

Comparing Geometric Parameters of the Cavitation Reactor In Removing Persistent Compounds from Surface Water

Dr. Amal Ateah*

(Received 23 / 6 / 2024. Accepted 29 / 7 / 2024)

□ ABSTRACT □

The problem of contamination of drinking water sources with persistent compounds has become a global issue that must be confronted, due to their toxic, carcinogenic effects. This research aims to remove polycyclic aromatic hydrocarbons from the Sureat Lake water using hydrodynamic cavitation technology. Two different types of the orifice plates were used as a cavitation reactor (plate No. 1, perforated with one hole and a diameter of 2 mm, and plate No. 2, perforated with 10 holes and a diameter of one hole of 1.5 mm). (The effect of the following parameters: applied inlet pressure, number of recirculation times, cavitation number and yield, and diameter and number of holes during operation time on the removal efficiency of PAHs was studied.

The research results showed that the orifice plate 2 had better efficiency compared to plate 1, as plate 2 achieved 100% complete removal of aromatic compounds at a pressure of 5 bar and an operating time of 25 min, while plate 1 achieved 100% complete removal at a pressure of 7 bar and a time of 30 min. It was found that plate No. 2 is the best economically and environmentally friendly for removing aromatic compounds from the Sureat Lake water, which contributes to securing water suitable for human use.

Keywords : polycyclic aromatic hydrocarbons, hydrodynamic cavitation, orifice plate No1 and orifice plate No 2, degradation rate constant, cavitation number, cavitation yield.

Copyright



:Tishreen University journal-Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

* Work Supervisor, Environmental Systems Engineering, Higher Institute for Environmental Research, Tishreen University, LAtakia, Syria. Amal83ym@gmail.com

مقارنة البارامترات الهندسية لمفاعل التجويف في إزالة المركبات الثابتة من المياه السطحية

د. امال عطيه*

(تاريخ الإيداع 23 / 6 / 2024. قُبل للنشر في 29 / 7 / 2024)

□ ملخص □

أصبحت مشكلة تلوث مصادر مياه الشرب بالمركبات الثابتة قضية عالمية يجب مواجهتها، نظراً لتأثيراتها السمية المسرطنة. يهدف هذا البحث إلى إزالة المركبات الهيدروكربونية العطرية متعددة الحلقات من مياه بحيرة سورييت باستخدام تقنية التجويف الهيدروديناميكي. تم استخدام نوعين مختلفين من الصفائح كمفاعل للتجويف (الصفحة رقم 1 المثقبة بنقبة واحد وقطره 2 mm، والصفحة رقم 2 المثقبة بـ 10 ثقب وقطر الثقب الواحد فيها 1.5 mm). تمت دراسة تأثير البارامترات الآتية: ضغط المدخل المطبق، وعدد مرات إعادة التدوير، ورقم التجويف وعائده، وقطر الثقب وعددها خلال زمن التشغيل على كفاءة إزالة المركبات الهيدروكربونية العطرية متعددة الحلقات.

أظهرت نتائج البحث أن الصفحة 2 كانت كفاءتها أفضل مقارنة مع الصفحة 1، حيث حققت الصفحة 2 إزالة كاملة 100% للمركبات العطرية عند الضغط 5 bar وزمن التشغيل min 25، بينما حققت الصفحة 1 إزالة كاملة 100% عند الضغط 7 bar والزمن min 30. ومنه وجد أن الصفحة رقم 2 الأفضل اقتصادياً وبيئياً لإزالة المركبات العطرية من مياه بحيرة سورييت، مما يساهم في تأمين المياه الصالحة للاستخدام البشري.

الكلمات المفتاحية: الهيدروكربونات العطرية متعددة الحلقات، التجويف الهيدروديناميكي، الصفحة 1 والصفحة 2، ثابت معدل التحلل، رقم التجويف، عائد التجويف.

CC

مجلة جامعة تشرين - سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص



حقوق النشر

BY-NC-SA 04

* مشرف على الأعمال - قسم هندسة النظم البيئية - المعهد العالي لبحوث البيئة - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

Amal83ym@gmail.com

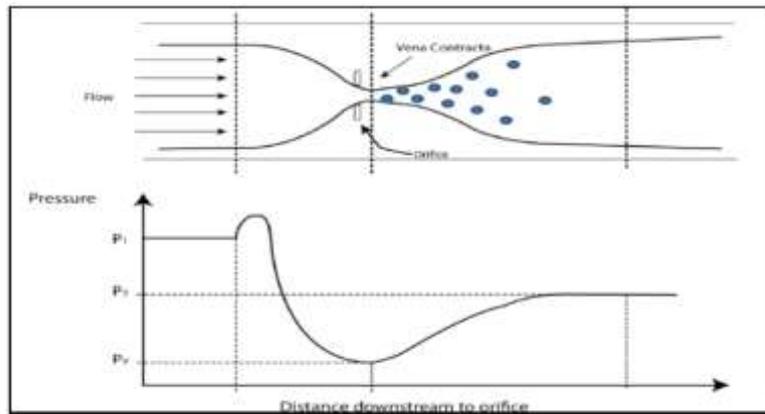
مقدمة:

تُعدُّ الملوثات العضوية الثابتة (POPs) Persistent Organic Pollutants من أخطر أشكال الملوثات الموجودة في مصادر المياه، لذلك فقد أثارت قلقاً كبيراً لدى الكثير من الحكومات في دول العالم، واتجهت أبحاثهم إلى دراسة مركباتها وتحديد مصادرها، وتقدير مخاطرها على الإنسان والبيئة (Mishra et al., 2022؛ et al., 2020 Duttagupta). تضم (POPs) مجموعة من المركبات: المواد الكيميائية الصناعية، والهرومونات، والأصبغ، والمبيدات الزراعية، والمركبات الهيدروكربونية العطرية متعددة الحلقات، والديوكسينات، والفينولات، والفيورانات (et al., 2022 Krithiga). أكدت الدراسات التي أجريت على مركبات (POPs) في المياه على ثباتها لسنوات أو شهور عديدة دون أن تتحلل، كما أشارت الدراسات إلى عدم قدرة محطات معالجة المياه التقليدية على إزالتها (Akhtar et al., 2021). تُعدُّ المركبات الهيدروكربونية العطرية متعددة الحلقات (PAHs) Polycyclic Aromatic Hydrocarbons من مجموعة (POPs)، حيث تتألف مركبات (PAHs) من ذرات الكربون والهيدروجين مرتبة على شكل حلقتين بنزينيتين ملتصقتين أو أكثر بترتيب خطي أو عنقودي أو زاوي مشكلة حلقات عطرية متماسكة، وتسمى مركبات (PAHs) التي تحتوي على ما يصل إلى أربع حلقات عطرية بالمركبات الخفيفة، وتلك التي تحتوي على أكثر من أربع حلقات بالمركبات الثقيلة، وتكون المركبات الثقيلة أكثر استقراراً وسمية من الخفيفة (et al., 2023 Vijayanand). توجد مركبات (PAHs) في الأوساط البيئية المختلفة كالهواء والماء والتربة والرسوبيات، وتنتج عن بعض الصناعات المختلفة، كصناعة الأصبغة والألياف الزجاجية، والبلاستيك والمبيدات الحشرية، والمواد الصيدلانية. كما تنشأ من مصادر طبيعية كالتسربات البترولية الطبيعية، وحرائق النباتات والغابات، والنشاطات البركانية (Zhu et al., 2023). بينت دراسة (Yu et al., 2021) التي أجريت على مياه الأنهار في الصين على وجود مركبات (PAHs) بتراكيز تراوحت ما بين 215.50 (L/ng) وحتى 1969.91 (L/ng). كما كانت تراكيز (PAHs) 1006 µg/L في بحيرة Lagos في نيجيريا (et al., 2019 Sogbanmu). وتراوحت ما بين 175 - 325 L/ng في نهر Yinma في الصين (Sun et al., 2017)، وتراوحت ما بين 37.93-69.81 (L/ng) في مياه الشرب في مدن الصين (Zhang et al., 2019). من المعروف أن مركبات PAHs تقاوم أساليب المعالجة التقليدية للمياه مثل: التخثير، والترسيب، والترشيح، والتحلل الضوئي والبيولوجي، والأكسدة الكيميائية باستخدام مواد كيميائية مثل الكلور. كما أن استخدام تقنيات مثل: الطرائق الحيوية، والامتزاز، والمفاعلات الحيوية الغشائية لم تحقق النتائج المرجوة لأنها أضافت نفايات ثانوية خطيرة يجب التخلص منها بشكل آمن (Saravanan, 2021، et al.). لذلك تم استخدام عمليات الأكسدة المتقدمة (Nguyen et al., 2020؛ Qiao & Xiong, 2021).

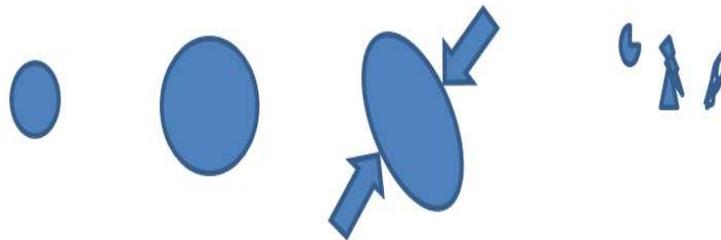
•التجويف الهيدروديناميكي (HC Hydrodynamic Cavitation)

تعد تقنية التجويف الهيدروديناميكي إحدى عمليات الأكسدة المتقدمة بتصاميم هندسية بسيطة ومرنة. حيث تحدث ظاهرة التجويف داخل الأنابيب في منطقة منضيقة المقطع مثل: صمام الاختناق، وأنبوب فنتوري، والصفحة المثقبة. ففي مقطع التضيق تتشكل فقاعات كثيرة بسبب حدوث فرق مفاجئ في الضغط حسب مبدأ قانون برنولي، حيث ينخفض ضغط المياه وتزداد سرعتها في هذا المقطع، ثم يعود الضغط ليرتفع من جديد بعد التوسع المقطعي للأنبوب كما هو مبين في الشكل (1). وتتسبب هذه التغيرات المفاجئة في الضغط والسرعة إلى انهيار فقاعات التجويف المتشكلة كما هو مبين في الشكل (2)، وتتكون ظروف قاسية موضعية داخل الفقاعات المتشكلة ذات درجات حرارة عالية من 1000 - 10000 كلفن، وضغوط

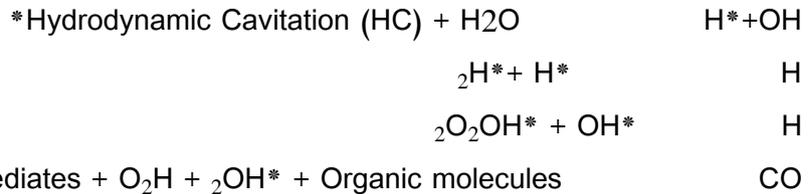
عالية تتراوح ما بين 100 و 5000 بار، وتتولد بعض الجذور الحرة شديدة التفاعل كجذور H^* و OH^* ، وتعتبر هذه الجذور الحرة شديدة التفاعل مع الملوثات كما هو مبين في المعادلة (1) (et al., 2016 Musmarra).



الشكل (1): انخفاض الضغط وتشكيل فقاعات التجويف في منطقة التضيق



الشكل (2): نمو وتكوين وانهيار الفقاعات المتشكلة



يمكن أن يُعزى تفكك الروابط الهيدروكربونية (رابطة الكربون- الكربون) إلى التأثيرات الميكانيكية (إجهاد القص)، والكيميائية (الجذور الحرة)، والحرارية (النقاط الساخنة) الناتجة عن انهيار الفقاعة. وتؤدي هذه التأثيرات المشتركة المتشكلة في الفقاعة إلى تحلل المركبات العضوية ذات الكتل الجزيئية الكبيرة إلى مركبات منخفضة الكتلة الجزيئية. (et al Kakama, 2024) تتميز تقنية التجويف الهيدروديناميكي بفعاليتها العالية، وصدقتها للبيئة، ومزاياها المختلفة مثل التكلفة التشغيلية المنخفضة، وعدم إضافة المواد الكيميائية، والاستخدام المنخفض للطاقة، ومعالجة الحجم الكبير من الملوثات .

أهمية البحث وأهدافه:

مشكلة البحث:

تتجسد مشكلة البحث الأساسية في وجود مركبات PAHs المسرطنة في مياه بحيرة سوريا والتي من الممكن استثمارها للشرب، وعدم قدرة محطات تنقية مياه الشرب على إزالتها، وبالتالي بقائها في المياه مسببةً أمراضاً متعددة.

أهمية البحث:

تتجلى أهمية البحث من خلال دراسة إمكانية إزالة مركبات PAHs من مياه بحيرة سوريث باستخدام تقنية التجويف الهيدروديناميكي، مما يساهم في وصول المياه الآمنة للإنسان.

أهداف البحث:

يهدف البحث إلى إزالة المركبات الهيدروكربونية العطرية متعددة الحلقات PAHs من مياه بحيرة سوريث بتطبيق تقنية التجويف الهيدروديناميكي باستخدام صفيحتين متفتحتين، ومقارنة بارامترات التجويف لاقتراح الصفيحة الأمثل اقتصادياً وبيئياً.

1 - وصف منطقة الدراسة:

تقع بحيرة سوريث قرب بحيرة السن في منطقة حريصون في بانياس، وتبعد عنها 100 m باتجاه الجنوب، ويتشاركان في الحوض المغذي (مديرية الموارد المائية في اللاذقية، 2023).

يبين الشكل (3) صورة فضائية لموقع بحيرة سوريث. تقع البحيرة في منطقة زراعية وفيها الكثير من البيوت البلاستيكية، وبساتين الليمون، والزيتون، والتبغ وغيرها، ويستخدم فيها كميات كبيرة من المبيدات الزراعية، ومواد التعقيم والأسمدة. كما ينتشر فيها مصبات الصرف الصحي والصناعي والزراعي، ومكببات القمامة، ويمر فيها الأوتوستراد الدولي (دمشق - اللاذقية) وسكك القطار، مما ساهم في وصول الملوثات المختلفة ومنها مركبات PAHs إلى البحيرة.



الشكل (3): صورة فضائية لموقع بحيرة سوريث

طرائق البحث ومواده:**1 - جمع العينات وتحليلها**

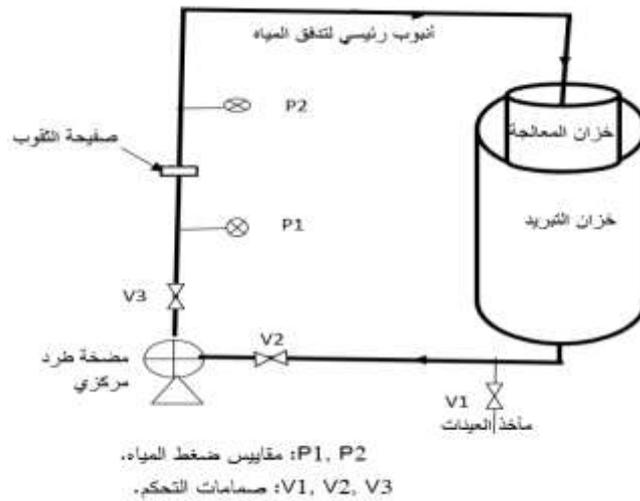
تم قطف عينات مائية من موقع في منتصف بحيرة سوريث، وعلى عمق 25 cm عن سطح المياه في شهر كانون الثاني في فصل الشتاء في عام 2023م من الموقع المبين في الشكل (4)، وتم تحديد درجة حرارة المياه الوسطية والتركيز الإجمالي الوسطي للمركبات العطرية متعددة الحلقات (Σ PAHs). تمت عملية استخلاص وتنقية وتحليل العينات لتحديد تراكيز (Σ PAHs) باستخدام جهاز الكروماتوغرافيا الغازية الموصول بمكشاف مطيافية الكتلة / gas chromatography/ mass spectrometry (GC/MS) في مخابر المعهد العالي للبحوث البحرية في جامعة تشرين.



الشكل (4): موقع أخذ العينات في بحيرة سوريث

2 - تصميم جهاز التجويف الهيدروديناميكي

تم العمل على إعادة تدوير المياه المأخوذة من بحيرة سوريث ضمن منظومة التجويف المبينة في الشكل (5). حيث تتكون منظومة التجويف المستخدمة لإنجاز هذا البحث من مضخة لسحب المياه 1 حصان بخاري واستطاعتها 2800 دورة في الدقيقة، وخزان معالجة حجمه (32 L)، وأنبوب تدفق المياه قطره 1. inch حيث تقوم المضخة بسحب المياه من الخزان عبر الأنبوب لتمر خلال مفاعل التجويف الهيدروديناميكي (وهو عبارة عن صفيحة مثقبة) ثم تفرغ مرة ثانية في الخزان وهكذا حتى نهاية التجارب. وينتهي الأنبوب على مستوى تحت منسوب سطح المياه في الخزان، وذلك لتجنب أي تحريض للهواء في النظام. بالإضافة إلى مكونات المنظومة الأخرى كمقاييس الضغط وقطع الوصل والتمديدات، وصمامات التحكم في التدفق، ومنها صمام استخدم خصيصاً لتركيب الصفيحة المثقبة في داخله، ويمكن فكه وتركيبه لاستبدال الصفيحة بصفيحة أخرى. أيضاً، تم تزويد خزان المعالجة بخزان تبريد خارجي للحفاظ على درجة حرارة المياه ثابتة. تم إجراء التجارب وتدوير المياه خلال الصفيحة رقم 1 المثقبة بثقب دائري واحد قطره 2 mm، ثم تم استبدالها بالصفيحة رقم 2 المثقبة بـ 10 ثقب دائرية الشكل قطر الثقب 1.5 mm كما هي مبينة في الشكل (6)، ومعظم الصفائح مصنوعة من الفولاذ المقاوم للصدأ، ويبلغ قطرها (25.5 mm) وسماكتها (2 mm)، كما أن غالبية عناصر المنظومة مصنوعة من الحديد المقاوم للصدأ وللتآكل. تم تصميم هذه المنظومة وتركيبها ووضعها في مركز تكنولوجيات معالجة المياه في جامعة تشرين، والتابع لقسم هندسة النظم البيئية في المعهد العالي لبحوث البيئة.



الشكل (5): منظومة التجويف الهيدروديناميكي



الشكل (6): التصميم الهندسي للصفحة 1 والصفحة 2

3 - مراحل العمل التجريبي

تم ملئ الخزان الداخلي بـ (30 L) من مياه بحيرة سوريت، وإغلاقه بغطاء محكم. وتم تحديد القيم الوسطية لدرجات الحرارة وكانت $11.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ، والقيمة الوسطية للتركيز الإجمالي لـ ($\sum\text{PAHs}$) كانت 540.3 ng/L . تم إجراء عدة تجارب، وإعادة تدوير المياه خلال منظومة التجويف الهيدروديناميكي باستخدام الصفحة رقم 1، ثم استبدلت بالصفحة رقم 2. وتم تقييم كفاءة جهاز التجويف في إزالة مركبات ($\sum\text{PAHs}$) بعد أزمنة تشغيل 5 و 10 و 15 و 20 و 25 و 30 دقيقة لكل صفحة، وتمت دراسة تأثير العوامل الآتية:

• تأثير الضغط المطبق

تم التحقق من تأثير تغيير الضغط المطبق على نسبة إزالة ($\sum\text{PAHs}$) عند القيم التالية: 1 و 3 و 5 و 7 و 9 bar على الصفحة 1 عند أزمنة تشغيل متتالية 5، 10، 15، 20، 25 و 30 دقيقة، ثم تم إعادة التجارب على الصفحة 2.

2. تأثير رقم التجويف C_v

تمت دراسة رقم التجويف عند الضغوط 1 و 3 و 5 و 7 و 9 bar على الصفحة 1 ثم على الصفحة 2، ويعطى بالعلاقة الآتية (2016، Cieplak):

$$C_v = \frac{P_1 - P_2}{\frac{1}{2} \times \rho \times V_0^2}$$

حيث: P_1 - الضغط بعد التوسع المقطعي للأنبوب. [Pa]

P_2 - ضغط بخار الماء المشبع. [Pa]

ρ - كثافة الماء، [kg/m³]

V : سرعة المياه عبر الثقب. [m/sec]

3. تأثير عدد مرات إعادة التدوير L_c

تم تحديد عدد مرات دوران المياه (درجة الدوران) L_c خلال عملية التجويف بالعلاقة الآتية (Cieplak، 2016):

$$L_c = t \times \frac{Q}{V}$$

حيث: t - مدة التجويف. [sec]

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

V - حجم المياه في الخزان [m³].

4. تقييم كفاءة عملية التجويف الهيدروديناميكي

تم حساب التغيرات في تركيز (Σ PAHs) بالنسبة إلى تركيزها الأولي كما في المعادلة التالية (Tao et al., 2016):

$$R = \frac{C_o - C_t}{C_o} * 100$$

حيث: R - نسبة الإزالة %.

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

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

5. تحديد ثابت معدل التحلل k

يمثل مستقيم معادلته خطية من الدرجة الأولى كما في المعادلة التالية (Manickam & Panda، 2018):

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

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

حيث: k - ثابت معدل التحلل (min^{-1}).

C_o - التركيز الأولي لـ (Σ PAHs) [ng/L].

C_t - تركيز (Σ PAHs) بعد زمن المعالجة t [L/ng].

t - زمن المعالجة (min).

6. تحديد عائد التجويف

يعبر عن كفاءة استخدام الطاقة الكهربائية المستهلكة لإزالة مركبات (Σ PAHs) من المياه المدروسة، وهو نسبة مقدار تفكك

(Σ PAHs) إلى كمية الطاقة الكهربائية الموردة إلى النظام، ويعطى بالمعادلة التالية (Cieplak، 2016؛ Gagola et

(8al., 201

حيث: H - ضاغط المضخة [m].

ρ - كثافة السائل. [kg/m³].

g - تسارع الجاذبية. [m/s²].

Q - معدل التدفق الحجمي. [m³/s].

t - زمن المعالجة [s].

7. دراسة تأثير العاملين الهندسيين α و β للصفحتين 1 و 2
تم تحديد قيمة α و β بالمعادلتين التاليتين: (Tao et al., 2016)

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

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

حيث: d_h : قطر الثقب الواحد (mm).

d_p : قطر الصفحة (mm).

n: عدد الثقوب.

النتائج والمناقشة:

1 - نتائج تشغيل جهاز التجويف الهيدروديناميكي باستخدام الصفحة رقم 1

1. تحديد الخصائص الهيدروليكية للصفحة 1

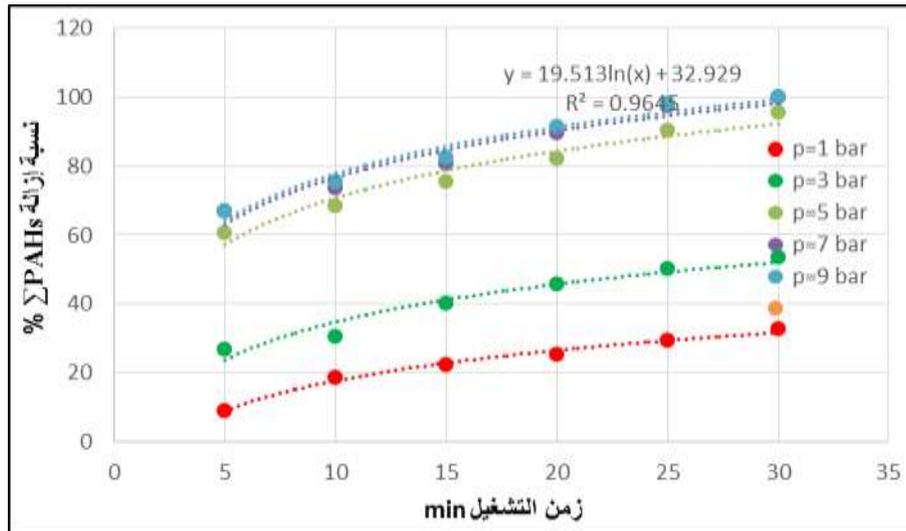
وجد بنتيجة التجارب زيادة تدفق المياه وسرعتها مع زيادة الضغط المطبق من 1 حتى 9 bar كما هو مبين في الجدول (1).

الجدول (1): قيم تدفق المياه وسرعتها خلال الثقب مع تغيرات الضغط المطبق على الصفحة رقم 1

السرعة m/s	التدفق m ³ /s	مساحة الثقوب m ²	الضغط المطبق bar
13.269	4.17E-05	3.14E-06	1
19.904	0.000063		3
28.5	0.000089		5
35.6	0.00012		7
44.585	0.00014		9

2. تأثير زيادة الضغط على نسبة إزالة (Σ PAHs)

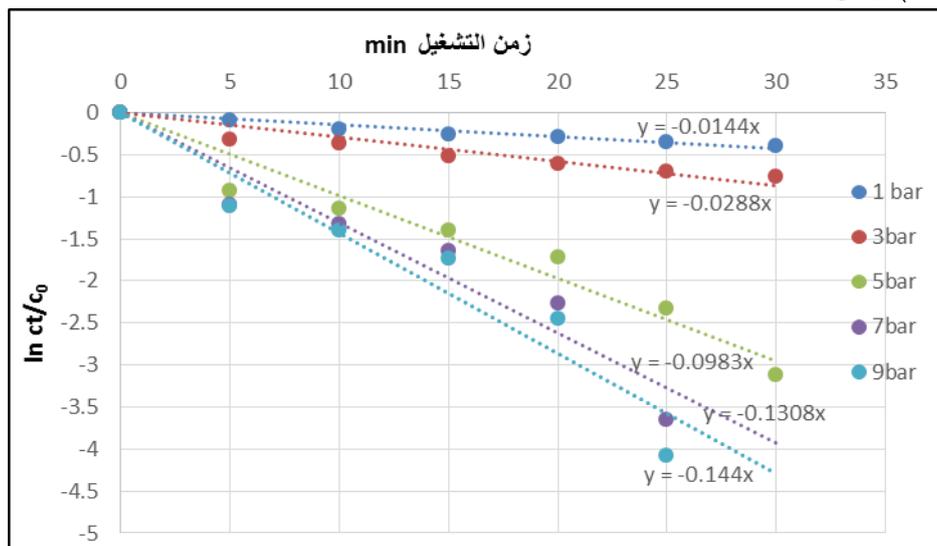
وجد أن نسبة إزالة (Σ PAHs) تزداد مع زيادة الضغط وزمن التشغيل كما هو مبين في الشكل (7)، فقد بلغت نسبة الإزالة 8.98% بعد زمن التشغيل 5 min، وازدادت حتى 29.4% بعد زمن 30 min عند الضغط 1 bar كما لوحظ استمرار زيادة هذه النسبة مع زيادة الضغط وزيادة الزمن حتى بلغت 100% عند الزمن 30 min عند الضغط 7 و 9 bar. لذلك يمكن اعتبار الضغط 7 bar والزمن 30 min مثاليان لتحقيق الكفاءة المطلوبة.



الشكل (7): قيم نسبة إزالة (PAHs) Σ مع زيادة الضغط والزمن للصفحة رقم 1

3. تأثير ثابت معدل التحلل k للصفحة رقم 1

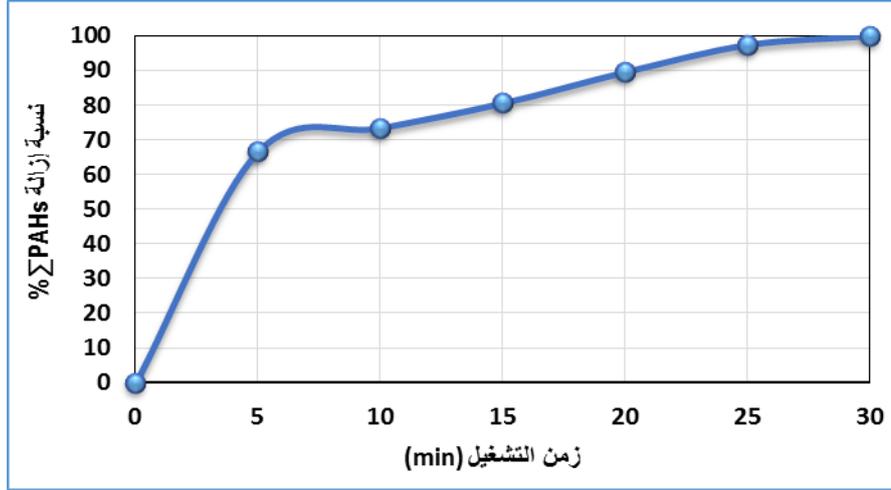
يبين الشكل (8) ازدياد ثابت معدل التحلل مع زيادة الضغط وزمن التشغيل، حيث ازدادت قيمته من 0.0144 min^{-1} عند الضغط (1 bar) وحتى 0.144 min^{-1} عند الضغط 9 bar.



الشكل (8): تغيرات ثابت معدل تحلل (PAHs) Σ مع تغيرات الضغط والزمن للصفحة رقم 1

4. تغيرات نسبة الإزالة مع الزمن عند الضغط 7 bar باستخدام الصفحة 1

وجد عند تطبيق الضغط المثالي 7 bar على الصفحة 1 زيادة نسبة إزالة (PAHs) Σ مع زيادة الزمن لتبلغ 100 % عند الزمن 30 min كما هو مبين في الشكل (9).



الشكل (9): نسبة إزالة (ΣPAHs) مع الزمن باستخدام الصفيحة 1

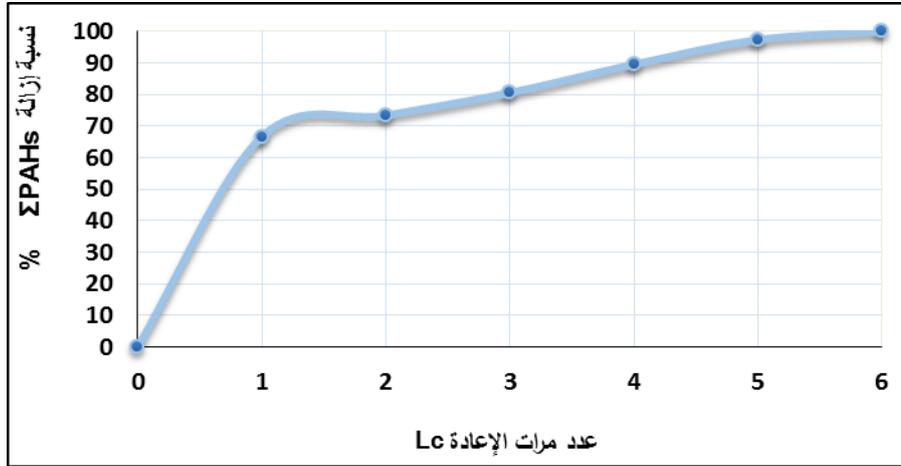
5. تغيرات نسبة الإزالة مع عدد مرات الدوران عند الضغط 7 bar للصفيحة 1

$$L_c = \frac{0.00012}{0.03} * \tau$$

تم تحديد عدد مرات دوران المياه خلال الصفيحة 1 بالعلاقة الآتية:

يبين الشكل (10) زيادة نسبة الإزالة مع زيادة عدد مرات دوران، فعندما كانت درجة الدوران (1 = Lc) بلغت نسبة الإزالة 66.7%، واستمرت النسبة بالازدياد لتبلغ 100% عند (6 = Lc)، وتتوافق هذه النتائج مع نتائج باحثين مثل (Cieplak،

(2017)



الشكل (10): نسبة إزالة (ΣPAHs) مع عدد مرات الإعادة للصفيحة 1

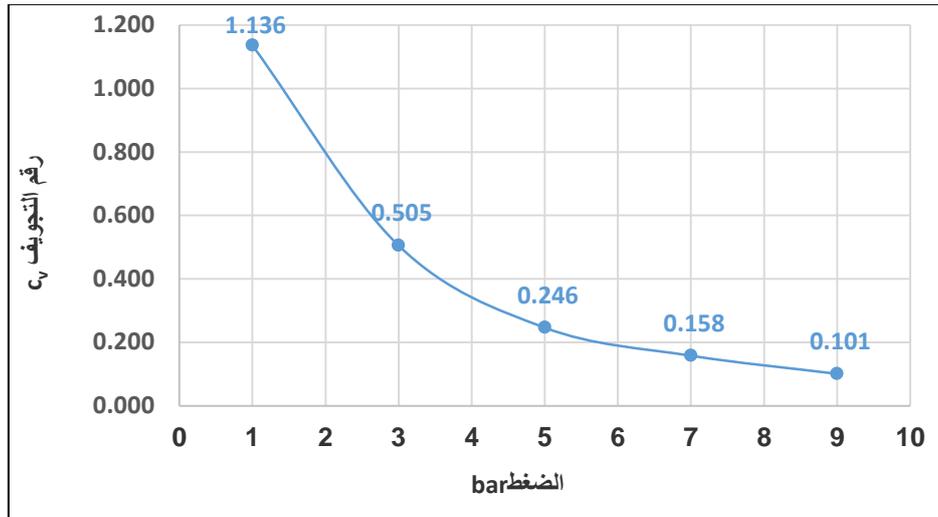
6. رقم التجويف (Cv) للصفيحة رقم 1

$$C_v = \frac{101325 - 1300}{\frac{1}{2} (1000 * V_0^2)}$$

تم تحديد قيم رقم التجويف Cv مع تغيرات الضغط بالعلاقة الآتية:

حيث لوحظ تناقص رقم التجويف مع زيادة الضغط، فقد بلغ رقم التجويف 1.136 عند الضغط 1 bar وتناقص مع زيادة الضغط حتى القيمة 0.101 عند الضغط 9 bar كما هو مبين في الشكل (11). وهذا توافق مع نتائج (SIVAKUMAR)

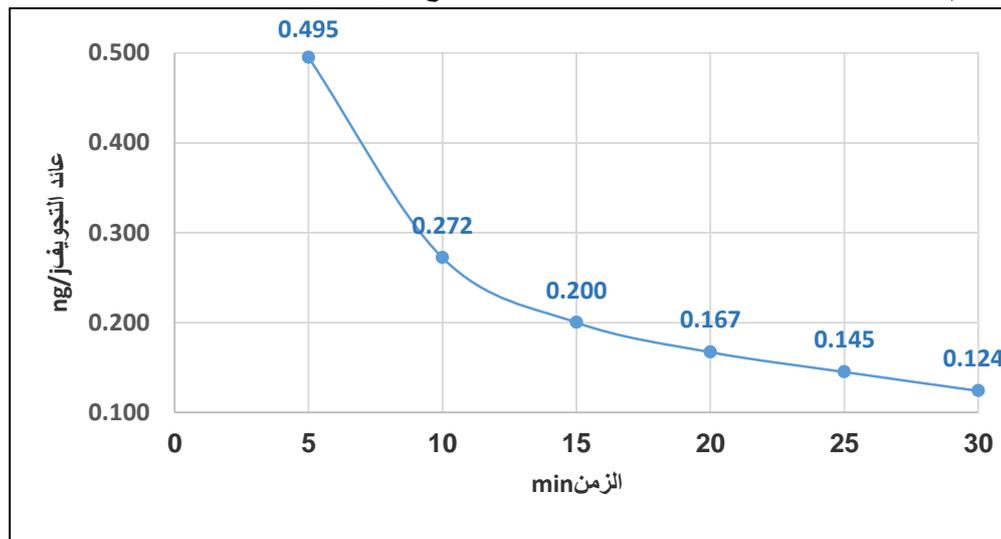
(PANDIT, 2002 &



الشكل (11): تغيرات قيم رقم التجويف C_v مع تغيرات الضغط المطبق على الصفحة رقم 1

7. تأثير عائد التجويف ye للصفحة رقم 1

تم تحديد قيم عائد التجويف للصفحة 1 عند الضغط 7 bar مع تغيرات الزمن بالمعادلة الآتية:



الشكل (12): تغيرات قيم العائد التجويفي مع الزمن عند الضغط 7 bar للصفحة رقم 1

وجد تناقص قيمة عائد التجويف مع زيادة الزمن نتيجة ازدياد استهلاك الطاقة الكهربائية اللازمة لإزالة ($\sum PAHs$) وزيادة كمية المركبات المتفككة بزيادة الزمن، فقد كانت 0.495 ng/j عند الزمن 5 min وتناقصت قيمته مع زيادة الزمن حتى 0.124 ng/j عند الزمن 30 min، وهذا يتوافق مع نتائج (LENIK, 2011 & OZONEK).

2 - نتائج تشغيل جهاز التجويف الهيدروديناميكي باستخدام الصفحة رقم 2

1. تحديد الخصائص الهيدروليكية للصفحة رقم 2

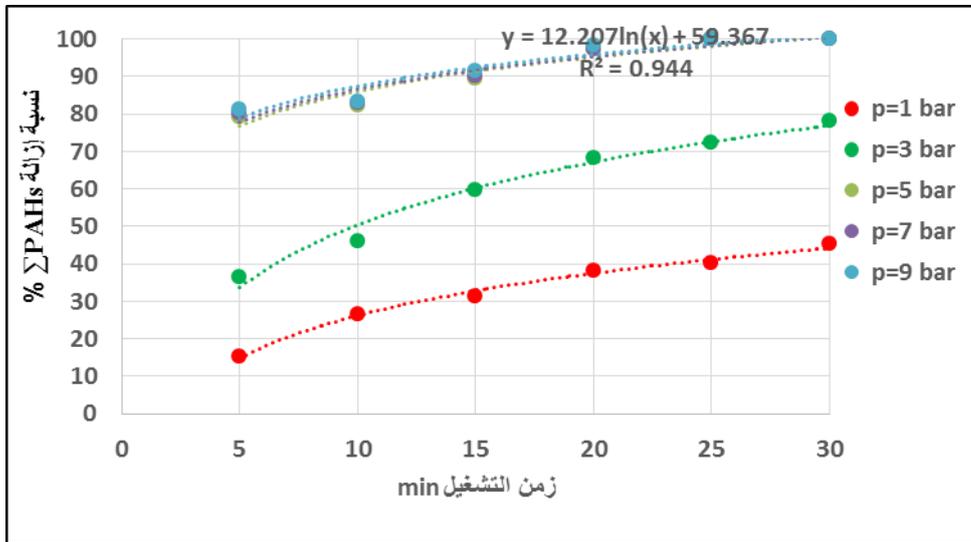
يبين الجدول (3) زيادة قيم تدفق المياه وسرعتها خلال مرورها عبر الثقوب للصفحة رقم 2 بزيادة الضغط المطبق من 1 حتى 9 bar.

الجدول (3): قيم تدفق وسرعة المياه خلال الثقوب مع زيادة الضغط المطبق على الصفيحة رقم 2

السرعة m/s	التدفق m ³ /s	مساحة الثقوب m ²	الضغط المطبق bar
14.12	0.00025	0.0000177	1
18.08	0.00032		3
22.03	0.00039		5
23.16	0.00041		7
26.55	0.00047		9

2. تأثير تغيير الضغط على نسبة الإزالة للصفيحة رقم 2

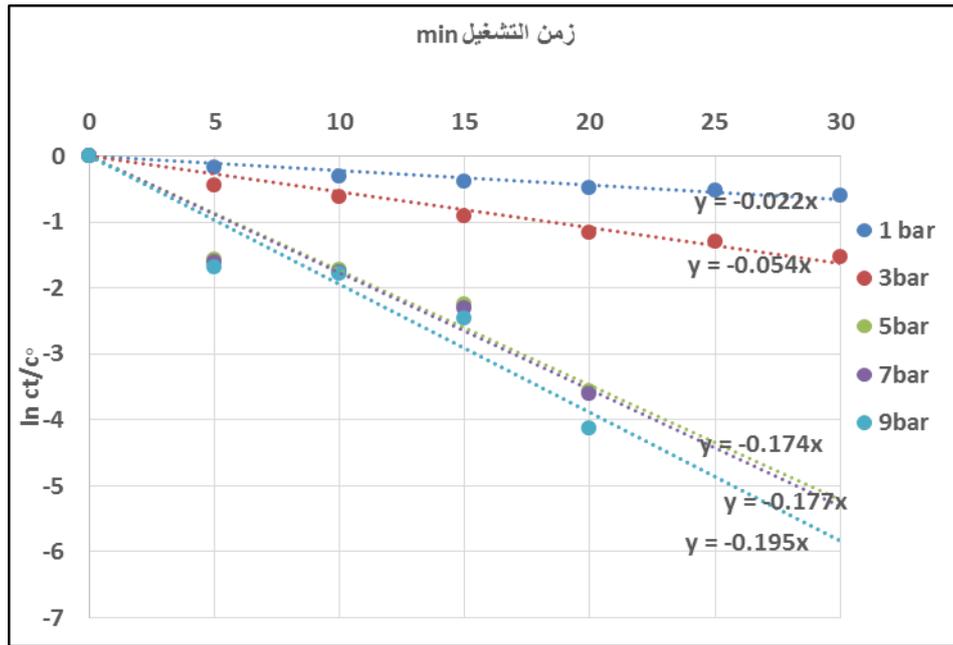
لوحظ زيادة نسبة الإزالة مع زيادة الضغط وزيادة الزمن حتى بلغت 100% عند الزمن 25 min عند الضغوط 5 و 7 و 9 bar كما هو مبين في الشكل (13). لذلك تم اختيار الضغط 5 bar والزمن 25 min لتحقيق الكفاءة المطلوبة.



الشكل (13): تغيرات نسبة إزالة ΣPAHs مع تغيرات الزمن والضغط للصفيحة رقم 2

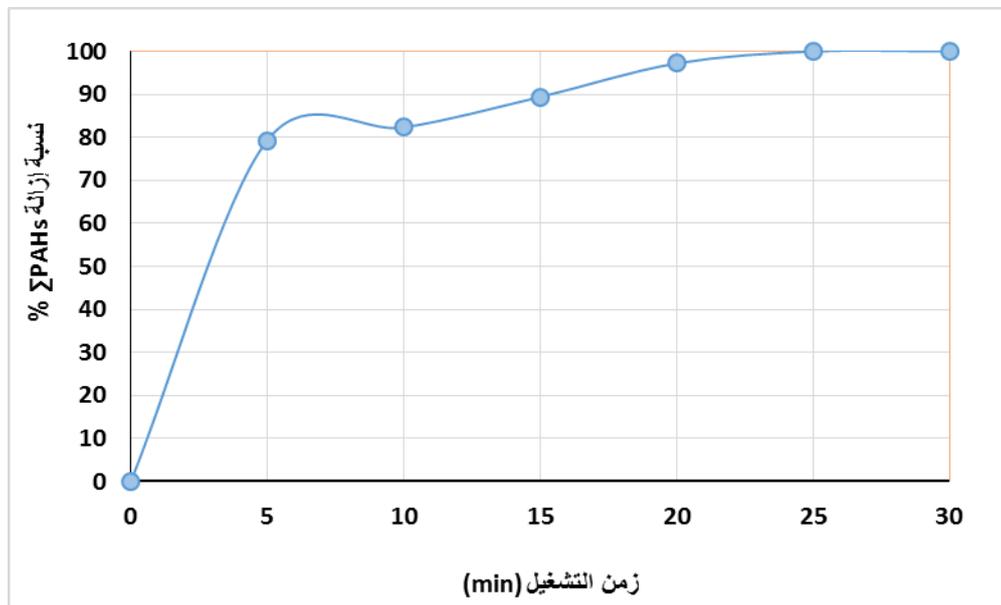
3. ثابت معدل التحلل k للصفيحة رقم 2

يبين الشكل (14) ازدياد ثابت معدل التحلل مع زيادة الضغط المطبق وزيادة زمن التشغيل، فقد ازدادت قيمته من 0.022 min^{-1} عند الضغط (1 bar) وحتى 0.195 min^{-1} عند الضغط 9 bar.



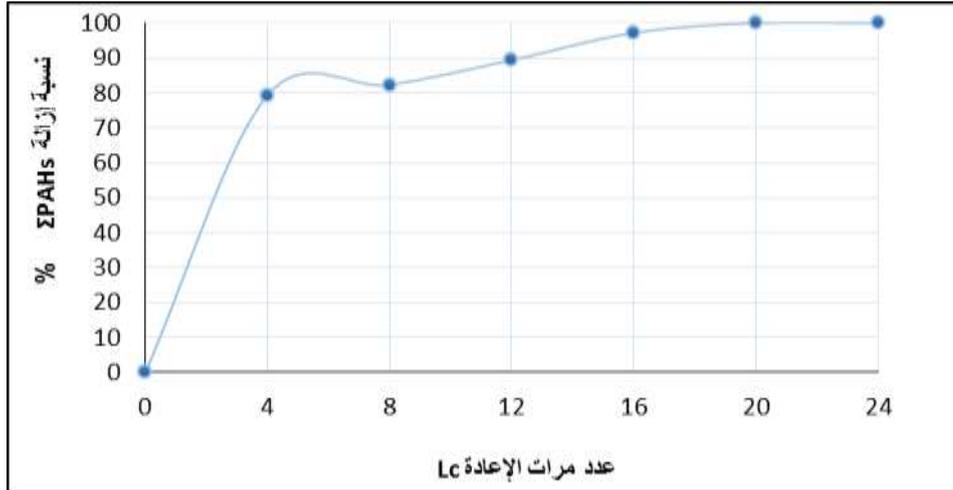
الشكل (14): ثابت معدل تحلل (Σ PAHs) من الدرجة الأولى للصفحة رقم 2

4. تغيرات نسبة الإزالة مع الزمن عند الضغط 5 bar للصفحة رقم 2
تم تطبيق الضغط المثالي 5 bar على الصفحة 2، وبين الشكل (15) زيادة نسبة إزالة (Σ PAHs) مع زيادة زمن التشغيل عند الضغط 5 bar حتى بلغت 100 % عند 25 min.



الشكل (15): نسبة إزالة (Σ PAHs) مع الزمن للصفحة رقم 2

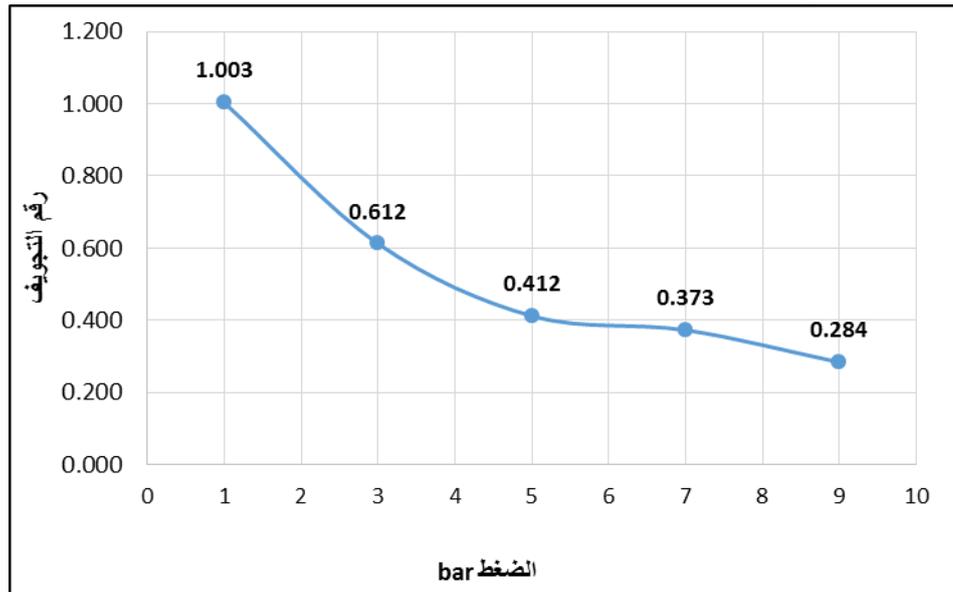
5. تغيرات نسبة الإزالة مع عدد مرات الدوران (Lc) عند الضغط 5 bar للصفحة رقم 2
لوحظ زيادة نسبة الإزالة مع زيادة عدد مرات الدوران لتبلغ 100 % عند درجة الدوران (Lc = 24) كما هو مبين الشكل (16).



الشكل (16): نسبة إزالة (ΣPAHs) مع عدد مرات الإعادة للصفحة رقم 2

6. تأثير رقم التجويف Cv للصفحة رقم 2

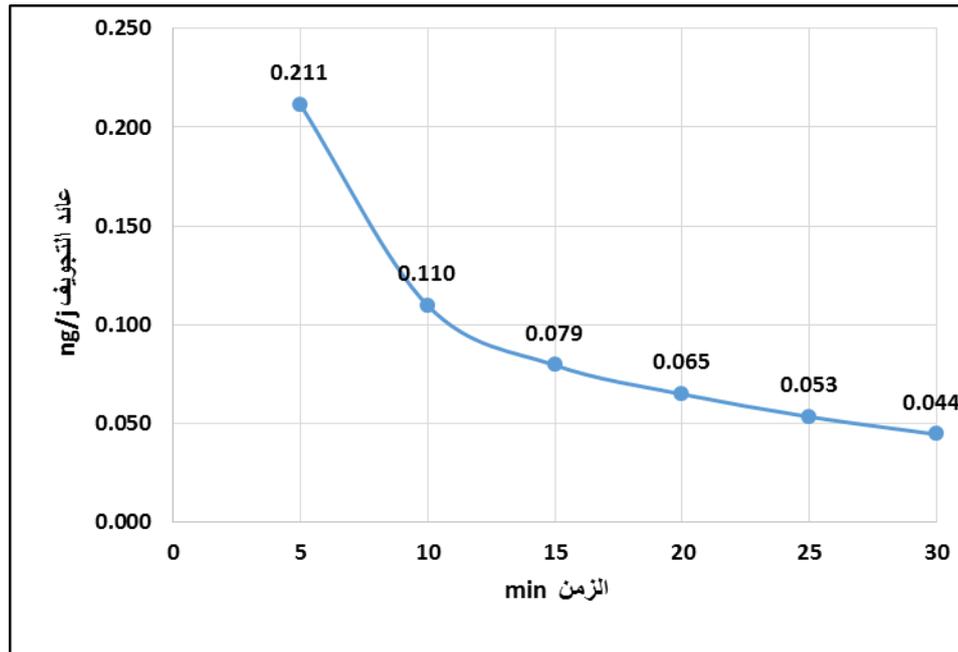
يبين الشكل (17) تناقص رقم التجويف مع زيادة الضغط، حيث بلغ رقم التجويف 1.003 عند الضغط 1 bar، وتناقصت قيمته مع زيادة الضغط لتبلغ 0.284 عند الضغط 9 bar.



الشكل (17): قيم رقم التجويف Cv مع تغيرات الضغط المطبق على الصفحة رقم 2

7. العائد التجويفي ye للصفحة رقم 2

يوضح الشكل (18) تناقص قيم عائد التجويف مع زيادة الزمن، حيث تناقص من القيمة 0.211 ng/j عند الزمن 5 min إلى 0.053 ng/j عند الزمن 25 min.

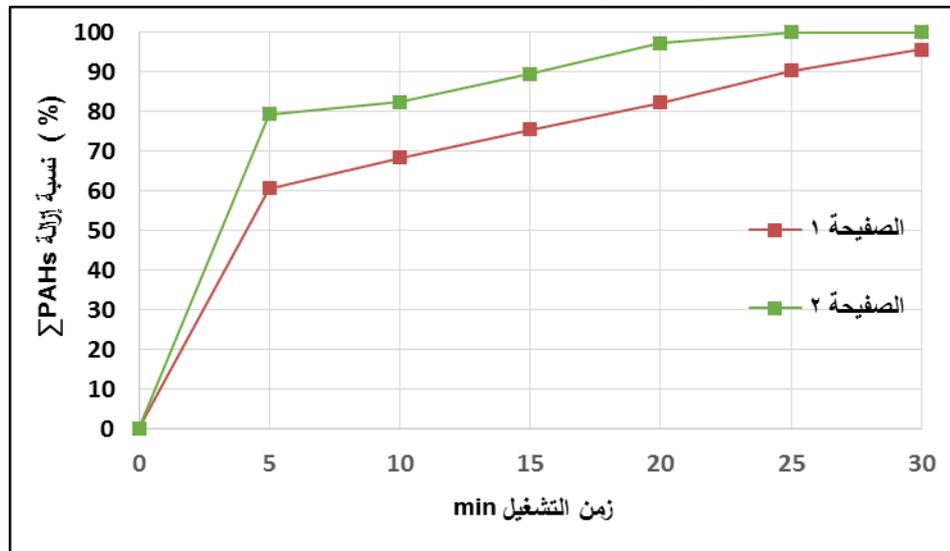


الشكل (18): تغيرات قيم عائد التجويف مع الزمن عند الضغط المطبق 5 bar على الصفيحة رقم 2

3- مقارنة النتائج للصفحتين (1 و 2) عند الضغط 5 bar

1. نسبة إزالة (PAHs) Σ

يوضح الشكل (19) زيادة نسبة إزالة (Σ PAHs) مع زيادة زمن التشغيل عند الضغط 5 bar للصفحة 1 والصفحة 2، فقد بلغت 95.6% عند الزمن 30 min للصفحة 1، و 100% عند الزمن 25 min للصفحة 2، أي أن الصفيحة 2 هي الأفضل لتحقيق إزالة كاملة لـ (Σ PAHs) من المياه المدروسة.

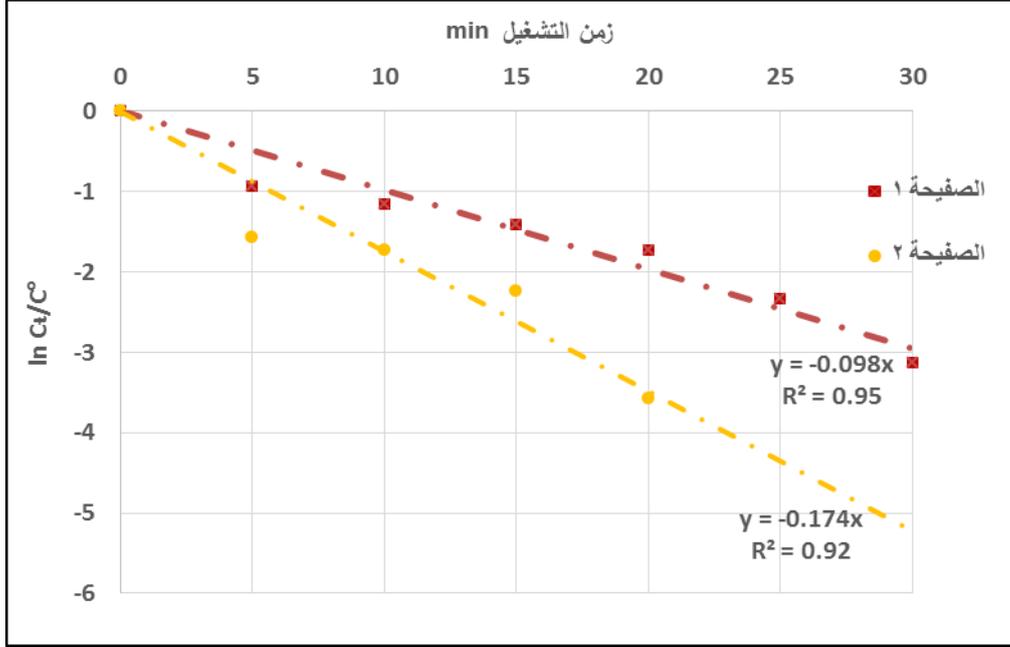


الشكل (19): نسبة إزالة (Σ PAHs) للصفحتين 1 و 2 عند الضغط 5 bar

2. ثابت معدل التحلل k لـ (Σ PAHs)

يظهر الشكل (20) أن ثابت معدل التحلل للصفحة 2 أكبر من ثابت معدل التحلل للصفحة رقم 1، حيث كانت قيمة

0.098 min^{-1} للصفحة (1) و 0.174 min^{-1} للصفحة (2). ويعزى ذلك إلى زيادة عدد الثقوب للصفحة 2 والذي يسبب بدوره زيادة مساحة التدفق وزيادة المحيط الكلي للثقوب، والذي أدى إلى زيادة شدة التجاوب المتشكلة وإجهادات القص وانهايار أكبر للفقاعات المتشكلة. (Tao et al., 2016) أي أنه يجب اختيار مساحة تدفق معينة بثقوب متعددة ذات قطر صغير. (2019, Randhavane).



الشكل (20): ثابت معدل التحلل لـ (PAHs Σ) للصفحة 1 والصفحة 2 عند الضغط 5 bar

3. دراسة تأثير المعاملين الهندسيين α و β

يبين الجدول (4) زيادة ثابت معدل التحلل للصفحتين 1 و 2 بزيادة قيمة α ، حيث كانت قيمة α (2 mm^{-1}) للصفحة (1) و (2.67 mm^{-1}) للصفحة (2). وكان ثابت معدل التحلل (0.098 min^{-1}) للصفحة (1) و (0.174 min^{-1}) للصفحة (2)، أي وبالتالي فإن زيادة قيمة α يرافقها زيادة قيمة ثابت معدل التحلل، أي أن زيادة عدد الثقوب يزيد من نسبة الإزالة (Pandit and Sivakumar, 2001؛ Tao et al., 2016).

كما يوضح الجدول (4) أن قيمة β للصفحة (1) (0.006) وثابت معدل التحلل (0.098 min^{-1})، حيث لوحظ زيادة ثابت معدل التحلل إلى (0.174 min^{-1}) بزيادة قيمة β إلى 0.035 للصفحة (2)، ويعزى ذلك إلى زيادة مساحة الثقوب والذي بدوره أدى إلى حدوث تجاوب بشدة أعلى وإجهادات قص كبيرة (Saharan et al., 2012).

4. تأثير رقم التجويف C_v

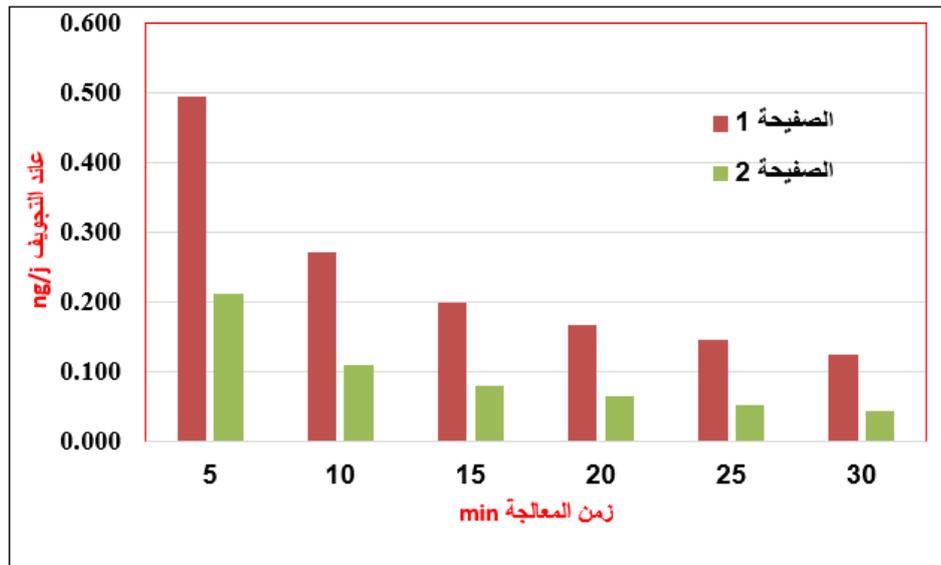
يوضح الجدول (4) زيادة ثابت معدل التحلل بزيادة قيمة C_v للصفحتين (1 و 2) عند الضغط 5 bar ويعزى ذلك إلى اختلاف مساحة التدفق والمحيط الكلي للثقوب في الصفحة 1 والصفحة 2، والذي ينجم عنه اختلاف في شدة التجاوب ومساحة طبقة القص عند منطقة الثقوب. (Dindar, 2016؛ Gagola et al., 2018).

الجدول (4): قيم البارامترات α و β و k و C_v للصفحة (1) والصفحة (2)

رقم الصفحة	عدد الثقوب	قطر الثقب (mm)	مساحة الثقوب الكلية ((mm ²	المحيط الكلي للثقوب (mm)	α (mm)	β	ثابت معدل التحلل k min	رقم التجويف C_v
1	1	2	3.14	6.25	2	0.006	0.098	0.246
2	10	1.5	17.7	47.1	2.67	0.035	0.174	0.412

5. العائد التجويفي ye

يوضح الشكل (21) تغيرات قيم العائد التجويفي مع الزمن للصفحة 1 والصفحة 2 عند الضغط 5 بار، فقد لوحظ تناقص في العائد التجويفي بزيادة زمن التجويف (Cieplak, 2017, Sivakumar, 2001 and Pandit).



الشكل (21): تغيرات قيم العائد التجويفي مع الزمن للصفحتين (1 و 2) عند الضغط 5 bar

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

لوحظ زيادة نسبة إزالة مركبات (PAHs) من مياه بحيرة سوريث باستخدام جهاز التجويف الهيدروديناميكي باستخدام الصفحة المثقبة 1 و 2 مع زيادة كل من البارامترات الآتية: زمن التشغيل، والضغط المطبق، وعدد مرات الإعادة، ورقم التجويف، و α و β للصفحتين 1 و 2، وتم التوصل إلى أن الصفحة 2 الأفضل اقتصادياً وبيئياً حيث بلغت نسبة إزالة مركبات (PAHs) (100%) عند الزمن (25 min) والضغط 5 بار.

التوصيات:

إجراء المزيد من الدراسات والأبحاث لإزالة مركبات (PAHs) ومركبات (POPs) الأخرى المسرطنة من المياه العذبة وخاصة المستخدمة لأغراض الشرب بتقنيات التجويف بتصاميم هندسية مختلفة، ومقارنتها مع أنبوب فينتوري.

References:

- Akhtar, A. B. T ،.Naseem ،S ،.Yasar ،A & ،.Naseem ،Z. (2021). Persistent organic pollutants (POPs): sources, types, impacts, and their remediation. *Environmental Pollution and Remediation*, 213-246.
- 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.
- Duttagupta, S., Mukherjee, A., Bhattacharya, A., & Bhattacharya, J. (2020). Wide exposure of persistent organic pollutants (POPs) in natural waters and sediments of the densely populated Western Bengal basin, India. *Science of the total environment*, 717, 137187.
- Dindar, E. (2016). An overview of the application of hydrodynamic cavitation for the intensification of wastewater treatment applications: a review. *Innovative Energy & Research*, 5(137), 1-7.
- Gałol, M., Przyjazny, A., & Boczkaj, G. (2018). Wastewater treatment by means of *Chemical Engineering* a review–advanced oxidation processes based on cavitation .627-599 ،338، *Journal*
- Kakama, N. K., Petrik, L. F., & Ojumu, T. V. (2024). The Optimization of Hydrodynamic Cavitation as an Advanced Oxidation Option for the Removal of Persistent Contaminants in Wastewater. *Water, Air, & Soil Pollution*, 235(3), 193.
- Krithiga, T., Sathish, S., Renita, A. A., Prabu, D., Lokesh, S., Geetha, R., ... & Sillanpaa, M. (2022). Persistent organic pollutants in water resources: Fate, occurrence, characterization and risk analysis. *Science of The Total Environment*, 831, 154808.
- Mishra, A., Kumari, M., Kumar, R., Iqbal, K., & Thakur, I. S. (2022). Persistent organic pollutants in the environment: Risk assessment, hazards, and mitigation strategies. *Bioresource Technology Reports*, 19, 101143.
- Musmarra, D., Prisciandaro, M., Capocelli, M., Karatza, D., Iovino, P. (2016). Canzano, S., Lancia, A. -Degradation of ibuprofen by hydrodynamic cavitation: Reaction pathways and effect of operational parameters. *Ultrasonics Sonochemistry* 29, 76–83.
- Nguyen, V. H., Smith, S. M., Wantala, K., & Kajitvichyanukul, P. (2020). Photocatalytic remediation of persistent organic pollutants (POPs): a review. *Arabian Journal of Chemistry*, 13(11), 8309-8337.
- 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.
- Panda, D., & Manickam, S. (2019). Hydrodynamic cavitation assisted degradation of persistent endocrine-disrupting organochlorine pesticide Dicofol: Optimization of operating parameters and investigations on the mechanism of intensification. *Ultrasonics sonochemistry*, 51, 526-532.
- Qiao, J., & Xiong, Y. (2021). Electrochemical oxidation technology: A review of its application in high-efficiency treatment of wastewater containing persistent organic pollutants. *Journal of Water Process Engineering*, 44, 102308.

- RANDHAVANE, S. B. (2019). Comparing geometric parameters in treatment of pesticide effluent with hydrodynamic cavitation process. *Environmental Engineering Research*, 24(2), 318-323.
- 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.
- Saravanan, A., Kumar, P. S., Jeevanantham, S., Karishma, S., Tajsabreen, B., Yaashikaa, P. R., & Reshma, B. (2021). Effective water/wastewater treatment methodologies for toxic pollutants removal: Processes and applications towards sustainable development. *Chemosphere*, 280, 130595.
- Sivakumar, M. & Pandit, A., B. 2002 Wastewater treatment: a novel cavitation technique. *Ultrasonics Sonochemistry* 9. 123–131.
- Sogbanmu, T. O., Osibona, A. O., Otitolaju A. A. (2019). -Specific polycyclic aromatic hydrocarbons identified as ecological risk factors in the Lagos lagoon, Nigeria, *Environmental Pollution*, 255. 113295.
- Sun, C., Zhang, J., Ma, Q., Yanan Chen, Y., Ju, H. (2017). Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in water and sediment from a river basin: sediment–water partitioning, source identification and environmental health risk assessment. *Environ Geochem Health*, Vol. 39, 63–74.
- 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.
- Vijayanand, M., Ramakrishnan, A., Subramanian, R., Issac, P. K., Nasr, M., Khoo, K. S., ... & Ravindran, B. (2023). Polyaromatic hydrocarbons (PAHs) in the water environment: A review on toxicity, microbial biodegradation, systematic biological advancements, and environmental fate. *Environmental research*, 227, 115716.
- Yu, H., Liu, Y., Han, C., Fang, H., Weng, J., Shu, X., ... & Ma, L. (2021). Polycyclic aromatic hydrocarbons in surface waters from the seven main river basins of China: Spatial distribution, source apportionment, and potential risk assessment. *Science of the Total Environment*, 752, 141764.
- 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.
- Zhu, Z., Li, L., Yu, Y., Tan, L., Wang, Z., Suo, S., ... & Liang, W. (2023). Distribution, source, risk and phytoremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in typical urban landscape waters recharged by reclaimed water. *Journal of Environmental Management*, 330, 117214.