الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العالي

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:

بوغزاله حمد أميمة

جوادي نادية

الموضوع

تحسين إنتاج البلاستيك الحيوي

نـــــوقـــشـت فـــي: 2026/05/ 24

أمام لـــــجنـــة المـنـاقـشـة:

د. قماري فتحي	أستاذ محاضر (ب)	رئيسا	جامعة الوادي
د. همامي هادية	أستاذة	مناقش	جامعة الوادي
د. زغود العيد	أستاذ محاضر (أ)	مشرفا	جامعة الوادي
د. بن عمر الهام	أستاذة مساعد	مساعد المشرف	جامعة الوادي

الموسم الجامعي:2026/2025

بِسْمِ ٱللَّهِ ٱلرَّحْمَٰنِ ٱلرَّحِيمِ

الإهداء

بِسْمِ اللهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

(فَرِحِينَ بِمَا أَتَاهُمُ اللهُ مِنْ فَضْلِهِ)

وفِي هَذا اليَوم المُمَيّز أُهْدِي تَخَرُّجِي إِلَى من كَلّل العَرَق جَبِينَه ومَنْ عَلَّمَنِي أَنَّ النَّجَاح لَايَأْتِي إِلاَّ بِالصَّبْرِ وَالإِصرَار إِلَى النُّور الّذِي أَضَاءَ دَرْبِي والسِّرَاج الّذِي لَا يَنْطَفِيء نُورَه بِقَلْبِي إِلى..... أَبِي العَزِيزْ

أُهْدِيه إِلَى التِي الجَنَّة تَحْتَ أَقْدَامِهَا وَ بِدُعَائِهَا سَهُلَت لِي الصِّعَاب وَالشَّدَائِد إِلَى الإِنْسَانَة العَظِيمَة الحَنُونَة التِي طَالَمَا رَجُوَت الله أَنْ تَقِرَّ عَيْنَهَا فِي هَذا اليَوْم إِلى.....أُمِّي الغَالِيَة

وَإِلَى ضِلْعِي الثَّابِت وَ مَنْ شَدَدّت عُضُدِي بِهِمْ وَأَمَانَ أَيَّامِي إِلَى قُرَّة عَيْنِي .....اِخوَاتِي وَاخَوَاتِي اَسْأَلُ اللهَ أَنْ يُوَفِقَكُم وَيُبَارِكَ فِيكُم

لِكُلِّ مَنْ كَانَ عَونًا وَسَنَدًا فِي هَذَا الطَرِيق إِلَى الرُّفَقَاء وَالأَصْدِقَاء

أُهْدِيكُم هَذَا الإِنْجَاز وَثَمَرَة النَّجَاح بِفَضْل الله سُبْحَانَهُ وَتَعَالَى

فَالحَمْدُلِله حَمْدًا يَلِيقُوا بِعَظِيمَ سُلْطَانِه حَمْدًا وَامتِنَانًا عَلَى البَدْءُ وَالخِتَام

(وأَخِرُ دَعْوَاهُمُ أنِ الحَمْدُ للهِ رَبِّ العَالَمِين)

نادية

الإهداء

بسم الله الرحمن الرحيم والحمد لله رب العالمين حمدًا كما ينبغي لجلال وجهه وعظيم سلطانه، وصل الله وسلم على من بعث رحمة للعالمين، نبينا محمد وعلى آله وصحبه أجمعين.

أهدي تخرجي:

إلى مالك الملك وواهب العلم والتوفيق. اللهم تقبل هذا الجهد قُربة إليك، واجعله خالصًا لوجهك الكريم.

إلى أعز الناس على قلبي، أمي وأبي رزقني الله بركما، وجزاكما عني خير ما يجزي به والدًا عن ولده، هذه الشهادة ثمرةتعبكماودعواتهما الصادقة، فبارك الله لي فيكما، ورضي عنكما وأرضاكما.

إلى إخوتي وأخواتي، سندي في الحياة وعماد ظهري، الذين أحسوا بي في كل تفصيلة صغيرة وكبيرة،

إلى كل أساتذتي الكرام على مر حياتي، من علمني الحرف الأول إلى من أتم معي آخر محاضرة، اللهم اجزهم عني خير الجزاء، وبارك في أعمارهم وعلومهم،

إلى من شاركوني التفاصيل والجهد من الصحبة الطيبة والزملاء، وإلى كل من ساهم في هذا النجاح ولو بدعوة صادقة من القلب.

أقولها بكل وفاء: شكرًا لكم فهذا التخرج ثمرة فضل الله أولاً، ثم دعائكم ودعمكم ووجودكم في حياتي.

جزاكم الله خيرا وجعل هذا النجاح خطوة في طريق يرضيه عنا وعنكم.

والحمدلله رب العالمين.

أميمة

الشكر والعرفان

وعن ابي هريرة رضي الله عنه قال، قال رسول الله صلى الله عليه وسلم:

" مَنْ لاَ يَشْكُر النَّاسَ لاَ يَشْكُر الله "

(رواه أبو داود والترمذي)

نحمد الله سبحانه وتعالى حمداً يليق بجلاله وعظيم سلطانه، على ما أولانا من نعمة العقل والتوفيق، وأعاننا على إتمام هذه المذكرة في أتمّ حال وأكملها.

ثم نتقدم بجزيل الشكر وعظيم الامتنان إلى :

أستاذنا و مشرفنا "د. زغود العيد " لما بذله من جهد وعطاء وحرص على سلامة هذا العمل المتواضع في مختلف مراحل إعداده وعلى التسهيلات المقدّمة من خلاله في المختبر وتَوفيره الامكانيات اللازمة، فَجزاه الله عنَّا كل خير.

الاستاذة مساعدة المشرف "د. بن عمر إلهام " على دعمها المستمر وارشاداتها البليغة وملاحظاتها السّديدة التي كان لها الأثر الكبير في اخراج هذا العمل بصورته النهائية نسأل الله ان يبارك في علمك وجهودك وأن يجعلها الله في ميزان حسناتك، بارك الله فيك.

الأستاذة الفاضلة "أ.د. همامي هادية " على نصائِحها الثمينة وتَحفيزها الغير منقطع نفع الله بك الامّة.

الاستاذة "د. زغود سمية " التي وقفت معنا ولم تبخل علينا بوقتها وجُهدها في تطبيق هذا الانجاز، بارك الله فيك.

شكرًا الى اعضاء لجنة المناقشة الكِرام على تفضّلهم بقبول مناقشة هذا العمل وإثرائه بملاحظاتهم العلمية النّافعة وتوجيهاتهم القيّمة.

ونسأل الله أن يكون هذا العمل نافعًا وخالصًا لوجهه الكريم.

والحَمدُ للهِ ربِّ العَالَمِين.

ملخص

يُعد إنتاج البلاستيك الحيوي من المخلفات الزراعية أحد الحلول الواعدة لتقليل الاعتماد على البلاستيك التقليدي المشتق من البترول ، مع تحقيق الاستدامة البيئية وإعادة تدوير المخلفات الزراعية ، في هذا العمل تم استخلاص بلاستيك حيوي من مخلفات البازلاء ، حيث تم تطبيق خطة التصميم المركزي المركب (Central Composite Design - CCD) لتحسين عملية الإنتاج ، مع متغيرين مستقلين رئيسيين: كتلة مخلفات البازلاء وكتلة الجلسيرين ، حيث هدف التصميم هو دراسة التأثير المشترك والتفاعلي للمتغيرين على الاستجابات الرئيسية، وتم قياس خمسة استجابات رئيسية لتقييم الأداء: قابلية التحلل الحيوي، امتصاص الماء، محتوى الرطوبة، ذوبان الماء، والمسامية ، و كشف التحليل الإحصائي باستخدام تحليل التباين (ANOVA) أن المسامية كانت النموذج الأكثر قوة ($R^2 = 0.9786$)، حيث عملت كل من كتلة مخلفات البازلاء وكتلة الجلسرين كعوامل ذات دلالة إحصائية عالية ($p\text{-value} < 0.0001$)، و كانت قابلية التحلل الحيوي متأثرة بشكل أساسي بكتلة مخلفات البازلاء ($p\text{-value} = 0.0397$)، حيث بلغت ذروتها ب 80.92% عند زيادة كتلتها إلى أقصى حد وتقليل الجلسرين إلى أدنى حد، في المقابل عمل الجلسرين كملدّن مهيمن مؤثرًا بشكل كبير على امتصاص الماء ($p\text{-value} = 0.0007$) ومحتوى الرطوبة من خلال تفاعلات تربيعية غير خطية، و تُظهر هذه النتائج أنه في حين أن كتلة مخلفات البازلاء توفر الهيكل الأساسي القابل للتحلل الحيوي، يجب معايرة تركيزات الجلسرين بدقة لتحقيق التوازن بين كراهية الماء للمادة وسلامتها الهيكلية ، و يساهم هذا العمل في تعزيز الاقتصاد الدائري من خلال تحويل مخلفات البازلاء إلى مادة ذات قيمة مضافة، مع تقليل التكلفة البيئية والاقتصادية مقارنة بالطرق التقليدية.

الكلمات المفتاحية: بلاستيك حيوي، مخلفات البازلاء، جلسيرين، تصميم مركزي مركب (CCD).

Abstract

Producing bioplastics from agricultural waste is a promising solution for reducing reliance on traditional petroleum-derived plastics, while achieving environmental sustainability and recycling agricultural waste. In this work, bioplastics were extracted from pea waste. A Central Composite Design (CCD) was applied to optimize the production process, with two main independent variables: pea waste mass and glycerol mass. The design aimed to study the combined and interactive effect of these two variables on the main responses. Five main responses were measured to evaluate performance: biodegradability, water absorption, moisture content, water solubility, and porosity. Statistical analysis using analysis of variance (ANOVA) revealed that porosity was the most robust model (R^2 = 0.9786). Both pea waste mass and glycerol mass acted as highly significant factors (p-value < 0.0001). Biodegradability was primarily influenced by pea waste mass (p-value = 0.0397), reaching its peak. At 80.92% when its mass was maximized and glycerol minimized, glycerol acted as the dominant plasticizer, significantly influencing water absorption (p-value = 0.0007) and moisture content through nonlinear quadratic interactions. These results demonstrate that while the mass of pea waste provides a biodegradable basic structure, glycerol concentrations must be precisely calibrated to balance the material's hydrophobicity with its structural integrity. This work contributes to the circular economy by transforming pea waste into a value-added material, while reducing environmental and economic costs compared to conventional methods.

Keywords: Bioplastics, Pea Waste, Glycerol, Composite Central Design (CCD).

قائمة الرموز

الرمز	المعنى
β-(1-4)	الروابط الجلوكوز
N-Acétylglucosamine	وحدات السكر المتعدد
PHA	بولي هيدروكسي ألكانوات
BPA	ثنائي الفينول أ
PLA	حمض البولي لاكتيك
ASTM D6400	مواصفة قياسية أمريكية تحدد معايير المواد البلاستيكية القابلة للتحلل الحيوي في مرافق التسميد الصناعي
EN 13432	المعيار الأوروبي عبارة عن شهادة توثق قابلية مواد التغليف والمنتجات للتحلل الحيوي والتسميد الصناعي
PCL	بولي كابرولاكتون
Pisum sativum	البازلاء الخضراء
(Design of) Experiments	تصميم التجارب
ANOVA	تحليل التباين
R	معامل الارتباط الخطي
R^2	معامل التحديد (مربع معامل الارتباط الخطي)
R^2adj	معامل التحديد المضبوط
F	معامل فيشر
P	معامل الاحتمالية

قيمة فيشر	**F-Valeur**
قيمة الاحتمالية	**P-Valeur**
معامل تضخم التباين	**VIF**
منهجية سطح الاستجابة	**RSM**
الاستجابة	**Y**
المتغير المستقل	**X**
المستوى المعين للمتغير	**xi xj**
معاملات النموذج الرياضي	**aii,aij,ai,a0**
الانحدار الخطي المتعدد	**MLR**
درجة الحموضة	**PH**
ثابت الانحدار الخطي	**B**
ميل الانحدار	$a_1,\ldots,a_n$
متوسط مربع الانحدار	**MS Regression**
متوسط مربع البواقي	**MS Residual**
التفاوت الكلي	**TSS**
التفاوت المفسر	**RSS**
التفاوت الغير مفسر	**ESS**
درجة الحرية	**DF**
الانحراف المعياري	**SD**
مجموع المربعات	**Sum of Squares**

نسبة المئوية	**%**
الدرجة الزاوية	°
ثنائي الأبعاد	**2D**
ثلاثي الأبعاد	**3D**
خطأ في النموذج	**Lack of Fit**
الخطأ الناتج عن المجرب	**Pure Error**

قائمة الأشكال

الرقم	العنوان	الصفحة
الفصل الأول: البلاستيك الحيوي والبازلاء		
الشكل 1.I	تصنيف البلاستيك حسب قابلية التحلل والمصدر القائم عليه	8
الشكل 2.I	تطبيقات البلاستيك الحيوي	10
الشكل 3.I	نبات البازلاء	16
الشكل 4.I	قشور البازلاء	19
الفصل الثاني: التصاميم التجريبية والتّحليل الاحصائي		
الشكل 1.II	مجال تغير العامل	20
الشكل2.II	النقاط التجريبية في فضاء ثنائي الابعاد	20
الشكل3.II	رسم توضيحي لتأثير المتغير	27
الشكل 4.II	منحنى التأثير بين المتغيرات	32
الشكل 5.II	خط الانحدار	37
الفصل الثالث: الجزء العملي		
الشكل1.III	مسحوق قشور البازلاء	46
الشكل 2.III	خطوات تحضير البلاستيك الحيوي	47
الشكل 3.III	يوضح خطوات الاستخدام في برنامج Design-Expert	51-49
الشكل 4.III	خطوات عمل اختبار التحلل البيولوجي	52
الفصل الرابع: النتائج والمناقشة		

الشكل 1.IV	العلاقة بين القيم التجريبية والمتوقعة لتأثير الاستجابات الخمسة (قابلية التحلل البيولوجي (a)، نسبة امتصاص الماء(b)، نسبة الرطوبة (c)، نسبة الذوبان في الماء (d)، والمسامية(e)) على جودة بلاستيك حيوي المنتج	59
الشكل 2.IV	تأثير كتلة البازلاء (A) وكتلة الجلسرين (B) على التحلل البيولوجي (%)	65
الشكل 3.IV	تأثير كتلة البازلاء (A) وكتلة الجلسرين (B) على امتصاص الماء (%)	66
الشكل 4.IV	تأثير كتلة البازلاء (A) وكتلة الجلسرين (B) على الذوبان في الماء (%)	67
الشكل 5.IV	تأثير كتلة البازلاء (A) وكتلة الجلسرين (B) على المسامية (%)	68
الشكل 6.IV	تأثير كتلة البازلاء (A) وكتلة الجلسرين (B) على الرطوبة (%)	69
الشكل 7.IV	الظروف المثلى المتوقعة بطريقة التصميم المركب المركزي	70
الشكل 8.IV	تأثير التحلل البيولوجي لبلاستيك حيوي المنتج على فترات زمنية مختلفة	74-72

قائمة الجداول

الجدول		الصفحة
الفصل الاول: البلاستيك الحيوي والبازلاء		
الجدول 1.I	مزايا وعيوب البلاستيك الحيوي	13
الجدول 2.I	الفرق بين البلاستيك الحيوي والبلاستيك العادي	15
الجدول 3.I	الأغراض التي تزرع من أجلها البازلاء	18
الفصل الثاني: التصاميم التجريبية والتحليل الاحصائي		
الجدول 1.II	الاهداف الرئيسية للتصاميم التجريبية وغرضها العملي	28
الجدول 2.II	أنواع العوال في التصاميم التجريبية وفقا لطبيعتها	29
الجدول 3.II	برامج التصاميم التجريبية	35
الفصل الثالث: الجزء العملي		
الجدول 1.III	يوضح المواد الكيميائية المستعملة في خطوات العمل	45
الجدول 2.III	مستويات تصميم التجارب لعوامل مختلفة	52
الفصل الرابع: النتائج والمناقشة		
الجدول 1.IV	خطة التصميم المركب المركزي مع الاستجابات التجريبية	57
الجدول 2.IV	القيم التجريبية والمتوقعة للاستجابات الخمسة (%) لكل تجربة	60
الجدول 3.IV	تحليل التباين(ANOVA) لاستجابة خمس استجابات (قابلية التحلل البيولوجي (%)، نسبة امتصاص الماء (%)، نسبة الرطوبة (%)، نسبة الذوبان في الماء (%)، والمسامية (%))	62

فهرس المحتويات

الإهداء

الشكر والعرفان

ملخص

Abstract

قائمة الرموز VI

قائمة الأشكال IV

قائمة الجداول VI

فهرس المحتويات VII

المقدمة العامة 1

الفصل الاول

البلاستيك الحيوي والبازلاء

تمهيد 6

I.1 البلاستيك الحيوي 6

I.1.1 تعريف البلاستيك الحيوي 6

I.1.2 تركيب البلاستيك الحيوي 6

I.1.3 مصادر البلاستيك الحيوي 6

I.1.4 تصنيف البلاستيك الحيوي 8

I.1.5 خصائص البلاستيك الحيوي 9

I.1.6 تطبيقات البلاستيك الحيوي 10

I.1.7 مزايا وعيوب البلاستيك الحيوي 13

I.1.8 الفرق بين البلاستيك الحيوي والبلاستيك العادي 14

I.1.9 الأهمية الاقتصادية للبلاستيك الحيوي 15

I.2 البازلاء 16

I.2.1 توصيف نبات البازلاء 17

I.2.2 التركيب المورفولوجي لنبات البازلاء 17

I.2.3 أهمية البازلاء 18
I.2.4 مخلفات البازلاء 19
I.2.5 التطبيقات المحتملة لقشور البازلاء 19
خلاصة الفصل 20
الفصل الثاني
التصاميم التجريبية والتحليل الاحصائي
تمهيد 26
II.1 التصاميم التجريبية 26
II.1.1 لمحة تاريخية 26
II.1.2 مبدأ عمل التصميم التجريبي 27
II.1.3تعريف التصميم التجريبي 28
II.1.4 أهداف التصاميم التجريبية 28
II.1.5 المفاهيم الأساسية للتصاميم التجريبية 29
II.1.6 منهجية التصاميم التجريبية 32
II.1.7 أنواع التصاميم التجريبية 32
II.1.8خطط طريقة سطح الاستجابة 33
II.1.9 النموذج الرياضي 34
II.1.10 أشهر برامج الحاسوب المستخدمة في التصميم التجريبي 35
II.2 التحليل الاحصائي للنمذجة 36
II.2.1 التحليل الاحصائي للبيانات 36
II.2.2 معاملات التحليل الإحصائي 38
II.2.3 التحقق من صحة النموذج 39
II.2.4 التمثيل البياني 40
خلاصة الفصل 40

الفصل الثالث

الجزء العملي

تمهيد **45**

III.1 المواد والأدوات والأجهزة المستعملة **45**

III .1.1 المواد الكيميائية **45**

III.1.2 الأدوات و المواد **45**

III.1.3 الأجهزة **45**

III.2 المادة النباتية **45**

III.2.1 تجميع وتحضير النباتات **45**

III.3 بلاستيك حيوي قائم على النشاء مدعم بقشور البازلاء **46**

III.4 البرنامج المستخدم **47**

III.4.1 خطوات البرنامج **47**

خلاصة الفصل **54**

الفصل الرابع

النتائج والمناقشة

IV.1 نمذجة الاستجابة **57**

IV.2. النتائج الإحصائية وتفسيرها **58**

IV.3 العلاقة بين القيم التجريبية والمتوقعة **58**

IV.4 تحليل التباين(ANOVA) **60**

IV.5 تحسين الاستجابة **64**

IV.6 القيم المثلى المتوقعة للمتغيرات في نموذج التنبؤ **70**

IV.7 التحلل البيولوجي لبلاستيك الحيوي في التربة **71**

الخاتمة العامة **76**

المـقدمـة

العـامـة

المقدمة العامة

تفوق المواد البلاستيكية المعادن والورق وغيرها من المواد في العديد من التطبيقات نظرًا لخصائصها، كخفة وزنها وانخفاض تكلفتها ومتانتها ، ونتيجة لذلك تُستخدم في جميع القطاعات الصناعية تقريبًا[1]، [2] ، وقد بلغ الاستهلاك العالمي أكثر من 300 مليون طن من البلاستيك في عام 2015 [3] ، فقد أصبح تطوير المواد البلاستيكية الحيوية من الموارد المتجددة أولوية بحثية استراتيجية وعالمية، حيث يمثل هذا التحول حلاً جذرياً يقلل من البصمة الكربونية، ويعزز الأمن البيئي، ويشكل جزءاً من أهداف التنمية المستدامة[4] .

تُعدّ البازلاء (*Pisum sativum L.*) من المحاصيل الواعدة كمادة خام لتصنيع البلاستيك الحيوي، وذلك لانها غنية بالنشاء والبروتينات النباتية، مما يسهل استخلاص مكوناتها البوليمرية الطبيعية، كما يتوفر محصولها الزراعي في مناطق واسعة منها المناطق الجافة وشبه الجافة، ومن جهة أخرى يُعد استغلال مخلفات البازلاء وتحديداً القشور خطوة فعّالة نحو تعظيم القيمة المضافة للمحصول وتقليل الهدر وهذا النهج يتوافق مع مبدأ الاقتصاد الدائري[5] ، [6].

تهدف الدراسة إلى تحسين إنتاج البلاستيك الحيوي من البازلاء وذلك بالاعتماد على متغيرين أساسيين وهما: تركيز الجليسرين كعامل تلدين طبيعي يعمل على زيادة مرونة السلاسل البوليمرية وتقليل التشققات أثناء التشكيل، وكتلة مسحوق قشور البازلاء كمادة تعزيز طبيعية غنية بالألياف ، وقد تم تقييم فعالية هذا المزيج من خلال قياس خمسة مؤشرات أداء تحدد جاهزية المنتج النهائي وجودته، وهي: المسامية، والتحلل البيولوجي، وامتصاص الماء، والذوبان في الماء، ومحتوى الرطوبة ، ويسعى هذا العمل إلى تحديد التركيبة والظروف المثلى التي ترفع من كفاءة عملية الإنتاج وتحسن خصائص المادة النهائية، مع الحفاظ على قابليتها الكاملة للتحلل الحيوي وملاءمتها للتطبيقات المستهدفة، بما يعزز جدوى البوليمرات النباتية كبدائل واقعية ومستدامة للبلاستيك التقليدي.

قسمت المذكرة إلى أربع فصول تضمنت العناوين التالية:

الفصل الأول: يتمحور حول البلاستيك الحيوي والبازلاء.

الفصل الثاني: عموميات حول التصاميم التجريبية والتحليل الاحصائي.

الفصل الثالث: يضم الجزء العملي حيث تم فيه تحضير البلاستيك الحيوي من قشور البازلاء.

الفصل الرابع: النتائج والمناقشة

في الختام وبالنظر إلى النتائج النهائية، يتضح مدى النجاح في تحقيق الأهداف المرجوة من هذه الدراسة.

مراجع المقدمة العامة

[1] P. G. C. Nayanathara Thathsarani Pilapitiya and A. S. Ratnayake, “The world of plastic waste: A review,” Cleaner Materials, vol. 11, p. 100220, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.clema.2024.100220.

[2] S. Cui, “Study on the Application and Properties of Plastic Materials in Modern Architecture,” Highlights in Science, Engineering and Technology, vol. 137, pp. 162–166, Apr. 2025, doi: 10.54097/s4h0gr68.

[3] A. García Rellán, D. Vázquez Ares, C. Vázquez Brea, A. Francisco López, and P. M. Bello Bugallo, “Sources, sinks and transformations of plastics in our oceans: Review, management strategies and modelling,” Science of The Total Environment, vol. 854, p. 158745, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.158745.

[4] T. D. Moshood, G. Nawanir, F. Mahmud, F. Mohamad, M. H. Ahmad, and A. AbdulGhani, “Biodegradable plastic applications towards sustainability: A recent innovations in the green product,” Clean. Eng. Technol., vol. 6, p. 100404, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.clet.2022.100404.

[5] D.-T. Wu, W.-X. Li, J.-J. Wan, Y.-C. Hu, R.-Y. Gan, and L. Zou, “A Comprehensive Review of Pea (Pisum sativum L.): Chemical Composition, Processing, Health Benefits, and Food Applications,” Foods, vol. 12, no. 13, p. 2527, Jun. 2023, doi: 10.3390/foods12132527.

[6] V. Perez-Puyana, P. Cuartero, M. Jiménez-Rosado, I. Martínez, and A. Romero, “Physical crosslinking of pea protein-based bioplastics: Effect of heat and UV treatments,” Food Packag. Shelf Life, vol. 32, p. 100836, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.fpsl.2022.100836.

الفصل الأول

البلاستيك الحيوي والبازلاء

تمهيد

في عصرنا الحالي أصبح البلاستيك رفيقاً لا غنى عنه في حياتنا اليومية، يمتد من أبسط الأدوات المنزلية إلى مواد البناء والصناعات الثقيلة، ومع ذلك فإن هذا الانتشار الواسع للبلاستيك التقليدي المشتق من البترول أدى إلى كارثة بيئية عالمية غير مسبوقة، حيث ينتج العالم حالياً أكثر من 400-460 مليون طن من البلاستيك سنوياً، كما يوجد حالياً ما بين 75 إلى 199 مليون طن من البلاستيك متراكم في المحيطات، هذا التلوث لا يقتصر على المحيطات فحسب بل يمتد إلى التربة والسلاسل الغذائية، مما يهدد الحياة البرية والبحرية وصحة الإنسان [1]، أمام هذا التحدي البيئي الخطير برزت الحاجة الماسة إلى بدائل مستدامة فظهر البلاستيك الحيوي (Bioplastic) كحل بديل ،حيث يُصنع البلاستيك الحيوي من مصادر نباتية متجددة بدلاً من الوقود الأحفوري، مما يجعله أكثر استدامة وصداقة للبيئة ويقلل بشكل كبير من انبعاثات الكربون والتلوث [2].

ومن بين المواد الطبيعية الواعدة في هذا المجال قشور البازلاء التي تعتبر كمورد غير مكلف ومتوفر بكثرة كمخلفات زراعية، كانت قشور البازلاء في الماضي تُلقى كفضلات زراعية أو تُستخدم كعلف حيواني بسيط، لكن مع تطور البحث العلمي أصبح العلماء يستغلون مكوناتها الغنية بالسليلوز والنشاء والبروتينات لتحويلها إلى بوليمرات حيوية قابلة للتحلل تساهم في إنتاج بلاستيك حيوي مستدام.

بهذه الطريقة يعتبر استغلال قشور البازلاء في تصنيع البلاستيك الحيوي نموذجاً مثالياً للاقتصاد الدائري حيث يُعاد تدوير المخلفات الزراعية لخلق منتجات صديقة للبيئة، ويفتح آفاقاً جديدة للتنمية المستدامة [3].

1.I البلاستيك الحيوي

اكتسب البلاستيك الحيوي اهتمامًا متزايدًا كبديل مستدام للبلاستيك التقليدي المشتق من البترول، مدفوعًا بالحاجة المُلحة لمعالجة الآثار البيئية المرتبطة بنفايات البلاستيك، واستنزاف الموارد، وتغير المناخ، أصبح تحسين إنتاج هذا البلاستيك الحيوي ضرورة حتمية لتحقيق الأمن البيئي.

1.1.I تعريف البلاستيك الحيوي

في الفترّة ما بين عامي 1990 و2005، أُستخدام مصطلح البلاستيك الحيوي للإشارة إلى المواد البلاستيكية التي تتحلل بشكل حيوي، ويُشتهر البوليمر القابل للتحلل الحيوي على أنه البوليمر الذي يمكن أن تحلله الكائنات الحية الدقيقة بالكامل، مثل البكتيريا والفطريات والطحالب الدقيقة. خلال نشاطها الحيوي، تقوم الإنزيمات التي تفرزها الكائنات الحية الدقيقة بتفكيك المادة بشكل كامل أو بطريقة أخرى، حيث البلاستيك الحيوي هو عبارة عن مادة مصنّعة من بوليمرات التي يتم استخلاصها من الموارد الطبيعية أو الحفريات أو من كلاهما تتميز هذه المادة بقابليتها للقولبة والتشكيل لتكوين منتجات مختلفة، وهي أيضا قابلة للتحلل البيولوجي عند نهاية عمرها الافتراضي[4].

2.1.I تركيب البلاستيك الحيوي

يعتمد تركيب البلاستيك الحيوي على تفاعل كيميائي يسمى بلمرة التكثيف، حيث تتحول المونوميرات (الوحدات الأساسية البنائية) إلى بوليمرات (سلاسل طويلة)عبر خطوات متكررة، ليتم في النهاية الحصول على البولي ايثيلين [5].

3.1.I مصادر البلاستيك الحيوي

1.3.1.I البلاستيك الحيوي القائم على النشاء

البوليمرات التي تحتوي على أجزاء من النشاء الاصلي أو المعدل كيميائيا تندرج تحت فئة تسمى البوليمرات النشوية، وكما يتم تضمين كل من المواد البلاستيكية الطبيعية أو الإصطناعية مع النشاء، وكذلك البوليمرات الناتجة عن تخمير النشاء، في هذه المجموعة يشكل هذا النوع 50% من السوق العالمي[6].

I.1.3.2 البلاستيك الحيوي القائم على السليلوز

مشتق من مشتقات السليلوز الكيميائية مثل استرات السيليلوز أو ايثراته، حيث يحتوي السليلوز على جزيئات الغلوكوز متصلة ببعضها البعض عن طريق روابط (1-4)-β وهذه الروابط قوية جدا لا تستطيع معظم الكائنات الحية هضمها بمفردها، وهذا يفسر سبب الحاجة إلى ميكروبات تكافلية معينة لهضمها[7] .

I.1.3.3 البلاستيك الحيوي القائم على البروتين

هو نوع من المواد البلاستيكية القابلة للتحلل الحيوي، مشتق من مصادر طبيعية تحتوي على بروتين مثل: الحليب (يحتوي على بروتين يسمى الكازين) والغلوتين المستخرج من القمح ومصادر بروتينية الأخرى.

I.1.3.4 البلاستيك الحيوي القائم على اللجنين (lignine)

اللجنين هو مادة عضوية معقدة تعمل بمثابة المادة اللاصقة الطبيعية التي تربط بين الياف السيليلوز. على الرغم من الحصول على اللجنين منذ فترة طويلة كمنتج ثانوي لإنتاج السليلوز، إلى أن تم استخدامه مع ظهور مشاريع التكرير الحيوي التي يمتلكها هذا البوليمر[8].

I.1.3.5 البلاستيك الحيوي القائم على الكيتين

الكيتين عبارة عن بوليمر حيوي سكري متعدد مصنوع من وحدات إن–أسيتيل غلوكوز أمين N- Acétylglucosamine المرتبطة بروابط (1-4) -β ، وهو ثاني أكثر البوليمرات الحيوية وفرة بعد السليلوز، ويتواجد الكيتين في الفطريات والهياكل الخارجية لجميع المفصليات خاصة قشور القشريات مثل: سرطان البحر والجمبري التي تمثل المصدر التجاري الأهم له [9].

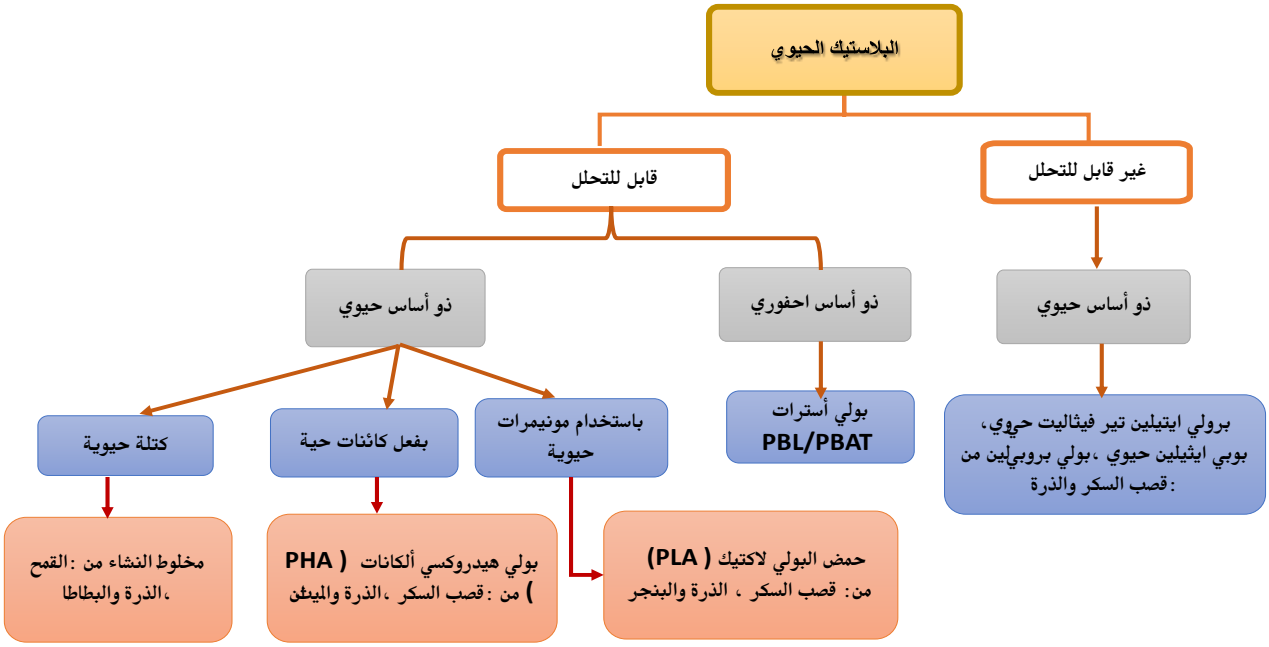
I.1.3.6 البلاستيك الحيوي القائم على الشيتوزان

الشيتوزان هو مشتق كيميائي ناتج عن نزع مجموعة الأسيتيل من الكيتين مما يجعله مادة قابلة لذوبان وذات إمكانيات مستقبلية كبيرة، أجريت أعمال بحث مكثفة عليه نظرا لخصائصه الفريدة وسماته الإيجابية كالتوافق الحيوي الممتاز وقابلية التحلل البيولوجي الرائعة مع السلامة البيئية، والسمية المنخفضة والأنشطة البيولوجية المتنوعة مثل: النشاط المضاد للميكروبات [10].

4.1.I تصنيف البلاستيك الحيوي

البلاستيك يمكن تصنيعه من مواد بيولوجية أو مواد قائمة على مشتقات البترول، بحيث تنتج مواد بلاستيكًية قابلة للتحلل الحيوي أو غير قابله له، يتم تصنيع البلاستيك الحيوي من مواد متجددة، بينما يصنع البلاستيك القابل للتحلل الحيوي إما من بوليمر أحفوري أو خليط من المواد المتجددة والمواد الأحفورية، تصنف المواد البلاستيكية القابلة للتحلل البيولوجي والبلاستيك الحيوي إلى ثلاثة أنواع رئيسة:

- قابلة للتحلل البيولوجي ومستندة على أساس النفط (أحفوري) .
- غير قابلة للتحلل الحيوي والمستندة إلى أساس إحيائي.
- غير قابلة للتحلل البيولوجي وقائمة على البترول معروفة بالبلاستيك، حيث يوضح **الشكل (1.I)** تصنيف البلاستيك حسب قابلية التحلل والمصدر القائم عليه[11].



الشكل (1.I) : تصنيف البلاستيك حسب قابلية التحلل والمصدر القائم عليه[12].

I.5.1 خصائص البلاستيك الحيوي

I.5.1.1 التحلل البيولوجي

يُعد معدل التحلل البيولوجي لمعظم أنواع البلاستيك الحيوي مُرتبطًا بشكل أساسي بمساحة سطح البوليمر، حيث يحدث التحلل الأنزيمي (مثلًا بواسطة إنزيمات دي بوليميراز PHA) بشكل رئيسي على سطح المادة ومع تسارع تحلل الطبقات السطحية خاصةً في التربة تصبح المادة أكثر خشونة، مما يُعرّض مساحة أكبر، ويُتيح التصاقًا أكبر للميكروبات، ويُسرّع من عملية التحلل، تتأثر هذه العملية بعوامل متعددة، منها التبلور، والشكل، وسُمك المادة، والمسامية، ودرجة الحرارة، ودرجة الحموضة، وكثافة الميكروبات وتنوعها، بالإضافة إلى تركيز الأملاح ،على سبيل المثال يتحلل PHA بسهولة بواسطة العديد من الكائنات الحية الدقيقة التي تعيش في التربة والرواسب، حيث يتحلل إلى قليل الوحدات وأحادي الوحدات، ويميل إلى أن يكون أكثر متانة من بعض البوليمرات الحيوية الأخرى، مثل تلك المُستخلصة من الأعشاب البحرية [13].

I.5.1.2 السمية البيئية بسبب تحلل البوليمر

عندما تتحلل المواد البلاستيكية التقليدية في التربة، تتفتت إلى جزيئات بلاستيكية دقيقة وتطلق مواد مضافة ضارة مثل ثنائي الفينول (BPA) ، أما المواد البلاستيكية القابلة للتحلل بالأكسجين، والمُعززة بالمعادن لتسريع تحللها، فقد تُطلق هذه المعادن في التربة، مما قد يُخل بتوازن العناصر الغذائية ويُلوث المياه الجوفية ، وبالمثل قد تُنتج المواد البلاستيكية الحيوية مثل حمض البولي لاكتيك (PLA) نواتج تحلل غير مكتملة أو ضارة تُلحق الضرر بالنظم البيئية المحيطة والشبكات الغذائية؛ فعلى سبيل المثال، ثبت أن تحلل حمض البولي لاكتيك في الرواسب البحرية يُغير التنوع الميكروبي، ويُسرع تحلل الكربون العضوي، ويُقلل من إطلاق النيتروجين العضوي، مع آثار طويلة الأمد محتملة على المجتمعات النباتية والحيوانية المحلية [14].

I.5.1.3 قابل للتسميد

صُممت المواد القابلة للتحلل الحيوي لتتحلل بالكامل إلى كتلة حيوية غنية بالعناصر الغذائية في غضون ثلاثة أشهر أو أقل في ظل الظروف المناسبة ولكي تُصنف المواد البلاستيكية الحيوية على أنها قابلة للتحلل الحيوي، يجب أن تتوافق مع معايير مثل معيار ASTM D6400 (المستخدم بشكل شائع في

الولايات المتحدة)، والذي يشترط التحلل الكامل دون أي بقايا مرئية أو مادية، ودون أي منتجات ثانوية سامة ، ومع ذلك تختلف بيئات التسميد اختلافًا كبيرًا: فالتسميد المنزلي أو في الحدائق لا تتجاوز درجة حرارته عادةً 40 درجة مئوية، ويكون أقل تحكمًا، بينما تعمل مرافق التسميد الصناعية في ظل ظروف مُحسّنة ودرجات حرارة أعلى لتحقيق تحلل أسرع، ولا تُحدد العديد من المواد البلاستيكية الحيوية المعتمدة وفقًا لمعيار ASTM D6400 بوضوح ما إذا كانت مناسبة للأنظمة المنزلية أو الصناعية، مما قد يؤدي إلى ضعف الأداء في أنظمة التسميد المنزلية ، في المقابل يشترط المعيار الأوروبي EN 13432 صراحةً إجراء الاختبارات في ظل ظروف التسميد الصناعية، ويُقيّم التحلل الحيوي، وقابلية التحلل، وعدم وجود بقايا ضارة (السمية البيئية) [15].

6.1.I تطبيقات البلاستيك الحيوي

البلاستيك الحيوي بخصائصه المتطورة وطرق إنتاجه المحسنة، يُدمج بشكل متزايد في تطبيقات متنوعة، وتتيح له مرونته استخدامه في قطاعات متعددة، مقدماً فوائد بيئية ووظيفية في الوقت ذاته، و يوضح **الشكل(2. I)** بعض تطبيقات البلاستيك الحيوي في صناعات مختلفة:

الشكل(2. I): تطبيقات البلاستيك الحيوي.

1.6.1.I صناعة التعبئة والتغليف

باعتبارها واحدة من أكبر مستهلكي المواد البلاستيكية، تخضع صناعة التغليف لتدقيق متزايد بشأن تأثيرها البيئي، مما دفع إلى تحول كبير نحو البلاستيك الحيوي كبديل أكثر استدامة ، يُستخلص البلاستيك الحيوي من موارد متجددة مثل الذرة وقصب السكر والمخلفات الزراعية، ويُوفر بصمة كربونية أقل، واعتمادًا أقل على الوقود الأحفوري، وخيارات محسّنة للتخلص منه في نهاية عمره الافتراضي، بما في ذلك قابليته للتحلل الحيوي والتسميد وإعادة التدوير ، في تطبيقات التغليف يُستخدم البلاستيك الحيوي مثل حمض البولي لاكتيك (PLA) والبولي هيدروكسي ألكانوات (PHA) بشكل متزايد في المنتجات ذات الاستخدام الواحد كحاويات الطعام الصلبة والمرنة والأغشية والأغلفة ، يُعزى هذا الانتشار المتزايد ليس فقط إلى انخفاض تأثيره البيئي وقدرته على التحلل في ظل ظروف معينة، بل أيضًا إلى خصائصه الوظيفية، بما في ذلك قوته الميكانيكية الكافية وخفة وزنه وقابليته للطباعة وشفافيته البصرية ، تُمكّن هذه الخصائص المصنّعين من الحفاظ على سلامة المنتج وجاذبيته على الرفوف مع الاستجابة لطلب المستهلكين والضغوط التنظيمية لحلول تغليف أكثر صداقة للبيئة [16], [17] .

2.6.1.I صناعة الطيران والفضاء

صناعة الطيران والفضاء تجد العناصر الحيوية الطبية وتطبيقات في الطيران والفضاء مجال المواد التي كان يهيمن عليها تقليديًا المواد عالية الأداء، ويعود استخدام المواد البلاستيكية الحيوية في الطيران والفضاء إلى تركيز الصناعة على الاستدامة والمساهمة في التأثير والتأثير البيئي .

تتزايد وتيرة استكشاف البلاستيك الحيوي في العديد من شركات الطيران والفضاء والمؤسسات البحثية ووكالات الفضاء لاستخدامه في المكونات الداخلية غير الأساسية والهياكل الثانوية مدفوعةً بأهداف الاستدامة وضرورة تقليل الوزن ومبادئ الاقتصاد الدائري، تشمل التطبيقات والأمثلة الرئيسية ما يلي:

تعمل شركة إيرباص بنشاط على تطوير البلاستيك الحيوي للمقصورات الداخلية للطائرات، بما في ذلك طاولات الطعام وأغطية مساند المقاعد وحجيرات التخزين ، تُسهم هذه المواد في خفض انبعاثات الإنتاج وتقليل وزن المكونات والحد من النفايات خلال دورة حياة المنتج ، وقد أجرت شركة بوينغ أبحاثًا حول المركبات الحيوية والبلاستيك الحيوي، لا سيما للمقصورات الداخلية للطائرات كجزء من جهود أوسع نطاقًا لدمج مواد مستدامة وتحسين الأداء البيئي لتصاميم طائراتها المستقبلية ، وتختبر وكالة ناسا البلاستيك

الحيوي مثل حمض البولي لاكتيك (PLA) لاستخدامه في تطبيقات غير هيكلية في مهمات الفضاء، تُستخدم هذه المواد في تصنيع الأجزاء الصغيرة والأدوات والنماذج الأولية بتقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد، مستفيدةً من خفة وزنها وقابليتها للتحلل الحيوي ، إلى جانب هذه الحالات المحددة، تُظهر المواد البلاستيكية الحيوية إمكانات واعدة في عدة مجالات:

- **المكونات خفيفة الوزن:** يجري تقييم مركبات البلاستيك الحيوي المدعمة بالألياف الطبيعية (مثل الكتان أو القنب) لاستخدامها في ألواح المقصورة، ووسائد المقاعد، وغيرها من العناصر غير الأساسية، حيث توفر نسبًا جيدة بين القوة والوزن، مما يدعم تحسين كفاءة استهلاك الوقود.
- **مواد العزل:** يجري تطوير المواد البلاستيكية الحيوية للعزل الحراري والصوتي في مقصورات الطائرات والمركبات الفضائية، مما يوفر مزايا بيئية مقارنةً بالبدائل الاصطناعية التقليدية، مع الحفاظ على الأداء الأمثل في التحكم بدرجة الحرارة والضوضاء، يركز البحث الجاري على تحسين الخصائص الأساسية مثل الثبات الحراري ومقاومة الحريق والمتانة، لتلبية معايير السلامة والأداء الصارمة في مجال الطيران، لا سيما في الظروف القاسية.

وعلى الرغم من أن المواد البلاستيكية الحيوية ليست مناسبة بعد للهياكل الحاملة للأحمال الأساسية، إلا أن استخدامها يتزايد باطراد في التطبيقات الثانوية والداخلية، حيث تُعطي الصناعة الأولوية لحلول المواد الأخف وزنًا والأكثر مراعاةً للبيئة واستدامة [18] .

3.6.1.I قطاع الرعاية الصحية

يشهد قطاع الرعاية الصحية إقبالاً متزايداً على استخدام البلاستيك الحيوي في مختلف التطبيقات مدفوعاً بقابليته للتحلل الحيوي وتوافقه الحيوي وتعدد استخداماته الوظيفية ، ومن أبرز استخداماته الخيوط الجراحية والشبكات الجراحية القابلة للتحلل الحيوي والتي تُغني عن الحاجة إلى إجراءات الإزالة وتقلل من مخاطر المضاعفات طويلة الأمد، وذلك بفضل تحللها الآمن داخل الجسم دون ترك أي مخلفات سامة [19] ، وفي التطبيقات الصيدلانية يُستخدم البلاستيك الحيوي في أنظمة توصيل الأدوية المُتحكم بها ، تُمكّن هذه الأجهزة القابلة للتحلل الحيوي من إطلاق مُستدام ومُوجّه للعوامل العلاجية كالمضادات الحيوية، مما يُحسّن التزام المريض بالعلاج، ويُقلل من عدد مرات تناول الجرعات، ويُعزز فعالية العلاج [20] .

وفي هندسة الأنسجة والطب التجديدي يُستخدم البلاستيك الحيوي مثل حمض البولي لاكتيك (PLA) والبولي كابرولاكتون(PCL) في تصنيع هياكل مسامية تدعم مؤقتاً التصاق الخلايا وتكاثرها وتكوين الأنسجة، تتحلل هذه الهياكل بمعدل قابل للتعديل وتُمتص تدريجياً مع تجدد الأنسجة الأصلية [20] .

إضافةً إلى ذلك تتميز الضمادات المتطورة للجروح المصنوعة من البلاستيك الحيوي بخصائص مضادة للميكروبات وتوازن مثالي للرطوبة ونفاذية للأكسجين، مما يخلق بيئة مواتية لتسريع الشفاء والسيطرة على العدوى، وتؤكد هذه الابتكارات مجتمعةً على الإمكانات التحويلية للبلاستيك الحيوي في حلول الرعاية الصحية الحديثة والمستدامة والتي تركز على المريض [21].

7.1.I مزايا وعيوب البلاستيك الحيوي

لبلاستيك الحيوي عدة مزايا وعيوب كما هو موضح في **الجدول (1.I):**

الجدول (1.I): مزايا وعيوب البلاستيك الحيوي [22] .

البلاستيك الحيوي	المزايا	العيوب
المصنوع من النشاء	– قابل للتحلل الحيوي، متوافق حيوياً، صالح للأكل. – استخلاص بسيط، منخفض التكلفة. – عديم الرائحة والطعم، غير سام. – يحتوي على مضادات أكسدة طبيعية.	– ضعف في المتانة الميكانيكية. – مقاومة منخفضة لبخار الماء، وثبات ضعيف في حالة التجمد. – غير متجانس عند الذوبان. – غير مناسب للعمليات التي تتطلب ضغطًا عاليًا وحرارة عالية.
أساس السيليلوز	– خصائص ميكانيكية قوية. – مواد خام متعددة الاستخدامات وسهلة التوفر. – قابلة للتحلل الحيوي وشفافة.	– تكلفة إنتاج عالية، ومعدلات إنتاج منخفضة. – يُضعف الماء الروابط الهيدروجينية، مما يُؤثر سلبًا على المتانة.

		– تُؤدي الفراغات إلى عيوب هيكلية، مما يُقلل من السلامة الميكانيكية بعد إعادة التبلل .
الشيتوزان	– نتاج بسيط وفعّال من حيث التكلفة. – امتصاص منخفض للماء (أقل من 20%). – مقاومة ممتازة للمذيبات والماء. – قابل لإعادة التدوير بسهولة في ظروف معتدلة.	– تحديات في قابلية التوسع وكفاءة التصنيع. – مشاكل في الإنتاج على نطاق واسع تعيق التطبيق على نطاق أوسع.
الهيميسليلوز	– متجدد، قابل للتحلل الحيوي، متوافق حيوياً. – غير سام. – فعال من حيث التكلفة. – يمكن تعديله كيميائياً أو فيزيائياً لتحسين قوته الميكانيكية. – يتميز بخصائص عزل ممتازة، خاصة ضد الأكسجين.	– محب للماء، حساس للرطوبة. – عدم القدرة على تكوين أغشية قائمة بذاتها من الهيميسليلوز المشتق من الخشب. – هش، عرضة للتشقق أثناء التصنيع.
الدهون	– معامل مرونة عالٍ، ومقاومة جيدة للصدمات. – بوليستر أميدات قوي مستخلص من زيوت نباتية. – قابل لإعادة التدوير بشكل مستدام دون فقدان الأداء.	– انخفاض مقاومة الخضوع والاستطالة عند نقطة الخضوع. – الطبيعة الكارهة للماء تبطئ التحلل.

I.8.1.1 الفرق بين البلاستيك الحيوي والبلاستيك العادي

يكمن الاختلاف الرئيسي بين البلاستيك الحيوي والبلاستيك التقليدي (الاصطناعي) في أصلهما وسلوك تحللهما وأدائهما البيئي العام ، فالبلاستيك التقليدي المشتق من الوقود الأحفوري عادةً ما يكون غير

قابل للتحلل الحيوي ويبقى في البيئة لقرون ، في المقابل يظهر البلاستيك الحيوي قابليته للتحلل الحيوي بمعدل تحلل أعلى بكثير نظرًا لتوافره الحيوي الأكبر مما يُمكّنه من التحلل بسرعة أكبر بفعل الكائنات الحية الدقيقة وبالتالي تقليل حجم النفايات ، توفر تقييمات دورة الحياة مقارنة شاملة عبر فئات تأثير متعددة بما في ذلك استنزاف الموارد غير الحيوية (التي غالبًا ما تكون أقل بالنسبة للبلاستيك الحيوي نظرًا لاستخدام مواد خام متجددة) والسمية البشرية والسمية المائية للمياه العذبة والبحرية والتحمض والسمية البيئية الأرضية ، في حين أن المواد البلاستيكية الحيوية غالباً ما تُظهر مزايا في مجالات مثل تقليل استنزاف الموارد الأحفورية وانخفاض انبعاثات غازات الاحتباس الحراري في بعض الحالات[23] .

يلخص **الجدول (2.I)** الفرق بين البلاستيك الحيوي والبلاستيك العادي:

الجدول (2.I): الفرق بين البلاستيك الحيوي والبلاستيك العادي[24].

معايير المقارنة	البلاستيك الحيوي	البلاستيك العادي
قابلية التجديد	نعم	لا
الاستدامة	نعم	لا
التفكك في البيئة	قابل لتحول البيولوجي	قابل لتحول البيولوجي
مجموعة البوليمر	محدود السلسلة	بوليمر واسع
معدل الانبعاثات الكربونية	منخفض	مرتفع
كثافة استهلاك الطاقة الاحفورية	منخفض	مرتفع
استخدام الأراضي الصالحة للزراعة	مصدره	ليست مصدره

9.1.I الأهمية الاقتصادية للبلاستيك الحيوي

يكتسب البلاستيك الحيوي أهمية اقتصادية متزايدة كأحد ركائز التحول نحو الاقتصاد الأخضر والمستدام ، حيث يساهم في تقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري المستخدم في صناعة البلاستيك التقليدي، مما يخفض تكاليف الطاقة والانبعاثات الغازية الناجمة عن الإنتاج والحرق ، كما أن اعتماده على مصادر متجددة (كالنباتات والمنتجات الحيوانية) يعزز الاستثمار في القطاع الزراعي، مما يخلق فرص عمل جديدة ويحسن الدخل الفردي ، إضافة إلى ذلك فإن قابلية هذه المواد للتحلل السريع في الطبيعة وإمكانية إعادة

تدويرها بسهولة تساهم في خفض التكاليف المرتبطة بإدارة النفايات ومعالجة التلوث، مع إتاحة المجال لإعادة استخدامها مرات عديدة، مما يحقق قيمة مضافة تدعم استدامة الموارد وتحمي النظام البيئي البحري والبري [25].

2.I البازلاء

تعد البازلاء الخضراء (*Pisum sativum*) من أقدم البقوليات المزروعة إذ يمتد تاريخ زراعتها لأكثر من 9000 عام في منطقة الشرق الأدنى والبحر الأبيض المتوسط قبل أن تنتشر في جميع أنحاء العالم [26]، واليوم تُعتبر البازلاء محصولًا خضريًا عالميًا رئيسيًا، تُستهلك طازجة أو مجمدة أو معلبة أو مجففة ، ومع ذلك ينتج الإنتاج واسع النطاق للبازلاء كميات هائلة من المخلفات الزراعية، بما في ذلك القشور والسيقان والأوراق وحبيبات البازلاء غير المطابقة للمواصفات، والتي تصل إلى آلاف الأطنان سنويًا ، ويتم التخلص من معظم هذه المخلفات حاليًا من خلال ممارسات ضارة بالبيئة كالحرق أو الطمر [27] ، مما يؤدي إلى هدر الموارد والتلوث ، وعليه يهتم الباحثون بشكل متزايد عن طرق للاستفادة من مخلفات البازلاء عن طريق تحويلها إلى منتجات قيّمة، مثل علف الحيوانات والأسمدة العضوية ومصادر المركبات النشطة بيولوجيًا للاستخدامات الغذائية والصيدلانية [28] .

الشكل(3.I): نبات البازلاء

1.2.I توصيف نبات البازلاء

يتميز نبات البازلاء بجذره الوتدي الذي يحتوي على عُقيدات بكتيرية تساهم في تثبيت النيتروجين من الهواء مما يغني عن استخدام الأسمدة النيتروجينية في كثير من الأحيان [29] ، ساقه عشبية يتراوح طولها بين 60 و120 سم وقد تصل إلى 3 أمتار في بعض الأصناف وتكون إما منتصبة أو متسلقة مما يستدعي توفير دعامات لها ، أوراقه مركبة ومتبادلة تنتهي بخيوط ملتفة تساعد النبات على التسلق وتحمل الأوراق زوائد ورقية كبيرة ووريقات بيضاوية في بعض الأصناف الحديثة، تتحول الأوراق إلى محاليق بشكل شبه كامل ، أزهار البازلاء فراشية الشكل تحمل ألوانًا أبيض أو أرجواني أو وردي وتظهر في عناقيد الخارجة من الزوايا بين الساق والاوراق ، ثمارها موجودة في القرون على شكل بذور مستديرة قد تكون ملساء أو مجعدة، وتتميز بلونها الأخضر الفاتح وطعمها الحلو [30] .

تُزرع البازلاء بأنواع متعددة منها بازلاء الحدائق وبازلاء الثلجية (المانجتو) وبازلاء السكرية المهجنة بين بازلاء الحدائق وبازلاء الثلج، إضافة إلى أصناف مخصصة للحقول والعلف لها تاريخ زراعي طويل في مناطق مختلفة منها الجزائر حيث ترد في سجلات نباتية قديمة وذلك بفضل قدرتها على تثبيت النيتروجين، تُعد البازلاء محصولًا مهمًا لتحسين خصوبة التربة، إضافة إلى قيمتها الغذائية للإنسان والحيوان [31] .

2.2.I التركيب المورفولوجي لنبات البازلاء

❖ نظام الجذور

تمتد جذور نبات البازلاء في التربة إلى عمق يتراوح بين 60 و80 سم مما يسمح لها بامتصاص الماء والمغذيات من الطبقات العميقة وتتفرع الجذور الجانبية والثالثية من هذا الجذر الرئيسي [32] ، تتشكل عُقيدات بكتيرية في المراحل الأخيرة من الإزهار التي تعمل على تثبيت النيتروجين الجوي، وبالتالي تحسين خصوبة التربة وتقليل الحاجة إلى الأسمدة النيتروجينية [33] .

❖ الساق والفروع

الساق عشبي، مجوف، ورفيع، ويتراوح ارتفاعه بين 25 سم و2 متر حسب الصنف (الأصناف القزمية، وشبه الخشبية، والخشبية)، يتكون الجزء الهوائي من ساق رئيسي وفروع جانبية تنشأ من براعم جانبية تحمل العُقد السفلية الأوراق فقط، بينما تحمل العُقد العلوية الأزهار والقرون [34]، [35] .

❖ **الأوراق**

الأوراق شمعية الملمس تتكون من عدة وريقات صغيرة تتصل بعرق وسط واحد يمتد بطول الورقة بحيث يشبه شكلها ريشة الطير وتكون من 4 إلى 6 وريقات مرتبة بالتناوب وذات شكل بيضوي ولها حواف كاملة أو مسننة قليلاً، يتراوح لونها بين الأخضر المصفر والأخضر المزرق وتنتهي كل ورقة بمحاليق (خيوط ملتوية) تساعد النبات على التسلق [36], [37] .

❖ **الأزهار والثما**

تظهر الأزهار في عناقيد عند قاعدة الأوراق (الزاوية بين الساق والورقة)، بعد الإخصاب تتطور الأزهار إلى قرون بذرية (تشبه قرون البازلاء)، يختلف عدد الأزهار والقرون والبذور باختلاف نوع النبات [38].

3.2.I أهمية البازلاء

تعدّ البازلاء (*Pisum sativum*) من أهم المحاصيل البقولية في العالم وذلك لما تتمتع به من قيمة غذائية عالية فهي مصدر غني بالبروتين والألياف والفيتامينات الضرورية للاستهلاك البشري، علاوة على ذلك فإنّ لها قدرة فريدة على تثبيت النيتروجين الجوي من خلال التكافل الجذري مما يساهم في تحسين خصوبة التربة ويجعلها ذات ركيزة أساسية للأنظمة الزراعية المستدامة، ونظرا لهذه الاهمية تُزرع البازلاء على نطاق واسع للأغراض متعددة ملخصة في **الجدول(3.I):**

الجدول(3.I): الأغراض التي تزرع من أجلها البازلاء.

الغرض	شرحه
الاستهلاك	البازلاء غنية بالعناصر الغذائية، والجزء الصالح للأكل منها هو البذور، مع أن بعض الأصناف، كالبازلاء الحلوة، تُنتج قرونًا صالحة للأكل [39] .
العلف	تُزرع بعض أصناف البازلاء من أجل قرونها الكاملة، التي تُستخدم كعلف للحيوانات [40] .
السماد العضوي	تُستخدم مخلفات نبات البازلاء كسماد أخضر [41] .

البحث العلمي	تشتهر البازلاء بثباتها وهو ما شكّل أساس تجارب Gregor Mendel التي أرست دعائم علم الوراثة [41] .

4.2.I مخلفات البازلاء

تُنتج صناعة البازلاء كميات كبيرة من النفايات التي تُشكّل تحديات اقتصادية وبيئية، نظرًا لارتفاع تكاليف التخلص منها وتراكمها [42] ، تُمثّل قرون البازلاء (الغلاف الخارجي السميك لثمرة البازلاء المنفصلة عن غلاف البذرة) جزءًا كبيرًا من النبات ويتم التخلص منها في الغالب ، على الصعيد العالمي تحتل الهند المرتبة الثانية عالميًا في إنتاج البازلاء حيث يبلغ إنتاجها السنوي حوالي 4 ملايين طن ما يُعادل 22.9% من إجمالي الإنتاج مع ذلك لا يُستعاد سوى 45-50% من البازلاء الخضراء للاستهلاك البشري، بينما الجزء المتبقي معظمه من القرون يتخلص منه كنفايات ويزيد من حدة المشكلة ان موسمية البازلاء وسرعة تلفها إلى تجميدها بكميات اكبر لتوفيرها لفترات أطول، ما يُؤدي إلى كميات أكبر من نفايات القرون كمنتج ثانوي صلب .

الشكل(4.I): قشور البازلاء.

5.2.I التطبيقات المحتملة لقشور البازلاء

على الرغم من التحديات البيئية التي تُشكّلها مخلفات قشور البازلاء، إلا أنها تُمثّل مورداً واعداً يُمكن استخدامه في العديد من التطبيقات الصناعية والبيولوجية، مما يُحوّلها من عبء بيئي إلى مورد اقتصادي قيّم، ومن أبرز هذه التطبيقات:

- **إنتاج السليلوز:** دُرست نفايات قشور البازلاء كمصدر للكربون لإنتاج السليلوز، حيث حُددت الظروف المثلى عند 30 درجة مئوية ودرجة حموضة 0.5 ، يوفر استخدام هذه المادة الرخيصة نهجًا جديدًا وفعالًا من حيث التكلفة لإنتاج السليلوز وإدارة النفايات الصلبة [42] .
- **توليد الطاقة الحيوية:** تُظهر هذه النفايات إمكانية إنتاج الطاقة الحيوية من خلال التحلل الحراري [43]، وكعلف لإنتاج الإيثانول الحيوي، حيث تتجاوز تكاليف المواد الخام عادةً 58% من نفقات الإنتاج [44].

يؤدي الغلاف نفسه وظائف بيولوجية متعددة فهو يوفر غطاء واقي للبذور النامية، ويعمل في الوقت نفسه كمخزن وناقل للمكونات النباتية القابلة للذوبان، و يمثل الاعتراف بمخلفات قشور البازلاء كمصدر طاقة غير مُستغل تحولاً نحو تقدير قيمة المواد التي كانت تُعتبر سابقًا غير مجدية اقتصاديا [42].

خلاصة الفصل

البلاستيك الحيوي يعتبر بديلاً مستداماً للبلاستيك التقليدي، إذ يتميز بقابليته للتحلل وتعدد مصادره الطبيعية وتطبيقاته الواسعة في التغليف والرعاية الصحية، وفي سياق الاستفادة من المخلفات الزراعية تبرز البازلاء *(Pisum sativum)* كنموذج استراتيجي، حيث يمكن تحويل قشورها إلى موارد قيّمة مثل الأغشية القابلة للتحلل، وفي النهج علمي يُساهم دمج ألياف السليلوز النانوية المستخلصة من قشور البازلاء في جعل البلاستيك الحيوي أكثر صلابة ومقاوم للرطوبة، مما يرفع أداءه ويحسن عائده الاقتصادي.

قائمة مراجع الفصل الأول:

[1] Y. Sarkingobir and A. A. Lawal, "Bioplastics: their advantages and concerns," *Mater. Metallurg. Eng*, vol. 11, no. 1, pp. 13–18, 2021.

[2] A. K. Maurya, F. M. de Souza, T. Dawsey, and R. K. Gupta, "Biodegradable polymers and composites: Recent development and challenges," *Polym. Compos.*, vol. 45, no. 4, pp. 2896–2918, Mar. 2024, doi: 10.1002/pc.28023.

[3] S. Jayarathna, M. Andersson, and R. Andersson, "Recent Advances in Starch-Based Blends and Composites for Bioplastics Applications," *Polymers (Basel).*, vol. 14, no. 21, p. 4557, Oct. 2022, doi: 10.3390/polym14214557.

[4] Md. T. Hossain *et al.*, "Cellulose and starch-based bioplastics: a review of advances and challenges for sustainability," *Polymer-Plastics Technology and Materials*, vol. 63, no. 10, pp. 1329–1349, Jul. 2024, doi: 10.1080/25740881.2024.2329980.

[5] Y. Huang, "Lignin Modification and its Application in Polymeric Materials," *MATEC Web of Conferences*, vol. 386, p. 01012, Nov. 2023, doi: 10.1051/matecconf/202338601012.

[6] I. Ben Amor, H. Hemmami, S. E. Laouini, A. G. Abdelaziz, and A. Barhoum, "Influence of chitosan source and degree of deacetylation on antibacterial activity and adsorption of AZO dye from water," *Biomass Convers. Biorefin.*, vol. 14, no. 14, pp. 16245–16255, Jul. 2024, doi: 10.1007/s13399-023-03741-9.

[7] I. Ben Amor, H. Hemmami, S. E. Laouini, H. Ben Temam, H. Zaoui, and A. Barhoum, "Biosynthesis MgO and ZnO nanoparticles using chitosan extracted from Pimelia Payraudi Latreille for antibacterial applications," *World J. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 39, no. 1, p. 19, Jan. 2023, doi: 10.1007/s11274-022-03464-5.

[8] G. Fredi and A. Dorigato, "Recycling of bioplastic waste: A review," Jul. 01, 2021, *KeAi* Communications *Co.* doi: 10.1016/j.aiepr.2021.06.006.

[9] Z. Cai, J. Yang, H. Fang, T. Ji, Y. Hu, and X. Wang, "Research on Waste Plastics Classification Method Based on Multi-Scale Feature Fusion," *Sensors*, vol. 22, no. 20, p. 7974, Oct. 2022, doi: 10.3390/s22207974.

[10] N. F. Zaaba and M. Jaafar, "A review on degradation mechanisms of polylactic acid: Hydrolytic, photodegradative, microbial, and enzymatic degradation," *Polym. Eng. Sci.*, vol. 60, no. 9, pp. 2061–2075, Sep. 2020, doi: 10.1002/pen.25511.

[11] X. Zhang, Z. Yin, S. Xiang, H. Yan, and H. Tian, "Degradation of Polymer Materials in the Environment and Its Impact on the Health of Experimental Animals: A Review," *Polymers (Basel).*, vol. 16, no. 19, p. 2807, Oct. 2024, doi: 10.3390/polym16192807.

[12] X. Zhao *et al.*, "Sustainable bioplastics derived from renewable natural resources for food packaging," *Matter*, vol. 6, no. 1, pp. 97–127, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.matt.2022.11.006.

[13] G. Bishop, D. Styles, and P. N. L. Lens, "Environmental performance of bioplastic packaging on fresh food produce: A consequential life cycle assessment," *J. Clean. Prod.*, vol. 317, p. 128377, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.128377.

[14] S. Kakadellis and Z. M. Harris, "Don't scrap the waste: The need for broader system boundaries in bioplastic food packaging life-cycle assessment – A critical review," *J. Clean. Prod.*, vol. 274, p. 122831, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122831.

[15] F. S. Shahar, T. S. Balakrishnan, and M. T. Hameed Sultan, "The Evolution and Environmental Prospects of Renewable Bioplastics: Types, Production Methods, and Sustainability," *J. Renew. Mater.*, vol. 13, no. 6, pp. 1071–1101, 2025, doi: 10.32604/jrm.2024.02024-0011.

[16] V. Upadhayay, S. Verma, and A. Kuila, "Production of poly hydroxy butyrate (PHB) from Eichhornia crassipes through microbial fermentation process," *Plant Science Today*, vol. 6, no. sp1, pp. 541–550, Dec. 2019, doi: 10.14719/pst.2019.6.sp1.673.

[17] M. He *et al.*, "Biocompatible and Biodegradable Bioplastics Constructed from Chitin via a 'Green' Pathway for Bone Repair," *ACS Sustain. Chem. Eng.*, vol. 5, no. 10, pp. 9126–9135, Oct. 2017, doi: 10.1021/acssuschemeng.7b02051.

[18] S. Buonvino, M. Ciocci, F. Nanni, I. Cacciotti, and S. Melino, "New vegetable-waste biomaterials by Lupin albus L. as cellular scaffolds for applications in biomedicine and food," *Biomaterials*, vol. 293, p. 121984, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.biomaterials.2022.121984.

[19] S. Huang, Q. Dong, S. Che, R. Li, and K. H. D. Tang, "Bioplastics and biodegradable plastics: A review of recent advances, feasibility and cleaner production," *Science of The Total Environment*, vol. 969, p. 178911, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.scitotenv.2025.178911.

[20] Ş. N. Erkul, M. Karahan, and A. Ari, "A Sustainable Approach to Plastics; Bioplastics," *RECENT - REzultatele CErcetărilor Noastre Tehnice*, vol. 24, no. 1, pp. 29–50, Feb. 2023, doi: 10.31926/RECENT.2023.69.029.

[21] I. S. Sidek, S. F. S. Draman, S. R. S. Abdullah, and N. Anuar, "CURRENT DEVELOPMENT ON BIOPLASTICS AND ITS FUTURE PROSPECTS: AN INTRODUCTORY REVIEW," *INWASCON Technology Magazine*, pp. 03–08, Oct. 2019, doi: 10.26480/itechmag.01.2019.03.08.

[22] N. Singh, O. A. Ogunseitan, M. H. Wong, and Y. Tang, "Sustainable materials alternative to petrochemical plastics pollution: A review analysis," *Sustainable Horizons*, vol. 2, p. 100016, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.horiz.2022.100016.

[23] A. Mikić, A. Medović, Ž. Jovanović, and N. Stanisavljević, "Integrating archaeobotany, paleogenetics and historical linguistics may cast more light onto crop domestication: The case of pea (Pisum sativum)," *Genet. Resour. Crop Evol.*, vol. 61, no. 5, pp. 887–892, 2014, doi: 10.1007/s10722-014-0102-9.

[24] K. Garg *et al.*, "Enhancing agricultural output: Investigating the impact of advanced organic formulations on crop productivity, nutrient use efficiency, and profitability in a multi-crop system," *J. Environ. Manage.*, vol. 366, p. 121759, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.jenvman.2024.121759.

[25] R. Fatima *et al.*, "Bridging sustainability and industry through resourceful utilization of pea pods- A focus on diverse industrial applications," *Food Chem. X*, vol. 23, p. 101518, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.fochx.2024.101518.

[26] T. J. Underwood and P. S. Poole, "Resource allocation in the nodules of the *Pisum sativum* - *Rhizobium* symbiosis," Aug. 25, 2025. doi: 10.1101/2025.08.21.671492.

[27] C. Toker and H. Sari, "Phylogenetic relationship among taxa in the genus Pisum L. based on morphological traits," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 458, no. 1, p. 012043, Feb. 2020, doi: 10.1088/1755-1315/458/1/012043.

[28] O. Leila, A. Farida, R.-B. Hafida, and A. Aissa, "Agro-morphological diversity within field pea (Pisum sativum L.) genotypes," *Afr. J. Agric. Res.*, vol. 11, no. 40, pp. 4039–4047, Oct. 2016, doi: 10.5897/AJAR2016.11454.

[29] F. Tricot, Y. Crozat, and S. Pellerin, "Root system growth and nodule establishment on pea (*Pisum sativum* L.)," *J. Exp. Bot.*, vol. 48, no. 11, pp. 1935–1941, 1997, doi: 10.1093/jxb/48.11.1935.

[30] Z. Hossain, X. Wang, C. Hamel, and Y. Gan, "Nodulation and nitrogen accumulation in pulses vary with species, cultivars, growth stages, and environments," *Canadian Journal of Plant Science*, vol. 98, no. 3, pp. 527–542, Jun. 2018, doi: 10.1139/cjps-2017-0114.

[31] C. Feng *et al.*, "Genomic and genetic insights into Mendel's pea genes," *Nature*, vol. 642, no. 8069, pp. 980–989, Jun. 2025, doi: 10.1038/s41586-025-08891-6.

[32] M. Thirumalai *et al.*, "A comprehensive assessment of vegetable pea (Pisum sativum L.) germplasm integrating multivariate data analysis with agro-morphological and biochemical characterisation," *J. Agric. Food Res.*, vol. 23, p. 102253, Oct. 2025, doi: 10.1016/j.jafr.2025.102253.

[33] R. Liu *et al.*, "Population genetic structure and classification of cultivated and wild pea (*Pisum* sp.) based on morphological traits and SSR markers," *J. Syst. Evol.*, vol. 60, no. 1, pp. 85–100, Jan. 2022, doi: 10.1111/jse.12710.

[34] J. Singh and R. K. Dhall, "Genetic variability parameters of yield and quality attributes in vegetable pea (Pisum sativum L.)," *Genetika*, vol. 50, no. 1, pp. 153–170, 2018, doi: 10.2298/GENSR1801153S.

[35] T. Mekwilai, N. Vichiansan, S. Braspaiboon, and K. Leksakul, "Low-vacuum plasma-assisted extraction of anthocyanins from butterfly pea (Clitoria ternatea) flowers," *Applied Food Research*, vol. 5, no. 2, p. 101271, Dec. 2025, doi: 10.1016/j.afres.2025.101271.

[36] H. Ram, N. K. Hedau, G. V. Chaudhari, and L. Kant, “Peas with zero shelling edible pods: A review,” *Sci. Hortic.*, vol. 288, p. 110333, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.scienta.2021.110333.

[37] H. Cicek, J. R. T. Martens, K. C. Bamford, and M. H. Entz, “Forage potential of six leguminous green manures and effect of grazing on following grain crops,” *Renewable Agriculture and Food Systems*, vol. 30, no. 6, pp. 503–514, Dec. 2015, doi: 10.1017/S1742170514000349.

[38] H. Zhang, H. Sun, Z. Tang, and G. Wang, “Integrated agronomy of pea (Pisum sativum L.): a review on cultivation, harvesting, and storage for sustainable agriculture,” *Front. Plant Sci.*, vol. 16, Sep. 2025, doi: 10.3389/fpls.2025.1670445.

[39] N. Verma, M. C. Bansal, and V. Kumar, “PEA PEEL WASTE: A LIGNOCELLULOSIC WASTE AND ITS UTILITY IN CELLULASE PRODUCTION BY Trichoderma reesei UNDER SOLID STATE CULTIVATION.”

[40] A. S. Lozano Pérez, V. Romero Mahecha, and C. A. Guerrero Fajardo, “Hydrothermal Valorization of Peapods and Coffee Cherry Waste: Comparative Analysis of Organic and Inorganic Acid Catalysis and Evaluation of Biomass’ Influence on Catalytic Efficiency,” *Resources*, vol. 14, no. 6, p. 92, May 2025, doi: 10.3390/resources14060092.

[41] R. Fatima *et al.*, “Bridging sustainability and industry through resourceful utilization of pea pods- A focus on diverse industrial applications,” *Food Chem. X*, vol. 23, p. 101518, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.fochx.2024.101518.

الفصل الثاني

التصاميم التجريبية والتحليل الاحصائي

تمهيد

يعتمد البحث العلمي الحديث على التصميم التجريبي (Design of Experiments) كإطار منظم لتخطيط التجارب عبر التغيير المنهجي للعوامل المستقلة وفق مبادئ إحصائية، خصوصًا في مجالات الدراسة التجريبية وتحسين العمليات، مما يسمح باستخلاص أقصى معلومات بأقل عدد من التجارب، ويحسّن دقة النتائج وقابليتها للتكرار مع تحديد الظروف المثلى و التحكم في التباين العشوائي لتقليل الوقت والتكلفة، ويتكامل ذلك مع التحليل الإحصائي الذي يفسر البيانات باستخدام أدوات مثل تحليل الانحدار الخطي المتعدد وتحليل التباين (ANOVA) لبناء نماذج رياضية تصف العلاقات بين المتغيرات، مع تقييم كفاءة النموذج وأهمية العوامل والتفاعلات، عبر مؤشرات تشخيصية مثل R^2 وR^2adj و$p\text{-value}$ وVIF، مما يوفر معايير موضوعية للتحقق من جودة النموذج [1]،[2].

يعالج هذا الفصل هذه المجالات المترابطة يبدأ بمبادئ تصميم التجارب، ثم ينتقل إلى دراسة التقنيات الإحصائية الأساسية والمعاملات الضرورية لبناء النموذج والتحقق من صحته وتفسيره، لتحويل البيانات التجريبية الخام إلى معرفة موثوقة وقابلة للتطبيق من خلال أدوات منهجية.

1.II التصاميم التجريبية

في العصر الحديث بات تحسين العمليات التجريبية وتقليل عدد التجارب ضرورة ملحة في جميع المجالات العلمية والصناعية، وتواجه المؤسسات البحثية والصناعية تحديات متزايدة في الحصول على نتائج دقيقة وموثوقة في أقصر وقت ممكن وبأقل تكلفة وفي هذا السياق تبرز أهمية تصميم التجارب كأداة إحصائية ومنهجية تهدف إلى تنظيم التجارب وتحليل النتائج بطريقة علمية دقيقة[3].

يُمكّن تصميم التجارب من تنظيم اختبارات مثلى تُصاحب البحوث العلمية أو الدراسات الصناعية وهو قابل للتطبيق في العديد من التخصصات، مما يسمح بالحصول على أقصى قدر من المعلومات بأقل عدد من التجارب [4].

1.1.II لمحة تاريخية

يعتمد البحث العلمي الحديث اعتمادًا كبيرًا على التصاميم التجريبية، يُعرف الإحصائي البريطاني رونالد فيشر (Ronald A. Fisher) (1890-1962) بتطويره لمبدأ تحليل التباين (ANOVA) في

الإحصاء بدأ اهتمامه بالتقنيات التجريبية بعد انضمامه إلى محطة روتهامستيد التجريبية في إنجلترا عام 1919[5] .

يشمل عمل فيشر مفاهيم أساسية مثل التكرار والعشوائية في مخططات التقسيم المُسماة وقد تبنى المتخصصون الزراعيون أفكاره في عشرينيات القرن الماضي، ثم طُوّرت لاحقًا لتشمل مفاهيم جديدة مثل مخططات (Plackett–Burman) ومنهجية سطح الاستجابة (RSM)[6] .

2.1.II مبدأ عمل التصميم التجريبي

استنادًا إلى المبادئ التي وضعها رونالد فيشر في كتابه تصميم التجارب (1935)، يرتكز تصميم التجارب على أربعة مبادئ أساسية:

1. التوزيع العشوائي

التوزيع العشوائي هو عملية تخصيص المعالجات المختلفة عشوائيًا لوحدات التجربة، بحيث يكون لكل وحدة فرصة متساوية لتلقي أي معالجة، ومن أهداف التوزيع العشوائي ما يلي:

- منع التحيز في توزيع المعالجات
- توزيع العوامل المجهولة بالتساوي بين المجموعات
- تمكين إجراء تحليل إحصائي دقيق

2. التكرار

هو تخصيص عدد كافٍ من الوحدات التجريبية في كل مجموعة معاملة، بهدف:

- تقليل التباين العشوائي في النتائج
- تقدير الخطأ التجريبي بدقة
- الكشف عن الفروق الحقيقية بين المعاملات

3. الضبط

هو مقارنة معاملتين أو أكثر في ظروف متجانسة، مع مجموعة ضابطة لا تتلقى أي معاملة، ومن أهداف المجموعة الضابطة ما يلي:

- عزل تأثير العلاج عن العوامل الأخرى

- توفير أساس للمقارنة
- تحديد ما إذا كان التغير في المتغير التابع ناتجًا عن العلاج أم عن عوامل أخرى.

4. التقسيم الى بلوكات (Blocking)

يتضمن هذا الأسلوب تجميع الوحدات التجريبية المتشابهة في مجموعات بناءً على خاصية معروفة قد تؤثر على النتائج (مثل خصوبة التربة في التجارب الزراعية أو الدفعات في التجارب المختبرية)، ثم توزيع المعاملات عشوائيًا داخل كل مجموعة [7].

3.1.II تعريف التصميم التجريبي

هو مجموعة من المناهج الإحصائية والمنهجية المنظمة التي تهدف إلى تخطيط التجارب العلمية وإجرائها وتحليلها بطريقة تضمن نتائج موثوقة وقابلة للتفسير بأقل جهد وتكلفة، يتضمن التصميم التجريبي تحديد كيفية اختيار الوحدات التجريبية، وتوزيع المعاملات بينها، وجمع البيانات وتحليلها لضمان أن تعكس النتائج علاقات حقيقية بين المتغيرات، وليست مجرد نتيجة للصدفة أو التحيز [8].

4.1.II أهداف التصاميم التجريبية

تساهم التصاميم التجريبية في تطوير البحث العلمي والصناعي بشكل كبير حيث لا تقتصر فائدتها على مجرد إجراء التجارب بل تمتد لتحقيق أهداف استراتيجية تُحسّن المخرجات وتُخفّض التكاليف[9].

يوضح **الجدول (1.II)** هذه الأهداف إلى جانب وظيفتها الأساسية :

الجدول (1.II): الأهداف الرئيسية للتصاميم التجريبية وغرضها العملي[9].

الهدف	الغرض العملي
تحسين الجودة	تعزيز جودة المنتجات أو العمليات أو نتائج التحليل.
خفض التكاليف	تحقيق النتائج المرجوة مع تقليل النفقات والوقت واستهلاك المواد.
دراسة المتغيرات	دراسة وفهم تأثير العوامل المختلفة على الاستجابة المدروسة.
تحقيق دقة اعلى	لحصول على نتائج أكثر دقة وموثوقية إحصائية مقارنةً بالطرق التقليدية التي تعتمد على دراسة عامل واحد في كل مرة.

5.1.II المفاهيم الأساسية للتصاميم التجريبية

❖ المتغيّرات

في تصميم التجارب تُشير المتغيرات (العوامل) إلى عناصر الإدخال في النظام التي يدرسها الباحثون ويضبطونها لفهم تأثيرها على النتيجة النهائية ، يمكن قياس هذه العوامل أو ملاحظتها أو وصفها، وقد تكون كمية أو نوعية ، تُقسم عمومًا إلى :

- ❖ عوامل قابلة للتحكم والتي يمكن للمُجرِّب اختيارها وتغييرها مباشرةً (مثل درجة الحرارة أو الضغط أو نوع المادة)
- ❖ عوامل غير قابلة للتحكم والتي تتغير بشكل مستقل (مثل الطقس أو الظروف البيئية).

تُعرف العوامل التي نهدف إلى تحليلها بشكل أساسي بعوامل الإدخال مثل المواد الخام وسرعة التحريك والتركيز [10]، ووفقًا لطبيعتها تُصنف العوامل المدروسة إلى الأنواع الموضحة في **الجدول (2.II)**.

الجدول (2.II): أنواع العوامل في التصاميم التجريبية وفقا لطبيعتها[10].

نوع العامل	الوصف والأمثلة
العوامل الكمية المستمرة	يمكن أن تأخذ هذه العوامل أي قيمة ضمن نطاق معين، مثل درجة الحرارة أو الضغط أو التركيز أو سرعة التحريك.
العوامل الكمية غير المتصلة (المنفصلة)	لها قيم محددة ومنفصلة، مثل عدد أو نوع الكواشف المستخدمة.
العوامل النوعية	هي عوامل وصفية وغير رقمية مثل طبيعة العملية (مستمرة أو متقطعة) أو نوع المادة .

❖ مفهوم الفضاء التجريبي

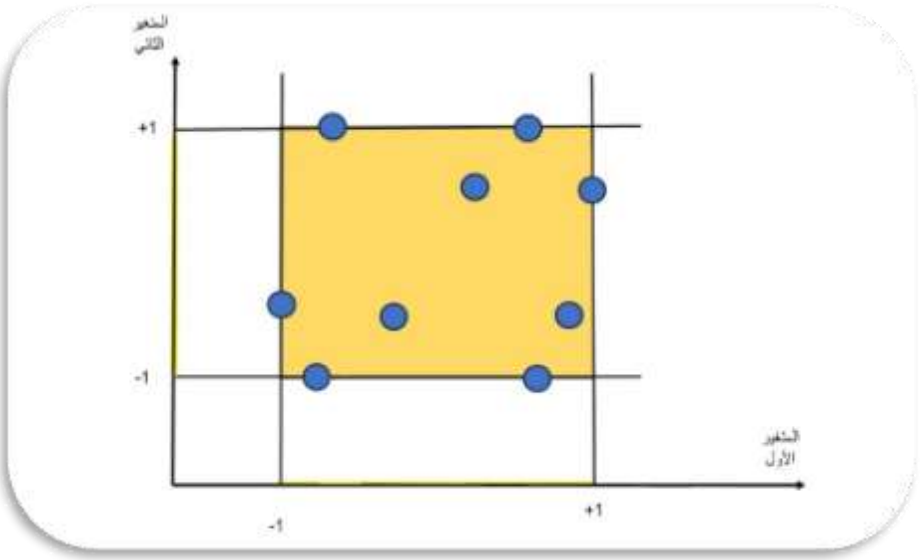
عندما يُجري الباحث تجربة فإنه يقيس كمية معينة تُسمى الاستجابة ، تعتمد هذه الاخيرة على متغير واحد أو أكثر تُسمى العوامل ، يمكن تمثيل كل عامل بخط مستقيم (محور) تتزايد قيمه على طوله وتُسمى

القيمة المختارة لعامل ما في تجربة معينة مستوى ، عادةً يُحدد الباحث مستويين رئيسيين لكل عامل: المستوى الادنى(يرمز له بـ 1−) والمستوى الأعلى (يرمز له بـ 1+) [11].

تُشكل جميع القيم الممكنة التي يمكن أن يأخذها العامل بين هذين المستويين ما يُسمى نطاق التباين ، إذا كان هناك عامل واحد فقط فإن الفضاء التجريبي هو ببساطة خط بين المستويين الأدنى والأعلى [12]، الموضح في الشكل (1.II).

الشكل (1.II): مجال تغير العامل .

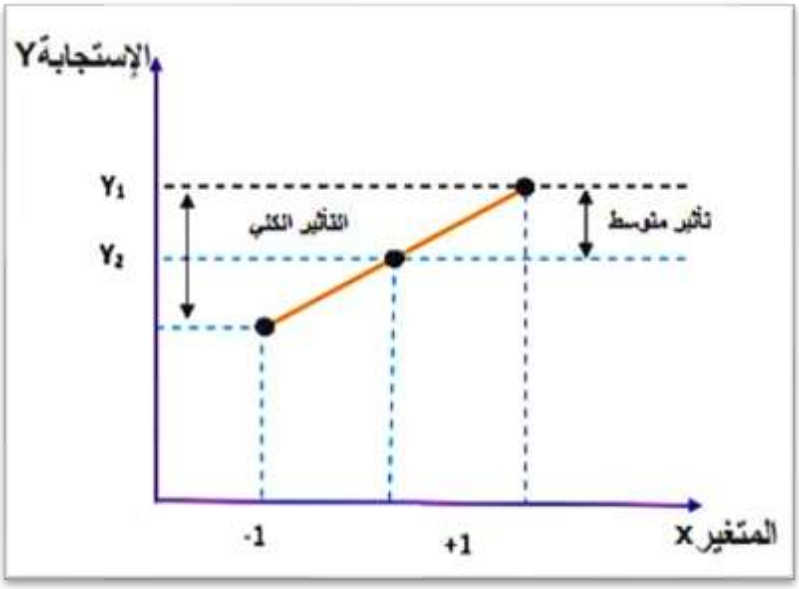
عند إضافة عامل ثانٍ يتم تمثيله بمحور آخر موضوع عموديًا على المحور الأول ، يُنشئ هذا مساحة ثنائية الأبعاد مسطحة تُعرف باسم الفضاء التجريبي (أو المجال التجريبي) تُمثَّل جميع التجارب بنقاط متناثرة داخل هذا الفضاء كما هو موضح في الشكل (2.II) [12].



الشكل (2.II): النقاط التجريبية في فضاء ثنائي الأبعاد .

❖ تأثير المتغيّرات بين الاستجابة

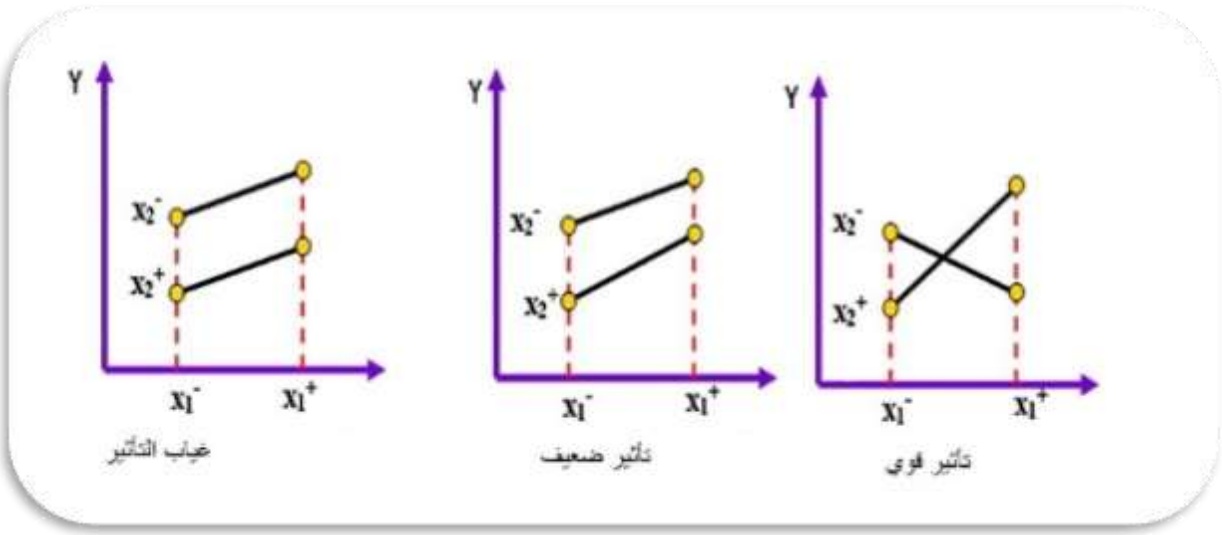
تأثير العامل X على الاستجابة Y هو ببساطة الفرق في قيمة Y عندما يتغير X من مستوى (يُسمى المستوى 1-) إلى مستوى آخر (يُسمى المستوى 1+) ، بعبارة أخرى يُظهر هذا التأثير مقدار تغير النتيجة Y عند تعديل العامل X من مستوى منخفض إلى مستوى مرتفع ويمكن فهم هذا التأثير بصريًا من خلال النظر إلى الرسم البياني ، فكلما زاد انحدار الخط في الرسم البياني زاد تأثير العامل X على الاستجابة Y[7] ، كما هو موضح في **الشكل (3.II)**



الشكل (3.II) : رسم توضيحي لتأثير المتغير.

❖ التأثير بين المتغيّرات

التأثير المتبادل بين متغيرين يعني أن تأثير أحدهما على الاستجابة يعتمد على قيمة الآخر، يظهر هذا في **الشكل (4.II)** باستخدام خطين غير متوازيين ، و كلما زاد انحراف هذين الخطين عن التوازي (أي كلما زاد تباعدهما أو تقاطعهما) زادت قوة التفاعل أو التأثير بين المتغيرين[13].



الشكل (4.II): منحنى التأثير بين المتغيرات .

6.1.II منهجية التصاميم التجريبية

هي طريقة ذكية لتخطيط التجارب ، فهي تُمكّن الباحثين من تغيير مستويات جميع العوامل في كل تجربة ولكن بطريقة منظمة ومنطقية ، تتمثل المزايا الرئيسية للتصميم التجريبي فيما يلي:

- تقليل عدد التجارب
- تقليل عدد العوامل المهمة للدراسة
- الكشف عن التفاعلات بين العوامل
- دقة أكبر في الحصول على النتائج
- نتائج مثالية
- نمذجة النتائج

بشكل عام تُستخدم التصاميم التجريبية بشكل أساسي لتقييم عوامل متعددة في آن واحد وللتنبؤ بالتفاعلات بين المتغيرات المختلفة [14].

7.1.II أنواع التصاميم التجريبية

توجد أنواع عديدة من التصاميم التجريبية التي تساعد الباحثين على التكيف مع مختلف الظروف والتعامل بفعالية مع عوامل متعددة ، ومن أكثرها شيوعًا ما يلي:

1. التصميم العشوائي الكامل (CRD)

يعد من أبسط التصاميم حيث يتم توزيع الوحدات التجريبية بشكل عشوائي تمامًا عبر المعاملات ويبرز في التجارب المختبرية المتجانسة.

2. التصميم القطاعي العشوائي (RBD)

يتم من خلال تقسيم الوحدات إلى بلوكات متجانسة، ثم توزّع عشوائياً داخل كل بلوك ونجده في التجارب السريرية والتجارب الزراعية.

3. التصميم المربع اللاتيني (Latin Square)

بهذا التصميم تيم التحكم بمصدرين من مصادر التباين في آنّ واحد تطبق في التجارب التي تدرس تأثير عاملين مختلفين.

4. التصميم العاملي (Factorial Design)

دراسة تأثير عاملين أو أكثر على جميع المستويات الممكنة، مما يسمح بتحليل التفاعلات بين العوامل ويظهر في الدراسات الاستكشافية المتعدّدة العوامل.

5. تصاميم الغربلة (Screening Designs)

هذا التصميم يهدف إلى تحديد العوامل الأكثر تأثيراً من بين عدد كبير من العوامل المحتملة (مثل بلاكيت – برومان).

6. تصاميم سطح الاستجابة (RSM)

مجموعة من التقنيات الإحصائية والرياضية المستخدمة لنمذجة وتحسين الاستجابة المتأثرة بعوامل متعددة لتحسين العمليات والوصول الى الظروف المثلى[15] .

II.8.1 خطط طريقة سطح الاستجابة

يُعدّ نمذجة سطح الاستجابة (RSM) من أهمّ الطرق وأكثرها استخدامًا لتحسين العمليات وتحديد الظروف المثلى وتعتمد هذه الطريقة على بناء نماذج رياضية (عادةً من الدرجة الثانية) تصف العلاقة بين المتغيرات المستقلة والاستجابة المدروسة.

- **الخطط المركبة**

يُعدّ التصميم المركب المركزي (CCD) التصميم الأكثر شيوعًا في منهجية سطح الاستجابة (RSM)ويتكون من ثلاثة أجزاء:

النقاط العامليّة: نقاط التصميم العاملي (2^K) أو جزء منه

النقاط المحورية: نقاط على محاور الإحداثيات على بُعد α من المركز

النقاط المركزية: نقاط متكررة في مركز الحقل التجريبي، تُستخدم لتقدير الخطأ المطلق واختبار جودة النموذج.

- **خطط بوكس بينكن (BBD)**

تُعدّ هذه الخطط بديلاً لتصميم التجارب المركزية المركبة (CCD) مع عدد أقل من التجارب وهو مناسب عندما يتعذر إجراء التجارب عند المستويات القصوى للعوامل، تتميز مخططات BBD بوجود نقاط تجريبية على حواف المكعب وليس عند زواياه، مما يجعلها آمنة للتجارب التي لا يمكن فيها الوصول إلى الحدود القصوى للعوامل[15] .

II.9.1 النموذج الرياضي

هو معادلة توضح التغير في الاستجابة الناتج عن تغير في متغير واحد أو أكثر، يهدف النمذجة إلى الحصول على نموذج رياضي قادر على حساب جميع الاستجابات في منطقة الدراسة دون الحاجة إلى إجراء تجارب، عادةً ما يكون النموذج الرياضي المستخدم في منهجية سطح الاستجابة (RSM) نموذجًا تربيعيًا

$$(1)\quad Y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{IJ} x_i x_j + \cdots + \sum a_{ii} {x_{ii}}^2 + a_{ij\ldots z} x_i x_j \cdots x_z$$

حيث:

Y : الاستجابة المتوقعة.

a_0 : الحد الثابت.

x_i : معاملات التأثيرات الخطية.

x_{ii} : معاملات التأثيرات التربيعية.

a_i: معاملات التأثيرات التفاعل بين العوامل.

X_i, Xa : المتغيرات المستقلة (العوامل).

ε: الخطأ العشوائي[16] .

10.1.II أشهر برامج الحاسوب المستخدمة في التصميم التجريبي

تتوفر العديد من البرامج المتخصصة للتعامل بكفاءة مع تصميم التجارب، تتضمن هذه البرامج مكتبات مدمجة لتصاميم كلاسيكية وتتيح للمستخدمين إنشاء تصاميم مخصصة بسهولة مع أنه من الممكن حساب معاملات النموذج يدويًا باستخدام جداول البيانات، إلا أن هذه الطريقة تتطلب الكثير من البرمجة والوقت، لذلك يُفضل استخدام برامج متخصصة في تصميم التجارب ولا تقتصر هذه البرامج على حساب معاملات النموذج الرياضي بسرعة فحسب بل تُجري أيضًا جميع العمليات الحسابية الإحصائية اللازمة لتقييم جودة النموذج [17]، ويمكنها:

- التنبؤ بالاستجابات المتوقعة في منطقة الدراسة بأكملها.
- إجراء تحليل التباين(ANOVA)
- إنشاء رسومات بيانية ثنائية وثلاثية الأبعاد.
- إنشاء رسوم بيانية لسطح الاستجابة.
- تحديد مناطق الاستجابة المثلى.

بفضل هذه الميزات القوية يستطيع الباحثون تحليل نتائج التجارب من زوايا متعددة في وقت قصير جدًا واستخلاص جميع المعلومات المفيدة الكامنة في البيانات المذكورة في **الجدول (3.II)** التالي:

الجدول (3.II): يوضح برامج التصاميم التجريبية [17].

البرامج	استخداماته
Design-Expert	تحسين العمليات الصناعية وتطوير المنتجات، الكيمياء، الأغذية
Minitab	الصناعة، مراقبة الجودة، التعليم والبحوث الطبية
JMP	الأبحاث الطبية والهندسة، الكيمياء الحيوية، تحليلات الأعمال
STATGRAPHICS	الصناعات التحويلية، الهندسة وضبط الجودة
MATLAB	الهندسة، الفيزياء، معالجة الإشارات
MODDE	الصناعات الدوائية، الكيمياء الحيوية، تطوير العمليات

2.II التحليل الاحصائي للنمذجة

التحليل الإحصائي هو عملية إعداد وتنظيم البيانات العلمية بهدف تمكين دراستها وفحصها بدقة، ومن خلال هذه العملية يطبق الباحثون أساليب رياضية وإحصائية متنوعة على البيانات لاكتشاف أنماط وعلاقات ذات دلالة، تساعد هذه الأساليب في النهاية على استخراج نتائج واستنتاجات دقيقة وموثوقة، تساهم في فهم أعمق للظاهرة المدروسة وتنتج معرفة ذات قيمة علمية من المعلومات المُجمّعة [18].

1.2.II التحليل الاحصائي للبيانات

الطرق الإحصائية

تعتمد الطرق الإحصائية على تحليل مجموعة من البيانات التي تشمل مجالات دراسية مختلفة، تُعالج هذه البيانات رياضيًا لتفسر العلاقة بين مجموعة من المتغيرات ومن ثم صياغتها في شكل نموذج إحصائي، هذا النموذج يوضح درجة التقارب والتوافق بين النتائج الفعلية والنتائج المتوقعة وتُعرف هذه العملية باسم تصميم التجربة (Experimental Design)، يمكن إجراء هذه العملية البحثية يدويًا أو باستخدام الحواسيب وبرامج الإحصاء المختلفة.

يعتمد تصميم التجربة على إقامة علاقة منطقية بين المتغيرات والنتائج ويتم تلخيص هذه البيانات بطريقة واضحة ومفيدة [19].

تحليل الانحدار (Regression Analysis)

هو طريقة تسمح لنا بتحديد العلاقة (معادلة رياضية) بين المتغير التابع والمستقل وطبيعة العوامل المؤثرة عليها [20]، وهناك نوعان رئيسيان لتحليل الانحدار:

1) الانحدار الخطي البسيط (Simple Linear Regression)

يتضمن دراسة علاقة رياضية خطية (على شكل خط مستقيم) بين متغيرين فقط: المتغير التابع (Y) الذي يتأثر بتغير المتغير المستقل (X)، وتُعبَّر عن هذه العلاقة بالمعادلة الرياضية التالية:

$$(2) \quad Y = a\,X + b$$

2) الانحدار الخطي المتعدد (Multiple Linear Regression - MLR)

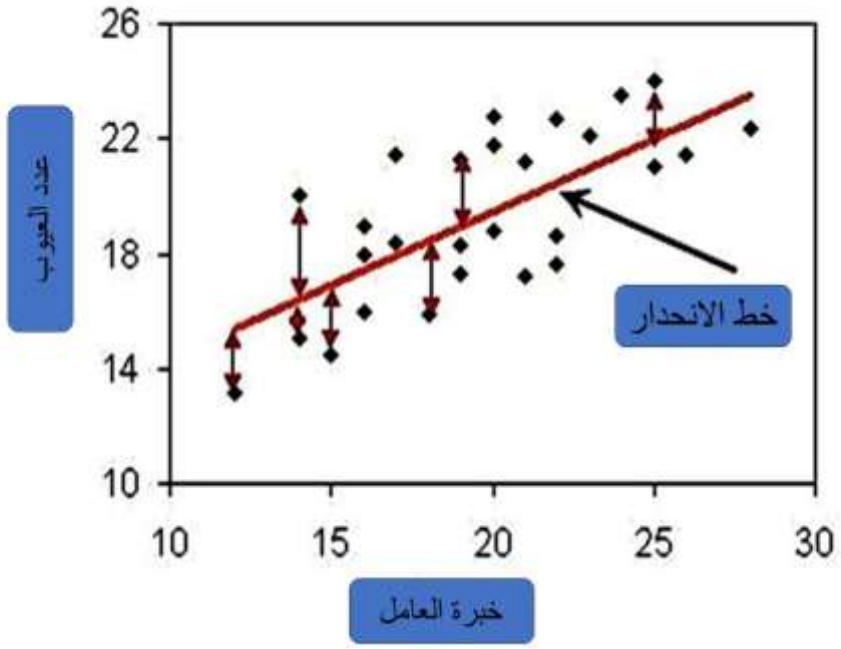
يختلف عن الانحدار الخطي البسيط في عدد المتغيرات المستقلة (X) المرتبطة بالمتغير التابع (Y)، وتعتمد هذه الطريقة على تحديد العلاقة الحقيقية بين المتغير التابع (Y) وأحد المتغيرات المستقلة (X_i)، مع استبعاد تأثير المتغيرات الأخرى ويُمثل ميل الخط (الانحدار) بمقدار التغير في المتغير التابع (Y) عند تغير المتغير المستقل (X_i) بوحدة واحدة كما هو موضح في **الشكل (5.II)**، تُعبَّر عن هذه العلاقة بالمعادلة التالية:

$$(3) \quad Y = b + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + \ldots + a_nX_n$$

حيث:

b : ثابت الانحدار الخطي (Linear regression constant)

a_1 .... a_n : معاملات الانحدار (Slopes) التي تمثل تأثير كل متغير مستقل على المتغير التابع[20] .



الشكل (5.II): خط الإنحدار.

2.2.II معاملات التحليل الإحصائي

معاملات التحليل الإحصائي هي مجموعة من الأرقام والمؤشرات المستخدمة لاختبار جودة النموذج الإحصائي وتقييم العلاقة بين المتغيرات المدروسة، وهي بمثابة مؤشرات موثوقة للحكم على دقة التحليل الإحصائي وطبيعة الارتباط بين أجزاء النموذج المختلفة [21]، من أهم هذه المعاملات:

1.2.2.II معامل الارتباط (R)

هذه قيمة تُظهر قوة العلاقة بين المتغير التابع والمتغيرات المستقلة وتتراوح قيمتها بين 0 و1، كلما اقتربت القيمة من 1 كان النموذج أفضل وأقوى، وكذلك كلما اقتربت من 0 كان النموذج أضعف وأقل كفاءة، بالإضافة إلى ذلك يكون معامل الارتباط المتعدد دائمًا أكبر من معامل الارتباط الفردي[22] .

2.2.2.II معامل التحديد (R^2)

هذا هو العامل الإحصائي الذي يوضح التباين بين المتغير التابع والمتغيرات المستقلة داخل النموذج الإحصائي الذي يتم دراسته، تتراوح قيم R^2 بين 0 و1 وكلما اقتربت قيمة R^2 من 1 كانت نقاط العينات قريبة من خط المربعات الصغرى للنموذج، وإذا ابتعدت قيمة R^2 عن 1، تصبح النقاط أكثر تشتتًا مما يشير إلى ضعف النموذج، وتقسم قيم R^2 الى قيم كبيرة (0.75) ، متوسطة حوالي (0.5) أو صغيرة (0.25) ،

يتغير معامل التحديد R^2 بالزيادة عند إضافة المزيد من المتغيرات المستقلة إلى النموذج حتى لو لم يكن لهذه المتغيرات الجديدة المستقلة (X) أي تأثير فعلي على المتغير التابع (Y) [23].

II.2.2.3 معامل التحديد المعدل (R^2adj)

يُستخدم معامل التحديد المعدل (R^2adj) لقياس العلاقة بين المتغيرات في النموذج ويُحسب بناءً على متوسط المربعات وليس مجموع المربعات الكلي، و يتغير تبعًا لعدد المتغيرات المستقلة وما إذا كانت هذه المتغيرات تؤثر فعليًا على النموذج أم لا، يختلف هذا عن معامل التحديد القياسي (R^2) الذي يزداد دائمًا أو يبقى ثابتًا عند إضافة متغير مستقل آخر، فلا يمكن استخدامه لدراسة تأثير المتغير الإضافي في عملية الانحدار الخطي المتعدد، و تتراوح قيمة R^2adj بين 0 و1 وهو مفيد جدًا عند الرغبة في مقارنة نماذج إحصائية مختلفة واختيار أفضلها ، وتؤول قيمة R^2adj إلى الاقتراب من قيمة R^2 في العينات الكبيرة [24].

II.2.2.4 اختبار F –Valeur

هو اختبار إحصائي يُستخدم في تحليل التباين المُفسَّر عند إضافة عدة متغيرات مستقلة إلى معادلة الانحدار ويمكن أن يأخذ قيمًا مختلفة ترتفع كلما كان النموذج أفضل وتنخفض كلما كان النموذج أسوأ، ويمثل نسبة متوسط مربع الانحدار (MS Regression) إلى متوسط مربع البواقي (MS Residual).

يمكن أن تأخذ F-Valeur أي قيمة موجبة إذا كانت تساوي الصفر فإن النموذج المقترح غير مناسب أي لا يمكن تفسير التباين في البيانات باستخدام هذا النموذج، أما إذا كانت قيمتها تختلف عن الصفر فإن النموذج مناسب أي توجد علاقة ذات دلالة إحصائية بين المتغيرات المدروسة [25].

II.2.2.5 قيمة الاحتمالية P-Valeur

تُفيد P- Valeur في تحديد تأثير كل متغير في كل من الانحدار المتعدد والانحدار البسيط ويمكن أن تأخذ قيمًا مختلفة، لكي يكون النموذج المدروس صالح وقابل للاستخدام في استخراج البيانات يجب أن تكون P- Valeur أقل من 0.05 [26] .

II.2.2.6 تحليل التباين Analyse de la variance (ANOVA)

هو مقياس إحصائي يُستخدم لتقييم العينات المدروسة عن طريق قياس درجة الاختلاف بين العوامل المدروسة والعوامل المتوقعة فهو مقياس للتشتت (التباين)، كلما صغرت قيمته قلّ التشتت في البيانات، وهو يعتبر نوع من أنواع تحليل التفاوت الكلي (TSS) وعناصره: مجموع مربعات الانحدار (RSS) ومجموع مربعات الخطأ (ESS) [27] .

- **متوسط المربعات (MS)**

هي قيمة متوسط المربعات أو متوسط الفروق تُحسب بقسمة كل مجموع مربعات (SS) على درجات حريته (DF)، كما تُستخدم قيمة مربع الانحراف المعياري (SD) في هذا الحساب.

- **معامل تضخم التباين (VIF)**

يُستخدم هذا المعامل للكشف عن الارتباط الخطي المتعدد أي للتحقق من عدم وجود ارتباط خطي تام أو شبه تام بين المتغيرات المستقلة ويساعد اختبار VIF في تحديد مستوى التباين المقبول بين المتغيرات فإذا تجاوزت قيمته 10 فهذا يشير إلى وجود ارتباط خطي متعدد بين المتغيرات المستقلة [27].

3.2.II التحقق من صحة النموذج

يتم التحقق من صحة النموذج بإجراء تجارب إضافية في نقاط محددة ضمن منطقة الدراسة ثم تُقارن القيم المقاسة من هذه التجارب بالقيم المحسوبة بواسطة النموذج، ويُعتبر هذا الأخير مُتحقق من صحته إذا لم تكن الفروق بين القيم المقاسة والمحسوبة كبيرة [28].

4.2.II التمثيل البياني

بعد ضبط النموذج يُمثل بيانيًا باستخدام رسوم بيانية تُعرف باسم "أسطح الاستجابة"، مما يسمح لنا ذلك بتصور سلوك الاستجابة كدالة للمتغيرات المدروسة وتُساعد منحنيات الاستجابة بشكل كبير في استخدام النموذج لتحسين النظام التجريبي.

يتم تمثيل النموذج المُتحقق من صحته بيانيًا برسم منحنيات استجابة ثنائية الأبعاد (2D)، وللقيام بذلك نختار متغيرين لكل رسم بياني مع الحفاظ على ثبات مستويات المتغيرات الأخرى (على سبيل المثال عند متوسط قيمتها)، ثم يُرسم سطح استجابة ثلاثي الأبعاد (3D) لإظهار تغير قيم الاستجابة عند تغير المتغيرين المُختارين [29].

خلاصة الفصل

في هذا الفصل تطرقنا الى كيفية تنظيم التصاميم التجريبية للعمليات التجريبية وتحليل النتائج باستخدام أدوات واختبارات إحصائية متنوعة ، حيث مكن هذا التصميم الباحثين من الحصول على نتائج دقيقة للغاية بأقل عدد ممكن من التجارب، مما يؤدي إلى ظروف مثالية مُعبَّر عنها بنموذج رياضي ، ثم استعرض الفصل أساليب التحليل الإحصائي الرئيسية بما في ذلك تحليل الانحدار لبناء النموذج وتحليل التباين (ANOVA) لتقييم مدى ملائمته و تُنتج هذه الأساليب معادلة إحصائية توضح العلاقة بين المتغيرات والاستجابة مع تغطية أهم المعاملات المستخدمة لتقييم جودة النموذج .

قائمة مراجع الفصل الثاني

[1] S. A. Weissman and N. G. Anderson, "Design of Experiments (DoE) and Process Optimization. A Review of Recent Publications," *Org. Process Res. Dev.*, vol. 19, no. 11, pp. 1605–1633, Nov. 2015, doi: 10.1021/op500169m.

[2] S. N. Politis, P. Colombo, G. Colombo, and D. M. Rekkas, "Design of experiments (DoE) in pharmaceutical development," *Drug Dev. Ind. Pharm.*, vol. 43, no. 6, pp. 889–901, Jun. 2017, doi: 10.1080/03639045.2017.1291672.

[3] M. Sharma and S. Sharma, "Critical Evaluation into the practical utility of the Design of Experiments," *Engineering Management in Production and Services*, vol. 13, no. 3, pp. 50–65, Sep. 2021, doi: 10.2478/emj-2021-0021.

[4] M. J. . Anderson and P. J. . Whitcomb, *DOE simplified : practical tools for effective experimentation*. CRC Press, 2015.

[5] P. D. Berger, R. E. Maurer, and G. B. Celli, *Experimental Design*. Cham: Springer International Publishing, 2018. doi: 10.1007/978-3-319-64583-4.

[6] A. B. Pardee, "G1 events and regulation of cell proliferation.," *Science*, vol. 246, no. 4930, pp. 603–8, Nov. 1989, doi: 10.1126/science.2683075.

[7] D. C. . Montgomery, *Design and analysis of experiments*. John Wiley & Sons, Inc., 2017.

[8] R. M. Groves, *Survey Errors and Survey Costs*. Wiley, 1989. doi: 10.1002/0471725277.

[9] M. J. . Anderson and P. J. . Whitcomb, *DOE simplified : practical tools for effective experimentation*. CRC Press, 2015.

[10] Dharmaraja. Selvamuthu and Dipayan. Das, *Introduction to probability, statistical methods, design of experiments and statistical quality control*. Springer, 2024.

[11] A. Badr, "General Introduction to Design of Experiments (DOE)," in *Wide Spectra of Quality Control*, InTech, 2011. doi: 10.5772/23878.

[12] S. Shina, "Two-Level Factorial Design and Analysis Techniques," in *Industrial Design of Experiments*, Cham: Springer International Publishing, 2022, pp. 139–186. doi: 10.1007/978-3-030-86267-1_4.

[13] R. M. Groves, *Survey Errors and Survey Costs*. Wiley, 2005. doi: 10.1002/0471725277.

[14] S. L. Grüninger and F. Frommlet, "Half the price, twice the gain: How to simultaneously decrease animal numbers and increase precision with good experimental design," *Lab. Anim.*, vol. 58, no. 5, pp. 411–418, Oct. 2024, doi: 10.1177/00236772241260905.

[15] T. Karchiyappan and R. R. Karri, "Process Optimization and Modeling of Hydraulic Fracturing Process Wastewater Treatment Using Aerobic Mixed Microbial Reactor via Response Surface Methodology," in *Soft Computing Techniques in Solid Waste and*

Wastewater Management, Elsevier, 2021, pp. 351–363. doi: 10.1016/B978-0-12-824463-0.00023-9.

[16] R. M. Groves, *Survey Errors and Survey Costs*. Wiley, 2005. doi: 10.1002/0471725277.

[17] E. J. Stollar, "A beginner's guide to design of experiments for life sciences using Spreadsheet DoE," *Biochem. (Lond).*, vol. 46, no. 6, pp. 29–35, Dec. 2024, doi: 10.1042/bio_2024_901.

[18] Z. Ali and Sb. Bhaskar, "Basic statistical tools in research and data analysis," *Indian J. Anaesth.*, vol. 60, no. 9, p. 662, 2016, doi: 10.4103/0019-5049.190623.

[19] J. H. Wilson and S. W. Joye, *Research Methods and Statistics: An Integrated Approach*. SAGE Publications, Inc, 2020. doi: 10.4135/9781071802717.

[20] M. Sarstedt and E. Mooi, "Regression analysis," in *A concise guide to market research: The process, data, and methods using IBM SPSS Statistics*, Springer, 2018, pp. 209–256.

[21] A. Hiyama, H. Katoh, S. Nomura, D. Sakai, M. Sato, and M. Watanabe, "Treatment of Lumbar Degenerative Disease by Lateral Lumbar Interbody Fusion in Patients Under and Over 80 Years of Age," *World Neurosurg.*, vol. 167, pp. e747–e756, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.wneu.2022.08.078.

[22] P. Schober, C. Boer, and L. A. Schwarte, "Correlation Coefficients: Appropriate Use and Interpretation," *Anesth. Analg.*, vol. 126, no. 5, pp. 1763–1768, May 2018, doi: 10.1213/ANE.0000000000002864.

[23] C. R. Brydges, "Effect Size Guidelines, Sample Size Calculations, and Statistical Power in Gerontology," *Innov. Aging*, vol. 3, no. 4, Aug. 2019, doi: 10.1093/geroni/igz036.

[24] J. Karch, "Improving on Adjusted R-Squared," *Collabra Psychol.*, vol. 6, no. 1, Jan. 2020, doi: 10.1525/collabra.343.

[25] T. Tome, N. Žigart, Z. Časar, and A. Obreza, "Development and Optimization of Liquid Chromatography Analytical Methods by Using AQbD Principles: Overview and Recent Advances," *Org. Process Res. Dev.*, vol. 23, no. 9, pp. 1784–1802, Sep. 2019, doi: 10.1021/acs.oprd.9b00238.

[26] C. Andrade, "The P Value and Statistical Significance: Misunderstandings, Explanations, Challenges, and Alternatives," *Indian J. Psychol. Med.*, vol. 41, no. 3, pp. 210–215, May 2019, doi: 10.4103/IJPSYM.IJPSYM_193_19.

[27] G. K. Uyanık and N. Güler, "A Study on Multiple Linear Regression Analysis," *Procedia Soc. Behav. Sci.*, vol. 106, pp. 234–240, Dec. 2013, doi: 10.1016/j.sbspro.2013.12.027.

[28] D. E. La and R. Scientifique, "REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR."

[29] H.-Y. Chen and C. Chen, “A Study of the Response Surface Methodology Model with Regression Analysis in Three Fields of Engineering,” *Applied System Innovation*, vol. 8, no. 4, p. 99, Jul. 2025, doi: 10.3390/asi8040099.

الفصل الثالث

الجزء العملي

تمهيد

في هذا الفصل تم التطرق الى الجانب العملي حيث تم تحضير البلاستيك الحيوي من قشور البازلاء وتم إجراء هذا العمل في مخبر التكنولوجيات الحديثة والتنمية المحلية بكلية التكنولوجيا بجامعة الوادي- بالجزائر.

1.III المواد والأدوات والأجهزة المستعملة

1.1. III المواد الكيميائية

المواد الكيميائية المستعملة يوضحها **الجدول (1.III):**

الجدول (1.III): يوضح المواد الكيميائية المستعملة في خطوات العمل.

المواد	الصيغة الكيميائية	النقاوة (%)	الكتلة المولية(g/mol)
النشاء	$(C_6H_{10}O_5)n$	99	162.14
الجليسرين	$C_3H_8O_3$	99	92.09
حمض الخليك (Acide Acetic)	CH_3COOH	99.8	60.05

2.1.III الأدوات و المواد

ماء مقطر، بيشر.

3.1.III الأجهزة

مخلاط مغناطيسي، ميزان حساس، جهاز قياس الحرارة، فرن تجفيف.

2.III المادة النباتية

1.2.III تجميع وتحضير النباتات

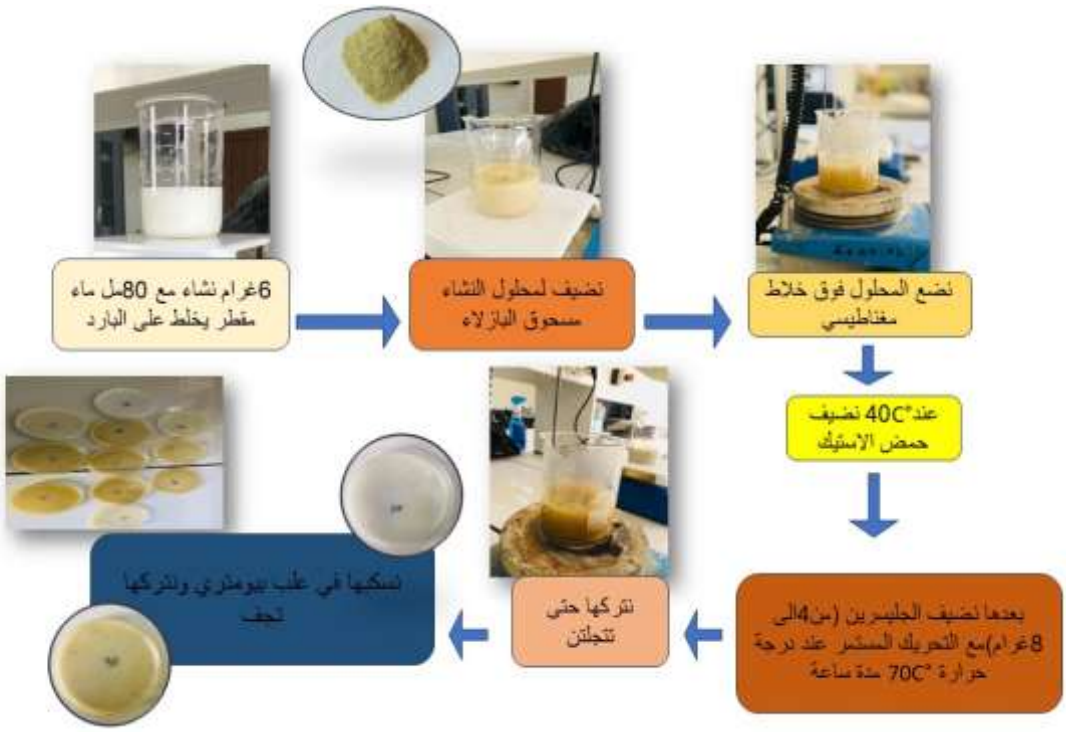
جُمعت قشور البازلاء من سوق محلي في الوادي وأُزيلت منها أي أوساخ أو حطام عالق وذلك بغسل القشور جيدًا بالماء، لتسهيل التجفيف قُطِّعت القشور إلى قطع صغيرة، وتُركت لتجف في ظروف طبيعية حتى وصل وزنها إلى وزن ثابت، وبعد التجفيف طُحِنت القشور باستخدام مطحنة كهربائية، ونُخِل المسحوق الناتج عبر شبكة بقطر 45 ميكرومتر للحصول على جزيئات متساوية الحجم موضحة في **الشكل**

(1.III)، و حفظت القشور في عبوات زجاجية محكمة الغلق في درجة حرارة الغرفة إلى حين الاستخدام التالي.

الشكل (1.III): مسحوق قشور البازلاء.

3.III بلاستيك حيوي قائم على النشاء مدعم بقشور البازلاء

تبدأ العملية بتحضير محلول النشاء عبر خلط 6 غرام من النشاء في بيشر مع 80 مل من الماء المقطر على البارد أولاً لمنع التكتل، ثم يضاف مسحوق البازلاء الناعم (بكمية تتراوح بين1 إلى 2.5 غرام) وضبط الرقم الهيدروجيني عند pH=4 باستخدام قطرات من حمض الأستيك (CH_3COOH) وتحت درجة حرارة C°40 لضمان تفكك الروابط البروتينية، ثم يُرفع المزيج إلى درجة حرارة C°70 مع التحريك المستمر لمدة 15 دقيقة حتى حدوث الجلتنة التامة، بعد ذلك يضاف إلى المحلول الجليسرين (كمادة ملدنة) بكمية تتراوح بين 4 إلى 8 غرام، ويستمر التفاعل تحت التحريك الهادئ عند C°70 لمدة ساعة كاملة لضمان تجانس الخليط وتبخر الفائض من المذيب، في المرحلة النهائية يُسكب الهلام الناتج في أطباق بترية موضوعة على سطح مستوي تماماً وتُترك لتجف، يلخص **الشكل (2.III)** خطوات التحضير.



الشكل (2.III): خطوات تحضير البلاستيك الحيوي.

4.III البرنامج المستخدم

تم استخدام برنامج Design-Expert الذي يعتبر أداة إحصائية متخصصة لإجراء تصميم التجارب وتحسينها، يقدم البرنامج اختبارات ومقارنات دقيقة بين المتغيرات المختلفة، ويوفر أدوات قوية لتحسين هذه المتغيرات والتنبؤ بالاستجابات الناتجة، مما يساعد على الوصول إلى أفضل النتائج بأقل عدد من التجارب [1].

1.4.III خطوات البرنامج

في هذا العمل تم اختيار خطة التصميم المركب المركزي وهو أسلوب يجمع النقاط العاملية والمحورية والمركزية لنمذجة العلاقات التربيعية بكفاءة [2]، وقد كان الدافع من وراء هذا الاختيار هو التكلفة المنخفضة مقارنة بالتصميمات الأخرى، مما سمح لنا بإجراء 13تجربة، تهدف هذه الطريقة الى تحديد القيم المثلى للمتغيرات المختلفة المؤثرة في العملية، أما الاستجابات (المتغيرات التابعة) التي قيست لتقييم الأداء فقد تم اختياراها وفقا للظروف المتاحة وهي:

- قابلية التحلل البيولوجي Biodegradability(%)

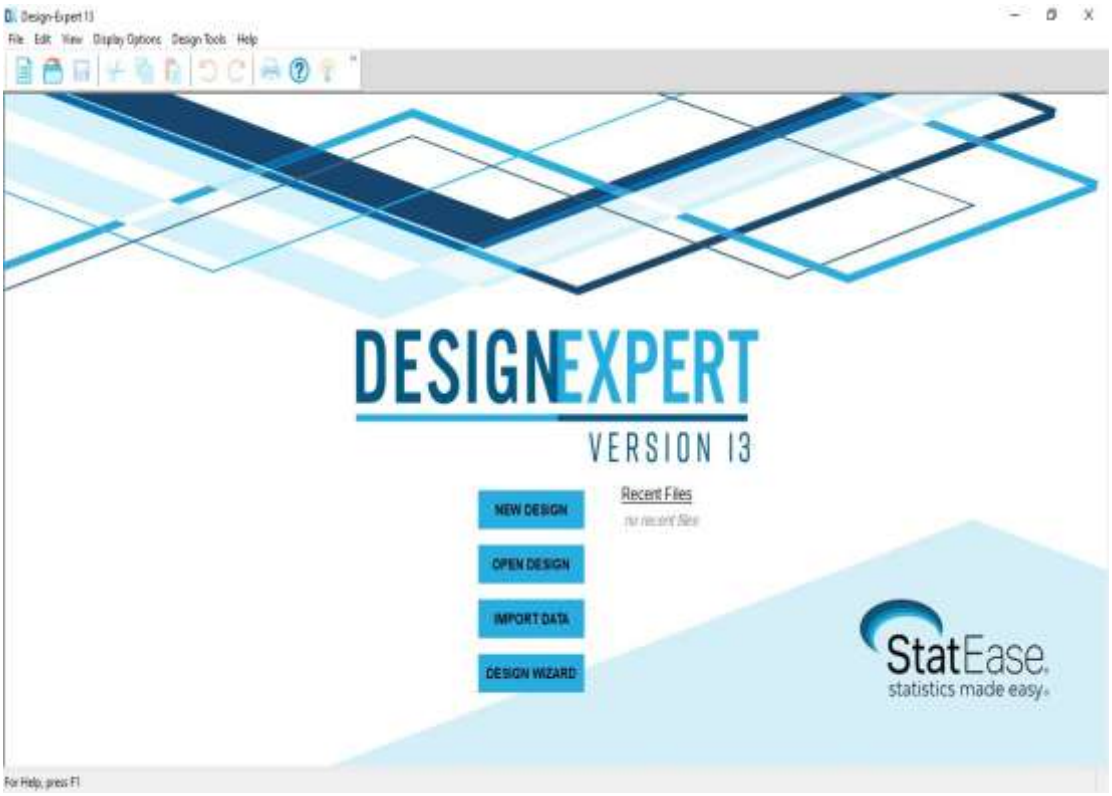
- نسبة امتصاص الماء Water Absorption (%)
- نسبة الرطوبة Moisture Content(%)
- نسبة الذوبان في الماء Water Solubility(%)
- المسامية Porosity(%)

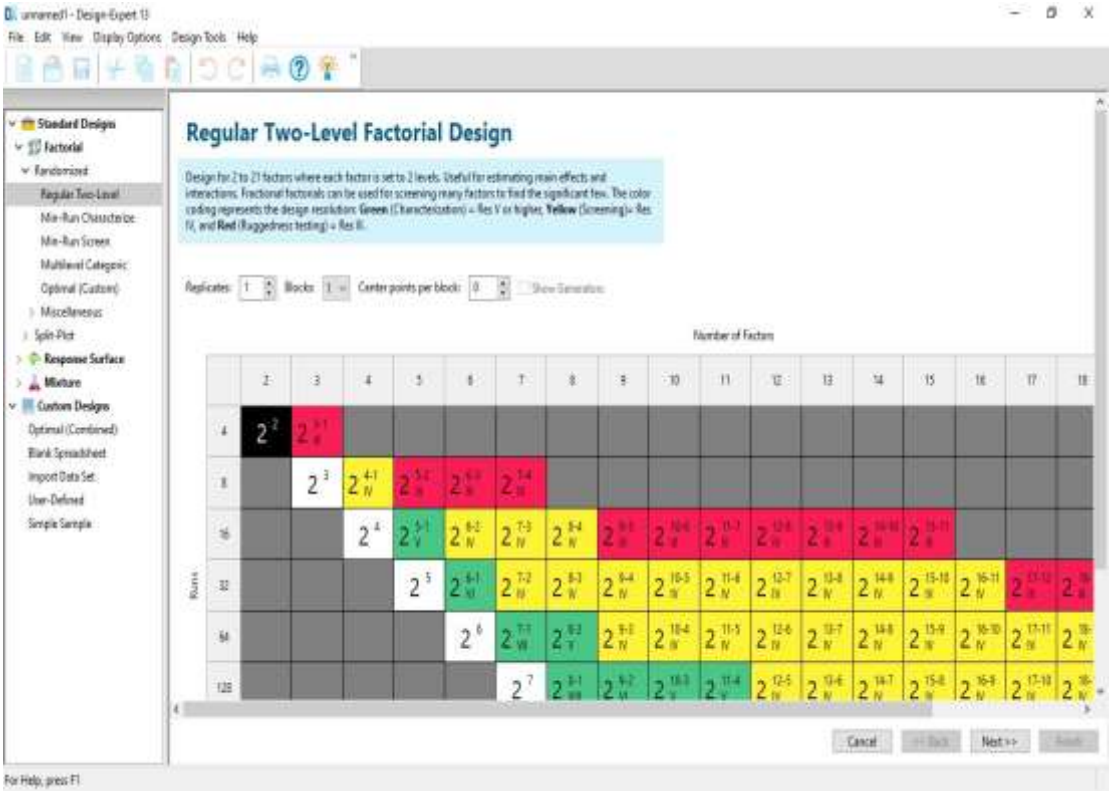
للحصول على نتائج دقيقة في أي دراسة تجريبية لابد من اتباع منهجية علمية منظمة تضمن تسلسل الإجراءات ودقة الاستنتاجات، يعتمد نجاح هذه الطريقة على تنفيذ خطواتها متسلسلة بدءاً من التخطيط السليم للتصميم التجريبي، مروراً بالتنفيذ المخبري وإدخال البيانات، وصولاً إلى استخلاص القيم المثلى للمتغيرات [3]، بحيث تعرض الخطوات على النحو التالي:

- تحديد التصميم التجريبي المناسب مثل التصميم المركب المركزي وذلك بناءً على عدد المتغيرات وأهداف الدراسة.
- تعيين مجالات الدراسة حيث يُحدد المستخدم القيم الأدنى والأقصى لكل متغير مستقل (مثل كتلة البازلاء).
- بعد ذلك يُنفذ العمل التجريبي عملياً في المختبر، حيث يقوم البرنامج بتوليد جدول يحتوي على عدد محدد من التجارب ويطبق الباحث هذه التجارب كما هي دون تغيير.
- تليها مرحلة إدخال النتائج التجريبية التي تم قياسها (مثل نسبة فقدان الوزن أو المسامية) إلى البرنامج.
- ثم يقوم البرنامج تلقائياً بتحليل هذه النتائج وإنتاج نموذج رياضي يصف العلاقة بين المتغيرات والاستجابات، مما يسمح بالتنبؤ بسلوك النظام.
- وأخيراً يتم الوصول إلى القيم المثلى للمتغيرات التي تحقق أفضل استجابة ممكنة وهي هدف الدراسة.

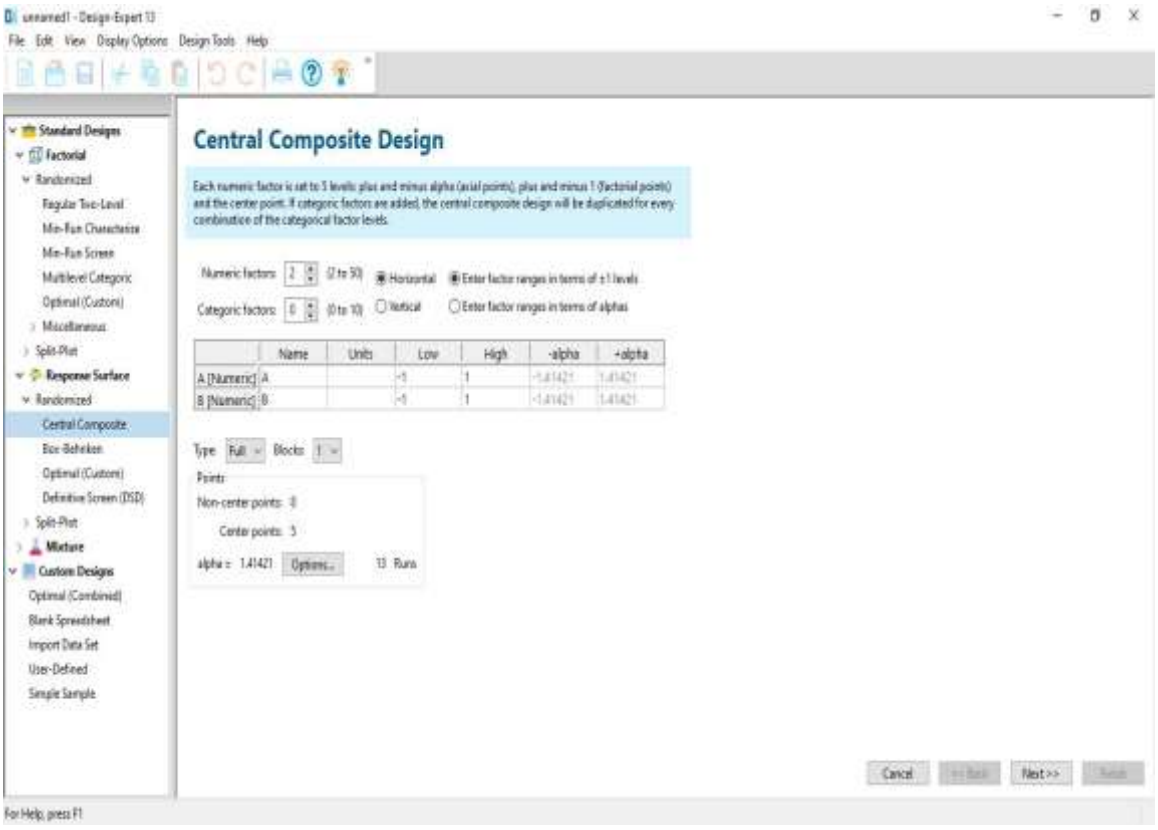
هذه الخطوات تمثل الآلية الأساسية التي يعمل بها برنامج Design-Expert وهو أحد أبرز البرامج الإحصائية المستخدمة في تصميم التجارب وتحسين العمليات وتحليل النتائج المدخلة واستخراج النموذج الرياضي، ثم تحديد الظروف المثلى [4]، ويمكن رؤية تسلسل هذه الخطوات كما ينفذها البرنامج في **الشكل (3.III)**.

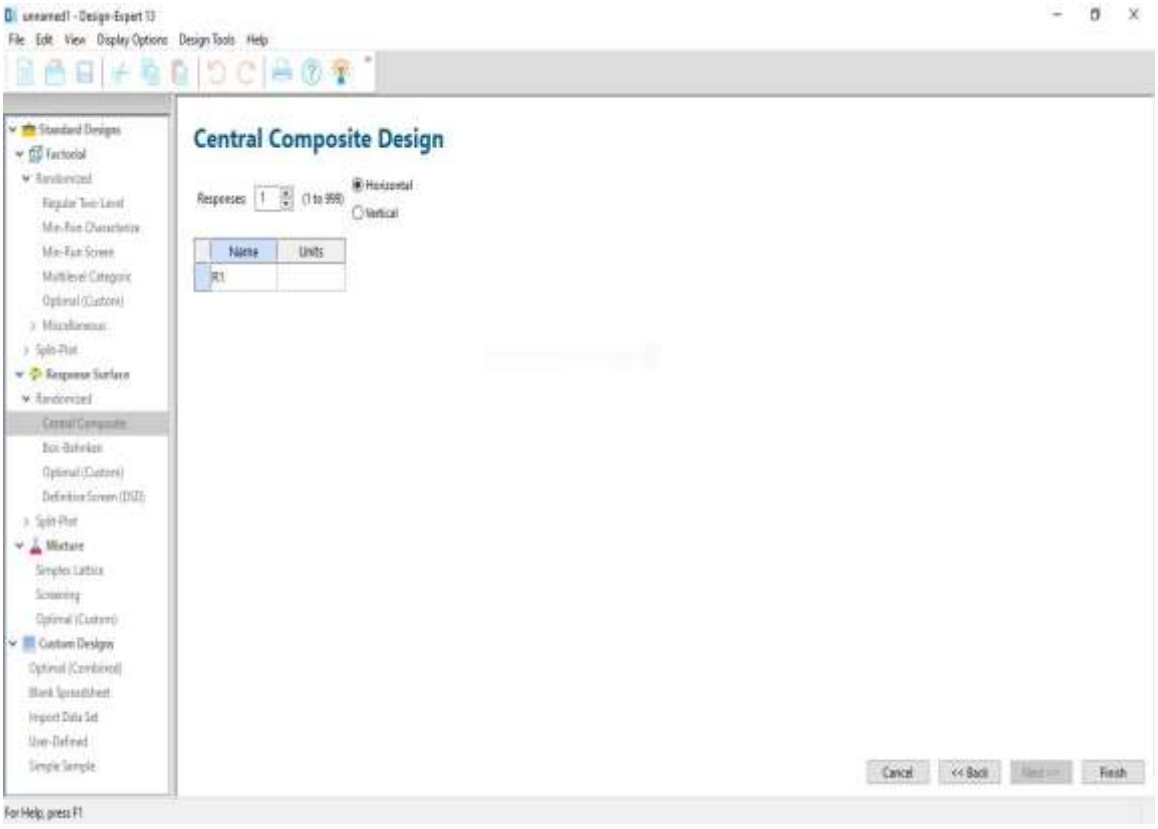
الخطوة الأولى: فتح التطبيق.


Design-Expert 13
File Edit View Display Options Design Tools Help
DESIGNEXPERT
VERSION 13
NEW DESIGN
OPEN DESIGN
IMPORT DATA
DESIGN WIZARD
Recent Files
no recent files
StatEase
statistics made easy
For Help, press F1

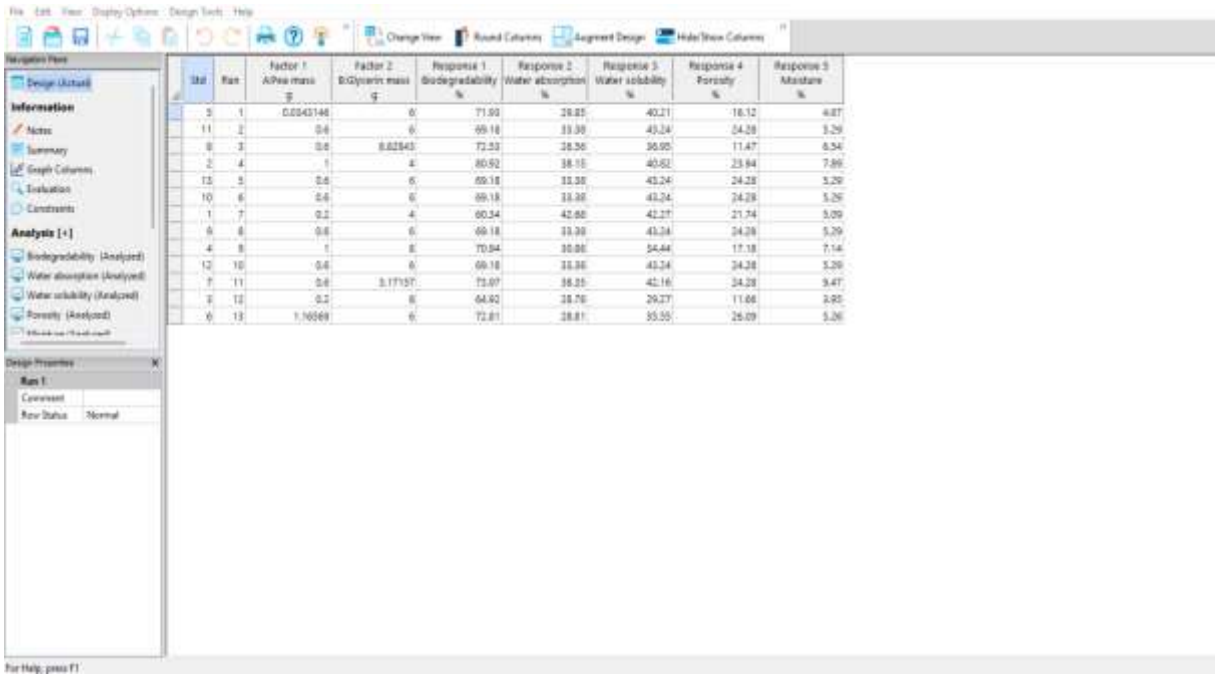

unnamed1 - Design-Expert 13
File Edit View Display Options Design Tools Help
Standard Designs
Factorial
Randomized
Regular Two-Level
Min-Run Characterize
Min-Run Screen
Multilevel Categoric
Optimal (Custom)
Miscellaneous
Split-Plot
Response Surface
Mixture
Custom Designs
Optimal (Combined)
Blank Spreadsheet
Import Data Set
User-Defined
Simple Sample
Regular Two-Level Factorial Design
Design for 2 to 21 factors where each factor is set to 2 levels. Useful for estimating main effects and interactions. Fractional factorials can be used for screening many factors to find the significant few. The color coding represents the design resolution: Green (Characterization) = Res V or higher, Yellow (Screening) = Res IV, and Red (Ruggedness testing) = Res III.
Replicates: 1 Blocks: 1 Center points per block: 0 Show Generators
Number of Factors
Runs
Cancel
Next >>
For Help, press F1

الخطوة الثانية: إختيار طريقة النمذجة (طريقة تصميم المركب المركزي) .

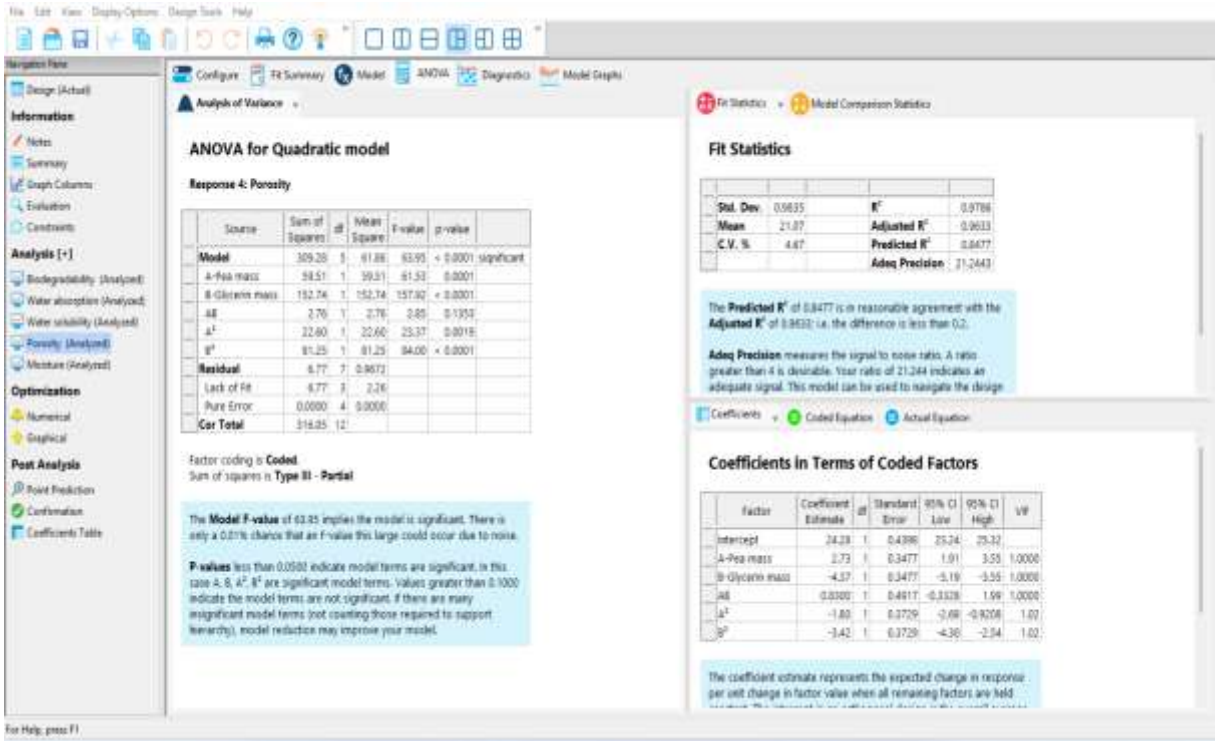




الخطوة الثالثة: إدخال النتائج التجريبية .



الخطوة الرابعة: تحليل النتائج.



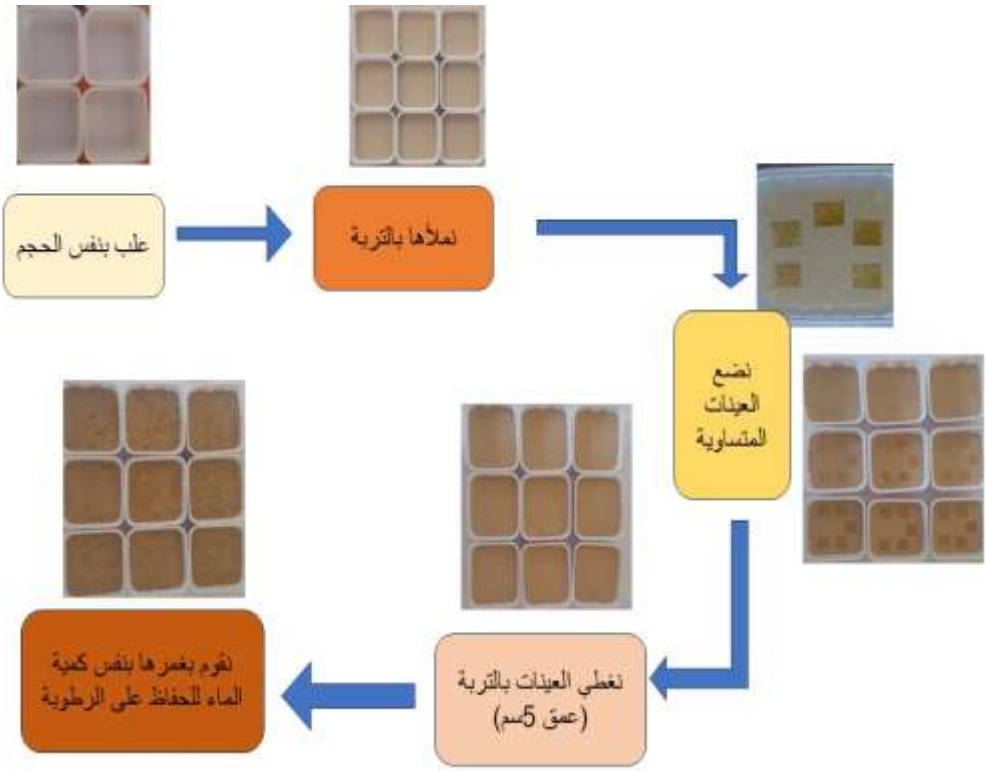
الشكل (3.III): خطوات الاستخدام في برنامج Design-Expert

الجدول (2.III): مستويات تصميم التجارب لعوامل مختلفة.

متغيرات	الترميز	المستوى		
		-1.0	0.0	1.0
كتلة البازلاء	A	1	1.75	2.5
كتلة الجلسرين	B	4	6	8

1.1.4.III استجابة اختبار التحلل البيولوجي

يتم هذا الاختبار عبر تقييم الدفن في التربة، بحيث يتم تقييم قابلية الأغشية للتحلل البيولوجي بناءً على فقدان الوزن، دُفنت عينات مربعة من الأغشية (2 سم × 2 سم) على عمق 5 سم في أواني مملوءة بالتربة، وسُقيت يوميًا للحفاظ على مستويات الرطوبة أو سقي ب3 مل من الماء كل خمسة أيام، وأُجريت اختبارات الدفن عند درجة حرارة مضبوطة تبلغ 27 درجة مئوية، ودُفنت جميع العينات في نفس نوع التربة، الخطوات ملخصة في **الشكل (4.III)**.



الشكل (4.III): خطوات عمل اختبار التحلل البيولوجي.

بعد مرور 5، 10، 15،20، 30 يومًا من الحضانة في الظروف المحيطة، أُخرجت العينات بعناية ونُظفت برفق لإزالة أي تربة عالقة وجُففت قبل وزنها، وتم حساب نسبة فقدان الوزن باستخدام المعادلة:

$$100 \times \frac{W_i - W_f}{W_i} = \text{نسبة فقدان الوزن}(\%) \quad (1)$$

حيث تمثل W_i الكتلة الجافة الأولية، و W_f الكتلة الجافة النهائية بعد الدفن.

2.1.4.III استجابة اختبار امتصاص الماء

تأخذ قطع صغيرة من العينات (2×2سم) وتم تسجيل الوزن الأولي للعينة، بعد ذلك توضع العينات في دورق يحتوي على 60 مل من الماء عند درجة حرارة الغرفة لمدة 24 ساعة، ثم تسحب العينة من الماء وتمسح جيدا وتوزن، وتم حساب مقدار امتصاص الماء باستخدام العلاقة التالية:

$$100 \times \frac{W_i - W_f}{W_f} = \text{امتصاص الماء}(\%) \quad (2)$$

حيث: W_i: وزن العينة الابتدائي (g)، W_f: وزن العينة النهائي (g).

3.1.4.III استجابة اختبار محتوى الرطوبة

تم تقدير محتوى الرطوبة عن طريق قياس فقدان الوزن للأفلام، وذلك من خلال أخذ قطع من أفلام البلاستيك المحضر (2×2سم)، حيث توزن العينات بدقة ثم تجفف في الفرن عند 110 C ° حتى الحصول على وزن جاف ثابت، يتم قياس محتوى الرطوبة بالعلاقة التالية:

$$100 \times \frac{W_i - W_f}{W_i} = \text{محتوى الرطوبة}(\%) \quad (3)$$

حيث:Wi : وزن العينة الابتدائي (g)، W_f: وزن العينة النهائي (g).

4.1.4.III استجابة اختبار الذوبان في الماء

وزنت قطع البلاستيك المحضرة المختلفة بدقة، غمرت العينات في 100 مل من الماء المقطر مع التحريك 180 دورة في الدقيقة لمدة 6 ساعات عند 25° C، بعد انقضاء المدة الزمنية رشحت القطع ثم جففت في فرن هواء ساخن عند درجة حرارة 110 C°، تم حساب النسبة المئوية للذوبان في الماء حسب العلاقة التالية:

$$\text{الذوبانية}(\%) = \frac{W_f - W_i}{W_i} \times 100 \quad (4)$$

حيث:Wi : وزن العينة الابتدائي (g)، W_f: وزن العينة النهائي (g).

5.1.4.III استجابة تحليل المسامية

تم تحديد النسبة المئوية لمسامية الفيلم باستخدام طريقة إزاحة السائل، تم فيها اختيار الإيثانول كسائل الإزاحة، وتستلزم هذه التقنية غمر تركيبات البلاستيك المجففة المتنوعة (W_1) في الإيثانول بنسبة 100% لمدة 24 ساعة، وعند تحقيق التوازن(W_2) ، يتم استخراج الأفلام توثيق كتلة الإيثانول المتبقية (W_3) ، مع تحديد مسامية الأفلام باستخدام المعادلة أدناه:

$$\text{مسامية}(\%) = [(W_2 - W_1 - W_3)/(W_2 - W_3)] \times 100 \quad (5)$$

حيث W_1: وزن الفيلم، W_2: مجموع الإيثانول والفيلم المغمور، وW_3: وزن الإيثانول المتبقي بعد إزالة الفيلم.

خلاصة الفصل

قدم هذا الفصل وصف التجريبي لخطوات تحضير البلاستيك الحيوي من قشور البازلاء، كما تم توظيف برنامج Design Expert لتصميم التجارب، حيث تم تطبيق خطة التصميم المركزي المركب (Central Composite Design - CCD) لتحسين عملية الإنتاج، مع متغيرين مستقلين رئيسيين: كتلة مخلفات البازلاء وكتلة الجلسيرين، وتم قياس خمسة استجابات رئيسية لتقييم الأداء: قابلية التحلل الحيوي، امتصاص الماء، محتوى الرطوبة، ذوبان الماء، والمسامية وسيُخصص الفصل التالي لعرض النتائج وتحليلها.

قائمة مراجع الفصل الثالث

[1] A. Hindustan Abdul, A. Golla Bala, H. Chintaginjala, S. P. Manchikanti, A. Kamsali, and R. R. Dasari, "'Equator Assessment of Nanoparticles Using the Design- Expert Software,'" *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Nanotechnology*, vol. 13, no. 1, pp. 4766–4722, Oct. 2019, doi: 10.37285/ijpsn.2020.13.1.5.

[2] I. Veza, M. Spraggon, I. M. R. Fattah, and M. Idris, "Response surface methodology (RSM) for optimizing engine performance and emissions fueled with biofuel: Review of RSM for sustainability energy transition," *Results in Engineering*, vol. 18, p. 101213, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.rineng.2023.101213.

[3] C. N. Njoku and S. K. Otisi, "Application of Central Composite Design with Design Expert v13 in Process Optimization," in *Response Surface Methodology - Research Advances and Applications*, IntechOpen, 2023. doi: 10.5772/intechopen.109704.

[4] T. Elsayed and R. M. Hathout, "Evaluating the prediction power and accuracy of two smart response surface experimental designs after revisiting repaglinide floating tablets," *Futur. J. Pharm. Sci.*, vol. 10, no. 1, p. 34, Mar. 2024, doi: 10.1186/s43094-024-00611-7.

الفصل الرابع

النتائج والمناقشة

1.IV نمذجة الاستجابة

تم الاعتماد على خطة التصميم المركب المركزي CCD لعاملين والتي تتكون من 13 اختبارا بما في ذلك 5تجارب في نفس المجال (التجربة رقم 2،3،5،7،10) لضمان تقدير الخطأ التجريبي النقي (Pure Error) وتعزيز الدقة الإحصائية للنتائج، كما ستخضع هذه البيانات لمعالجة الإحصائية باستخدام برنامج Design–Expertلتقدير تأثير المتغيرات الخمسة، كذلك لحصول على نموذج رياضي كما هو موضح في الجدول(1.IV).

الجدول(1.IV): خطة التصميم المركب المركزي مع الاستجابات التجريبية.

			قيم التجريبية				
	متغير 1	متغير2	R1	R2	R3	R4	R5
Run	A:Pea mass	B:Glycerin mass	التحلل البيولوجي (%)	امتصاص الماء (%)	ذوبان الماء (%)	المسامية (%)	الرطوبة (%)
1	0.2	8	64.92	28.78	29.27	11.66	3.95
2	0.6	6	69.18	33.38	43.24	24.28	5.29
3	0.6	6	69.18	33.38	43.24	24.28	5.29
4	1	8	70.94	30.88	34.44	17.18	7.14
5	0.6	6	69.18	33.38	43.24	24.28	5.29
6	0.0343146	6	71.93	29.85	40.21	16.12	4.67
7	0.6	6	69.18	33.38	43.24	24.28	5.29
8	0.6	3.17157	73.97	38.35	42.16	24.28	9.47
9	1.16569	6	72.81	28.81	35.55	26.09	5.26
10	0.6	6	69.18	33.38	43.24	24.28	5.29
11	0.2	4	60.34	42.68	42.27	21.74	5.09
12	0.6	8.82843	72.53	26.56	36.95	11.47	6.54
13	1	4	80.92	38.15	40.82	23.94	7.89

2.IV. النتائج الإحصائية وتفسيرها

النموذج الرياضي:

تم فحص تأثير المتغيرين على خمس استجابات وهي: قابلية التحلل البيولوجي (%)، نسبة امتصاص الماء (%)، نسبة الرطوبة (%)، نسبة الذوبان في الماء (%)، والمسامية (%) وتم إنشاء البيانات التي تحصلنا عليها بواسطة خطة التصميم المركب المركزي في نموذج تربيعي كدالة للاستجابة والمعبر عنها بالمعادلات الرياضية التالية:

$$\textbf{التحلل البيولوجي (\%)} = +69.18+3.48A -0.9296B-3.64AB+0.7125A^2+1.15B^2$$

$$\textbf{امتصاص الماء (\%)} = +33.38-0.4876A -4.73B+1.66AB-0.9675A^2+0.5950B^2$$

$$\textbf{ذوبان الماء (\%)} = +43.24-0.3588A -3.34B+1.66AB-3.18A^2-2.35B^2$$

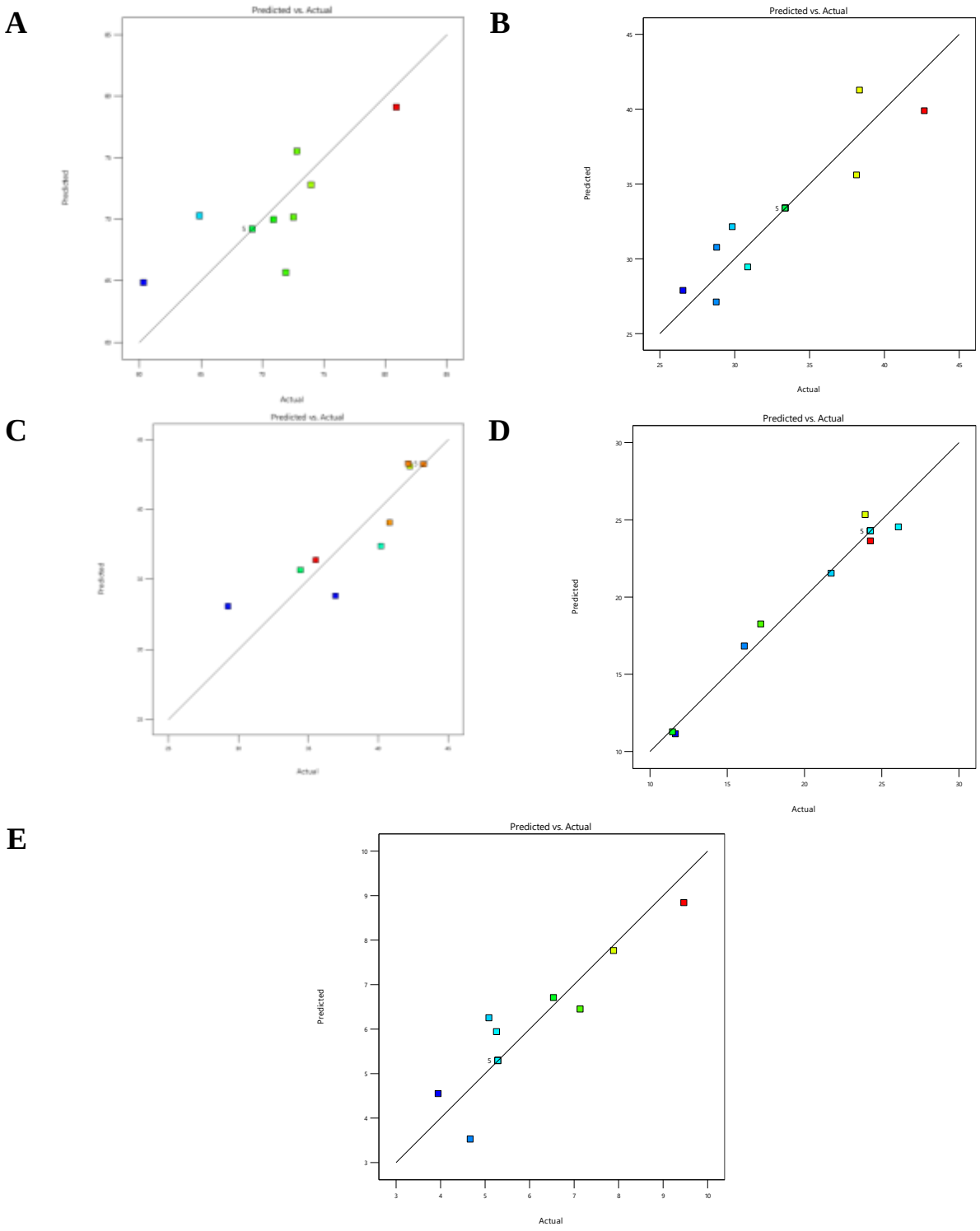
$$\textbf{المسامية (\%)} = +24.28+2.73A -4.37B+0.8300AB-1.80A^2-3.42B^2$$

$$\textbf{الرطوبة (\%)} = +5.29+0.8530A -0.7542B+0.0975AB-0.2794A^2+1.24B^2$$

و بِناءا على النموذج الرياضي المتحصل عليه تمت المقارنة بين قيم الاستجابات الخمسة المتحصل عليها تجريبيا وقيم الاستجابات الخمسة المتوقعة من طرف النموذج الرياضي بواسطة البرنامج الإحصائي المشار إليه في السابق.

3.IV العلاقة بين القيم التجريبية والمتوقعة

تم استخدام الطرق الرسومية للتحقق من صحة نموذج التصميم المركب المركزي من خلال تقييم طبيعة التوزيع المتبقي والارتباط بين الكميات التجريبية والمتوقعة لتأثير لاستجابات الخمسة على جودة بلاستيك حيوي المنتج، والشكل (1.IV) يوضح العلاقة بين القيم التجريبية والمتوقعة في الاستجابات الخمسة التي تم الحصول عليها في ظل ظروف تصنيع مختلفة، ويبدو أن القيم التجريبية والقيم المقدرة قريبة.



الشكل (1.IV): العلاقة بين القيم التجريبية والمتوقعة لتأثير الاستجابات الخمسة (قابلية التحلل البيولوجي (A)، نسبة امتصاص الماء(B)، نسبة الرطوبة (C)، نسبة الذوبان في الماء (D)، والمسامية(E)) على جودة بلاستيك حيوي المنتج.

كما يوضح **الجدول(2. IV)** قيم الاستجابات الخمسة (%) المتوقعة من طرف نموذج التنبؤ لكل تجربة على حدى وهو ما يؤكد خطية النموذج الرياضي .

الجدول(IV .2):القيم المتوقعة لاستجابات الخمسة (%) لكل تجربة.

			قيم المتوقعة				
	متغير 1	متغير2	R1	R2	R3	R4	R5
Run	A:Pea mass	B:Glycerin mass	التحلل البيولوجي (%)	امتصاص الماء (%)	ذوبان الماء (%)	المسامية (%)	الرطوبة (%)
1	0.2	8	70.27	27.11	33.07	11.13	4.55
2	0.6	6	69.18	33.38	43.24	24.28	5.29
3	0.6	6	69.18	33.38	43.24	24.28	5.29
4	1	8	69.96	29.45	35.66	18.25	6.45
5	0.6	6	69.18	33.38	43.24	24.28	5.29
6	0.0343146	6	65.68	32.13	37.38	16.82	3.52
7	0.6	6	69.18	33.38	43.24	24.28	5.29
8	0.6	3.17157	72.80	41.26	43.27	24.28	8.84
9	1.16569	6	75.53	30.76	36.36	24.53	5.94
10	0.6	6	69.18	33.38	43.24	24.28	5.29
11	0.2	4	64.85	39.88	43.07	21.53	6.25
12	0.6	8.82843	70.17	27.88	33.82	11.27	6.70
13	1	4	79.10	35.59	39.04	25.33	7.76

4.IV تحليل التباين(ANOVA)

تعطي المعالجة الإحصائية للاستجابات وفقًا لخطة التصميم المركب المركزي النتائج الممثلة في **الجدول(IV .3)** تحليل التباين (ANOVA) ويظهر الجدول مدى قابلية المادة للتفكك بفعل العوامل الحيوية، وهو مؤشر أساسي لاستدامة المادة المصنعة، حيث بلغت قيمة p-value للنموذج (0.1653)، وهي أكبر من (0.05)، مما يشير علمياً إلى أن النموذج التربيعي قد لا يكون الأنسب لتمثيل هذه الاستجابة بشكل كامل، أو أن هناك عوامل بيئية أخرى لم تُدرس تؤثر على سرعة التحلل ، ومع ذلك يبرز الجدول أن كتلة البازلاء (A) هي العامل الوحيد المعنوي بقيمة (p-value =0.0397) وقيمة (F-value =6.36) ، مما يعني أن زيادة المادة الحيوية الأساسية تسرع عملية التحلل لأنها تزيد من نسبة البوليمرات الطبيعية القابلة للهضم من قبل الميكروبات، بينما لم يكن للجلسرين تأثير معنوي مباشر في هذه المرحلة.

أما بالنسبة إلى تحليل تباين لامتصاص الماء أظهرت النتائج أن النموذج معنوي إحصائياً (p=0.0104) مع قيمة (F-value =7.36) ويبرز الجلسرين (B) كعامل حاسم ومسيطر جداً بـ (p-value=0.0007) وقيمة F-value عالية جداً (32.61)، ومن الناحية العلمية الجلسرين مادة عالية القطبية وشرهة للماء؛ لذا فإن زيادته تفتح المسافات بين سلاسل البروتين في البازلاء، مما يسهل نفاذ جزيئات الماء ويزيد الامتصاص بشكل حاد، وقد بلغت دقة النموذج هنا (84.02%) وفقاً لقيمة R^2 وبالنسبة إلى تحليل تباين للذوبانية في الماء حيث أظهر النموذج العام المعنوي بقيمة (p-value = 0.0117)، حيث لعب الجلسرين دوراً جوهرياً (p-value = 0.0053) في زيادة هذه الخاصية، اللافت في هذا الجدول هو معنوية القيم التربيعية لكل من البازلاء والجلسرين(A^2,B^2) بقيم p-value أقل من (0.05)، مما يبرز وجود "علاقة منحنية" وتداخل كيميائي فيزيائي معقد، هذا يعني أن هناك نسب محددة من الخلط إذا تم تجاوزها تنهار الروابط الهيدروجينية للمادة وتزداد ذوبانيتها بشكل غير خطي.

أما بالنسبة إلى تحليل التباين للمسامية يعتبر الأقوى إحصائياً وعلمياً في الدراسة، مع توفير دقة تنبؤية فائقة، حيث قيمة p-value للنموذج كانت أقل من (0.0001)، وR^2 مرتفعة جداً بقيمة (0.9786)، مما يعني أن النموذج يغطي (97.8%) من المتغيرات المؤثرة على مسامية المادة، جميع العوامل الفردية والتربيعية كانت معنوية للغاية، حيث سجل الجلسرين أعلى قيمة (157.92) F-value والتفسير العلمي الذي يربط بين عمل الجلسرين كملدن للهيكل البوليمري والبازلاء كبناء له، حيث يحدد التوازن بينهما كثافة وحجم الفراغات المجهرية داخل المادة.

أما بالنسبة إلى تحليل التباين لنسبة الرطوبة فأظهر النموذج معنوية مقبولة (p-value =0.0112) مع(R^2=0.8366) ، كان لكل من البازلاء (p-value =0.0187) والجلسرين (p-value =0.0310) تأثير خطي معنوي، ولكن الأهم هو التأثير التربيعي القوي للجلسرين (p-value = 0.0044) يخبرنا هذا بأن الجلسرين لا يزيد الرطوبة بشكل خطي بسيط بل توجد قيمة تشبع عند إضافة الجلسرين بكميات صغيرة إلى متوسطة، تزداد الرطوبة بسرعة لأنه يجذب الماء من الجو ويحتفظ به، لكن عند إضافة كميات كبيرة جدًا من الجلسرين قد تصبح المادة مشبعة تمامًا بالرطوبة أو قد يحدث فصل طوري مما يبطئ الزيادة الإضافية في الرطوبة، أما البازلاء فتحتوي على ماء داخلي مرتبط ببنيتها، ولذلك زيادة كتلتها تزيد الرطوبة الكلية للمادة، هذا السلوك مهم عمليًا خاصة إذا كانت المادة ستُستخدم في بيئات رطبة أو معرضة للهواء.

الجدول(IV .3) : تحليل التباين (ANOVA) لاستجابة خمس استجابات (قابلية التحلل البيولوجي (%)، نسبة امتصاص الماء (%)، نسبة الرطوبة (%)، نسبة الذوبان في الماء (%)، والمسامية (%))

تحليل التباين (ANOVA)					
الاستجابة 1: التحلل البيولوجي					
Source	**Sum of Squares**	**DF**	**Mean Square**	**F-value**	**p-value**
Model	168.30	5	33.66	2.21	0.1653
A-Pea mass	96.91	1	96.91	6.36	0.0397
B-Glycerin mass	6.91	1	6.91	0.4535	0.5223
AB	53.00	1	53.00	3.48	0.1045
A^2	3.53	1	3.53	0.2317	0.6450
B^2	9.24	1	9.24	0.6062	0.4617
Residual	106.70	7	15.24		
Lack of Fit	106.70	3	35.57		
Pure Error	0.0000	4	0.0000		
Cor Total	275.00	12			
R^2: 0.6120					
الاستجابة 2: امتصاص الماء					
Source	**Sum of Squares**	**DF**	**Mean Square**	**F-value**	**p-value**
Model	202.10	5	40.42	7.36	0.0104
A-Pea mass	1.90	1	1.90	0.3465	0.5746
B-Glycerin mass	179.02	1	179.02	32.61	0.0007
AB	10.99	1	10.99	2.00	0.2000
A^2	6.51	1	6.51	1.19	0.3122
B^2	2.46	1	2.46	0.4486	0.5245
Residual	38.43	7	5.49		
Lack of Fit	38.43	3	12.81		
Pure Error	0.0000	4	0.0000		
Cor Total	240.53	12			
R^2: 0.8402					
الاستجابة 3: الذوبان في الماء					
Source	**Sum of Squares**	**DF**	**Mean Square**	**F-value**	**p-value**
Model	198.36	5	39.67	7.04	0.0117
A-Pea mass	1.03	1	1.03	0.1827	0.6819

B-Glycerin mass	89.43	1	89.43	15.86	0.0053
AB	10.96	1	10.96	1.94	0.2060
A^2	70.54	1	70.54	12.51	0.0095
B^2	38.32	1	38.32	6.80	0.0351
Residual	39.46	7	5.64		
Lack of Fit	39.46	3	13.15		
Pure Error	0.0000	4	0.0000		
Cor Total	237.83	12			
R^2: 0.8341					
الاستجابة 4: المسامية					
Source	**Sum of Squares**	**Df**	**Mean Square**	**F-value**	**p-value**
Model	309.28	5	61.86	63.95	< 0.0001
A-Pea mass	59.51	1	59.51	61.53	0.0001
B-Glycerin mass	152.74	1	152.74	157.92	< 0.0001
AB	2.76	1	2.76	2.85	0.1353
A^2	22.60	1	22.60	23.37	0.0019
B^2	81.25	1	81.25	84.00	< 0.0001
Residual	6.77	7	0.9672		
Lack of Fit	6.77	3	2.26		
Pure Error	0.0000	4	0.0000		
Cor Total	316.05	12			
R^2: 0.9786					
الاستجابة 5: الرطوبة					
Source	**Sum of Squares**	**Df**	**Mean Square**	**F-value**	**p-value**
Model	22.49	5	4.50	7.17	0.0112
A-Pea mass	5.82	1	5.82	9.27	0.0187
B-Glycerin mass	4.55	1	4.55	7.25	0.0310
AB	0.0380	1	0.0380	0.0606	0.8127
A^2	0.5430	1	0.5430	0.8649	0.3833
B^2	10.71	1	10.71	17.06	0.0044
Residual	4.39	7	0.6278		
Lack of Fit	4.39	3	1.46		
Pure Error	0.0000	4	0.0000		
Cor Total	26.89	12			
R^2: 0.8366;					

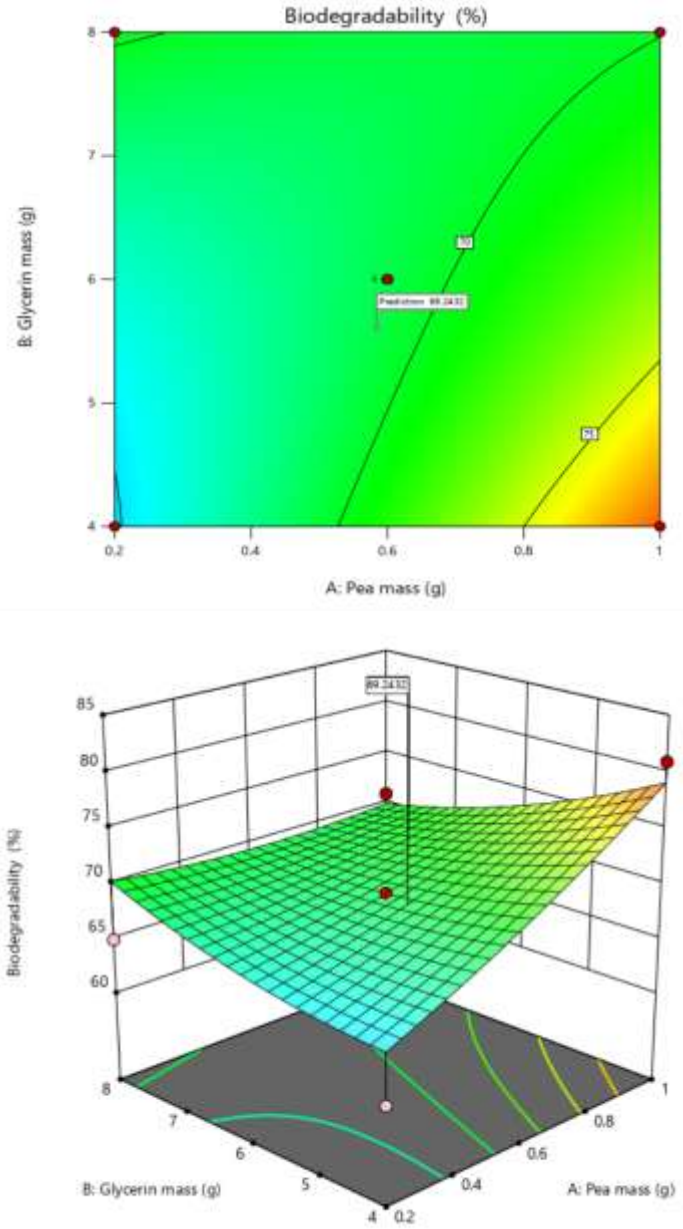
5.IV تحسين الاستجابة

تمثل الخطوة ما قبل الأخيرة في هذه الدراسة تحديد قيم المتغيرات المستقلة التي تؤدي إلى الحصول على الاستجابة المثلى، وذلك بالاعتماد على النموذج الرياضي المستخلص باستخدام البرنامج الإحصائي، وبناءً على ذلك تم الحصول على الأشكال ثنائية الأبعاد، التي يُنشئها برنامج Design-Expert من خلال دمج العوامل المستقلة مع الاستجابة المعبر عنها بالمردود.

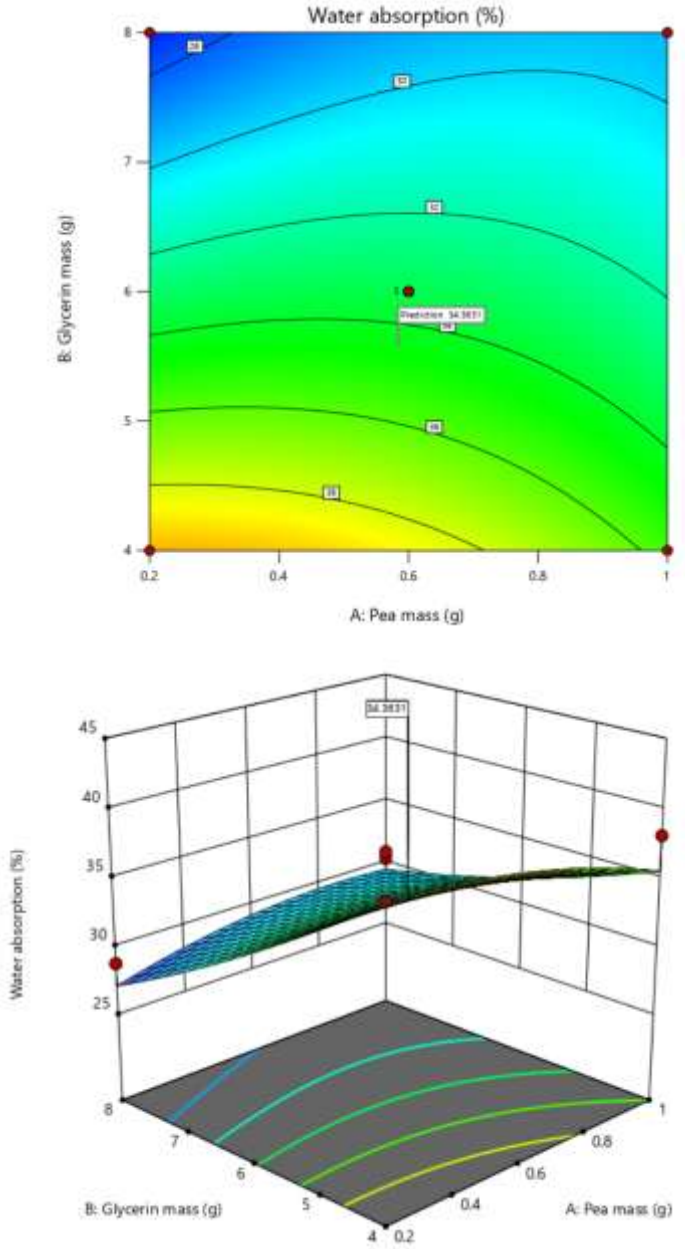
في كل مرة يتم تثبيت أحد العوامل على ثلاثة مستويات مختلفة (مرتفع، منخفض، ومتوسط)، ثم تُقيَّم الاستجابة (الممثلة على المحور Z) بدلالة العاملين الآخرين (على المحورين X و Y) باستخدام الأشكال ثلاثية الأبعاد، وتتيح لنا هذه الأشكال إمكانية البحث عن الظروف المثلى الأكثر توقعًا وتحقيقًا لمحاكاة دقيقة للعمل التجريبي.

يوضح **الشكل (2.IV)** تأثير المتغيرات المختلفة وتفاعلاتها عموماً على تحلل البيولوجي، حيث يظهر الشكل أن كتلة البازلاء (A) هي العامل الأكثر تأثيراً في تعزيز قابلية التحلل البيولوجي للبلاستيك الحيوي، حيث تزداد النسبة بشكل طردي وواضح كلما زادت كمية البازلاء لتتجاوز (75%) عند وصول الكتلة إلى (1غرام)، وفي المقابل يظهر تأثير كتلة البازلاء (A) بشكل عكسي طفيف إذ تتحقق أعلى مستويات التحلل التي تصل إلى (80.92%) عند دمج أقصى كمية من البازلاء مع أدنى كمية من الجلسرين (4 غرام)، وتكشف نقطة التنبؤ المركزية في المخطط عن قيمة متوقعة تبلغ حوالي (69.24%)، مما يؤكد أن البازلاء تعمل كمحفز أساسي للتفكك الحيوي للمادة.

يُظهر **الشكل (3.IV)** تأثير كل من كتلة البازلاء (A) وكتلة الجلسرين (B) على نسبة امتصاص الماء (%) للبلاستيك الحيوي حيث أظهرت النتائج أن كتلة الجلسرين (B) هي العامل الأكثر تأثيراً على قدرة البلاستيك على امتصاص الماء، حيث توجد علاقة عكسية واضحة، فكلما زادت كتلة الجلسرين انخفضت نسبة امتصاص الماء لتصل إلى أدنى مستوياتها (حوالي 28%)، وفي المقابل تزداد نسبة الامتصاص لتتجاوز 38% عند تقليل كمية الجلسرين إلى أدنى مستوياتها، أما بالنسبة لـ كتلة البازلاء (A) فيبدو تأثيرها أقل حدة، حيث تساهم الزيادة الطفيفة في كتلة البازلاء في استقرار نسبة الامتصاص ضمن نطاق معين وتكشف نقطة التنبؤ المركزية في المخطط عن قيمة متوقعة تبلغ (34.36%)، مما يشير إلى أن الجلسرين يعمل كمادة لدنّة تقلل من نفاذية الماء داخل الهيكل البوليمري عند زيادة تركيزه.



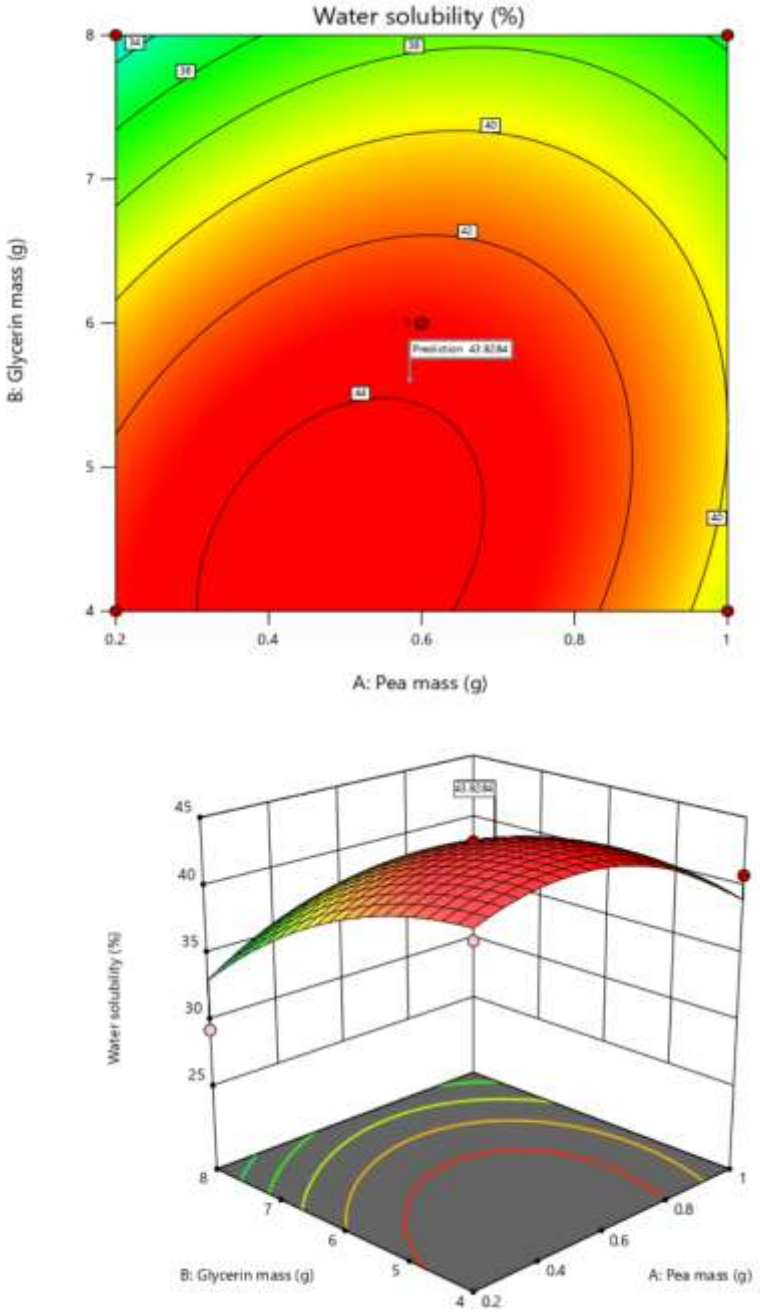
الشكل (2.IV): تأثير كتلة البازلاء (A) وكتلة الجلسرين (B) على التحلل البيولوجي (%).



الشكل (3.IV): تأثير كتلة البازلاء (A) وكتلة الجلسرين (B) على امتصاص الماء (%).

يُظهر **الشكل (4.IV)** تأثير كل من كتلة البازلاء (A) وكتلة الجلسرين (B) على نسبة الذوبان في الماء (%) للبلاستيك الحيوي المنتج، نلاحظ أن أعلى نسبة ذوبان (تتجاوز 44%) تتحقق عند دمج كميات متوسطة إلى منخفضة من كلا المتغيرين، وتحديداً عندما تكون كتلة البازلاء بين 0.4 و0.6 غرام مع كتلة جلسرين تقارب 4 إلى 5 غرام، وبالمقابل تنخفض نسبة الذوبان لتصل إلى أدنى مستوياتها (حوالي 34%) عند زيادة كتلة الجلسرين إلى حدها الأقصى (8غرام) مع تقليل كتلة البازلاء، وتكشف نقطة التنبؤ (Prediction) أن القيمة المتوقعة عند المركز هي (43.82%)، مما يفسر أن التفاعل بين المادة الملدنة

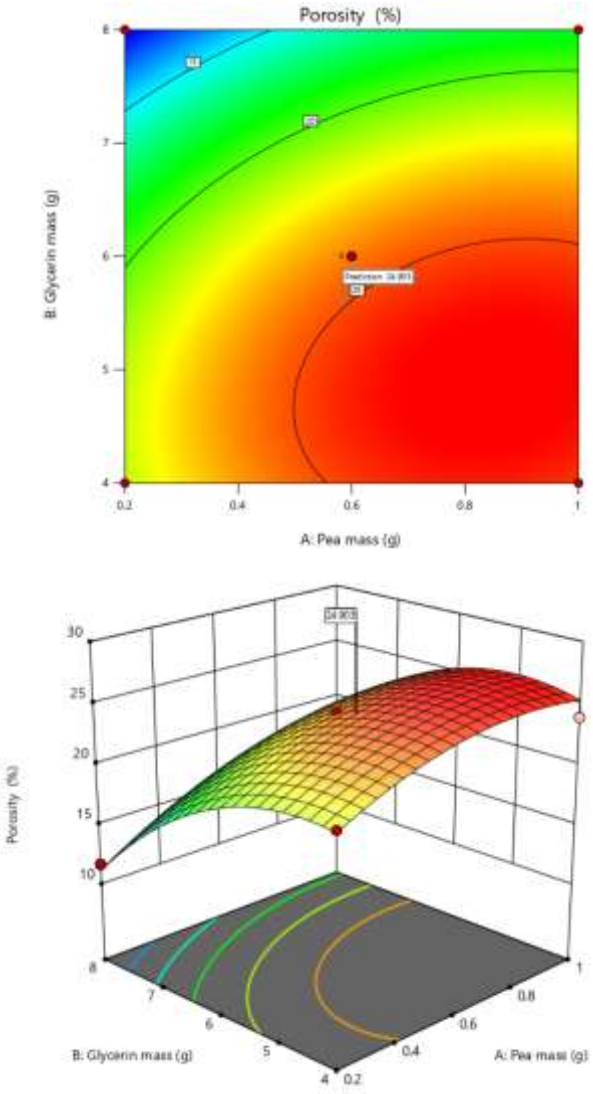
(الجلسرين) والمادة الأساسية (البازلاء) يؤدي إلى تكوين بنية بوليمرية تختلف درجة تماسكها ومقاومتها للماء بناءً على هذه النسب الدقيقة.



الشكل (4.IV): تأثير كتلة البازلاء (A) وكتلة الجلسرين (B) على الذوبان في الماء (%).

يُظهر **الشكل (5.IV)** تأثير كل من كتلة البازلاء (A) وكتلة الجلسرين (B) على المسامية (%) للبلاستيك الحيوي، نلاحظ وجود علاقة طردية واضحة، فكلما زادت كمية البازلاء تزداد نسبة المسامية لتصل إلى أعلى مستوياتها (تتجاوز 25%) ، وفي المقابل يلعب الجلسرين (B) دوراً عكسياً إذ تنخفض المسامية

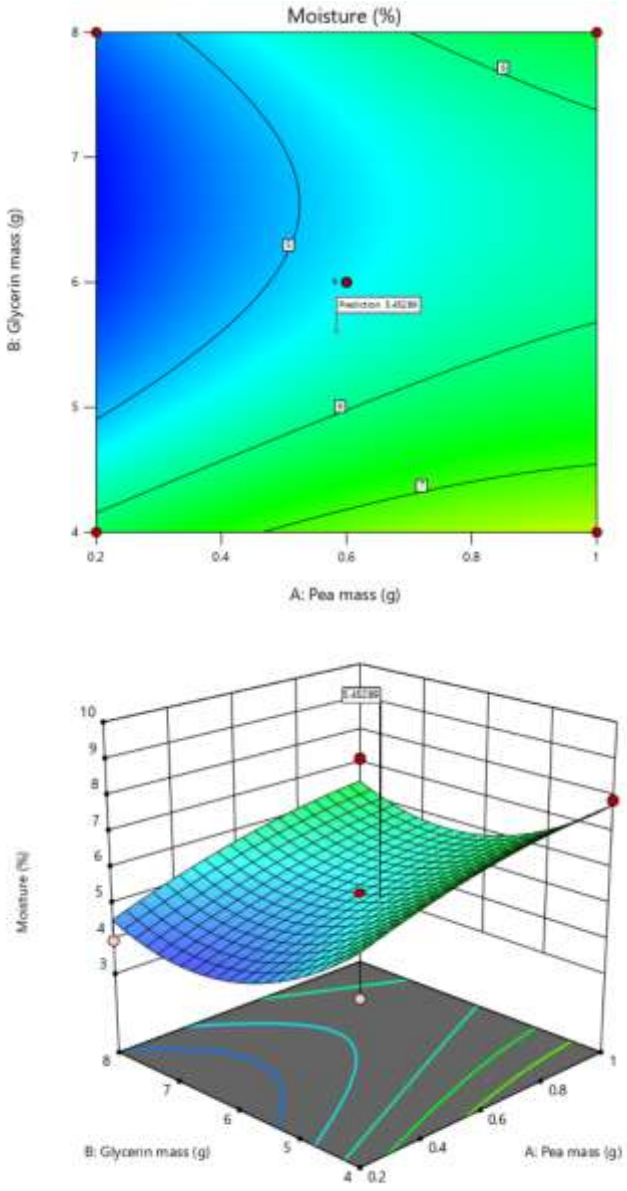
بشكل ملحوظ عند زيادة كتلته لتصل إلى أدنى قيمها (حوالي 11.47%) عند دمج كمية كبيرة من الجلسرين مع كمية قليلة من البازلاء، وتكشف نقطة التنبؤ (Prediction) أن القيمة المتوقعة عند المركز هي (24.90%)، ويُفسر ذلك علمياً بأن زيادة المادة النباتية الصلبة (البازلاء) تساهم في تكوين فراغات بنيوية أكثر، بينما يعمل الجلسرين كمادة مالئة وملدنة تقلل من هذه الفراغات وتجعل هيكل البلاستيك أكثر تماسكاً وأقل مسامية.



الشكل (5.IV): تأثير كتلة البازلاء (A) وكتلة الجلسرين (B) على المسامية (%).

يُظهر **الشكل (6.IV)** تأثير كل من كتلة البازلاء (A) وكتلة الجلسرين (B) على نسبة الرطوبة (Moisture %) للبلاستيك الحيوي، حيث نلاحظ أن نسبة الرطوبة تتأثر بشكل ملحوظ بزيادة كتلة البازلاء (A)، حيث تزداد الرطوبة كلما انتقلنا من اليسار إلى اليمين لتصل إلى أعلى مستوياتها (بنسبة تتجاوز

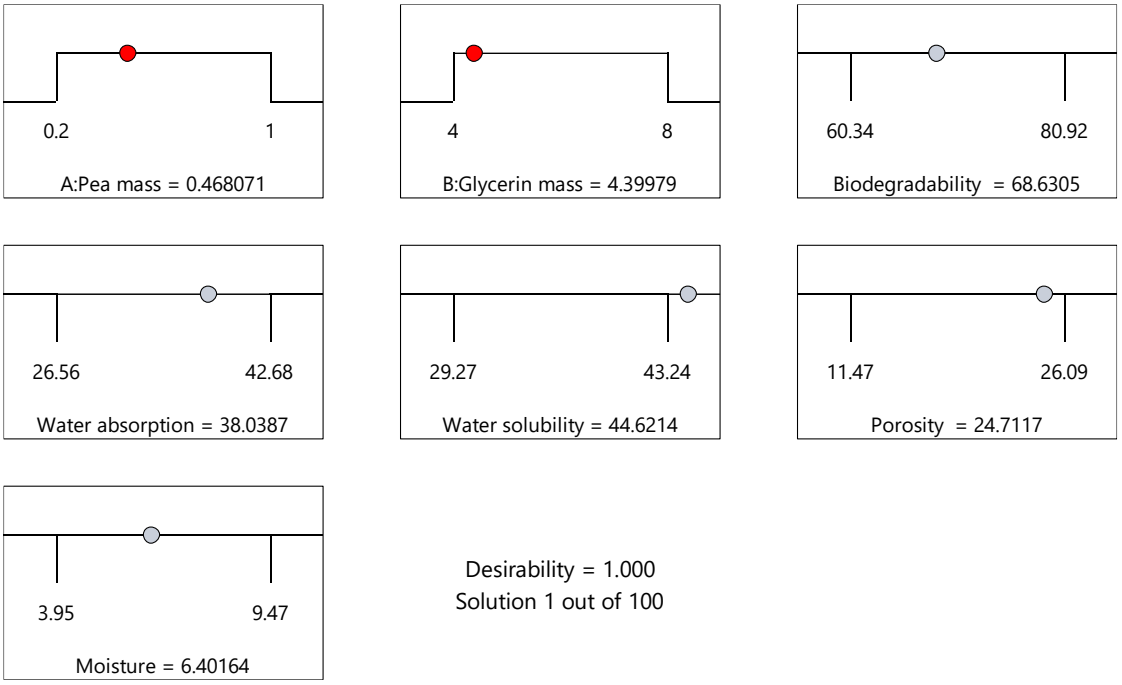
7%) عند زيادة المادة النباتية، أما بالنسبة لكتلة الجلسرين (B) فيلاحظ وجود علاقة عكسية طفيفة، إذ تزداد الرطوبة عند تقليل كمية الجلسرين نحو الحد الأدنى (4 غرام)، بينما تنخفض لتصل إلى أقل مستوياتها (بنسبة أقل من 5%) عند زيادة كمية الجلسرين مع تقليل كمية البازلاء وتكشف نقطة التنبؤ المركزية (Prediction) عن قيمة متوقعة تبلغ (5.45%) عند استخدام نسب متوسطة من المكونين، حيث يؤكد هذا السلوك إلى أن زيادة المادة الأساسية (البازلاء) تزيد من قدرة الغشاء على الاحتفاظ بالرطوبة ضمن هيكله البوليمري، بينما يعمل الجلسرين بتركيزات معينة على تعديل هذه القدرة.



الشكل (6.IV): تأثير كتلة البازلاء (A) وكتلة الجلسرين (B) على الرطوبة (%).

IV. 6 القيم المثلى المتوقعة للمتغيرات في نموذج التنبؤ

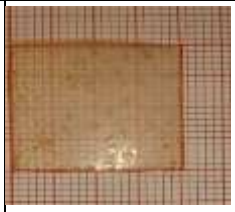
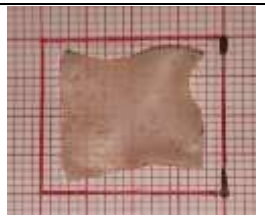
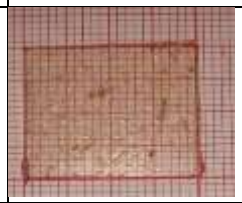
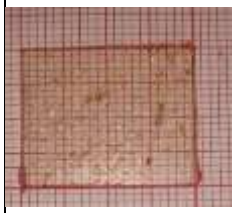
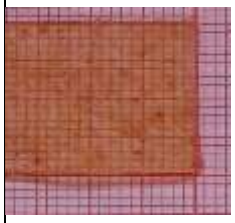
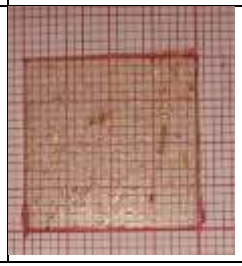
تم استخلاص القيم المثلى المتوقعة للمتغيرات من خلال النموذج الرياضي الخاص بالتنبؤ، وذلك بعد إجراء حسابات التصميم الإحصائي التكميلي تحت نفس الظروف التجريبية، وقد بلغت قيمة معامل الاستحقاق (الملاءمة) 1، كما هو موضح في **الشكل (7.IV)**، وبناءً على ذلك تم تحديد القيم المثلى على النحو التالي: حيث بلغت الاستجابات مثلى لقابلية تحلل بيولوجي (68.63%)، امتصاص ماء (38.04%)، ذوبان في الماء (44.62%)، مسامية (24.71%)، ورطوبة (6.40%) بتوافق مع كتلة بازلاء مقدارها (0.468071غ) وكتلة جلسرين مقدارها (4.39979غ).

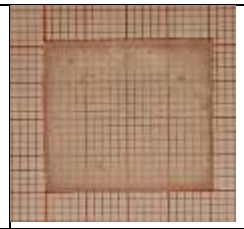
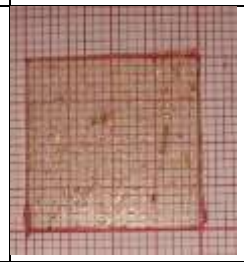
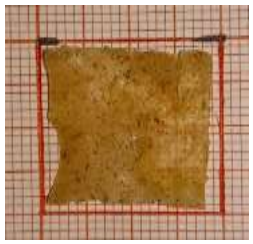
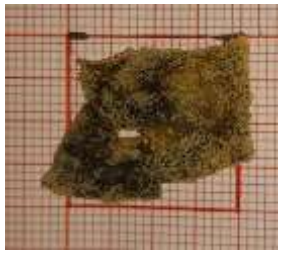
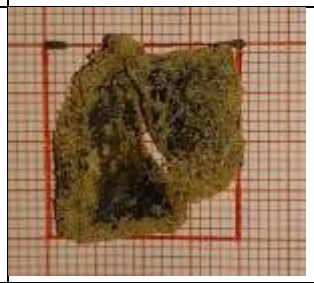
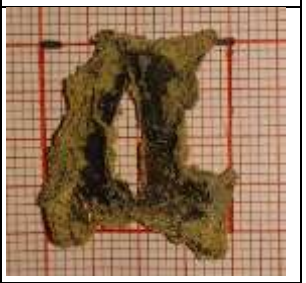
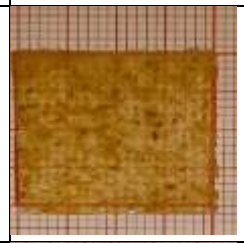
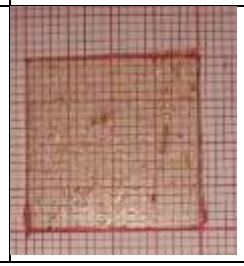


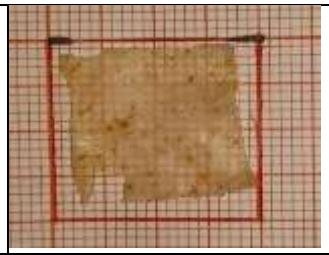
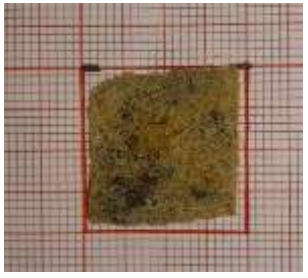
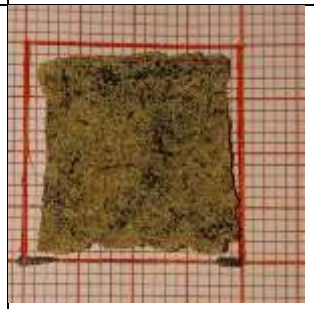
الشكل (7.IV): الظروف المثلى المتوقعة بطريقة التصميم المركب المركزي.

7.IV التحلل البيولوجي لبلاستيك الحيوي في التربة

يظهر **الشكل (8.IV)** عملية التحلل الحيوي لعينات مختلفة من البلاستيك الحيوي المنتجة على مدار 30 يوماً، في البداية (اليوم 0)، تظهر العينات ببنية متماسكة وشفافة أو نصف شفافة ذات أسطح ملساء، ومع مرور الوقت وتحديداً بدءاً من اليوم 5 إلى اليوم 15، يبدأ لون العينات في التغير ليصبح داكناً مع ظهور علامات التآكل والتشقق على الحواف نتيجة نشاط الكائنات الحية الدقيقة في التربة، وبحلول اليوم 20 واليوم 30 يزداد التفكك البنيوي بشكل حاد، حيث تظهر فجوات واضحة وتفتت في الكتلة الكلية للعينات، مما يشير إلى كفاءة المكونات الطبيعية (كتلة البازلاء) في تسريع عملية التحلل البيولوجي وتحويل المادة البوليمرية إلى مركبات بسيطة.

	0 يوم	5 أيام	10 أيام	15 يوم	20 يوم	30 يوم
1						
2						
3						
4						
5						

6						
7						
8						
9						
10						

11						
12						
13						

الشكل (8.IV): تأثير التحلل البيولوجي لبلاستيك حيوي المنتج على فترات زمنية مختلفة.

الخـــــاتمة

العامــة

الخاتمة العامة

تؤكد نتائج هذا البحث أن تصنيع البلاستيك الحيوي من البازلاء يُعد بديلاً عملياً ومستداماً للغاية عن البلاستيك التقليدي وباستخدام تصميم المركب المركزي (CCD)، تبيّن أن التفاعل بين المكون الحيوي الأساسي (كتلة البازلاء) والمُلدّن (الجلسرين) هو ما يُحدد الخصائص النهائية للمادة وقد أوضحت الدراسة أن كتلة البازلاء هي المكون الأساسي لبناء مصفوفة البوليمر، بينما يعمل الجلسرين كمُوسّع حاسم، وأن التوازن بينهما هو مفتاح تحسين أداء البلاستيك الحيوي.

أظهرت الدراسة دقة عالية في التنبؤ بسلوك المادة، لا سيما فيما يتعلق بالمسامية، حيث بلغ معامل الارتباط 0.9786 (R^2) ، ومحتوى الرطوبة 0.8366 ، ولوحظ أن زيادة كتلة البازلاء تُحسّن بشكل ملحوظ قابلية التحلل الحيوي لتصل إلى مستويات عالية تصل إلى 80.92%، في المقابل وُجد أن كتلة الجلسرين هي العامل المهيمن في التحكم بامتصاص الماء وذوبانه، حيث تُسهّل قطبيته العالية اختراق جزيئات الماء لسلاسل البروتين في مخلفات البازلاء.

سمحت عملية التحسين باستخدام برنامج Design–Expert بتحديد الظروف التجريبية المثالية، وتشير النتائج إلى إمكانية إنتاج بلاستيك حيوي ذي توافق بيئي عالي وخصائص فيزيائية مستقرة عند نقطة تنبؤ مركزية تبلغ 69.24% للتحلل الحيوي و34.36% لامتصاص الماء وتوفر هذه النتائج أساسًا متينًا للتطبيقات الصناعية المستقبلية، مما يشير إلى إمكانية تصميم البلاستيك الحيوي المستخلص من البازلاء لاستخدامات مُحددة من خلال ضبط تركيزات المكونات العضوية المُستخدمة في هذه الدراسة بدقة.