دراسة الخواص الميكانيكية والحرارية لكتل الفحم الحيوي المضغوطة لنواتج تقليم أشجار النخيل (*Phoenix dactylifera*) والزيتون (*Olea europaea*) والحمضيات (*Citrus*)

عيادة محمد هلاب[1]، محمد أبوصاع فنير[2]، محمد الطاهر مرغم[3] ، عبدالسلام محمد بن احميدة[4] وسمية امحمد كشافرة[5]

[1]الهيئة الليبية للبحث العلمي، [2و3و5] معمل تقنيات ما بعد الحصاد، قسم الهندسة الزراعية، كلية الزراعة، جامعة طرابلس،[3]باحث، [4]مركز البحوث الزراعية

المستخلص

أجريت هذه الدراسة بمعامل كليتي الزراعة والهندسة بجامعة طرابلس، وتناولت بعض الخواص الميكانيكية والحرارية لوحدات الفحم الحيوي المضغوطة للمنتجات الثانوية للنخيل والزيتون والحمضيات، طُحن الفحم الحيوي المُنتج بعملية الكربنة، وأضيف له النشا كمادة لاحمة بواقع 6 جم و10 جم/90 جم؛ أي: بنسبة 6.7 و11.1% على التوالي، خُلِطت المكونات واستُخدم قالب معدني قطره 4 سم، وأداة ضغط لعمل وحدات أسطوانية الشكل بوزن 22 جم. جُففت العينات وحُدد محتواها الرطوبي والكثافة الجافة، كما أُجرى اختبار الضغط وتحديد خواص الاحتراق. أظهرت النتائج تأثيراً معنوياً لنسبة النشا وللنوع على الخصائص المدروسة، فقد كانت الكثافة الأعلى لفحم النخيل عند 0.596 جم/سم^3، يليه الزيتون 0.570 جم/سم^3، ثم الحمضيات 0.5440جم/سم^3، أما إجهاد الضغط فقط كانت الاختلافات معنوية أيضاً، سُجلت للنخيل المتانة الأعلى (1.71 ميقا باسكال)، يليه الزيتون (1.63 ميقا باسكال)، بينما سجلت الحمضيات أقل قيمة (1.26 ميقا باسكال)، أما تأثير نسبة النشا والنوع كان –أيضا- معنوياً على خصائص الاحتراق، فقد سجل فحم الحمضيات أعلى معدل للطاقة عند 1002.77 كجول/كجم وبأقصى درجة حرارة للماء 85.65°م، يليه الزيتون بمتوسط 916.13 كجول/كجم و80.07°م، فيما سجل النخيل 826.58 كجول/كجم و75.35°م، كما كان لفحم النخيل أعلى كمية رماد 3.47 جم، يليه الزيتون 2.02 جم، بينما الحمضيات كانت لها الكمية الأقل 1.95 جم، بصفة عامة أثبتت الدراسة متانة الوحدات المضغوطة باستخدام نسبة نشا بحوالي 10%، ويمكن استخدام المنتجات الثانوية للأنواع المستخدمة كمصادر جيدة للطاقة.

الكلمات الدالة: الخواص الميكانيكية والحرارية، الفحم الحيوي، الكتل المضغوطة، نو اتج التقليم.

المقدمة

تُشكِّل المنتجات الزراعية الثانوية (Agricultural Byproducts) الناتجة عن المحاصيل الزراعية تحدياً بيئياً واقتصادياً على المستوى العالمي؛ نظراً لضخامة كمياتها، وقلة طرق تدويرها بيئياً واستغلالها بكفاءة، تعد أشجار النخيل والزيتون والحمضيات من أهم الأشجار في ليبيا؛ نظراً لملائمة المناخ ولعوامل اقتصادية واجتماعية، يقدر عدد الأشجار للأنواع الثلاثة بحوالي 10 ملايين نخلة، و8 ملايين شجرة زيتون، و4 ملايين شجرة حمضيات، تشير الإحصائيات إلى أن النخلة الواحدة تنتج سنوياً حوالي 26 كجم من الأجزاء الثانوية كالجريد والكُرَّب والعراجين (المنظمة العربية للتنمية الزراعية، 2022).

للاتصال: أ. د. محمد أبوصاع فنير – قسم الهندسة الزراعية ، كلية الزراعة - جامعة طرابلس – ليبيا

هاتف: 218924190621+ **البريد الالكتروني : m.fennir@uot.edu.ly**

استلمت بتاريخ: 2026/01/05 **أجيزت بتاريخ: 2026/06/21**

هذا وينتج عن خدمة الزيتون والحمضيات كميات مشابهة، يستغل القدر اليسير منها في تغذية الحيوانات (كركوتلي وآخرون، 2011)، وبعض الصناعات التقليدية تستغل المنتجات الثانوية في إنتاج الحرف اليدوية والصناعات المحلية (منظمة الأغذية والزراعة، 2022)، وكمصدر للحرارة في أغراض الطهي (عبد الرحمن، 2020)، وإنتاج الفحم الحيوي بالطرق التقليدية (Koves *et al.*, 2024)، فيما يترك القدر الأكبر في المزرعة أو يحرق بطرق عشوائية، وغالباً ما تتراكم تلك المنتجات لتكون بيئة للأمراض النباتية وتكاثر الحشرات والقوارض.

يقدر الإنتاج السنوي للمنتجات الثانوية للنخيل في ليبيا بحوالي 260 ألف طن، أما الزيتون فبالإضافة إلى نواتج التربية والتقليم ينتج عن عملية العصر –أيضًا – كميات كبيرة من الفيتورة (ثفل الزيتون)، تشكّل نحو 30% إلى 40% من وزن الثمار المعصورة (علي، 2020؛ Akay *et al.*, 2019)، وفي قطاع الحمضيات تنتج المزارع كميات كبيرة من نواتج التقليم، وتُشير التقديرات إلى نواتج تقليم البساتين الكثيفة قد تصل إلى (10 – 15 طن) للهكتار سنوياً (Velázquez-Martí *et al.*, 2010; Smith and Jones, 2019)، ناهيك عن قشور وبذور الثمار الناتجة عن الصناعات التحويلية.

يشكل تراكم المنتجات الثانوية وعدم استغلالها ضغطاً على النظم البيئية؛ مما يحفز الباحثين لإيجاد حلول مستدامة وتحويلها إلى منتجات عالية القيمة تساهم في صحة النظام البيئي، وتؤدي إلى استدامة وحسن استغلال الموارد (Carter, 2022)، هنا تبرز أهمية الفحم الحيوي (Biochar) الناتج عن الانحلال الحراري (Pyrolysis) للمواد العضوية، ويعد أهم وسائل تحويل المنتجات الثانوية إلى مادة كربونية عالية المسامية لها فوائد في النظام البيئي، ناهيك عن استخداماته الصناعية، هذا وقد أظهرت الدراسات البحثية فعالية الفحم الحيوي في مجالين رئيسيين: مصدراً حراريا للطاقة(Li *et al.*, 2016; Thalita et al., 2019; Pivato *et al.*, 2024)، ومحسناً لخواص التربة (Ali *et al.*, 2025) في العمليات الزراعية يستخدم مسحوق الفحم الحيوي كمُحسِّن لخواص التربة، خاصة الأراضي القاحلة أو المتأثرة بالملوحة (محمد، 2023؛ Yuan *et al.*, 2023؛ Smith, 2024)، ورفع محتوى التربة من: النيتروجين، والفوسفور، والبوتاسيوم (يوسف، 2020، عبد الله، 2021)، أيضًا تحسين نمو المحاصيل، ويعزز أداءها الفسيولوجي (Garcia *et al.*, 2018; Abou-Zeid and Aly, 2023).

صناعياً يُطحن الفحم الحيوي ويُضغط في قوالب متنوعة الأشكال والأحجام لإنتاج وحدات مضغوطة (pallets and briquettes)، تستخدم بعد تجفيفها كمصدر حراري، وقد أكدت عديد الدراسات جودة خصائصها الحرارية، ككفاءة الاحتراق والقيمة الحرارية (Wang *et al.*, 2019). وفيما يتعلق بفحم النخيل الحيوي وُجد أن محتواه الكربوني عال، وقيمته وكفاءة الحرارية مرتفعتين (Lee and Park, 2020)، أيضاً له احتراق جيد وانبعاثات منخفضة؛ مما يوفر طاقة مماثلة للحرق التقليدي للحطب مع تقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون (محمد، 2018)، كما للفحم الحيوي دور بيئي غير مباشر يتمثل في تقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري، وتقليل الانبعاثات المسببة في الاحتباس الحراري (حسني، 2021؛ إبراهيم، 2022).

يهدف هذا البحث إلى: إنتاج وحدات اسطوانية مضغوطة للفحم الحيوي لجريد النخيل، وأغصان وفروع الزيتون والحمضيات، وتقييم خواصها الميكانيكية والحرارية.

المواد وطرائق البحث

المواد الأولية: (Raw Materials)

جُمعت المنتجات الثانوية الزراعية المحلية كمواد خام من مزارع متفرقة بضواحي مدينة طرابلس، شملت نواتج تقليم أشجار الحمضيات صنف اليوسفي، وأغصان الزيتون غير محدد الصنف، وجريد النخيل غير محدد الصنف أيضاً.

تجهيز المواد: (Material Preparation)

جُففت المنتجات الزراعية وقُطّعت إلى أجزاء صغيرة بطول حوال 10 سم، ثم أُجريت لها عملية الكربنة

(Pyrolysis) داخل حلة معدنية محكمة الغلق، واستخدم غاز الطهي في تسخين قاعدة الحلة، وإحداث الاحتراق غير المباشر لمحتوياتها الخشبية، استمرت العملية إلى أن توقف خروج غازات نواتج الاحتراق، والتي تم تكثيفها للحصول على خل الخشب، تفاصيل أكثر على عملية الكربنة وتكثيف منتجات الاحتراق وردت ضمن ورقة مرجعية (Bridgwater, 2003)، أحضر الفحم الحيوي إلى معمل تقنيات ما بعد الحصاد بقسم الهندسة الزراعية، أجريت عملية الطحن باستخدام خلاط كهربائي عالي السرعة للحصول على مسحوق ناعم، غُربل المسحوق باستخدام منخل دقيق ووُضع المسحوق في عبوات بلاستيكية مُحكمة الإغلاق للحفاظ على خصائصه.

إنتاج الوحدات المضغوطة (Briquetting)

تحضير المادة الرابطة (Binder Preparation)

استُخدم نشا الذرة كمادة لاحمة (رابطة) بنسبتين مختلفتين: 6 جم و 10 جم لكل 90 جم من مسحوق الفحم للأصناف الثلاثة، وبعد إضافة نشا الذرة كمادة لاحمة تساهم في متانة وتماسك وحدات الفحم الحيوي عند ضغطها (Sette et al., 2020)، أثناء التجهيز خُلط النشا مع 50 ملم ماء مقطر، ووُضع في وعاء على حرارة هادئة مع التحريك المستمر حتى الحصول على قوام كريمي لزج استُخدم مع الماء في عجن الفحم الحيوي.

تجهيز الوحدات المضغوطة (Briquettes Compaction)

خُلط 90 جم من مسحوق الفحم الناعم لكل نوع مع مستحضر النشا، وفُرك يدوياً للحصول على خليط متجانس مبلل يمكن تشكيله، وُزن الخليط بعد التجهيز، وقُسّم إلى ستة أجزاء متساوية، ووُزن كل جزء منها على حدة لإنتاج وحدة مضغوطة، وُضع الخليط داخل قالب حديدي أسطواني الشكل قطره الداخلي 4 سم، وعمقه 12 سم، وسمكه 1سم، في كل عملية ضغط يوضع الفحم المبلل داخل القالب الذي يتخلله مكبس مزود بذراع بارز، والذي ضُغط بواسطة قطعة معدنية مربعة الشكل متصلة بقضيب لولبي (مقلوظ) يدار يدوياً، ونافذ من خلال قاعدة ثابتة، عُرضت جميع الوحدات لضغط مساو وفقاً لما أورده (Wilaipon, 2007) وذلك باستخدام عدد ثابت من خطوات اللولب، وُزنت الوحدات المضغوطة في حالتها الرطبة قبل التجفيف، ثم وُضعت في وحدة تجفيف ضُبطت على 60 درجة مئوية لمدة 72 ساعة، وُزنت العينات جافة بعد إخراجها، حُسبت الكثافة الجافة للعينات باستخدام الوزن الجاف للوحدة وحجمها، وحُسبت نسبة الرطوبة المتبقية في العينات بعد التجفيف باستخدام الفرق بين الوزن الرطب والوزن الجاف.

قياس محتوى الرطوبة

قيست رطوبة الوحدات المضغوطة بتقدير كمية الماء في العينة بعد عملية التجفيف الأولى؛ حيث حدد وزنها الرطب وجُففت في الفرن عند 105 °م لمدة 24 ساعة، سجل الوزن بعد عملية التجفيف كما هو مبين بالجدول (1)، حُدد المحتوى الرطوبي بالعلاقة التالية (1)، حسبت نسبة الرطوبة للعينات بالطريقة التي أوردها يحيى وسليمان (1984).

نسبة الرطوبة (%) = 100 × (الجاف الوزن - الرطب الوزن)/(الجاف الوزن) ..... (1)

الكثافة الجافة (Dry Density)

قيست الكثافة الجافة للوحدات المضغوطة بعد تجفيفها في وحدة التجفيف عند 60 °م لمدة 72 ساعة، وحدد الوزن الجاف بثبات الوزن، حُسبت الكثافة بقسمة الوزن الجاف بالعلاقة التالية (2) :

الكثافة الجافة = (للعينة الجاف الوزن)/(الداخلي القالب حجم) .....(2)

اختبار قوة الضغط (Compressive Strength Test)

قِيست قوة الضغط القصوى التي تتحملها الوحدات المضغوطة باستخدام آلة اختبار الضغط (CBR Testing Machine 1870/1457 ELE UK)، وُضعت العينات بين قطبي الجهاز، وسُلطت عليها قوة ضغط متزايدة حتى حدوث الكسر، عندها سُجلت قوة الضغط القصوى التي تتحملها كل عينة.

اختبار الاحتراق (Combustion Test)

حُدد معدل الاحتراق ومعدل إنتاج الحرارة ودرجة الحرارة القصوى لكل نوع باستخدام وحدة قياس حراري جُهزت للغرض، يتكون من وعاء من السراميك حجم (377 سم^3)، زُود الوعاء بفتحات سفلية للتهوية، وُضعت الوحدة المضغوطة المراد اختبارها في الوعاء، وثبت أعلاها ولا يلامسها كأس زجاجي حراري سعة 70مل، وضعت الوحدة ومحتوياتها على جهاز تقليب مغناطيسي نوع (LABSCO – Friedberg, H – Germany)، وذلك لضمان تجانس حرارة الماء أثناء الاختبار، شُعلت الوحدة المضغوطة بوضعها على لهب لمدة 2 - 3 دقائق، وبعد اشتعالها وُضعت في أسفل الوحدة، وثُبت أعلى الوحدة المضغوطة المشتعلة الكأس المحتوي على الماء، داخل الكأس وُضع حساس قياس حرارة رقمي، وسُجلت درجة حرارة الماء كل 20 دقيقة بداية من الاشتعال، وأوقف التسجيل بانخفاض درجة حرارة الماء دون 45°م.

التحليل الإحصائي (Statistical Analysis)

صُممت التجربة بنظام القطاعات العشوائية الكاملة، وكانت العوامل الأساسية نوع الفحم الحيوي، ونسبة المادة اللاحمة (النشا)، فيما كانت العوامل التابعة: الكثافة، وقوة الضغط، ودرجة الحرارة القصوى، ومعدل الحرارة، وكمية الرماد، أجري التحليل الإحصائي للبيانات باستخدام تحليل التباين (ANOVA)، وباستخدام البرنامج الإحصائي SPSS، إصدار 20، وقُورنت المتوسطات المختلفة معنوياً عند مستوى 0.05 باستخدام اختبار .Tukey Kramer

النتائج والمناقشة

خصائص الوحدات المضغوطة، والمحتوى الرطوبي والوزن

جدول (1) يبين خصائص الوحدات المضغوطة المنتجة والفحم الحيوي للأنواع الثلاثة: حمضيات وزيتون ونخيل، واللاتي أنتجت بإضافة نشا الذرة بنسبتين 6 جم/90 جراما فحم و10 جرام/90جم فحم؛ أي: بنسبة 6.7% و11.1% على التوالي، وبإضافة 50 مل من الماء المقطر لكل عينة، حددت النسب السابقة بناءً على عدة تجارب مبدئية، إضافة إلى أن التركيبة المستخدمة مكنت من الحصول على ثلاث وحدات مضغوطة من كل عملية خلط، يلاحظ من الجدول أن أوزان الوحدات المضغوطة كانت متقاربة جداً لكل معاملة نشا؛ مما مكن من الحصول على نتائج يمكن مقارنتها في تقدير الحرارة القصوى ومعدل الحرارة المنتجة من حرق الوحدات، يلاحظ –أيضًا- من الجدول أن النسبة الثانية من النشا أدت إلى الحصول على محتوى رطوبي أعلى بعد التجفيف، ووزن أكبر لوحدات الأنواع الثلاثة، بالطبع زيادة المادة اللاحمة يزيد من تماسك الوحدات وقدرتها على الاحتفاظ بالماء، ناهيك عن زيادة الوزن، وبالنظر إلى المحتوى الرطوبي للوحدات فقد تراوح بين 3.73 و6.68 عند التجفيف لمدة 72 ساعة على درجة حرارة 60°م، وبالرغم من أن ذلك أنتج وحدات جيدة ومتماسكه، هذا يتوافق إلى حد ما مع ما أورده Hasibuan *et al.* (2025) من أن المحتوى الرطوبي للوحدات المضغوطة تراوح بين 1.5 و3.8%.

جدول (1): خصائص العينات للأنواع الثلاثة

مسافات الزراعة (سم)	وزن البذور للنبات(جم)	وزن الألف بذرة(جم)	درجة امتلاء القرن
10	^{b}19.8	^{b}304.9	^{a}0.66
20	^{b}20.8	^{b}305.2	^{a}0.66
30	^{a}22.5	^{a}310.7	^{a}0.63

الكثافة الجافة

جدول (2) يبين تحليل التباين لتأثير كل من الأنواع، ونسبة النشا على الكثافة الجافة، تظهر النتائج تأثيراً معنوياً للعاملين الأساسيين على الكثافة عند مستوى معنوي 0.05، سجلت وحدات الفحم المضغوطة للنخيل أعلى قيمة عند 0.596 جم/سم^3، يليها الزيتون 0.570 جم/سم^3، وكانت نسبة الفارق بين النوعين 4.4%، فيما كانت كثافة الحمضيات الأقل عند 0.544 جم/سم^3، وكانت نسبة الفرق بينها وبين النوع الأول 8.7%، وينسب هذا الاختلاف إلى نسبة الألياف الكربونية أو ربما أقطار حبيبات الكربون المنتجة من كل نوع، وتأثير ذلك على كثافة الوحدات المضغوطة لكل نوع في صورة التصاق الحبيبات الكربونية وتشكلها بتأثير الضغط والمادة اللاحمة، أما تأثير نسبة النشا فقد كان –أيضًا- معنويًا عند مستوى 0.05، فعند زيادة نسبة النشا من 6 جم إلى 9 جم زادت الكثافة الجافة للوحدات المضغوطة للأنواع الثلاثة، وكانت الزيادة لوحدات نوع الزيتون بنسبة 2.85 %، وللحمضيات 2.23%، فيما كان تأثير النشا على وحدات النخيل أقل عند 0.34%، يمكن أن يُفسر ذلك بأن النشا أدى إلى سد الفراغات بين الجزيئات الداخلية للوحدات وعمل كمالئ للفراغات (Pore-Filling Agent)؛ ولذلك علاقة وطيدة بالنوع، فيما كانت الزيادة أكبر للحمضيات والزيتون، فقد كانت الزيادة بنسبة أقل للنخيل مما ذكر أعلاه، تؤكد النتائج تأثير النشا على الخصائص الميكانيكية للوحدات المضغوطة، واختلاف ذلك التأثير باختلاف النوع، ربما يكون اختلاف وحدات نوع النخيل في استجابتها لزيادة نسبة النشا ناتج عن التركيب الجزيئي وحجم حبيبات الكربون، والذي قد يكون قلل من دور كمية النشا المضافة، وبالتالي انعكس على عدم الحصول على نسبة ارتفاع للكثافة قريبة من النوعين الآخرين، بصفة عامة النتائج التي سُجلت هنا تتفق مع النتائج التي أوردها Anguruwa (2024) *et al.* و Glalah *et al.* (2024) من حيث نوع المادة العضوية أو الفحم المستخدم، وكذلك المادة اللاحمة التي كانت في الغالب النشا، ولهما تأثير معنوي على الكثافة الجافة للوحدات المضغوطة، ناهيك عن التأثير على الخصائص الأخرى.

جدول (2): تأثير النوع ونسبة النشا على الكثافة الجافة للوحدات المضغوطة

القيمة	D.F	S.S	M.S	F	P
الكثافة الجافة					
نسبة النشا	1	0.000	0.000	33.065	0.000
النوع	2	0.008	0.004	394.245	0.000
نسبة النشا * النوع	2	0.000	0.000	12.668	0.001

إجهاد الضغط

جدول (3) يبين تحليل التباين لتأثير كل من النوع ونسبة النشا على إجهاد الضغط، تظهر النتائج أن الأنواع الثلاثة كان لها تأثير معنوي على إجهاد الضغط عند مستوى معنوي 0.05، في حين لم يكن تأثير نسبة النشا معنوياً على المتوسطات، سجل النخيل أعلى متوسط لإجهاد الضغط (1.71 ميقا باسكال)، يليه الزيتون (1.63 ميقا باسكال)، بينما سجلت الحمضيات أقل قيمة (1.26 ميقا باسكال).، بالطبع كانت هذه النتائج متوقعة أن تُسجل وحدات فحم النخيل أعلى تحمل لإجهاد الضغط بحكم كثافتها الأعلى، فيما يسجل النوعان الآخران أقل إجهاد ضغط، يرجع هذا

الاختلاف إلى الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للفحم الحيوي المنتج من كل نوع، من حيث بناء التركيب الداخلي للمادة، والكثافة الظاهرية، ونسبة الألياف، وحجم حبيبات الكربون وغيرها، أما تأثير التداخل بين النوع ونسبة النشا فقد كان معنويا عند مستوى 0.05؛ حيث اختلفت الاستجابة باختلاف النوع، فأدت زيادة نسبة النشا إلى تحسن في أداء الحمضيات بنسبة (19.12%)، فيما سجل النخيل انخفاضاً بنسبة (28.18%)، والسبب يعود إلى القوة الهيكلية لنوع النخيل التي جعلته يقلل من تأثير النشا، بدلًا من كونه عاملًا مُعززًا لتحمل قوة الضغط والكسر، ومن هنا يمكن القول أن نسبة النشا يجب أن تُحدد لكل نوع على حدة مراعاةً لاختلاف الخواص الميكانيكية للفحم الحيوي المنتج من كل نوع، وعلى أية حال الدراسة الحالية تتوافق مع ما أورده Ajiboye *et al.* (2016) و Borowski *et al.* (2017) من تأثير النشا كمادة لاحمة على صلابة الوحدات المضغوطة، على الرغم من أن الباحثين أجروا اختبار مقاومة الكسر عن طريق الإسقاط الحر للوحدات المضغوطة، وتحديدا ما أسموه "احتفاظ مؤشر التشتت" دون تحديد رقمي لقوة الكسر مثلما أجري في الدراسة الحالية.

جدول (3): تأثير النوع ونسبة النشا على إجهاد الضغط للوحدات المضغوطة

القيمة	D.F	S.S	M.S	F	P
نسبة النشا	1	25.609	25.609	0.680	0.426
النوع	2	450.274	225.137	5.981	0.016
نسبة النشا * النوع	2	325.517	162.758	4.324	0.039

الخصائص الحرارية ومخلفات الاحتراق

أ. معدل إنتاج الطاقة، ودرجة الحرارة القصوى، وكمية الرماد.

جدول (4) يبين نتائج تحليل التباين لتأثير كل من النوع ونسبة النشا على معدل إنتاج الطاقة، ودرجة حرارة الماء القصوى، وكمية الرماد، تظهر النتائج أن النوع كان له تأثير معنوي على المتغيرات الثلاثة عند مستوى 0.05، في حين لم يكن للنشا تأثير معنوي على المتوسطات، سجل فحم الحمضيات أعلى متوسط لمعدل إنتاج الطاقة عند 1002.77 كجول/كجم، وبأقصى درجة حرارة للماء 85.65°م، يليه الزيتون بمتوسط 916.13 كجول/كجم، و 80.07°م، فيما سجل النخيل 826.58 كجول/كجم و 75.35°م، وكانت نسب زيادة معدل الطاقة لفحم الحمضيات 8.64% و17.57% عن الزيتون والنخيل على التوالي، أيضاً سجل فحم الحمضيات زيادة في درجة الحرارة بنسبة 6.52% و11.91% عن فحم الزيتون والنخيل على التوالي، أما نتائج الرماد فقد سُجل لفحم النخيل أعلى كمية رماد 3.47 جم، يليه الزيتون بمتوسط 2.02 جم، فيما كان للحمضيات الكمية الأقل بمتوسط 1.95جم، هنا يظهر بوضوح العلاقة بين وزن الرماد والخصائص الحرارية، فكلما زادت كمية الرماد انعكس ذلك على انخفاض معدل الطاقة الحرارية المنتجة، وأقصى درجة حرارة للماء، وقد يكون ذلك له علاقة بنسبة الكربون القابل للاشتعال أو لوجود مركبات منخفضة القيمة الحرارية، والذي أدى احتراقها إلى إنتاج كمية أعلى من الرماد تزامناً مع أقل طاقة وحرارة، أيضاً يمكن أن يُفسر هذا الاختلاف نتيجة لتباين الخصائص الفيزيائية والحرارية للفحم المنتج من الأنواع الثلاثة، ربما نتيجة للتباين الجيني الوراثي بين الأنواع، مما أدى إلى اختلاف واضح في قدرة الأنواع على إنتاج المادة الجافة والتي تحولت إلى كربون، وانعكس ذلك على

الاختلاف المعنوي في معدل الطاقة المنتجة ودرجة حرارة الماء وكمية الرماد، وعند مقارنة هذه النتائج بما ورد في دراسات سابقة، توافقت نتائج الدراسة الحالية للخصائص الحرارية مع دراسات مماثلة أجراها كل من Ajiboye *et al.* (2016) و Borowski *et al.* (2017).

جدول (4): تأثير النوع ونسبة النشا على: معدل إنتاج الطاقة ودرجة الحرارة القصوى، وكمية الرماد

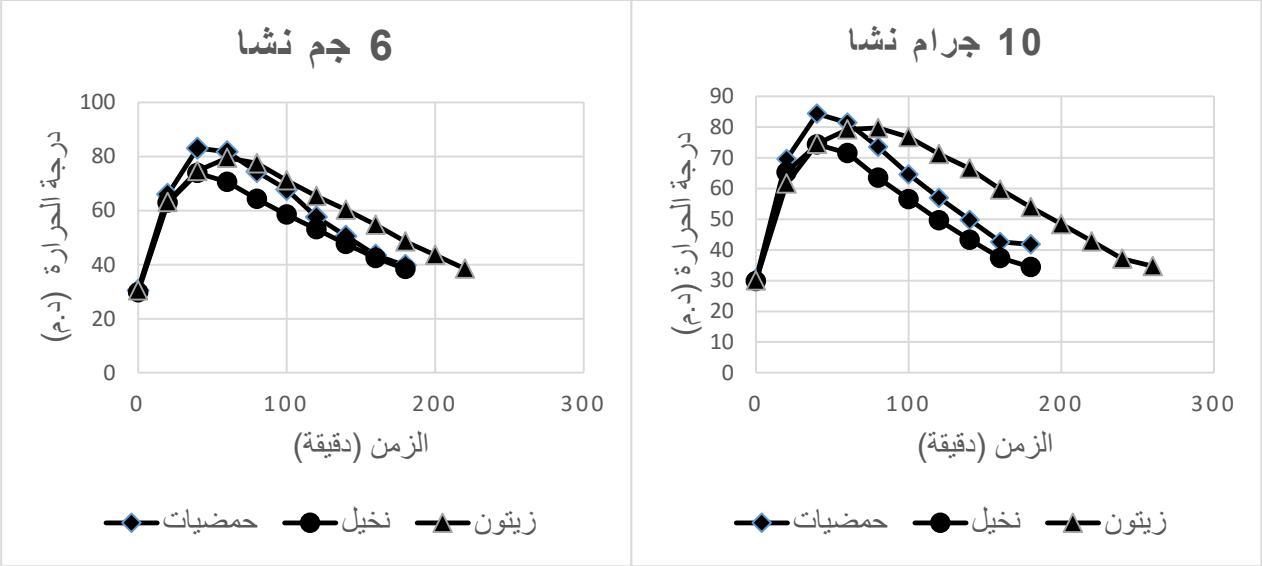
القيمة	D.F	S.S	M.S	F	P
كمية إنتاج الحرارة					
نسبة النشا	1	686.598	686.598	0.320	0.582
النوع	2	93137.158	46568.579	21.709	0.000
نسبة النشا *النوع	2	4838.214	2419.107	1.128	0.356
درجة الحرارة القصوى					
نسبة النشا	1	9.976	9.976	3.472	0.087
النوع	2	319.021	159.511	55.514	0.000
نسبة النشا *النوع	2	10.488	5.244	1.825	0.203
كمية الرماد					
نسبة النشا	1	0.008	0.008	0.286	0.602
النوع	2	8.785	4.393	156.728	0.000
نسبة النشا *النوع	2	0.020	0.010	0.358	0.706

ب. السلوك الحراري وأداء احتراق الوحدات المضغوطة للأنواع الثلاثة

الشكل (1) يبين سلوك الاشتعال لوحدات الأنواع الثلاثة، يسار لمعاملة 6 جم نشا، ويمين لمعاملة 10 جم، يوضح الأول مقارنة السلوك الحراري لوحدات الفحم المضغوطة والمنتجة من الحمضيات، والنخيل، والزيتون، سجّل فحم الحمضيات أعلى درجة حرارة للماء 83.1°م بعد 40 دقيقة من الاشتعال، وحدث انخفاض في درجة حرارة الماء شبه خطي إلى أن سجلت درجة حرارة للماء قريبة أقل من 40°م بعد 180 دقيقة من الاشتعال، سجل الزيتون أقصى درجة حرارة للماء عند 79.5°م ولكن جاء متأخراً بعد 60 دقيقة من الاشتعال، غير أن المنحنى أخذ سلوكاً مختلفاً في انخفاض درجة الحرارة، فقد استغرق 220 دقيقة ليصل الماء إلى درجة حرارة أقل من 40°م، أما وحدات النحيل فقد سجلت درجة حرارة قصوى أقل من النوعين السابقين عند 73.9°م، وكان ذلك بعد 40 دقيقة متساوياً في الزمن مع الحمضيات وسابقاً للزيتون بحوالي 20 دقيقة، غير أن المنحنى سلك انخفاضاً للحرارة بدرجة أسرع من النوعين الآخرين ليصل إلى درجة حرارة أقل من 40°م متساوياً مع الحمضيات بعد 180 دقيقة، قد يُعزى ذلك لكون الزيتون أظهر بطء في عملية الاشتعال.

وبزيادة النشا 10 جم سلكت منحنيات الاحتراق ذات السلوك لمعاملة 6 جم، وسجلت درجات حرارة أعلى، فقد كانت درجة حرارة الماء القصوى 84.3 و 79.7 و74.3°م للحمضيات والزيتون والنخيل على التوالي، أما زمن تسجيل أعلى درجة حرارة للماء فقد سجل فحم الحمضيات والنخيل نفس الزمن للمعاملة السابقة، فيما تأخر فحم الزيتون بزمن أطول عند 80 دقيقة.

أكدت هذه النتائج أن فحم الزيتون أظهر الاستقرار الحراري الهيكلي الفائق زمن احتراق أطول، بينما أظهر فحم الحمضيات أعلى كفاءة في خصائص الاشتعال، أما سلوك منحنى الاحتراق ذاته فقد كان مشابهاً للسابق، غير أن درجات الحرارة كانت أعلى، ويمكن أن يُفسر ذلك لكون النشا كان عاملاً هاماً في تشكيل الوحدات المضغوطة وسلوكها أثناء الاشتعال، أو ربما لقيمته الحرارية في الاشتعال (Lee, 2023)، ومن الجدير بالذكر هنا أنه لم تسجل علاقة واضحة للكثافة بخصائص الاشتعال، فعلى الرغم من أن فحم الحمضيات كان الأقل كثافة إلا انه أعطى أفضل خصائص الاشتعال، على العكس من ذلك فقد كان لفحم النخيل الكثافة الجافة الأعلى غير أن أنه أظهر خصائص الاحتراق الأدنى.



شكل 2. السلوك الحراري لاحتراق الوحدات المضغوطة لأنواع الفحم الثلاثة.

الاستنتاج:

تناولت هذه الدراسة تحويل المنتجات الثانوية للحمضيات والزيتون والنخيل بعد الكربنة إلى وحدات مضغوطة لغرض استخدامها كمصدر للطاقة، بينت الدراسة أن الوحدات المنتجة لها خصائص فيزيائية وحرارية جيدة، أيضاً أثبت الدراسة أن استخدام النشا كمادة لاحمة بنسبة وزنية 11% أدى إلى إنتاج وحدات متماسكة وجيدة الخواص؛ حيث أدت إلى كثافة جافة مرتفعة، ومقاومة عالية للكسر، وقيمة حرارية، وسلوك احتراق جيد، عند المقارنة بين الأنواع الثلاثة أعطت وحدات الحمضيات المضغوطة أفضل خصائص حرارية، تليها وحدات الزيتون ثم النخيل، بينت الدراسة أن تحويل المنتجات الزراعية الثانوية غير المستغلة إلى مصدر للطاقة الحرارية للاستخدامات المنزلية ولقطاع تحضير الأغذية خياراً جيداً، وأن ذلك له تأثيرات إيجابية على البيئة والموارد الحيوية، وتوصي الدراسة باختبار مواد لاحمة طبيعية واقتصادية أخرى كبدائل للنشا، وتطوير كفاءة آلات الكبس محلياً، مع إعداد دراسات جدوى اقتصادية لتشجيع استغلال هذه المنتجات الثانوية الزراعية، ونشر الوعي البيئي بأهمية الاستفادة من هذه المواد.

شكروتقدير:

يتقدم المشاركون في الدراسة بجزيل الشكر إلى الدكتور صلاح حمودة رئيس قسم الهندسة المدنية بكلية الهندسة، جامعة طرابلس، على دعمه وتوجيهاته، وإلى الفنيين بمعامل القسم للمساعدة في إجراء اختبارات الخصائص الميكانيكية للعينات، والشكر موصول للسيد محمد الطاهر مرغم الذي سعى في جمع

المنتجات الثانوية للأنواع الثلاثة، وتولى عناء إجراء عملية كربنة المنتجات الثانوية في منزله.

المراجع

إبراهيم، خالد. 2022. إنتاج الفحم الحيوي من المخلفات الزراعية واستخدامه كوقود للتدفئة والطهي. مجلة الطاقة المتجددة، 10(3)، 215-230.

حسني، أحمد. 2021. تقييم كفاءة الفحم الحيوي المنتج من المخلفات الزراعية كوقود للتدفئة والطهي. مجلة العلوم الهندسية، 12(4)، 320-335.

عبد الرحمن، ليلى. 2020. تأثير نوع المخلفات الزراعية على خصائص الفحم الحيوي المستخدم كوقود للتدفئة والطهي. مجلة بحوث الطاقة، 9(2)، 145-160.

عبد الله، محمود. 2021. تأثير الفحم الحيوي على نمو وإنتاجية نبات الطماطم. مجلة العلوم الزراعية والبيئية، 16(1)، 78-92.

علي، أحمد محمد. 2020. الاستفادة من مخلفات معاصر الزيتون (الجفت وماء الجفت) في تطبيقات بيئية وصناعية. المجلة العربية للعلوم الزراعية، 25(3)، 155–170.

كركوتلي، أمين؛ محمود ضوا؛ عبد الله درويش؛ أحمد مفيد الصبح؛ عدنان الأسعد؛ موفق عبد الرحيم؛ ماهر قطلبي؛ مروان زيد. 2011. أثر استخدام نواتج تقليم أشجار الزيتون في بعض المعايير الإنتاجية عند حملان العواس. المجلة العربية للبيئات الجافة 5 (1): 62-68.

محمد عبد الله. 2018. تقييم جدوى إنتاج الفحم الحيوي من مخلفات نخيل التمر في المملكة العربية السعودية. مجلة العلوم البيئية والتكنولوجيا، 52، 1234-1245.

محمد، علي. 2023. تأثير الفحم الحيوي المنتج من قش الأرز على نمو وإنتاجية نبات الخيار. مجلة العلوم الزراعية، 14(1)، 65-80.

منظمة الأغذية والزراعة. 2022. المنتجات الثانوية لنخيل التمر. سلسلة النشرات الإرشادية لنخيل التمر. الخرطوم http. // dio.org./ 10.4060/cb3588ar

المنظمة العربية للتنمية الزراعية. 2022. المنتجات الثانوية لنخيل التمر: الإمكانات والفرص. منظمة الأغذية والزراعة للأمم المتحدة (.FAO)

يحيى، الطاهر أحمد وسليمان، أبو بكر خليل. 1984. الدليل العلمي لخواص التربة الطبيعية. منشورات جامعة الفاتح.

يوسف، أحمد. 2020. تأثير الفحم الحيوي على نمو وإنتاجية نبات الذرة الرفيعة. مجلة العلوم الزراعية والبيئية، 15(2)، 125-140.

المراجع غير العربية:

Abou-Zeid, H. M., & Aly, H. M. 2023. Application of olive mill waste-based biochar for improving wheat response to salt stress. Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences, 11(5), 854-865

Ajiboye, TK; Abdulkareem, S; Anibijuwon, A. O. Y, 2016. Investigation of Mechanical Properties of Briquette Product of Sawdust-charcoal as a Potential Domestic Energy Source. J. Appl. Sci. Environ. Manage. Dec. 2016 Vol. 20 (4) 1179-1188.

http://dx.doi.org/10.4314/jasem.v20i4.34

Akay, G., Yigit, N. O., & Özcan, O. 2019. Olive tree pruning's and olive mill solid waste as feedstocks for biochar production and application for soil amendment. Bioresource Technology, 278, 248–256.

Ali A, Jabeen N, Chachar Z, Chachar S, Ahmed S, Ahmed N, Laghari AA, Sahito ZA, Farruhbek R and Yang Z 2025. The role of biochar in enhancing soil health & interactions with rhizosphere properties and enzyme activities in organic fertilizer substitution. Front. Plant Sci. 16:1595208. doi: 10.3389/fpls.2025.1595208.

Energy and Sustainable Development, 11(1), pp. 45-58.

Koves, M.; Madár, V.; Ringer,M.; Kocsis, T, 2024. Overview of Traditional and Contemporary Industrial Production Technologies for Biochar along with Quality Standardization Methods. Land, 13, 1388. https://doi.org/10.3390/land13091388

Lee, D. 2023. Effect of agricultural waste type on properties of biochar used as fuel for heating and cooking. Bioresource Technology, 375, 129876

Lee, S., & Park, J. 2020. "Biochar Production from Palm Waste: Properties and Applications." Bioresource Technology, 142, 105789.

Li1 Q. , X. Li, J. Jiang, L. Duan, S. Ge, Q. Zhang, J. Deng, S. Wang, J Hao. 2016 Semi-coke briquettes: towards reducing emissions of primary PM2.5, particulate carbon, and carbon monoxide from household coal combustion in China. Rep. 6, 19306; doi: 10.1038/srep19306 (2016).

Pivato A, Malesani R, Bocchi S, Rafieenia R and Schievano. A. 2024. Biochar addition to compost heat recovery systems improves heat conversion yields. Front. Energy Res. 11:1327136. doi: 10.3389/fenrg.2023.1327136.

Sette, C. R., Freitas, P. C., Almeida, R. A., & Yamaji, F. M. 2020. Production and characterization of biochar briquettes from agricultural wastes using corn starch as binder. Journal of Cleaner Production, 268, 122245.

Smith, J. 2024. Effect of biochar produced from coconut shells on growth and yield of tomato plants. Scientia Horticulturae, 323, 110025.

Borowski, G., W. Stępniewski, and K. Wójcik-Oliveira. 2017. Effect of starch binder on charcoal briquette properties. Int. Agrophys., 2017, 31, 571-574 doi: 10.1515/intag-2016-0077.

Bridgwater, A. V. 2003. Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass. Chemical Engineering Journal, 176, 178-194.

Carter, E. 2022. Biochar production from agricultural waste and its impact on the environment. Bioresource Technology, 345, 126489

G. T. Anguruwa, B. B. Adetunji, I. T. Ademola, M. O. Omidiran, A. R. Alawode, R. I., Oyediran, O. O. Ayodele and E. A. Adekunle. 2024. Production and characterization of corn chaff briquette using cassava starch and gum Arabic as binders. Agr. Foo. Nat. Res. J. Volume 3, Issue 2, Page 282 – 288.

Garcia, R., et al. 2018. "Effect of Pyrolysis Temperature on the Properties of Biochar Produced from Olive Stones." Fuel, 215, 325-333.

Glalah M, Antwi-Boasiako C, Adu-Gyamfi D 2024. Binder-type effect on the physicomechanical, combustion and emission properties of Alstonia boonei De Wild. sawdust and Theobroma cacao L. pod biochar briquettes for energy applications. PLoS ONE 19(7): e0306827. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0306827

Hasibuan, A., et al. 2025. Investigation of moisture content and physical properties of compressed biochar units. Journal of Renewable

Wang, T. Y. Li, D. Zhi, Y. Lin, K. He, B. Liu, H. Mao, 2019. Assessment of combustion and emission behavior of corn straw biochar briquette fuels under different temperatures. Journal of Environmental Management. Volume 250.

Wilaipon, P. 2007. The effects of binder ratio and compression pressure on the density of biomass briquette. International Journal of Sustainable Energy, 26(1), 33-39.

Yuan Y. , Q. Liu , H. Zheng , M. Li, Y. Liu , X. Wang , Y. Penga , X. Luo , F. Li, X. Li , B. Xing. 2023. Biochar as a sustainable tool for improving the health of salt-affected soils. Soil & Environmental Health. Volume 1, Issue 3, September 2023.1-18

Smith, J., & Jones, A. 2019. "Conversion of Citrus Waste to Biochar: A Review." Journal of Environmental Science and Technology, 53(10), 5432-5445

Thalita F. A, C. A. Davies, F. H. Toledo, C. E. P. Cerri. 2019. Dynamic biochar effects on nitrogen use efficiency, crop yield and soil nitrous oxide emissions during a tropical wheat-growing season. Journal of Environmental Management. Volume 252, 15 December 2019, 109638.

Velázquez-Martí, B., Estornell-Tomás, J., & López-Cortés, I. 2010. The Influence of Mechanical Pruning in Cost Reduction, Production of Fruit, and Biomass Waste in Citrus Orchards. Applied Engineering in Agriculture (ASABE), 26(4), 647–655.

THE LIBYAN JOURNAL OF AGRICULTURE
Volume (31), No. (2), 2026: 1 - 12

Original Article

Investigation of the Mechanical and Thermal Properties of Briquettes Made from Pruning's of Date Palm (*Phoenix dactylifera*), Olive (*Olea europaea*), and *Citrus* Trees

Ayada Mohammed Hallab[1]; Mohamed Abusaa Fennir[2]; Mohamed Taher Morghem[3]; Abdusalam Mohamed Benhmeda[4] and Somia Emhemed Hashafra[5]

[1]Libyan National Research Agency, [2,3 and 5]Postharvest Laboratory, Department of Agricultural Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tripoli. [4]Agricultural Research Center, Tripoli Libya

ABSTRACT

This study was conducted at the laboratories of the Faculties of Agriculture and Engineering at the University of Tripoli. It investigated several mechanical and thermal properties of compressed biochar units (briquettes) derived from palm, olive, and citrus byproducts. The biochar produced through pyrolysis was ground, and corn starch was added as a binding agent at concentrations of 6g and 10g per 90g of biochar representing 6.7% and 11.1%, respectively. The components were hand kneaded, and a metal mold with an inside diameter of 4cm and a pressing tool were used to form cylindrical units weighing approximately 22g. The samples were dried, and their moisture content and dry density were determined, followed by compression testing and the assessment of combustion characteristics.

The results revealed a significant effect of both the starch percentage and the species type on the studied properties. The highest dry density was recorded for palm biochar at 0.596 g/cm3, followed by olive at 0.570g/cm3, and then citrus at 0.5440g/cm3. Regarding compressive stress, the differences were also significant; palm recorded the highest strength at 1.71 MPa , followed by olive at 1.63 MPa , while citrus recorded the lowest value at 1.26 MPa.

The influence of the starch ratio and species type was also significant on combustion characteristics. Citrus biochar recorded the highest energy production rate at 1002.77 kJ/kg and a maximum water temperature of 85.65°C. This was followed by olive with an average of 916.13 kJ/kg and 80.07°C, while palm recorded 826.58 kJ/kg and 75.35°C. Additionally, palm biochar yielded the highest ash content at 3.47g, followed by olive at 2.02g, while citrus had the lowest amount at 1.95g. Overall, the study demonstrated the durability briquettes using a starch ratio of approximately 10%, and confirmed that these byproducts can be used as effective energy sources.

Keywords: Mechanical and thermal properties, biochar, compressed units, pruning byproducts.

Corresponding Author: Mohamed Abusaa Fennir, Department of Agricultural Engineering. Faculty of Agriculture. University of Tripoli

Phone: +218924190621 **Email: m.fennir@uot.edu.ly**

Received: 5/1/2026 **Accepted: 21/6/2026**