

جدوى إنتاج الكربون المنشط من الكتلة الحيوية لنبات الأثل لإزالة ملوثات المياه عن طريق الامتزاز  
نوري بلقاسم خليفة حفيظ  
عبدالباسط سالم عمار هويدي  
قسم البيئة والتلوث - المعهد العالي لتقنيات شؤون المياه لشؤون المياه - العجيلات - ليبيا

**Feasibility of Producing Activated Carbon from Tamarisk Biomass for the Removal of Water Pollutants via Adsorption**  
**Higher Institution of Technical Water Affairs – Alagelat**  
**Dr – NURI .A . KH .EHFAED <sup>(1)</sup>**  
**E - nuriafeed@yahoo.com**  
**ABDULBASEIT SALIM AMMAR HUWAYDI <sup>(2)</sup>**

تاريخ الاستلام: 2026/04/03 تاريخ المراجعة 2026 /05/02 تاريخ القبول:2026/05/15- تاريخ النشر: 2026 /06/04

### الملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم إمكانية إنتاج الفحم المنشط محلياً من شجرة نبات الطرفة (*Tamarix spp.*) واستخدامه كمادة ماصة لإزالة ملوثات المياه. تم تحضير الفحم المنشط باستخدام عمليات الكربنة والتنشيط الكيميائي، ثم تم تقييم كفاءته في امتزاز بعض الأصباغ العضوية حيث تم إزالة حوالي 95% من صبغة الميثيلين الأزرق من المحاليل المائية. أما بالنسبة لنتائج الامتزاز للملوثات الهيدروكربونية التي تم إجراء التجارب عليها (البنزين والبربانول) فكانت متفاوتة حيث كانت نتائج الامتزاز بصورة مسحوق أفضل منها في الصورة الحبيبية فقد تمت إزالة ما يقارب 18% من البربانول و 37% من البنزين و أظهرت النتائج أن الفحم المنتج يمتلك مساحة سطحية عالية وقدرة فعالة على إزالة الملوثات مما يجعله خياراً اقتصادياً ومستداماً لمعالجة المياه.

### الكلمات الدالة :

الاتزان الديناميكي ، الكربنة ، التنشيط الكيميائي ، حركية الامتزاز ، المذيبات الغير قطبية

### Abstract

This study aims to evaluate the potential of locally producing activated carbon from *Tamarix spp.* and assessing its efficacy as a sustainable adsorbent for wastewater remediation. The activated carbon was synthesized via carbonization followed by chemical activation. The adsorptive performance was primarily evaluated using methylene blue (MB) dye, achieving a significant removal efficiency of approximately 95% from aqueous solutions. Furthermore, the study investigated the removal of hydrocarbon pollutants, specifically benzene and propanol. The results indicated that the adsorbent in powdered form exhibited superior performance compared to its granular counterpart, with removal rates reaching approximately 37% for benzene and 18% for propanol. Characterization of the produced activated carbon revealed a high specific surface area and a robust capacity for pollutant sequestration. These findings suggest that *Tamarix*-derived activated carbon serves as a cost-effective and environmentally sustainable alternative for advanced water treatment applications.

## 1. المقدمة

تُعدّ مشكلة تلوث المياه بالأصبغ الصناعية من أكثر القضايا البيئية تعقيداً وإحاطاً في العصر الحديث، نظراً للزيادة المتسارعة في الأنشطة الصناعية المرتبطة بقطاعات النسيج والجلود والورق والصناعات الكيماوية. إذ يتم تصريف كميات كبيرة من مياه الصرف الصناعي المحتوية على أصباغ عضوية معقّدة التركيب إلى المسطحات المائية دون معالجة كافية مما يؤدي إلى تدهور نوعية المياه وتأثيرات سلبية مباشرة وغير مباشرة على النظم البيئية المائية وصحة الإنسان. وتتميز هذه الأصباغ بخصائص كيميائية تجعلها مقاومة للتحلل الحيوي والضوئي فضلاً عن سميتها العالية وإمكانية تراكمها في السلاسل الغذائية، الأمر الذي يفاقم من خطورتها البيئية. [15] وقد تم تطوير العديد من التقنيات لمعالجة هذه الملوثات بما في ذلك العمليات الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية مثل الترسيب الكيميائي والأكسدة المتقدمة والمعالجة البيولوجية. وعلى الرغم من فعالية بعض هذه الأساليب إلا أنها غالباً ما تعاني من قيود تتعلق بارتفاع التكلفة أو تعقيد التشغيل، أو توليد نواتج ثانوية قد تكون أكثر خطورة من الملوثات الأصلية [11]. في هذا السياق برزت تقنية الامتزاز كواحدة من أكثر الطرق كفاءة وبساطة لمعالجة المياه الملوثة بالأصبغ نظراً لقدرتها العالية على إزالة مجموعة واسعة من الملوثات وسهولة تشغيلها وإمكانية تطبيقها على نطاق واسع. يُعتبر الفحم المنشط من أبرز المواد المستخدمة في عمليات الامتزاز وذلك بفضل مساحته السطحية الكبيرة وتوزيع مساهمته المتنوع واحتوائه على مجموعات وظيفية فعالة تساهم في تعزيز كفاءة إزالة الملوثات العضوية وغير العضوية. ومع ذلك، فإن التكلفة المرتفعة لإنتاج الفحم المنشط التجاري تحدّ من استخدامه على نطاق واسع [4] خاصة في الدول النامية. ومن هنا اتجهت الجهود البحثية في السنوات الأخيرة نحو تطوير مواد امتزاز منخفضة التكلفة وذات كفاءة عالية من خلال الاستفادة من المخلفات الزراعية والكتلة الحيوية المتوفرة محلياً. من هنا يبرز نبات الطرفة

(*Tamarix spp*) كمصدر واعد لإنتاج الفحم المنشط، نظراً لانتشاره الواسع في البيئات الجافة وشبه الجافة وقدرته على النمو في ظروف قاسية ذات ملوحة مرتفعة وشح في الموارد المائية. كما يتميز هذا النبات بتركيبه اللجنوسليلوزي الذي يجعله مادة أولية مناسبة لإنتاج مواد كربونية ذات خصائص امتزازية متميزة [10]. إن استغلال نبات الطرفة في إنتاج الفحم المنشط لا يسهم فقط في تقليل تكاليف المعالجة بل يعزز أيضاً من مفهوم الاقتصاد الدائري والاستدامة البيئية من خلال تحويل الموارد الطبيعية المتاحة أو المهملّة إلى مواد ذات قيمة مضافة بناءً على ما سبق تهدف هذه الدراسة إلى تقييم كفاءة الفحم المنشط المُحضّر من نبات الطرفة في إزالة الأصباغ الصناعية من المياه، مع دراسة تأثير العوامل التشغيلية المختلفة مثل زمن التلامس ودرجة الحموضة وتركيز الصبغة ودرجة الحرارة. كما تسعى الدراسة إلى توصيف الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمادة المُحضّرة باستخدام تقنيات تحليل متقدمة من أجل فهم آليات الامتزاز وتحسين أداء المادة. ومن المتوقع أن تساهم نتائج هذه الدراسة في تطوير حلول فعالة ومنخفضة التكلفة لمعالجة مياه الصرف الصناعي، خاصة في المناطق التي تعاني من ندرة الموارد المائية وتزايد الضغوط البيئية.

## 2. أهمية الدراسة

تتبع أهمية هذه الدراسة من تزايد التحديات المرتبطة بتلوث المياه بالملوثات العضوية، وعلى رأسها الأصباغ الصناعية والمركبات الهيدروكربونية والتي تمثل خطراً بيئياً وصحياً متنامياً، خاصة في ظل محدودية موارد المياه العذبة في العديد من المناطق. وتكتسب هذه الدراسة بعداً تطبيقياً مهماً من خلال سعيها إلى تطوير حل محلي منخفض التكلفة لمعالجة هذه الملوثات عبر إنتاج الفحم المنشط من نبات الطرفة (*Tamarix spp*) وهو مورد نباتي متوفر بكثرة في البيئات الجافة وشبه الجافة وتكمن الأهمية العلمية للدراسة في مساهمتها في توسيع قاعدة المعرفة المتعلقة باستخدام الكتلة الحيوية المحلية كمصدر بديل لإنتاج مواد ماصة عالية الكفاءة حيث تقدم تقييماً عملياً لخصائص الفحم المنشط المُحضّر وفاعليته في إزالة أنواع مختلفة من

الملوثات. كما تسلط الضوء على تأثير الشكل الفيزيائي للمادة (مسحوق أو حبيبي) على كفاءة الامتزاز وهو جانب مهم في تصميم وتطبيق أنظمة المعالجة.

أما من الناحية البيئية فإن هذه الدراسة تدعم التوجه نحو تبني تقنيات صديقة للبيئة ومستدامة من خلال تحويل نبات الطرفة الذي قد يُعد في بعض الأحيان نباتاً غير مستغل أو حتى عبئاً بيئياً إلى مادة ذات قيمة مضافة تُستخدم في تنقية المياه. ويسهم ذلك في تقليل الاعتماد على المواد التجارية مرتفعة التكلفة والحد من الأثر البيئي المرتبط بإنتاجها ونقلها.

وعلى الصعيد الاقتصادي توفر هذه الدراسة أساساً لتقليل تكاليف معالجة المياه خاصة في الدول النامية، من خلال استخدام موارد محلية متاحة بدلاً من استيراد الفحم المنشط التجاري. كما يمكن أن تفتح المجال أمام مشاريع صغيرة أو صناعات محلية قائمة على إنتاج مواد الامتزاز، مما يعزز من التنمية المستدامة.

بالإضافة إلى ذلك، تبرز أهمية الدراسة من خلال نتائجها التطبيقية، حيث أظهرت كفاءة عالية في إزالة صبغة الميثيلين الأزرق بنسبة تصل إلى نحو 95%، إلى جانب قدرة متفاوتة على إزالة الملوثات الهيدروكربونية مثل البنزين والبروبانول. وتؤكد هذه النتائج إمكانية استخدام الفحم المنتج في معالجة أنواع متعددة من الملوثات، مع الحاجة إلى تحسين بعض الجوانب لرفع كفاءة الامتزاز للمركبات العضوية المتطايرة.

بناءً على ذلك تمثل هذه الدراسة خطوة مهمة نحو تطوير تقنيات معالجة مياه فعالة، اقتصادية، ومستدامة، قائمة على استغلال الموارد الطبيعية المحلية بما يتماشى مع التوجهات العالمية نحو الاقتصاد الدائري وحماية البيئة.

### 3. أهداف الدراسة

تهدف الدراسة الى :

- (1) إنتاج فحم منشط من نبات الطرفة.
- (2) توصيف الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمادة المُحضّرة باستخدام تقنيات تحليل متقدمة من أجل فهم آليات الامتزاز وتحسين أداء المادة
- (3) تقييم كفاءة الفحم المنشط المُحضّر من نبات الطرفة في إزالة الأصباغ الصناعية من المياه ومقارنة كفاءته مع الفحم التجاري.

### 4. مشكلة الدراسة

تتمثل مشكلة هذه الدراسة في التزايد المستمر لتلوث المياه بالملوثات العضوية خاصة الأصباغ الصناعية والمركبات الهيدروكربونية نتيجة الأنشطة الصناعية المختلفة في مقابل محدودية كفاءة وتكلفة تقنيات المعالجة التقليدية المستخدمة حالياً. فعلى الرغم من فعالية بعض هذه التقنيات إلا أنها غالباً ما تكون مكلفة أو معقدة التشغيل أو غير مناسبة للتطبيق على نطاق واسع في البيئات ذات الموارد المحدود ومن جهة أخرى يُعد الفحم المنشط من أكثر المواد كفاءة في إزالة هذه الملوثات، إلا أن ارتفاع تكلفته واعتماده في الغالب على مصادر صناعية مستوردة يشكل عائقاً أمام استخدامه بشكل واسع، خاصة في الدول النامية وفي المقابل تتوفر موارد نباتية محلية غير مستغلة مثل نبات (Tamarix spp) والذي يمكن أن يمثل بديلاً واعداً لإنتاج الفحم المنشط بتكلفة أقل.

بناءً على ذلك تتمحور مشكلة الدراسة حول التساؤل الرئيسي التالي:

إلى أي مدى يمكن إنتاج فحم منشط عالي الكفاءة من نبات الطرفة واستخدامه في إزالة ملوثات المياه (الأصباغ والمركبات الهيدروكربونية) بكفاءة تضاهي أو تقارب المواد التجارية؟  
كما تنبثق عن هذه المشكلة عدة تساؤلات فرعية من أبرزها:

ما مدى كفاءة الفحم المنشط المنتج من نبات الطرفة في امتزاز الأصباغ الصناعية مقارنة بالملوثات الهيدروكربونية؟  
 ما تأثير الشكل الفيزيائي للفحم (مسحوق أو حبيبي) على كفاءة الامتزاز؟  
 ما الخصائص الفيزيائية والكيميائية التي تميز الفحم المنتج وتؤثر في أدائه؟  
 وهل يمكن اعتبار هذا المنتج خيارًا اقتصاديًا ومستدامًا لمعالجة المياه في البيئات المحلية؟  
 وعليه، تسعى هذه الدراسة إلى معالجة هذه الفجوة من خلال تقييم إمكانية إنتاج فحم منشط محليًا من نبات الطرفة ودراسة كفاءته في إزالة ملوثات المياه المختلفة بما يسهم في تطوير حلول عملية ومستدامة لمعالجة المياه.

### 5. فرضية الدراسة

تنطلق هذه الدراسة من الفرضية التالية :

يمكن إنتاج فحم منشط عالي الكفاءة من نبات الطرفة (*Tamarix spp*) باستخدام تقنيات الكربنة والتنشيط الكيميائي بحيث يمتلك خصائص سطحية وبنائية تمكنه من إزالة ملوثات المياه وخاصة الأصباغ العضوية والمركبات الهيدروكربونية بكفاءة ملحوظة تجعله بديلًا اقتصاديًا ومستدامًا للفحم المنشط التجاري.

وتتفرع عن هذه الفرضية مجموعة من الفرضيات الفرعية، من أهمها:

- (1) يمتلك الفحم المنشط المحضّر من نبات الطرفة مساحة سطحية عالية وبنية مسامية متطورة تسهم في تحسين كفاءة الامتزاز .
- (2) تكون كفاءة إزالة الأصباغ العضوية (مثل الميثيلين الأزرق) أعلى مقارنةً بالمركبات الهيدروكربونية (مثل البنزين والبروبانول) نتيجة لاختلاف طبيعة التفاعل واليات الامتزاز .
- (3) يؤثر الشكل الفيزيائي للفحم المنشط (مسحوق مقابل حبيبي) بشكل ملحوظ على كفاءة الامتزاز، حيث يُتوقع أن يُظهر الشكل المسحوق أداءً أفضل بسبب زيادة المساحة السطحية المتاحة .
- (4) يمكن تحسين كفاءة الامتزاز من خلال التحكم في ظروف التشغيل مثل درجة الحموضة، وزمن التلامس، وتركيز الملوثات .
- (5) يمثل استخدام نبات الطرفة كمصدر لإنتاج الفحم المنشط خيارًا منخفض التكلفة وصديقًا للبيئة مما يعزز من إمكانية تطبيقه عمليًا في معالجة المياه على المستوى المحلي .

وبناءً على هذه الفرضيات تهدف الدراسة إلى اختبار مدى صحتها من خلال إجراء تجارب تطبيقية وتحليل النتائج لتقييم جدوى استخدام الفحم المنشط المنتج من نبات الطرفة في معالجة ملوثات المياه.

### 6. منهجية الدراسة

اعتمدت هذه الدراسة على المنهج التجريبي التطبيقي بهدف تقييم إمكانية إنتاج الفحم المنشط من نبات الطرفة (*Tamarix spp.*) واختبار كفاءته في امتزاز ملوثات المياه. وقد شملت المنهجية عدة مراحل متكاملة يمكن تلخيصها فيما يلي:

#### (1) جمع وتحضير المادة الأولية

المادة الخام : تم استخدام خشب شجرة الطرفة (الأغصان الصلبة) كمصدر عالي الكربون. جمع عينات نبات الطرفة من البيئة المحلية ثم غُسلت جيداً لإزالة الأتربة والشوائب وجُففت في درجة حرارة مناسبة حتى ثبات الوزن بعد ذلك تم تقطيعها وطحنها للحصول على حجم جسيمات مناسب لعملية الكربنة.

(2) **تحضير الفحم المنشط**  
تم إنتاج الفحم المنشط عبر مرحلتين أساسيتين:

- **الكربنة (Carbonization):** حرق الخشب في أوعية معدنية محكمة الإغلاق بوجود كمية محدودة من الأكسجين لمدة 3-5 ساعات لإنتاج الفحم النباتي ثم تسخين المادة النباتية في فرن عند درجات حرارة مرتفعة (عادة بين 400-600 °م) في غياب الأكسجين لتحويلها إلى مادة كربونية .
- **التنشيط الكيميائي (Chemical Activation):** يتم تسخين الفحم الناتج في درجات حرارة عالية جداً (800-1000 درجة مئوية) مع بخار الماء أو مواد كيميائية منشطة (مثل هيدروكسيد البوتاسيوم أو حمض الفوسفوريك) لتحسين البنية المسامية وزيادة المساحة السطحية للفحم تلاها غسل وتجفيف المنتج النهائي مما يمنحه قدرة امتصاص عالية

(3) **توصيف الفحم المنشط**  
تم تحليل الخصائص الفيزيائية والكيميائية للفحم الناتج باستخدام مجموعة من التقنيات، مثل:

- تحليل البنية السطحية باستخدام المجهر الإلكتروني الماسح (SEM).
- تحديد المجموعات الوظيفية باستخدام تحليل الأشعة تحت الحمراء (FTIR). وذلك لفهم طبيعة المسام وآليات الامتزاز .

(4) **تحضير محاليل الملوثات**  
تم إعداد محاليل مائية لعدد من الملوثات شملت:

- صبغة عضوية (الميثيلين الأزرق) بتركيزات مختلفة .
- بعض المركبات الهيدروكربونية مثل البنزين والبروبانول لدراسة كفاءة الامتزاز لمواد مختلفة الطبيعة .

(4) **تجارب الامتزاز**  
أجريت تجارب الامتزاز بنظام الدفعات (Batch System) لدراسة كفاءة الفحم المنشط، حيث تم اختبار:

- تأثير زمن التلامس .
- تأثير درجة الحموضة (pH).
- تأثير تركيز الملوث .
- تأثير الشكل الفيزيائي للفحم (مسحوق مقابل حبيبي)

تم قياس تركيز الملوثات قبل وبعد الامتزاز باستخدام أجهزة تحليل مناسبة (مثل المطيافية الضوئية للأصباغ) ومن ثم حساب نسبة الإزالة وكفاءة الامتزاز.

(5) **تحليل البيانات**  
تم تحليل النتائج باستخدام نماذج حركية (Kinetics) ونماذج الاتزان (Isotherms) مثل نموذج لانجموير وفريدلخ بهدف فهم آلية الامتزاز وتحديد السعة الامتزازية للفحم المنشط.

## 6) تقييم الأداء

تمت مقارنة كفاءة الفحم المنشط المنتج من نبات الطرفة مع نتائج منشورة لفحم منشط تجاري لتقييم مدى جدواه كبديل اقتصادي وفعال في معالجة المياه.

وبذلك وفرت هذه المنهجية إطاراً علمياً متكاملًا لدراسة خصائص وأداء الفحم المنشط المنتج محلياً ومدى صلاحيته للتطبيق في إزالة ملوثات المياه

## 8. المواد وطرق العمل

### • المواد

نبات الطرفة ( الأغصان الصلبة الجافة )

مواد كيميائية للتنشيط (مثل حمض الفوسفوريك أو هيدروكسيد البوتاسيوم)

ملونات مائية (مثل الميثيلين الأزرق)

### • تحضير الفحم المنشط

تنظيف وتجفيف النبات.

الكرينة عند درجات حرارة (400 - 600 C°).

التنشيط الكيميائي.

الغسل والتجفيف.

### 9. التجارب العملية

تحضير محاليل ملونة بتركيزات مختلفة.

إضافة كميات محددة من الفحم.

قياس الامتزاز باستخدام جهاز UV-Vis

مراحل كربنة المواد الخام

1. يتم حرق المواد الخام باستخدام فرن كهربائي في مدى درجة حرارة من (800Co إلى 900Co) كما موضح

في الشكل

2. للحصول على حبيبات كربونية ذات درجة صلادة مناسبة تُجرى عملية تبريد فجائي (Quenching) للفحم

في ماء بارد مما يؤدي إلى تثبيت البنية الصلبة. بعد ذلك يُخضع الفحم الناتج لعمليات التكسير والطحن بهدف

إنتاج حبيبات كربونية بأحجام مختلفة (مسحوقة وحبيبية) ثم تُجفف هذه الحبيبات عند درجة حرارة (120°)

لمدة ساعة واحدة، كما هو موضح في الشكل (2)

3. تُجرى عملية التنشيط الكيميائي باستخدام حمض الفوسفوريك (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) بتركيز (85%) بهدف زيادة

المسامية الداخلية للمادة الكربونية. ويتم ذلك عبر غمر حبيبات الكربون في المحلول مع التحريك المستمر

لمدة زمنية محددة لضمان تفاعل متجانس وتحقيق تنشيط فعال [6].

4. تُزال بقايا الأحماض من حبيبات الكربون المنشط من خلال غسلها بشكل متكرر باستخدام ماء نقي منزوع

الأملاح مع مراقبة درجة الحموضة (pH) لمياه الغسيل بواسطة جهاز قياس الأس الهيدروجيني وذلك

للتأكد من التخلص التام من الأثر الحمضي

لدراسة جودة الكربون المنشط المحضّر أجريت مجموعة من الاختبارات لتقييم كفاءته في امتزاز المركبات العضوية

حيث تم تحضير محلول من Methylene Blue بتركيز (600 ppm).

حيث وضع حجم (200 ml) من المحلول في دورق زجاجي ثم أُضيفت كميات مختلفة من حبيبات الكربون المنشط

(0.2 - 0.5 gr) مع التحريك المستمر باستخدام خلاط مغناطيسي لضمان تجانس النظام بعد ذلك يتم سحب عينات

من المحلول كل خمس دقائق على مدى زمني قدره 30 دقيقة لتحليل سلوك الامتزاز مع الزمن.

أُعيدت التجربة عند نفس التركيز (600 ppm) باستخدام (0.5 gr) من الكربون المنشط، مع أخذ ثلاث عينات كل

خمس دقائق لزيادة دقة النتائج. كما أُجريت التجربة باستخدام الكربون المنشط في صورته المسحوقة لمقارنة تأثير

حجم الحبيبات على كفاءة الامتزاز.

وفي المرحلة النهائية جمعت العينات عند فترات زمنية وأوزان مختلفة من الكربون ثم خضعت لقياسات الامتصاص باستخدام تقنية المسح الطيفي

(Spectrophotometric analysis) لتحديد تركيز الصبغة المتبقي وتقييم كفاءة الكربون المنشط.

للتأكد من الخواص الطبيعية للكربون المنتج تم إجراء التجارب التالية

### 1. تحديد نسبة الرطوبة

تقدير المحتوى الرطوبي في العينة تم وزن كمية معلومة من الكربون المنشط ووضعها في جفنة زجاجية مقاومة للحرارة ومن ثم تجفيفها داخل فرن تجفيف عند درجة حرارة (120° م) لمدة ثلاث ساعات لضمان إزالة الرطوبة الحرة. بعد انتهاء عملية التجفيف أُعيد وزن العينة وتم حساب نسبة الرطوبة اعتماداً على الفرق بين الوزن قبل وبعد التجفيف وفق العلاقة الحسابية المخصصة لذلك.

$$H2O \text{ Ratio} = 100 * W3 - (W2 + W1)/W1$$

W1 = وزن الفحم قبل التجفيف

W2 = وزن الجفنة

W3 = الوزن بعد التجفيف

### تحديد محتوى الرماد (Ash Content Determination)

تم تقدير نسبة الرماد في الكربون المنشط المُحضّر باستخدام طريقة الحرق الحراري (Ashing Method). حيث تم وزن كمية معلومة من العينة (W1) ووضعها في جفنة حرارية ذات وزن معلوم (W2)، ثم أُخضعت لعملية حرق في فرن عند درجة حرارة (900 C °) لمدة ساعة واحدة في وجود الهواء الجوي لضمان الأكسدة الكاملة للمادة العضوية بعد انتهاء عملية الحرق تُركت الجفنة لتبرد تدريجياً إلى درجة حرارة الغرفة داخل مجفف (Desiccator) لتجنب امتصاص الرطوبة ثم وُزنت الجفنة بما تحتويه من الرماد المتبقي وتم حساب نسبة الرماد اعتماداً على الكتلة المتبقية بعد الاحتراق وفق العلاقة الحسابية القياسية [3]

$$ASH \text{ Ratio} = 100 * W3 - (W2 + W3)/W1$$

W1 = وزن الكربون

W2 = وزن الجفنة الحرارية

W3 = وزن مع الرماد

اختبار امتزاز المركبات البنزين والبربانول

### دراسة امتزاز المركبات العضوية باستخدام الكربون المنشط

تم تحضير محلول مائي بسعة لتر واحد أُضيفت إليه (2ml) من كل مركب من المركبات العضوية المدروسة بعد ذلك تم سحب حجم (250ml) من كل محلول لتحضير التجارب الامتزازية حيث أُضيف (1gr) من الكربون المنشط إلى كل عينة ثم وُضعت في خلاط مغناطيسي لضمان التجانس التام بين الطورين وتم سحب عينات دورية كل 5 دقائق لمدة 30 دقيقة لمتابعة ديناميكية عملية الامتزاز بعد ذلك أُجريت عملية استخلاص للمركبات العضوية من العينات باستخدام مذيب الكلوروفورم (Chloroform) وذلك لتحديد التركيز المتبقي في الطور المائي

أُجريت التجارب باستخدام الكربون المنشط بصورتين مختلفتين مسحوق وحبيبي بهدف تقييم تأثير الحجم الحبيبي على كفاءة الامتزاز. بعد الاستخلاص جمعت العينات وتم تحليلها باستخدام جهاز الاستشراب بالغاز (Gas Chromatography) لتحديد نسبة امتزاز المركبات الحلقية من المحلول المائي بدقة عالية.

تم إجراء مجموعة من الاختبارات الفيزيائية لتحديد الخصائص الأساسية للكربون المنشط المُحضّر لتقييم كفاءة الامتزاز وفعالية الأداء السطحي للمادة وتُعد هذه الخصائص مؤشرات رئيسية تتحكم في سعة الامتزاز وسرعته ونوعية التفاعل مع الملوثات المختلفة ويعرض الجدول (1) أهم الخصائص الفيزيائية للكربون المنشط المنتج من خشب شجرة الطرفة والتي تشمل المعايير المرتبطة بالمساحة السطحية والمسامية والكثافة ونسبة الرماد والرطوبة لما لها من تأثير مباشر على كفاءة الامتزاز وجودة المنتج النهائي

جدول (1) الخواص الطبيعية للكربون المنشط المسحوق والحبيبي

ت	الخواص الطبيعية	الكربون المنشط (مسحوق)	الكربون المنشط (حبيبي)
1	الكثافة (g/cm <sup>3</sup> )	0.29	0.348
2	الرقم الايوديني (mgi/gc)	870.2	792.5
3	الرطوبة (%)	35.26	38.14
4	الاس الهيدروجيني	2.5	2.5
5	الحجم الحبيبي (μ)	65	300

تم تحضير خمس محاليل قياسية من صبغة (Methylene Blue) بهدف إنشاء منحنى المعايرة (Calibration Curve) المستخدم في التقدير الكمي للتركيز غير المعروفة.

وقد تم اختيار تراكيز مختلفة تغطي مدى تركيزاً مناسباً لضمان دقة القياس وخطية العلاقة بين الامتصاصية والتركيز وفق قانون بير-لامبرت. ويوضح الجدول (2) التراكيز القياسية المحضرة وقيم الامتصاصية المقابلة لها والمقاسة باستخدام جهاز التحليل الطيفي

(UV-Vis Spectrophotometer) والتي تم الاعتماد عليها في رسم منحنى المعايرة وتحديد التراكيز المجهولة في العينات قيد الدراسة.

جدول (2) يوضح التركيز وقراءة الجهاز لمعايرة الميثيلين الأزرق

ت	التركيز (ppm)	قراءة الجهاز (امتصاص)
1	0	0.0034
2	150	0.0125
3	300	0.1613
4	600	0.1268
5	700	0.1686

تم الحصول على معامل تحديد (R<sup>2</sup>) بقيمة 0.98 لمنحنى المعايرة الخاص بمحاليل الميثيلين الأزرق (Methylene Blue) مما يدل على وجود علاقة خطية قوية وارتباط مرتفع بين الامتصاصية والتركيز ضمن المجال المدروس. ويعكس هذا الارتفاع في قيمة R<sup>2</sup> ملاءمة النموذج الخطي المستخدم في وصف سلوك النظام التحليلي بما يضمن دقة وموثوقية عالية في تقدير تراكيز العينات المأخوذة أثناء تجارب الامتزاز. وبناءً عليه يمكن اعتماد معادلة منحنى المعايرة بثقة في حساب تراكيز الميثيلين الأزرق خلال مراحل التحليل المختلفة.

$$Y = 0.0002X$$

$$X = \frac{Y}{0.002}$$

حيث ان :

$$Y = \text{الامتصاص}$$

$$X = \text{التركيز}$$

تم قياس الامتصاص للعينات واستخدام المعادلة الخطية اعلاه ومن ثم حساب التركيز

### 8. عرض ومناقشة النتائج

أظهرت نتائج هذه الدراسة إمكانية إنتاج فحم منشط عالي الكفاءة من نبات الطرفة (*Tamarix spp.*) باستخدام عمليتي الكربنة والتنشيط الكيميائي مع خصائص فيزيائية وكيميائية متميزة تؤهله للاستخدام في معالجة ملوثات المياه و أكدت تحاليل المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) تطور البنية المسامية للفحم المنتج حيث لوحظت شبكة واسعة من المسامات ذات الأحجام المختلفة مما يعزز من قدرة الامتزاز كما أظهرت نتائج تحليل الأشعة تحت الحمراء (FTIR) وجود مجموعات وظيفية نشطة مثل الهيدروكسيل والكربونيل والتي تلعب دوراً مهماً في تعزيز التفاعلات الكيميائية مع الملوثات. بالإضافة إلى ذلك، بينت نتائج تحليل BET أن الفحم يمتلك مساحة سطحية عالية وتوزيعاً مسامياً متوازناً، مما يساهم في تحسين كفاءة الامتزاز. وقد أظهرت النتائج التجريبية كفاءة عالية في إزالة صبغة الميثيلين الأزرق، حيث بلغت نسبة الإزالة حوالي (95%) مما يعكس فعالية الفحم المنتج في إزالة الأصباغ العضوية. في المقابل كانت كفاءة إزالة المركبات الهيدروكربونية (البنزين والبروبانول) أقل نسبياً وهو ما يعزى إلى اختلاف طبيعة التفاعل وآليات الامتزاز. كما تبين أن الشكل المسحوق للفحم المنشط أكثر كفاءة مقارنة بالشكل

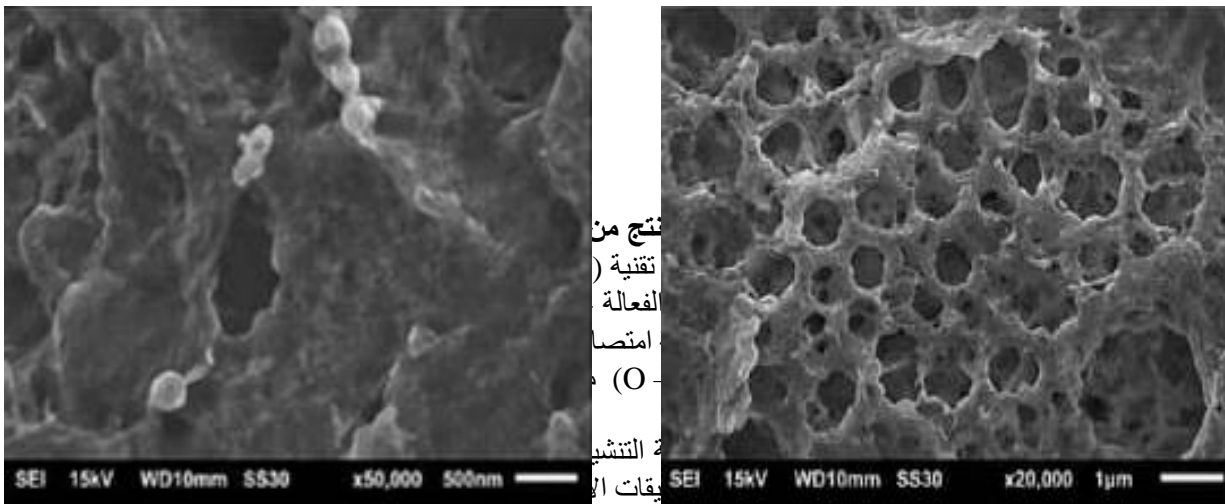
الحبيبي. بناءً على ذلك يمكن اعتبار الفحم المنشط المنتج من نبات الطرفة خيارًا واعدًا اقتصاديًا ومستدامًا لمعالجة المياه الملوثة خاصة في المناطق التي تتوفر فيها هذه الموارد النباتية.

حيث أوضحت صور المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) للكربون المنشط المنتج من نبات الطرفة كما في الشكل (1) أن السطح يتميز ببنية مسامية غير منتظمة تحتوي على عدد كبير من المسام والتجاويف بأحجام مختلفة وهو ما يدل على نجاح عملية التنشيط في تطوير البنية السطحية للمادة كما أظهرت الصور وجود شبكة مترابطة من المسام الدقيقة والمتوسطة مما يؤدي إلى زيادة المساحة السطحية الفعالة للكربون المنشط.

ولوحظ عند التكبيرات العالية أن السطح يمتلك خشونة واضحة وتجاويف عميقة ناتجة عن تحلل المكونات العضوية أثناء عمليات الكربنة والتنشيط، الأمر الذي يسهم في تحسين خصائص الامتزاز ورفع كفاءة إزالة الملوثات وتشير هذه النتائج إلى أن الكربون المنشط المحضر من نبات الطرفة يمتلك خصائص سطحية مناسبة للاستخدام في تطبيقات معالجة المياه وامتزاز المواد العضوية وغير العضوية.

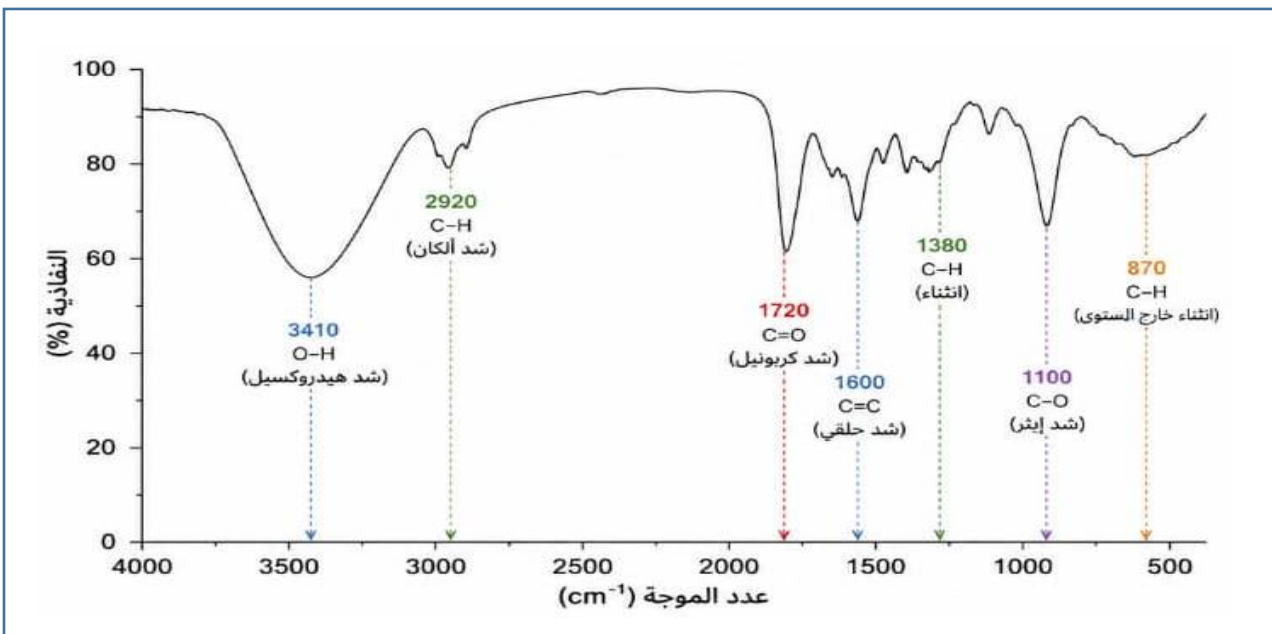
تكبير 50.00kx

تكبير 20.00kx



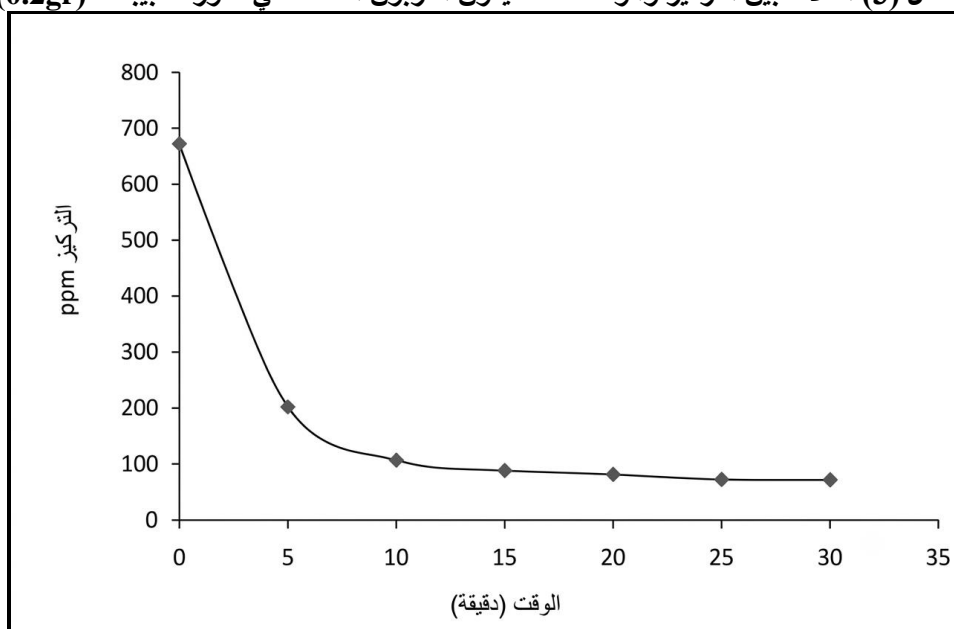
نتج من  
(  
تقنية  
الفعالة  
امتصا  
(O  
التنشيط  
بفات

شكل (2) تحديد المجموعات الوظيفية للكربون المنشط المنتج من الطرفة باستخدام تحليل FTIR



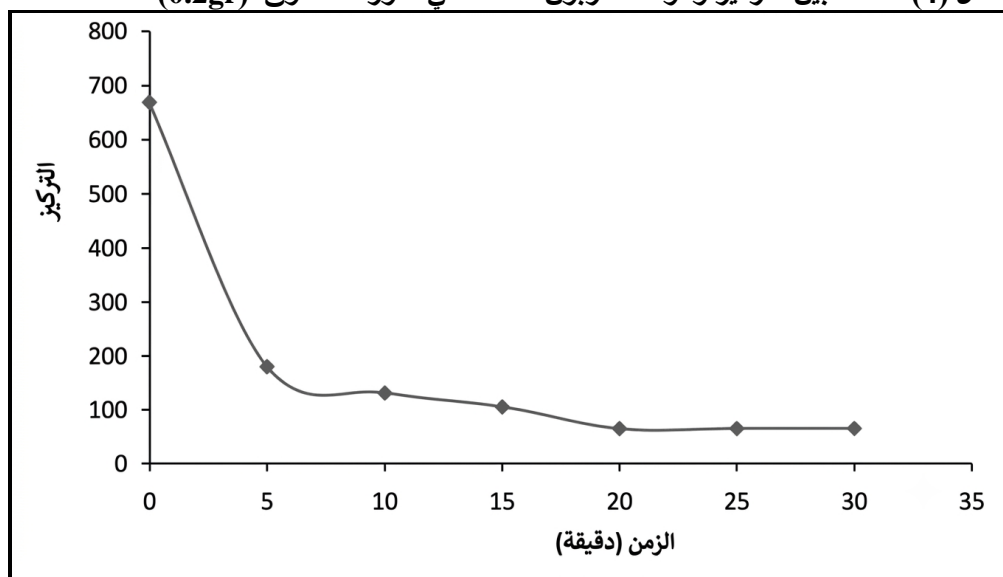
ويوضح نتائج الشكل (3) دراسة حركية الامتزاز (Adsorption kinetics) لصبغة الميثيلين الأزرق (Methylene Blue) باستخدام الكربون المنشط الحبيبي (GAC) المُحضّر محلياً من خشب شجرة الطرفة بكتلة مقدارها (0.2 gr) أن معدل الإزالة الأقصى قد تحقق خلال الدقائق الخمس الأولى من بدء التفاعل. ويعزى هذا السلوك الحركي المتسارع في المراحل الأولية إلى وفرة المواقع النشطة الشاغرة. (Vacant active sites) والمساحة السطحية الكبيرة المتاحة على سطح الكربون المنشط، مما أدى إلى زيادة قوة الدفع الانتشارية للصبغة من المحلول نحو السطح. ومع تقدم زمن التفاعل، لوحظ انخفاض تدريجي في معدل الامتزاز نتيجة للاشغال المتزايد لهذه المواقع بجزيئات الصبغة (Surface saturation) وصولاً إلى حالة الاتزان الديناميكي (Equilibrium state) خلال الدقائق الخمس الأخيرة من التجربة. وتعكس القيم النهائية للامتزاز كفاءة وجودة عالية للكربون المنشط المُنتج محلياً حيث بلغت النسبة المئوية القصوى للإزالة (Removal efficiency) حوالي (90%) مما يؤكد فعاليته كامتزاز واعد واقتصادي في معالجة المياه الملوثة بالصبغات .

الشكل (3) العلاقة بين التركيز والوقت عندما يكون الكربون المنشط في صورة حبيبات (0.2gr)



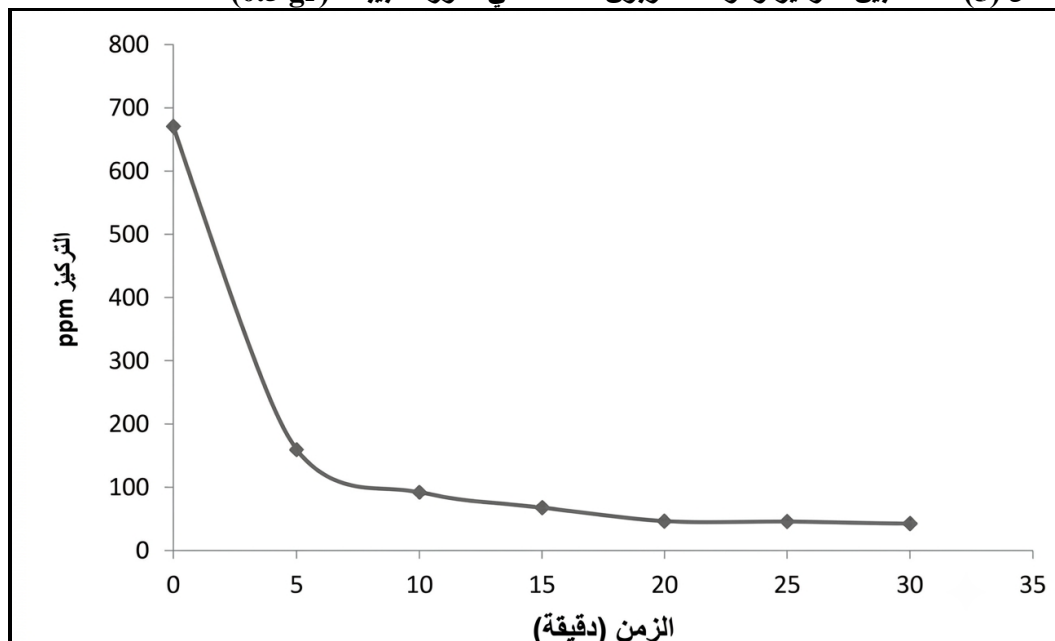
كما يبيّن الشكل (4) العلاقة الحركية بين تركيز صبغة الميثيلين الأزرق المتبقي وزمن التفاعل باستخدام الكربون المنشط في صورة مسحوق (PAC) بكتلة مقدارها (0.2gr) وتكشف المراحل الحركية للامتزاز عن سلوك مماثل للنمط السابق حيث سُجّل أعلى معدل للإزالة خلال الدقائق الخمس الأولى والتي شهدت اختزالاً لأكثر من نصف التركيز الابتدائي للصبغة بفعل وفرة المواقع السطحية الشاغرة في البداية [8]. تلا ذلك انخفاض تدريجي ومستمر في معدل الامتزاز عبر المراحل اللاحقة نتيجة للاشغال المتزايد لتلك المواقع حتى استقر النظام عند حالة الاتزان الديناميكي بنسبة إزالة إجمالية بلغت (85%) وبمقارنة هذه النتائج بالتجربة السابقة، يتضح أن الكربون المنشط في صورته الحبيبية (GAC) قد حقق كفاءة إزالة أعلى بفارق يقدر بنحو (5%) ويُعزى تفوق الكربون الحبيبي في هذه الحالة إلى خصائصه البنوية أو طبيعة توزيع المسام التي منحت جزيئات الصبغة ثباتاً انتشارياً أفضل مقارنة بصورة المسحوق تحت الظروف التجريبية ذاتها.

الشكل (4) العلاقة بين التركيز والوقت الكربون المنشط في صورة مسحوق (0.2gr)



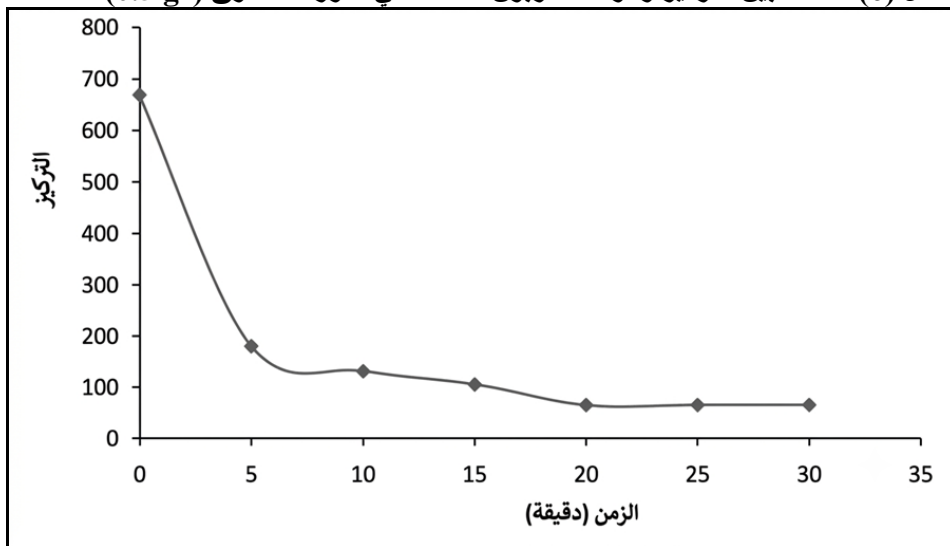
يُظهر الشكل (5) منحنى حركية الامتزاز لصبغة الميثيلين الأزرق بعد زيادة جرعة الكربون المنشط الحبيبي (GAC) من (0.2 gr) إلى (0.5 gr) وتكشف النتائج عن سلوك حركي مماثل للأنماط الحركية السابقة، حيث تميزت المرحلة الأولية بكفاءة إزالة عالية وسريعة خلال الدقائق الخمس الأولى، أدت إلى التخلص مما يقارب (80 %) من التركيز الابتدائي للصبغة ويُعزى هذا التسارع الحركي المحفز إلى الزيادة المباشرة في المساحة السطحية الإجمالية وعدد المواقع النشطة الشاغرة الناتجة عن رفع جرعة المادة الممتازة. تلا ذلك تباطؤ تدريجي في معدل الامتزاز عبر المراحل اللاحقة نتيجة للاشغال التدريجي للمواقع السطحية والاقتراب من سعة الامتزاز القصوى حتى استقر النظام عند حالة الاتزان بكفاءة إزالة نهائية بلغت (95 %). وتُعد هذه النسبة المرتفعة مؤشراً جلياً على الكفاءة العالية والفاعلية التطبيقية الواعدة للكربون المنشط المُنتج محلياً من خشب شجرة الطرفة كمرشح اقتصادي لإزالة الأصباغ من المحاليل المائية.

الشكل (5) العلاقة بين التركيز والوقت الكربون المنشط في صورة حبيبات (0.5 gr)



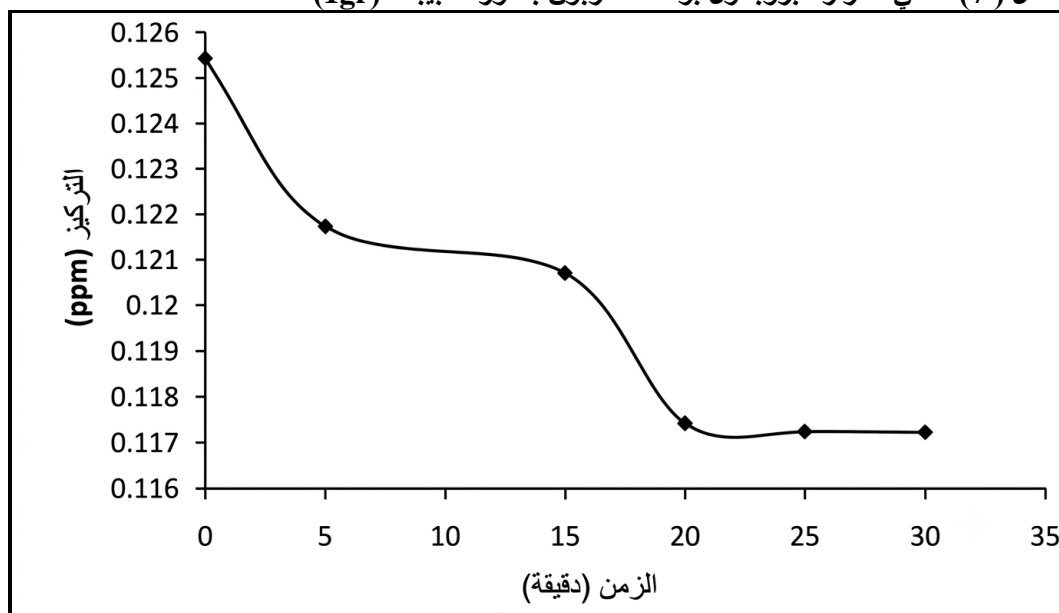
يُظهر الشكل (6) ميكانيكية حركية الامتزاز لصبغة الميثيلين الأزرق بواسطة مسحوق الكربون المنشط (PAC) بعد زيادة جرعته. ويمكن تقسيم مسار العملية إلى ثلاث مراحل حركية رئيسية حيث تمثلت المرحلة الأولى في استجابة سريعة وفاعلية امتزاز عالية جداً امتدت حتى بداية المرحلة الثانية (عند الدقيقة العاشرة تقريباً) ويُعزى هذا السلوك الحركي الحاد إلى وفرة المواقع النشطة الشاغرة والانخفاض المتسارع في المقاومة الانتشارية للصبغة على سطح المادة الممتزة. عقب ذلك دخلت العملية في مرحلة انتقالية شبه مستقرة، شهدت تباطؤاً تدريجياً في معدل الامتزاز نتيجة للاشغال المتزايد لتلك المواقع السطحية وضيق المساحة المتاحة للانتشار الداخلي. وأخيراً استقر النظام تماماً عند حالة الاتزان الديناميكي (Equilibrium state) خلال المرحلتين الأخيرتين من التجربة، مسجلاً كفاءة إزالة إجمالية قصوى بلغت حوالي (91 %) وهي نتيجة تؤكد التأثير الإيجابي لزيادة جرعة المسحوق في تعزيز السعة الاستيعابية للنظام المعالج.

الشكل (6) العلاقة بين التركيز والزمن الكربون المنشط في صورة مسحوق (0.5 gr)



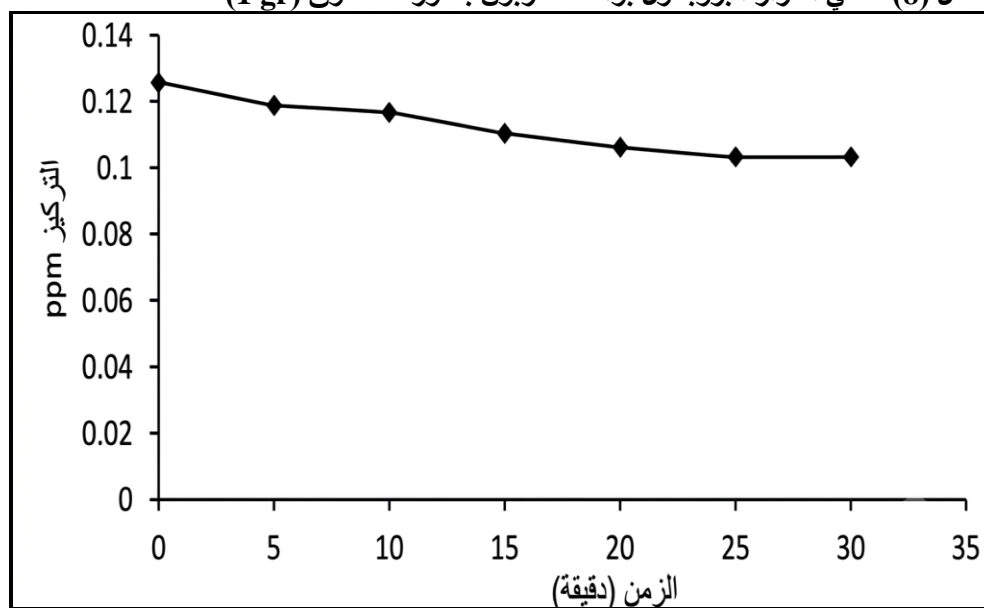
امتداداً لتقييم كفاءة الكربون المنشط المُحضّر في إزالة صبغة الميثيلين الأزرق، تم استقصاء قدرته الارتشاحية في امتزاز المركبات العضوية السائلة ولتحقيق هذا الغرض أُجري اختبار الامتزاز على مركبين عضويين متباينين في الخصائص الفيزيوكيميائية وهما: البروبانول (Propanol) والبنزين (Benzene)؛ حيث تم اختيار البروبانول كنموذج للمذيبات القطبية (Polar solvents) نظراً لاحتوائه على مجموعة الهيدروكسيل في حين يُمثّل البنزين المذيبات غير القطبية (Non-polar solvents). يهدف هذا التباين في القطبية إلى دراسة تأثير الطبيعة الكيميائية للمواد الممتزة (Adsorbates) ومدى توافقها مع كيمياء سطح الكربون المنشط المُنتج يُظهر الشكل (7) التغير الحركي لتركيز مركب البروبانول بمرور الزمن تحت تأثير الكربون المنشط الحبيبي (GAC) بجرعة مقدارها (1gr) وتكشف مسارات المنحنى البياني عن تدني كفاءة هذا النمط من الكربون المنشط في إزالة المركبات العضوية الأليفاتية القطبية لاسيما في صورته الحبيبية حيث لم تتجاوز النسبة المئوية القصوى للإزالة (Removal efficiency) حوالي (7%) من التركيز الابتدائي للمادة الممتزة. وتُعد هذه القدرة الاستيعابية المنخفضة ضئيلة جداً عند مقارنتها بالفاعلية العالية التي أباها الكربون المنشط ذاته في إزالة الأصباغ (مثل الميثيلين الأزرق) ويُعزى هذا التباين الحاد في الأداء إلى الطبيعة القطبية والوزن الجزيئي المنخفض للبروبانول مما يقلل من ألفته السطحية (Surface affinity) نحو المواقع النشطة للكربون الحبيبي فضلاً عن وجود عوائق انتشارية تحد من نفاذية الجزيئات داخل البنية المسامية للحبيبات مقارنة بصورة المسحوق

الشكل (7) منحي امتزاز البروبانول بواسطة كربون بصورة حبيبات (1gr)



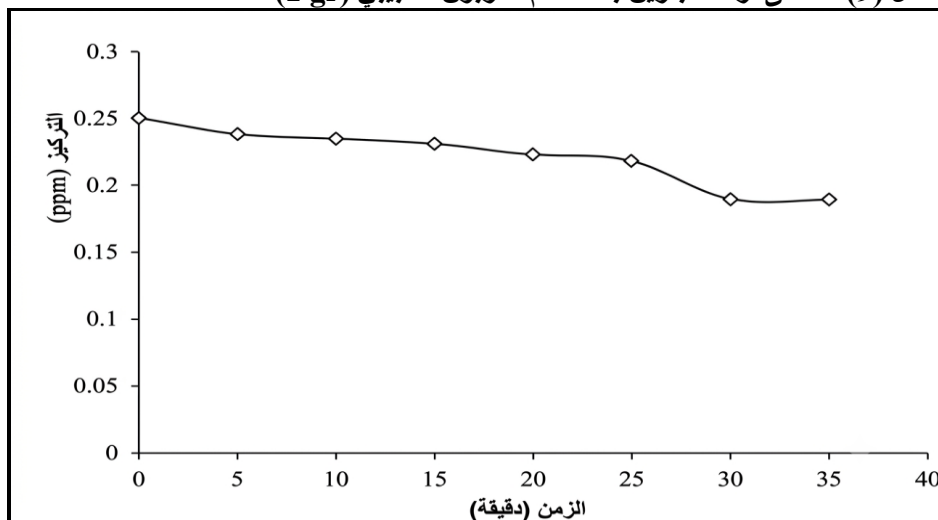
يُوضح الشكل (8) المسار الحركي لعملية امتزاز مركب البروبانول من المحاليل المائية باستخدام مسحوق الكربون المنشط (PAC) وتُشير النتائج التجريبية إلى أن العملية قد سارت بمعدل حركي بطيء نسبياً، حيث استقرت النسبة المئوية القصوى للإزالة (Removal efficiency) عند (18 %) فقط من المحتوى الابتدائي للكحول ورغم تدني هذه النسبة إجمالاً إلا أن مقارنتها بالنتائج السابقة تُظهر تفوقاً ملحوظاً لكفاءة الكربون المنشط في صورته المسحوقة مقارنة بنظيره الحبيبي (GAC) ويُعزى هذا التباين والأداء الأفضل للمسحوق إلى اختزال المقاومة الانتشارية الداخلية (Intraparticle diffusion resistance) وزيادة المساحة السطحية النوعية المتاحة مباشرة للجزيئات مما أتاح تأثيراً سطحياً أفضل مع جزيئات البروبانول القطبية ذات الوزن الجزيئي المنخفض مقارنة بالبنية المسامية المعقدة للحبيبات.

الشكل (8) منحي امتزاز البروبانول بواسطة كربون بصورة مسحوق (1 gr)



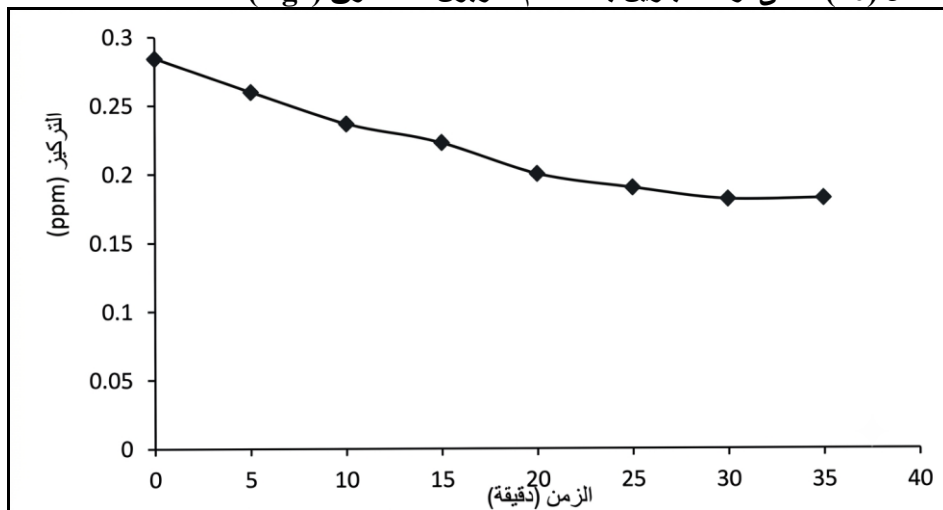
يوضح منحنى الامتزاز في الشكل (9) تغير تركيز البنزين بمرور الوقت باستخدام الكربون المنشط الحبيبي عند تركيز بدئي يبلغ (0.25 ppm) تميزت حركية الإزالة ببطء ملحوظ وتقارب كبير في النتائج التجريبية عبر معظم فترات التفاعل تلا ذلك انحراف طفيف في القراءات النهائية قبل الاستقرار عند مرحلة الاتزان الثابت وقد أسفرت العملية عن إزالة ما يقارب (24 %) من المحتوى الإجمالي للبنزين ويعكس هذا الأداء الحركي المتباطئ طبيعة التأثير بين جزيئات البنزين العطرية والسطح الخارجي للكربون الحبيبي تحت الظروف الحركية المطبقة.

الشكل (9) منحنى إزالة البنزين باستخدام الكربون الحبيبي (1 gr)



يوضح منحنى الامتزاز في الشكل (10) المراحل الزمنية لإزالة البنزين بواسطة مسحوق الكربون المنشط، حيث بلغت العملية حالة الاتزان بعد (35 دقيقة) بنسبة إزالة بلغت (37 %) وتؤكد هذه النتيجة تفوق الكربون المسحوق على نظيره الحبيبي نتيجة لزيادة المساحة السطحية الفعالة وتأثير الرطوبة البنيوية وعند مقارنة آليات الفصل بين المادتين الممتزتين يعود التباين أساساً إلى الاختلاف في القطبية والذوبانية فالبروبانول مركب كحولي قطبي شديد التجانس مع الماء مما يضعف كفاءة امتزازه بينما البنزين مركب عطري حلقي منخفض القطبية وكاره للماء، مما حفز تأثيره السطحي مع الكربون المنشط ورفع من كفاءة فصله

الشكل (10) منحنى إزالة البنزين باستخدام الكربون المسحوق (1 gr)



## 9. الخاتمة (Conclusion)

توصلت هذه الدراسة إلى إثبات الجدوى الفنية والبيئية لإنتاج كربون منشط ذي كفاءة عالية ومستدامة من الكتلة الحيوية لنبات الأثل/الطرفه (Tamarix spp.) عبر أليتي الكربنة والتنشيط الكيميائي بحمض الفوسفوريك ( $H_3PO_4$ )

أظهرت نتائج التوصيف الهيكلي والبنوي للمادة الكربونية المطورة امتلاكها لمساحة سطحية نوعية ممتازة وبنية مسامية متطورة ومجموعات وظيفية سطحية نشطة مما منحها خصائص امتزازية تنافسية في معالجة المياه الملوثة وفي المقابل أظهر النظام كفاءة متفاوتة ومحدودة نسبياً تجاه المركبات الهيدروكربونية السائلة حيث أثبت الكربون المنشط في صورته المسحوقة (PAC) تفوقاً على الصورة الحبيبية (GAC) بفعل اختزال المقاومة الانتشارية الداخلية وزيادة المساحة السطحية المعرضة مباشرة للتفاعل مسجلاً نسبة إزالة بلغت (37%) للبنزين و (18%) للبروبانول وقد عزا البحث هذا التباين بين الهيدروكربونات إلى عامل القطبية والذوبانية حيث ساهمت الطبيعة العطرية الكارهة للماء (Hydrophobic) لمركب البنزين في تعزيز ألفته السطحية نحو الكربون غير القطبي مقارنة بمركب البروبانول القطبي شديد التجانس مع الماء ختاماً تؤكد هذه النتائج أن الكربون المنشط المشتق من نبات الطرفة يُمثل بديلاً حيوياً واعداً واقتصادياً وصديقاً للبيئة يمكن اعتماده كمرشح منخفض التكلفة في تطبيقات معالجة مياه الصرف الصناعي، مما يخدم توجهات الاستدامة ومبادئ الاقتصاد الدائري من خلال تجميع الموارد الطبيعية المحلية المهملّة.

### . التوصيات (Recommendations)

استناداً إلى نتائج الدراسة يمكن تقديم التوصيات التالية:

- ضرورة التوسع في استخدام الكتلة الحيوية المحلية مثل نبات الطرفة لإنتاج الفحم المنشط كبديل منخفض التكلفة للفحم التجاري .
- تحسين ظروف التنشيط (نوع العامل المنشط، درجة الحرارة ، زمن المعالجة) لزيادة المساحة السطحية وكفاءة الامتزاز، خاصة للمركبات الهيدروكربونية .
- إجراء دراسات مستقبلية لتعديل السطح كيميائياً (Surface Modification) لتعزيز الامتزاز الانتقائي للملوثات العضوية المعقدة .
- اختبار أداء الفحم المنشط في أنظمة مستمرة (Continuous Systems) لمحاكاة التطبيقات الصناعية الفعلية .
- دراسة إمكانية إعادة استخدام الفحم المنشط (Regeneration) لتقليل التكلفة وزيادة الاستدامة .
- توسيع نطاق الدراسة ليشمل ملوثات أخرى مثل المعادن الثقيلة والمبيدات

### المراجع

- [1]. Ahmad, M. A., & Alrozi, R. (2011). Optimization of preparation conditions for mangosteen peel-based activated carbon for the removal of Remazol Brilliant Blue R using response surface methodology. *Chemical Engineering Journal*, 166(2), 564–572.
- [2]. Al-Degs, Y. S., El-Barghouthi, M. I., El-Sheikh, A. H., & Walker, G. M. (2008). Effect of carbon surface chemistry on the removal of reactive dyes from textile effluent. *Water Research*, 42(14), 3747–3758.
- [3]. Al-Qodah, Z., & Shawabkah, R. (2009). Production and characterization of activated carbon from Shale Oil ash. *Journal of Hazardous Materials*, 164(2-3), 1301–1307.
- [4]. Alslaibi, T. M., Abustan, I., Ahmad, M. A., & Foul, A. A. (2013). A review: Production of activated carbon from agricultural byproducts via conventional and microwave heating. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 88(7), 1183–1190.
- [5]. Dawood, S., & Sen, T. K. (2012). Removal of anionic dye Congo red from aqueous solution by adsorption onto Pine cone biomass of *Pinus radiata*: Kinetics, isotherms and thermodynamic studies. *Water, Air, & Soil Pollution*, 223(5), 2105–2112.

- [6]. El-Hendawy, A. N. A. (2006). Variation in the structural characteristics, pore size distribution and surface properties of activated carbons prepared from plum stones by  $\text{H}_3\text{PO}_4$  activation. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 75(2), 159–166.
- [7]. Garg, V. K., Amita, M., Kumar, R., & Gupta, R. (2004). Basic Blue 9 removal from aqueous solution using de-oiled mustard cake, an agricultural waste. *Journal of Hazardous Materials*, 109(1-3), 257–264.
- [8]. Hameed, B. H., Ahmad, A. L., & Latiff, K. N. A. (2007). Adsorption of basic dye (methylene blue) onto activated carbon prepared from rattan sawdust. *Journal of Hazardous Materials*, 147(1-2), 1–13.
- [9]. Malik, P. K. (2003). Use of activated carbons prepared from sawdust and rice husk for adsorption of acid dyes: a case study of Acid Yellow 36. *Dyes and Pigments*, 56(3), 239–249.
- [10]. Noumer, G., & Boujelben, N. (2020). Synthesis, characterization, and application of activated carbon derived from *Tamarix aphylla* for wastewater treatment. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(15), 18455–18468.
- [11]. Pignatello, J. J., Oliveros, E., & MacKay, A. (2006). Advanced oxidation processes for organic contaminant destruction based on the Fenton reaction and related chemistry. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 36(1), 1–84.
- [12]. Azouz, A., Fawzi, M., Mohammed, I., Hamed, O., Maher, A., & Baddi, M. (2026). Influence of Electrolyte Chemistry and Electrode Material on Hydrogen Production Performance in Alkaline Water Electrolysis. *Al-Farooq Journal of Sciences*, 2(2), 49-66.
- [13]. Rafatullah, M., Sulaiman, O., Hashim, R., & Ahmad, A. (2010). Adsorption of methylene blue on low-cost adsorbents: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 177(1-3), 70–80.
- [14]. Salman, J. M., Amrin, A. B., & Hasan, F. M. (2015). Adsorption of benzene and volatile organic compounds from industrial wastewater onto agricultural-based activated carbon. *International Journal of Chemical Engineering*, 2015, 1–11.
- [15]. Tan, I. A. W., Ahmad, A. L., & Hameed, B. H. (2008). Adsorption of basic dye on high-surface-area activated carbon prepared from coconut husk: Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies. *Journal of Hazardous Materials*, 154(1-3), 337–346.
- [16]. Yagub, M. T., Sen, T. K., Afroze, S., & Ang, H. M. (2014). Dye and its removal from aqueous solution by adsorption: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 209, 172–184.