# تقييم فعالية الفحم المنشط المصنّع من كوز الصنوبر في إزالة الكروم والكادميوم من مياه الصرف الناتجة عن معامل دباغة الجلود

د.م. فاطمة التركي

**الملخص**

في ظل الطلب المتنامي على المياه نتيجة التزايد المستمر في عدد سكان العالم، تفاقمت مشكلة توفر المياه الصالحة للاستخدام البشري، ولذلك كان لابد من البحث على طرق جديدة وفعالة لمعالجة المياه باستخدام مواد طبيعية. يحقق شروط الاستدامة وعدم استنزاف الموارد الطبيعية.

تم في هذا البحث تصنيع فحم منشط من كوز الصنوبر، حيث تم تصنيعه بهدف استخدامه لإزالة الكروم والكادميوم من مياه الصرف الناتجة عن معامل دباغة الجلود، والتي ينتج عنها كميات كبيرة من الملوثات ذات الأثر سلبي كبير أهمها الكروم والكادميوم.

بعد أن تم تصنيع الفحم المنشط من كوز الصنوبر تم تحديد أهم خصائصه ومقارنتها بخصائص فحم منشط تجاري للمقارنة، بينت النتائج: أن الفحم المنشط المصنّع من كوز الصنوبر يمتلك كثافة أقل مما يمتلكه الفحم التجاري بنسبة % 2.83 ، وكانت نسبة الرماد في فحم كوز الصنوبر المنشط أقل من نسبته في الفم المنشط التجاري بنسبة % 16.3 وهذا يعطيه أفضلية من هذه الناحية حيث تزداد جودة الفحم المنشط بانخفاض نسبة الرماد فيه، وتفوق رقم اليود للفحم المدروس على رقم اليود للفحم التجاري بنسبة 11.3% وهذا يدل على أن مساحة السطح الفعال لفحم كوز الصنوبر أكبر من مساحة السطح الفعال للفحم التجاري، وبالتالي مساحة امتزاز أكبر، وأظهرت صور المجهر الالكتروني وجود تشابه في البنية الهيكلية بين فحم كوز الصنوبر المنشط والفحم التجاري، ووجود فارق في متوسط أبعاد وأقطار المسام بين النوعين، فكان متوسط مقاس المسام لفحم كوز الصنوبر أقل بنسبة % 32.23 مع وجود تفوق كبير وواضح في كثافة المسام لصالح فحم كوز الصنوبر المنشط. وبينت النتائج أن فحم كوز الصنوبر المنشط قادر على إزالة كل من الكروم والكادميوم من مياه صرف معامل دباغة الجلود بنسب إزالة مختلفة، حيث بلغت نسبة إزالة الكروم % 84.6 ونسبة إزالة الكادميوم % 60.6 ، وكانت هذه النتائج قريبة من نسب الازالة عند استخدام الفحم المنشط التجاري حيث بلغت نسبة إزالة الكروم % 82.3 ونسبة إزالة الكادميوم % 63.3 .

**الكلمات المفتاحية:** الفحم المنشط – كوز الصنوبر– إزالة الكروم والكادميوم – مياه منصرفات معامل دباغة الجلود.

# Evaluating the effectiveness of activated carbon made from pine cones in removing chromium and cadmium from wastewater generated by leather tanning plants

**Dr. Fatima Alturki**

**Abstract**

With the growing demand for water due to the continuous increase in the world's population, the problem of providing potable water has worsened. Therefore, it became necessary to search for new and effective methods of water treatment using natural materials, while ensuring sustainability and avoiding the depletion of natural resources.

This research involved the production of activated carbon from pine cones. This carbon was manufactured specifically for the removal of chromium and cadmium from wastewater generated by leather tanning plants, which produce large quantities of pollutants with significant negative impacts, most notably chromium and cadmium.

After pine cone activated carbon was manufactured, its most important properties were determined and compared with those of commercial activated carbon for comparison. The results showed that the pine cone activated carbon had a density 2.83% lower than commercial activated carbon, and the ash content in the pine cone activated carbon was 16.3% lower than in commercial activated carbon. This gives it an advantage in this respect, as the quality of activated carbon increases with a lower ash content. The iodine value of the studied carbon was 11.3% higher than that of commercial activated carbon, indicating that the effective surface area of the pine cone activated carbon is larger than that of commercial activated carbon, and therefore a larger adsorption area. Electron microscope images showed a similarity in the structural composition between the pine cone activated carbon and commercial activated carbon, and a difference in the average dimensions and diameters of the pores between the two types. The average pore size of the pine cone activated carbon was 32.23% smaller, with a significant and clear advantage in pore density in favor of the pine cone activated carbon. The results showed that activated pine cone charcoal is able to remove both chromium and cadmium from the wastewater of leather tanning factories at different removal rates, with the removal rate for chromium reaching 84.6% and the removal rate for cadmium reaching 60.6%. These results were close to the removal rates when using commercial activated charcoal, where the removal rate for chromium reached 82.3% and the removal rate for cadmium reached 63.3%.

**Key Words:** Activated carbon - pine cone - removal of chromium and cadmium - wastewater from leather tanning factories.

## 1. مقدمة:

تشكِّل ندرة المياه العذبة وتدهور جودتها أحد أبرز التحديات البيئية والتنموية في القرن الحادي والعشرين. فمع التوسع الصناعي والزراعي والسكاني المتسارع، تتعرض المسطحات المائية حول العالم لضغوط هائلة نتيجة تصريف كميات متزايدة من الملوثات بمختلف أنواعها: العضوية (كالأصباغ والمبيدات والهيدروكربونات)، وغير العضوية (كالمعادن الثقيلة مثل الرصاص والكادميوم والكروم)، والمغذيات (كالنترات والفوسفات)، إضافة إلى الملوثات الناشئة مثل المستحضرات الصيدلانية ومنتجات العناية الشخصية. تشير تقارير منظمة الصحة العالمية والأمم المتحدة إلى أن أكثر من ملياري شخص لا يحصلون على مياه شرب آمنة، وأن ما يصل إلى 80% من مياه الصرف الصحي على مستوى العالم تُصرف إلى البيئة دون معالجة كافية، مما يؤدي إلى تداعيات صحية سيئة (كتفشي الأمراض المنقولة بالماء) وبيئية (كنمو الطحالب الضارة وانخفاض التنوع الحيوي) واقتصادية (كتراجع الإنتاجية الزراعية والصناعية).

تتطلب مواجهة هذه الأزمة تطوير تقنيات معالجة مياه فعالة، مستدامة، واقتصادية، خاصة في ظل محدودية تقنيات المعالجة التقليدية (كالترسيب الكيميائي والتهوية) في إزالة بعض الملوثات ذات التركيزات المنخفضة والسمية العالية. ومن هنا، تبرز الحاجة الملحة إلى وسائل معالجة متقدمة ترتكز على مبادئ الكيمياء الخضراء وتقنيات التدوير، تستهدف تحويل النفايات إلى موارد، وتقديم حلول قابلة للتطبيق على نطاق واسع.

يُعتبر الامتزاز (Adsorption) من أكثر التقنيات الواعدة والأكثر استخداماً في تنقية المياه والهواء، نظراً لكفاءته العالية، وسهولة تطبيقه. ومن بين أهم المواد المازة التي يمكن استخدامها في هذا المجال، الفحم المنشط (Activated Carbon) حيث يحتل مكانة الصدارة بسبب مساحته السطحية الهائلة، ونسبة مساميته العالية، وتعدد أشكاله، وقدرته على امتزاز طيف واسع من الملوثات.

هناك الكثير من المواد يتم منها تصنيع الفحم المنشط لأغراض تنقية المياه والهواء، لكن الاعتماد على المواد الخام التقليدية يسبب ارتفاع تكلفته نسبياً. هذا ما قاد المجتمع العلمي إلى البحث عن مواد خام بديلة، رخيصة، ومتجددة، تكون في العادة من نواتج عمليات زراعية أو صناعية، مما يحقق فائدتين: تقليل تكلفة إنتاج الفحم المنشط، والتخلص الآمن من النفايات عبر تحويلها إلى منتج ذي قيمة مضافة. ومن بين هذه المواد الواعدة، يبرز كوز الصنوبر الذي هو محور بحثنا هذا.

شجرة الصنوبر من الأشجار المنتشرة على نطاق واسع في مناطق حوض البحر الأبيض المتوسط وأمريكا الشمالية وآسيا، وتُزرع لأغراض تجارية متعددة (الخشب، الراتنج، الزينة). ينتج عن هذه الصناعة كميات هائلة من المخلفات الثانوية، ومن أبرزها أكواز الصنوبر. تشكل هذه الأكواز، التي تُجمع عادة وتسقط حول الأشجار، مصدر إزعاج قد يزيد من خطر الحرائق في الغابات، وغالباً ما تُحرق في العراء أو تترك لتتحلل ببطء، مما يساهم في انبعاثات غير مرغوبة أو يستهلك مساحات مخصصة للتخلص من النفايات.

من الناحية التركيبية، يُظهر كوز الصنوبر خصائص مثيرة تجعله مرشحاً ممتازاً لإنتاج الفحم المنشط عالي الجودة: لاحتوائه على محتوى كربوني عالٍ: حيث تصل نسبة الكربون الثابت فيه إلى حدود 40–50%، وهو الأساس لبناء الهيكل المسامي، بالإضافة لبنية صلبة ومتينة مما ينتج عنه فحم منشط بحبيبات ذات متانة ميكانيكية جيدة، ويمتاز بوفرة وتجدد فهو منتج ثانوي متجدد سنوياً وبكميات كبيرة، وذو تكلفة منخفضة للغاية تكاد تكون تكلفته فقط تكلفة الجمع والنقل، وخلوه نسبياً من الشوائب الضارة مقارنة ببعض المواد الخام الأخرى، لذا فإن تحويل كوز الصنوبر من نفايات إلى فحم منشط يمثل نموذجاً تطبيقياً جيداً لمفاهيم اقتصاد التدوير والتكنولوجيا النظيفة، حيث يتم تدوير المخلفات إلى منتج مفيد يساعد في حل مشكلة بيئية أخرى.

**2. أهمية البحث وأهدافه:**

تكمن أهمية هذا البحث في إيجاد بدائل طبيعية لإزالة بعض العناصر المعدنية الثقيلة من منصرفات معامل الدباغة وأهمها الكروم والكادميوم.

**يهدف البحث بشكل أساسي إلى:**

1- تصنيع فحم منشط من كوز الصنوبر والذي يعتبر أحد أنواع المخلفات الزراعية.

2- تحديد خواص الفحم الذي تم تصنيعه ومقارنة خواصه بخواص الفحم المنشط التجاري.

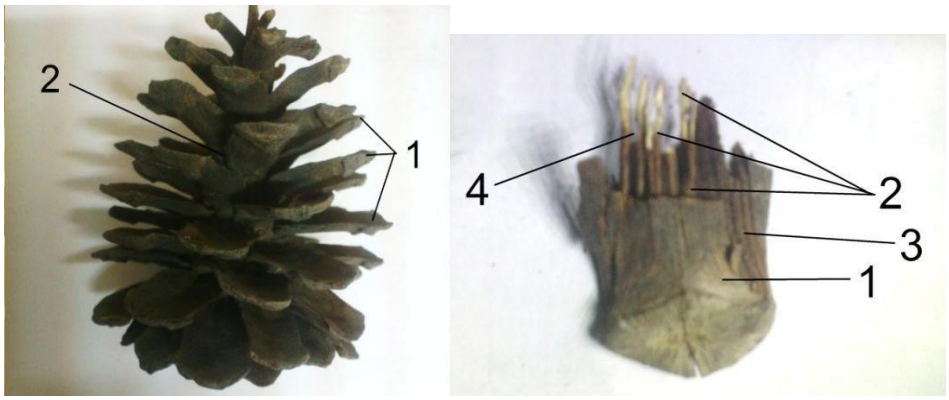
3- اختبار فعالية فحم كوز الصنوبر المنشط في إزالة كل من عنصري الكروم والكادميوم من مياه الصـــرف الناتجة عن معامل دباغة الجلود ومقارنتها بفعالية الإزالة التي يحققها الفحم التجاري.

**3. الدراسات المرجعية:**

بالعودة إلى الدراســات المرجعية، نجد أنه من الممكن النظر لهذا الموضــوع من عدة نواحي، فبعض الدراسات اهتمت بما يتعلق بإعادة تدوير كوز الصنوبر نفسه الذي يعد نفايات، والبعض الآخر اهتمت باســتخدام بعض مواد المخلفات لتصــنيع فحم منشــط واختبار فعالية الفحم المنتج، حيث تعطينا الأدبيات العلمية العديد من الدراسات ونذكر منها:

أجرى قرمو ورفاقه في عام 2016 دراسة كان الهدف منها دراسة خواص بعض مواد المخلفات الزراعية لتحديد إمكانية اســـتخدامها في العزل الحراري للمباني بعد تحويلها لألواح، وكان كوز الصـــنوبر الســـوري غير الثمري من أهم المواد المدروســـة، حيث تم تحديد بعض خواصـه الفيزيائية والتركيبية وهو في حالته الأولية، حيث قدم الباحث وصـفاً تركيبياً دقيقاً لكوز الصـــنوبر ككل ولحراشـــفه، حيث يتكون كوز الصـــنوبر من مخروط يحيط به حراشـــف شـــبه خشـــبية بســـماكة تتراوح ما بين 2-6 mm ، وتتكون كل حرشـــفة من أربع طبقات: الطبقة الأولى هي الطبقة العليا، وهي عبارة عن قشـــر بني اللون وهي الأقل ســـماكة وتكون قصـــفة وقاســـية. أما الطبقة الثانية فهي الطبقة الداخلية وتتكون من طبقتين، تكون احداها عبارة عن أعصاب متينة ذات طبيعة خشبية مرنة نوعاً ما تعمل كأعصاب تقوية، وتحيط بها طبقة ثانية

والتي تكون إما مادة ذات طبيعة متفتتة خشـــبية تغلف الأعصـــاب، أو فراغ هوائي يحيط بالأعصـــاب، أما الطبقة الأخيرة فهي طبقة ســـفلية، وهي شـــبيهة بالطبقة الأولى ولها نفس الطبيعة والمواصفات. حيث تتصل الطبقة الأخيرة بالطبقة الأولى في نهاية الحرشفة من الأمام لتشكلا سوياً غلاف الحرشفة بشكل كامل. ويوضح الشكل (1) كوز الصنوبر كاملاً وإحدى حراشف كوز الصنوبر.




a- بنية كوز الصنوبر

b- بنية طبقات احدى حراشف كوز الصنوبر

1- الحراشف 2- محور الكوز

1- الطبقة الأولى (قشر الحرشفة) 2- الطبقة الثانية (أعصاب)

3- الطبقة الثالثة ( المتفتتة) 3- الطبقة الرابعة (القشر السفلي)

**الشكل (1) كوز الصنوبر كاملاً وإحدى حراشف كوز الصنوبر [1]**

بينت الدراسة أن كثافة كوز الصنوبر $193.75\ kg/m^3$ ، وبلغت امتصاصيته للماء 40% من وزنه الاولي، ومن حيث اختبارات مقاومته للحرائق فقد كان قابلاً للاشـتعال بسـرعة اشتعال متوسطة مقارنةً بباقي المواد لتي تم اختبارها.[1]

قام كاديرفيلو ورفاقه في العام 2003 بإجراء بحث اســـتخدم فيه الباحثون مخلفات زراعية لتحضـــير فحم منشـــط وتطبيقه لإزالة الأصـــباغ وأيونات المعادن من المحاليل المائية، تم استخدام قشور القطن ونشارة خشب جوز الهند، حيث تم تحضير الفحم وتنشيطه، من ثم تم اختباره لإزالة الملوثات المذكورة، وأظهرت النتائج أن الفحم الذي تم اختباره قام بإزالة معظم الأصباغ بالإضافة لإزالته لأيونات الزئبق والنيكل، وذلك خلال فترة زمنية قصيرة جداً.[2]

وفي دراسة أخرى قام بها ديبي وزملاؤه عام 2015 تم تحضير الفحم المنشّط من قشور جوز الهند الخضراء بطريقة التنشيط الكيميائي واستخدامه في معالجة المياه الملوثة بأزرق الميثيلين. أشارت النتائج إلى أنّ قدرة الامتزاز تعتمد على حجم المسام، ومساحة السطح، وحجم المسام الدقيقة للفحم المنشّط. [3]

أجريت دراسة في عام 2016 من قبل أبو الرب وزملائه والتي عملت على إزالة رابع كلوروفينول من المياه الملوثة باستخدام الكربون المنشط المستخلص من نوى التمر المجففة، حيث تم تحضير خمسة أنواع مختلفة من الكربون المنشط من نوى التمر المجففة باستخدام الهواء وحمض الفوسفوريك كعوامل تنشيط. وقد حددت نسبة حمض الفوسفوريك إلى نوى التمر خصائص الكربون المنشط المُحضر؛ حيث تراوحت مساحة سطح النيتروجين المكافئة من 794 $m^2/g$ لنسبة 5:1 إلى 1707 $m^2/g$ لنسبة 2:1، بينما تراوح حجم المسام الدقيقة من 0.24 $cm^3/g$ لنسبة 5:1 إلى 0.59 $cm^3/g$ لنسبة 2:1. وتم اختبار الكربون المنشط المُحضر لإزالة رابع كلوروفينول من المحاليل المائية باستخدام عملية الامتزاز. وأظهر الكربون المنشط المُحضر بنسبة 2:1 أعلى قدرة على الامتزاز بحد أقصى بلغ 525 mg/g. وأظهرت دراسات الرقم الهيدروجيني عند التوازن أن إزالة رابع كلوروفينول تعتمد على الرقم الهيدروجيني. فبلغ الامتزاز أقصاه عند قيمة أس هيدروجيني متوازنة قدرها 5.5. وأظهرت الدراسات الديناميكية أن امتزاز رابع كلوروفينول على الكربون المنشط بنسبة 2:1 سريع، حيث تم بلوغ % 80 من أقصى امتصاص خلال أول 40 دقيقة. وقد تبين أن كلاً من الامتزاز السطحي والانتشار داخل الجسيمات آليتان فعالتان للامتزاز. وأشارت قيم المعاملات المبينة في الدراسة إلى قدرة الفحم المنشّط المحضّر على امتزاز مادة خماسي كلورفينول من المحاليل المائية بكفاءة عالية بحيث يمكن استخدامه عوضاً من المواد الأكثر كلفة [4].

## 4. مواد وطرائق البحث:

### 1.4.المواد والأجهزة:

### 1.1.4. المواد المستخدمة:

كوز الصنوبر (مادة أولية)- ماء مقطر (لعمليات الغسيل)- هيدروكسيد البوتاسيوم (لتنشيط الفحم)- حمض كلور الماء(لضبط الحموضة والغسيل)- نشاء الذرة (مادة رابطة)- مياه صناعية (مياه منصرفات مدابغ الجلود)- غاز النيتروجين (لتأمين جو خامل أثناء الكربنة)

### 2.1.4. الأجهزة المستخدمة:

فرن كهربائي (للكربنة) - مجفف مزود بمروحة (للتجفيف)- مطحنة (لطحن المواد الصلبة أثناء عملية التصنيع)- ميزان الكتروني دقيق- جهاز قياس الحموضة -خلية ترشيح- مفاعل اهتزازي- جهاز امتصاص ذري - جهاز اختبار الضغط الميكانيكي.

### 2.4.تحضير الفحم:

تمر عملية تصنيع الفحم المنشط بالعديد من المراحل، كمراحل التحضير الأولية، مروراً بالطحن والتفحيم وغيرها من مراحل التشطيب النهائية، وفيما يلي طريقة التي تم بها تحضير الفحم المنشط من أكواز الصنوبر ضمن هذا البحث.

**1- الجمع والتجفيف:**

تم جمع كمية من أكواز الصنوبر غير الثمري التي تساقطت من الأشجار في إحدى المناطق الحراجية، من ثم تم غسل تلك الأكواز بشكل جيد وتخليصها من الاوساخ والأتربة والغبار المتلاصق عليها، وتم بعد ذلك تجفيف تلك الأكواز باستخدام مجفف عند درجة حرارة 105 °C وذلك حتى ثبات الوزن، وبذلك أصبحت أكواز الصنوبر جاهزة للانتقال إلى الخطوة التي تليها.

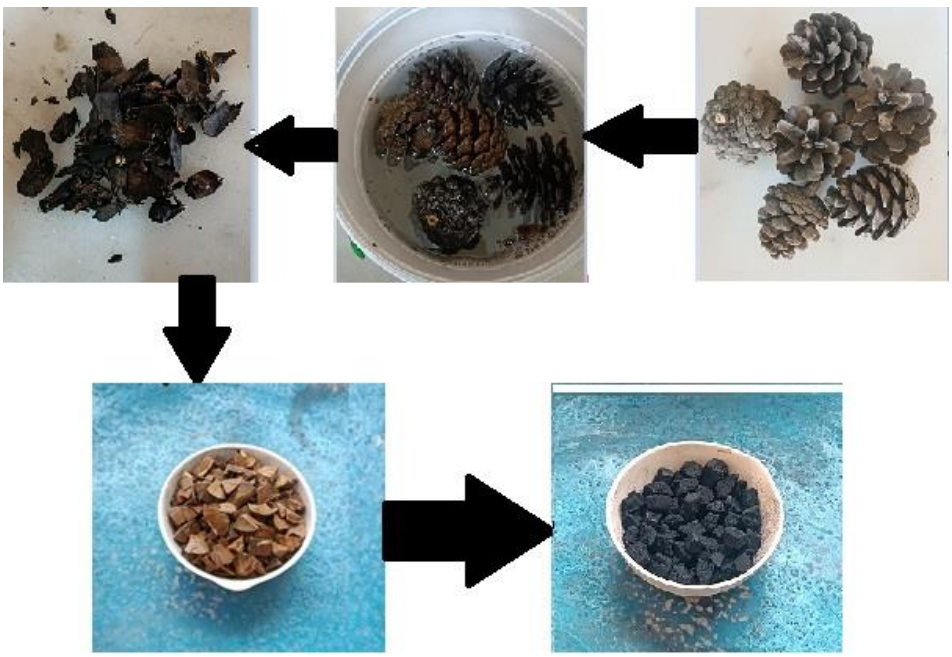
**2- التقطيع:**

بعد تجفيف أكواز الصنوبر تم البدء بعملية تقطيع وتكسير الأكواز لقطع صغيرة، حيث تم تكسير الحراشف الموجودة على محيط الكوز وفصلها عن مركز الكوز، من ثم تم

تقطيع المركز لقطع صغيرة مساوية بالحجم للحراشف، وبذلك أصبح لدينا مسحوق حُبيبي خشن تتراوح أبعاد كل حبة بين 0.5 cm حتى 1 cm تقريباً.

**3- الكربنة:**

تم في هذه المرحلة وضع كمية من المادة الأولية التي تم تحضيرها (أكواز الصنوبر المجففة والمقطعة) في فرن كهربائي وتشغيله، حيث تم ضبط درجة الحرارة على الدرجة 600 °C في جو خامل، فتمت العملية مع تدفق ثابت لغاز النيتروجين ضمن حجرة الفرن، وقد استمرت العملية لفترة تزيد عن الساعتين والنصف، حتى إتمام تفحيم المادة الأولية وتحولها إلى فحم، حيث تم التأكد من إتمام عملية التفحيم من خلال اخراج عينات من داخل الفرن اثناء التفحيم والعمل على طحنها والتأكد أن داخلها أصبح متفحماً (تفحيم من الداخل والخارج)، من ثم تم اخراج الفحم وتبريده حتى الوصول إلى درجة حرارة المحيط. ويظهر الشكل (2) مراحل عملية تصنيع الفحم وصولاً للكربنة.



الشكل (2) يبين مراحل عملية تصنيع الفحم وصولاً للكربنة

## 4- تشكيل وتنشيط حبيبات الفحم:

في هذه المرحلة تم تحويل الفحم الأولي الناتج عن عملية الكربنة إلى مادة قابلة للتشكيل والتنشيط الفعّال. حيث جرى طحن الفحم باستخدام مطحنة ميكانيكية للحصول على مسحوق فحمي ناعم ومتجانس نسبياً، وذلك بهدف زيادة مساحة التلامس بين الجسيمات وتحسين كفاءة المزج مع المواد المضافة في الخطوات اللاحقة.

بعد ذلك أضيف نشاء الذرة كمادة رابطة بنسبة وزنية مقدارها 10% من كتلة الفحم المطحون، لما يتمتع به من قدرة على تحسين التماسك البنيوي للحبيبات النهائية دون التأثير سلباً على خصائصها المسامية بعد المعالجة الحرارية، حيث بينت الأبحاث أن النسبة المعتمدة التي يتم استخدامها من النشاء كمادة رابطة تتراوح ما بين 5–12% [9] وعلى هذا الأساس تم تجربة عدة نسب مستخدمة وبينت التجربة العملية أن نسبة 10% تعطي أفضل أداء بنيوي. تم خلط المزيج خلطاً ميكانيكياً جيداً لضمان التوزيع المتجانس للمادة الرابطة ضمن كامل الكتلة الكربونية، الأمر الذي يسهم في الحصول على بنية متماسكة ومتجانسة عند التشكيل.

في الخطوة التالية أضيف هيدروكسيد البوتاسيوم (KOH) بتركيز % 85 كعامل تنشيط كيميائي، حيث يُعد من أكثر العوامل فاعلية في تطوير البنية المسامية للفحم المنشط. تم مزج المكونات لفترة زمنية كافية لضمان تفاعل أولي متجانس بين الفحم وعامل التنشيط، وتشكيل قوام عجيني متجانس يسمح بإجراء عملية التشكيل دون حدوث تكتلات موضعية أو تباين في التركيب .[9]

أُخضعت العجينة الناتجة لعملية ضغط وتشكيل باستخدام قالب مناسب للحصول على حبيبات منتظمة الشكل ومتقاربة الأبعاد، بما يحقق تجانساً في الخصائص الفيزيائية ويجعلها مماثلة – من حيث الشكل والحجم – للحبيبات التجارية المستخدمة في تطبيقات أعمدة الامتزاز. وتكتسب هذه الخطوة أهمية عملية، إذ إن انتظام الشكل يسهم في تحسين توزيع الجريان وتقليل فقدان الضغط عند الاستخدام الصناعي.

عقب التشكيل، وُضعت الحبيبات في فرن حراري تحت جو خامل من غاز النيتروجين يُضـــخ بمعدل تدفق ثابت لمنع حدوث الأكســـدة أو الاحتراق الجزئي للبنية الكربونية. رُفعت درجة الحرارة تدريجياً حتى 500°C ، وتم الحفاظ عليها لمدة تزيد عن ساعة ونصف لضمان اكتمال عملية التنشيط الكيميائي.

تؤدي هذه المعالجة الحرارية بوجود KOH إلى حدوث تفاعلات اختزالية وإعادة ترتيب للبنية الكربونية، ينتج عنها تطوير شـبكة مسـامية متقدمة تتضـمن مسـامات دقيقة ومسامات متوسطة، إضافة إلى تشققات داخلية على المستويين الميكروي والنانوّي. وتعمل هذه البنية المسـامية المتطورة على زيادة المسـاحة السـطحية النوعية للفحم المنشـط، وتعزيز عدد المواقع الفعالـة القادرة على امتزاز الملوثات، ممـا ينعكس مباشـــرة على رفع كفاءة الأداء الامتزازي للمادة الناتجة.

وفي نهاية عملية التنشـــيط، أُخرجت الحبيبات من الفرن وتركَت لتبرد تدريجياً إلى درجة حرارة الغرفة تحت ظروف خاضـعة للتحكم، حفاظاً على اسـتقرار بنيتها المسـامية ومنع حدوث إجهادات حرارية قد تؤثر في متانتها الميكانيكية.

**5- الغسيل النهائي وضبط الرقم الهيدروجيني للفحم:**

المرحلة النهائية تضـمنت الغسـيل النهائي للفحم وتجفيفه، وتخلل هذه المرحلة تعديل الرقم الهيدروجيني للفحم الناتج، حيث تم غســـيل الفحم بحمض كلور الماء ثم بالماء المقطر عدة مرات، مع قياس pH مياه الغسيل لتحديد الرقم الهيدروجيني للفحم الناتج، وبعد الوصـول لرقم هيدروجيني 7 تم وضـــع الفحم الناتج في مجفف عند درجة حرارة 105°C لفترة زمنية كافية وذلك حتى ثبات الوزن، من ثم تم التبريد حتى الوصـــول لدرجة حرارة الغرفة، وبذلك أصبح الفحم المنشط جاهزاً لاختباره وتحديد خواصه.

**3.4. تحديد خواص فحم كوز الصنوبر المنشط المنتج:**

تم اجراء بعض القياسات والاختبارات لتوصيف الفحم المنشط الناتج وتحديد بعض خواصه، وهي تحديد الكثافة الظاهرية، تحديد نسبة الرماد، تحديد رقم اليود، توصيف البنية المجهرية، وتحديد مقاومته الميكانيكية (مقاومة الكسر نتيجة الضغط)، حيث تمت جميع الاختبارات والقياسات وفقاً للمواصفات والمقاييس العالمية المعمول بها.

**1- تحديد الكثافة:**

تم تحديد الكثافة الظاهرية لفحم كوز الصنوبر المنتج وذلك بتحديد كلاً من وزن حبيبات الفحم وتحديد حجمها، حيث تم تحديد وزن عدد من حبيبات الفحم منتظمة الشكل باستخدام ميزان رقمي دقيق، وتم تحديد أحجامها وذلك بقياس أبعادها باستخدام بياكولس وحساب أحجامها، من ثم بقسمة الوزن على الحجم يتم تحديد كثافة كل حبيبة فحم. تم هذا الإجراء على عدد من حبيبات الفحم وحساب متوسط الكثافة. تم تطبيق هذا القياس على كل من فحم كوز الصنوبر والفحم التجاري.

تم تطبيق هذا الإجراء بالاعتماد معايير الجمعية الأمريكية للمواصفات والمقاييس ASTM وفقاً للمواصفة القياسية الأمريكية ASTM D2854-09(2025). [5]

**2- تحديد نسبة الرماد:**

يُعد تحديد نسبة الرماد من الاختبارات الأساسية في توصيف جودة الفحم المنشط، لما لهذا العامل من تأثير مباشر في أدائه التطبيقي، سواء في تنقية المياه أو معالجة الهواء أو الاستخدامات الصناعية الأخرى.

تم تنفيذ اختبار تحديد نسبة الرماد وفقاً للمواصفة القياسية للجمعية الأمريكية لاختبار المواد ASTM D2866-11 [6] ، والتي تُعنى بتحديد المحتوى الكلي للرماد في الفحم المنشط تحت ظروف احتراق مضبوطة. وقد طُبق هذا الإجراء على كل من الفحم المنشط المصنَّع من كوز الصنوبر والفحم المنشط التجاري المستخدم كعينة مرجعية، وذلك بهدف إجراء مقارنة علمية دقيقة بين العينتين من حيث درجة النقاوة وجودة البنية الكربونية.

أُجريت التجربة وفق الخطوات الآتية: في البداية تم تجفيف عينات من كلاً النوعين من الفحم في مجفف عند درجة مناسبة حتى ثبات الوزن، وذلك لضمان إزالة أي رطوبة متبقية قد تؤثر في دقة القياس. بعد ذلك وُزنت كمية مقدارها 10 g من كل عينة مجففة باستخدام ميزان تحليلي عالي الدقة، ثم وُضعت العينات في بواتق خزفية مقاومة لدرجات الحرارة المرتفعة.

نُقلت البواتق إلى فرن احتراق (مرمدة)، حيث رُفعت درجة الحرارة تدريجياً إلى ما يقارب 800 °C مع تأمين دخول هواء كافٍ لضمان الاحتراق الكامل للمكوّن الكربوني. استمرت عملية الترميد ثلاث ساعات، وهي مدة كافية لإتمام الأكسدة الكاملة وتحويل الجزء العضوي إلى غازات متطايرة، مع بقاء المكونات غير العضوية على شكل رماد. بعد انتهاء فترة الاحتراق، أُخرجت البواتق من الفرن وتركَت لتبرد في وسط معزول لمنع امتصاص الرطوبة من الجو، ثم وُزن الرماد المتبقي بدقة. تم بعد ذلك وزن رماد العينات المدروسة، من ثم تم حساب نسبة الرماد من خلال العلاقة التالية:

$$\text{نسبة الرماد}[\%] = \frac{W2}{W1} X100$$

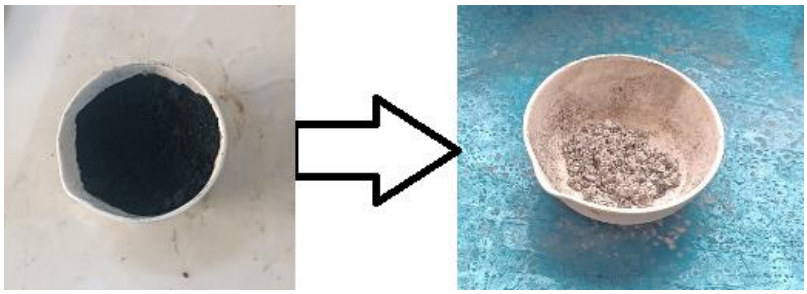
حيث: W1: وزن العينة قبل الترميد، W2: وزن الرماد المتبقي.

بلغ وزن الرماد المتبقي في عينة الفحم المنشط المصنوع من كوز الصنوبر 0.41 g، في حين بلغ وزن الرماد في العينة المرجعية التجارية 0.49 g. وبحساب نسبة الرماد

وبتطبيق العلاقة السابقة، بلغت نسبة الرماد في الفحم المنشط المصنَّع من كوز الصنوبر 4.1% ، بينما بلغت في الفحم المنشط التجاري 4.9 %. وتُعد هاتان القيمتان ضمن الحدود المقبولة للفحم المنشط عالي الجودة، إذ تشير الأدبيات إلى أن نسبة الرماد الأقل من 5–6 % تُعتبر مؤشراً جيداً على نقاوة المادة وكفاءتها في التطبيقات الامتزازية.

ويُلاحظ من النتائج أن الفحم المصنَّع من كوز الصنوبر أظهر نسبة رماد أقل من العينة التجارية، مما يعكس انخفاض المحتوى غير العضوي فيه، ويُحتمل أن يكون ذلك ناتجاً

عن طبيعة المادة الأولية الزراعية المستخدمة أو كفاءة عمليات الغسيل بعد التنشيط. ويعزز هذا الانخفاض في نسبة الرماد من قابلية الفحم المصنَّع لاستخدامه في تطبيقات معالجة المياه وتنقية الهواء، حيث يساهم في الحفاظ على كفاءة المسامات وتقليل احتمال إطلاق شوائب معدنية إلى الوسط المعالج. يظهر الشكل (3) ترميد الفحم.



**الشكل (3) عملية ترميد الفحم لتحديد نسبة الرماد فيه.**

### 3- تحديد رقم اليود:

يُعتبر رقم اليود (Iodine Number) أحد المعايير الأساسية والمؤشرات الحيوية الهامة المستخدمة على نطاق واسع في تقييم جودة وكفاءة الفحم المنشط. فهو لا يقتصر على كونه مقياساً كمياً فحسب، بل يُعد انعكاساً مباشراً للخصائص البنيوية الدقيقة للمادة المازة. يقدم رقم اليود تقديراً غير مباشر لكل من درجة المسامية والمساحة السطحية الكلية للفحم المنشط، كما يُستخدم كمؤشر فعال لمستوى التنشيط الذي تعرضت له المادة الكربونية أثناء عملية التصنيع. توجد علاقة طردية واضحة بين هذه القيمة والمساحة السطحية؛ فكلما ارتفعت قيمة رقم اليود، دل ذلك على اتساع المساحة السطحية للحبيبات، مما يعني زيادة المواقع النشطة القادرة على الامتزاز. يُعرف رقم اليود تقنياً بأنه كمية اليود المقدرة بالـ mg والتي يمكن أن يمتزها g 1 من الفحم المنشط. تم إجراء قياسات رقم اليود اعتماداً على المواصفات القياسية المحددة من الجمعية الأمريكية للمواصفات والمقاييس ووفقاً للمواصفة ASTM D4607 [7] لضمان دقة النتائج وقابليتها للمقارنة مع الدراسات الأخرى.

تم الاجراء العملي لتحديد رقم اليود باتباع الخطوات المنهجية التالية بدقة متناهية:

تم في البداية تحضير العينات فتم أولاً وزن كمية محددة بدقة من عينة الفحم المنشط المُصنّعة في البحث (والتي تم الحصول عليها من كوز الصنوبر). وفي خطوة موازية، تم وزن كمية مطابقة تماماً من عينة فحم منشط مرجعية تجارية (قياسية) لغرض المقارنة. تم نقل كل عينة على حدة إلى دورق زجاجي نظيف ومُجفف. بعد ذلك، تمت إضـــافة حجم معين من محلول يود قياســـي بتركيز معلوم إلى كلا الدورقين المحتويين على عينات الفحم، مع التأكيد على تساوي الكمية المضافة لضمان تكافؤ الظروف الأولية. ثم عُرضتا لعملية رج ميكانيكي مستمر لمدة كافية لضمان تحقيق أقصى قدر ممكن من الانتشار والتماس بين جزيئات اليود وسطح الفحم المسامي. تلا ذلك فترة سكون (زمن تماس) محددة زمنياً للسماح بوصول عملية الامتزاز إلى حالة قريبة من الاتزان، حيث يتمكن الفحم من امتزاز أكبر كمية من اليود. بعد انقضاء زمن التماس، تم ترشيح محتويات كل دورق على حدة باستخدام ورق ترشيح مناسب. تهدف عملية الترشـــيح إلى فصـــل حبيبات الفحم المنشـــط (التي امتزت اليود) عن المحلول المائي المتبقي الذي يحتوي على اليود الذي لم يتم امتزازه (الراشح). تم جمع الراشح الناتج من كل عينة، ثم جرى تحديد تركيز اليود المتبقي فيه عن طريق عملية المعايرة بالتحليل الحجمي. استخدم في هذه المعايرة محلول قياسي من ثيوسلفات الصوديوم كمحلول معايرة، مع استخدام دليل النشا للكشف عن نقطة نهاية التفاعل. ومن خلال الفرق بين كمية اليود الابتدائية والكمية المتبقية في الراشـح، تم حسـاب كمية اليود التي امتزها الغرام الواحد من الفحم، أي رقم اليود، حيث بلغ رقم اليود في فحم كوز الصنوبر المنشط 782 mg/g بينما بلغ هذا الرقم في الفحم التجار المعياري 702 mg/g .

**4- التوصيف المجهري:**

تم اجراء مسـح مجهري لسـطح حبيبات الفحم التي تم تصـنيعها في البحث الحالي، والتي تم تصنيعها باستخدام أكواز الصنوبر، وتم ذلك باستخدام المجهر الالكتروني الماسح (SEM)، وتم تطبيق الاجراء على حبيبات فحم كوز الصنوبر وعلى الفحم التجاري المرجعي.

**5- تحديد المقاومة الميكانيكية:**

يعد اختبار المقاومة الميكانيكية أحد أهم الاختبارات التي يتوجب القيام بها، وذلك تحديد مقاومة الفحم المنشط للقوى والضغوط التي يتعرض لها أثناء التشغيل وأثناء عمليات النقل، حيث يتعرض الفحم أثناء استخدامه إلى ضغوط أحمال وخاصةً عند استخدامه في أعمدة تنقية المياه، ولذلك يجب أن يتمتع الفحم المنشط بمتانة ميكانيكية جيدة، تجعله مقاوماً لتلك الضغوط والأحمال.

لذلك تم اجراء اختبار تحديد مقاومة الفحم المنشط لقوى الكسر الناتجة عن الضغط، وذلك باستخدام جهاز خاص مخصص لذلك، حيث توضع عينة الفحم بين فكي الجهاز، أحدهما فك ثابت والآخر فك متحرك، من ثم يتم تطبيق قوة ضغط متزايدة على الفك المتحرك، فتعمل على تحريك الفك المتحرك بسرعة ثابتة بشكل يعمل على ضغط العينة بين الفكين، فيتشكل اجهاد مطبق على عينة الفحم نتيجة القوة المطبقة عليها، وتستمر القوة المطبقة بالازدياد حتى انهيار العينة المختبرة، وتكون نقطة الانهيار هي نقطة تحمل العينة لقوة الكسر نتيجة الضغط، وعندها يتم حساب اجهاد الكسر نتيجة الضغط، ويم حسابه وفقاً للعلاقة التالية:

$$\sigma = F/A$$

حيث: $\sigma$: اجهاد الانكسار بـ MPa ، F: القوة التي تنكسر عندها العينة بـ N

A: مساحة سطح العينة بـ $m^2$

تم تطبيق هذا الاختبار وفقاً للجمعية الأمريكية للمواصفات والمقاييس بالاعتماد على المواصفة القياسية ASTM D4179-22. [8]

**4.4. اختبار كفاءة إزالة فحم كوز الصنوبر لعنصري الكروم والكادميوم من مياه منصرفات معامل دباغة الجلود:**

تم جمع عينات من المياه الناتجة عن أحد معامل دباغة الجلود، وتمت عملية الجمع وفق الطرق الفنية المتبعة اصولاً باستخدام أواني زجاجية معقمة ومخصصة لهذا الغرض، من ثم تم اجراء ترشيح أولي لعينات المياه المقطوفة وذلك للتخلص من الشوائب الصلبة المعلقة

وجميع المواد التي يمكن ترشيحها، وتمت هذه العملية باستخدام خلية ترشيح، من ثم أُخذ الراشح للتحليل باستخدام جهاز الامتصاص الذري، وذلك لتحديد التركيز الأولي لكل من عنصري الكروم والكادميوم، حيث يتواجد هاذان العنصران في المياه الناتجة عن معامل دباغة الجلود بتراكيز مرتفعة.

بعد اجراء تحليل للمياه وتحديد تراكيز الكروم والكادميوم، تم اجراء معالجة للمياه باستخدام الفحم المنشط الذي تم تصنيعه في البحث الحالي (فحم كوز الصنوبر)، وتم تطبيق نفس الاجراء باستخدام الفحم التجاري المرجعي، وتم ذلك بغرض إزالة الكروم والكادميوم من المياه الملوثة الناتجة عن معامل الدباغة باستخدام هاذان النوعان من الفحم المنشط وتحديد كفاءة كل منهما في الازالة.

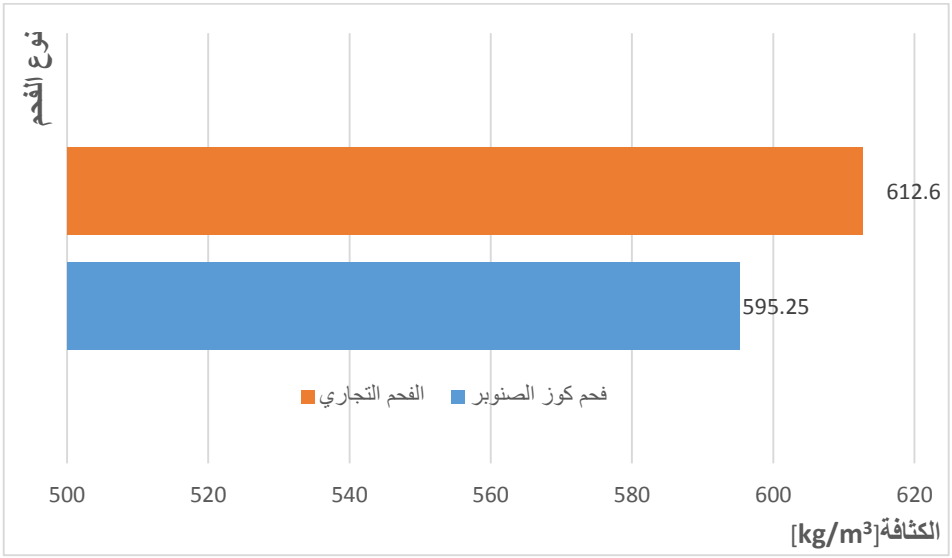
تمت عملية المعالجة بوضع كميات متساوية من المياه الملوثة بعدد من الأواني الزجاجية المخبرية، كمية المياه في كل آنية زجاجية تبلغ 500 ml ، وتم بعد ذلك وضع كميات متدرجة من الفحم المنشط في كل آنية ومن كل نوع من أنواع الفحم المنشط المدروس، فوضع في الآنية الأولى 0.5 g من فحم كوز الصنوبر المنشط، وفي الثانية 1 g وفي الثالثة 2 g وفي الرابعة 4 g والخامسة 6 g والسادسة 8 g ، وتم وضع كميات مماثلة من الفحم المنشط التجاري في الأواني الزجاجية الأخرى وبنفس الظروف، وتم بعد ذلك وضع الأواني الزجاجية على جهاز هزاز يعمل على رج العينات بشكل جيد من أجل تحقيق أكبر قدر من الانتشار لضمان تحقيق أقصى قدر ممكن من الانتشار والتماس بين سطح الفحم المسامي وبين الملوثات التي تحتويها المياه، وبالتالي تحقيق أكبر قدر من الامتزاز الممكن، واستمرت هذه العملية لفترة زمنية تزيد عن الساعة، ثم تم ترك العينات فترة إضافية من أجل السماح بوصول عملية الامتزاز إلى حالة قريبة من الاتزان.

تم بعد ذلك تم فصل الفحم ضمن كل عينة عن الراشح، وأخذ العينات للتحليل بجهاز الامتصاص الذري، وذلك لتحديد التراكيز الجديدة للكروم والكادميوم لجميع العينات.

## 5. النتائج والمناقشة:

بعد الانتهاء من إجراء القياسات والاختبارات التي تحدد أهم خواص الفحم المنشط المصنوع من كوز الصنوبر والفحم المنشط التجاري المستخدم للمقارنة، أصبح بالإمكان النظر لنتائج الاختبارات وترتيبها وإجراء المقارنات المناسبة فيما بينها.

عند النظر لنتائج اختبار تحديد الكثافة، نجد بأن نتائج الكثافات كانت متقاربة نسبياً، ويبين الشكل (4) مقارنة بين نتائج الكثافة في العينات المدروسة.

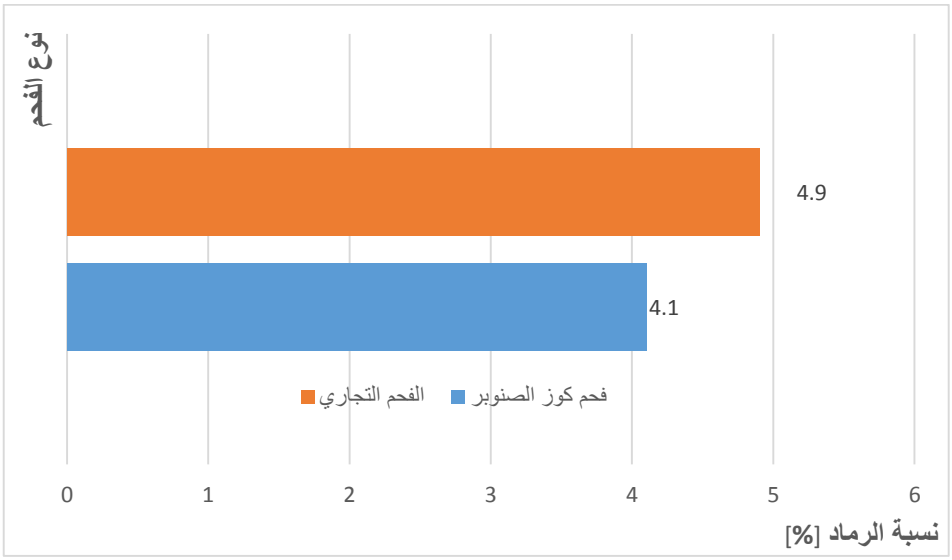



**الشكل (4) يبين مقارنة بين كثافة فحم كوز الصنوبر وكثافة الفحم التجاري**

يُلاحظ من الشكل السابق بأن كثافة فحم كوز الصنوبر المنشط كانت أصغر من كثافة الفحم التجاري المرجعي، حيث بلغت 595.25 $kg/cm^3$ بينما بلغت كثافة الفحم التجاري (المرجعي) 612.6 $kg/cm^3$ ، ويمكن أن يعود ذلك لعدة أسباب أهمها: طبيعة المادة الأولية المصنوع منها كل نوع من أنواع الفحم المدروس، فلكل مادة كثافة أولية يكون لها دور هام في تحديد الكثافة النهائية للفحم المنشط. وقد يعود السبب أيضاً لعملية الضغط أثناء تشكيل حبيبات الفحم، فكلما زاد الضغط ازدادت معه كثافة الفحم النهائية. وتلعب عملية تنشيط الفحم أيضاً دوراً هاماً في تحديد كثافة حبيبات الفحم، فكلما ازادت فعالية التنشيط انخفضت معها كثافة

حبيبات الفحم المنشط. وقد تحدد العوامل الثلاثة معاً مجتمعة تلك الكثافة مع تفاوت في تأثير كل عامل. من خلال نتائج قياس الكثافة لكلا النوعين من الفحم المنشط، يمكننا ملاحظة أن الكثافة المقاسة لكلا النوعين تعتبران ذات قيم جيدة، ومتوافقة مع نتائج امتزاز الفحم للملوثات المدروسة ومع نسبة الفراغات والمسامات الظاهرة من خلال الصور المجهرية.

أعطت نتائج اختبارات نسبة الرماد لعينات الفحم المختبرة نتائج متباينة نسبياً، وقد تم تبيان تلك النتائج في المخطط الشريطي المعروض ضمن الشكل (5).

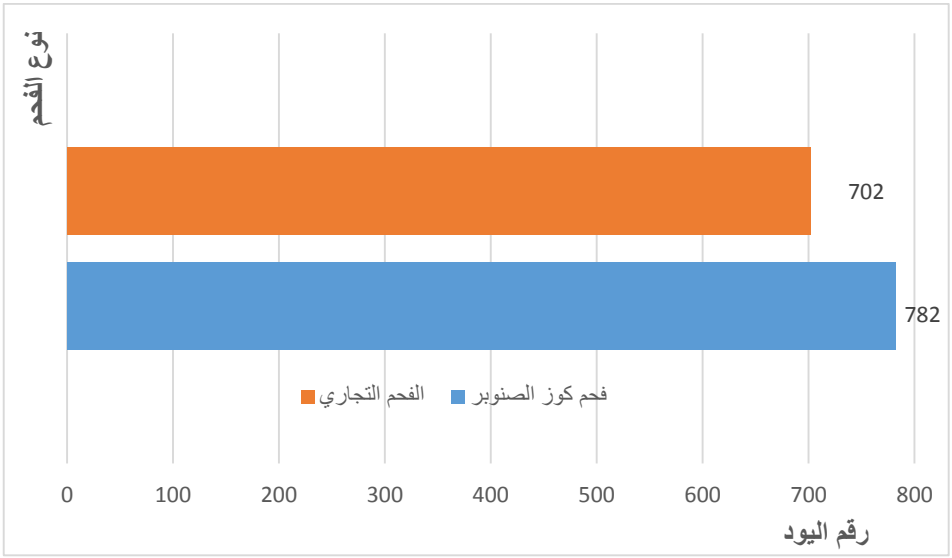



**الشكل (5) مقارنة نسبة الرماد بين فحم كوز الصنوبر والفحم التجاري**

نلاحظ من الشكل السابق أن نسبة الرماد الناتجة عن عينات فحم كوز الصنوبر أصغر من نسبة الرماد الناتجة من عينات الفحم التجار فقد بلغت تلك النسبة في فحم كوز الصنوبر 4.1 % بينما بلغت في الفحم التجاري 4.9 %، ويعود سبب ارتفاع نسبة الرماد في نوع عن الآخر هو لوجود جزء من المواد غير العضوية المتبقية بعد الاحتراق الكامل للمادة الكربونية، والتي تتكون عادةً من أكاسيد ومعادن وشوائب معدنية مصدرها المادة الأولية أو المواد الكيميائية المستخدمة في عمليات التنشيط والغسيل. وإن ارتفاع نسبة الرماد قد يؤدي إلى تقليل المساحة

السطحية الفعالة، وانخفاض عدد المواقع النشطة المتاحة للامتزاز، إضافة إلى احتمال تداخل المكونات المعدنية مع آلية الامتزاز من خلال تغيير الشحنة السطحية أو إحداث انسداد جزئي للمسام. لذلك يُنظر إلى انخفاض نسبة الرماد كمؤشر إيجابي يدل على نقاوة أعلى وبنية مسامية أكثر كفاءة، ومن ثم أداء امتزازي أفضل.

من خلال مقارنة نتائج اختبار رقم اليود الذي جرى على فحم كوز الصنوبر المنشط وعلى الفحم التجاري المنشط، لوحظ وجود تفاوت في رقم اليود، وقد تم تبيان هذا التفاوت في الشكل (6) الذي يبين مقارنة رقم اليود لعينات فحم كوز الصنوبر المنشط مع عينات الفحم التجاري المرجعي.

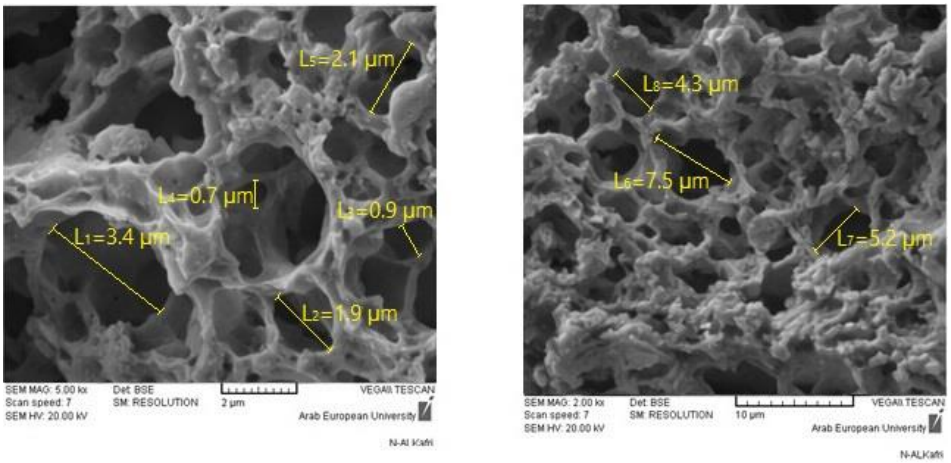



**الشكل (6) مقارنة رقم اليود بين فحم كوز الصنوبر والفحم التجاري**

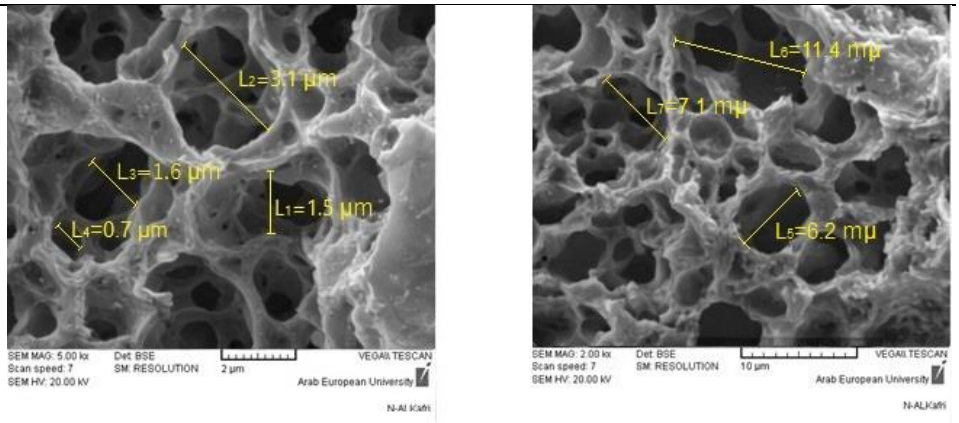
يُلاحظ من الشكل السابق أن الاختبارات بينت أن رقم اليود الخاص بفحم كوز الصنوبر المنشط تفوق على رقم اليود الخاص بالفحم التجاري المرجعي، فقد بلغ رقم اليود في فحم كوز الصنوبر المنشط 782 mg/g بينما بلغ هذا الرقم في الفحم التجار المعياري 702 mg/g .

إن زيادة رقم اليود الخاص بفحم كوز الصنوبر عنه في الفحم التجاري يدل على أن مساحة السطح الفعال للنوع الأول أكبر من النوع الثاني، هذا يعطي فحم كوز الصنوبر تفوقاً من ناحية قدرته على الامتزاز، لأن زيادة المساحة السطحية تعمل على زيادة قدرته على امتزاز أكبر قدر من الملوثات، وإن زيادة السطح النوعي الفعال تأتي من زيادة المسام والشقوق ضمن العينات، والتي تنتج عن فعالية عملية التنشيط وقدرتها على صنع تلك المسام والشقوق.

أظهر الفحص المجهري لعينات فحم كوز الصنوبر وعينات الفحم التجاري البنية الهيكلية لحبيبات الفحم، ويظهر الشكل (7) والشكل (8) صور مجهرية لحبيبات فحم كوز الصنوبر وحبيبات الفحم التجاري على الترتيب

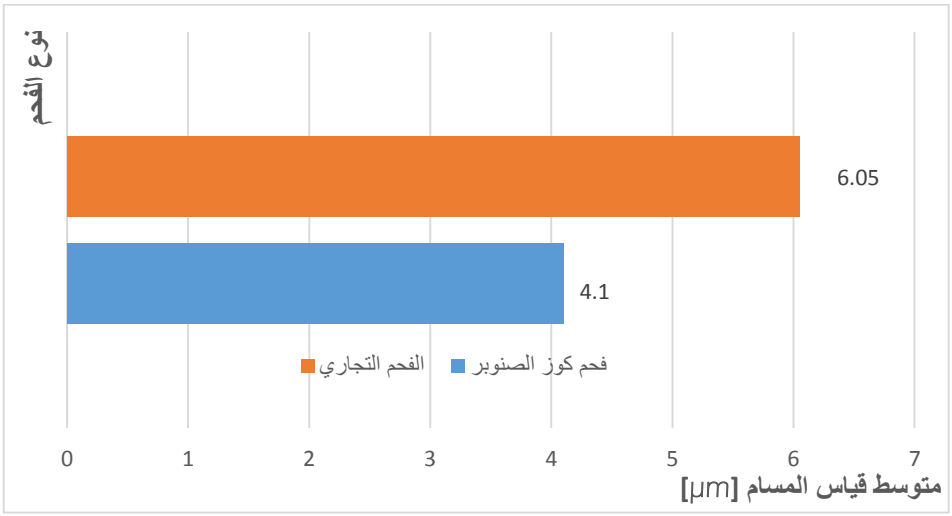



**الشكل (7) البنية المجهرية لفحم كوز الصنوبر المنشط**




**الشكل (8) البنية المجهرية للفحم المنشط التجاري (المرجعي)**

بالنظر للصور المجهرية لعينات الفحم المنشط المدروسة والمبينة في الشكل (7) لفحم كوز الصنوبر المنشط والشكل (8) للفحم التجاري المرجعي، نلاحظ تشابه في البنية الهيكلية لكلا العينتان، وهذا ما يفسر تقارب نتائج الخواص الأخرى، ويلاحظ أيضاً أن مجال أبعاد المسام في فحم كوز الصنوبر يتراوح ما بين 0.7 µm و 7.5 µm وكان المتوسط 4.1 µm ، بينما تراوحت الأبعاد في عينات الفحم التجاري ما بين 0.7 µm و 11.4 µm وكان المتوسط 6.05 µm ، أما من حيث كثافة المسام، فقد كان لعينات فحم كوز الصنوبر كثافة مسام أكبر من كثافة مسام الفحم التجاري، وهذا ما يفسر أن الكثافة الظاهرية لفحم كوز الصنوبر أقل من الكثافة الظاهرية للفحم المنشط التجاري، ويبين الشكل (9) مقارنة ما بين متوسط قياس المسام في النوعين المدروسين من الفحم المنشط.

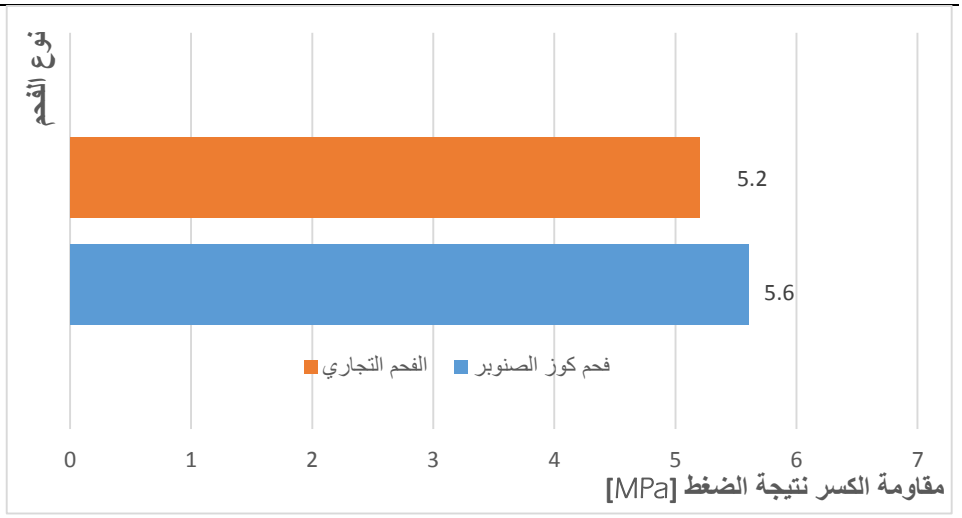



**الشكل (9) مقارنة متوسط مقاس المسام بين فحم كوز الصنوبر والفحم التجاري المرجعي**

يُلاحظ من الشكل السابق أن متوسط مقاس المسام في الفحم التجاري أكبر من متوسط مقاس مسام فحم كوز الصنوبر، وعلى الرغم من ذلك فقد كانت الكثافة الظاهرية لفحم كوز الصنوبر أصغر، وما يفسر ذلك هو تفوق تأثير عامل كثافة المسام على تأثير عامل متوسط مقاس المسام، والذي أدى بدوه إلى انخفاض الكثافة الظاهرية لفحم كوز الصنوبر عنه في الفحم التجاري.

إن النتائج التي تم الحصول عليها من خلال الصور المجهرية والكثافة الظاهرية تعكس مدى جودة الفحم المنشط الذي تم تصنيعه، وأكد ذلك نتائج اختبار اليود حيث امتز الفحم المدروس كمية جيدة من اليود وهذا ما يعطي مقياساً لمساحة السطح الفعال الكبيرة للفحم المنتج.

بالانتقال إلى نتائج اختبار الكسر نتيجة الضغط نجد بأنه يوجد تفاوت في قيم تحمل كل نوع من أنواع الفحم، وقد تم تبيان النتائج في الشكل (10).

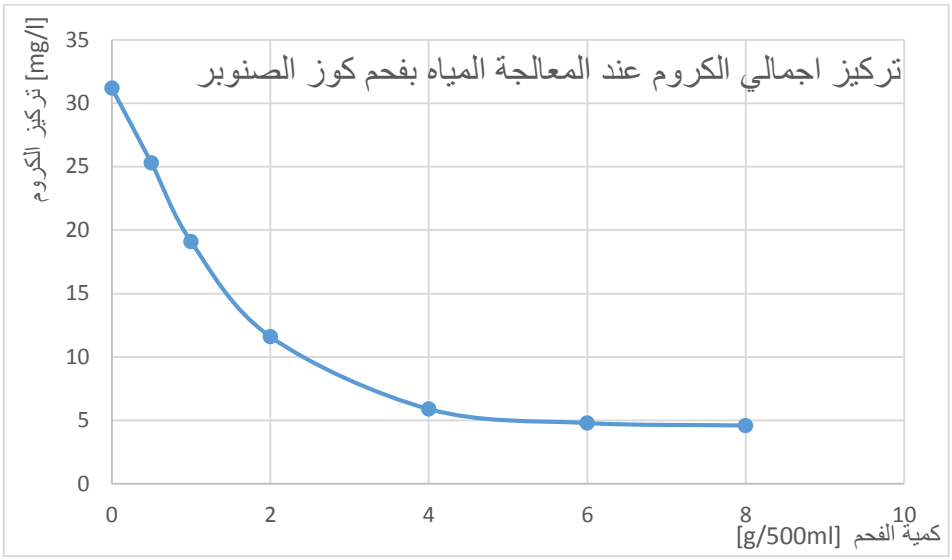



**الشكل (10) مقارنة مقاومة الكسر نتيجة الضغط بين فحم كوز الصنوبر والفحم التجاري**

بالنظر للشكل السابق نجد بأن مقاومة الكسر لفحم كوز الصنوبر أكبر من مقاومة الكسر للفحم التجاري، حيث انهارت عينة فحم كوز الصنوبر عند قيمة قوة بلغت 5.6 MPa بينما كانت قيمة قوة مقاومة الانكسار لعينة الفحم التجاري 5.2 MPa .

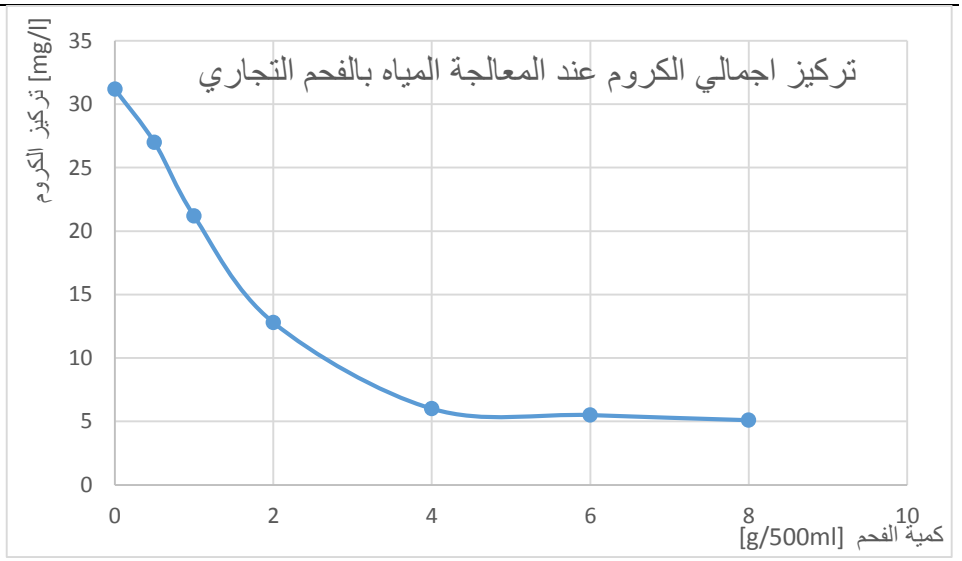
يمكن تفسير تفوق فحم كوز الصنوبر من حيث القوة الميكانيكية لعدة أسباب، أهمها: طبيعة المادة الأولية المستخدمة في تصنيع الفحم، بالإضافة لقوة الضغط المطبقة لتشكيل حبيبات الفحم، فكلما زادت تلك القوة كلما زاد تماسك تلك الحبيبات، وتلعب جودة المادة الرابطة (النشاء) ونسبتها دوراً في تحديد متانة الحبيبات، وإن تفوق فحم كوز الصنوبر من حيث المتانة هو نتيجة تفوقه من حيث العوامل التي تم ذكرها.

بعد أن تم معالجة المياه الملوثة الناتجة عن معامل دباغة الجلود باستخدام كل من فحم كوز الصنوبر والفحم التجاري وبكميات فحم مختلفة، تم رسم المنحنيات التي تبين تغير تراكيز الملوثات المدروسة مع تغير كمية الفحم المستخدم في المعالجة. ويبين الشكلان (11) و (12) رسم المنحنيات البيانية التي تبين تغير تركيز الكروم مع تغير كمية الفحم المستخدمة في معالجة المياه، وذلك عند استخدام كلا النوعين من الفحم المنشط، وهما فحم كوز الصنوبر المنشط والفحم التجاري المرجعي المنشط.




**الشكل (11) تغير تركيز اجمالي الكروم في العينات مع تغيير كمية فحم كوز الصنوبر المنشط المستخدم للمعالجة**

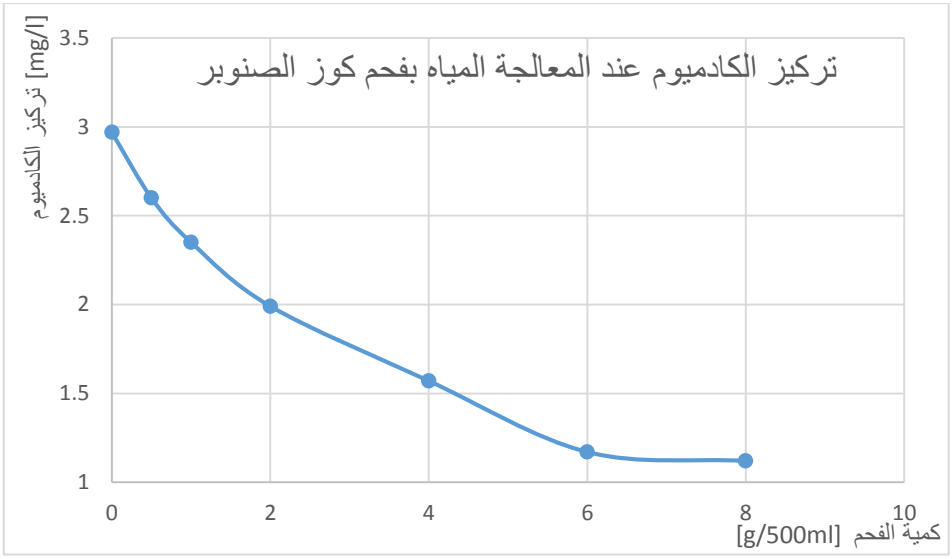
يُلاحظ من خلال الشكل (11) أن التركيز الأولي لإجمالي الكروم الموجود في مياه صرف معامل دباغة الجلود قبل المعالجة كان 31.2 mg/l ، وبعد البدء بالمعالجة باستخدام فحم كوز الصنوبر المنشط بدأت تلك التراكيز بالانخفاض نتيجة امتزاز الفحم المنشط لتلك الملوثات، حيث أصبح تركيز الكروم عند استخدام 0.5 g/500ml من الفحم المنشط 25.3 mg/l ، واستمرت تلك التراكيز بالانخفاض حتى وصلت 19.1 mg/l عند كمية فحم تبلغ 1 g/500ml ، وواصل تركيز الكروم انخفاضه إلى تراكيز 11.6 mg/l و 5.9 mg/l و 4.8 mg/l و 4.6 mg/l عند كميات فحم تم استخدامها في المعالجة بلغت 2 g/500ml و 4 g/500ml و 6 g/500ml و 8 g/500ml على التوالي، حيث بدأ التركيز بالاستقرار تقريباً عند كمية فحم 6 g/500ml حيث لم يعد لزيادة كمية الفحم تأثير كبير على انخفاض تركيز الكروم وبالتالي لم يعد لعملية زيادة كمية الفحم جدوى اقتصادية، وبالتالي يمكن اعتماد كمية 6 g/500ml من فحم كوز الصنوبر كأفضل كمية في امتزاز الكروم من مياه التصريف لمعامل دباغة الجلود.




**الشكل (12) تغير تركيز اجمالي الكروم في العينات مع تغيير كمية الفحم التجاري المنشط المستخدم للمعالجة**

يتضح من خلال الشكل (12) أن التركيز الأولي لإجمالي الكروم الموجود في المياه المدروسة قبل عملية المعالجة كان 31.2 mg/l ، وبعد البدء بالمعالجة باستخدام الفحم المنشط التجاري بدأت التراكيز بالانخفاض نتيجة امتزاز الفحم المنشط لتلك الملوثات، حيث أصبح تركيز الكروم عند استخدام 0.5 g/500ml من الفحم المنشط 27 mg/l ، واستمرت تراكيز الكروم بالانخفاض مع زيادة كمية الفحم المستخدمة في المعالجة، فبلغت التراكيز 21.2 mg/l و 12.8 mg/l و 6.4 mg/l و 5.5 mg/l و 5.1 mg/l عند كميات فحم منشط تم استخدامها في المعالجة بلغت 1 g/500ml و 2 g/500ml و 4 g/500ml و 6 g/500ml و 8 g/500ml على الترتيب، وبدأ التركيز بالاستقرار تقريباً عند كمية فحم 6 g/500ml حيث لم يعد لزيادة كمية الفحم تأثير كبير على انخفاض تركيز الكروم، أي يمكن اعتماد كمية 6 g/500ml كأفضل كمية فحم تجاري في امتزاز الكروم من مياه التصريف لمعامل دباغة الجلود.

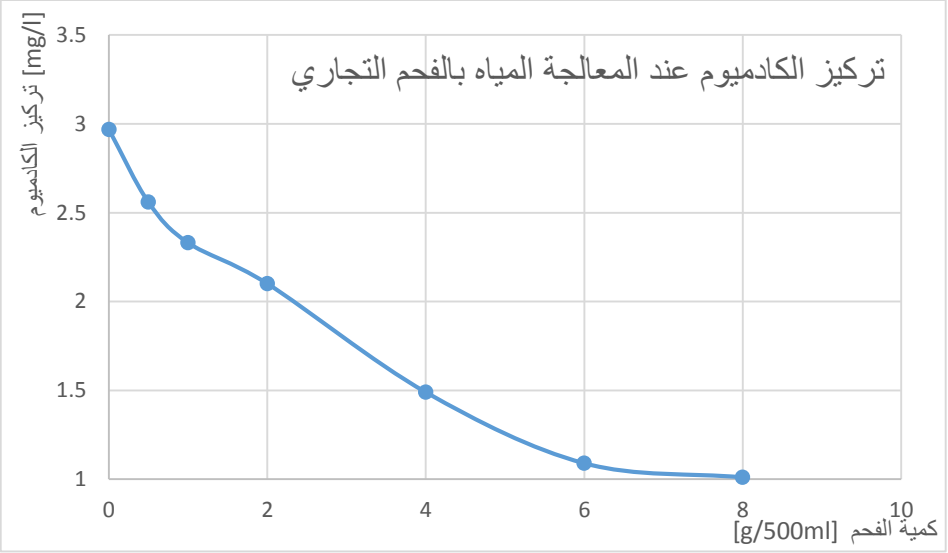
يبين الشكلان (13) و (14) رسم المنحنيات البيانية التي تبين تغير تركيز الكادميوم مع تغير كمية الفحم المستخدمة في معالجة المياه، وذلك عند استخدام كلا النوعين من الفحم المنشط، وهما فحم كوز الصنوبر المنشط والفحم التجاري المرجعي المنشط.




**الشكل (13) تغير تركيز الكادميوم في العينات مع تغيير كمية فحم كوز الصنوبر المنشط المستخدم للمعالجة**

يُبين الشكل (13) أن التركيز الأولي للكادميوم الموجود في مياه صرف معامل الدباغة قبل المعالجة كان 2.97 mg/l ، وبعد البدء بالمعالجة باستخدام فحم كوز الصنوبر المنشط بدأت تلك التراكيز بالانخفاض نتيجة امتزاز الفحم المنشط لتلك الملوثات، فأصبح تركيز الكادميوم عند استخدام 0.5 g/500ml من الفحم المنشط 2.6 mg/l ، واستمرت تلك التراكيز بالانخفاض حتى وصلت 2.35 mg/l عند كمية فحم كوز صنوبر منشط تبلغ 1 g/500ml ، وواصل تركيز الكادميوم انخفاضه إلى تراكيز 1.99 mg/l و 1.57 mg/l و 1.17 mg/l و 1.12 mg/l عند كميات فحم تم استخدامها في المعالجة بلغت 2 g/500ml و 4 g/500ml و 6 g/500ml و 8 g/500ml على التوالي، حيث بدأ التركيز بالاستقرار تقريباً عند كمية فحم 6 g/500ml حيث لم يعد لزيادة كمية الفحم تأثير كبير على انخفاض تركيز الكادميوم

وبالتالي لم يعد لعملية زيادة كمية الفحم جدوى اقتصادية، وبالتالي يمكن اعتماد كمية 6 g/500ml من فحم كوز الصنوبر كأفضل كمية في امتزاز الكادميوم من مياه التصريف المدروسة.




**الشكل (14) تغير تركيز الكادميوم في العينات مع تغيير كمية الفحم التجاري المنشط المستخدم للمعالجة**

يُلاحظ من خلال الشكل (14) أن التركيز الأولي للكادميوم الموجود في المياه المدروسة قبل عملية المعالجة كان 2.97 mg/l ، وبعد البدء بالمعالجة باستخدام الفحم المنشط التجاري بدأت التراكيز بالانخفاض نتيجة امتزاز الفحم المنشط لتلك الملوثات، حيث أصبح تركيز الكادميوم عند استخدام 0.5 g/500ml من الفحم المنشط 2.56 mg/l ، واستمرت تراكيز الكادميوم بالانخفاض مع زيادة كمية الفحم المستخدمة في المعالجة، فبلغت تراكيز الكادميوم 2.33 mg/l و 2.1 mg/l و 1.49 mg/l و 1.09 mg/l و 1.01 mg/l عند كميات فحم منشط تم استخدامها في المعالجة بلغت 1 g/500ml و 2 g/500ml و 4 g/500ml و 6 g/500ml و 8 g/500ml على الترتيب، وبدأ التركيز بالاستقرار تقريباً عند كمية فحم 6 g/500ml حيث لم يعد لزيادة كمية الفحم تأثير كبير على انخفاض تركيز الكادميوم، أي يمكن

اعتماد كمية 6 g/500ml كأفضل كمية فحم تجاري في امتزاز الكادميوم من مياه التصريف لمعامل دباغة الجلود.

من خلال الاطلاع على نتائج معالجة مياه الصرف الناتجة عن معامل دباغة الجلود بغرض إزالة الكروم والكادميوم منها باستخدام كلاً من فحم كوز الصنوبر المنشط والفحم التجاري المنشط، يمكننا القول أن كلا النوعين من الفحم المنشط المدروس قد أعطيا قدرة جيدة على إزالة هاذان الملوثان بنسب إزالة مختلفة وفقاً لكمية الفحم المستخدمة في المعالجة، وتبين أيضاً أن أفضل كمية فحم مستخدمة لهذا الغرض بلغت 6 g/500ml وذلك في إزالة كلا النوعين من الملوثات.

**6. الاستنتاجات والتوصيات:**

من خلال الدراسة التي تمت أصبح من الممكن صياغة بعض الاستنتاجات على النحو الآتي:

1. أكدت الدراسة نجاح تصنيع فحم منشط من كوز الصنوبر الذي يعتبر أحد المخلفات الزراعية المهملة.
2. بينت نتائج تحديد الكثافة أن فحم كوز الصنوبر المنشط يمتلك كثافة أقل مما يمتلكه الفحم التجاري بنسبة % 2.83 وهذا يعطيه أفضية من حيث امتلاكه على فراغات ومسام اكثر، بالإضافة لخفة الوزن أثناء النقل.
3. كانت نسبة الرماد في فحم كوز الصنوبر المنشط أقل من نسبته في الفم المنشط التجاري بنسبة % 16.3 وهذا يعطيه أفضلية من هذه الناحية.
4. تفوق رقم اليود لفحم كوز الصنوبر المنشط على رقم اليود للفحم التجاري بنسبة 11.3% وهذا يدل على أن مساحة السطح الفعال لفحم كوز الصنوبر أكبر من مساحة السطح الفعال للفحم المنشط التجاري، وبالتالي مساحة امتزاز أكبر.

5. أظهرت صور المجهر الالكتروني وجود تشابه في البنية الهيكلية بين فحم كوز الصنوبر المنشط والفحم التجاري، وهذا ما يفسر وجود تقارب في قيم خصائص كل منهما، كما بينت الصور وجود فارق في متوسط مقاس المسام بين النوعين، حيث كان متوسط مقاس المسام لفحم كوز الصنوبر أقل من متوسط مقاس المسام للفحم التجاري بنسبة % 32.23 مع وجود تفوق كبير وواضح في كثافة المسام لصالح فحم كوز الصنوبر المنشط.
6. بينت النتائج أن فحم كوز الصنوبر المنشط قادر على إزالة كل من الكروم والكادميوم من مياه صرف معامل دباغة الجلود بنسب إزلة مختلفة، حيث بلغت نسبة إزالة الكروم 84.6 % ونسبة إزلة الكادميوم % 60.6 ، وكانت هذه النتائج قريبة من نسب الازالة عند استخدام الفحم المنشط التجاري حيث بلغت نسبة إزالة الكروم % 82.3 ونسبة إزلة الكادميوم % 63.3 .
7. تفوق فحم كوز الصنوبر المنشط على الفحم التجاري في إزالة الكروم على خلاف عملية إزالة الكادميوم فقد تفوق الفحم التجاري على فحم كوز الصنوبر المنشط.

**التوصيات:**

من خلال ما سبق يمكن أن يوصى بما يلي:

1- استخدام فحم كوز الصنوبر المنشط في تطبيقات إزالة الملوثات من مياه المنصرفات الصناعية.

2- دراسة فعالية فحم كوز الصنوبر في إزالة ملوثات مياه الشرب في محطات معالجة المياه.

3- دراسة إمكانية تصنيع فحم منشط من أنواع أخرى من المخلفات الزراعية لوجود كميات كبيرة، بالإضافة لدعم مفهوم الاستدامة.

4- التشجيع على اتباع سياسات إعادة التدوير لإنتاج مواد مفيدة من مواد يتم اعتبارها كمخلفات، وتوفير الدعم المادي للباحثين الشباب لتشجيعهم على البحث في هذا المجال والعمل على توفير جميع مستلزمات الأبحاث العلمية اللازمة كأجهزة قياس ومعدات اخرى.

**7. المراجع** **References**

1. Qarmo A and Esteifi K., 2016- **Determination of Mechanical and Thermal Characteristics of some Waste Materials in Order to Be Used for Thermal Insulation Purposes.***Research Journal of Aleppo University, Engineering Science Series (2), 2016.129.*
2. Kadirvelu K et al. 2003- **Utilization of various agricultural wastes for activated carbon preparation and application for the removal of dyes and metal ions from aqueous solutions.** *Journal of Bioresource Technology , Volume 87, Issue 1, March 2003, Pages 129-132.*
3. Debi, P et al. 2015- **Preparation of activated carbon from green coconut shell and its characterization**. *Journal Chemical Engineering Process Technology, 6.5 ,1000248.*
4. Abu Al-Rub F et al. 2016- **Removal of 4-Chlorophenol from Contaminated Water Using Activated Carbon from Dried Date Pits: Equilibrium, Kinetics, and Thermodynamics Analyses**, *Journal of Materials2016, 9(4), 251.*
5. **Standard Test Method for Apparent Density of Activated Carbon**. *ASTM D2854-09(2025).* https://store.astm.org/d2854-09r25.html.
6. **Standard Test Method for Total Ash Content of Activated Carbon.** *ASTM D2866-11-202. https://store.astm.org/d286611r25.html.*
7. **Standard Test Method for Determination of Iodine Number of Activated Carbon**. *ASTM D4607-14(2021).*
8. **Standard Test Method for Single Pellet Crush Strength of Formed Catalysts and Catalyst Carriers**. *ASTM D4179-22. https://store.astm.org/d4179-22.html*