



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



جامعة الشهيد حمه لخضر الوادي

كلية التكنولوجيا

مذكرة التخرج لنيل شهادة

ماستر أكاديمي

ميدان : العلوم والتكنولوجيا

شعبة: هندسة الطرائق

تخصص: هندسة كيميائية

من إعداد الطلبة:

1- سناء زكور

2- مريم بركو

3- ألاء قريرة

## الموضوع

**تأثير الفحم الحيوي وتحلل السليلوز على التربة الزراعية شبه  
الحضرية**

نوقشت في: 2025/05/28

أمام لجنة المناقشة:

جامعة الوادي	رئيسا	أستاذ مساعد (ب)	د. ديه وحيدة
جامعة الوادي	مناقشا	أستاذ محاضر (ب)	د. ثابت أمينة
جامعة الوادي	مشرفا	أستاذ محاضر (ب)	د. زغود سمية

الموسم الجامعي: 2025/2024





## الإهداء

بسم الله الرحمن الرحيم

اقتداءً بقوله تعالى: "لئن شكرتم لأزيدنكم" (إبراهيم: 7).

الحمد لله رب العالمين على جزيل نعائمه وإن فضله عليّ كان عظيماً  
وها أنا اليوم أصل إلى هذه المحطة وأتوجه بالشكر والتقدير إلى نبض قلبي وسندي في الحياة،  
الغالي حبيبي مصطفى...

وإلى روعي وريحانتي، أمي...

ويا من أشد بهم عضدي وبقربهم تزهر أيامي إلى عزوتي وسندي، إخوتي وأخواتي الأحباء...  
وإلى من رافقتنا خطواتي في هذه المذكرة رغم كل شيء، صديقتي: مريم وآلاء.

إلى من كانوا عوناً وسنداً في هذا الطريق، من آمن بقدراتي ودعمني ولو بكلمة طيبة... خاصة  
إلى أم صديقتي مريم، لكم مني كل الحب والامتنان.

إلى أساتذتي الأفاضل ومشرفي البحث الكرام... لكم كل الشكر والتقدير على توجيهاتكم  
وإرشاداتكم.

وفي الختام لقوله تعالى: "وآخر دعوانهم أن الحمد لله رب العالمين" (يونس: 10) حمداً لله  
رب العالمين، أسأل الله أن يتقبل هذا العمل، وأسأله لي ولكم التوفيق..

سناء مصطفى





## الإلهام

بسم الرحمن الرحيم: "وما توفيقي إلا بالله عليه توكلت وإليه أنيب". صدق الله العظيم

اما الان فأنا الحمدالله بكامل قوتي وعزيمتي وحببي العظيم لنفسي في المكان الذي كنتُ أصبو له منذ زمن طويل.. أهدي تخرجي هذا إلى عزيزٍ حُتم اسمه بي وغالي كان يطمح ان يراني متفوقة ولم يستطع ان يكمل المسيرة معي من كان يسموا لأن يراني في مكاني هذا ويفتخر بي رحلت جسدا وبقيت نورا في قلبي.

### الى روح ابني الغالي

الى من جعل الجنة تحت اقدمها انيسة العمر وحببية الروح وأعظم نعم الله علي التي ضمت اسمي بدعواتها في ليلها ونهارها وأضاءت بالحب دربي وكانت لي سحابا ماطرا بالحب والبذل والعطاء وكانت سببا بعد الله فيما انا عليه.

### الى امي حومه الغالية

قال تعالى: ﴿وَسَنَشُدُّ عَضُدَكَ بِأَخِيكَ﴾ عضدي وسندي بعد الله، كنت القوة حين ضعفت، والهدوء حين اشتدت بي العواصف، شكراً لوقوفك الصادق، ودعمك الذي لا يُقارن، أسأل الله أن يجزيك عني خير الجزاء.

### الى اخي

الى القلوب التي احتضنتني، والضحكات التي خففت عني كل تعب، شكراً لكنّ على الحب، والدعاء، والرفقة التي لا تُعوض ودعمك طريقي نحو الثبات أنتن فخري

### الى قرة عيني اخواتي

كنتنّ البلم في أوقات التعب، والنور في لحظات العتمة في حضوركن يخفّ الحمل، ويزهر الوقت، وتطيب الذاكرة، الى صديقتي فطوم الكويتية لكي خالص الشكر والحب.

### الى صديقاتي واصدقائي

كنتم الأمل المشرق في أيامي، ضحكاتكم كانت نسيم راحتي، وبراءتكم ألهمتني المضيّ رغم التعب

### الى احفادنا

مريم بروكو





## الإهداء

الحمد لله الذي بنعمته تمت الصالحات

الى من أعطتني بدون مقابل. نور الدرب والسراج الذي لا ينطفئ " امي "  
الى من علمنا ان الدنيا كفاح " ابي " سلاحه العلم والمعرفة.  
الى ضلعي الثابت وأمان أيامي والعقد المتين، الى من شددت عضدي بهم  
اخواتي " شيماء خولة "  
الى سكر العائلة، أطفال اختي الاحب الى قلبي " جمال سيرين "  
الى صديقاتي ورفيقات المشوار " مريم سناء "  
لكل من كان عوننا لنا.

ألاء قريرة



# شكراً وإلحاحاً

الحمد والشكر لله الذي رزقنا العقل وحسن التوكل عليه سبحانه وتعالى وألهمنا الصبر ووقفنا لإتمام هذا العمل والصلاة والسلام على نبينا محمد وعلى آله وصحبه أجمعين.

نتوجه بخالص الشكر وعظيم الامتنان والتقدير إلى الأستاذتين الفاضلتين: المشرفة "د. سمية زغود" والأستاذة المساعدة والداعمة "د. إلهام بن عمر" على ما بذلتاه من جهد، وعلى ما قدمته لنا من توجيهات قيمة، ونصائح سديدة، وتشجيع مستمر طوال فترة إعداد هذه المذكرة، لقد كانوا نورا أضاء لنا دروب البحث، وساهموا بشكل كبير في إثراء هذا العمل وإخراجه في صورته النهائية.

إلى الأستاذة "د. همامي هادية" على مساعدتها لنا بنصائحها وتحفيزها ولا يفوتنا أن نتوجه بالشكر الجزيل لأعضاء لجنة المناقشة الكرام، على تفضلهم بقبول مناقشة هذا البحث وإثرائهم بملاحظاتهم القيمة وتوجيهاتهم السديدة.

ونخص بالشكر أيضاً إلى "د. محمد الطيب وصيف خالد" على مجهوداته معنا.

وأخيراً، نتوجه بفائض من الحب والتقدير إلى عائلاتنا الغالية وللأصدقاء الأوفياء على دعمهم المتواصل وتشجيعهم الدائم وإيمانهم بقدراتنا والذي كان الدافع الأكبر لنا لإتمام هذا العمل والى كل من دعمنا ودعاء لنا بالنجاح والتوفيق.

## ملخص:

يتزايد الاهتمام بأهمية الفحم الحيوي والنفايات العضوية الغنية بالسليولوز في تحسين جودة التربة وتعزيز الممارسات الزراعية المستدامة، حيث تُركز هذه الدراسة على دور الأسمدة العضوية، وخاصةً الأسمدة الحيوية بما فيها الفحم الحيوي، والنفايات الغنية بالسليولوز في تحسين جودة التربة وتعزيز الممارسات الزراعية المستدامة، و تم تحليل الأسمدة العضوية باستخدام تحليل الأشعة تحت الحمراء والأشعة فوق البنفسجية والمرئية وتحليل نمو النبات ومستويات العناصر الغذائية في التربة (الحديد (Fe) والزنك (Zn)) باستخدام مطيافية الامتصاص الذري لفرن الجرافيت، و أظهرت النتائج أن القشور المحروقة (AAP، AAF، AAC) أنتجت نباتاتٍ أكثر صحة، وإطلاقاً لمحتوى أيونات الحديد، و أظهرت قشور المطحونة (AGF، AGP، AGC) نمواً معتدلاً، ونسب جيدة لإطلاق العناصر الغذائية، بينما سجلت الأنواع المفتتة والتربة العادية نمو عادي، وتقدم الدراسة تحليلاً شاملاً لهذه الحلول الطبيعية، وتقدمها كبديل فعال وصديقة للبيئة لتعزيز الإنتاجية الزراعية مع الحفاظ على الاستدامة البيئية.

**الكلمات المفتاحية:** النفايات العضوية، الفحم الحيوي، السليولوز، الزراعة المستدامة.

## Abstract:

There is growing interest in the importance of biochar and cellulose-rich organic waste in improving soil quality and promoting sustainable agricultural practices. This study focuses on the role of organic fertilizers, particularly biofertilizers including biochar and cellulose-rich waste, in improving soil quality and promoting sustainable agricultural practices. Organic fertilizers were analyzed using infrared, ultraviolet, and visible spectrophotometers, while plant growth and soil nutrient levels (iron (Fe) and zinc (Zn)) were analyzed using graphite furnace atomic absorption spectroscopy. The results showed that burnt peels (AAP, AAF, and AAC) produced healthier plants and higher iron ion release. Milled peels (AGP, AGF, and AGC) showed moderate growth and good nutrient release rates, while crushed types and ordinary soil recorded normal growth. The study provides a comprehensive analysis of these natural solutions and proposes them as effective and environmentally friendly alternatives for enhancing agricultural productivity while maintaining environmental sustainability.

**Keywords:** Organic waste, biochar, cellulose, sustainable agriculture

الصفحة	العنوان
	الإهداء
	شكر وعرفان
	قائمة الرموز
	قائمة الأشكال
	قائمة الجداول
	الفهرس
2	المقدمة العامة
	الفصل الأول: الفحم الحيوي
8	تمهيد
8	1.1. لمحة تاريخية
8	2.1. تعريف
8	1.2.1. الكتلة الحيوية
9	2.2.1. الفحم الحيوي
9	3.1. طرق انتاج الفحم الحيوي
10	1.3.1. التحلل الحراري
11	1.1.3.1. تحلل السليلوز
12	2.1.3.1. تحلل الهيميسليلوز
12	3.1.3.1. تحلل اللجنين
12	2.3.1. الكربنة الحرارية المائية
13	3.3.1. التغويز
13	1.3.3.1. التجفيف
13	2.3.3.1. الأكسدة/الاحتراق
14	4.3.1. التخميص والتفحيم السريع
14	1.4.3.1. التسخين
14	2.4.3.1. التسخين المسبق
14	3.4.3.1. بعد التجفيف
15	4.4.3.1. التخميص
15	5.4.3.1. التبريد

15	4.I. العوامل المؤثرة على إنتاج الفحم الحيوي
16	5.I. خصائص الفحم الحيوي
16	1.5.I. الخصائص الفيزيائية
17	2.5.I. الخصائص الكيميائية
18	6.I. العوامل المؤثرة على خصائص الفحم الحيوي
18	1.6.I. المواد الخام
19	2.6.I. درجة حرارة الكربنة
19	3.6.I. زمن المكوث
19	4.6.I. المعالجة المسبقة للكتلة الحيوية
20	7.I. توصيف الفحم الحيوي
20	1.7.I. المجموعات الوظيفية
21	2.7.I. مساحة السطح والمسامية
21	3.7.I. المجهر الإلكتروني الماسح
21	4.7.I. مطيافية تحويل فورييه بالأشعة تحت الحمراء
22	5.7.I. حيود الأشعة السينية
22	6.7.I. التحليل الوزني الحراري
23	7.7.I. تحليل بروناور-إيميت-تيلر (BET)
23	8.7.I. مطيافية الرنين المغناطيسي النووي
23	9.7.I. مطيافية رامان
23	10.7.I. مطيافية الفوتون بالأشعة السينية
24	11.7.I. استقرار الفحم الحيوي
24	8.I. تطبيقات الفحم الحيوي
26	9.I. الفحم الحيوي والاستدامة
27	خاتمة الفصل الأول
28	مراجع للفصل الأول
<b>الفصل الثاني: السليلوز</b>	
33	تمهيد
33	1.II. لمحة تاريخية عن السليلوز
33	2.II. مواد الليجنوسليلوز
34	1.2.II. السليلوز
34	2.2.II. اللجنين
35	3.2.II. الهيميسليلوز
36	3.II. التركيب الكيميائي للسليلوز
36	4.II. مصادر السليلوز
39	5.II. خواص السليلوز
39	1.5.II. الخواص الفيزيائية

40	2.5.II. الخواص الكيميائية
40	3.5.II. الخواص الميكانيكية
41	6.II. أنواع السليلوز
41	1.6.II. السليلوز البكتيري
42	2.6.II. أسيتات السليلوز
42	3.6.II. إيثيل السليلوز
42	4.6.II. هيدروكسي بروبيل السليلوز
43	7.II. أهمية السليلوز
43	8.II. الطرق الخضراء لاستخلاص السليلوز
45	9.II. توصيف السليلوز
46	1.9.II. المجهر الالكتروني الماسح (SEM) والنافذ (TEM)
46	2.9.II. مطيافية تحويل فورييه للأشعة تحت الحمراء
46	3.9.II. حيود الأشعة السينية
47	4.9.II. التحلل الحراري للسليلوز
47	10.II. تطبيقات السليلوز
48	1.10.II. إستخدام السليلوز في الطاقة المتجددة
48	2.10.II. التطبيقات الطبية الحيوية والصيدلانية للسليلوز
49	خاتمة الفصل الثاني
50	مراجع الفصل الثاني
<b>الفصل الثالث: دراسات سابقة</b>	
55	تمهيد
55	1.III. دراسات سابقة حول استغلال الفحم الحيوي في تعزيز التربة الزراعية
55	1.1.III. الدراسة الأولى
56	2.1.III. الدراسة الثانية
56	3.1.III. الدراسة الثالثة
57	4.1.III. الدراسة الرابعة
59	5.1.III. الدراسة الخامسة
60	6.1.III. الدراسة السادسة
61	7.1.III. الدراسة السابعة
61	8.1.III. الدراسة الثامنة
62	9.1.III. الدراسة التاسعة
63	10.1.III. الدراسة العاشرة
64	2.III. دراسات سابقة حول استغلال السليلوز في تعزيز التربة الزراعية
64	1.2.III. الدراسة الأولى
64	2.2.III. الدراسة الثانية
66	3.2.III. الدراسة الثالثة

67	4.2.III. الدراسة الرابعة
67	5.2.III. الدراسة الخامسة
68	6.2.III. الدراسة السادسة
70	7.2.III. الدراسة السابعة
70	8.2.III. الدراسة الثامنة
71	9.2.III. الدراسة التاسعة
72	10.2.III. الدراسة العاشرة
	خاتمة الفصل الثالث
74	مراجع الفصل الثالث
<b>الفصل الرابع: المواد والطرق والنتائج والمناقشة</b>	
75	تمهيد
75	1.VI. المواد والأدوات
75	1.1.VI. المواد المستخدمة
76	2.1.VI. الأدوات
76	2.VI. خطوات العمل
79	3.VI. تقنيات التحليل والتوصيف
79	1.3.VI. مطيافية تحويل فورييه للأشعة تحت الحمراء
80	2.3.VI. مطيافية الأشعة فوق البنفسجية
81	3.3.VI. تحليل الطيفي للامتصاص الذري باستخدام فرن جرافيت
82	4.VI. نتائج والمناقشة
82	1.4.VI. مطياف الأشعة تحت الحمراء لقشور الكوكاو
84	2.4.VI. تحليل نمو النبات
84	1.2.4.VI. نبات البازلاء
86	2.2.4.VI. نبات الفول
87	3.2.4.VI. نبات الحمص
89	3.4.VI. نتائج التحليل والتوصيف
89	1.3.4.VI. مطيافية الأشعة فوق البنفسجية
90	2.3.4.VI. التحليل الطيفي للامتصاص الذري باستخدام فرن الجرافيت
95	خاتمة الفصل الرابع
96	مراجع الفصل الرابع
	الملاحق

الصفحة	العنوان
<b>الفصل الأول: عموميات حول الفحم الحيوي</b>	
10	الجدول (1.I): تقنيات التحويل الحراري الكيميائي وظروف عمليتها.
<b>الفصل الثاني: السليلوز</b>	
37	الجدول (1.II): بعض مصادر السليلوز ومحتواها النسبي.
39	الجدول (2.II): انتقاخ أنواع مختلفة من السليلوز في الماء.
44	الجدول (3.II): مزايا وعيوب الطرق الخضراء لاستخراج السليلوز.
<b>الفصل الرابع: المواد والطرق والنتائج والمناقشة</b>	
79	الجدول (1.VI): الترميز لكل عينة من النبات.
85	الجدول (2.VI): قياسات الساق لنبات البازلاء.
85	الجدول (3.VI): قياسات الأوراق لنبات البازلاء.
87	الجدول (4.VI): قياسات الساق لنبات الفول.
87	الجدول (5.VI): قياسات الأوراق لنبات الفول.
87	الجدول (6.VI): قياسات الساق لنبات الحمص.
88	الجدول (7.VI): قياسات الأوراق لنبات الحمص.
90	الجدول (8.VI): تراكيز معادن عنصري الزنك (Zn) والحديد (Fe) للتربة المستخدمة والأسمدة والبذور.
91	الجدول (9.VI): نتائج تحاليل الحديد لتربة نبات البازلاء.
91	الجدول (10.VI): نتائج تحاليل الزنك لتربة نبات البازلاء.
92	الجدول (11.VI): نتائج تحاليل الحديد لتربة نبات الفول.
93	الجدول (12.VI): نتائج تحاليل الزنك لتربة نبات الفول.
94	الجدول (13.VI): نتائج تحاليل الحديد لتربة نبات الحمص.
94	الجدول (14.VI): نتائج تحاليل الزنك لتربة نبات الحمص.

الصفحة	العنوان
<b>الفصل الأول: الفحم الحيوي</b>	
9	الشكل (1.I): تحويل الكتلة الحيوية إلى فحم حيوي.
11	الشكل (2.I): آلية التحلل الحراري.
13	الشكل (3.I): عملية الكربنة الحرارية المائية.
13	الشكل (4.I): عملية التغويز.
14	الشكل (5.I): الخطوات المتبعة في عملية التخميص
16	الشكل (6.I): الخصائص والتطبيقات الرئيسية للفحم الحيوي
20	الشكل (7.I): توصيف الفحم الحيوي
25	الشكل (8.I): بعض استخدامات الفحم الحيوي
26	الشكل (9.I): الأهداف التحفيزية للفحم الحيوي
27	الشكل (10.I): نظام الصرف الصحي تيرا بريتا
<b>الفصل الثاني: السليلوز</b>	
34	الشكل (1.II): بنية جدار الخلية النباتية.
34	الشكل (2.II): الصيغة البنائية للسليلوز موضح للروابط 1,4- $\beta$ .
35	الشكل (3.II): كحولات سيناميلية (cinnamyl alcohols) الرئيسية الموجودة في لجنين النباتات "الطبيعية".
36	الشكل (4.II): المكونات الرئيسية للهيميسيليلوزات.
36	الشكل (5.II): السيلوببيوز.
38	الشكل (6.II): بعض مصادر السليلوز.
42	الشكل (7.II): أنواع السليلوز.
44	الشكل (8.II): عملية الاستخلاص الخضراء لاستخراج السليلوز.
46	الشكل (9.II): توصيف السليلوز.
47	الشكل (10.II): بعض استخدامات السليلوز.
<b>الفصل الرابع: المواد والطرق والنتائج المناقشة</b>	
75	الشكل (1.VI): قشور الكوكاو.
76	الشكل (2.VI): أشكال قشور الكوكاو.
77	الشكل (3.VI): سماد لقشور الكوكاو المختلفة.
77	الشكل (4.VI): تحضير السماد.

## قائمة الأشكال

78	الشكل (5.VI): اختصار علبه الزرع لمخلف الكوكا المفتت لنبات البازلاء (ACP).
78	الشكل (6.VI): أخذ وحفظ العينات.
80	الشكل (7.VI): جهاز مطيافية تحويل فورييه بالأشعة تحت الحمراء
81	الشكل (8.VI): جهاز مطياف الأشعة فوق البنفسجية والمرئية
81	الشكل (9.VI): تحضير العينة للأشعة فوق البنفسجية UV
82	الشكل (10.VI): جهاز التحليل الطيفي للامتصاص الذري باستخدام فرن جرافيت
82	الشكل (11.VI): تحضير العينة لقياس تراكيز (الزنك والحديد) بالامتصاص الذري
84	الشكل (12.VI): منحني أطياف FTIR لمخلف الكوكا والمحروق AA والمطحون AG
85	الشكل (13.VI): تطور نمو نبات البازلاء في التربة المعالجة والعادية.
86	الشكل (14.VI): تطور نمو نبات الفول في التربة المعالجة والعادية.
88	الشكل (15.VI): تطور نمو نبات الحمص في التربة المعالجة والعادية.
89	الشكل (16.VI): مطيافية الأشعة UV-vis لقشور الكوكا (a) وسماد القشور (b) (مطحون ومحروق)

## قائمة الرموز

الرموز	المعنى
A	امتصاص الضوء
AAS	مطياف الامتصاص الذري
B	قيمة تتناسب طرديا مع طول المسار عبر العينة
BC	فحم حيوي محضر
BET	تحليل بروناور-ايميت-تيلر
$\beta$ -O-4	رابطة اللجنين
$\beta$ -1,4	رابطة السليلوز
C	الكربون
C	التركيز
CaCl <sub>2</sub>	كلوريد الكالسيوم
Ca (H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	فوسفات احادي الكالسيوم
CD	السيكلوديسترين
CFM	اغشية دقيقة من كربوكسي ميثيل سليلوز
C-H	مجموعة وظيفية
-CH <sub>2</sub>	مجموعة الميثيلين
C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub>	الصيغة الكيميائية للسليلوز
CMC	كاربوكسي ميثيل السيلسلوز
CMC- K	كاربوكسي ميثيل السيلسلوز البوتاسيوم
CMC-Na	كاربوكسي ميثيل سيلسلوز صوديوم
CNF	ألياف النانو السليلوزية
CNF <sup>-</sup>	الياف النانو السليلوزية بشحنات سالبة
CNF <sup>+</sup>	الياف النانو السليلوزية بشحنات موجبة
C-O	رابطة بين ذرة الكربون والاكسجين
C-O-C	مجموعة ايثر
COOH	الحمض الكربوكسيل
DRIFTS	مطيافية تحويل فورية للأشعة تحت الحمراء ذات الانعكاس المنتشر

## قائمة الرموز

مطيافية تشتت الطاقة للأشعة السينية	EDX
مطياف الامتصاص الذري باللهب	FAAS
معدن الحديد	Fe
فلوريد الكربون	FC
مطياف الامتصاص الذري باستخدام فرن جرافيت	GFAAS
ذرة الهيدروجين	H
هيدروكسي بروبيل السليلوز	HPC
هيدروكسي بروبيل ميثيل سلولوز	HPMC
شدة الضوء المنقول بواسطة محلول العينة	I
شدة الضوء الساقط	I <sub>0</sub>
نطاق تردد الاشعة تحت الحمراء	IR
ايونات البوتاسيوم	K <sup>+</sup>
مغذي نترات البوتاسيوم	KNO <sub>3</sub>
قيمة تتناسب طردياً مع طول المسار عبر العينة	l
ميثيل السليلوز	MC
ذرة النيتروجين	N
جزيء النيتروجين	N <sub>2</sub>
صوديوم كاربوكسي ميثيل السيلسلوز	NaCMC
هيدروكسيديات المزدوجة النانوية السميكة ذات الطبقات الزهرية	NLDHs
مطيافية الرنين المغناطيسي النووي	NMR
نترات الامونيوم	NO <sup>-3</sup>
أيون النتريت	NO <sup>-2</sup>
ذرة الأوكسجين	O
الهيدروكسيل	OH
عنصر الفوسفور	P
الرقم الهيدروجيني	pH

## قائمة الرموز

عنصر الكبريت	S
المجهر الالكتروني الماسح	SEM
السيليكون	Si
المجهرية الالكترونية النافذة	TEM
التحليل الحراري الوزني	TGA
المساحة السطحية الكلية	TSA
الاشعة فوق البنفسجية والمرئية	UV-Vis
مطيافية الالكترونات الضوئية للأشعة السينية	XPS
حيود الاشعة السينية	XRD
مطيافية الاشعة السينية الفلورية	XRF USA XEDA
معدن الزنك	Zn
معامل الامتصاص المولي	$\epsilon$

المقام  
العامه

تلعب الزراعة دورًا حاسمًا في ضمان الأمن الغذائي العالمي، إلا أن الممارسات الزراعية الحديثة التي تعتمد بشكل كبير على الأسمدة والمبيدات الحشرية الكيماوية، وأدت إلى تدهور كبير في التربة، مما يهدد الأمن الغذائي والتنوع البيولوجي والاستدامة البيئية<sup>[1]</sup>، ولمعالجة هذه المخاوف يتجه الباحثون والممارسون بشكل متزايد نحو ممارسات الزراعة المستدامة التي تهدف إلى استعادة صحة التربة وتعزيزها، ومن بين هذه الممارسات، حظي استخدام الفحم الحيوي وتحلل السليلوز باهتمام كبير نظرًا لفوائدهما المحتملة لخصوبة التربة وصحة النظام البيئي بشكل عام<sup>[2]</sup>.

الفحم الحيوي مادة غنية بالكربون، وتنتج عن طريق تحليل المواد العضوية مثل المخلفات الزراعية ونفايات الغابات وروث الحيوانات في غياب الأكسجين، وتنتج هذه العملية شكلًا مستقرًا من الفحم النباتي، وقد وُجد أنه يُقدم العديد من المزايا عند استخدامه في التربة الزراعية<sup>[3]</sup>، ويُوفر هيكل الفحم الحيوي المسامي بيئة مناسبة للكائنات الحية الدقيقة المفيدة، مما يُعزز النشاط الميكروبي في التربة، وعلاوةً على ذلك ثبت أن الفحم الحيوي يُحسن الخصائص الفيزيائية للتربة، مثل احتباس الماء والتهوية والقدرة على الاحتفاظ بالمغذيات، وكما أشارت الدراسات إلى أن الفحم الحيوي يُمكن أن يزيد من سعة تبادل الكاتيونات في التربة، مما يُوفر العناصر الغذائية الأساسية بشكل أكبر للنباتات<sup>[4]</sup>، ومن المزايا المهمة الأخرى للفحم الحيوي دوره في التخفيف من آثار تغير المناخ من خلال عزل الكربون، وتقليل انبعاثات غازات الاحتباس الحراري، وتحسين قدرة التربة على الصمود في وجه الظواهر الجوية القاسية<sup>[5]</sup>.

تناولت العديد من الدراسات المقارنة فعالية الفحم الحيوي في مختلف أنواع التربة، والظروف البيئية، والممارسات الزراعية، وعلى سبيل المثال أظهرت الأبحاث التي قارنت تأثير الفحم الحيوي على التربة الحمضية بالقلوية أن الفحم الحيوي مفيد بشكل خاص في تحسين درجة حموضة التربة الحمضية، مما يجعلها أكثر ملاءمة لزراعة المحاصيل<sup>[6]</sup>، ركزت دراسات أخرى على الآثار طويلة المدى للفحم الحيوي على صحة التربة، حيث أظهرت النتائج تحسنًا مستدامًا في خصوبة التربة ونمو النباتات حتى بعد سنوات من الاستخدام<sup>[7]</sup>، وتدعم هذه الدراسات مجتمعةً الفحم الحيوي كمُحسِّن قيم لتحسين صحة التربة، ومع أن المدى الكامل لفوائده قد يختلف تبعًا لعوامل مثل المادة المصدر المستخدمة في إنتاج الفحم الحيوي، ومعدل استخدامه، والظروف البيئية المحلية<sup>[8]</sup>.

من ناحية أخرى يلعب تحلل السليلوز دورًا حاسمًا في ديناميكيات المادة العضوية في التربة<sup>[9]</sup>، حيث يعد السليلوز المكون الرئيسي لجدران الخلايا النباتية، وهو البوليمر العضوي الأكثر وفرة على وجه الأرض<sup>[10]</sup>، عندما تتحلل المواد النباتية التي تحتوي على السليلوز في التربة، فإنها تُطلق عناصر غذائية

أساسية مثل الكربون والنيتروجين والفوسفور، وهي عناصر حيوية لخصوبة التربة<sup>[11]</sup>، ويؤدي التحلل الميكروبي للسليولوز إلى تكوين الدبال ومركبات عضوية أخرى تُحسّن بنية التربة، وتزيد من احتباس الماء، وتُعزز دورة العناصر الغذائية<sup>[12]</sup>، وقد أظهرت الأبحاث أن معدل تحلل السليولوز يتأثر بعدة عوامل منها درجة حرارة التربة، ورطوبتها، وتركيبية المجتمعات الميكروبية، والتركيب الكيميائي<sup>[13]</sup>.

في حين أن تحلل السليولوز وحده يمكن أن يعزز خصوبة التربة، إلا أنه يمكن تعزيز آثاره بإضافة الفحم الحيوي<sup>[14]</sup>، وقد وُجد أن الفحم الحيوي يدعم نمو الكائنات الدقيقة المحللة للسليولوز من خلال توفير بيئة مستقرة لها، وقد بحثت العديد من الدراسات التفاعل بين الفحم الحيوي وتحلل السليولوز، وكشفت أن البنية المسامية للفحم الحيوي يمكن أن تكون بمثابة موطن للميكروبات التي تحلل السليولوز بكفاءة أكبر، مما يُسرّع إطلاق العناصر الغذائية في التربة، وتشير هذه النتائج إلى أن دمج الفحم الحيوي مع التعديلات العضوية القائمة على السليولوز، مثل مخلفات المحاصيل، يمكن أن يؤدي إلى تأثيرات تآزيرية تُحسّن كلاً من خصوبة التربة والتنوع الميكروبي<sup>[15]</sup>.

أبرزت الدراسات المقارنة الفوائد المحتملة للجمع بين تحلل الفحم الحيوي والسليولوز لتحسين صحة التربة، وعلى سبيل المثال قارنت إحدى الدراسات آثار الفحم الحيوي وحده، والسليولوز وحده، ومزيجهما على خصائص التربة في بيئات زراعية مختلفة، وأظهرت النتائج أن التربة المعالجة بكل من الفحم الحيوي والسليولوز أظهرت احتفاظاً أفضل بالمغذيات، وتنوعاً ميكروبياً أعلى، وعززت سلامة بنية التربة مقارنةً بالتربة المعالجة إما بالفحم الحيوي أو السليولوز وحده<sup>[16]</sup>، وعلاوة على ذلك كان العلاج المركب فعالاً بشكل خاص في تحسين التوافر الحيوي للمغذيات مثل النيتروجين والفوسفور، وهي عناصر أساسية لنمو النبات، وتتوافق هذه النتائج مع دراسات أخرى استكشفت التأثيرات التآزيرية لتحلل الفحم الحيوي والسليولوز، مما يشير إلى أن الممارستين يمكن أن تتكاملا لإنشاء أنظمة زراعية أكثر استدامة وإنتاجية<sup>[17]</sup>.

تهدف هذه الدراسة إلى دراسة تأثير تحلل الفحم الحيوي والسليولوز على التربة الزراعية شبه الحضرية، ومع التركيز على تأثيرهما على خصوبة التربة ودورة العناصر الغذائية وصحتها العامة، حيث يسعى هذا البحث إلى المساهمة في ممارسات زراعية مستدامة تُحسّن جودة التربة وتُعزز الرعاية البيئية.

حيث تضمنت هذه المذكرة أربعة فصول تتدرج تحت العناوين التالية:

✓ الفصل الأول: تناولنا فيه عموميات حول الفحم الحيوي: مفهوم، طرق التصنيع، توصيف والاستخدامات.

✓ الفصل الثاني: احتوى على ماهية السليلوز، مصادر، طرق الاستخلاص والاستخدامات.

✓ الفصل الثالث: تطرقنا فيه دراسات سابقة حول استغلال الفحم الحيوي والسيللوز كدعم للتربة الزراعية.

✓ الفصل الرابع: تضمن جزئين: الجزء الأول: المواد والطرق، والجزء الثاني: تطرقنا فيه الى النتائج المتوصل اليها ومناقشتها.

وفي الأخير ختمنا الدراسة بملخص حول تأثير الفحم الحيوي وتحلل السليلوز على التربة الزراعية شبه الحضرية واستغلالها لتعزيز هذه التربة، ختاماً بالتوصيات وآفاق مستقبلية.

## المراجع

- [1] A. Rehman, M. Farooq, D.-J. Lee, and K. H. Siddique, "Sustainable agricultural practices for food security and ecosystem services," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 29, no. 56, pp. 84076-84095, 2022.
- [2] D. Skrzypczak, G. Izydorczyk, R. Taf, K. Moustakas, and K. Chojnacka, "Cellulose-based fertilizers for sustainable agriculture: Effective methods for increasing crop yield and soil health," *Industrial Crops and Products*, vol. 205, p. 117500, 2023.
- [3] S. Sri Shalini, K. Palanivelu, A. Ramachandran, and V. Raghavan, "Biochar from biomass waste as a renewable carbon material for climate change mitigation in reducing greenhouse gas emissions—a review," *Biomass Conversion and Biorefinery*, vol. 11, no. 5, pp. 2247-2267, 2021.
- [4] A. Obia, J. Mulder, S. E. Hale, N. L. Nurida, and G. Cornelissen, "The potential of biochar in improving drainage, aeration and maize yields in heavy clay soils," *PLoS One*, vol. 13, no. 5, p. e0196794, 2018.
- [5] A. Kumar, T. Bhattacharya, S. Mukherjee, and B. Sarkar, "A perspective on biochar for repairing damages in the soil–plant system caused by climate change-driven extreme weather events," *Biochar*, vol. 4, no. 1, p. 22, 2022.
- [6] M. Rashid *et al.*, "Prospects of biochar in alkaline soils to mitigate climate change," *Environment, climate, plant and vegetation growth*, pp. 133-149, 2020.
- [7] A. Adekiya, T. Olayanju, S. Ejue, E. Alori, and K. Adegbite, "Contribution of biochar in improving soil health," *Soil health*, pp. 99-113, 2020.
- [8] G. M. Rahman *et al.*, "Biochar and organic amendments for sustainable soil carbon and soil health," *Carbon and nitrogen cycling in soil*, pp. 45-85, 2020.
- [9] X. Bai, Z. Guo, Y. Huang, and S. An, "Root cellulose drives soil fulvic acid carbon sequestration in the grassland restoration process," *Catena*, vol. 191, p. 104575, 2020.
- [10] S. Rongpipi, D. Ye, E. D. Gomez, and E. W. Gomez, "Progress and opportunities in the characterization of cellulose—an important regulator of cell wall growth and mechanics," *Frontiers in Plant Science*, vol. 9, p. 1894, 2019.
- [11] K. T. Osman and K. T. Osman, "Plant nutrients and soil fertility management," *Soils: Principles, properties and management*, pp. 129-159, 2013.

- [12] S. Wang, N. Wang, J. Xu, X. Zhang, and S. Dou, "Contribution of microbial residues obtained from lignin and cellulose on humus formation," *Sustainability*, vol. 11, no. 17, p. 4777, 2019.
- [13] Y. Lü, N. Li, D. Gong, X. Wang, and Z. Cui, "The effect of temperature on the structure and function of a cellulose-degrading microbial community," *Applied biochemistry and biotechnology*, vol. 168, pp. 219-233, 2012.
- [14] F. Shao *et al.*, "Synergistic effects of biochar and carboxymethyl cellulose sodium (CMC) applications on improving water retention and aggregate stability in desert soils," *Journal of Environmental Management*, vol. 331, p. 117305, 2023.
- [15] Y. Cheng, M. Huang, X. Shen, and C. Jiang, "Enhanced cornstalk decomposition by a psychrotrophic bacterial consortium comprising cellulose, hemicellulose, and lignin degraders with biochar as a carrier for carbon neutrality," *Bioresource technology*, vol. 344, p. 126259, 2022.
- [16] S. A. Haddad *et al.*, "Response of Cellulose Decomposition and Nodulation in Soils Amended with Biochar for Peri-Urban Agriculture," *Sustainability*, vol. 15, no. 13, p. 10003, 2023.
- [17] P. Jia, X. Wang, S. Liu, Y. Hua, S. Zhou, and Z. Jiang, "Combined use of biochar and microbial agent can promote lignocellulose degradation and humic acid formation during sewage sludge-reed straw composting," *Bioresource Technology*, vol. 370, p. 128525, 2023.

# الفصل الأول:

عموميات حول الفلم

التبويب

مع تزايد الاهتمام بالحلول المستدامة لمواجهة التحديات البيئية، برز الفحم الحيوي كمركب متعدد الاستخدامات، حيث حظي باهتمام متزايد من الباحثين والمختصين، يتم إنتاجه من مواد عضوية متجددة، مثل: مخلفات النباتات والخشب عبر عملية التحلل الحراري، مما جعله خياراً صديقاً للبيئة، والذي يتميز بخصائص فريدة تجعله مادة قيمة في مجالات متنوعة، فهو يساهم في عزل الكربون وتخزينه لفترات طويلة، مما يساعد في التخفيف من آثار تغير المناخ، وبالإضافة إلى ذلك يستخدم في معالجة المياه والهواء، و يشهد مجال الفحم الحيوي تطورات مستمرة، حيث يتم تطوير تقنيات جديدة لإنتاجه وتطبيقاته، بحيث يهدف البحث في هذا المجال إلى تحسين كفاءة إنتاجه وتوسيع نطاق استخدامه في مختلف القطاعات، وبفضل فوائده المتعددة، يعتبر أداة قوية لتحقيق التنمية المستدامة وحماية البيئة، حيث سنتطرق في هذا الفصل إلى ماهية الفحم الحيوي، صادر، خصائص، وتطبيقات.

### 1.1. لمحة تاريخية

يعود استخدام الفحم الحيوي إلى 2000 عام مضت على أقل تقدير<sup>[1]</sup>، وفي منتصف القرن التاسع عشر، كان أول اعتراف بتطبيقه في الزراعة الغربية، ولكن الاستخدام الدقيق له قد يمتد إلى أبعد من ذلك، حيث ترتبط أقدم أصول الفحم الحيوي بمجتمعات الهنود الأمريكيين في حوض الأمازون، تم إنشاء التربة الخصبة بشكل استثنائي والمعروفة باسم Terra preta، والتي تعني "التربة السوداء للهنود"، من قبل ثقافة أصلية قديمة، مما يوفر دليلاً على الاستخدام المكثف للفحم الحيوي، ويمكن العثور عليه في التربة في جميع أنحاء العالم بسبب الأحداث الطبيعية مثل حرائق الغابات والأراضي العشبية، التربة المعروفة بمستوياتها العالية جداً من تركيزات الفحم الحيوي، مثل مراعي أمريكا الشمالية، فهي من بين أكثر التربة إنتاجية في العالم، وفي أعقاب الاجتماع الأول لمنظمة الدفاع عن الفحم الحيوي الدولية، والذي عقد في أستراليا في عام 2007، أنشأت العديد من البلدان جمعيات الفحم الحيوي الوطنية لبدء مؤتمرات البحوث والعروض التوضيحية للفحم الحيوي، ومنذ ذلك الحين، زادت كمية الأبحاث التي يتم إجراؤها على الفحم الحيوي تدريجياً<sup>[2]</sup>.

### 2.1. تعريف

#### 1.2.1. الكتلة الحيوية (Biomass)

تمثل المواد الناتجة عن نمو الكائنات الحية الدقيقة أو النباتات أو الحيوانات<sup>[3]</sup>.

## 2.2.I. الفحم الحيوي (Biochar)

هو مصطلح علمي حديث، يُعرّف بأنه منتج غني بالكربون (C) ينتج عن تسخين الكتلة الحيوية في بيئة قليلة أو معدومة الأكسجين كما هو مبين في الشكل (1.I) وتختلف التعريفات في التفاصيل، ولكنها تتفق على أنه مادة صلبة مسامية تنتج عن التحويل الحراري الكيميائي للمواد العضوية في بيئة فقيرة بالأكسجين، وتتميز بخصائص فيزيائية وكيميائية مناسبة لتخزين الكربون في البيئة وتحسين وظائف التربة، وقد قامت مبادرة الفحم الحيوي الدولية<sup>[4]</sup> (International Biochar Initiative, IBI) بتوحيد تعريفه على أنها "مادة صلبة يتم الحصول عليها من التحويل الحراري الكيميائي للكتلة الحيوية في بيئة محدودة الأكسجين"، ويختلف الفحم الحيوي عن الفحم النباتي في الاستخدام النهائي، بحيث الفحم النباتي يستخدم كوقود، بينما الفحم الحيوي يستخدم لعزل الكربون وإدارة البيئة، ويرتبط مصطلح الفحم المائي (Hydrochar) ارتباطاً وثيقاً بالفحم الحيوي، ومع ذلك فإنه يتميز بظروف مختلفة مثل الكربنة الحرارية المائية للكتلة الحيوية<sup>[5]</sup>.



الشكل (1.I): تحويل الكتلة الحيوية إلى فحم حيوي.

## 3.I. طرق إنتاج الفحم الحيوي

نظراً لتزايد الاهتمام باستخدام الفحم الحيوي في تطبيقات مختلفة أدت إلى تنوع طرق إنتاجه، بحيث يعتبر التحويل الحراري الكيميائي الطريقة الأكثر شيوعاً فيشمل الانحلال الحراري والكربنة المائية والتغويز والتحميص<sup>[6, 7]</sup>، يتطلب الحصول على أعلى إنتاجية للفحم الحيوي اختيار الطريقة المناسبة بناءً على نوع الكتلة الحيوية وظروف العملية مثل معدل التسخين ودرجة الحرارة وزمن المكوث، حيث تؤثر هذه الظروف على الخصائص الفيزيائية والكيميائية للفحم الحيوي، ويختلف شكل الفحم الحيوي حسب ظروف العملية نتيجة لفقدان الوزن الذي يحدث على مراحل، بدءاً بفقدان الماء عند حوالي 100 °C، ومن ثم

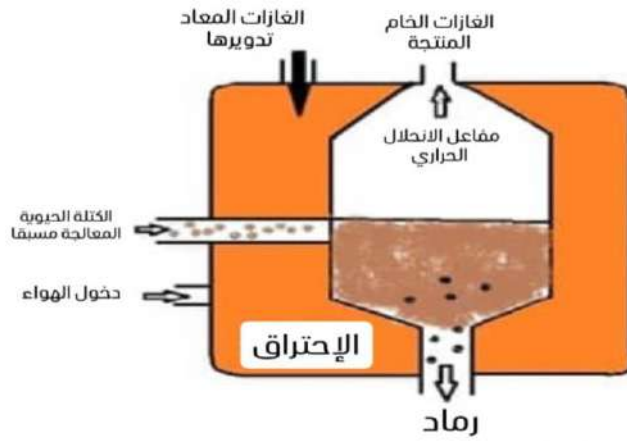
تحلل السليلوز والهيميسليلوز واللجنين فوق 220 °C، وأخيرًا حرق المخلفات الكربونية، حيث تم توضيح تقنيات التحويل الكيميائي الحراري وظروف عمليتها في **الجدول (1.I)**.

**الجدول(1.I):** تقنيات التحويل الحراري الكيميائي وظروف عمليتها<sup>[8]</sup>.

التقنية	درجة الحرارة (°C)	مدة الإقامة	إنتاج الفحم الحيوي (%)	العائد من الزيت الحيوي (%)	إنتاج الغاز الاصطناعي (%)
التحلل الحراري	700-300 (بطيء)	<2s (بطيئة)	35 (بطيء)	30 (بطيء)	35 (بطيء)
	1000-500 (سريع)	ساعة-يوم (سريع)	12 (سريع)	75 (سريع)	13 (سريع)
التفحيم الحراري المائي	300-180	16-1 ساعة (h)	80-50	20-5	5-2
التغويز	900-750	20-10 ثانية	10	5	85
التحميص	290	60-10 دقيقة	80	0	20
الكربنة السريعة	600-300	<30 دقيقة	37	/	/

### 1.3.I التحلل الحراري (Pyrolysis)

هو عملية التحلل الحراري للمواد العضوية في بيئة خالية من الأكسجين ضمن نطاق درجة حرارة 900-250 °C، وتستخدم هذه العملية لتحويل الكتلة الحيوية إلى منتجات ذات قيمة مضافة مثل الفحم الحيوي والغاز الاصطناعي والزيت الحيوي، ومن خلال هذه العملية تخضع المكونات الليجنوسليلولوزية لعمليات تفاعل مثل إزالة البلمرة والتجزئة والترابط المتبادل عند درجات حرارة محددة مما يؤدي إلى منتجات مختلفة في حالات صلابة وسائلة وغازية، ويعتمد إنتاج الفحم الحيوي على نوع الكتلة الحيوية المستخدمة، فتعتبر درجة الحرارة العامل الرئيسي الذي يحدد كفاءة المنتج<sup>[9]</sup>، وتظهر آلية عملية التحلل الحراري في **الشكل (2.I)**، بحيث يمكن تصنيف التحلل الحراري على أنه عملية تحلل حراري سريعة وبطيئة اعتمادًا على معدل التسخين ودرجة الحرارة وزمن التفاعل والضغط.



الشكل (2.1): آلية التحلل الحراري [8].

- التحلل الحراري السريع (Fast pyrolysis): يتم تداول التحلل الحراري السريع كإجراء كيميائي حراري مباشر يمكنه تسهيل الكتلة الحيوية الصلبة إلى زيت حيوي سائل ذو إمكانيات عالية لتطبيق الطاقة، بحيث تتميز ظروف التحلل الحراري السريع بما يلي :
- معدلات تسخين سريعة لجزيئات الكتلة الحيوية (<100 درجة مئوية / دقيقة).
- مقترنة بأوقات قصيرة لجزيئات الكتلة الحيوية وأبخرة التحلل الحراري (0.5-2 ثانية) عند درجات حرارة عالية .
- درجات حرارة معالجة التحلل الحراري المعتدلة (400-600 °C) .

أحد المكونات المميزة الرئيسية لابتكار التحلل الحراري السريع هو الحاجة إلى الحفاظ على وقت إقامة الأبخرة في المنطقة الساخنة إلى القاعدة لتحقيق جودة زيت حيوي رائعة، ويمكن تحقيق ذلك من خلال ضمان إطفاء أو تبريد الأبخرة بسرعة [10].

- التحلل الحراري البطيء (Slow Pyrolysis): في الانحلال الحراري البطيء، يكون معدل التسخين منخفضاً جداً حوالي 5-7 درجة مئوية/دقيقة ويمتلك زمن تفاعل أطول يزيد عن ساعة واحدة [11].
- وتتميز تقنية الانحلال الحراري البطيء بإنتاجية أفضل للفحم مقارنة بتقنيات الانحلال الحراري والكربنة الأخرى، ويمكن استخدام الفحم الحيوي كمحسن للتربة لتحسين جودتها.

### 1.1.3.I. تحلل السليلوز (Cellulose decomposition)

يتم تحديد آلية تحلل السليلوز من خلال تقليل درجة البلمرة المكونة من تفاعلين:

- التحلل الحراري البطيء: والذي يتكون من تحلل السليلوز في زمن تفاعل أطول ومعدل تسخين أقل.

- التحلل الحراري السريع: والذي يحدث بمعدل تسخين مرتفع من خلال التطاير السريع مما يؤدي إلى تطوير الليفوجلوكوزان (Levogluconan).

### 2.1.3.I. تحلل الهيميسليلوز (Hemicellulose decomposition)

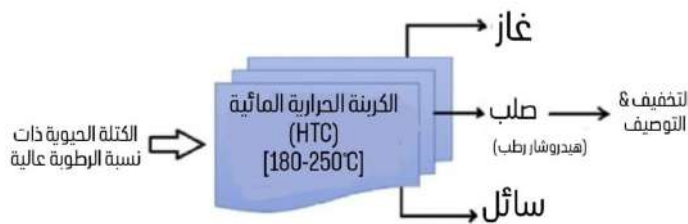
آلية تحلل الهيميسليلوز تشبه تلك الخاصة بالسليولوز، حيث يخضع الهيميسليلوز لعملية إزالة البلمرة لتكوين السكريات القليلة، ويمكن أن يتم ذلك من خلال سلسلة من التفاعلات بما في ذلك نزع الكربوكسيل (Decarboxylation) وإعادة الترتيب داخل الجزيء وإزالة البلمرة والأروماتة (Depolymerization and Aromatization) لإنتاج الفحم الحيوي أو يتحلل المركب إلى غاز اصطناعي وزيت حيوي [12].

### 3.1.3.I. تحلل اللجنين (Lignin decomposition)

على النقيض من آلية تحلل السليولوز والهيميسليلوز، فإن آلية تحلل اللجنين معقدة [13]، حيث تتكسر رابطة اللجنين  $\beta$ -O-4 مما يؤدي إلى إنتاج الجذور الحرة، فتلتقط هذه الجذور البروتونات من الأنواع الأخرى مما يؤدي إلى تكوين المركبات المتحللة، وتنتقل الجذور الحرة إلى جزيئات أخرى تؤدي إلى انتشار السلسلة.

### 2.3.I. الكربنة الحرارية المائية (Hydrothermal carbonization)

تُعتبر الكربنة الحرارية المائية طريقة فعالة من حيث التكلفة لإنتاج الفحم الحيوي، حيث تتم عند درجات حرارة منخفضة (180-250 °C)، ويسمى المنتج "الفحم المائي" لتمييزه عن المنتجات الجافة (التحلل الحراري والتغويز)، حيث تتضمن العملية خلط الكتلة الحيوية بالماء في مفاعل مغلق مع زيادة درجة الحرارة تدريجياً، فتنتج درجات الحرارة المختلفة منتجات مختلفة: الفحم الحيوي (>250 °C)، والزيت الحيوي (250-400 °C)، والغازات (<400 °C) كما هو موضح في الشكل (3.I) بحيث يتم إجراء عملية الكربنة الحرارية المائية، وتتضمن العملية تفاعلات مثل التكتيف والبلمرة وإزالة الماء داخل الجزيء لإنتاج الفحم المائي [14]، فيتحلل اللجنين إلى منتجات فينولية، ثم يتحول إلى الفحم المائي عبر إعادة البلمرة والتشابك.



الشكل (3.I): عملية الكربنة الحرارية المائية [18].

### 3.3.I. التغويز (Gasification)

هو عملية تحويل المواد الكربونية إلى غازات باستخدام عوامل التغويز ودرجات حرارة عالية<sup>[15]</sup>، ويشار إلى أن المنتج الرئيسي هو الغاز الاصطناعي والفحم منتج ثانوي، بحيث يتم عرض عملية التغويز في الشكل (4.I)، حيث يمكن تقسيم آلية التغويز إلى العديد من الخطوات على النحو التالي:



الشكل (4.I): عملية التغويز<sup>[8]</sup>.

### 1.3.3.I. التجفيف (Drying)

هو إزالة كاملة للرطوبة من الكتلة الحيوية عبر التبخير دون استعادة الطاقة، فيختلف محتوى الرطوبة في المواد المختلفة، ويتم التجفيف كخطوة منفصلة في التغويز عندما تكون نسبة الرطوبة عالية.

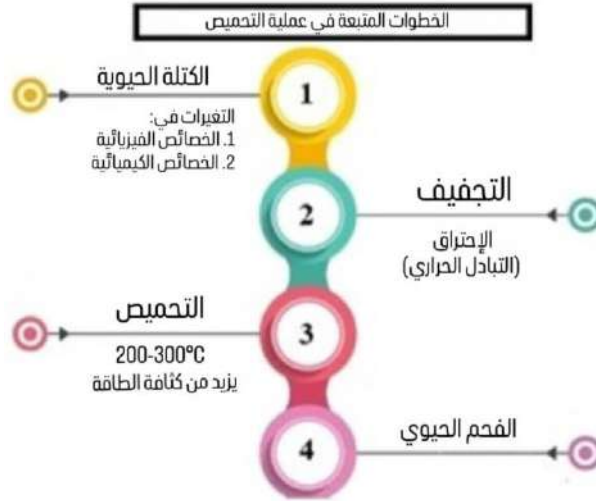
### 2.3.3.I. الأكسدة/الإحتراق (Oxidation/Combustion)

تفاعلات الأكسدة والإحتراق لعوامل التغويز توفر الطاقة الرئيسية لعملية التغويز، وتتفاعل هذه العوامل مع المواد القابلة للإحتراق داخل جهاز التغويز، منتجةً ثاني أكسيد الكربون وأول أكسيد الكربون والماء.

### 4.3.I. التخميص والتفحيم السريع (Torrefaction and flash carbonization)

التفحيم الخفيف هو تقنية جديدة لإنتاج الفحم الحيوي، بحيث يستخدم معدل تسخين منخفض (تحلل حراري المعتدل)، ويتم إزالة الأكسجين والرطوبة وثاني أكسيد الكربون باستخدام الهواء الخامل عند 300°C<sup>[16]</sup>، ويغير التفحيم خصائص الكتلة الحيوية (الحجم، الرطوبة، المساحة، معدل التسخين، الكثافة) بحيث يتم تمثيل الخطوات المتضمنة في عملية التفحيم في الشكل (5.I)، ويشمل التفحيم:

بالبخار (أقل من 260 °C وزمن مكوث يبلغ حوالي 10 دقائق)، والتفحيم الرطب (الكربنة الحرارية المائية، 180-260 °C وزمن إقامة يتراوح بين 5 و240 دقيقة)، والتفحيم التأكسدي (باستخدام عوامل مؤكسدة)، والتفحيم الخفيف وهو تحلل حراري غير كامل (200-300 °C ، أقل من 30 دقيقة، معدل التسخين أقل من 50 درجة مئوية/دقيقة، بدون أكسجين)، حيث يتضمن التسخين التجفيف (مسبق ولاحق) والتفحيم والتبريد.



الشكل (5.I): الخطوات المتبعة في عملية التفحيم [8].

**1.4.3.I. التسخين (Heating):** أثناء هذه العملية يتم تسخين الكتلة الحيوية حتى يتم الحفاظ على درجة حرارة التجفيف المطلوبة ويتبخر محتوى الرطوبة في الكتلة الحيوية.

**2.4.3.I. التسخين المسبق (Pre-heating):** تحدث هذه العملية عند درجة حرارة 100 °C حتى يتبخر محتوى الرطوبة الموجود في الكتلة الحيوية تمامًا.

**3.4.3.I. بعد التجفيف (Post-drying):** ترتفع درجة الحرارة حتى 200 °C ويتبخر محتوى الماء تمامًا، حيث يتم فقدان محتوى الكتلة بسبب ارتفاع درجة الحرارة.

**4.4.3.I. التفحيم (Torrefaction):** هذه العملية هي المرحلة الرئيسية لعملية التفحيم بالكامل، وتتم عند درجة حرارة 200 °C ويتم الحصول على درجة حرارة ثابتة أثناء العملية.

**5.4.3.I. التبريد (Cooling):** بعد تكوين المنتج يُسمح لدرجة الحرارة بالتبريد قبل ملامسته للهواء والحصول على درجة حرارة الغرفة ويتم إشعال سريع للكتلة الحيوية تحت ضغط عالٍ، مما يحولها إلى منتجات صلبة وغازية، وتتم العملية عند 300-600 °C وفي أقل من 30 دقيقة، وحوالي 40% من الكتلة الحيوية تتحول إلى منتجات صلبة، وتقل هذه النسبة بزيادة الضغط.

## 4.I. العوامل المؤثرة على إنتاج الفحم الحيوي

يعتمد إنتاجه بشكل كبير على الأنواع المختلفة من المواد الأولية المستخدمة ومحتوى رطوبتها ودرجة الحرارة والضغط، حيث تحتوي الكتلة الحيوية على ثلاث مجموعات رئيسية: السليلوز والهيميسليلوز واللجنين وكميات ضئيلة من المعادن، فتؤثر هذه النسب والرطوبة بشكل كبير على إنتاجية الفحم الحيوي، حيث أفاد بريدجواتر وبيكوك (Bridgwater and Peacocke)<sup>[17]</sup> أنه في عمليات التحلل الحراري السريع يعتبر محتوى الرطوبة حوالي 10% مرغوبًا فيه إلى حد ما أثناء عملية تصنيع الفحم مع مواد أولية يمكن كربنتها بحيث تحتوي على رطوبة بنسبة 15-20%.

إنتاج الفحم الحيوي هو عملية كيميائية حرارية، حيث تلعب درجة الحرارة دورًا رئيسيًا في خصائص الفحم الحيوي، حيث قام ماسيك (Masek)<sup>[18]</sup> وآخرون بإجراء دراسة عملية حول قدرة التحلل الحراري على إنتاج الفحم الحيوي من رقائق الصنوبر والأرز المختلطة ورقائق التنوب ومن حبيبات الخشب اللين، حيث تراوحت درجات الحرارة بين 350 و 550 °C، كما أفاد أيضا أن استقرار الفحم الحيوي يزداد مع زيادة درجة الحرارة، وأفاد أنجين وسينسوز (Angin and Sensoz)<sup>[19]</sup> أيضًا أن الخصائص الكيميائية والسطحية للفحم الحيوي تتأثر بدرجة حرارة التحلل الحراري مع زيادة درجة حرارة التحلل الحراري من 400 إلى 700 °C.

يؤثر الضغط أيضًا على إنتاجية الفحم الحيوي، حيث قام مانيا (Manya)<sup>[20]</sup> وآخرون بفحص تأثير الضغط المطلق (0.1-1.5 MPa) ودرجة الحرارة القصوى (400-550 °C) على سلوك التحلل الحراري لنفايات زيت الزيتون، بحيث تؤدي زيادة كل من الضغط المطلق ودرجة الحرارة القصوى إلى انخفاض في إنتاجية الفحم الحيوي، ومع ذلك يزداد إنتاج الكربون الثابت.

## 5.I. خصائص الفحم الحيوي

تعتبر خصائص الفحم الحيوي مهمة لتقييم فعاليته في إزالة المعادن الثقيلة وتحليل تطبيقاته، فتشمل بعض الخصائص المهمة مثل مساحة السطح وبنية المسام ودرجة الحموضة والمجموعات الوظيفية والتركيب العنصري والاستقرار والتي تتم مناقشتها أدناه<sup>[21]</sup>، حيث يوضح الشكل (6.I) أهم خصائص الفحم الحيوي وتطبيقاته.



الشكل (6.I): الخصائص والتطبيقات الرئيسية للفحم الحيوي [21].

### 1.5.I. الخصائص الفيزيائية

- **مساحة السطح (Surface area):** يفضل عمومًا أن تكون مساحة سطح الفحم الحيوي أكبر، بحيث تتأثر بشكل كبير بدرجة الحرارة والوقت والمادة الأولية، بحيث تعتبر درجة الحرارة هي العامل الأساسي الذي يؤثر على مساحة السطح، في دراسة أجراها تشانغ (Zhang) [22] وآخرون زادت مساحة السطح من 3.6 إلى  $82.9\text{m}^2/\text{g}$  مع ارتفاع درجة الحرارة من 300 إلى  $700\text{C}$  بسبب إطلاق المواد المتطايرة مع فقدان الهيدروجين والأكسجين الحامل للمجموعات الوظيفية، وبعد الوصول إلى قيمة الذروة لمساحة السطح يتم تدمير المسام بعد درجة حرارة معينة مما يؤدي إلى انخفاض في مساحة السطح، حيث تساعد مساحة السطح النوعية الكبيرة في امتصاص المعادن الثقيلة وتزيد من كفاءة إزالة الملوثات، وأوضح سون (Son) [23] وآخرون في دراستهم عن أهمية مساحة السطح الكبيرة التي أظهرت إزالة معدن النحاس بمقدار ضعفين مقارنة بالدراسات السابقة.

- **بنية المسام (Pore structure):** تعتبر درجة الحرارة عاملاً هاماً لتقييم خصائص المسام في الفحم الحيوي، حيث يزيد حجم المسام الكلي للفحم الحيوي من 0.5 إلى 0.6 سم مكعب/جرام عند زيادة درجة الحرارة من 400 إلى  $500\text{C}$ ، مما تسبب في ذوبان المسام ويؤدي إلى انسدادها [24]، ان وجود مسام نانوية منتظمة في الفحم الحيوي يسهل دخول أيونات المعادن الثقيلة [25]، حيث تلعب المواد المتطايرة دورًا هاماً في تحديد بنية المسام في الفحم الحيوي.

- **الاستقرار (Stability):** يتميز الفحم الحيوي بثباته العالي، حيث يتأثر استقراره بشكل كبير بنوع المواد الخام المستخدمة وطريقة التحلل الحراري وظروف الرقم الهيدروجيني، وتساعد زيادة درجة حرارة التحلل الحراري في إنتاج الفحم الحيوي بثبات عالٍ، وقد وجد أن الفحم الحيوي المنتج عند 600 °C أكثر استقرارًا من الفحم المنتج عند درجات حرارة 250، 350 و 450 °C في دراسة اجراها يانغ وآخرون (Yang)<sup>[26]</sup>، ولا يؤثر إجراء التحلل الحراري في وجود الأكسجين على استقراره حيث يكون الفقدان في الوزن ضئيلة للغاية، وفي دراسة داس (Das)<sup>[27]</sup> وآخرون يتم تحسين عملية التحلل الحراري بطريقة تجعل استقرار الفحم الحيوي مرتفعًا مما يجعل الفحم الحيوي له تطبيقات واسعة بما في ذلك استخدامه كمادة مضافة.

### 2.5.I. الخصائص الكيميائية

- **التركيب العنصري (Elemental composition):** يتكون الفحم الحيوي من عناصر مختلفة في تركيبه، بحيث تشمل العناصر الشائعة الكربون والهيدروجين والأكسجين، ويحتوي أيضًا على كميات ضئيلة من الكبريت والنيتروجين وعناصر أخرى، حيث تؤدي زيادة درجة حرارة التحلل الحراري إلى زيادة محتوى الكربون، وانخفاض محتوى الهيدروجين والأكسجين في الفحم الحيوي من قش الأرز من 4.4 إلى 2.9% و 49% إلى 30.1% على التوالي، وعند زيادة درجة حرارة التحلل الحراري من 400 إلى 600 °C يؤدي حدوث البلمرة والأروماتة والكربنة للفحم الحيوي إلى محتوى عالٍ من الكربون، ويتغير التركيب العنصري للفحم الحيوي بسبب فقدان كتلته<sup>[25]</sup>، وتؤدي درجات الحرارة المنخفضة أقل من 100 °C إلى فقدان كتلة الفحم الحيوي بسبب محتوى الرطوبة الموجود، بينما تؤدي درجات الحرارة الأعلى من 500 °C إلى أكسدة جزيئات الكربون مما يؤدي أيضًا إلى فقدان كتلة الفحم الحيوي<sup>[28]</sup>.

- **المجموعات الوظيفية (Functional groups):** يتميز الفحم الحيوي بمجموعات وظيفية مختلفة تحتوي على الأكسجين على السطح، حيث أفاد تشين وآخرون (Chen)<sup>[29]</sup> أن نسبة ذروة D-Raman إلى ذروة G-Raman (ID/IG) كانت 0.736 في الفحم الحيوي الناتج عن الحمأة الرطبة مقارنة بـ 0.805 في الفحم الحيوي الناتج عن الحمأة الجافة في طيف رامان، ويعتمد وجود مجموعة وظيفية معينة بشكل كامل على ظروف التحلل الحراري ونوع المواد الأولية المستخدمة، في الدراسة<sup>[22]</sup>، يساعد وجود المجموعات الوظيفية O-H و C-H على زيادة امتصاص المعادن الثقيلة لأنها تشكل مركبات مستقرة مع المعادن الثقيلة، ومع زيادة درجة الحرارة يؤدي ذلك إلى تكربن مكثف مما يقلل من كمية المجموعات الوظيفية الموجودة في الفحم الحيوي، تعتمد إزالة المعادن الثقيلة بشكل مباشر على كمية المجموعات الوظيفية السطحية الموجودة في الفحم الحيوي، وتساعد المجموعات الوظيفية أيضًا في معرفة خصائص الفحم الحيوي<sup>[30]</sup>.

- الرقم الهيدروجيني (pH): الرقم الهيدروجيني هو خاصية أخرى مهمة للفحم الحيوي، بحيث يمكن تصنيفه على أنه حمضي أو قاعدي من خلال دراسة قيمة الرقم الهيدروجيني الخاصة به، وعادة ما يكون للفحم الحيوي قيم pH بين 4 و12، ويؤدي ارتفاع درجة الحرارة إلى زيادة الرقم الهيدروجيني للفحم نحو الرقم الهيدروجيني القاعدي القوي، والذي يرجع إلى زيادة التطاير، حيث أنتج التحلل الحراري عند 600 °C فحمًا حيويًا بدرجة حموضة أساسية تبلغ 9، ويؤدي وجود درجة حموضة أعلى للفحم إلى زيادة في امتصاص المعادن الثقيلة، بشرط وجود تفاعل كهروستاتيكي (Electrostatic) بين المعدن الثقيل والفحم، وذلك لأن المزيد من الشحنات السلبية يتم إنتاجها عند مستويات pH أعلى، ومع ذلك يؤدي ارتفاع الرقم الهيدروجيني أحيانًا أيضًا إلى انخفاض في امتصاص المعادن الثقيلة بسبب تفكك المعادن الثقيلة في المحلول<sup>[25]</sup>.

### 6.I. العوامل المؤثرة على خصائص الفحم الحيوي

إن ظروف التفاعل أثناء عملية التحلل الحراري مسؤولة بشكل أساسي عن إنتاج الفحم الحيوي، فتؤثر العوامل مثل المواد الخام ودرجة الحرارة وحجم الجسيمات ومعدل التسخين وما إلى ذلك بشكل أساسي على خصائص الفحم الحيوي<sup>[8]</sup>.

#### 1.6.I. المواد الخام (Feedstocks)

الكتلة الحيوية هي مادة صلبة معقدة من أصل عضوي أو غير عضوي، مشتقة من الكائنات الحية، وتُصنف إلى كتلة حيوية خشبية (أشجار ومخلفات الغابات) وغير خشبية (نفايات حيوانية وصناعية وزراعية)، حيث إن الكتلة الخشبية تتميز برطوبة منخفضة، رماد قليل ومسامية أقل وكثافة عالية وقيمة حرارية مرتفعة، ومحتوى الرطوبة هو العامل الأكثر تأثيراً على تكوين الفحم الحيوي، فالرطوبة العالية تعيق تكوين الفحم وتزيد الطاقة اللازمة للتحلل الحراري<sup>[31]</sup>، إن انخفاض نسبة الرطوبة في الكتلة الحيوية هو الأفضل لتكوين الفحم الحيوي لأنها تقلل الطاقة الحرارية والوقت اللازم للتحلل الحراري مما يجعل العملية أكثر جدوى اقتصادياً.

#### 2.6.I. درجة حرارة الكربنة (Carbonization temperature)

وهو الطريقة الرئيسية لتحويل الكتلة الحيوية إلى فحم حيوي في بيئة خالية من الأكسجين ودرجات حرارة مرتفعة، ويصنف إلى: بطيء (أقل من 300 °C) ومتوسط (300-500 °C) وسريع (أكثر من 500

(°C)، بحيث تؤثر درجة حرارة التحلل الحراري على الخصائص الفيزيائية والكيميائية للفحم مثل التركيب العنصري وبنية المسام والمساحة السطحية والمجموعات الوظيفية<sup>[32]</sup>.

### 3.6.I. زمن المكوث (Residence time)

أدى إطالة زمن المكوث عند درجة حرارة منخفضة للتحلل الحراري (300 °C) إلى انخفاض بطيء في إنتاج الفحم الحيوي، بينما إطالة زمن المكوث عند درجة حرارة عالية للتحلل الحراري (600 °C) كان له تأثير ضعيف على إنتاج الفحم الحيوي أو الرقم الهيدروجيني، وفي حين أنه قلل من امتصاصه للبيود<sup>[33]</sup>.

### 4.6.I. المعالجة المسبقة للكتلة الحيوية (Pre-treatment of biomass)

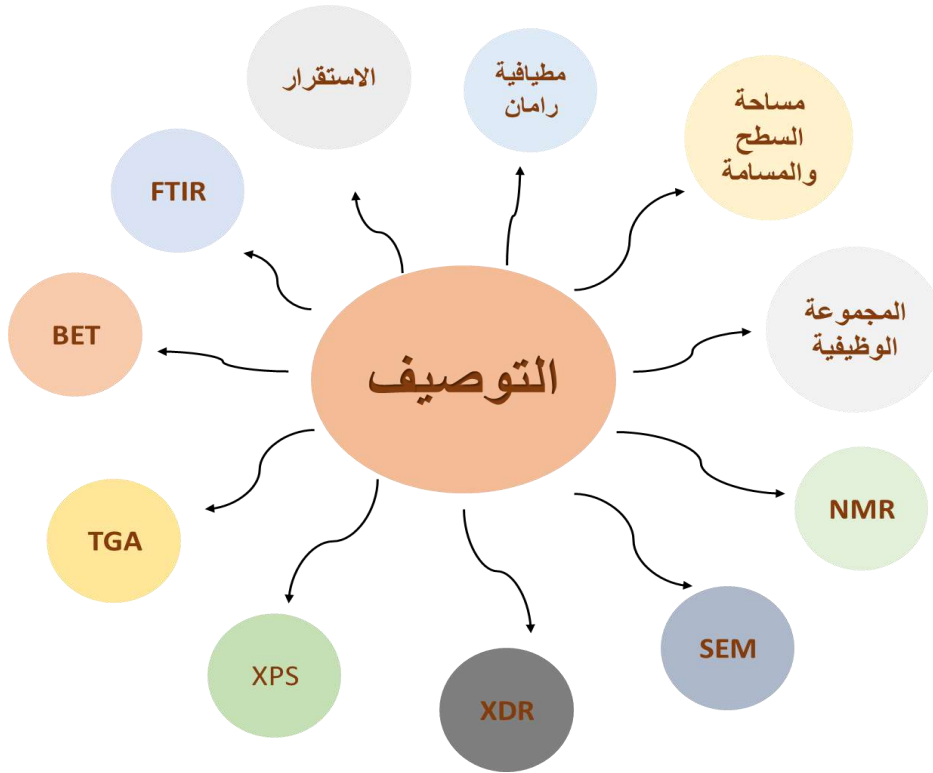
تؤثر المعالجة المسبقة للكتلة الحيوية قبل التحلل الحراري على خصائص الفحم الحيوي، وتشمل طرق المعالجة المسبقة الشائعة غمر المواد الخام في المحلول وتقليل حجم جزيئات الكتلة الحيوية، وتقليل حجم الجزيئات يزيد من إنتاج الفحم الحيوي، ويمكن لطرق المعالجة المسبقة الأخرى مثل التطعيم بالنيتروجين والمعادن أن تؤثر على إنتاج الفحم الحيوي، بينما تؤثر المعالجة المسبقة بالمحلول (النقع أو التبخير) على التركيب العنصري وخصائص الفحم الحيوي.

يعتمد الأداء العملي للكتلة الحيوية على محتوى الرطوبة والمعادن، على سبيل المثال يمكن أن يؤدي وجود الكلور والمعادن القاعدية القابلة للذوبان إلى التآكل، بحيث يمكن أن تختلف خصائص الفحم الحيوي بشكل كبير بسبب اختلاف تقنيات الإنتاج والكتلة الحيوية، ويمكن أن يكون وجود مركبات أو عناصر سامة في الفحم الحيوي نتيجة تلوث الكتلة الحيوية أثناء التحلل الحراري/التغويز<sup>[34]</sup>.

### 7.I. توصيف الفحم الحيوي

يتم توصيف الفحم الحيوي لتحديد قدرته على إزالة الملوثات وتطبيقات أخرى، ويساعد التحليل الهيكلي والعنصري في توقع تأثير الفحم الحيوي على البيئة، يتفاعل الفحم الحيوي مع المعادن بطريقة تعتمد على درجة الحموضة مما يجعله مادة ماصة فعالة لإزالة ملوثات التربة، وتعتمد تقنيات توصيف الفحم الحيوي على البنية والمجموعات الوظيفية السطحية والتحليل العنصري<sup>[35]</sup>، وتتضمن التقنيات الحديثة المستخدمة: المجهر الإلكتروني الماسح (SEM)، ومطيافية تحويل فورييه للأشعة تحت الحمراء (FTIR)، وحيود الأشعة السينية (XRD)، والتحليل الحراري الوزني (TGA)، ومطيافية الرنين المغناطيسي

النووي (NMR)، وطريقة بروناور-إيميت-تيلر (BET)، والتحليل التقريبي والنهائي، ومطيافية رامان، وما إلى ذلك كما هو موضح الشكل (9.I).



الشكل (7.I): توصيف الفحم الحيوي.

### 1.7.I المجموعات الوظيفية (Functional groups)

تزيد المجموعات الوظيفية الموجودة على سطح الفحم الحيوي مثل: الكربوكسيل (COOH) والهيدروكسيل (OH) والأمين والأميد والمجموعات اللاكتونية (Lactonic groups) من قدرته على الامتصاص، وتتأثر هذه المجموعات بشكل أساسي بنوع الكتلة الحيوية ودرجة حرارة الإنتاج<sup>[36]</sup> وزيادة خصائص أخرى مثل: الرقم الهيدروجيني والمساحة السطحية والمسامية، حيث أظهر الفحم الحيوي المنتج عند درجات حرارة مختلفة فرقًا كبيرًا في مجموعاته الوظيفية السطحية.

### 2.7.I مساحة السطح والمسامية (Surface area and porosity)

الفحم الحيوي ذو المساحة السطحية العالية والمسامية الكبيرة يتميز بقدرة امتصاص عالية، وتتكون المسام أثناء التحلل الحراري نتيجة فقدان الماء أثناء الجفاف، بحيث تصنف المسام إلى صغيرة (micro) (أقل من 2 nm)، ومتوسطة (meso) (2-50 nm)، وكبيرة (macro) (أكثر من 50 nm)، بحيث ان المسام الصغيرة لا تمتص جزيئات المبيدات بغض النظر عن قطبيتها أو شحنتها، ويمكن توصيف حجم المسام

باستخدام المجهر الإلكتروني الماسح (SEM)، وكذلك ان المساحة السطحية هي العامل الرئيسي في تحديد قدرة الامتصاص وتلعب درجة الحرارة دورًا كبيرًا في تكوينها، وتختلف بين المواد الخام المعالجة وغير المعالجة<sup>[37]</sup>.

### 3.7.I. المجهر الإلكتروني الماسح (SEM)

يستخدم المجهر الإلكتروني الماسح (Scanning Electron Microscopy) لتحديد البنية السطحية للفحم الحيوي، وكذلك تُظهر صور SEM أن العمليات ودرجات الحرارة المختلفة تُحدث تغييرات كبيرة في مورفولوجيا السطح للجسيمات الأصلية مع الحفاظ بشكل كبير على شكلها المرئي، وزيادة درجة الحرارة أثناء التحلل الحراري قد تؤدي إلى تحسين كبير في خصائص المسام وزيادة بلورية المكونات المعدنية وتكوين هياكل عطرية مرتبة<sup>[38]</sup>، وتوفر صور SEM وصفًا تفصيليًا لتوزيع المسام الصغيرة (Microporous) والمتوسطة (Mesoporous) وترتيب المسام، ويمكن التنبؤ بمورفولوجيا (Morphology) السطح قبل وبعد عملية الامتصاص باستخدام SEM، ويستخدم SEM مع مطيافية تشتت الطاقة للأشعة السينية (EDX) لتحليل التركيب العنصري للفحم الحيوي، ويمكن تحديد العناصر المتعددة الموجودة على سطح الفحم الحيوي باستخدام SEM-EDX.

### 4.7.I. مطيافية تحويل فورييه بالأشعة تحت الحمراء (FTIR)

مطيافية تحويل فورييه بالأشعة تحت الحمراء (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) هي تقنية اهتزازية للتحقيق في المجموعات الوظيفية الموجودة على سطح الفحم الحيوي، وأثناء زيادة درجة الحرارة حدثت تغييرات كبيرة في الفحم الحيوي في التركيب والترتيبات المساعدة، ويمكن ملاحظة هذه التغييرات بشكل فعال من خلال نظام FTIR غير الضار، وفي نطاق درجة الحرارة الأعلى من 650-800 °C كشفت الأطياف عن فقدان مستمر للمجموعات العطرية، وفي مطيافية تحويل فورييه بالأشعة تحت الحمراء ذات الانعكاس المنتشر (DRIFTS Diffuse Reflectance Infrared Fourier Transform Spectroscopy) يتم تحويل العينة إلى شكل حبيبات باستخدام بروميد البوتاسيوم (Potassium Bromide)، ويتم جعل عينة الحبيبات تتلامس مع بلورة الانعكاس الكلي المخفف (ATR Attenuated Total Reflectance) ويتم التنبؤ بالمجموعات الوظيفية في ATR-FTIR<sup>[39]</sup>.

**5.7.I. حيود الأشعة السينية (XRD)**

حيود الأشعة السينية (X-ray diffraction) هو استراتيجية ذات صلة واسعة لتحديد التبلور وبنية الفحم الحيوي، وفي XRD أشار مخطط الحيود إلى سمات معينة للمادة السديمية أي المادة الغير المتبلورة التي تم إنشاؤها فوق 350 °C، وتم تجهيز جهاز XRD المحوسب بموحد اللون ومصدر الإشعاع ومحرك متدرج<sup>[40]</sup>، حيث تشبه الطبيعة البلورية للبلورات النانوية المتكونة قمم XRD الحادة والقوية، ومع زيادة الوقت يزداد قطر الجسيمات، وبالتالي تساعد أنماط XRD في إنتاج فحم حيوي عالي الجودة وسريع وغير مدمر بكفاءة امتصاص عالية.

**6.7.I. التحليل الوزني الحراري (TGA)**

يستخدم التحليل الحراري الوزني (Thermo-Gravimetric Analysis) لتحليل الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمواد كدالة لارتفاع درجة الحرارة، ويُستخدم TGA بشكل شائع لوصف ومقارنة السلوك الحراري للعينات المختلفة، وفي هذه الحالة تم استخدامه لفحص خصائص الاحتراق للفحم الحيوي ومخاليط الكتلة الحيوية/الفحم الحيوي، وتم فحص المتوسط المرجح للأجزاء الفردية لتحديد ما إذا كان هناك نشاط تآزري بين مكونات المزيج، وقد تساعد النتائج في فهم أفضل للعملية الحرارية وخصائص العينات<sup>[41]</sup>، وأثناء العملية يتم تسخين الفحم الحيوي من درجة حرارة الغرفة إلى 1000 °C، واستخدم العديد من الباحثين معدلات تسخين مختلفة مثل 10 و20 درجة مئوية/دقيقة، و10 كلفن/دقيقة، ودرجات حرارة أقل من 1000 °C.

**7.7.I. تحليل بروناور-إيميت-تيلر (BET)**

يستخدم تحليل (Brunauer-Emmett-Teller) لقياس المساحة السطحية للفحم الحيوي، وهي خاصية أساسية في إزالة الملوثات، ويُظهر الفحم الحيوي زيادة كبيرة في المساحة السطحية بعد التحلل الحراري مع تكوين مسام دقيقة جديدة، وتزيد المسامية والمساحة السطحية مع زيادة الطاقة المستخدمة في التحلل الحراري بسبب إطلاق المواد المتطايرة وتكوين المسام<sup>[42]</sup>، وينتج عن إطلاق كميات كبيرة من المواد المتطايرة إلى فحم حيوي ذو مسامية عالية وبنية مسام متنوعة وكثافة منخفضة.

**8.7.I. مطيافية الرنين المغناطيسي النووي (NMR)**

يستخدم الرنين المغناطيسي النووي (Nuclear Magnetic Resonance) لفحص التركيب الهيكلي للفحم الحيوي، بحيث يستخدم NMR مجالاً مغناطيسياً قوياً ونبضات ترددات الراديو (RF) لدراسة بنية الجزيئات، ويمكن استخدام تقنيات الحالة الصلبة لتحديد كمية المجموعات الوظيفية الكربونية وتقدير تكثف الحلقات العطرية والبنية العامة لجزيئات الفحم الحيوي، ويمكن فحص محتوى الهيدروكربونات الأليفاتية والعطرية باستخدام NMR، ويمكن مقارنة استقرار وكرينة الفحم الحيوية المختلفة باستخدام NMR<sup>[43]</sup>، والعيب الرئيسي هو أن المعادن المغناطيسية الحديدية في الفحم الحيوي قد تعطل إشارات NMR، وكما أن الفحم الحيوي المنتج بالتحلل الحراري بدرجة حرارة عالية ينتج نسبة إشارة إلى ضوء منخفضة.

**9.7.I. مطيافية رامان (Raman spectroscopy)**

مطيافية رامان هي تقنية طيفية جزيئية تعتمد على اهتزازات الذرات عند إضاءتها بإشعاع كهرومغناطيسي، وتستخدم لقياس التغيرات الكيميائية والهيكلية النانوية التي تحدث أثناء كرينة الكتلة الحيوية، وتقدير درجات حرارة المعالجة الحرارية (HTTs) للفحم الحيوي، حيث تتميز بحساسية عالية، وتحتاج إلى تحضير عينات أقل وتداخل أقل مما يجعلها مناسبة لتوصيف الفحم الحيوي، ولكن تكلفتها تحد من استخدامها<sup>[44]</sup>.

**10.7.I. مطيافية الفوتون بالأشعة السينية (X-ray photon spectroscopy)**

تُستخدم مطيافية الإلكترونات الضوئية للأشعة السينية (XPS) لتوصيف الفحم الحيوي وتحديد بنيته وتركيبه الناتج عن درجات الحرارة المختلفة وأنواع الكتلة الحيوية، ويمكن لـ XPS تحديد وقياس المجموعات الوظيفية والعناصر الأساسية على الفحم الحيوي، وتُظهر التغيرات في المجموعات الوظيفية المحتوية على الأكسجين استقرار الفحم الحيوي على المدى القصير، ويمكن استخدام XPS أيضاً لتحديد النسبة المولية للعناصر O/C، والتي تعتبر مؤشراً على استقرار الفحم الحيوي<sup>[45]</sup>.

**11.7.I. استقرار الفحم الحيوي (Biochar stability)**

يتم قياس استقرار الفحم الحيوي أي مقاومته للتدهور الحيوي وغير الحيوي في التربة لتحديد قدرته على عزل الكربون، وتعتبر درجة حرارة التحلل الحراري مؤشراً غير دقيق للاستقرار، ويتم تقسيم طرق تقييم الاستقرار إلى ثلاث فئات [46]:

- تحديد هياكل الكربون.
- تحديد الكربون المستقر بالطرق الحرارية أو الكيميائية.
- حضانة الفحم الحيوي في التربة ونمذجة تمعدن الكربون.

الحضانة والنمذجة هي الطريقة الأساسية والتي تعطي نتائج مباشرة ودقيقة، ويعتمد استقرار الفحم الحيوي على بنية الكربون، وتساهم خصائص أخرى مثل بنية المسام ودرجة الحموضة في الاستقرار، وتعتبر الحضانة والنمذجة الطريقة الرئيسية ولكنها مكلفة وتستغرق وقتاً طويلاً، ان استخدام النظائر المشعة  $C_{14}$  هو نهج جديد، حيث لا توفر الطرق الحالية نتائج دقيقة لذا فإن تطوير طرق جديدة لتقييم الاستقرار سيحسن تطبيق الفحم الحيوي لتخفيف تغير المناخ.

### 8.I. تطبيقات الفحم الحيوي

يمكن استخدام الفحم الحيوي في مجموعة واسعة من القطاعات مثل إنتاج الطاقة واستخدامه كتعديل للتربة ومعالجة مياه الصرف الصحي والمعادن وما إلى ذلك، كما يوضح الشكل (8.I) بعض استخدامات الفحم الحيوي [47]:



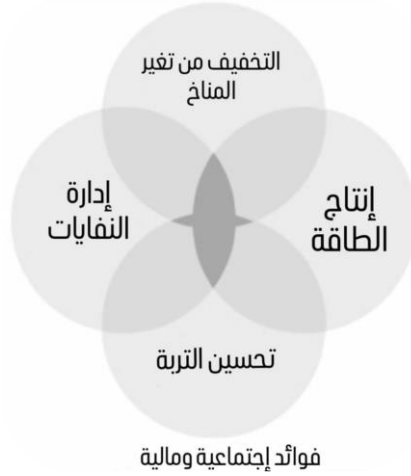
الشكل (8.I): بعض استخدامات الفحم الحيوي.

- تربية الحيوانات: إضافات الأعلاف/المكملات الغذائية، معالجة سماد الحيوانات، معالجة المياه في تربية الأسماك.

- محسن للتربة: سماد كربوني، سماد عضوي، بديل للسماد في تربة الأصيل ووقاية النبات، سماد تعويضي للعناصر النادرة.
- قطاع البناء: مادة عازلة، تنظيم الرطوبة، الحماية من الإشعاع الكهرومغناطيسي.
- إزالة التلوث: مادة مضافة لإصلاح التربة، ركائز التربة (ركائز تربة قابلة للزراعة وذات قدرة امتصاص عالية، للاستخدام في تنظيف مياه الصرف الصحي، وخاصة مياه الصرف الصحي الحضرية الملوثة بالمعادن الثقيلة)، حاجز يمنع دخول المبيدات الحشرية إلى المياه السطحية، معالجة مياه البرك والبحيرات (الفحم الحيوي جيد لامتصاص المبيدات الحشرية والأسمدة، وكذلك لتحسين تهوية المياه).
- إنتاج الغاز الحيوي: مادة مضافة للكتلة الحيوية، معالجة طين الغاز الحيوي.
- معالجة مياه الصرف الصحي: فلتر الكربون النشط، مادة مضافة للشطف المسبق.
- معالجة مياه الشرب: المرشحات الدقيقة، المرشحات الكبيرة في البلدان النامية.
- المنسوجات: مادة مضافة للنسيج للملابس الداخلية، عزل حراري للملابس الوظيفية، مزيل للعرق لنعال الأحذية.
- الصحة: حشوات الوسائد، يمتص الفحم الحيوي العرق والروائح، ويحمي من الإشعاع الكهرومغناطيسي (الضباب الكهرومغناطيسي)، في اليابان يتم حشو الوسائد بالفحم الحيوي لفترة طويلة، ومن المفترض أن يمنع هذا الأرق وتوتر الرقبة.
- الحماية من الإشعاع الكهرومغناطيسي: يمكن استخدام الفحم الحيوي في أفران الميكروويف وأجهزة التلفاز وإمدادات الطاقة وأجهزة الكمبيوتر ومقابس الطاقة وما إلى ذلك للحماية من الإشعاع الكهرومغناطيسي، ويمكن أيضًا استخدام هذه الخاصية في الملابس الوظيفية كحماية لأجزاء الجسم الحساسة بشكل خاص للإشعاع.
- استخدامات أخرى متعددة: المواد الصناعية (ألياف الكربون، البلاستيك)، الإلكترونيات (أشباه الموصلات، البطاريات)، علم المعادن، مستحضرات التجميل (الصابون، كريم الجلد، إضافات الحمام العلاجية)، الدهانات والتلوين (ملونات الطعام، الدهانات الصناعية)، إنتاج الطاقة، الأدوية (إزالة السموم، حامل للمكونات الصيدلانية النشطة).

## 9.I الفحم الحيوي والاستدامة

يلعب الفحم الحيوي دوراً رئيسياً في التخفيف من تغير المناخ، وتعزيز الاستدامة البيئية وزيادة الإنتاجية الزراعية، وتسهيل تخزين الكربون في التربة وتحسين خصوبة التربة لزيادة إنتاجية النباتات والمحاصيل الإجمالية، وكما قدمت دراسة أربعة أهداف تحفيزية لتطبيق الفحم الحيوي وهي تحسين التربة، وإدارة النفايات، والتخفيف من تغير المناخ والطاقة [48] ، حيث يوضح الشكل (9.I) الأهداف التحفيزية للفحم الحيوي.



الشكل (9.I): الأهداف التحفيزية للفحم الحيوي [36].

ناقشت دراسة [49] مفهوم الصرف الصحي للتربة السوداء (Terra Preta Sanitation (TPS)، والذي تم تبنيه على نطاق واسع في حضارة الأمازون، وقد تم الإبلاغ عن أن TSP هي عملية ذات حلقة مغلقة ومفيدة لأسلوب حياة مستدام، حيث تجمع بين خصوبة التربة والأمن الغذائي وإدارة النفايات والطاقة المتجددة، كما هو مبين في الشكل (10.I).



الشكل (10.I): نظام الصرف الصحي تيرا بريتا [50].

## خاتمة

في الختام يمكن القول أن الفحم الحيوي يمثل حلاً واعدًا للعديد من التحديات البيئية والزراعية التي تواجه عالمنا اليوم، فهو ليس مجرد منتج ثانوي للكتلة الحيوية بل هو مورد قيم يمكن استخدامه لتحسين جودة التربة وتعزيز الإنتاج الزراعي وتقليل انبعاثات الغازات الدفيئة والمساهمة في التنمية المستدامة، ومع ذلك لا يزال هناك حاجة إلى مزيد من البحث والتطوير لتحسين تقنيات إنتاج الفحم الحيوي وتوسيع نطاق استخدامه، وكما يتطلب الأمر تعاونًا وتنسيقًا بين مختلف الجهات المعنية، بما في ذلك الحكومات والقطاع الخاص والمجتمع المدني لضمان تبني ممارسات مستدامة في إنتاج واستخدام الفحم الحيوي وبالنظر إلى الفوائد العديدة التي يقدمها الفحم الحيوي يمكن القول إنه يمثل استثمارًا مستقبليًا واعدًا يمكن أن يساعد في بناء عالم أكثر استدامة وصحة للأجيال القادمة.

## المراجع

- [1] J. Hunt, M. DuPont, D. Sato, and A. Kawabata, "The basics of biochar: A natural soil amendment," *Soil and Crop Management*, vol. 30, no. 7, pp. 1-6, 2010.
- [2] N. S. Kamarudin *et al.*, "Biochar: A review of its history, characteristics, factors that influence its yield, methods of production, application in wastewater treatment and recent development," *Biointerface Res. Appl. Chem*, vol. 12, no. 6, pp. 7914-7926, 2022.
- [3] F. Biliás *et al.*, "Glossary of terms used in biochar research (IUPAC Technical Report)," *Pure and Applied Chemistry*, vol. 96, no. 11, pp. 1541-1572, 2024.
- [4] I. Initiative, "Standardized product definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil," *IBI biochar Stand*, 2012.
- [5] M. Ahmad *et al.*, "Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: a review," *Chemosphere*, vol. 99, pp. 19-33, 2014.
- [6] S. Pang, "Advances in thermochemical conversion of woody biomass to energy, fuels and chemicals," *Biotechnology advances*, vol. 37, no. 4, pp. 589-597, 2019.
- [7] Y. Lin *et al.*, "Combustion, pyrolysis and char CO<sub>2</sub>-gasification characteristics of hydrothermal carbonization solid fuel from municipal solid wastes," *Fuel*, vol. 181, pp. 905-915, 2016.
- [8] P. Yaashikaa, P. S. Kumar, S. Varjani, and A. Saravanan, "A critical review on the biochar production techniques, characterization, stability and applications for circular bioeconomy," *Biotechnology reports*, vol. 28, p. e00570, 2020.
- [9] J. Wei *et al.*, "Assessing the effect of pyrolysis temperature on the molecular properties and copper sorption capacity of a halophyte biochar," *Environmental Pollution*, vol. 251, pp. 56-65, 2019.
- [10] Y. Wang, R. Yin, and R. Liu, "Characterization of biochar from fast pyrolysis and its effect on chemical properties of the tea garden soil," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 110, pp. 375-381, 2014.
- [11] W.-J. Liu, H. Jiang, and H.-Q. Yu, "Development of biochar-based functional materials: toward a sustainable platform carbon material," *Chemical reviews*, vol. 115, no. 22, pp. 12251-12285, 2015.
- [12] J. Huang, C. Liu, H. Tong, W. Li, and D. Wu, "Theoretical studies on pyrolysis mechanism of xylopyranose," *Computational and Theoretical Chemistry*, vol. 1001, pp. 44-50, 2012.
- [13] W. Mu, H. Ben, A. Ragauskas, and Y. Deng, "Lignin pyrolysis components and upgrading—technology review," *Bioenergy research*, vol. 6, pp. 1183-1204, 2013.
- [14] M. Bakraoui, F. Karouach, B. Ouhammou, M. Aggour, A. Essamri, and H. El Bari, "Biogas production from recycled paper mill wastewater by UASB digester: Optimal and mesophilic conditions," *Biotechnology reports*, vol. 25, p. e00402, 2020.
- [15] D. Prabakar, V. T. Manimudi, S. Sampath, D. M. Mahapatra, K. Rajendran, and A. Pugazhendhi, "Advanced biohydrogen production using pretreated industrial waste: outlook and prospects," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 96, pp. 306-324, 2018.
- [16] K. L. Yu *et al.*, "Recent developments on algal biochar production and characterization," *Bioresource technology*, vol. 246, pp. 2-11, 2017.

- [17] A. Bridgwater and G. Peacocke, "Fast pyrolysis processes for biomass," *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 4, no. 1, pp. 1-73, 2000.
- [18] O. Mašek, P. Brownsort, A. Cross, and S. Sohi, "Influence of production conditions on the yield and environmental stability of biochar," *Fuel*, vol. 103, pp. 151-155, 2013.
- [19] D. Angin and S. Şensöz, "Effect of pyrolysis temperature on chemical and surface properties of biochar of rapeseed (*Brassica napus* L.)," *International Journal of phytoremediation*, vol. 16, no. 7-8, pp. 684-693, 2014.
- [20] J. J. Manyà, F. X. Roca, and J. F. Perales, "TGA study examining the effect of pressure and peak temperature on biochar yield during pyrolysis of two-phase olive mill waste," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 103, pp. 86-95, 2013.
- [21] D. Akhil, D. Lakshmi, A. Kartik, D.-V. N. Vo, J. Arun, and K. P. Gopinath, "Production, characterization, activation and environmental applications of engineered biochar: a review," *Environmental Chemistry Letters*, vol. 19, pp. 2261-2297, 2021.
- [22] J. Zhang, B. Huang, L. Chen, Y. Li, W. Li, and Z. Luo, "Characteristics of biochar produced from yak manure at different pyrolysis temperatures and its effects on the yield and growth of highland barley," *Chemical Speciation & Bioavailability*, vol. 30, no. 1, pp. 57-67, 2018.
- [23] E.-B. Son, K.-M. Poo, J.-S. Chang, and K.-J. Chae, "Heavy metal removal from aqueous solutions using engineered magnetic biochars derived from waste marine macro-algal biomass," *Science of the Total Environment*, vol. 615, pp. 161-168, 2018.
- [24] S. M. Yakout, "Physicochemical characteristics of biochar produced from rice straw at different pyrolysis temperature for soil amendment and removal of organics," *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section A: Physical Sciences*, vol. 87, pp. 207-214, 2017.
- [25] Y. Jia *et al.*, "Study of the effect of pyrolysis temperature on the Cd<sup>2+</sup> adsorption characteristics of biochar," *Applied Sciences*, vol. 8, no. 7, p. 1019, 2018.
- [26] Y. Yang *et al.*, "Effect of minerals on the stability of biochar," *Chemosphere*, vol. 204, pp. 310-317, 2018.
- [27] O. Das, N. K. Kim, A. K. Sarmah, and D. Bhattacharyya, "Development of waste based biochar/wool hybrid biocomposites: Flammability characteristics and mechanical properties," *Journal of cleaner production*, vol. 144, pp. 79-89, 2017.
- [28] Y. Yue, Q. Lin, Y. Xu, G. Li, and X. Zhao, "Slow pyrolysis as a measure for rapidly treating cow manure and the biochar characteristics," *Journal of analytical and applied pyrolysis*, vol. 124, pp. 355-361, 2017.
- [29] Q. Chen, H. Liu, J. Ko, H. Wu, and Q. Xu, "Structure characteristics of bio-char generated from co-pyrolysis of wooden waste and wet municipal sewage sludge," *Fuel Processing Technology*, vol. 183, pp. 48-54, 2019.
- [30] Y. Huang, C. Rong, R. Zhang, and S. J. J. o. m. m. Liu, "Evaluating frontier orbital energy and HOMO/LUMO gap with descriptors from density functional reactivity theory," vol. 23, pp. 1-12, 2017.
- [31] N. Jafri, W. Wong, V. Doshi, L. Yoon, and K. H. Cheah, "A review on production and characterization of biochars for application in direct carbon fuel cells," *Process safety and environmental protection*, vol. 118, pp. 152-166, 2018.
- [32] V. Dhyani and T. Bhaskar, "A comprehensive review on the pyrolysis of lignocellulosic biomass," *Renewable energy*, vol. 129, pp. 695-716, 2018.

- [33] C. Liang, G. Gascó, S. Fu, A. Méndez, and J. Paz-Ferreiro, "Biochar from pruning residues as a soil amendment: effects of pyrolysis temperature and particle size," *Soil and Tillage Research*, vol. 164, pp. 3-10, 2016.
- [34] S. You, Y. S. Ok, D. C. Tsang, E. E. Kwon, and C.-H. Wang, "Towards practical application of gasification: a critical review from syngas and biochar perspectives," *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, vol. 48, no. 22-24, pp. 1165-1213, 2018.
- [35] C. E. Brewer *et al.*, "New approaches to measuring biochar density and porosity," *Biomass and bioenergy*, vol. 66, pp. 176-185, 2014.
- [36] H. Li, X. Dong, E. B. da Silva, L. M. de Oliveira, Y. Chen, and L. Q. Ma, "Mechanisms of metal sorption by biochars: Biochar characteristics and modifications," *Chemosphere*, vol. 178, pp. 466-478, 2017.
- [37] K. H. Kim, J.-Y. Kim, T.-S. Cho, and J. W. Choi, "Influence of pyrolysis temperature on physicochemical properties of biochar obtained from the fast pyrolysis of pitch pine (*Pinus rigida*)," *Bioresource technology*, vol. 118, pp. 158-162, 2012.
- [38] G. Fellet, M. Marmiroli, and L. Marchiol, "Elements uptake by metal accumulator species grown on mine tailings amended with three types of biochar," *Science of the total environment*, vol. 468, pp. 598-608, 2014.
- [39] A. Berrazoum, R. Marouf, F. Ouadjenia, and J. Schott, "Bioadsorption of a reactive dye from aqueous solution by municipal solid waste," *Biotechnology Reports*, vol. 7, pp. 44-50, 2015.
- [40] A. R. Usman *et al.*, "Biochar production from date palm waste: Charring temperature induced changes in composition and surface chemistry," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 115, pp. 392-400, 2015.
- [41] Y. Yao *et al.*, "Characterization and environmental applications of clay-biochar composites," *Chemical Engineering Journal*, vol. 242, pp. 136-143, 2014.
- [42] X. Liu, Y. Zhang, Z. Li, R. Feng, and Y. Zhang, "Characterization of corncob-derived biochar and pyrolysis kinetics in comparison with corn stalk and sawdust," *Bioresource technology*, vol. 170, pp. 76-82, 2014.
- [43] D. B. Wiedemeier *et al.*, "Aromaticity and degree of aromatic condensation of char," *Organic Geochemistry*, vol. 78, pp. 135-143, 2015.
- [44] M. Vithanage *et al.*, "Mechanisms of antimony adsorption onto soybean stover-derived biochar in aqueous solutions," *Journal of Environmental Management*, vol. 151, pp. 443-449, 2015.
- [45] K. A. Spokas, "Review of the stability of biochar in soils: predictability of O: C molar ratios," *Carbon management*, vol. 1, no. 2, pp. 289-303, 2010.
- [46] L. Leng, H. Huang, H. Li, J. Li, and W. Zhou, "Biochar stability assessment methods: a review," *Science of the total environment*, vol. 647, pp. 210-222, 2019.
- [47] H.-P. Schmidt and K. Wilson, "55 uses of biochar," *Ithaka J*, vol. 1, no. May, pp. 286-289, 2012.
- [48] J. Lehmann and S. Joseph, "Biochar for environmental management: an introduction. Biochar for Environmental Management—Science and Technology. Edited by Lehmann J. and S.," *Joseph. Earthscan*, 2009.
- [49] S. De Gisi, L. Petta, and C. Wendland, "History and technology of Terra Preta sanitation," *Sustainability*, vol. 6, no. 3, pp. 1328-1345, 2014.

- [50] C. Barrow, "Biochar: potential for countering land degradation and for improving agriculture," *Applied Geography*, vol. 34, pp. 21-28, 2012.

# الفصل الثاني :

## السليلوز

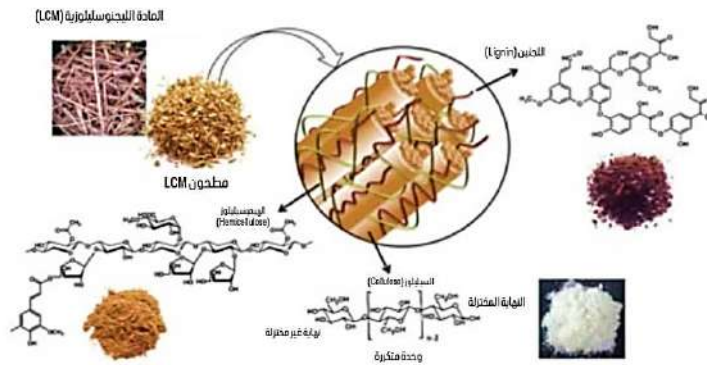
في عالم الكيمياء الحيوية تبرز جزيئات ضخمة تلعب أدواراً حيوية في دعم الحياة من بين هذه الجزيئات يحتل السليولوز مكانة فريدة كبوليمر طبيعي وفير يمثل الدعامة الأساسية للمملكة النباتية، هذا المركب العضوي الذي يتكون من وحدات بسيطة من الجلوكوز يمتلك خصائص هيكلية مميزة تجعله ليس فقط مكوناً أساسياً لجدران الخلايا النباتية بل ومادة خام قيمة تدخل في العديد من الصناعات، إن فهم طبيعة السليولوز وخصائصه يفتح آفاقاً واسعة لاستكشاف دوره الحيوي وتطبيقاته المتنوعة.

## 1.II. لمحة تاريخية عن السليولوز

لقد تم استخدام السليولوز كمادة على نطاق واسع لعدة قرون في جميع أنواع التطبيقات العملية، ومع ذلك فإن تركيبه الكيميائي وبنيته وشكله لم يكن معروفاً لعدة قرون، حيث بدأ التاريخ الحديث لكيمياء السليولوز في الواقع في عام 1837 عندما حدد أنسيلم باين (Anselme Payen) [1] السليولوز كيميائياً من النباتات، ومنذ ذلك الحين خضع إنشاء هيكله الكيميائية والفيزيائية لفترات عديدة من الصراع حتى أوائل القرن العشرين، واعتقد العديد من العلماء أن السليولوز يتكون من بضع جزيئات صغيرة من الجلوكوز (Glucose) أو السيلوبوز (Cellobiose)، ولم يقبل سوى عدد قليل جداً من العلماء فرضية أنه بوليمر، واستمرت المناقشات المثيرة للجدل لأكثر من عشر سنوات، وفي النهاية قدمت البيانات التجريبية الجوهريّة دليلاً على أن السليولوز هو جزيء كبير مرتبط تساهمياً وذو وزن جزيئي مرتفع، حيث وفرت هذه الحقيقة أيضاً الأساس لإنشاء علم البوليمر.

## 2.II. مواد الليجنوسليولوز (Lignocellulosic Materials)

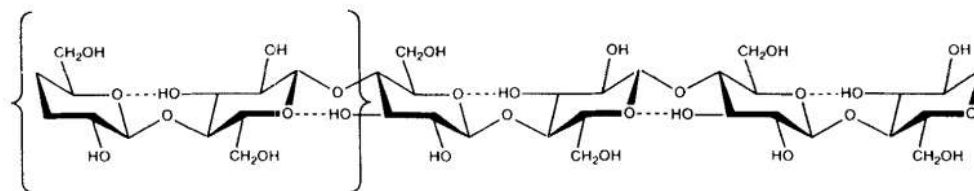
المواد الليجنوسليولوزية هي مواد نباتية جافة، بحيث تشكل الجزء الأساسي من جدار الخلية في النباتات أي السليولوز والهيميسليولوز واللجنين [2] كما هو مبين في الشكل (1.II).



الشكل (1.II): بنية جدار الخلية النباتية [2].

## 1.2.II. السليولوز (Cellulose)

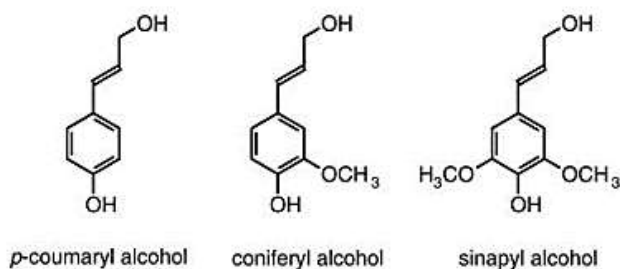
في عام 1839 صاغ الكيميائي الفرنسي "أنسيلم باين" (Anselme Payen)<sup>[3]</sup> مصطلح "السليولوز" لوصف مادة مقاومة للأحماض تم الحصول عليها عن طريق معالجة الخشب بحمض النيتريك، ووجد "باين" أنه بغض النظر عن مصدره كان للسليولوز نفس التركيب الكيميائي ( $C_6H_{10}O_5$ )، ويجب أن يأخذ التعريف الحديث للسليولوز في الاعتبار ليس فقط تركيب البوليمر، ولكن أيضًا روابطه، ووزنه الجزيئي، والترتيب البلوري لسلاسل البوليمر الفردية، فالتركيب الكيميائي للسليولوز بسيط: إنه بوليمر متجانس يتكون من مونومرات الجلوكوز (Glucose monomers) المرتبطة بروابط  $1,4-\beta$ <sup>[4]</sup>، وكما هو موضح في الشكل (2.II).



الشكل (2.II): الصيغة البنائية للسليولوز موضح للروابط  $1,4-\beta$ <sup>[4]</sup>.

## 2.2.II. اللجنين (Lignin)

لقد تم الاعتراف منذ 50 عامًا بأن اللجنين مادة بوليمرية تتكون من وحدات فينيل بروبانويد (Phenylpropanoid) مشتقة من ثلاثة كحولات سيناميل (Cinnamyl): كحولات p-coumaryl و coniferyl و sinapyl alcohols كما هو موضح في الشكل (3.II)، ومن وجهة نظر وظيفية، فإن اللجنين يمنح القوة لجدران الخلايا ويسهل نقل الماء ويعيق تحلل السكريات المتعددة في الجدار، وبالتالي يعمل كخط دفاع رئيسي ضد مسببات الأمراض والحشرات وغيرها من الحيوانات العاشبة<sup>[5]</sup>.

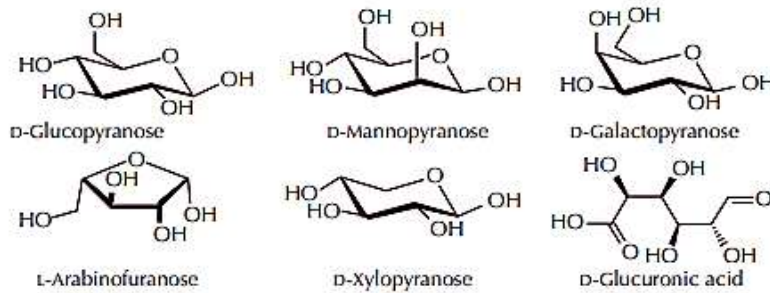


الشكل (3.II): كحولات سيناميلية (cinnamyl alcohols) الرئيسية الموجودة في لجنين النباتات

"الطبيعية"<sup>[5]</sup>.

## 3.2.II. الهيميسليلوز (Hemicelluloses)

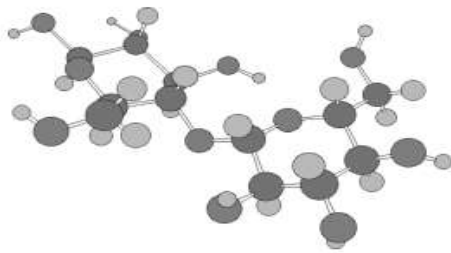
الهيميسيلولوز هو ثاني أكثر البوليمرات الحيوية وفرة في النباتات بعد السليلوز، وهي تختلف عن السليلوز في المكون الرئيسي لجدار الخلية، والذي هو بولي جلوكان (Polyglucan) موحد للغاية مرتبط بـ  $\beta$ -4، وهي عبارة عن سكريات متعددة غير متجانسة ذات هياكل معقدة التي تحتوي على الجلوكوز (Glucose) والزيلوز (Xylose) والمانوز (Mannose) والجالكتوز (Galactose) والأرابينوز (Arabinose) والفوكوز (Fucose) وحمض الجلوكورونيك (Glucuronic acid) وحمض الجالكتيورونيك (Galacturonic acid) بكميات مختلفة اعتمادًا على المصدر، وتُقسم الهيميسيلولوزات عادةً إلى أربع مجموعات عامة من أنواع السكريات المتعددة ذات التركيب المختلف: زيولوجليكانات (Xyloglycans) ومانوجليكانات (Mannoglycans) وزيلوجلوكانات (Xyloglucans) و $\beta$ -جلوكانات ( $\beta$ -glucans) ذات الروابط المختلطة، وتُعد السكريات المتعددة من نوع الزيلان (Xylan) المكونات الرئيسية للهيميسيلولوز في الجدر الخلوية الثانوية<sup>[6]</sup> كما هو موضح في الشكل (4.II).



الشكل (4.II): المكونات الرئيسية للهيميسيلولوزات<sup>[6]</sup>.

## 3.II. التركيب الكيميائي للسليلوز (Chemical composition of cellulose)

السليلوز هو بوليمر خطي لوحدات مونومر D-جلوكوبيرانوز (D-glucopyranose) المرتبطة بـ  $\beta$ -(1→4)، وعادةً تتراوح سلاسل السليلوز في جدران الخلايا النباتية الأولية بين 5000 و 7500 وحدة مونومر جلوكوز (monomer units glucose)، والوحدة المتكررة الأساسية للسليلوز هي السيلوبوز (Cellobiose) كما هو مبين في الشكل (5.II)<sup>[7]</sup>.



الشكل (5.II): السيلويوبوز<sup>[17]</sup>.

#### 4.II. مصادر السليولوز

أكثر مصادر السليولوز شيوعًا هي ألياف الخشب والقطن، ويمكن الحصول عليه من مصادر متنوعة من الكتلة الحيوية، كالخشب الصلب مثل خشب الحور (Poplar wood) أو الأكاسيا (Acacia) أو الكافور (Eucalyptus wood)، والخشب اللين مثل خشب الصنوبر (Pine wood) أو التنوب (Spruce wood)، والنفايات الزراعية، أو الأعشاب كما هي مبينه في الشكل (6.II)، حيث تؤثر عملية الاستخلاص المستخدمة للحصول على السليولوز على درجة بلمرة السليولوز المستخلص على سبيل المثال تؤدي عملية الكبريتيت (Sulfite process) إلى تحلل أقل للبلمرة مقارنة بعملية الكرافت (Kraft process) وهي مادة خام شائعة أخرى للسليولوز وهي القطن، ومن المهم ملاحظة أن السليولوز ينتج أيضًا في الطبيعة بواسطة بعض البكتيريا ويمكن العثور عليه في كائنات الغلاليات البحرية (Marine tunicates)<sup>[18]</sup> يعرض الجدول (1.II) بعض الأمثلة على مصادر السليولوز ومحتواها النسبي.

الجدول (1.II): بعض مصادر السليولوز ومحتواها النسبي<sup>[9]</sup>.

(%)	مصادر السليولوز	الكتلة الحيوية الليجنوسليولوز
50.0-35	حور	الخشب الصلب
40.4	بلوط	
45.0-40	كينيا	
45.0-40	أكاسيا أو سنط	
50.0-42.0	الصنوبر	الخشب اللين
50.0-40.0	التتوب دوغلاس	
45.5	التتوب	
39.0-35.0	قش القمح	النفائات الزراعية
34.0	قشور الشعير	
43.0-36.0	تبن الشعير	
34.7-29.2	قش الأرز	
35.6-28.7	قشور الأرز	
35.0-31.0	قش الشوفان	
41.2-33.7	أكواز الذرة (Corn cobs)	
39.6-35.0	سيقان الذرة	
45.0-25.0	تفل قصب السكر أو مصاصة القصب	
35.0-32.0	قش الذرة الرفيعة أو قش السرغوم (Sorghum straw)	
40.0-25.0	حشائش أو أعشاب	الأعشاب
40.0-35.0	حشيشة المفتاح أو ذيل الثعلب البري (Switchgrass)	

بالإضافة إلى السليولوز، تتكون الكتلة الحيوية الليجنوسليولوزية من بوليمرين (Two polymers) هيكليين آخرين وهما الهيميسليولوز واللجنين جنبًا إلى جنب مع مركبات أخرى طفيفة مثل البروتينات (Proteins) والأحماض الدهنية (Fatty acids)، ويمكن استخلاص وعزل السليولوز من المكونات الأخرى الموجودة في المادة الخام (عادة في شكل ألياف السليولوز) عن طريق إزالة الهيميسليولوز واللجنين والشوائب الأخرى، وتعتمد خصائص ألياف السليولوز المستخلصة على تركيبها الكيميائي، والذي بدوره يختلف وفقًا للمصدر وحتى اعتمادًا على جزء النبات الذي أستخلصت منه، وعملية الفصل المستخدمة.

في الوقت الحاضر، يتم استخلاص معظم ألياف السليلوز المستخدمة في جميع أنحاء العالم من الخشب، ومع ذلك فإنه غير متوفر على نطاق واسع في بعض المناطق، وهناك أيضًا اهتمام تنافسي بين العديد من الصناعات المتعلقة بالبناء والأثاث واللبن والورق وحرق الخشب لاستخلاص الطاقة، وبالتالي قد يكون من الصعب توفير الكميات المطلوبة من الخشب بأسعار معقولة لجميع القطاعات<sup>[10]</sup>، ويشجع هذا على استخدام مصادر **الشكل (6.II)** أخرى غير خشبية، مثل النباتات العشبية أو المائية والأعشاب والمحاصيل ومنتجاتها الثانوية، لمجموعة متنوعة من التطبيقات، وتحتوي هذه النباتات غير الخشبية عمومًا على كمية أقل من اللجنين مقارنة بالخشب، مما يجعل طرق التبييض أقل تطلبًا من حيث المواد الكيميائية واستهلاك الطاقة.



**الشكل (6.II) :** بعض مصادر السليلوز.

## 5.II. خواص السليلوز

### 1.5.II. الخواص الفيزيائية

السليلوز مادة مسترطبة نسبيًا في الظروف الجوية العادية (20 درجة مئوية، و60% رطوبة نسبية)، ويمتص حوالي 8-14% من الماء، بحيث ينتفخ السليلوز في الماء كما هو مبين في **الجدول (2.II)**، ومع ذلك فهو غير قابل للذوبان في الماء أو الأحماض المخففة، ويمكن تحقيق الذوبان في الأحماض المركزة تحت ظروف تدهور شديدة، وتتسبب المحاليل الكاوية في انتفاخ كبير وإذابة الأجزاء ذات الكتلة الجزيئية المنخفضة ( $P \leq 200$ ).

الجدول (2.II): انتفاخ أنواع مختلفة من السليولوز في الماء [11].

النوع	نسبة الانتفاخ %
قطن (Cotton)	18
فسكوز، خيوط متصلة (Viscose, continuous filament)	74
رايون النحاس الأمونيومي (Cuprammonium rayon)	86
ثلاثي أسيتات السليولوز (Cellulose triacetate)	10
ثلاثي بروبيونات السليولوز (Cellulose tripropionate)	2.5
ثلاثي بوتيرات السليولوز (Cellulose tributyrate)	1.8
ثلاثي فاليرات السليولوز (Cellulose trivalerate)	1.6
ثلاثي ستيرات السليولوز (Cellulose tristearate)	1.0

السليولوز مادة غير قابل للانصهار، ويبدأ التحلل الحراري عند 180 درجة مئوية، ونقطة الاشتعال < 290 درجة مئوية. فيما بعض المعلومات الإضافية [11]:

- الكثافة (Density):  $1.52 - 1.59 \text{ g/cm}^3$
- حرارة الاحتراق (Heat of combustion):  $17.46 \text{ J/g}$
- حرارة التبلور (Heat of crystallization):  $18.7 - 21.8 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
- الحرارة النوعية (Specific heat):  $1.00 - 1.21 \frac{\text{KJ}}{\text{J}}$
- معامل التوصيل الحراري (Coefficient of thermal conductivity):  $0.255 \text{ kJ/mhK}$  (مفكك) إلى  $0.920 \text{ kJ/mhK}$  (مضغوط).
- مساحة السطح الداخلية النوعية (Specific internal surface):  $10 - 200 \text{ m}^2/\text{g}$

## 2.5.II. الخواص الكيميائية

- البنية الكيميائية: السليولوز بوليمير طبيعي يتكون من وحدات ( $\beta$ -D-glucose) مرتبط بروابط ( $\beta$ -1,4- glycosidic)، ويمنح هذا الترتيب الخطي للسليولوز وزن الجزيئي العالي وقدراته الواسعة على تكوين روابط هيدروجينية، صيغته العامة  $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$  حيث n عدد الوحدات.

- مجموعات الهيدروكسيل: تحتوي كل وحدة جلوكوز في السليولوز على ثلاث مجموعات هيدروكسيل (-OH) تلعب دورا حاسما في تكوين الروابط الهيدروجينية، وتساهم هذه الروابط في التبلور العالي والقوة الميكانيكية لألياف السليولوز [12].
- الذوبانية: نظرا لبنيته البلورية العالية والروابط الهيدروجينية الواسعة بين السلاسل، فان السليولوز غير قابل للذوبان في معظم المذيبات الشائعة بما في ذلك الماء، وتعد عدم الذوبانية هذه احدى الخصائص الرئيسية التي تجعل السليولوز مادة متينة [13].
- الفاعلية: السليولوز تفاعلي كيميائيا بفضل مجموعات الهيدروكسيل الموجودة فيه، ويمكن أن يخضع السليولوز لتعديلات كيميائية متنوعة، مثل الأسترة، لإنتاج مشتقات السليولوز مثل أسيتات السليولوز وإثيرات السليولوز، وهي أكثر قابلية للذوبان ومفيدة في مختلف التطبيقات الصناعية [14].
- التحلل الحراري: يتميز السليولوز بكونه بوليمرا طبيعيا، بحيث يتميز بثباته الحراري حتى حوالي 300-350 °C [15]، وبعد هذه الدرجة يبدأ بالتحلل والانحلال الى جزيئات أصغر مثل الجلوكوز، يعد السليولوز مركب قابل للتحلل الحيوي مما يجعله مادة صديقة للبيئة [16].
- التبلور: يظهر السليولوز أشكالاً بلورية مختلفة (السليولوز 1 والسليولوز 2) حسب كيفية ترتيب سلاسل البوليمر، يؤثر مستوى التبلور على خصائصه الفيزيائية والكيميائية، بما في ذلك قابلية الذوبان والقوة ومعدل التحلل [12].

### 3.5.II. الخواص الميكانيكية

تظهر المواد القائمة على السليولوز ومركباتها مع المواد غير العضوية والبوليمرات كمواد ناشئة لتصميم مواد ميكانيكية ووظيفية عالية الأداء، تعد الصلابة والقوة الجوهرية العالية لبلورات السليولوز مواد واعدة تُظهر خصائص ميكانيكية إذا تم تجميعها بشكل صحيح، وتتميز ألياف النانو السليولوزية (CNFs) على سبيل المثال بخصائص ميكانيكية جوهرية فائقة نظراً لارتفاع درجة التبلور [17]، بالإضافة إلى الترتيب والتفاعلات بين الجزيئات مثل الترابط الهيدروجيني بين سلاسل السليولوز [18].

تم حساب متوسط معامل يونغ بمقدار 10.3 GPa للسليولوز غير المتبلور، وباستخدام نموذج مجال القوة وباستخدام حيود الأشعة السينية (X-Ray diffraction)

تنافس الخواص الميكانيكية للسليولوز بشكل جيد مواد هندسية أخرى مثل الألومنيوم (70 GPa) أو الألياف الزجاجية (76 GPa)، نتيجة للكثافة المنخفضة التي تتراوح بين  $1.58 - 1.59 \text{ g/cm}^3$ ، وصنف

[19] Wegst وآخرون الصلابة النوعية للسليولوز الطبيعي البالغة  $67 \text{ GPa cm}^3\text{g}^{-1}$  ضمن أعلى قيم الصلابة النوعية لجميع المواد الطبيعية.

المرونة: يمكن الفهم بسهولة أن معامل المرونة وقوة الشد للتقويات السليولوزية مثيرة للإعجاب.

- يظهر أن معامل المرونة للسليولوز البكتيري مرتفع جدًا، أي  $60 - 115 \text{ GPa}$  [20].
- يظهر أيضا معامل المرونة للسليولوز البلوري I على طول محور سلسلة السليولوز يتراوح بين  $124 - 155 \text{ GPa}$  [21].

## 6.II. أنواع السليولوز

### 1.6.II. السليولوز البكتيري (Bacterial cellulose)

يُنتج السليولوز بشكل أساسي بواسطة النباتات إلا أن العديد من البكتيريا وخاصة تلك التي تنتمي إلى جنس *Gluconacetobacter* تشارك في إنتاج شكل مميز جدًا من السليولوز، ويتم إنتاج السليولوز البكتيري عادةً بواسطة *Gluconacetobacter hansenii* UCP1619 باستخدام وسط هيوستين-شيرام (Hestrin-Schramm)، ومع ذلك هناك بعض القيود المرتبطة بالسليولوز البكتيري مثل ارتفاع تكلفة الإنتاج، واستخدام وسائل زراعة مكلفة، وضعف الإنتاجية، وعمليات المعالجة اللاحقة، وتكاليف التشغيل، ويمكن أيضًا إنتاج السليولوز البكتيري بواسطة بكتيريا من أجناس *Sarcina* و *Agrobacterium* [22]، ويتميز السليولوز البكتيري الذي تنتجه البكتيريا الهوائية بخصائص فيزيائية وكيميائية فريدة مقارنة بالسليولوز النباتي [23].

### 2.6.II. أسيتات السليولوز (Cellulose acetate)

وهو إستر هام للسليولوز يستخدم في مجموعة واسعة من التطبيقات مثل الأغشية والألياف اعتمادًا على طريقة معالجته، ومن المجالات المتخصصة في استخدام أسيتات السليولوز تخليق جزيئات كروية مسامية تُسمى حبيبات السليولوز (cellulose beads) [24].

### 3.6.II. إيثيل السليولوز (Ethylcellulose)

وهو مشتق من السليولوز يتم فيه تعديل بعض مجموعات الهيدروكسيل (Hydroxyl groups) في وحدات الأنهيدروجلووكوز (Anhydroglucose units) المتكررة إلى مجموعات إيثيل إيثر (Ethyl ether)، ويُعرف إلى حد كبير باسم إيثيل إيثر السليولوز (Ethyl Ether of Cellulose) غير الأيوني، ويتم دراسة

أنظمة توصيل الأدوية المغلفة بالجسيمات الدقيقة القائمة على EC لتحقيق إطلاق ممتد للدواء وحماية المادة الأساسية من التحلل<sup>[25]</sup>.

#### 4.6.II. هيدروكسي بروبيل السليولوز (Hydroxypropyl cellulose)

HPC هو أحد مشتقات السليولوز القابلة للذوبان في الماء والمذيبات العضوية، وهذا ما يجعله مادة مفيدة في العديد من التطبيقات، بحيث يمكن استخدامه لعلاج التهاب القرنية والملتحمة الجاف، وتآكل القرنية، والتهاب القرنية العصبي<sup>[26]</sup>.



الشكل (7.II): أنواع السليولوز.

#### 7.II. أهمية السليولوز

يُعد السليولوز المنتج بوفرة في العالم من قبل النباتات<sup>[27]</sup> والمكون الهيكلي الرئيسي في الخلايا والأنسجة النباتية، وذو أهمية بالغة لأدواره البيولوجية المتعددة في جدران الخلايا النباتية، بما في ذلك القوة الميكانيكية، ودوره في النمو والتمايز والاتصال ونقل الماء والدفاع<sup>[28, 29]</sup>، ومن المنظور الصناعي يكتسب السليولوز المعالج أهمية متميزو، حيث يشكل غشاء السيلوفان (Cellophane) المستخدم في التعبئة والتغليف الصيدلاني نظراً لتوافقه ومتانته ومرونته، وبصفته بوليمراً طبيعياً يُستخدم على نطاق واسع في المنسوجات والورق ومواد البناء والمشتقات الكيميائية الصناعية، كما يُعد مصدر طاقة متجدد ومتوافق حيويًا، ويدخل هذا البوليمر في العديد من الصناعات، بما في ذلك الغذائية والبيطرية والخشبية والورقية والألياف والملابس ومستحضرات التجميل والصحة والصيدلة<sup>[30, 31]</sup>.

#### 8.II. الطرق الخضراء لاستخلاص السليولوز

تتنوع طرق تجزئة الكتلة الحيوية الليجنوسليولوزية لفصل مكوناتها، ويعتمد اختيار الطريقة الأفضل على نوع البوليمر المراد استخلاصه، ومصدر الكتلة الحيوية، والمواصفات المطلوبة للمنتج النهائي، وعادةً

ما يتم الحصول على السليلوز عن طريق إذابة اللجنين والهيميسليلوز بالإضافة إلى المركبات ذات الوزن الجزيئي المنخفض.

الطرق التقليدية لاستخلاص السليلوز من الكتلة الحيوية (مثل طريقة كرافت) فعالة ولكنها تستخدم مذيبات وظروف صعبة وغير صديقة للبيئة لذلك يبحث العلماء عن بدائل خضراء، حيث ظهرت أنظمة المذيبات الخضراء مثل السوائل الأيونية والمذيبات ذات الانصهار العميق كبديل واحدة لتجزئة الكتلة الحيوية، وقد ثبت أنها أنظمة واحدة جدًا، وتتميز بكفاءتها العالية وانتقائيتها وتأثيرها البيئي المنخفض وسميتها القليلة وقابليتها للتحلل واستقرارها الجيد وسهولة إعادة تدويرها<sup>[32]</sup>.

يلخص الجدول (3.II) بعض مزايا وعيوب الطرق الخضراء لاستخلاص السليلوز.



الشكل (8.II): عملية الاستخلاص الخضراء لاستخراج السليلوز<sup>[9]</sup>.

الجدول (3.II): مزايا وعيوب الطرق الخضراء لاستخراج السليلوز<sup>[9]</sup>.

المزايا	العيوب
تأثير بيئي منخفض	تصميم معقد للمذيب
سهولة إعادة التدوير	لزوجة عالية
سمية منخفضة	التكلفة (السوائل الأيونية)
قابلية التحلل البيولوجي	
استقرار جيد	

السوائل الأيونية، والتي تعرف بالأملاح منصهرة ذات نقطة انصهار منخفضة (أقل من 100 °C)<sup>[33]</sup>، تعتبر مذيبات واحدة لإذابة وعزل الجزيئات الحيوية الكبيرة مثل السليلوز واللجنين، يمكن تعديل قوة تفاعلات السوائل الأيونية مع مكونات الكتلة الحيوية عن طريق تغيير تركيبها، ومما يسمح بإذابة السليلوز بشكل انتقائي، ومع ذلك فإن استخدام السوائل الأيونية في استخلاص السليلوز قابلة للتطبيق بشكل أساسي على نطاق التجارب المخبرية.

بصرف النظر عن الميزات الخضراء المشكوك فيها للسوائل الأيونية، فإن لزوجتها العالية نسبيًا وتكلفة إنتاجها وتفتيتها المرتفعة لا تزال تعيق التجارب على النطاق التجريبي والصناعي، لذلك فإن تطوير أنظمة جديدة قادرة على الاستخلاص الفعال والانتقائي للبوليمرات الحيوية الرئيسية الموجودة في الكتلة الحيوية أمر مرغوب فيه للغاية، وخاصة إذا تم إعطاء الأولوية للأنظمة الأكثر خضرة وصديقة للبيئة.

ظهرت مذيبات التشكل العميق (Deep Eutectic Solvents) كمذيبات واحدة لتجزئة الكتلة الحيوية بكفاءة عالية وصداقة للبيئة، وقد تم تصنيع أول مذيب تشكّل عميق بواسطة أبوت (Abbott) وآخرون<sup>[34]</sup>، وتكون من خليط من أحماض برونستد (Bronsted acids) أو لويس (Lewis acids) المانحات رابطة هيدروجينية ممزوجة بأملح الأمونيوم الرباعية (Quaternary Ammonium salts) مثل كلوريد الكولين (Choline Chloride) مستقبلات رابطة هيدروجينية، وعند مزجها بنسبة مولية معينة تصبح نقطة انصهار الخليط أقل بكثير من نقطة انصهار المكونات الأصلية<sup>[35]</sup>، وتتشابه الخصائص الفيزيائية لمذيبات التشكل العميق مثل نقطة الانصهار والتقلب المنخفضين، والاستقرار الحراري العالي، والتوصيلية، والتوتر السطحي مع خصائص السوائل الأيونية ذات درجة حرارة الغرفة، ويمكن تعديل الخصائص الفيزيائية والكيميائية عن طريق تغيير تركيبة مانح أو مستقبل الرابطة الهيدروجينية، مما سيؤثر بالتالي على أدائها كوسط استخلاص، وأنظمة مذيبات التشكل العميق سهلة التحضير في حالة نقية ولا تتطلب وجود أي مذيب آخر ولا تنتج أي نفايات، مما يجعل هذه الأنظمة منخفضة التكلفة وغير سامة وقابلة للتحلل البيولوجي بدرجة عالية، ومن الواضح أن مذيبات التشكل العميق تقدم العديد من المزايا على المذيبات التقليدية، وقد تولد اهتمام كبير مؤخرًا فيما يتعلق بتطبيقها في المصافي الحيوية<sup>[36]</sup>، وقد تم الإبلاغ عن أن مذيبات التشكل العميق تذيب وتستخلص بشكل انتقائي اللجنين (Lignin) عالي الجودة بنقاوة تصل إلى 90% وعائد يقارب 60% (w/w) من إجمالي اللجنين الموجود في مصادر مختلفة مثل قش الذرة<sup>[37]</sup>، وعلى الرغم من مزاياها لا يزال استخدامها واسع النطاق محدودًا ويتطلب المزيد من البحث لتأكيد إمكاناتها وتطبيقها على نطاق أوسع.

## 9.II. توصيف السليولوز (Characterization of cellulose)

تُستخدم تقنيات متنوعة لتوصيف السليولوز والكربون المنشط الناتج من السليولوز مثل SEM و TEM، وما إلى ذلك كما هو موضح في الشكل (9.II)، نذكر منها:



الشكل (9.II): توصيف السليولوز.

### 1.9.II. المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) والنافذ (TEM)

استخدمت تقنيات المجهر الإلكتروني مثل المجهر الإلكتروني الماسح ( Scanning Electron Microscopy) والمجهر الإلكتروني النافذ (Transmission Electron Microscopy) لفحص البنية المجهرية ومورفولوجيا السطح<sup>[38]</sup>، أشارت بعض الدراسات السابقة باستخدام هذه التقنيات إلى أن اللييف الأولي المنتظم للسليولوز يبلغ قطره 3.5 nm، ومع ذلك أظهرت تحقيقات أحدث أنه يتراوح بين 3-20 nm<sup>[39]</sup>، ويتوفر رأي مماثل للهياكل الملاحظة على شكل قضبان أسطوانية أو ذات شكل شريطي اعتمادًا على المصدر، وتظهر الدراسات أيضًا أنه عند درجة حرارة عالية نسبيًا، ينتج السليولوز سطحًا<sup>[40]</sup>.

### 2.9. II مطيافية تحويل فورييه للأشعة تحت الحمراء (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)

تعتمد خصائص المواد السليولوزية بشكل كبير على التفاعلات بين سلاسل السليولوز، وعادة ما تظهر الدراسات باستخدام مطيافية FTIR أن السليولوز يحتوي بشكل أساسي على مجموعات الهيدروكسيل (3600-3200 cm<sup>-1</sup>)، وتمدد روابط C-H من مجموعات -CH<sub>2</sub> (3000-2700 cm<sup>-1</sup>)، وتمدد روابط C-O (1300-1000 cm<sup>-1</sup>)، وتمدد روابط C-O-C (1164 cm<sup>-1</sup>)، وروابط جليكوسيدية (895 cm<sup>-1</sup>)<sup>[41]</sup>.

### 3.9.II. حيود الأشعة السينية (X-ray diffraction)

بمساعدة حيود الأشعة السينية يمكن الحصول على معلومات مثل تفاعل الأسترة، وبلورية السليولوز، وتأثير التحلل المائي الحمضي، ووجود روابط هيدروجينية داخل الجزيء، والتمييز بين الأشكال المتعددة، وفي الواقع كانت درجة البلورية وكذلك أبعاد البلورات النانوية في السليولوز موضوع بحث مكثف لسنوات

عديدة، وقد أنجزت بعض نتائج قياسات XRD للسليولوز الطبيعي<sup>[42]</sup>، ويقترح أن السليولوز بناء على نتائج حيود الأشعة السينية ذو طبيعة بلورية مع قمة مكثفة عند الزاوية  $2\theta=22.6^\circ$ .

#### 4.9.II. التحلل الحراري للسليولوز (Pyrolysis of cellulose)

لفهم أفضل للتحويل الكيميائي الحراري للسليولوز تجرى عادة عملية التحلل الحراري، والذي يعتبر مهمًا لأنه يؤثر على خصائص السطح والبنية المسامية للمنتج النهائي ويسبب عمومًا تغيرات فيزيائية وكيميائية معقدة، إن طبيعة التحلل الحراري للسليولوز<sup>[43]</sup> معقدة بسبب العديد من التفاعلات المترابطة مع عدد كبير من المتفاعلات والوسائط ومنتجات التفاعل، يكون التحلل الحراري كما سجله العديد من المؤلفين (Miyajima، Roberts و Brunner واخرون)<sup>[33,32]</sup> في أربع خطوات عامة:

- إطلاق الماء الممتص عند درجة حرارة أقل من  $150^\circ\text{C}$ .
- نزع الماء من وحدات الجلوكوبيرانوز في نطاق  $150-240^\circ\text{C}$ .
- إزالة البلمرة وتكسير روابط C-O و C-C داخل الوحدات الحلقية عند  $240-400^\circ\text{C}$ .
- الأروماتية أو تكوين طبقات جرافينية عند  $400-700^\circ\text{C}$ .

#### 10.II. تطبيقات السليولوز

السليولوز البوليمر العضوي الأكثر وفرة، يستخدم بشكل واسع في صناعة الورق، المنسوجات (قطن وكتان)، الأدوية (مواد مألثة)، والوقود الحيوي، ويتواجد بكميات كبيرة في القطن والخشب والقنب المجفف وما إلى ذلك كما هو موضح في الشكل (10.II).



الشكل (10.II): بعض استخدامات السليولوز.

**1.10.II. استخدام السليلوز في الطاقة المتجددة (Use of cellulose in renewable energy)**

- **الوقود الحيوي (Biofuel):** مع تزايد السكان والتطور التكنولوجي، يستند الوقود الأحفوري بسرعة يتطلب التنمية المستدامة التحول إلى وقود أنظف وأكثر فعالية من حيث التكلفة، مثل الوقود الحيوي المشتق من السليلوز والذي يتميز الوقود الحيوي بانخفاض التكلفة.

- **إنتاج الإيثانول الحيوي (bioethanol production):** يعتبر الإيثانول المستخلص من السليلوز بديلاً ممتازاً لإنتاج الوقود الحيوي، نظراً لكفاءته العالية وتكلفته المنخفضة مقارنة بمصادر أخرى يتواجد السليلوز بوفرة في سيقان وأوراق النباتات الخضراء، ويمكن إستخلاص الإيثانول أيضاً من قش القمح والأرز، ونشارة الخشب، والحشائش.

- **المواد الاستهلاكية:** يستخدم السليلوز في الأدوية والغذاء، حيث ينتج تعديل بنيته مركبات ذات توافق حيوي مرونة، وثبات أفضل كونه غير قابل للهضم، يضاف للأغذية بدون قيمة حرارية مركبات مثل HPMC وكربوكسي ميثيل السليلوز الصوديوم تستخدم في الصيدلة والغذاء.

- **هيدروكسي بروبيل ميثيل سلولوز (Hydroxypropyl methcellulose):** يستخدم HPMC على نطاق واسع في صناعة الأدوية لكونه آمناً وغير سام، يستخدم كعامل لتكوين الأفلام، وعامل معلق في العديد من أشكال الجرعات، يساهم في تكوين مستحضرات صيدلانية متجانسة وقوية، أو في إنتاج كبسولات دقيقة وحببيات ذات إطلاق مستدام أو متحكم به.

- **صوديوم كاربوكسي ميثيل السليلوز (Sodium carboxymethyl cellulose):** يعتبر CMC-Na مكوناً متعدد الاستخدامات في المجال الطبي، حيث يعمل كمثبت للمستحلبات في الحقن، ويستخدم في المواد التي تشكل طبقات لاصقة، كما يعتبر أنه مادة فعالة في الحد من التهابات الجروح، وتقليل التورم والتهيج بعد العمليات الجراحية، وأكدت التجارب الحيوانية على سلامته وموثوقيته كناقل للأدوية المضادة للسرطان [44].

- **الطعام (Food):** بسبب خصائصه المميزة وتفاعله مع الماء، أصبحت هذه المادة تستخدم بكثرة في الصناعات الغذائية لزيادة حجم الأطعمة ومحتواها من الألياف.

**2.10.II. التطبيقات الطبية الحيوية والصيدلانية للسليلوز**

يستخدم السليلوز على نطاق واسع في الطب والصيدلة بسبب وفرته وتوافقه الحيوي، يمكن أن يقلل من تكلفة الأدوية العالية باستخدام نفايات النباتات، يتطلب الاستخدام التجاري الواسع تحسين تقنيات الإنتاج.

- السليولوز في تغليف الأشكال الدوائية الصلبة ومحسنات الانضغاط: يستخدم السليولوز ومشتقاته لتغليف الأدوية الصلبة (حبوب، أقراص، إلخ) لحمايتها وتعديل إطلاقها كما يستخدم لتحسين انضغاط الأدوية، خاصةً عند ارتفاع تركيزها وتهدف الأبحاث إلى تقليل تكلفة الإنتاج.
- السليولوز في توصيل الأدوية: السليولوز مادة واعدة لتوصيل الأدوية، بلورات السليولوز النانوية (CNCs) تزيد من تحميل الدواء وتوفر إطلاقًا مستدامًا، السليولوز يساهم في صيدلة صديقة للبيئة.
- السليولوز في السقالات الحيوية: يستخدم السليولوز خاصةً من *Gluconacetobacter xylinus*، في صنع السقالات الحيوية التي تدعم نمو الأنسجة، السليولوز النانوي البكتيري مثالي لنمو الخلايا بسبب خصائصه الشبيهة بالهيدروجيل، التحدي الرئيسي هو التحلل البيولوجي في الجسم البشري، والذي يمكن تحسينه بأكسدة البريودات.
- السليولوز في الزراعات الطبية الحيوية: يتميز السليولوز النانوي البكتيري بعدم تحلله في الجسم وتوافقه الحيوي، مما يجعله مناسبًا للزراعات الطبية الحيوية بسبب متانته واستقراره الكيميائي.
- الزراعات القلبية الوعائية: يستخدم السليولوز البكتيري في صناعة الأوعية الدموية الإصطناعية، لتقليل التجلط والإسداد كما يُستخدم في هندسة الأنسجة الوعائية عند دمجها مع الهيبارين، وهناك بحث لإستخدامه في بدائل صمامات القلب.
- إصلاح العظام والأنسجة الضامة: يظهر السليولوز النانوي إمكانات واعدة في تجديد العظام والأنسجة الضامة، حيث يدعم نمو الخلايا العظمية والغضروفية تم تطوير غشاء من السليولوز البكتيري وهيدروكسي أباتيت يحفز نمو العظام [35].

### الخاتمة

في الختام يتضح الدور الأساسي الذي يلعبه السليولوز كمكون هيكلي رئيسي في المملكة النباتية ومصدر وفير للمواد الخام المتجددة، ولقد تم استعراض تعريفه ومصادره الطبيعية وتركيبه الكيميائي وبعض خصائصه، وإن الفهم الشامل لهذه العموميات يمثل القاعدة الأساسية للانطلاق نحو استكشاف أعمق لتطبيقاته المتنوعة وإمكانياته الهائلة في مختلف المجالات.

## المراجع

- [1] D. N.-S. Hon, "Cellulose: a random walk along its historical path," *Cellulose*, vol. 1, pp. 1-25, 1994.
- [2] L. F. Ballesteros *et al.*, "Lignocellulosic materials: sources and processing technologies," *Lignocellulosic Materials and Their Use in Bio-based Packaging*, pp. 13-33, 2018.
- [3] M. Phillips, "Anselme Payen, distinguished French chemist and pioneer investigator of the chemistry of lignin," *Journal of the Washington academy of sciences*, vol. 30, no. 2, pp. 65-71, 1940.
- [4] R. M. Brown Jr, "The biosynthesis of cellulose," *Journal of Macromolecular Science, Part A: Pure and Applied Chemistry*, vol. 33, no. 10, pp. 1345-1373, 1996.
- [5] R. Hatfield and W. Vermerris, "Lignin formation in plants. The dilemma of linkage specificity," *Plant physiology*, vol. 126, no. 4, pp. 1351-1357, 2001.
- [6] J.-L. Ren and R.-C. Sun, "Hemicelluloses," *Cereal straw as a resource for sustainable biomaterials and biofuels*, vol. 1, pp. 73-130, 2010.
- [7] C. E. Wyman, S. R. Decker, M. E. Himmel, J. W. Brady, C. E. Skopec, and L. Viikari, "Hydrolysis of cellulose and hemicellulose," *Polysaccharides: Structural diversity and functional versatility*, vol. 1, pp. 1023-1062, 2005.
- [8] D. Trache, M. H. Hussin, M. M. Haafiz, and V. K. Thakur, "Recent progress in cellulose nanocrystals: sources and production," *Nanoscale*, vol. 9, no. 5, pp. 1763-1786, 2017.
- [9] S. Magalhães *et al.*, "Eco-friendly methods for extraction and modification of cellulose: an overview," *Polymers*, vol. 15, no. 14, p. 3138, 2023.
- [10] D. R. Shankaran, "Cellulose nanocrystals for health care applications," in *Applications of nanomaterials*: Elsevier, 2018, pp. 415-459.
- [11] H. Krässig *et al.*, "Cellulose," *Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry*, 2000.
- [12] M. Wohler, T. Bensselfelt, L. Wågberg, I. Furó, L. A. Berglund, and J. Wohler, "Cellulose and the role of hydrogen bonds: not in charge of everything," *Cellulose*, pp. 1-23, 2022.
- [13] B. Medronho, A. Romano, M. G. Miguel, L. Stigsson, and B. Lindman, "Rationalizing cellulose (in) solubility: reviewing basic physicochemical aspects and role of hydrophobic interactions," *Cellulose*, vol. 19, pp. 581-587, 2012.

- [14] S. C. Fox, B. Li, D. Xu, and K. J. Edgar, "Regioselective esterification and etherification of cellulose: a review," *Biomacromolecules*, vol. 12, no. 6, pp. 1956-1972, 2011.
- [15] H. S. Hafid, F. N. Omar, J. Zhu, and M. Wakisaka, "Enhanced crystallinity and thermal properties of cellulose from rice husk using acid hydrolysis treatment," *Carbohydrate polymers*, vol. 260, p. 117789, 2021.
- [16] Z. Chen *et al.*, "Advances and applications of cellulose bio-composites in biodegradable materials," *Journal of Polymers and the Environment*, vol. 31, no. 6, pp. 2273-2284, 2023.
- [17] A. P. Abbott, T. J. Bell, S. Handa, and B. Stoddart, "O-Acetylation of cellulose and monosaccharides using a zinc based ionic liquid," *Green Chemistry*, vol. 7, no. 10, pp. 705-707, 2005.
- [18] H.-Y. Yu, Z.-Y. Qin, Y.-N. Liu, L. Chen, N. Liu, and Z. Zhou, "Simultaneous improvement of mechanical properties and thermal stability of bacterial polyester by cellulose nanocrystals," *Carbohydrate polymers*, vol. 89, no. 3, pp. 971-978, 2012.
- [19] A. C. O'sullivan, "Cellulose: the structure slowly unravels," *Cellulose*, vol. 4, no. 3, pp. 173-207, 1997.
- [20] Y.-C. Hsieh, H. Yano, M. Nogi, and S. Eichhorn, "An estimation of the Young's modulus of bacterial cellulose filaments," *Cellulose*, vol. 15, pp. 507-513, 2008.
- [21] K. Tashiro and M. Kobayashi, "Theoretical evaluation of three-dimensional elastic constants of native and regenerated celluloses :role of hydrogen bonds," *Polymer*, vol. 32, no. 8, pp. 1516-1526, 1991.
- [22] A. F. Costa, F. C. Almeida, G. M. Vinhas, and L. A. Sarubbo, "Production of bacterial cellulose by *Gluconacetobacter hansenii* using corn steep liquor as nutrient sources," *Frontiers in microbiology*, vol. 8, p. 2027, 2017.
- [23] F. Esa, S. M. Tasirin, and N. Abd Rahman, "Overview of bacterial cellulose production and application," *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, vol. 2, pp. 113-119, 2014.
- [24] S. Fischer, K. Thümmel, B. Volkert, K. Hettrich, I. Schmidt, and K. Fischer, "Properties and applications of cellulose acetate," in *Macromolecular symposia*, 2008, vol. 262, no. 1, pp. 89-96: Wiley Online Library.
- [25] G. Murtaza, "Ethylcellulose microparticles: A review," *Acta Pol Pharm*, vol. 69, no. 1, pp. 11-22, 2012.
- [26] J. I. Luchs, D. S. Nelinson, J. I. Macy, and L.-.-S. Group, "Efficacy of hydroxypropyl cellulose ophthalmic inserts (LACRISERT) in subsets of

- patients with dry eye syndrome: findings from a patient registry," *Cornea*, vol. 29, no. 12, pp. 1417-1427, 2010.
- [27] R. S. Riseh, M. Vatankhah, M. Hassanisaadi, and J. F. Kennedy, "Increasing the efficiency of agricultural fertilizers using cellulose nanofibrils: a review," *Carbohydrate Polymers*, vol. 321, p. 121313, 2023.
- [28] D. J. Cosgrove, "Growth of the plant cell wall," *Nature reviews molecular cell biology*, vol. 6, no. 11, pp. 850-861, 2005.
- [29] S. Rongpipi, D. Ye, E. D. Gomez, and E. W. Gomez, "Progress and opportunities in the characterization of cellulose—an important regulator of cell wall growth and mechanics," *Frontiers in Plant Science*, vol. 9, p. 1894, 2019.
- [30] J. Liu and R. O. Williams III, "Long-term stability of heat-humidity cured cellulose acetate phthalate coated beads," *European journal of pharmaceuticals and biopharmaceuticals*, vol. 53, no. 2, pp. 167-173, 2002.
- [31] J. Shokri and K. Adibkia, "Application of cellulose and cellulose derivatives in pharmaceutical industries," in *Cellulose-medical, pharmaceutical and electronic applications*: IntechOpen, 2013.
- [32] S. Magalhães *et al.*, "Lignin extraction from waste pine sawdust using a biomass derived binary solvent system," *Polymers*, vol. 13, no. 7, p. 1090, 2021.
- [33] X. Lin, K. Jiang, X. Liu, D. Han, and Q. Zhang, "Review on development of ionic liquids in lignocellulosic biomass refining," *Journal of Molecular Liquids*, vol. 359, p. 119326, 2022.
- [34] O. Nechyporchuk, M. N. Belgacem, and J. Bras, "Production of cellulose nanofibrils: A review of recent advances," *Industrial Crops and Products*, vol. 93, pp. 2-25, 2016.
- [35] D. Trache *et al.*, "Microcrystalline cellulose: Isolation, characterization and bio-composites application—A review," *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 93, pp. 789-804, 2016.
- [36] X. Tang *et al.*, "Green processing of lignocellulosic biomass and its derivatives in deep eutectic solvents," *ChemSusChem*, vol. 10, no. 13, pp. 2696-2706, 2017.
- [37] M. Zhou, O. A. Fakayode, and H. Li, "Green extraction of polyphenols via deep eutectic solvents and assisted technologies from agri-food by-products," *Molecules*, vol. 28, no. 19, p. 6852, 2023.
- [38] D. Klemm, B. Philipp, T. Heinze, U. Heinze, and W. Wagenknecht, "Comprehensive Cellulose Chemistry. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co," 1998.

- [39] D. Fengel and G. Wegener, *Wood :chemistry, ultrastructure, reactions*. Walter de Gruyter, 2011.
- [40] M. Diakit , A. Paul, C. J ger, J. Pielert, and J. Mumme, "Chemical and morphological changes in hydrochars derived from microcrystalline cellulose and investigated by chromatographic, spectroscopic and adsorption techniques," *Bioresource technology*, vol. 150, pp. 98-105, 2013.
- [41] Y. Guo and D. A. Rockstraw, "Physical and chemical properties of carbons synthesized from xylan, cellulose, and Kraft lignin by H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> activation," *Carbon*, vol. 44, no. 8, pp. 1464-1475, 2006.
- [42] D. Klemm, B. Heublein, H. P. Fink, and A. Bohn, "Cellulose: fascinating biopolymer and sustainable raw material," *Angewandte chemie international edition*, vol. 44, no. 22, pp. 3358-3393, 2005.
- [43] P. H. Brunner and P. V. Roberts, "The significance of heating rate on char yield and char properties in the pyrolysis of cellulose," *Carbon*, vol. 18, no. 3, pp. 217-224, 1980.
- [44] D. J. de Silva and J. M. Olver, "Hydroxypropyl methylcellulose (HPMC) lubricant facilitates insertion of porous spherical orbital implants," *Ophthalmic Plastic & Reconstructive Surgery*, vol. 21, no. 4, pp. 301-302, 2005.

الفصل الثالث :  
٤ ٥ ٦ ٧ ٨ ٩ ١٠

حكايات  
سابقه  
١١ ١٢ ١٣ ١٤ ١٥

شهدت الأبحاث المتعلقة بتحسين التربة في السنوات الأخيرة اهتماماً متزايداً خاصة في ظل التحديات البيئية التي تواجه الإنتاج الزراعي، مثل تدهور التربة ونقص خصوبتها، ومن بين الحلول الواعدة التي برزت في هذا المجال استغلال الفحم الحيوي والسليلوز لتحسين الخصائص الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية للتربة لخلق بيئة متوازنة تحفز النشاط الميكروبي وتدعم استدامة الإنتاج الزراعي.

### 1.III. دراسات سابقة حول استغلال الفحم الحيوي في تعزيز التربة الزراعية

#### 1.1.III. الدراسة الأولى: تأثير إضافة الفحم الحيوي على احتباس النيتروجين وتوافره الحيوي في التربة الزراعية

Impacts of adding biochar on nitrogen retention and bioavailability in agricultural soil

المؤلفين وسنة النشر: Hao Zhen, et .....al. 2013

الهدف: استخدام الفحم الحيوي لتحسين إنتاجية التربة.

التجربة: دراسة نقصان النيتروجين (Nitrogen) وتثبيتته، وتوافره البيولوجي في تربة معدلة بالفحم الحيوي في تجارب مخبرية.

#### النتائج:

- انخفاض كبير في نترات الأمونيوم ( $NO_3^-$ )، النيتريت ( $NO_2^-$ )، وأيونات الأمونيوم ( $NH_4^+$ ) المتسرب من التربة المسمدة بنترات الأمونيوم عند إضافة الفحم الحيوي، بينما لم يُلاحظ تأثير كبير على تسرب نترات الأمونيوم والنيتريت من التربة المسمدة بنترات الأمونيوم فقط.
  - تسربت أيونات الأمونيوم والنترات من التربة المسمدة بنترات الأمونيوم التي نما فيها الذرة بكميات أقل.
  - يُعزى تخفيف خسارة النيتروجين الناتج عن التسرب بعد إضافة الفحم الحيوي بشكل أساسي إلى زيادة قدرة التربة على الاحتفاظ بالماء، وامتزاز أيونات الأمونيوم، وزيادة تثبيت النيتروجين.
  - حفزت إضافة الفحم الحيوي نمو الذرة، سواء فوق أو تحت سطح التربة، كما زادت إضافة الفحم الحيوي من كفاءة استخدام النيتروجين للذرة لكنها قللت من كفاءة تراكم النيتروجين.
- الخلاصة: تشير هذه الدراسة إلى أن إضافة الفحم الحيوي قد تحسن التوافر البيولوجي للنيتروجين في

التربة الزراعية، لذلك يمكن أن يؤدي تقليل تسرب النيتروجين وزيادة احتفاظه وتوافره البيولوجي في التربة الزراعية إلى خفض الطلب على الأسمدة النيتروجينية لنمو المحاصيل.

### III.1.2. الدراسة الثانية: تأثير تعديلات الفحم الحيوي على جودة تربة زراعية نموذجية في الغرب الأوسط الأمريكي [2]

Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil

المؤلفين وسنة النشر: David A,.... Et al. 2010

الهدف: امكانية استخدام الفحم الحيوي كمعدل للتربة لتعزيز استدامة حصاد الكتلة الحيوية.  
التجربة:

- درست تأثير تعديلات الفحم الحيوي (0، 5، 10، و 20 g(biochar) kg<sup>-1</sup>(soil) ) على جودة التربة المدروسة.
- حُضنت أعمدة التربة المعبأة لمدة 500 يوم عند 25 °C ورطوبة نسبية 80%.
- في الأسبوع 12 أضيف 5g من سماد الخنازير المجفف والمطحون إلى الـ 3cm العلوية من التربة لنصف الأعمدة مرة واحدة في الأسبوع، وغسلت جميع الأعمدة بـ 200ml من محلول كلوريد الكالسيوم (CaCl<sub>2</sub>).

النتائج:

زادت تعديلات الفحم الحيوي بشكل ملحوظ من النيتروجين (Nitrogen) الكلي (حتى 7%)، والكربون العضوي (organic C) حتى 69%، والفوسفور والبوتاسيوم والكالسيوم.

الخلاصة: تشير النتائج إلى أن تعديلات الفحم الحيوي لديها القدرة على تحسين الحالة الغذائية للتربة الزراعية.

### III.1.3. الدراسة الثالثة: تأثيرات الفحم الحيوي على توافر الفوسفور في التربة الزراعية [3]

Biochar effects on phosphorus availability in agricultural soils: A meta-analysis

المؤلفين وسنة النشر: Bruno Glaser,.... et al. 2019

الهدف: اقتراح أدوات إدارة جديدة لاستخدام الأسمدة الصديقة للبيئة القائمة على الفوسفور.

التجربة: تم القيام بتقييم 108 مقارنات زوجية لاستجابة توافر الفوسفور لتطبيق الفحم الحيوي في التربة.

## النتائج:

- أدى تطبيق الفحم الحيوي إلى زيادة توافر الفوسفور في التربة الزراعية بعامل 4.6.
  - تطبيقات الفحم الحيوي بكميات تزيد عن  $10 \text{ Mg ha}^{-1}$  أنتجت زيادات كبيرة في توافر الفوسفور في التربة الزراعية.
  - أدى تطبيق الفحم الحيوي عند درجات حرارة أقل من  $600^\circ \text{C}$  إلى زيادة كبيرة في توافر الفوسفور في التربة الحمضية (الرقم الهيدروجيني  $\text{pH} > 6.5$ ) والتربة المحايدة (الرقم الهيدروجيني 6.5-7.5) بشكل كبير، بينما أظهرت التربة القلوية (الرقم الهيدروجيني  $< 7.5$ ) انخفاضًا كبيرًا في توافر الفوسفور بعامل 3.1 و 2.4 على التوالي (95% 3.5-6.7 و 1.4-4.3 على التوالي)، بينما لم يكن هناك تأثير كبير في التربة القلوية (الرقم الهيدروجيني  $< 7.5$ ).
- الخلاصة:** الفحم الحيوي يعزز بشكل كبير الفوسفور المتاح للنباتات في التربة المعدلة بالفحم الحيوي لمدة خمس سنوات على الأقل.

### III.4.1. الدراسة الرابعة: إنتاج وتوصيف الفحم الحيوي من المخلفات الزراعية لاستخدامه في تحسين جودة التربة<sup>[4]</sup>

Production and characterization of biochars from agricultural by-products for use in soil quality enhancement

المؤلفين وسنة النشر: D. Rehrach., ...et al. 2014

**الهدف:** استخدام المخلفات لإنتاج فحم حيوي مناسب للاستخدام في التربة الزراعية لعزل الكربون وتعزيز نمو النبات عن طريق توفير العناصر الغذائية والاحتفاظ بها مع تحسين الخواص الفيزيائية والبيولوجية للتربة، و كانت أهداف هذه الدراسة إنتاج فحم حيوي من مخلفات مختلفة [بقايا قشور البقان (PC)، بقايا قشور الفول السوداني (PS)، بقايا الحلق القطن (CG)، وحشيشة السويتش (*Panicum virgatum L.*)] عند درجات حرارة ووقت بقاء مختلفين أثناء التحلل الحراري، وتقييم الخواص الفيزيائية والكيميائية للفحم الحيوي الناتج [الناتج، الرماد، الرقم الهيدروجيني، المساحة السطحية الكلية (TSA)، المساحة السطحية (SC)، والتوصيل الكهربائي (EC)] والتركيب العنصري.

**التجربة:** تُنتج المخلفات بكميات كبيرة من بقايا المحاصيل مثل قشور البقان (PC)، وقشور الفول السوداني (PS)، وبقايا حلق القطن (CG)، وتم التحلل الحراري للمواد الأولية تحت النيتروجين ( $\text{N}_2$ ) عند

3 درجات حرارة (300، 500، و750 °C) وأوقات بقاء مختلفة (8، 16، و24 ساعة) لـ PC و PS و CG، و(4، 8، و12 ساعة) و (1، 2، و3 ساعات) لحشيشة السويتش، اعتمادًا على طبيعة المادة الأولية.

### النتائج:

- أدت درجات حرارة التحلل الحراري الأعلى إلى استرداد أقل للفحم الحيوي، ومساحة سطحية كلية أكبر، ورقم هيدروجيني أعلى، وأقل مساحة سطحية، ومحتوى رماد أعلى.
- من بين أنواع الفحم الحيوي الثمانية، كان الفحم الحيوي المشتق من حشيشة السويتش والمنتج عند 750 درجة مئوية هو الأعلى في المساحة السطحية الكلية ( $276 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ ) يليه الفحم الحيوي المشتق من قشور البقان ( $185 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ ).
- حدثت زيادة كبيرة في الرقم الهيدروجيني للفحم الحيوي (تصل إلى 9.8) عند درجات الحرارة الأعلى.
- وأظهر الفحم الحيوي المنتج عند درجات حرارة منخفضة (350 °C) مساحة سطحية قابلة للقياس مع فحم حيوي مشتق من قشور الفول السوداني.
- لوحظ أن أعلى محتوى للرماد في الفحم الحيوي المشتق من بقايا حلج القطن (يصل إلى 34%).

### الخلاصة:

- إمكانية إنتاج أنواع مختلفة من الفحم الحيوي لتحسين الخصائص الفيزيائية والكيميائية للتربة بشكل انتقائي من خلال اختيار مواد خام محددة وظروف التحلل الحراري.
- تتأثر خصائص التربة بشكل كبير بالفحم الحيوي المستخدم في تحسين التربة.
- تؤدي درجات حرارة التحلل الحراري العالية إلى زيادة درجة حموضة الفحم الحيوي مما يجعله مناسبًا للتربة الحمضية.
- يتمتع الفحم الحيوي ذو درجة الحرارة المنخفضة بشحنة سطحية أعلى مناسبة للتربة ذات التبادل الأيوني المنخفض.

### III.5.1. الدراسة الخامسة: تأثير الفحم الحيوي الناتج عن التحلل الحراري السريع لنشارة الخشب على

تحسين جودة التربة الصحراوية وتعزيز نمو النبات<sup>[5]</sup>

Fast pyrolysis biochar from sawdust improves the quality of desert soils and enhances plant growth

المؤلفين وسنة النشر: 2015... Et al Mahmood Laghari.,

**الهدف:** دراسة تأثير أنواع مختلفة من الفحم الحيوي على نمو نبات (الانتاجية، وارتفاع النبات) وتحسين خصائص التربة.

التحقيق في تأثير درجات حرارة الانحلال الحراري السريع المختلفة على خصائص الفحم الحيوي المشتق من نشارة خشب الصنوبر السريع الانحلال الحراري، ونمو وإنتاج الكتلة الحيوية الجافة للذرة الرفيعة في تربة الصحراء المتحكم بها، والخصائص الهيدروليكية والكيميائية للتربة.

### التجربة:

- تم جمع العينات من صحراء كوبوكي الداخلية في منغوليا، الصين (39.588° شمالاً، 109.588° شرقاً) (عشرين عينة لكل منها 1kg) بشكل عشوائي، ومزجها، وغربلتها بمنخل.
- تم اجراء عمليات الانحلال الحراري لإنتاج الفحم الحيوي في خمس درجات حرارة مختلفة (أي 400، 500، 600، 700، و 800 °C) في ظل ظروف محدودة من الأكسجين.
- حُسب إنتاج الفحم الحيوي عند درجات حرارة مختلفة على أساس الوزن الرطب، بينما أُجري التحليل التقريبي وفقاً لمعيار ASTM D 3176، وحددت التركيبات الأولية للفحم الحيوي مثل C و H و N و S و O بطريقة الاحتراق الجاف، وحددت الأكاسيد الكلية للمغنيسيوم والألمنيوم والسيليكون والفوسفور والبوليتاسيوم والكالسيوم في الفحم الحيوي بواسطة مطيافية الأشعة السينية الفلورية (XRF، EDAX (USA).

### النتائج:

- زادت إنتاجية الذرة بنسبة 19% و 32% مع المعاملتين T-400 و T-700 على التوالي مقارنةً بالعينة الشاهد.
- قلل الفحم الحيوي من استنزاف الرطوبة في أعمدة التربة وحسّن القدرة على الاحتفاظ بالماء في التربة بنسبة 14% و 57% مع المعاملتين T-400 و T-700.
- انخفضت الموصلية الهيدروليكية للتربة بنسبة 15% و 42% مع المعاملتين T-400 و T-700، على التوالي.
- تحسنت القدرة على الاحتفاظ بالرطوبة بنسبة 16% و 59% مع المعاملتين T-400 و T-700. ونتيجة لذلك، زادت كفاءة استخدام الماء الصافي للذرة بنسبة 52% و 74% مع المعاملتين T-400 و T-700، على التوالي.

- حسن الفحم الحيوي أيضاً إجمالي الكربون في التربة، وقدرة التبادل الكاتيوني، ومحتوى العناصر الغذائية في النبات.

الخلاصة: أدى إضافة الفحم الحيوي الناتج عن التحلل الحراري السريع من نشارة خشب الصنوبر إلى تحسين جودة التربة الصحراوية وتعزيز نمو النبات.

**6.1.III. الدراسة السادسة: الفحم الحيوي كمضاف محتمل للتربة لتحسين الخصائص الفيزيائية للتربة<sup>[6]</sup>**

Biochar as a potential soil additive for improving soil physical properties

المؤلفين وسنة النشر: Abdul-Aziz G.,...et al. 2018

الهدف: تستعرض الدراسة دور الفحم الحيوي كمضاف محتمل للتربة بهدف تحسين خصائصها الفيزيائية، مناقشة العوامل والآليات المؤثرة على أداء الفحم الحيوي في الخصائص الفيزيائية للتربة.

النتائج: أظهرت الدراسة أن خصائص الفحم الحيوي تتأثر بشكل كبير بنوع المادة الخام وظروف التحلل الحراري، مثل درجة الحرارة، مما ينعكس على فعاليته في تحسين خصائص التربة، وكما أثر كل من معدل إضافة الفحم الحيوي وحجم جزيئاته على مدى تحسين خصائص التربة، كما تفاعلت أنواع التربة المختلفة بطرق متفاوتة مع إضافة الفحم الحيوي.

الخلاصة: يظهر في هذه الدراسة أن للفحم الحيوي إمكانات واعدة كمضاف للتربة لتحسين خصائصها الفيزيائية.

**7.1.III. الدراسة السابعة: دراسة تقييم أداء السماد النانوي لإطلاق الفوسفور على قش القمح كمخلفات زراعية مستدامة<sup>[7]</sup>**

A performance evaluation study of nano-biochar as a potential slow-release nano-fertilizer from wheat straw residue for sustainable agriculture

المؤلفين وسنة النشر: Hamza Ahmad Khan, ...et al. 2021

الهدف: تطوير الفحم الحيوي النانوي الى فحم حيوي محسن ثم تطبيقه كدعامة لإطلاق المغذيات الدقيقة للنباتات.

التجربة: تم تصنيع الفحم الحيوي للقمح (WBC) والفحم الحيوي النانوي للقمح (WBNC) عن طريق الانحلال الحراري عند درجتي حرارة مختلفتين وتم دمج العناصر الغذائية في WBC عبر تقنية التثريب، وتمت تحليلات فيزيائية، وكما أجريت دراسات على احتفاظ الماء (WR) وامتصاص الماء (WA) ونسبة الانتفاخ (SR) ومحتوى الماء المتوازن (EWC) لجميع العينات.

### النتائج:

- جُمعت البيانات ومُقارنتها بالعينة الأفضل، حيث أظهرت دراسات الإطلاق البطيء نمط إطلاق العناصر الغذائية لفترات طويلة.
- أظهرت النتائج التجريبية أن الفحم الحيوي النانوي المُنتج عند درجة حرارة 350 °C أظهر خصائص واعدة (SI:0.05، SR:3.67، WA:64%، EWC:78.6%، FC:53.05%، pH:7.22)
- الخلاصة: حسن الفحم الحيوي النانوي النتائج، حيث يمكن استخدامه كسماد محتمل لتطبيقات الزراعة المستدامة والخضراء بالتالي هو صديق للبيئة.

### III.8.1. الدراسة الثامنة: تخليق مركبات الفحم الحيوي والهيدروجيل بوساطة الموجات الدقيقة لتعزيز امتصاص الماء وإطلاق النيتروجين<sup>[8]</sup>

Synthesis of microwave-mediated biochar-hydrogel composites for enhanced water absorbency and nitrogen release

المؤلفين وسنة النشر: Yudi Wu, .....et al. 2021

الهدف: استخدام طريقة جديدة لدمج الفحم الحيوي مع مواد هلامية لتحسين قدرة التربة على الاحتفاظ بالمياه وإطلاق النيتروجين بشكل أفضل.

التجربة: تم دمج الفحم الحيوي مع الهلاميات لصناعة مركب باستخدام أشعة الميكروويف، ودراسة الخصائص الفيزيائية والكيميائية لهذه المركبات، مثل وظائفها السطحية وثباتها الحراري وشكلها باستخدام تقنيات تحليلية حديثة.

النتائج: أظهرت النتائج ان استخدام أشعة الميكروويف ساعد بشكل فعال في تغيير التركيب وتحسين الترابط بين الفحم الحيوي والهلاميات، بعد 48 ساعة أظهر قدرة امتصاص مياه عالية (20.18% من المياه)، بعد 30 يومًا حسن إطلاق النيتروجين (انطلق 20.03% من المركبات).

الخلاصة: أظهرت النتائج أن مُركَّب الفحم الحيوي الهلامي المعالج بأشعة الميكروويف يعتبر إضافة واعدة للتربة.

### III.9.1. الدراسة التاسعة: تحليل مقارن للمجتمعات الميكروبية في التربة الزراعية المعدلة بفحوم حيوية محسنة أو أسمدة تقليدية<sup>[9]</sup>

Comparative analysis of the microbial communities in agricultural soil amended with enhanced biochars or traditional fertilisers

المؤلفين وسنة النشر: Shaun Nielsen, ... et al. 2014

الهدف: دراسة تأثير الفحم الحيوي على التربة الزراعية ونتاج المحاصيل.

التجربة: تم القيام بتحليل المجتمعات الميكروبية في تجربة حقلية مضبوطة قارنت تأثير الفحم الحيوي المحسن (EBs) مقابل ممارسة المزارعين (FP) للتسميد التقليدي (اليوريا والسوبر فوسفات والبوتاس) على محصول الذرة الحلوة، خلال دورات المحاصيل المتتالية (الشعير والذرة الحلوة).

تم تطبيق نوعين من الفحم الحيوي المحسن بمستويات منخفضة وعالية (إجمالي 1.1 - 5.44  $T.ha^{-1}$  على التوالي).

#### النتائج:

- تعديل الفحم الحيوي للتربة أنتج محاصيل مماثلة لمنتج المزارعين.
- أظهر تحليل الشبكة أن تطبيق الفحم الحيوي المحسن المنخفض كان له المزيد من أنماط الارتباط (التواجد المشترك والاستبعاد) بين الأصناف الميكروبية، وسلط الضوء على أهمية الارتباطات بين أعضاء شعبة الحمضيات والبكتيريا.

الخلاصة: يمكن أن يكون للفحم الحيوي تأثير إيجابي على التربة الزراعية ومنتج المحاصيل.

### III.10.1. الدراسة العاشرة: الاستخدام المشترك للموارد من رماد محطات توليد الطاقة بالكتلة الحيوية والفحم الحيوي لقمح لمعالجة التربة<sup>[10]</sup>

Combined resource utilization of ash from biomass power generation and wheat straw biochar for soil remediation

المؤلفين وسنة النشر: Xingxiu Huang, ... et al. 2024

**الهدف:** هدفت هذه الدراسة إلى تقييم تأثيرات الاستخدام المختلط لرماد النفايات الحيوية والفحم الحيوي على درجة حموضة التربة، ومعالجة المعادن الثقيلة، ونمو النبات.

**التجربة:** تم إجراء نمو النبات باستخدام عشبة الجاودار لفحص القيمة المحتملة لمزيج الرماد والفحم الحيوي لتحسين حموضة التربة وتلوث المعادن الثقيلة، تم تحضير السماد الخاص بالأرز عن طريق إضافة فوسفات ثنائي هيدروجين والأمونيوم وكلوريد البوتاسيوم واليوريا إلى الرماد والفحم الحيوي.

### النتائج:

- أظهرت النتائج أن الاستخدام المختلط للرماد والفحم الحيوي يمكن أن يحسن حمض التربة، ويقلل من امتصاص النباتات للكاديوم والرصاص بنسبة 43% و35% على التوالي، ويعزز نمو النبات.
  - أكدت نتائج تحديد العناصر الغذائية الكلية والفوسفور الذائب ونواتر النيتروجين وحجم الجزيئات أن هذا الخليط يقع ضمن نطاق تركيز الأسمدة العالية وفقاً للمعايير الوطنية للأسمدة المركبة.
- الخلاصة:** يمكن استخدام هذا السماد الخاص كسماد عالي الجودة لتعزيز نمو المحاصيل، ويؤكد البحث المتعمق في معالجة وإعادة تدوير رماد نفايات توليد الطاقة من الكتلة الحيوية على تأثيره الأساسي في تقليل التلوث البيئي الثانوي.

### 2.III. دراسات سابقة حول استغلال السليلوز في تعزيز التربة الزراعية

#### 1.2.III. الدراسة الأولى: تحقيق في امكانات استخدام السليلوز في تثبيت التربة [11]

An Investigation on the Potential of Cellulose for Soil Stabilization

المؤلفين وسنة النشر: Evangelin Ramani Sujatha, ... et al. 2022

**الهدف:** استخدام السليلوز في تعديل الخواص الجيوتقنية للتربة.

**التجربة:** أجريت تحقيقات تجريبية على طين عضوي مثبت بنسب تتراوح من 0.25% إلى 1.00% من صوديوم كاربوكسي ميثيل السيلسلوز (NaCMC).

**النتائج:** أظهرت النتائج أن:

- قوة الانضغاط غير المحصورة (UCS) للتربة المعالجة بـ 0.5% من NaCMC زادت بنسبة 76.7% بعد 28 يوماً.

- انخفضت الموصلية الهيدروليكية (HC) للتربة المعالجة بـ 0.5% من NaCMC بنسبة 91.7% بعد 28 يوماً.

- قامت الإضافات بتقليل معامل الانضغاط للتربة بنسبة 50%.

- كشف التحليل المجهرى باستخدام المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) والتحليل الكيميائي باستخدام حيود الأشعة السينية (XRD) أن تفاعل NaCMC مع التربة لم يشكل أي مركبات كيميائية جديدة، ومع ذلك، فإن الطبيعة اللزجة للمادة شكلت خيوطاً ليفية تربط التربة لتعزيز خواص الجيوتقنية.

**الخلاصة:** السيلسلوز بوليمر حيوي وفير يمكن استغلاله في تحسين التربة.

### III.2.2. الدراسة الثانية: تطبيق مصدر عضوي غني بالسليولوز يحسن جودة التربة ونمو النبات عن

طريق استقطاب الكائنات الحية الدقيقة المفيدة [12]

Application of cellulose-rich organic resource improves soil quality and plant growth by recruiting beneficial microorganisms

المؤلفين وسنة النشر: Xing Zhou, ... et al. 2025

**الهدف:**

دراسة تأثيرات تعديلات البرسيم وكاربوكسي ميثيل السليولوز على قمع مسببات الأمراض التي تنقلها التربة وتعزيز نمو النبات، ودراسة أهمية المؤشرات الحيوية المرتبطة بالموارد العضوية الغنية بالسليولوز لجودة التربة ونمو النبات.

**التجربة:** ميكروبات مريضة (D) وصحية (H) لفحص آثار تعديلات البرسيم وكاربوكسي ميثيل السليولوز على مجتمعات الميكروبات في التربة وقمع مسببات الأمراض التي تنتقل عن طريق التربة وتعزيز نمو النبات.

**النتائج:**

- أشارت النتائج إلى أن كلا التعديلين العضويين قللا بشكل كبير من الوفرة النسبية للفطريات، وعدلا الخواص الفيزيائية والكيميائية للتربة والمجتمع الميكروبي في كل من التربة المريضة والسليمة.
- زاد التعديل العضوي بشكل كبير من النشاط الميكروبي في التربة، وحفز نمو الكائنات الحية القليلة التغذية والكائنات الحية الدقيقة المعززة لنمو النبات.

- أدى تطبيق كاربوكسي ميثيل السليلوز إلى درجة أكبر من مكافحة مسببات الأمراض مقارنة بتطبيق قش البرسيم، مما أدى إلى أدنى مؤشر لوفرة مسببات الأمراض وشدة المرض في البطيخ، ولم يمنع التعديل العضوي ذبول العينة في التربة المريضة ولكنه زاد بشكل كبير من الوزن الجاف للبطيخ في التربة السليمة، بالإضافة إلى ذلك استقطب نفس التعديل العضوي نفس المؤشرات الحيوية المحددة في أنظمة التربة المختلفة، ووجد أن السليلوز كان مسؤولاً عن تكاثر المؤشرات الحيوية المثبطة للأمراض (PSBs).

- ساهمت هذه التغيرات الميكروبية في التأثيرات الإيجابية على مقاومة الأمراض ونمو البطيخ تحت تأثير التعديل العضوي الغني بالسليلوز.

**الخلاصة:** تؤكد هذه الدراسة أهمية المؤشرات الحيوية المرتبطة بالموارد العضوية بالموارد العضوية الغنية بالسليلوز لجودة التربة ونمو النبات.

**III.2.3. الدراسة الثالثة: هيدروجيلات صديقة للبيئة أساسها السليلوز مُشتقة من نفايات الورق كأسمدة ذات إطلاق مُتحكم به [13]**

Eco-friendly cellulose-based hydrogels derived from wastepapers as a controlled-release fertilizer

المؤلفين وسنة النشر: Dayang Fazirah Binyi Abg Ahmad, ... et al. 2023

**الهدف:** دراسة امكانية تحضير هيدروجيل صديق للبيئة للتحكم في إطلاق الاسمدة.

**التجربة:** تم تحضير هيدروجيل صديق للبيئة للتحكم في إطلاق الأسمدة يعتمد على السليلوز من ألياف السليلوز المشتقة من ورق النفايات، والإبيكلوروهيدرين (ECH) كعامل ربط متصالب وكاربوكسي ميثيل السليلوز (CMC) كعامل تثبيت.

**النتائج:**

- تم تحقيق أقصى قدرة على الانتفاخ بنسبة 2% لهيدروجيل السليلوز بتركيبية مثالية.
- تم تحديد محتوى رطوبة التربة في وجود هيدروجيلات السليلوز المثالية باستخدام مقياس الرطوبة الرقمي.
- بعد 7 أيام تم الحصول على أقصى رطوبة للتربة بنسبة 36.5% في الطبقة السطحية تليها 30.1% في التربة الطينية الرطبة و 23.4% في التربة الرملية.

- تم تحميل اليوريا كسماد نموذجي على هيدروجيلات السليلوز للتحكم في إطلاق الأسمدة، حيث كانت أقصى قدرة تحميل لليوريا في هيدروجيل السليلوز  $0.51 \text{ g/g}$ .
  - تركيب هيدروجيلات السليلوز يسهل الإطلاق التدريجي لليوريا، مع إطلاق حوالي 74.71% في الطبقة السطحية، و73.37% في التربة الطينية الرطبة و71.84% في التربة الرملية خلال 42 يوماً مقارنة باليوريا الحرة التي كان إطلاقها حوالي 97.32% و95.09% و98.47% في الطبقة السطحية والتربة الطينية الرطبة والتربة الرملية.
- الخلاصة:** تشير نتائج هذه الدراسة إلى أن هيدروجيل السليلوز المحمل باليوريا يمكن أن يكون سماداً واعدًا ذا إطلاق مُتحكم به.

### III.4.2. الدراسة الرابعة: ألياف النانو السليلوزية المشحونة كناقل للمغذيات في بوليمرات قابلة للتحلل لإنتاج أسمدة ذات كفاءة معززة [14]

Charged-cellulose nanofibrils as a nutrient carrier in biodegradable polymers for enhanced efficiency fertilizers

المؤلفين وسنة النشر: Débora França, ... et al. 2023

**الهدف:** تقييم استخدام ألياف النانو السليلوزية (CNF) كناقل للمغذيات ضمن مواد بوليمرية قابلة للتحلل.

#### التجربة:

- تم تعديل ألياف النانو السليلوزية بشحنات سالبة ( $CNF^-$ ) موجبة ( $CNF^+$ ) لتحسين تفاعلات المغذيات مع ألياف النانو السليلوزية وآلية تغليف المغذيات بألياف النانو السليلوزية.
- تم القيام بتغليف مغذي نترات البوتاسيوم ( $KNO_3$ ) عن طريق التجفيف بالريزاد (كبسولات دقيقة) ثم إدخاله في مادة أساسها بولي (هيدروكسي بوتيرات)/نشاء عن طريق الخلط بالصهر (أقراص).

#### النتائج:

- أظهرت خصائص إطلاق المغذيات أن الكبسولات الدقيقة أطلقت المغذيات لمدة تصل إلى ساعة واحدة في الماء، بينما أطلقت الأقراص المغذيات لمدة 8 ساعات في الماء وأكثر من 80 يوماً في التربة.
- أطلقت الأقراص التي تحتوي على ألياف النانو السليلوزية ذات الشحنة السالبة ( $CNF^-$ ) أيونات النترات ( $NO_3^-$ ) بشكل أسرع من أيونات البوتاسيوم ( $K^+$ )، بينما إطلاق الأقراص التي تحتوي على

ألياف النانو السليلوزية ذات الشحنة الموجبة ( $CNF^+$ ) بشكل عكسي، بالإضافة إلى ذلك وصلت كفاءة التحلل البيولوجي إلى 75% خلال 120 يوماً.

**الخلاصة:** أثرت شحنات ألياف النانو السليلوزية على إطلاق المغذيات وتحلل المادة الأساسية، مما يضمن أن هذه المواد غير ضارة بالبيئة.

**III.5.2. الدراسة الخامسة: تخليق مادة معدلة من السليلوز من مخلفات القش وتأثيرات تعزيز النمو على القمح [15]**

Synthesis of cellulose modified material from waste straw and the growth-promotion effects on wheat

المؤلفين وسنة النشر: Weishuai Wang, ... et al. 2021

**الهدف:** تصنيع مادة معدلة من السليلوز [كاربوكسي ميثيل سليلوز البوتاسيوم ( $CMC - K$ )] بناءً على قش القمح عن طريق طريقة القلوية والأسترة وذلك لتعزيز استخدام مخلفات القش وتحسين كفاءة المياه والأسمدة.

**التجربة:**

- تم إدخال البوتاسيوم من خلال الكربوكسي ميثيل السليلوز لتزويد المحاصيل بالعناصر الغذائية.
- تم تحديد ترتيب العوامل المؤثرة على خاصية امتصاص الماء من خلال تصميم تجريبي.

**النتائج:**

- أظهرت النتائج أن أعلى قدرة على امتصاص الماء بلغت  $196.2 g/g$  تم تحقيقها في ظل الظروف التالية: هيدروكسيد البوتاسيوم إلى السليلوز بنسبة 1.5:1، وحمض الكلوروأسيتيك إلى السليلوز بنسبة 1.5:1، وهيدروكسيد البوتاسيوم بنسبة 50%، وحمض الكلوروأسيتيك بنسبة 80%.
  - زيادة كل من محتوى النيتروجين، والنيتروجين الكلي، والبوتاسيوم الكلي، والبوتاسيوم المتاح في التربة.
- الخلاصة:**

- أشارت النتائج إلى أن المنتج أظهر قدرة ممتازة على الاحتفاظ بالماء في التربة وتقليل التسرب، حيث عزز التطبيق الزراعي لمركب  $CMC - K$  مؤشرات النمو للقمح، مما أدى إلى تحسين غلة القمح.
- شجع سلوك مركب  $CMC - K$  فيما يتعلق بكفاءة الأسمدة والاحتفاظ بالماء على استخدامه كعامل آمن للاحتفاظ بالماء والأسمدة ومحسن للتربة في التطبيقات الزراعية.

III.6.2. الدراسة السادسة: مواد هجينة من الياف النانو السليلوزية/ الفحم الحيوي المهندس كمادة طلاء قابلة للتحلل الحيوي للأسمدة الفوسفاتية بطيئة الإطلاق [16]

Cellulose Nanofibers/Engineered Biochar Hybrid Materials as Biodegradable Coating for Slow-Release Phosphate Fertilizers

المؤلفين وسنة النشر: Ihsane Kassem, ... et al. 2022

الهدف: تطوير تركيبات حيوية مصممة، مُعدّة باستخدام مواد الفحم الحيوي وألياف نانوية من السليلوز المؤكسد معبأة في ميثيل هيدروكسي إيثيل السليلوز.

التجربة:

- تم تحضير الفحم الحيوي عن طريق الانحلال الحراري المباشر للكتلة الحيوية اللجنينية السليلوزية، في حالة الفحم الحيوي المعدل.  
- تم إجراء عملية الانحلال الحراري المشترك للمونتوريلونيت (MT) والكتلة الحيوية، ثم تم تحضير أغشية النانو المركبة من تركيبات التغليف المحضرة لتقييم خصائصها من حيث البلل السطحي، وقدرة الانتفاخ، والتحلل البيولوجي في بيئة التربة.  
النتائج: أظهرت النتائج أن مواد الفحم الحيوي تقلل بشكل كبير من محبة الماء للمواد السليلوزية.

- إن إضافة المونتوريلونيت أثناء عملية الانحلال الحراري للكتلة الحيوية تؤثر على ناتج التفاعل (بزيادة قدرها 54.54%) وتعديل أيضاً البنية المسامية للفحم الحيوي، وانخفاض في قدرة الانتفاخ ومعدل تحلل أغشية السليلوز/الفحم الحيوي بعامل قدره 45.74 و 44.48%.  
- أدت مادة تغليف الفحم الحيوي المطورة إلى زيادة في قوة الانضغاط لحبيبات الأسمدة بنسبة 30.29% مقارنة بالأسمدة غير المغلفة.  
- أدت إضافة سماد حيوي (الفحم الحيوي النباتي مغلف بالسليلوز) بعد 25 يوماً إلى التربة إلى تحسين القدرة على الاحتفاظ بالماء بشكل كبير بنسبة 7.78% مع قدرة على الاحتفاظ بالماء تبلغ 3%.  
- خلال 80 يوماً من حضارة التربة أثر هذا السماد بشكل كبير على إطلاق الفوسفور في التربة مع انخفاض بنسبة 43.90% في ترشيح الفوسفور.

الخلاصة: تشير هذه النتائج إلى أن تركيبات النانو المركبة الحيوية المطورة القائمة على السليلوز مناسبة لإنتاج أسمدة فوسفاتية بطيئة الإطلاق مع تقليل ترشيح الفوسفور وخصائص توفير المياه.

III.7.2. الدراسة السابعة: كرات ميكروية جديدة منخفضة التكلفة من كربوكسي ميثيل السليلوز ذات قدرة امتصاص وإطلاق ممتازة للأسمدة في التربة القلوية المالحة [17]

Novel low-cost carboxymethyl cellulose microspheres with excellent fertilizer absorbency and release behavior for saline-alkali soil.

المؤلفين وسنة النشر: Houjuan Qi, ... et al. 2019

الهدف: إيجاد حل لنقص خصوبة التربة.

التجربة: تم تحضير أغشية دقيقة من كربوكسي ميثيل سليلوز (CFM) مثبتة مع قدرة عالية على امتصاص الماء، والقدرة على احتفاظ بالماء، وقدرة على التحلل الحيوي، وإطلاق بطيء للمغذيات.

النتائج:

- أظهرت أفضل ظروف تخليق أن CFM تم تحضيره عند درجة حموضة 7.5، ووقت تفاعل 5 ساعات، وتركيز إيبوكلوروهيدرين (Epichlorohydrin, ECH) 0.5 غرام لكل غرام من CFM المجفف، في التربة منزوعة الأيونات.
  - أظهرت سلوكيات الامتصاص والاحتفاظ بالمياه لـ CFM حساسية عالية لدرجة الحموضة وتركيز الأيونات، في محلول التربة القلوية المالحة (الرقم الهيدروجيني 9.65).
  - انخفضت قدرة امتصاص الماء لـ CFM إلى 1042.6 غرام لكل غرام، وكان معدل إطلاق البوتاسيوم ( $K^+$ ) والفسفور ( $P$ ) من CFM بطيئاً ومستداماً في المرحلة الثالثة.
  - أظهرت أغشية CFM المثبتة مقاومة جيدة لدرجة الحموضة القلوية، ومقاومة للملوحة، وقدرة على إطلاق الأسمدة في التربة القلوية المالحة.
- الخلاصة: من المرجح أن تكون أغشية CFM المثبتة واعدة لتخصيب التربة القلوية المالحة.

III.8.2. الدراسة الثامنة: مواد إطلاق بطيء مغلفة بميثيل السليلوز ومكونة من مركبات حيوية فحمية لتحسين التربة القلوية الملحية [18]

Biochar-composite methyl cellulose-coated slow-release materials for amelioration of soda saline soils

المؤلفين وسنة النشر: Shaoqi Ma, ... et al. 2025

**الهدف:** تحسين التربة الصودية الملحية لتقليل قلوية التربة مع توفير إطلاق بطيء للعناصر الغذائية الضرورية للتربة.

**التجربة:** تم تحضير حبيبات نووية للأسمدة ( $AC - PK$ ) بطريقة الخلط الرطب باستخدام ( بيروكسيد ثنائي كبريتات البوتاسيوم ) و  $Ca(H_2PO_4)_2$  (فوسفات احادي الكالسيوم ) ومسحوق القش وطين الأتابولجيت، وتم تحضير الفحم الحيوي ( $BC$ ) وميثيل السليلوز ( $MC$ ) وألجينات الصوديوم ( $SA$ ) عن طريق التحلل الحراري للقش كمادة تغليف، وتم تحضير ايضا حبيبات التربة ذات الإطلاق البطيء من حبيبات الأسمدة بطريقة التغليف بالتشريب بـ  $CaCl_2$  واستخدمت المواد المحضرة أيضاً لتحسين التربة الصودية الملحية لتقليل قلوية التربة مع توفير إطلاق بطيء للعناصر الغذائية الضرورية للتربة وكانت المواد المغلفة صديقة للبيئة، وتم توصيف خصائص وتركيب المواد المركبة باستخدام تقنيات متنوعة (FTIR,SEM).

### النتائج:

- أظهرت النتائج أن الحبيبات النووية لم تتفكك في الماء بالتحميمص.
  - انخفاض الرقم الهيدروجيني للتربة من 9.34 إلى 7.63 في التربة الصودية الملحية المحاكاة عند النسبة المثالية للمادة المركبة للفيلم.
  - بعد تشريب الفيلم كان المعدل التراكمي لإطلاق العناصر الغذائية 12% في بداية فترة إطلاق العناصر الغذائية، و بعد 28 يوماً كان المعدل التراكمي لإطلاق العناصر الغذائية هو 73.1%، مع تغير في نمط انخفاض الرقم الهيدروجيني.
- الخلاصة:** المركب المصنع يمكن أن يكون حلاً واعدًا لتحسين جودة التربة من خلال تحسين معدل استخدام العناصر الغذائية، وتحسين التربة الصودية الملحية وتعزيز بذور الذرة.

**III.9.2. الدراسة التاسعة: قدرة الذرة على الصمود في مواجهة ضغوط الجفاف: التأثير التآزري للفحم الحيوي المنزوع الرماد وتعديل الكربوكسي ميثيل السليلوز [19]**

Enhancing maize resilience to drought stress: the synergistic impact of deashed biochar and carboxymethyl cellulose amendment

المؤلفين وسنة النشر: Subhan Danish, ... et al. 2024

**الهدف:** التحقيق في تأثيرات الفحم الحيوي المتحلل (DAB) وكربوكسي ميثيل السليلسوز (CMC) على الذرة.

**التجربة:** تم تطبيق 6 معاملات مختلفة في هذه الدراسة وهي:

(0DAB + 0CMC, 25 CMC, 0.5 DAB, 0.5 DAB + 25 CMC, 1 DAB, 1 DAB + 25 CMC)

تم ترتيب هذه المعاملات وفقاً لتصميم عشوائي مع 6 تكرارات لكل معاملة.

**النتائج:**

- المعاملة 1 DAB + 25 CMC أحدثت تحسناً كبيراً في الوزن الطازج للساق (24.53%)، والوزن الجاف للساق (38.47%)، وطول الساق (32.23%)، والوزن الجاف للجذر (87.50%)، وطول الجذر (69.80%) في الذرة تحت الاجهاد الناتج عن الجفاف، وظهرت زيادة كبيرة في كلوروفيل الذرة (40.26%)، وكلوروفيل ب (26.92%)، وكلوروفيل الكلي (30.56%)، ومعدل النتج (23.61%)، والتوصيل الثغري (91.57%).

- كما عززت الزيادة في تراكيز النيتروجين والفوسفور والبوتاسيوم في كل من الجذور والساق. **الخلاصة:** يوصى باستخدام 1 DAB + 25 CMC لأنه مفيد للتخفيف من الاجهاد الناتج عن الجفاف في الذرة.

**III.10.2.10. الدراسة العاشرة: دمج السليلوز المعاد تدويره مع هيدروكسيدات مزدوجة نانوية سميكة ذات طبقات زهرية: سماد بطيء الإطلاق يحتفظ بالماء من الكتلة الحيوية للزراعة المستدامة<sup>[20]</sup>**

Combination of recycled cellulose with nano-thick flower layered double hydroxides: Biomass water retention slow-release fertilizer for sustainable agriculture

المؤلفين وسنة النشر: Feng Zhang, ... et al. 2024

**الهدف:** تقييم نوع من الهيدروكسيدات المزدوجة النانوية السميكة ذات الطبقات الزهرية (nLDHs) لامتصاص فعال ومؤثر للمبيدات الحشرية.

**التجربة:**

- إنشاء نوع من هيدروكسيدات مزدوجة الطبقات الزهرية النانوية (nLDHs) لامتصاص المبيدات الحشرية بسرعة وفعالية باستخدام تحريض السيكلوديكترين (CD)، بعد ذلك، تم تركيبه مع السليلوز المعاد تدويره (PCe) المشتق من الكتلة الحيوية للنفايات (قشر البوميلو).
  - تم تصنيع سماد هيدروجيل جديد بطيء الإطلاق (N@nLDHs/PCe-PAA) من خلال البلمرة التوعيمية لحمض الأكرليك (AA)، والذي تم استخدامه بعد ذلك كحامل للمغذيات (اليوريا) في مركب nLDHs/PCe.
  - تم تقييم قدرات السماد بطيء الإطلاق على الانتفاخ والاحتفاظ بالماء والبطء في الإطلاق. بالإضافة إلى ذلك، أجريت اختبارات زراعة المحاصيل على المادة للتأكد من استخدامها المحتمل في الزراعة المستدامة.
- النتائج:** أظهرت النتائج أن N@nLDHs/PCe-PAA أظهر معدل انتفاخ بلغ 197.02 g/g في 600 دقيقة، ومعدل احتفاظ بالماء بلغ 21.02% في التربة عند 60 يومًا، ومعدل إطلاق مغذيات بلغ 68.78% في التربة عند 60 يومًا، وأظهرت تجربة زراعة المحاصيل أن N@nLDHs/CPE-PAA أظهر تأثيرًا واضحًا في تعزيز نمو النبات، مما قد يحسن نظام الجذر والكلوروفيل والمحتوى المائي النسبي في أوراق النباتات.
- الخلاصة:** إن هذا السماد الهيدروجيلي المبتكر بطيء الإطلاق (N@nLDHs/PCe-PAA) لا يعزز فقط استتساخ الموارد، بل يتمتع أيضًا باحتفاظ ممتاز بمياه التربة، وخصائص إطلاق مغذيات بطيئة، ووظيفة تعزيز نمو النبات، وله قيمة كبيرة في تعزيز التنمية المستدامة للزراعة.

## المراجع

- [1] H. Zheng, Z. Wang, X. Deng, S. Herbert, and B. Xing, "Impacts of adding biochar on nitrogen retention and bioavailability in agricultural soil," *Geoderma*, vol. 206, pp. 32-39, 2013.
- [2] D. A. Laird, P. Fleming, D. D. Davis, R. Horton, B. Wang, and D. L. Karlen, "Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil," *Geoderma*, vol. 158, no. 3-4, pp. 443-449, 2010.
- [3] B. Glaser and V.-I. Lehr, "Biochar effects on phosphorus availability in agricultural soils: A meta-analysis," *Scientific reports*, vol. 9, no. 1, p. 9338, 2019.
- [4] D. Rehrach *et al.*, "Production and characterization of biochars from agricultural by-products for use in soil quality enhancement," *Journal of analytical and applied pyrolysis*, vol. 108, pp. 301-309, 2014.
- [5] M. Laghari, Z. Hu, M. S. Mirjat, B. Xiao, A. A. Tagar, and M. Hu, "Fast pyrolysis biochar from sawdust improves the quality of desert soils and enhances plant growth," *Journal of the Science of Food and Agriculture*, vol. 96, no. 1, pp. 199-206, 2016.
- [6] A. G. Alghamdi, "Biochar as a potential soil additive for improving soil physical properties—a review," *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 11, no. 24, p. 766, 2018.
- [7] H. A. Khan *et al.*, "A performance evaluation study of nano-biochar as a potential slow-release nano-fertilizer from wheat straw residue for sustainable agriculture," *Chemosphere*, vol. 285, p. 131382, 2021.
- [8] Y. Wu, C. Brickler, S. Li, and G. Chen, "Synthesis of microwave-mediated biochar-hydrogel composites for enhanced water absorbency and nitrogen release," *Polymer Testing*, vol. 93, p. 106996, 2021.
- [9] S. Nielsen *et al.*, "Comparative analysis of the microbial communities in agricultural soil amended with enhanced biochars or traditional fertilisers," *Agriculture, ecosystems & environment*, vol. 191, pp. 73-82, 2014.
- [10] X. Huang *et al.*, "Combined resource utilization of ash from biomass power generation and wheat straw biochar for soil remediation," *Applied Soil Ecology*, vol. 193, p. 105150, 2024.
- [11] E. R. Sujatha and G. Kannan, "An investigation on the potential of cellulose for soil stabilization," *Sustainability*, vol. 14, no. 23, p. 16277, 2022.

- [12] X. Zhou *et al.*, "Application of cellulose-rich organic resource improves soil quality and plant growth by recruiting beneficial microorganisms," *Applied Soil Ecology*, vol. 207, p. 105909, 2025.
- [13] D. F. B. A. Ahmad, M. E. Wasli, C. S. Y. Tan, Z. Musa, and S.-F. Chin, "Eco-friendly cellulose-based hydrogels derived from wastepapers as a controlled-release fertilizer," *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, vol. 10, no. 1, p. 36, 2023.
- [14] D. Fran a, G. Siqueira, G. Nystr  m, F. Clemens, C. F. Souza, and R. Faez, "Charged-cellulose nanofibrils as a nutrient carrier in biodegradable polymers for enhanced efficiency fertilizers," *Carbohydrate Polymers*, vol. 296, p. 119934, 2022.
- [15] W. Wang, S. Yang, Z. Yang, and A. Zhang, "Synthesis of cellulose modified material from waste straw and the growth-promotion effects on wheat," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 9, no. 6, p. 106454, 2021.
- [16] I. Kassem, E. Ablouh, and F. El Bouchtaoui, "Cellulose nanofibers/engineered biochar hybrid materials as biodegradable coating for slow-release phosphate fertilizers. ACS Sustain Chem Eng 10: 15250–15 ",262ed, 2022.
- [17] H. Qi *et al.*, "Novel low-cost carboxymethyl cellulose microspheres with excellent fertilizer absorbency and release behavior for saline-alkali soil," *International journal of biological macromolecules*, vol. 131, pp. 412-419, 2019.
- [18] S. Ma, Q. Zhu, S. Zhang, and J. Zhen, "Biochar-composite methyl cellulose-coated slow-release materials for amelioration of soda saline soils," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 13, no. 2, p. 116003, 2025.
- [19] S. Danish *et al.*, "Enhancing maize resilience to drought stress: the synergistic impact of deashed biochar and carboxymethyl cellulose amendment," *BMC Plant Biology*, vol. 24, no. 1, p. 139, 2024.
- [20] F. Zhang *et al.*, "Combination of recycled cellulose with nano-thick flower layered double hydroxides: Biomass water retention slow-release fertilizer for sustainable agriculture," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 702, p. 135144, 2024.

الفصل الرابع :  
البراهين

الفصل الخامس :  
العملية

النتائج /  
والمناقشة

في هذا العمل، قمنا باستغلال مخلفات عضوية غنية بالسليولوز وتحضير الفحم الحيوي انطلاقاً من مخلفات الكتلة الحيوية، وذلك بهدف تعزيز دعامة التربة الزراعية وإعادة تدوير المخلفات، حيث تساهم هذه العملية في تحسين الخصوبة، زيادة قدرة الاحتفاظ بالماء، وتقليل فقدان العناصر الغذائية، حيث استخدمت تقنيات طيفية تحليلية مثل: الأشعة فوق البنفسجية والمرئية (UV-Vis) لتحديد التغيرات في المركبات العضوية، ومطيافية الأشعة تحت الحمراء بتحويل فورييه (FTIR) لتحديد المجموعات الوظيفية، بالإضافة إلى استخدام مطياف الامتصاص الذري بالهيب الكهربيائي (GFAAS) للكشف عن تركيزات منخفضة جداً من المعادن، حيث تم إجراء مختلف التحاليل في كل من المخبر البيداغوجي بكلية التكنولوجيا والعلوم الدقيقة ومخبر البحث بوحدة تطوير الطاقات المتجددة في المناطق القاحلة بجامعة الشهيد حمه لخضر بالوادي، وتهدف هذه التحاليل إلى فهم مدى فعالية المخلفات الحيوية والفحم الحيوي في تحسين خصائص التربة.

#### 1.VI. المواد والأدوات

تم في هذا العمل الاعتماد على مواد أولية بسيطة ومتوفرة، بحيث أغلبها من مصادر طبيعية أو بقايا عضوية، وذلك بهدف إعادة التدوير واستغلال الموارد العضوية المتاحة بطريقه بيئية واقتصادية، وتتمثل هذه المواد فيما يلي:

##### 1.1.VI. المواد المستخدمة

قشور الكوكاو (*Arachis*)، التربة شبه الحضرية، البذور المستعملة: الفول (*Vicia faba*)، الحمص (*Cicer arietinum*) والبازلاء (*Pisum sativum*)، ومحلول منشط حيوي عضوي.



الشكل (1.VI): قشور الكوكاو.

## 2.1.VI. الأدوات

آلة طحن كهربائية، ميزان حساس، أنابيب اختبار (Tubes essai)، حامل الأنابيب، قمع، ورق الترشيح (Papier a filtre)، ملعقة (Spatule)، قوارير زجاجية سعة 30 ml، وعلب بلاستيك ذات السعة 250g.

## 2.VI. خطوات العمل

تم انجاز هذا العمل من خلال القيام بعدة خطوات، والتي ساعدت في تطبيق فكرة العمل، وهي كما يلي:

- **الخطوة الأولى:** مرحلة جمع وتحضير العينات.

تم الحصول على قشور الكوكاو (الفول السوداني) من عملية التقشير للثمار، وبعد ذلك تم تنظيفها من الشوائب بواسطة الماء المقطر لضمان خلوها من الملوثات الخارجية، وبعد ذلك تم تركها في غرفة مهواة بعيدا عن الرطوبة وأشعة الشمس في درجة حرارة الغرفة لإتمام عملية التجفيف الطبيعي، وبعد التجفيف تم تصنيف القشور وتحويلها الى ثلاثة اشكال مختلفة كما هي موضحة في الشكل (2.VI):

1. قشور مفتتة (C).

2. قشور مطحونة (G).

3. قشور محروقة (A).



قشور محروقة (AA)



قشور مطحونة (AG)



قشور مفتتة (AC)

**الشكل (2.VI):** أشكال قشور الكوكاو.

- **الخطوة الثانية:** تحضير السماد.

تم تحضير السماد العضوي انطلاقا من خلط التربة مع قشور الكوكاو (المحروقة A، والمفتتة C، والمطحونة G) بشكل منفصل، وذلك بهدف اختبار تأثير كل نوع على التربة والنباتات المزروعة (الفول F والحمص C والبازلاء P)، كما يلي:

- تم خلط 50g من تربة الزرع مع 50g من كل نوع من القشور (محروقة، مفتتة أو مرحية).
  - إضافة كمية مناسبة من الماء إلى الخليط لتسهيل عملية الدمج (الخلط) مع ضمان تفاعل المكونات.
  - بعد الخلط الجيد قمنا بحفظها في علب في الظلام لتتخمر لمدة ثلاثة أو أربعة أيام.
  - تم أخذ 10g من كل نوع من السماد المحضر وحفظه في الثلاجة للتحميل لاحقاً.
- وبعد التخمر تم الحصول على مختلف أنواع السماد كما هي مبينة في الشكل (3.VI).



سماد مفتت (AC)



سماد مطحون (AG)



سماد محروق (AA)

الشكل (3.VI): سماد قشور الكوكاو.



الشكل (4.VI): تحضير السماد.

- الخطوة الثالثة: مرحلة الزرع.
- بعد الانتهاء من تحضير السماد والتربة تم الانتقال إلى مرحلة الزرع، وفي هذه المرحلة تم تجهيز العلب الخاصة بالزرع، بحيث استخدمنا علب بلاستيكية مغلقة بالأسود ذات السعة 250g لكل تجربة مع وضع رمز لكل علب كما هو موضح في الشكل (5.VI)، وتم اتباع الخطوات التالية:
- تم وضع 2 إلى 3 cm من التربة أسفل كل علب.

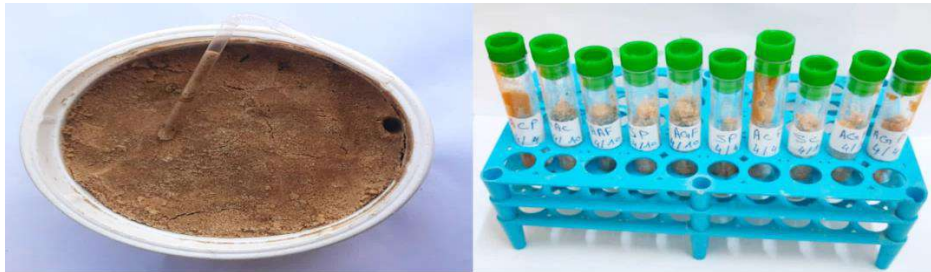
- أضيفت 20g من مختلف أنواع السماد المحضر فوق طبقة التربة.
- بعد ذلك تم ملء العلبة بالتربة تقريبا، مع ترك فراغ أعلى العلب لتجنب تسرب الماء عند السقي.
- وفي الأخير تم غرس البذور (حمص، الفول والبازلاء) في العلب المحضرة على عمق يتراوح بين 2 الى 3 cm داخل التربة، مع اعتماد ترميز لكل علبة لتمييز النباتات والسماد كما هو موضح في **الجدول (1.VI)**.

تم الاعتماد على نفس الطريقة في جميع العينات لضمان توحيد ظروف التجربة ومقارنة نتائج الانبات لاحقا بدقة.



**الشكل (5.VI):** اختصار علبة الزرع لمخلف الكوكاو المفتت لنبات البازلاء (ACP).

- **الخطوة الرابعة: السقي.**
- في هذه المرحلة تمت علمية السقي بانتظام لجميع العينات المزروعة بواسطة محلول عضوي حيوي.
- **الخطوة الاخيرة: مرحلة جمع عينات التحليل.**
- في هذه المرحلة تمت متابعة تطور النباتات من خلال أخذ عينات من التربة بشكل منتظم مرة كل شهر، ومراقبة نمو النباتات بشكل دوري، وقد تم اتباع الإجراءات التالية:
- أخذ العينات: تم اخذ العينات من التربة من كل علبة باستخدام مصاصة كما هو موضح في **الشكل (6.VI)**، وذلك من خلال إدخال الانبوب إلى قاع العلبة لاستخراج العينة، وتحفظ في انابيب اختبار مع الترميز وتاريخ العينة وتحفظ في الثلاجة لوقت التحليل.



اخذ عينة بالماصه

حفظ في أنابيب الاختبار

**الشكل (6.VI):** أخذ وحفظ العينات.

1. قياس نمو النبات: تم استخدام مسطرة مدرجة لقياس ارتفاع الساق وطول الأوراق بشكل دقيق، وذلك لمتابعة تطور النباتات ودراسة تأثير السماد المضاف.
2. التوثيق والتصوير: تم تصوير النباتات في كل مرحلة من مراحل النمو، وذلك بهدف توثيق التغيرات الحاصلة لمختلف النباتات وتطورها بمرور الوقت.

**الجدول (1.VI): الترميز لكل عينة من النبات.**

الاختصار	البذور	التربة	حالة المخلف
SF	فول	بدون معالجة	بدون مخلف
SC	حمص	بدون معالجة	بدون مخلف
SP	جلبانة	بدون معالجة	بدون مخلف
ACF	فول	معالجة	مفتت
AGF	فول	معالجة	مرحي
AAF	فول	معالجة	محروق
ACC	حمص	معالجة	مفتت
AGC	حمص	معالجة	مرحي
AAC	حمص	معالجة	محروق
ACP	جلبانة	معالجة	مفتت
AGP	جلبانة	معالجة	مرحي
AAP	جلبانة	معالجة	محروق

**3.VI. تقنيات التحليل والتوصيف**

**1.3.VI. مطيافية تحويل فورييه للأشعة تحت الحمراء ( Fourier Transform Infrared Spectroscopy )**

**تعريف:** FTIR هي تقنية مهمة توفر طريقة سهلة لتحديد وجود مجموعات وظيفية معينة في جزيء عضوي، للمجموعات الوظيفية ترددات اهتزازية مميزة لها، عند تمرير إشارة الأشعة تحت الحمراء عبر المركب العضوي يتسبب في اهتزاز المجموعات الوظيفية بترددات محددة (**أنظر الملحق I**)، أين سيتم امتصاص إشارة الأشعة تحت الحمراء التي تمر عبر المركب، والتي يمكن تحويلها إلى طيف<sup>[1]</sup>.



**الشكل (7.VI):** جهاز مطيافية تحويل فورييه بالأشعة تحت الحمراء (FTIR).

**طريقة العمل:** تم أخذ عينات القشور المحفوظة سابقاً من الأسمدة على الشكل مسحوق والمحروق، وتم تحليلها باستخدام تقنية FTIR بهدف تحديد الوظائف العضوية الموجودة في المادة المحللة.

### 2.3.VI. مطيافية الأشعة فوق البنفسجية (UV spectrometer)

**تعريف:** هي تقنية تحليلية سريعة تقيس امتصاص أو نفاذية الضوء<sup>[2]</sup>، على الرغم من أن نطاق الطول الموجي للأشعة يتراوح بين 380-100 نانومتر، ويمتد الجزء المرئي حتى 800 نانومتر<sup>[3]</sup>، وتوجه أجهزة القياس مصدر ضوء عبر العينة، ويسجل كاشف على الجانب المقابل الضوء النافذ، وعادة ما تحتوي الرسوم البيانية (الطيف) على خط الأساس في الأسفل مع قمم تشير إلى الأعلى، وهي تعرض الطول الموجي بوحدة النانومتر (nm) بدلالة الامتصاصية (A)، ويمثل النفاذية مقدار الضوء الممتص عند كل طول موجي، تعتمد UV-vis على الانتقالات الإلكترونية للجزيئات العضوية التي تمتص الضوء، مما يؤدي إلى إثارة الإلكترونات، و مبدأ<sup>[4]</sup> Beer-lambert والذي يعرف بالعلاقة التالية:

$$A = \log(I_0/I) = \epsilon \cdot l \cdot C$$

حيث:

A : امتصاص الضوء،  $I_0$  : شدة الضوء الساقط، I : شدة الضوء المنقول بواسطة محلول العينة.

$\epsilon$  : معامل الامتصاص المولي، l : قيمة تتناسب طردياً مع طول المسار عبر العينة، C : التركيز.



الشكل (8.VI): جهاز مطياف الأشعة فوق البنفسجية والمرئية.

**طريقة العمل:** تم استعمال العينات المحفوظة في الثلاجة من التربة (لكل شهر) والسماذ، حيث تم حلها في الماء المقطر ورجها جيدا، ثم ترشيحها للحصول على محلول صاف، بعد ذلك تم تحليل الراشح باستخدام جهاز UV-Vis.

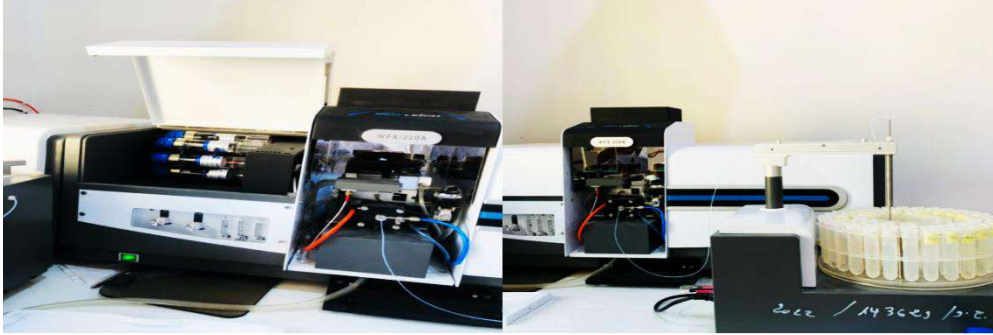


الشكل (9.VI): تحضير العينة للأشعة فوق البنفسجية UV

### 3.3.VI التحليل الطيفي لامتصاص الذري باستخدام فرن الجرافيت ( Graphite Furnace Atomic Absorption Analytical Spectroscopy)

**تعريف:** يعد مطياف الامتصاص الذري (AAS) أحد أكثر التقنيات استخداماً للأغراض التحليلية<sup>[5]</sup>، وقد استخدم على نطاق واسع في مختبرات الأبحاث وكذلك في قطاعات الأغذية والبيئة والصناعات الدوائية وغيرها<sup>[6]</sup>، من أبرز أنظمتها وأكثرها دقة نظام الامتصاص الذري باستخدام فرن الجرافيت (GFAAS)، حيث توضع العينة في أنبوب جرافيت مجوف يسخن حتى تتبخر العينة تماماً. يعتبر نظام GFAAS أكثر حساسية بكثير من نظام الامتصاص الذري باللهب (FAAS) ويمكنه الكشف عن تراكيزات منخفضة جداً من المعادن (أقل من 1 جزء في البليون) في العينات، يضمن استخدام الكهرباء لتسخين أنبوب الجرافيت الضيق تدرية جميع أجزاء العينة في فترة تتراوح من بضعة أجزاء من الألف من الثانية إلى بضع ثوانٍ، ثم يقاس امتصاص البخار الذري في المنطقة الواقعة مباشرة فوق السطح الساخن

وبطبيعة الحال، لا يتعين على وحدة الكشف التعامل مع الضوضاء الطيفية، مما يؤدي إلى تحسين الحساسية<sup>[17]</sup>.



**الشكل (10.VI):** جهاز التحليل الطيفي للامتصاص الذري باستخدام فرن الجرافيت.

**طريقة العمل:**

- تم تحضير عينات التربة المحفوظة مسبقاً في الثلاجة، حيث تأخذ كمية صغيرة من كل عينة، ويضاف إليها 30 مل من الماء المقطر، ثم ترج جيداً لضمان تجانس المزيج بعد ذلك، تتم عملية الترشيح، بعدها تم يحفظ المحلول المرشح في قوارير زجاجية بسعة 30 مل في الثلاجة إلى حين موعد تحليلها.
- في مرحلة التحليل، تم نقل العينات إلى المخبر، حيث تم استخدام جهاز GFAAS، حيث يمكن هذا الجهاز من تحديد تركيز المعادن (الزنك والحديد) الذائبة الموجودة في العينات بدقة عالية.

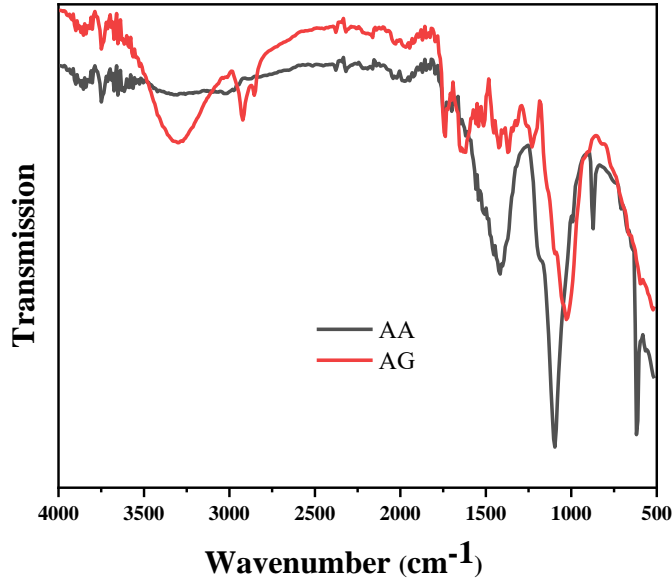


**الشكل (11.VI):** تحضير العينة لقياس تراكيز (زنك والحديد) بالامتصاص الذري.

## 4.VI. النتائج والمناقشة

## 1.4.VI. مطيافية الأشعة تحت الحمراء لقصور الكاوكا

يكشف طيف FTIR للقصور المطحونة (AG) عن نطاقات امتصاص مميزة تعكس التركيب الكيميائي للقصور، تعزى الذروة الواسعة بين 3200-3600  $\text{cm}^{-1}$  إلى اهتزازات تمدد O-H، مما يدل على وجود مجموعات الهيدروكسيل الموجودة عادة في السليلوز واللجنين، بالإضافة إلى ذلك تتوافق اهتزازات تمدد C-H حول 2800-3000  $\text{cm}^{-1}$  مع مجموعات الألكيل (الميثيل والميثيلين)، الشائعة في التركيب اللجنوسيلولوزي لقصور الفول السوداني، تظهر ذروة في حوالي 1750  $\text{cm}^{-1}$ ، مما يدل على تمدد C=O، مما يشير إلى وجود مجموعات الكربونيل في مشتقات الإستر أو اللجنين، تتوافق المنطقة 1500-1600  $\text{cm}^{-1}$  مع تمدد C=C، وهو امتصاص مميز للحلقات العطرية، يوجد عادة في اللجنين أو المركبات الفينولية، علاوة على ذلك، ترتبط المنطقة 1000-1100  $\text{cm}^{-1}$  بتمدد C-O في السليلوز أو الهيميسليلوز أو اللجنين، يعكس أيضا النطاق 600-800  $\text{cm}^{-1}$  اهتزازات انحناء C-H للمركبات العطرية، مما يدل على وجود اللجنين، وهذا ما يتوافق مع<sup>[8]</sup>، في المقابل، يظهر طيف FTIR للقصور (AA) تغيرات ملحوظة بسبب التحلل الحراري والكربنة، حيث لاحظنا انخفاض القمم المقابلة لمجموعات الهيدروكسيل (O-H) والكربونيل (C=O) في نطاق 3200-3600  $\text{cm}^{-1}$  و 1750  $\text{cm}^{-1}$ ، على التوالي، بشكل كبير أو غائبة تماما بسبب تحلل المكونات العضوية أثناء الاحتراق. قد تشتد أو تتزاح الامتصاصات المحيطة بـ 1500-1600  $\text{cm}^{-1}$ ، المرتبطة بتمدد C=C، مما يعكس تكون الهيدروكربونات العطرية متعددة الحلقات (PAHs) من الاحتراق غير الكامل، كما تتخفف شدة اهتزازات تمدد C-H حول 2800-3000  $\text{cm}^{-1}$ ، نتيجة فقدان المركبات العضوية المتطايرة أثناء عملية الاحتراق، قد تظهر قمم جديدة في المنطقة 500-600  $\text{cm}^{-1}$  بسبب تكون الفحم وبقايا غنية بالكربون، وهي ناتجة عن المعالجة الحرارية، علاوة على ذلك يمكن أن تظهر قمم امتصاص جديدة حول 1100  $\text{cm}^{-1}$ ، مما يشير إلى اهتزازات مرتبطة بروابط Si-O أو روابط معدنية، في حال وجود أملاح معدنية (من عملية الاحتراق) وهذا يتوافق تقريبا مع ما نشر سابقا<sup>[9]</sup>، حيث تكمن الاختلافات الرئيسية بين الطيفين في وجود المجموعات الوظيفية ومدى الكربنة، وتظهر القصور المطحونة قمم مجموعات وظيفية مميزة تمثل المكونات العضوية المعقدة مثل السليلوز والهيميسليلوز واللجنين، في حين تظهر القصور المحروقة طيفاً أبسط، يتميز بانخفاض المجموعات الوظيفية وظهور بقايا قائمة على الكربون وربما هياكل عطرية بسبب عملية الاحتراق.



الشكل (12.VI): منحنى أطياف FTIR لمخلف الكوكاو المحروق (AA)، المطحون (AG).

#### 2.4.VI. تحليل نمو النبات

قمنا بمتابعة تطور نمو مختلف النباتات من خلال شكل النبات باتباع طريقتين: قمنا بالتقاط صور لمختلف النباتات (البازلاء، الفول، الحمص) في فترات زمنية مختلفة، والثانية من خلال أخذ القياسات للساق والأوراق لكل نبات.

#### 1.2.4.VI. نبات البازلاء

يوضح الشكل (13.VI) والجدول (2.VI و 3) متابعة تطور نمو نبات البازلاء من خلال التقاط الصور وطول الساق والأوراق.



الشكل (13.VI): تطور نمو نباتات البازلاء في التربة المعالجة والعادية.

الجدول (2.VI): قياسات طول الساق لنبات البازلاء.

العينة الزمن	الشاهد SP	سماد مفتت ACP	سماد مطحون AGP	سماد محروق AAP
بداية الانبات	0.3	0.3	0.3	0.3
الأسبوع الأول	2.6	2.1	1.6	2
الأسبوع الثاني	6.1	6.1	5.7	6.2
الأسبوع الثالث	16	13	14	17
الأسبوع الرابع	27	20	24	26

الجدول (3.VI): قياسات طول الأوراق لنبات البازلاء.

العينة الزمن	الشاهد SP	سماد مفتت ACP	سماد مطحون AGP	سماد محروق AAP
الأسبوع الأول	0.7	0.5	0.3	0.5
الأسبوع الثاني	1.3	1.1	0.8	1.6
الأسبوع الثالث	1.6	1.5	1.1	2
الأسبوع الرابع	2.1	2.3	2.1	2.2

يظهر الشكل (13.VI) والجدول (2.VI و3) نمو نبات البازلاء في تجربة لتقييم تأثير الأسمدة القائمة على قشور الفول السوداني على تحسين التربة الزراعية، توضح النتائج المرئية عبر مراحل النمو اختلافات واضحة، حيث تظهر العينة الشاهد (SP) نمو متوسط مع أوراق أقل وتفرعات أكثر للساق، بينما تظهر العينة ACP نمواً أفضل قليلاً، مع أوراق كثيفة وأقل تفرع للساق، بينما أظهرت العينة AGP مزيداً من التحسن، مع شتلات أطول وأكثر كثافة للأوراق، مما يدل على توفر أفضل للمغذيات، يظهر AAP نمو أكثر وضوحاً، مع ساق طويلة وأوراق أوفر ويشير هذا إلى أن قشور الكاوكاو المحروقة توفر التعزيز الأكثر فعالية للتربة، ويرجع ذلك على الأرجح إلى زيادة إطلاق العناصر الغذائية من التحلل الحراري، تليها العينة AGP ثم ACP، أخيراً SP.

#### 2.2.4.VI. نبات الفول

يوضح الشكل (14.VI) والجدول (4.VI و5) متابعة تطور نمو نبات الفول من خلال التقاط الصور وطول الساق والأوراق، ومن خلال متابعة نمو نبات الفول عبر مراحل متعددة، وتظهر مختلف العينات في البداية نبات كثيف الأوراق وساق متينة ماعدا العينة AAF، في الأسابيع الأخيرة، يظهر ACF نمواً ضعيفاً وارتفاع وكثافة أوراق محدودة، بينما يظهر AGF نمواً أفضل، مع نباتات أطول وأكثر كثافة للأوراق، يعود هذا إلى زيادة توفر العناصر الغذائية، و في حين يظهر AAF نمو جيد، وساق أطول ، يشير هذا إلى أن قشور المحروقة هي التعديل الأكثر فعالية للأسمدة، ويرجع ذلك على الأرجح إلى زيادة إطلاق العناصر الغذائية تليها AGF.

الزمن	التربة العادية SF	سماد مفقوت ACF	سماد مطحون AGF	سماد محروق AAF
يوم الزرع				
يوم الانبات				
الأسبوع الأول بعد الانبات				
بعد الأسبوع الثاني بعد الانبات				
الأسبوع الثالث بعد الانبات				

الشكل (14.VI): تطور نمو نبات الفول في التربة المعالجة والعادية.

الجدول (4.VI): قياسات طول الساق لنبات الفول.

العينة الزمن	الشاهد SF	سماد مفتت ACF	سماد مطحون AGF	سماد محروق AAF
بداية الانبات	0.8	0.9	0.6	1.2
الأسبوع الأول	5.5	7.3	7.8	9.8
الأسبوع الثاني	14.2	13.5	16.5	17.3
الأسبوع الثالث	28	20	30	30
الأسبوع الرابع	36	30	38	48

الجدول (5.VI): قياسات طول الأوراق لنبات الفول.

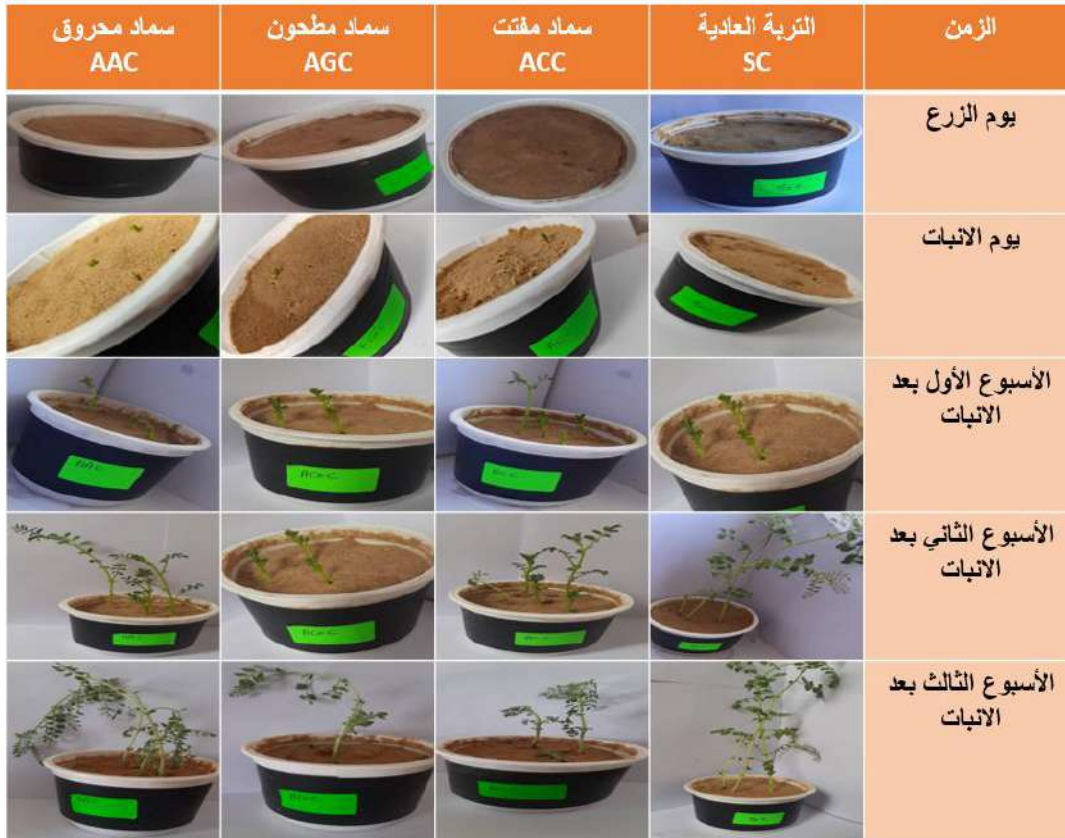
العينة الزمن	الشاهد SF	سماد مفتت ACF	سماد مطحون AGF	سماد محروق AAF
الأسبوع الأول	2.1	2	2	1.3
الأسبوع الثاني	3.5	3.3	3.8	3.5
الأسبوع الثالث	4.3	4.7	4.3	5
الأسبوع الرابع	5	5.5	5	7.4

#### 3.2.4.VI. نبات الحمص

يوضح الشكل (15.VI) والجدول (6.VI و7) متابعة تطور نمو نبات الحمص من خلال التقاط الصور وطول الساق والأوراق، ومن خلال متابعة نمو نبات الفول عبر مراحل متعددة.

الجدول (6.VI): قياسات طول الساق لنبات الحمص.

العينة الزمن	الشاهد SC	سماد مفتت ACC	سماد مطحون AGC	سماد محروق AAC
بداية الانبات	0.2	0.6	0.4	0.5
الأسبوع الأول	4	4.5	3.2	4.1
الأسبوع الثاني	17	11.2	5.8	15.5
الأسبوع الثالث	32	11.3	22.2	35
الأسبوع الرابع	43.1	20	30	45



الشكل (15.VI): تطور نمو نبات الحمص في التربة المعالجة والعادية.

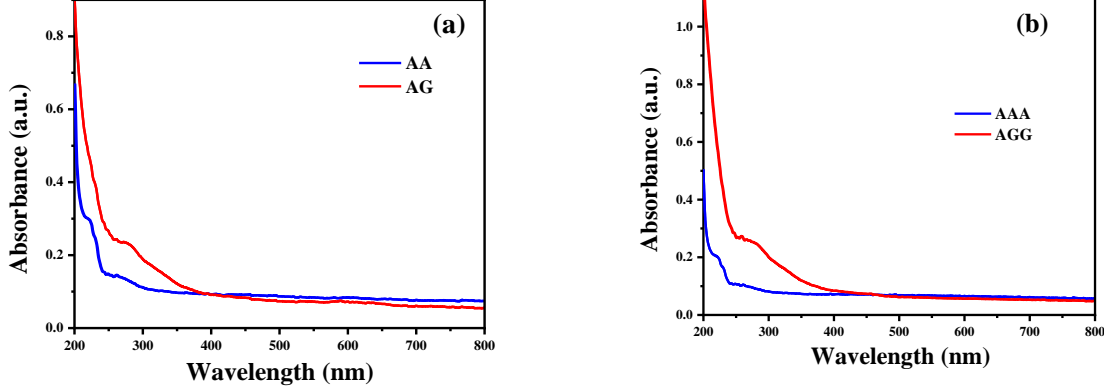
الجدول (7.VI): قياسات طول الأوراق لنبات الحمص.

سماد محروق AAC	سماد مطحون AGC	سماد مفتت ACC	الشاهد SC	العينة الزمن
0.4	0.3	0.3	0.6	الأسبوع الأول
0.8	0.6	0.8	1.3	الأسبوع الثاني
1	0.8	0.8	1.5	الأسبوع الثالث
1.3	1	0.9	1.7	الأسبوع الرابع

يظهر الشكل (15.VI) والجدول (7.VI و 6.VI) الصورة نمو نبات الحمص، حيث نلاحظ أضعف نمو للعينة AAC في المراحل الأولى، في الأسابيع الأخيرة، تظهر العينة AAC أقوى نمو، مع أطول ساق وكثافة أوراق، تليها العينة SC نمو جيد للساق والأوراق، مع المزيد من الشتلات ولكن ارتفاعًا وكثافة محدودين. ثم العينة AGC نلاحظ نمو متوسط وساق أطول، أخيرا العينة ACC أقل نمو وساق وأكثر كثافة للأوراق، تشير هذه الملاحظات إلى أن القشور المحروقة هي التعديل الأكثر فعالية للأسمدة، ويرجع ذلك على الأرجح إلى زيادة إطلاق العناصر الغذائية.

## 3.4.VI. نتائج التحليل والتوصيف

## 1.3.4.VI. مطياف الأشعة فوق البنفسجية



الشكل (16.VI): مطيافية UV-vis لقشور الكوكاو (a) وسماد القشور (b) (مطحون ومحروق).

تكشف بيانات UV-vis للقشور المطحونة (AG) والمحروقة (AA) كيف يؤثر الحرق على التركيب الكيميائي لقشور الفول السوداني، يساعد هذا التحليل على فهم وجود المركبات الممتصة للأشعة وتأثير العمليات الحرارية، حيث يظهر طيف العينات AG و AA أنماط امتصاص مميزة، حيث نلاحظ امتصاصاً أعلى، يبلغ ذروته عند حوالي 280 nm للعينات AG، مما يشير إلى وجود قوي لمركبات الفينول أو مشتقات اللجنين، وهي شائعة في الكتلة الحيوية النباتية، في المقابل، يظهر AA امتصاصاً أقل بكثير عبر نطاق 200-800 nm، مع ذروة بالقرب من 280 nm، مما يشير إلى أن عملية الحرق تحلل أو تغير هذه المركبات، ويرجع ذلك على الأرجح إلى التحلل الحراري أو الكربنة، تظهر كلتا العينتين انخفاضاً تدريجياً في الامتصاص بعد 300 nm، يشير هذا التحليل إلى أن الحرق يحدث تحولاً كبيراً في التركيب الكيميائي، مما يقلل من تركيز هيكل الكروموفورات في القشور وربما تشكل هياكل جديدة قائمة على الكربون.

تظهر بيانات UV-vis للسماد المحضر من التربة وقشور الفول السوداني المطحونة (AGG) والمحروقة (AAA)، والمخمرة لمدة أربعة أيام، أنماط امتصاص واضحة. يُظهر طيف AGG امتصاصاً أعلى، يبلغ ذروته عند حوالي 280 nm، مما يشير إلى وجود مركبات الفينولات واللجنينات أو المواد العضوية المرشحة من قشور الفول السوداني المطحونة إلى التربة أثناء التخمر، في المقابل يظهر طيف AAA ذروة امتصاص أقل عند نفس الطول الموجي، مما يشير إلى أن عملية الحرق تحلل هذه

المركبات، مما يقلل تركيزها أو يغير بنيتها من خلال التحلل الحراري، هذا يشير إلى أن قشور المطحونة تساهم في إضافة مركبات أكثر فعالية إلى التربة مقارنة بالقشور المحروقة بعد التخمر.

#### 2.3.4.VI. التحليل الطيفي للامتصاص الذري باستخدام فرن الجرافيت

في هذا التحليل تم تحديد تركيز عنصري الزنك (Zn) والحديد (Fe)، حيث أظهرت كل منهما نتائج مستقلة تم الحصول عليها من العينات المحفوظة سابقا.

- العينات المدروسة: يوضح الجدول (8.VI) تحليل GFAAS لجميع العينات المستخدمة في الدراسة من تربة، قشور الكاوكاو (محروق ومطحون)، سماد القشور والبذور المستخدمة للزرع.
- الجدول (8.VI): تراكيز معادن عنصري الزنك (Zn) والحديد (Fe) للتربة المستخدمة والأسمدة والبذور.

الحديد (Fe)	الزنك (Zn)	تراكيز المعادن (g/L) المواد
1.4941	0.7585	التربة (S)
1.4731	0.7268	كاوكاو مطحون AG
1.5634	0.7256	سماد الكاوكاو مطحون AG
1.4950	0.6769	كاوكاو محروق AA
1.5187	0.7032	سماد الكاوكاو المحروق AA
1.5160	0.7121	البازلاء (P)
1.4722	0.7368	الفول (F)
1.5224	0.7245	الحمص (C)

يعرض الجدول نتائج تحليل GFAAS، لقياس محتوى الزنك (Zn) والحديد (Fe) (ب g/L) في العينات المختلفة، حيث تحتوي التربة (S) على 0.7585 g/L من Zn و 1.4941 g/L من Fe، بينما تحتوي القشور المطحونة (AG) على زنك أقل قليلا وحديد أعلى بكثير (1.5634 g/L) مقارنة بالتربة، في حين تظهر القشور المحروقة (AA) انخفاضا في الزنك، مع ارتفاع في محتوى الحديد، مما يشير إلى أن الحرق يقلل من توافر الزنك مع الحفاظ على مستويات الحديد، أما السمادان AGG و AAA، فقد سجلا مستويات مرتفعة من الحديد (1.5634 g/L و 1.5187 g/L، على التوالي)، ومستويات زنك تبلغ 0.7256 g/L و 0.7032 g/L، مما يشير إلى إثراء التربة بالعناصر الغذائية، من بين البذور، تحتوي البازلاء (P) على 0.7121 g/L من Zn و 1.5160 g/L من Fe، والفاصوليا (F) على 0.7368 g/L

من Zn و 1.4722 g/L من Fe، والحمص (C) على 0.7245 g/L من Zn و 1.5224 g/L من Fe، مما يدل على أن البذور تحتفظ عمومًا بمستويات معتدلة من الزنك والحديد، مع احتواء الحمص على أعلى مستويات الحديد، بشكل عام، تُعزز الأسمدة المصنوعة من قشور الفول السوداني، وخاصة AGG، محتوى Fe في التربة، بينما تنخفض مستويات Zn مع AA و AAA، ويرجع ذلك على الأرجح إلى التحلل الحراري.

- نتائج تحاليل نبات البازلاء:

يوضح الجدول (10-9.VI) نتائج تحليل محتوى الحديد والزنك في مختلف السماد والتربة الشاهد لنبات البازلاء.

الجدول (9.VI): نتائج تحاليل الحديد لتربة نبات البازلاء

العينة الزمن	شاهد SP	سماد مفتت ACP	سماد مطحون AGP	سماد محروق AAP
الشهر الأول	1.5361g/L	1.5270g/L	1.5653g/L	1.5680g/L
الشهر الثاني	1.5388g/L	1.5105g/L	1.5525g/L	1.5288g/L
الشهر الثالث	1.5242g/L	1.5425g/L	1.5507g/L	1.5297g/L
الشهر الرابع	1.4987g/L	1.5945g/L	1.5653g/L	1.5862g/L

الجدول (10.VI): نتائج تحاليل الزنك لتربة نبات البازلاء

العينة الزمن	شاهد SP	سماد مفتت ACP	سماد مطحون AGP	سماد محروق AAP
الشهر الأول	0.7407g/L	0.7098g/L	0.7090g/L	0.7396g/L
الشهر الثاني	0.7307g/L	0.7446g/L	0.7125g/L	0.7225g/L
الشهر الثالث	0.6885g/L	0.7322g/L	0.7365g/L	0.7318g/L
الشهر الرابع	0.7222g/L	0.7415g/L	0.7442g/L	0.7175g/L

تعرض الجداول نتائج تحليل العناصر الغذائية لمحتوى Fe و Zn بـ g/L، حيث يظهر التحليل أن ACP يحتوي على أعلى نطاق من الحديد (1.5105-1.5945 g/L، وبلغ ذروته عند 1.5945 g/L)، مما يشير إلى إطلاق كبير للحديد من القشور المحروقة، يليه AAP (1.5288-1.5862 g/L، وبلغ

ذروته عند (g/L 1.5862)، ثم AGP (1.5525-1.5653 g/L، وبلغ ذروته عند (g/L 1.5653)، ثم SP (1.4987-1.5388 g/L).

بينما يكشف تحليل محتوى الزنك في العينة AGP أقصى قيمة 0.7442 g/L حيث نلاحظ زيادة تدريجية لمحتوى الزنك في التربة مع الزمن، بينما العينة ACP كان أقصى محتوى 0.7446 g/L في الشهر الثاني لكن مع مرور الزمن كانت قيمة المحتوى معتبرة، أما AAP كانت أقصى قيمة للمحتوى عند 0.7396 g/L في الشهر الأول ثم يتناقص المحتوى في الأشهر الأخرى، بينما العينة الشاهد SP أقصى قيمة محتوى 0.7407 g/L في الشهر الأول بعدها نلاحظ تذبذب في المحتوى، مما يدل على مستويات معتدلة ومتغيرة من الزنك.

يمكن أن يحسن الري المنتظم بالمحلول العضوي المخفف من توافر العناصر الغذائية من خلال توفير النيتروجين والفوسفور والعناصر الدقيقة، مما يعزز أيضا إطلاق عنصر الحديد، في العينة AAP بسبب التحلل الحراري والنشاط الميكروبي أثناء التخمر، بينما AGP و ACP نلاحظ إطلاق العناصر الغذائية بشكل تدريجي، تكون مستويات إطلاق الزنك متوسطة AGP و ACP، بينما في العينة AAP و SP نلاحظ نقصان تدريجي مع الزمن في محتوى الزنك. وبشكل عام، يعزز المحلول العضوي تأثير التسميد، خاصة بالنسبة للحديد في العينة المفتتة والمطحونة، مما يدعم نمو النبات، مع تعزيز محدود الزنك.

#### - نتائج تحاليل نبات الفول

يوضح الجدول (11.VI) نتائج تحليل محتوى الحديد والزنك في مختلف السماد والتربة الشاهد لنبات الفول.

الجدول (11.VI): نتائج تحاليل الحديد لتربة نبات الفول

العينة الزمن	شاهد SF	سماد مفتت ACF	سماد مطحون AGF	سماد محروق AAF
الشهر الأول	1.5306g/L	1.5306g/L	1.5288g/L	1.5169g/L
الشهر الثاني	1.5425g/L	1.5315g/L	1.5397g/L	1.5160g/L
الشهر الثالث	1.5105g/L	1.5224g/L	1.4859g/L	1.5552g/L
الشهر الرابع	1.5197g/L	1.5233g/L	1.5324g/L	1.5279g/L

الجدول (12.VI): نتائج تحاليل الزنك لتربة نبات الفول

العينة الزمن	شاهد SF	سماد مفتت ACF	سماد مطحون AGF	سماد محروق AAF
الشهر الأول	0.7164g/L	0.6978g/L	0.7140g/L	0.6881g/L
الشهر الثاني	0.7542g/L	0.7233g/L	0.7272g/L	0.7175g/L
الشهر الثالث	0.7430g/L	0.7133g/L	0.7113g/L	0.7055g/L
الشهر الرابع	0.7137g/L	0.7299g/L	0.7075g/L	0.7249g/L

تعرض الجداول تحليل عنصري الحديد والزنك، بالنسبة للحديد، نلاحظ في العينة AAF تظهر أقصى قيمة 1.5562 g/L في الشهر الثالث، تليه العينة AGF بقيمة 1.5397 g/L في الشهر الثاني، ثم العينة ACF بمحتوى بلغ 1.5315 g/L في الشهر الثالث، بينما العينة SF بلغ المحتوى ذروته عند 1.5425 g/L، مما يشير إلى أن القشور المحروقة تطلق أكبر كمية من الحديد، ويرجع ذلك على الأرجح إلى التحلل الحراري، بينما تعزز القشور المطحونة والمفتتة أيضا توافر الحديد.

بالنسبة للزنك، في العينة AAF بلغ التركيز 0.7249 g/L في الشهر الرابع، بلغ 0.7272 g/L في الشهر الثاني بالنسبة للعينة AGF، في حين بلغ 0.7299 g/L في الشهر الرابع للعينة ACF، في حين العينة الشاهد SF بلغ التركيز ذروته 0.7542 g/L في الشهر الثاني، مما يظهر مستويات زنك متفاوتة، حيث تساهم القشور المفتتة ACF بأكبر قدر من الزنك بمرور الوقت.

يساهم المحلول العضوي في توافر العناصر الغذائية المختلفة، مما قد يُعزز النشاط الميكروبي، ويساعد في تقثيت قشور الفول السوداني، وخاصة في تربة AAF، مما يؤدي إلى زيادة إطلاق الحديد، بينما تتفاوت مستويات الزنك، ويدعم هذا الإثراء الغذائي، وخاصة في تربة AAF وAGF، تحسين نمو النبات من خلال زيادة توافر العناصر الغذائية الدقيقة الأساسية، حيث يلعب المحلول العضوي دورا رئيسيا إطلاق العناصر الغذائية في التربة المخصبة مقارنة بالتربة العادية.

#### - نتائج تحاليل نبات الحمص

يوضح الجدول (14-13.VI) نتائج تحليل محتوى الحديد والزنك في مختلف السماد والتربة الشاهد لنبات الحمص.

الجدول (13.VI): نتائج تحاليل الحديد لتربة نبات الحمص

العينة الزمن	شاهد SC	سماد مفتت ACC	سماد مطحون AGC	سماد محروق AAC
الشهر الأول	1.5151g/L	1.5780g/L	1.6054g/L	1.5479g/L
الشهر الثاني	1.5488g/L	1.5333g/L	1.6127g/L	1.5835g/L
الشهر الثالث	1.5151g/L	1.5580g/L	1.5771g/L	1.5808g/L
الشهر الرابع	1.5242g/L	1.5799g/L	1.5844g/L	1.6036g/L

الجدول (14.VI): نتائج تحاليل الزنك لتربة نبات الحمص

العينة الزمن	شاهد SC	سماد مفتت ACC	سماد مطحون AGC	سماد محروق AAC
الشهر الأول	0.7079g/L	0.7156g/L	0.7403g/L	0.7365g/L
الشهر الثاني	0.7187g/L	0.7191g/L	0.7102g/L	0.6955g/L
الشهر الثالث	0.7600g/L	0.7245g/L	0.7175g/L	0.7036g/L
الشهر الرابع	0.7187g/L	0.7349g/L	0.7148g/L	0.7272g/L

تقدم الجداول تحليل العناصر الغذائية لعينات التربة، بالنسبة لعنصر Fe، يظهر AAC أعلى قيمة إطلاق للحديد في الشهر الرابع بقيمة 1.6036 g/L، كان التركيز في العينة AGC بأعلى قيمة قدرت بـ 1.6127 g/L في الشهر الثاني، بينما أظهرت العينة ACC أعلى تركيز في الشهر الرابع بقيمة 1.5799 g/L، بالنسبة للعينة الشاهد SC بلغ التركيز ذروته عند 1.5488 g/L في الشهر الثاني.

بالنسبة لتركيز الزنك، في العينة AAC بلغ ذروته عند 0.7365 g/L في الشهر الأول، حيث نلاحظ تذبذب في التركيز بعدها، أما العينة AGC كان أعلى تركيز في الشهر الأول بقيمة 0.7403 g/L، في حين أعطت العينة ACC زيادة مستمرة في التركيز من الشهر الأول إلى الرابع، حيث بلغ ذروته 0.7349 g/L، بينما العينة الشاهد SC أعلى تركيز كان في الشهر الثالث بقيمة 0.7600 g/L، مما يظهر مستويات متغيرة من الزنك مع مساهمة العينة AGC بأكثر قدر من الزنك بمرور الوقت. ساهم المحلول العضوي من توافر العناصر الغذائية، وخاصة في التربة العضوية المركبة AAC، مما يؤدي إلى زيادة إطلاق الحديد، يعزز هذا الإثراء الغذائي، وخاصة في العينة AAC وAGC، نمو نبات الحمص من خلال زيادة توافر العناصر الغذائية الدقيقة الأساسية، حيث يلعب المحلول العضوي دوراً رئيسياً في تعبئة العناصر الغذائية في التربة المخصبة مقارنة بالتربة العادية SC.

يرجح أن يحسن الري المنتظم بالمحلول العضوي المخفف من توافر العناصر الغذائية من خلال توفير كميات إضافية من النيتروجين والفوسفور والعناصر الدقيقة، والتي قد تتفاعل مع أسمدة القشور بحالاتها المختلفة لتعزيز إطلاق الحديد والزنك ، يشير أعلى محتوى من الحديد في القشور المحترقة إلى أن الحرق يفكك المادة العضوية، مطلقا الحديد المرتبط، وقد يعزز المحلول العضوي من تحريض هذه العناصر الغذائية من خلال النشاط الميكروبي أثناء التخمر، مما يدعم نموا قويا للنبات، على الرغم من أن تعزيز الزنك أقل وضوحا، ربما بسبب تركيب التربة أو فقدانه أثناء الري.

#### الخاتمة

أظهرت النتائج أن استعمال كتلة الحيوية والفحم الحيوي المستخلص من المخلفات النباتية كمعزز للتربة الزراعية، ويمكن أن يحسن من خصائصها الفيزيائية والكيميائية، وكما أظهرت التحاليل التي قمنا بها فعالية واضحة في تقييم هذه التغيرات، وبالتالي تعد مخلفات الكتلة الحيوية ومشتقاتها خيارا واعدًا ضمن ممارسات الزراعة المستدامة.

## المراجع

- [1] M. A. Mohamed, J. Jaafar, A. Ismail, M. Othman, and M. Rahman, "Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy," in *Membrane characterization*: Elsevier, 2017, pp. 3-29.
- [2] O. Barbosa-García *et al.*, "UV-vis absorption spectroscopy and multivariate analysis as a method to discriminate tequila," *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, vol. 66, no. 1, pp. 129-134, 2007.
- [3] R. Asahi, T. Morikawa, T. Ohwaki, K. Aoki, and Y. Taga, "Visible-light photocatalysis in nitrogen-doped titanium oxides," *science*, vol. 293, no. 5528, pp. 269-271, 2001.
- [4] M. Sauer, J. Hofkens, and J. Enderlein, "Basic principles of fluorescence spectroscopy," *Handbook of fluorescence spectroscopy and imaging*, vol. 1, p. 30, 2011.
- [5] B. Welz, H. Becker-Ross, S. Florek, and U. Heitmann, *High-resolution continuum source AAS: The better way to do atomic absorption spectrometry*. John Wiley & Sons, 2005.
- [6] E. Kroukamp, T. Wondimu, and P. Forbes, "Metal and metalloid speciation in plants: overview, instrumentation, approaches and commonly assessed elements," *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, vol. 77, pp. 87-99, 2016.
- [7] D. Visser, "Atomic absorption spectroscopy, principles and applications," *Technol Networks Anal Sep Available* <https://www.Technolcom/analysis/articles/atomic-absorption-spectroscopy-principles-and-applications-356829> (accessed 28 December 2022), 2021.
- [8] K. Chen, L. Wang, L. Xu, H. Pan, H. Hao, and F. Guo, "Preparation of peanut shell cellulose nanofibrils and their superhydrophobic aerogels and their application on cotton fabrics," *Journal of Porous Materials*, vol. 30, no. 2, pp. 471-483, 2023.
- [9] A. Y. Elnour *et al.*, "Effect of pyrolysis temperature on biochar microstructural evolution, physicochemical characteristics, and its influence on biochar/polypropylene composites," *Applied sciences*, vol. 9, no. 6, p. 1149, 2019.

الحائمه الحائمه  
العلماء العلماء

تلعب الإضافات العضوية والفحم الحيوي دورا حاسما في الزراعة المستدامة من خلال تحسين خصوبة التربة، وتعزيز الاحتفاظ بالمغذيات، وتحفيز نمو النباتات مع تقليل الاعتماد على الأسمدة الكيماوية، تبحث هذه الدراسة في فعالية الأسمدة القائمة على قشور الفول السوداني بثلاثة أشكال (المفتتة (C)، والمطحونة (G)، والمحروقة (A)) كمحسنات عضوية ومصادر محتملة للفحم الحيوي، مع استخدام محلول عضوي مخفف للري، قارنت التجربة بالتربة العادية، مع التربة المعدلة بأسمدة قشور الفول السوداني المختلفة، لتقييم نمو النباتات ومحتوى العناصر الغذائية في التربة من خلال التحليل الطيفي للأشعة تحت الحمراء والأشعة فوق البنفسجية والمرئية ومطيافية الامتصاص الذري لفرن الجرافيت.

أظهرت النتائج أن قشور الفول السوداني، حققت أعلى معدل نمو للنبات، حيث بلغت ذروة تركيز الحديد 1.6036 g/L في AAC، والزنك 0.7349 g/L في ACC، مما يشير إلى أن المعالجة الحرارية تعزز إطلاق المغذيات، أما قشور الفول السوداني المطحونة فقد حققت نموا ومستويات مغذيات متوسطة، بينما أظهرت القشور المفتتة والتربة العادية أقل معدل نمو، عزز السقي بالمحلول العضوي من استخلاص العناصر الغذائية، وخاصة الحديد، من خلال النشاط الميكروبي، مع أن مستويات الزنك تفاوتت بسبب احتمالية الاستخلاص وتركيب التربة، و تؤكد هذه النتائج على إمكانية استخدام قشور الفول السوداني المحروقة كمحسنين شبيهة بالفحم الحيوي، مما يساهم بشكل كبير في خصوبة التربة ونمو النباتات، مما يقدم حلا مستداما لتحسين الزراعة.

الملاحق  
العلمية

# الملاحق I

## جدول الامتصاصية الأشعة تحت الحمراء

التردد ( $\text{cm}^{-1}$ )	الرابط	المجموعة الوظيفية
3640-3610 (s.sh)	O-H stretch ، hydroxyl	Alcohls ,phenols
3500-3200 (s.b)	O-H stretch،H-bonded	Alcohls.phenols
3400-3250 (m)	N-H stretch	1°,2° amines, amides
3300-2500 (m)	O-H stretch	Carboxylic acids
3300-3270 (n.s)	-C=C-H stretch	Alkynes (terminal)
3100-3000 (s)	C-H stretch	Aromatics
3100-3000 (m)	= C-H stretch	Alkenes
3000-2850 (m)	C-H stretch	Alkenes
2830-2695 (m)	H-C=O C-H stretch	Aldehydes
2260-2210 (v)	C=N stretch	Nitriles
2260-2100 (w)	-C=C- stretch	Alkynes
1760-1665 (s)	C=O stretch	Carbonyls (general)
1760-1690 (s)	C=O stretch	Carboxylic acids
1750-1735 (s)	C=O stretch	Esters,saturated aliphatic
1740-1720 (s)	C=O stretch	Aldehydes, saturated aliphatic
1715 (s)	C=O stretch	$\alpha,\beta$ -unsaturated esters
1710-1665 (s)	C=O stretch	Ketones , saturated aliphatic
1680-1640 (m)	C=O stretch	1°,2° unsaturated aldehydes, ketones
1650-1580 (m)	-C=C- stretch	Alkenes

1600-1585 (m)	N-H bend	1° amines
1550-1475 (s)	C-C stretch (in-ring)	Aromatic
1500-1400 (m)	N-O asymmetric stretch	Nitro compounds
3100-3000 (m)	C-C stretch (in-ring)	Aromatic
3000-2850 (m)	= C-H stretch	Alkenes
2830-2695 (m)	H-C=O :C-H stretch	Alkanes
2260-2210 (v)	C=N stretch	Aldehydes
2260-2100 (w)	-C=C- stretch	Nitriles
1760-1665 (s)	C=O stretch	Alkynes
1760-1690 (s)	C=O stretch	Carbonyls (general)
1750-1735 (s)	C=O stretch	Carboxylic acids
1740-1720 (s)	C=O stretch	Esters, saturated aliphatic
1730-1715 (s)	C=O stretch	Aldehydes saturated aliphatic
1715 (s)	C=O stretch	$\alpha,\beta$ -unsaturated esters
1710-1665 (s)	C=O stretch	Ketones , saturated aliphatic

متوسط = m ، ضعيف = w ، قوي = s ، ضيق = n ، واسع = b ، حاد = sh