

تقييم الكفاءة الحيوية ليرقات عثة الشمع الكبرى (*Galleria mellonella*) في التحلل الحيوي لمادة البوليسترين تحت الظروف المختبرية

آمال عاشور محمد

مركز البحوث الزراعية والثروة الحيوانية، البيضاء، ليبيا

amalashoor@gmail.com

Evaluation of the Biological Efficiency of Greater Wax Moth Larvae (*Galleria mellonella*) in the Biodegradation of Polystyrene under Laboratory Conditions.

Amal Ashour Mohammed

Agricultural and Animal Wealth Research Center, Al-Bayda, Libya

amalashoor@gmail.com

تاريخ الاستلام: 2026/04/01 تاريخ المراجعة 2026 /04/30 تاريخ القبول: 2026/05/13- تاريخ النشر: 2026 /06/16

الملخص

هدفت هذه الدراسة المختبرية إلى تقييم القدرة التحليلية والكفاءة الحيوية ليرقات عثة الشمع الكبرى (*Galleria mellonella*)، المجموعة محلياً من مناحل منطقة "الزحيم" بليبيا، تجاه مادة البوليسترين الرغوي (الفلين الصناعي) الذي يشكل تهديداً بيئياً كبيراً. بعد تربية اليرقات وتغذيتها طبيعياً حتى بلوغ الطور المناسب، عُزلت 100 يرقة متجانسة وخضعت للتجويد القسري مدة 48 ساعة، ثم قُسمت عشوائياً إلى مجموعتين متساويتين (50 يرقة لكل مجموعة): مجموعة تجريبية قُدِّمت لها قطعة بوليسترين قياسية بأبعاد (5cm x 5cm) كمصدر غذاء وحيد، ومجموعة ضابطة استمرت تغذيتها القياسية على شمع العسل الطبيعي. أظهرت النتائج كفاءة ميكانيكية وسلوكية عالية ليرقات المجموعة التجريبية في اختراق وتفكيك البوليسترين وإحداث ثقوب ملتحمة فيه خلال أول 12 ساعة من التعرض. ومع ذلك، كشف تحليل البقاء الإحصائي بطريقة كابلان-ماير (Kaplan-Meier) واختبار لوج-رانك (Log-Rank) عن تباين معنوي ودال إحصائياً ($p = .000$) بين المجموعتين خلال فترة الرصد الرقمي (7 أيام)؛ حيث واجهت مجموعة البوليسترين انخفاضاً حاداً ونفوفاً جماعياً بنسبة 94%؛ إذ سجل متوسط زمن البقاء لها 4.22 يوماً (بفاصل ثقة 95%: 3.82 - 4.63 يوماً)، في حين بلغ وسيط زمن البقاء لها 4.00 أيام نتيجة الإجهاد الحيوي والحرمان الغذائي الكيميائي. في المقابل، حافظت المجموعة الضابطة على استقرار معدل البقاء الذي بلغ 92%. أثبتت الدراسة أن قضم اليرقات للبوليسترين هو سلوك ميكانيكي اضطراري بدافع الجوع وليس كعنصر غذائي مستدام، مما يستدعي توجيه الأبحاث المستقبلية نحو استخلاص الأنزيمات المعوية المسؤولة عن التفكيك دون إجهاد الحشرة حيويًا.

الكلمات المفتاحية: عثة الشمع الكبرى، التحلل الحيوي، البوليسترين، ليبيا.

Abstract:

This laboratory study aimed to evaluate the degradative capacity and bio-efficiency of greater wax moth larvae (*Galleria mellonella*), collected locally from apiaries in the Al-Zahim region, Libya, against expanded polystyrene (Styrofoam), a significant environmental threat. Following natural rearing and feeding until reaching the appropriate size, 100 homogeneous larvae were isolated and subjected to forced starvation for 48 hours. The larvae were then randomly divided into two equal groups ($n = 50$ per group): an experimental group provided with a standard polystyrene piece (5cm x 5cm) as the sole food source, and a control group maintained on their standard diet of natural beeswax. The results demonstrated high mechanical and behavioral efficiency of the larvae in penetrating and disintegrating the polystyrene, creating coalescing holes within the first 12 hours of exposure. However, statistical survival analysis using the Kaplan-Meier method and the Log-Rank test revealed a statistically significant difference ($p = .000$) between the two groups during the 7-day digital monitoring period. The polystyrene group experienced a sharp decline and mass mortality of 94%, with a mean survival time of 4.22 days (95% CI: 3.82–4.63 days) and a median survival time of 4.00

days due to bio-stress and chemical nutritional deprivation. Conversely, the control group maintained stability with a survival rate of 92%. The study proved that the larvae's chewing of polystyrene is an obligatory mechanical behavior driven by forced hunger rather than a sustainable nutrient, which warrants directing future research toward extracting the intestinal enzymes responsible for degradation without biologically stressing the insect

.Keywords: *Galleria mellonella*, bio-degradation, polystyrene, Libya

المقدمة:

تعد المخلفات البلاستيكية من أخطر المشكلات البيئية في الوقت الراهن؛ إذ تهدد الحياة البرية والصحة البشرية. وتسعى دول العالم إلى خفض معدلات إنتاج البلاستيك للتخفيف من الضغوط البيئية على النظم الحيوية التي تواجه تحديات أخرى كالأضرار الحمضية والمبيدات الزراعية والمخسبات الكيميائية. ومن بين هذه النفايات البلاستيكية، يبرز الفلين الصناعي (البوليسترين) كمهدد كبير للبيئة نظراً لبطء تحلله الطبيعي الذي يستغرق مئات السنين، مما يؤدي إلى تراكمه في المكبات وتلوث التربة والمياه، فضلاً عن الأضرار الصحية الناتجة عن انبعاث الغازات السامة عند حرقه وارتباطها بأمراض خطيرة كالأورام وسوء التغذية (Geyer et al., 2017; Zheng et al., 2021).

يتكون البوليسترين من سلاسل كيميائية معقدة وطويلة من البوليمرات تمنحه استقراراً بنائياً ومقاومة عالية للظروف الجوية، مما يجعله صعب التفكك بالطرق التقليدية. ويعد البوليسترين من أكثر المواد شيوعاً في التطبيقات أحادية الاستخدام، وخاصة في أواني الوجبات الجاهزة، نظراً لتكلفته المنخفضة، وبساطة تصنيعه، وخصائصه الميكانيكية المقبولة، وثباته الكيميائي، وهو ما يسهم بشكل مباشر في ظاهرة "التلوث الأبيض" (تراكم المواد البلاستيكية في التربة) (Botelho et al., 2004). وتثير طبيعة هذه المادة المنتشرة ومقاومتها للتحلل قلقاً بيئياً بالغاً؛ حيث أثبتت الدراسات أن اللدائن الدقيقة (Microplastics) المستخلصة من البوليسترين تؤثر سلباً في وظائف الكلى لدى الفئران، وتحدث التهاباً حاداً في المثانة وتؤدي إلى انخفاض الكرياتينين (Ahmed et al., 2023).

وعلى الرغم من أن البوليسترين يصنف عموماً كمادة غير قابلة للتحلل، فإن بعض الكائنات الحية تمتلك القدرة على تفكيكه ببطء. ففي عام 2015، اكتشف الباحثون أن ديدان الوجبة (Mealworms) -وهي الطور اليرقي لخنفساء الدقيق الداكنة (*Tenebrio molitor*) يمكنها هضم البوليسترين الممدد. وبحلول عام 2016، أُشير أيضاً إلى قدرة الديدان الخارقة (*Zophobas atratus*) على الاقتيات عليه؛ حيث وجد أن يرقات الديدان الخارقة تستهلك كميات أكبر من البوليسترين الممدد على مدى فترات أطول مقارنة بديدان الوجبة (Yang et al., 2015; Al-Rasheed et al., 2016).

وفي هذا السياق، تبرز يرقات عثة الشمع الكبرى (*Galleria mellonella*)، وهي آفة شائعة تصيب خلايا النحل وتعيش متطفلة داخل مستعمراتها؛ حيث تضع العثة بيضها داخل الخلايا لتفقس اليرقات وتتغذى على شمع العسل الطبيعي. وقد جذبت هذه اليرقات الاهتمام العلمي لقدرتها المحتملة على تفكيك البلاستيك؛ إذ أظهرت الدراسات قدرتها على تحليل البوليسترين، وتحليل البولي إيثيلين بواسطة ميكروبات الأمعاء المتعايشة (Bombelli et al., 2017). ومع ذلك، لا تزال هناك فجوة معرفية تتطلب فهم الآليات الإنزيمية والجزيئية الدقيقة الكامنة وراء هذه القدرة، وتقييم كفاءتها تحت ظروف مختبرية محددة، وتحديد تأثير التغذية الحصرية للبوليسترين في بقاء اليرقات وصحتها الفسيولوجية.

امتداداً لتلك الدراسات، تُعد يرقات عثة الشمع الكبرى خياراً واعداً وأداة بيئية هامة في مجالات المعالجة الحيوية. تسعى هذه الدراسة المختبرية إلى تقييم الكفاية الحيوية ليرقات عثة الشمع الكبرى (المحلية)، في تفكيك مخلفات البوليسترين الرغوي، من هذا المنطلق، وبناءً على ما تقدم، تم صياغة أهداف هذه الدراسة الحالية.

أهداف الدراسة:-

تقييم القدرة التحليلية ليرقات عثة الشمع الكبرى (*Galleria mellonella*) على مادة البوليسترين في بيئة معملية، وتحديد تأثير التغذية عليها كغذاء وحيد على معدل بقاء اليرقات. كما سعت الدراسة إلى مقارنة معدل بقاء اليرقات التي تتغذى على هذه المادة بتلك التي تتغذى على شمع العسل (كمجموعة ضابطة)، وتحليل العلاقة بين استهلاك البوليمر وبقاء اليرقات؛ لتحديد مدى استدامة استخدامها كأداة بيئية للتخلص من النفايات البلاستيكية.

المواد وطرق البحث:

1 جمع وتربية يرقات دودة الشمع الكبرى أُجريت هذه الدراسة المختبرية خلال شهر مارس لعام 2023م؛ حيث تم القيام بزيارات ميدانية لمناحل النحل الموجودة في المزرعة بمنطقة "الزحيم" بليبيا. وخلال الفحص، لوحظ وجود إصابة حشرية واضحة بعثة الشمع في خلايا النحل؛ فتم جمع أفراس الشمع المصابة، ونُقلت بعناية إلى حاويات بلاستيكية معقمة ومحكمة الإغلاق الشكل (2). ووُفرت للعينات ظروف بيئية مثالية مع تأمين إضاءة خافتة وتغطية الحاويات بقطعة من قماش الشاش لتوفير ظلام دامس لمدة 24 ساعة، كما جرى الحفاظ على درجة حرارة الغرفة ثابتة عند 28°م؛ وذلك لتأمين البيئة الملائمة لتحفيز فقس البيض الكامن وتطور الأطوار اليرقية تحت الملاحظة. وبعد فترة زمنية محددة، فقس البيض ونمت اليرقات وبدأت في الحركة والتغذية على شمع العسل الطبيعي المتوفر كما في الشكل (4) حتى وصلت للحجم والكتلة الفسيولوجية المناسبة لإجراء الاختبارات العلمية، وهو بروتوكول التربية القياسي المعتمد في الدراسات المرجعية لتجهيز يرقات الحشرات قبل تعرضها للملوثات (Elli et al., 2013).

2-تصميم التجربة.

لتقييم القدرة التحليلية ليرقات دودة الشمع على البوليسترين وتأثيره على بقائها، تم تصميم تجربة معملية على النحو التالي: تجهيز اليرقات وعزلها: تم عزل 100 يرقة نشطة وسليمة من يرقات دودة الشمع الكبرى (*Galleria mellonella*)، وتنظيفها بالماء الدافئ لإزالة أي بقايا ملتصقة من شمع العسل. ويُعد عزل هذا العدد المحدد من اليرقات المتجانسة في الحجم والطور اليرقي إجراءً قياسياً معتمداً في دراسات التحلل الحيوي للبلاستيك؛ لضمان دقة القراءات الحيوية والميكانيكية اللاحقة (Bombelli et al., 2018). قُسمت اليرقات بعد ذلك عشوائياً إلى مجموعتين متساويتين (50 يرقة لكل مجموعة).

المجموعة التجريبية (البوليسترين): تم تجويع اليرقات مخبرياً لمدة 48 ساعة في حاوية بلاستيكية صلبة؛ إذ تعد هذه الخطوة منهجية هامة تهدف إلى تفرغ أمعائها وقناتها الهضمية بالكامل من بقايا الغذاء الطبيعي السابق بالكامل كما في الشكل (5)، فضلاً عن تحفيز دافعها الغذائي وتوجيه سلوكها لقمص المادة البلاستيكية البديلة، وهو البروتوكول القياسي المعمول به في الاختبارات البيولوجية للحشرة (Jorjão et al., 2018). بعد انتهاء فترة التجويع، وُضعت اليرقات على قطعة من البوليسترين بأبعاد قياسية بلغت (5cm × 5cm) كما في الشكل (6)، تم الحصول عليها من قطع تغليف مضخة منزلية، كغذاء وحيد وحصري.

المجموعة الضابطة (شمع العسل): وضعت 50 يرقة أخرى في حاوية مماثلة وتغذت على شمع العسل كغذاء طبيعي، كما في الشكل (4)؛ وذلك للمقارنة وضمان ضبط المتغيرات.

المراقبة والقياسات: استمرت فترة المراقبة والمتابعة الفسيولوجية الشاملة لمدة 31 يوماً كاملة. تم رصد وتسجيل أعداد اليرقات الحية والنفوق يومياً بدقة خلال الأسبوع الأول (7 أيام)، وهي الفترة التي شهدت النشاط الحركي الأساسي والتحول التطوري، للعينة التجريبية، وبناءً على هذا المدى الزمني أُجريت التحليلات الرقمية الجدولية. بعد اليوم السابع، تم الاكتفاء بالمراقبة البصرية التوثيقية والملاحظة الحيوية المورفولوجية للمجموعتين حتى اليوم 31.

معدل التحلل الظاهري: تم فحص مكعب البوليسترين يومياً لمراقبة قدرة اليرقات على القضم والتثقيب، وتم التقاط صور فوتوغرافية توثيقية لمراحل التآكل المورفولوجية والتحلل الميكانيكي للمكعب.

3-التحليل الإحصائي -

بناءً على طبيعة البيانات المبتورة (Censored Data) والنفوق السريع خلال مدة المراقبة (7 أيام)، تم استخدام برنامج SPSS لتطبيق التحليلات الإحصائية التالية:

الإحصاء الوصفي (Descriptive Statistics): لحساب أعداد الوفيات اليومية والنسب المئوية المتراكمة لموت وبقاء اليرقات في المجموعتين.

تحليل كابلان-ماير للبقاء (Kaplan-Meier Survival Analysis): وهو التحليل الاستدلالي الرئيسي المستخدم لمقارنة منحنيات البقاء على قيد الحياة، وتحديد وسيط زمن البقاء (Median Survival Time) بدقة لكل مجموعة عبر الزمن.

اختبار لوج-رانك (Log-Rank Test / Mantel-Cox): تم تطبيق هذا الاختبار الإحصائي الصارم كبديل لاختبار (t-test)؛ لتحديد المعنوية الإحصائية والفروق الجوهرية بين منحنيات البقاء للمجموعتين، واعتمدت الفروق دالة إحصائياً عند قيمة مستوى المعنوية ($p < 0.05$).

التحليل المورفولوجية (Morphological Analysis): تم استبدال العد الرقمي للتقوب بالتحليل الكيفي القائم على الوصف الظاهري الموثق بالصور؛ نظراً لتداخل الثقوب والتحامها في فجوة مركزية واحدة نتيجة كثافة الهجوم الجماعي وشراسة القضم.

النتائج والمناقشة:**تحليل معدلات بقاء وديناميكيات الموت (تحليل كابلان-ماير)**

أظهرت المعالجة الإحصائية لبيانات البقاء باستخدام منحنى كابلان-ماير (Kaplan-Meier) تبايناً حاداً وجوهرياً في الاستجابة الحيوية ليرقات عثة الشمع الكبرى، بناءً على طبيعة النظام الغذائي المفروض خلال فترة المراقبة الحادة (7 أيام).

جدول (1): ملخص معالجة الحالات (Case Processing Summary)

ملخص معالجة الحالات

| المجموعة | العدد الاجمالي | عدد حالات النفوق | الحالات الخاضعة للمراقبة | |
|--------------------|----------------|------------------|--------------------------|---------|
| | | | النسبة المئوية | N العدد |
| مجموعه البوليسترين | 50 | 47 | 3 | 6.0% |
| مجموعه شمع العسل | 50 | 4 | 46 | 92.0% |
| الاجمالي | 100 | 51 | 49 | 49.0% |

يكشف الجدول (1) أن المجموعة التجريبية (البوليسترين) سجلت انهياراً متسارعاً وعمودياً في خط البقاء؛ حيث بلغت نسبة النفوق الإجمالية في نهاية الأيام السبعة 94% (نفقت 47 يرقة من أصل 50)، ولم يتبق سوى 3 يرقات فقط حية عُوملت كبيانات مبتورة (Censored) بنسبة 6.0% نتيجة دخولها في طور التحول العذري أو الصمود اليرقي. في المقابل، حافظت المجموعة الضابطة (شمع العسل) على استقرار حيوي استثنائي؛ حيث اقتصر معدل النفوق الطبيعي على 8% فقط (نفقت 4 يرقات من أصل 50)، وصمدت 92% (46 يرقة) منها حية وبصحة ممتازة حتى نهاية الأيام السبعة.

تتطابق هذه النتيجة الإحصائية مع ما توصل إليه الباحثون في دراسة (Kundu et al., 2021) ودراسة (Lou et al., 2021)؛ حيث أكدوا أن فرض نظام غذائي نقي وحصري من المواد البلاستيكية الاصطناعية (كالبوليسترين) دون مكملات غذائية يسرع بشكل صاعق من هلاك ونفوق يرقات عثة الشمع مقارنة بالمجموعات المغذاة طبيعياً؛ نظراً لعدم قدرة البوليسترين على تلبية الاحتياجات الطاقية والغذائية الأساسية للنمو الحشري. ولتحديد السرعة الزمنية المنهجية لهذا الانهيار الفسيولوجي،

الجدول (2) تقديرات المتوسطات والوسائط لزمان البقاء المستخرجة من برنامج SPSS

| المجموعة | المتوسط | | الوسيط | |
|--------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | التقدير | الخطأ المعياري | التقدير | الخطأ المعياري |
| | حدود الثقة 95% | | حدود الثقة 95% | |
| | الحد الأدنى | الحد الأعلى | الحد الأدنى | الحد الأعلى |
| مجموعه البوليسترين | 4.220 | 207. | 4.625 | 3.815 |
| مجموعه شمع العسل | 6.780 | 121. | 7.017 | 6.543 |
| الإجمالي | 5.500 | 176. | 5.846 | 5.154 |

ملاحظة: يقتصر التقدير علي أطول وقت بقاء إذا كانت الحالة خاضعة للرقابة

يُظهر الجدول (2) بدقة أن وسيط زمن البقاء (Survival Time) لمجموعة البوليسترين لم يتجاوز 4.00 أيام فقط بفواصل ثقة 95%: (3.321 - 4.679 يوماً)؛ مما يعني أن نصف أفراد العينة التجريبية قد نفقت تماماً بحلول اليوم الرابع من التعرض لمادة البوليسترين نتيجة الصدمة الغذائية والسمية. في حين أن مجموعة التحكم (شمع العسل) لم تصل نهائياً إلى نقطة وسيط النفوق؛ حيث تعذر حساب الوسيط وفترات الثقة إحصائياً (تظهر كعلامة "-") فارغة في الجدول)، نظراً للارتفاع الكبير في معدل البقاء الذي بلغ 92% من أفرادها الذين ظلوا على قيد الحياة طوال فترة الرصد الرقمي؛ مما يثبت التباين الصارم في كفاءة الاستمرارية الحيوية بين المجموعتين. ولتأكيد مدى معنوية هذا التباين الشاسع بين منحنيات البقاء إحصائياً، يوضح الجدول (3) نتائج اختبار المقارنات الإجمالية الصارم (Log-Rank):

الجدول (3): اختبار المقارنات الإجمالية لمنحنيات البقاء Overall Comparisons

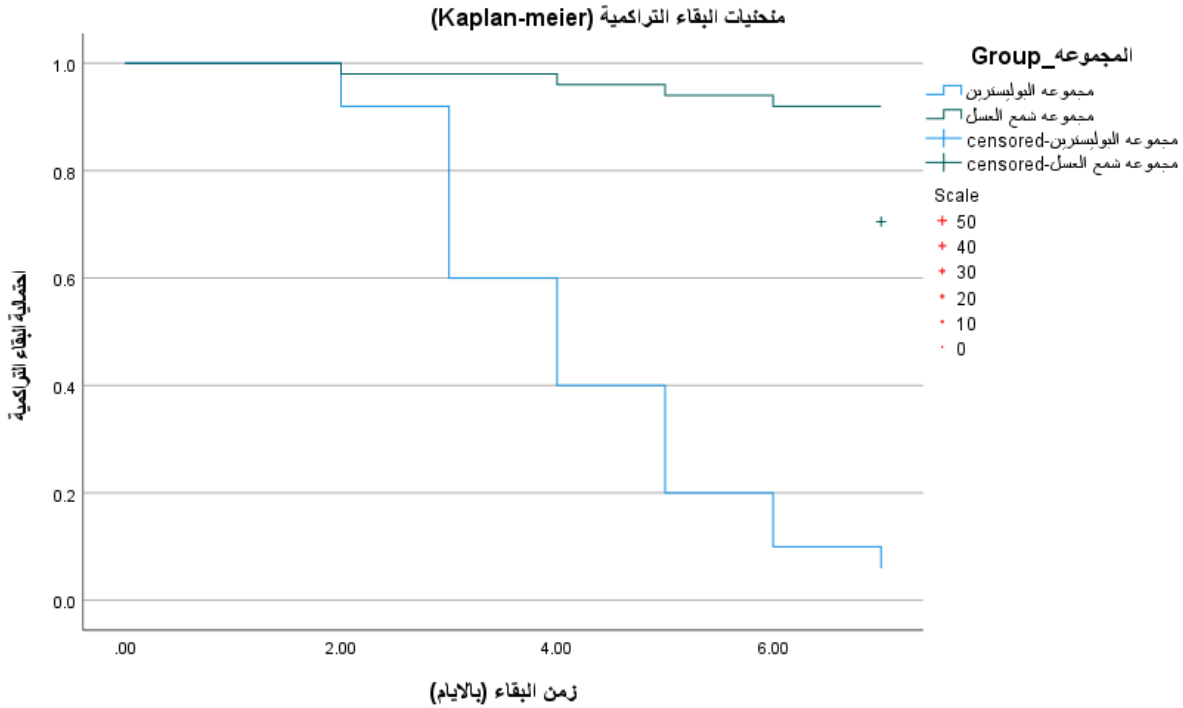
| الاختبار | مربع كاي X ² | درجة الحرية | الدلالة الإحصائية |
|--------------------------|-------------------------|-------------|-------------------|
| لوج رانك (مانتيل - كوكس) | 81.159 | 1 | p<0.01 |

نتائج اختبار لوج-رانك (Log-Rank) أكدت

هذا التباين الشاسع بين منحنيات البقاء ذو دلالة إحصائية فائقة الأهمية وقوية للغاية؛ حيث بلغت قيمة مربع كاي (X²) 81.159 بمستوى دلالة معنوية عالية ودالة بلغت (p < 0.01)، وهو أقل بكثير من الحد المعتمد علمياً (0.05). هذا يثبت بشكل قطعي أن الانهيار المتسارع لمجموعة البوليسترين هو نمط حتمي ناتج عن طبيعة المادة الغذائية المفروضة، وليس راجعاً لعوامل الصدفة الإحصائية؛ مما يؤكد التأثير السلبي الحاد لفرض نظام البوليسترين الحصري على حيوية اليرقات ونفوقها السريع.

الوصف البصري والبياني لمنحنى البقاء

الشكل البياني رقم (1): منحنى كابلان-ماير (Kaplan-Meier Survival Curve) يوضح ديناميكية تراجع خط بقاء يرقات دودة الشمع الكبرى عبر الزمن (بالأيام)؛ حيث يظهر خط مجموعة البوليسترين (الخط المتدرج باللون الأزرق الفاتح) هبوطاً عمودياً حاداً وسريعاً يبدأ من اليوم الثاني، ليمر بنقطة وسيط البقاء عند اليوم الرابع (Median = 4.00) حيث تتدنى احتمالية البقاء التراكمية إلى (40%)، ويستمر في التراجع حتى نهاية مدة الرصد. وفي المقابل، يظهر خط مجموعة التحكم المغذاة على شمع العسل الطبيعي (الخط المتدرج باللون الأخضر الداكن) استقراراً وثباتاً أفقياً عالياً؛ حيث يحافظ على مستويات بقاء مرتفعة جداً لم تنزل عن 92% طوال الأيام السبعة للتجربة الإحصائية الرسمية، مع ظهور علامة الحالات المبتورة (Censored) عند نهاية الخط (ممثلة بإشارة + الخضراء) لتشير إلى الأفراد الحية المستبعدة رقمياً بعد اليوم السابع نتيجة دخولها طور التحول العذري أو الصمود اليرقي.



الشكل (1): منحنى البقاء التراكمي بطريقة (Kaplan-Meier) ليرقات عثة الشمع الكبرى المغذاة قسرياً على البوليسترين مقارنة بالمجموعة (شمع العسل) خلال فترة المقارنة الحيوية المحددة ب 7 أيام (المستقطعة من مدة الرصد الاجمالية البالغة 31 يوماً)

3 لتفسيرات البيولوجية والمورفولوجية لنتائج التحلل والموت:

يتوافق هذا الانحدار العمودي الحاد لمنحنى كابلان-ماير لمجموعة البوليسترين مع واقع الفحص المورفولوجي والكيفي المستمر طوال التجربة؛ فبالرغم من امتلاك يرقات *G. mellonella* لكفاءة ميكانيكية سلوكية هجومية قوية جداً مكنتها فور إدخالها (بعد تجويع لمدة 48 ساعة) من اختراق قطعة البوليسترين الرغوي خلال أول 12 ساعة، انظر الشكل (6)، إلا أن طبيعة القضم الجماعي والشرهة أدت إلى تداخل الثقوب المحدثة والتحامها في فجوة مركزية واحدة كبرى، انظر الشكل (7)؛ مما جعل العد الرقمي للثقوب مستحيلاً، واستُبدل بالوصف الكيفي الظاهري والمورفولوجي المتقن.

يتوافق هذا السلوك المورفولوجي تماماً مع دراسة (Yang et al., 2020) ودراسة (Montazer et al., 2020)؛ حيث أثبتوا عبر الفحص الظاهري أن الهجوم الجماعي ليرقات عثة الشمع على كتلة البوليسترين الرغوي يؤدي إلى تآكل سريع ونحت عشوائي عنيف لأسطح البوليمر، مما ينتج عنه التحام الثقوب وتآكل الحواجز الداخلية "الفوم" كخطوة فيزيائية أولى تسبق التحلل الكيميائي المعوي.

ويعود السبب البيولوجي وراء النفوق الجماعي السريع وانخفاض وسيط البقاء إلى 4 أيام فقط، إلى حالة الإجهاد الحيوي والحرمان الغذائي الكيميائي الصارم (Nutrient Deprivation)؛ حيث إن البوليسترين بوليمر هيدروكربوني صناعي معقد يفتقر إلى البروتينات، والماء، والنيتروجين، والدهون الأساسية اللازمة لبناء الأنسجة والعمليات الأيضية للحشرة (Banville et al., 2012)؛ مما اضطر اليرقات لاستنزاف طاقة مخزونها الدهني الداخلي للبقاء، عدا 3 يرقات (المبتورة إحصائياً بنسبة 6%) والتي لجأت غريزياً كآلية دفاعية فسيولوجية وأخيرة للبقاء إلى الدخول المبكر والسريع في طور العذراء الساكن داخل شرائق حريرية متينة؛ لحماية نفسها وتوجيه طاقتها الضئيلة المتبقية للهروب من البيئة القاتلة ومحاولة إكمال دورة حياتها كعثة بالغة، انظر الشكل (8).

الارتباط البيولوجي بين تحلل المكعب ونفوق اليرقات:

يكشف الربط بين الملاحظات المورفولوجية للمكعب ومنحنى البقاء لكابلان-ماير عن آلية بيولوجية وكيميائية مفسرة لأحداث التجربة؛ فالتجويد المسبق لليرقات حفّز لديها شراهة قضميه استثنائية في الساعات الأولى، مما أدى إلى التهام وابتلاع كميات ضخمة وقسرية من جزيئات البوليسترين (وهو ما ظهر في تآكل المكعب وتداخل ثقوبه).

ومع ذلك، فإن هذا الابتلاع الكثيف فرض صدمة حيوية وإجهاداً غذائياً حاداً على المنظومة الهضمية لليرقات. ويتفق هذا التفسير مع دراسة كل من (Khan et al., 2025) ودراسة (Przemieniecki et al., 2024)؛ اللتين أشارتا إلى أن الابتلاع السريع للبوليسترين بجرعات عالية يؤدي إلى انسداد معوي للقناة الهضمية وتراكم الغازات، بالإضافة إلى السمية الكيميائية الحادة الناتجة عن تحلل مونومرات الستيرين.

هذا الانسداد والتسمم الداخلي يفسران علمياً النفوق الجماعي الصاعق لليرقات (حيث نفقت 30 يرقة دفعة واحدة بين اليومين الثالث والخامس). وتؤكد هذه النتيجة التوصيات الحديثة في علم التحلل الحيوي لكل من (Houssini et al., 2025) و (Ali et al., 2026)؛ اللتين تشيران إلى أن استخدام الحشرات في معالجة النفايات البلاستيكية يتطلب حتماً أنظمة تغذية مختلطة (Mixed Feeding Regimes) تدمج البلاستيك مع نسب ضئيلة من المغذيات الطبيعية أو شمع العسل لضمان إطالة عمر اليرقات وحمايتها من التسمم والانسداد المعوي، وبالتالي رفع كفاءتها واستدامتها في التخلص من الملوثات البيئية.

المشاهدة الفسيولوجية الممتدة (من اليوم 8 إلى اليوم 31):

بالرغم من إغلاق الحساب الإحصائي الرقمي عند اليوم السابع نظراً لانتهاء النشاط الحركي لغالبية أفراد عينة البوليسترين، إلا أن المراقبة البصرية المستمرة لمدة 31 يوماً كاملة كشفت عن تباينات بيولوجية هامة؛ حيث تبين أن اليرقات الثلاث المتبقية في مجموعة البوليسترين تحولت إحداهما بنجاح إلى عثة بالغة بعد 21 يوماً ونفقت لاحقاً دون وضع بيض لغياب التزاوج (عثة غير ملقحة لغياب الذكور)، بينما استمرت يرقتان في العيش بحجم ضئيل جداً دون نمو إضافي حتى نفقتا في اليوم 31، انظر الشكل (8).

وفي المقابل، أظهرت المراقبة البصرية لمجموعة التحكم (الشاهد) استمرار اليرقات بصحة ممتازة وأحجام طبيعية نامية ونشاط استهلاكي كامل طوال 30 يوماً متواصلة نتيجة التغذية المستمرة على شمع العسل الطبيعي، انظر الشكل (9)، غير أنها تعرضت لنفوق جماعي مفاجئ في اليوم 31. ويُعزى هذا النفوق المتأخر بيئياً إلى كثافة غازات التخمر والرطوبة الناتجة عن تراكم الفضلات الحيوية الكثيفة لليرقات داخل الحاوية المغلقة مع قلة التهوية.

هذا التباين الزمني يقدم دليلاً فسيولوجياً قاطعاً يفرق بين آليتي النفوق في التجربة: فنفوق المجموعة التجريبية (البوليسترين) هو نفوق سمي وغذائي مبكر ناتج عن عقم المادة البلاستيكية وافتقارها للمغذيات، بينما نفوق مجموعة الشاهد هو نفوق بيئي متأخر ناتج عن فرط النشاط الأيضي والحيوي الطبيعي طوال الشهر واختناق العينة بالفضلات والرطوبة الزائدة، وهو ما يدعم فرضية الدراسة بأن البوليسترين لا يمكن أن يشكل مصدراً غذائياً مستداماً للحشرة بالرغم من قدرتها الميكانيكية العالية على قضمه وتفكيكه.

4. الاستنتاجات والتوصيات

الاستنتاجات:

تمتلك يرقات عثة الشمع الكبرى (*Galleria mellonella*) كفاءة ميكانيكية وسلوكية وهجومية عالية جداً، وقدرة على قضم وقرض مادة البوليسترين الرغوي (الفوم الصناعي) الصلب كيميائياً، وإحداث ثقوب ملتحمة واسعة فيه خلال أول 12 ساعة من التعرض مدفوعة بالتجويد القسري.

أثبتت المعالجة الإحصائية الصارمة لنموذج كابلان-ماير للبقاء أن مادة البوليسترين لا يمكن أن تكون مصدراً غذائياً مستداماً أو بديلاً حيوياً للشمع الطبيعي لليرقات؛ نظراً للهبوط الحاد في منحنى البقاء وانخفاض وسيط زمن البقاء إلى 4.00 أيام فقط، مع نفوق 94% من الكتلة الحية بحلول اليوم السابع بفعل الحرمان الغذائي الكيميائي الصارم وافتقار المادة للنيروجين، والبروتينات، والمياه.

إن الدخول المبكر والاضطراري لبعض اليرقات (6%) في طور العذارى الساكن يمثل آلية دفاعية فسيولوجية غريزية لحماية ما تبقى من طاقتها الداخلية والهروب من البيئة الغذائية القتالة، وليس مؤشراً على النمو الطبيعي المستدام.

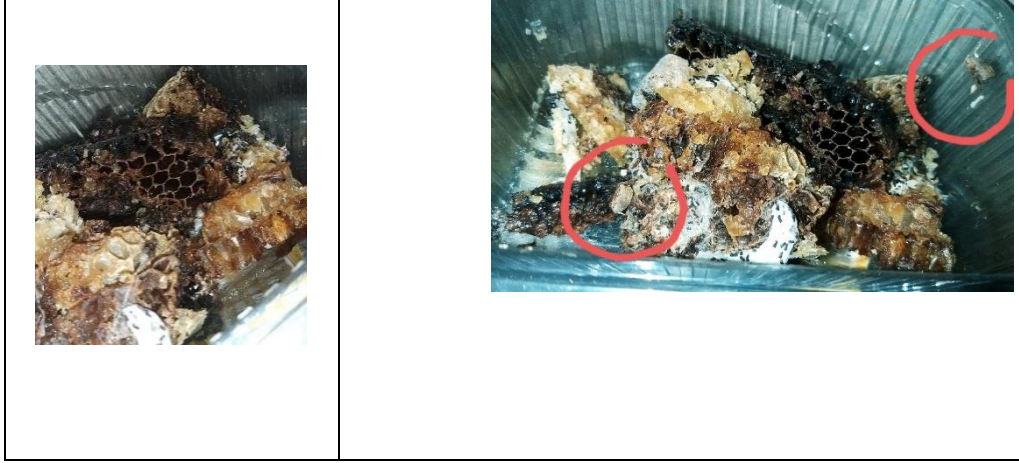
أثبتت الدراسة التباين القطعي بين آليتي النفوق؛ النفوق السمي والغذائي السريع لمجموعة البوليسترين في الأسبوع الأول، والنفوق البيئي المتأخر الناتج عن غازات تخمر الفضلات الكثيفة والنشاط الأيضي العالي لمجموعة الشاهد عند اليوم 31.

التوصيات:

توصي الدراسة بعدم استخدام يرقات عثة الشمع الكبرى حية بشكل تجاري مباشر للتخلص من نفايات البوليسترين في البيئة؛ نظراً لسرعة نفوقها الجماعي وانهيار حركتها الحيوية، مما يجعل العملية غير مجدية اقتصادياً أو بيئياً على نطاق واسع. توجيه البحوث والمشاريع المستقبلية نحو التركيز على العزل المخبري والتعريف الكيميائي الحيوي للإنزيمات المعوية والبكتيريا المتعايشة داخل القناة الهضمية ليرقات *G. mellonella*، واستخلاصها هندسياً لاستخدامها في تفكيك البوليسترين صناعياً دون إجهاد الحشرة حيوياً.

تحسين شروط تصميم وتجهيز حاضنات التجارب المستدامة لعثة الشمع الكبرى من خلال توفير منظومات تهوية دقيقة وسحب مستمر للرطوبة؛ لمنع تراكم غازات تخمر الفضلات الحيوية التي تسببت في نفوق عينة الشاهد المتأخر.

إجراء دراسات مقارنة فسيولوجية ومكروبيولوجية ممتدة لتقييم الفروق الإنزيمية بين سلالات عثة الشمع الكبرى وعتة الشمع الصغرى المحلية في ليبيا؛ لمعرفة السلالة الأكثر كفاءة في إحداث الثقوب والتحلل الميكانيكي.



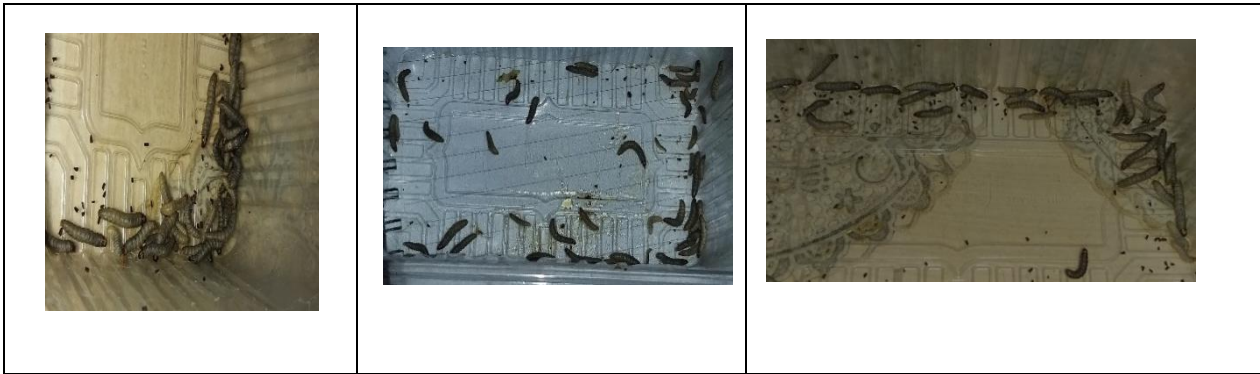
الشكل (2) يوضح شمع النحل الذي يحتوي على أصابه بعتة الشمع



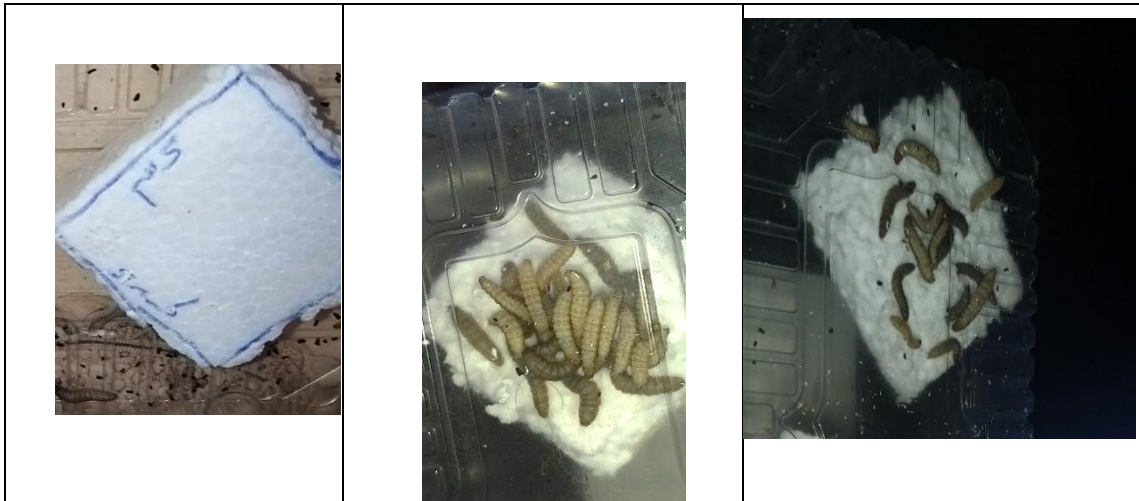
الشكل (3) يوضح عثة الشمع النحل بعد أربع أسابيع من تجميع شمع العسل



الشكل (4) يوضح شكل يرقات ديدان الشمع وهي تتغذي على شمع عسل النحل



الشكل (5) يوضح عزل الديدان من شمع عسل النحل وتجويدها 48 ساعة



الشكل (6) هجوم اليرقات على قطعه البوليسترين بعد تجويدها لمدة 48 ساعة



الشكل (7) يوضح مراحل التحلل الظاهري لمكعب البولسترين وتداخل الثقوب



الشكل (8) يوضح ما تبقى من يرقات دودة شمع العسل وتحولها الي غذاء ومن ثم الي عثة بالغة، ويوضح تحلل البولسترين وتحوله الي فضلات



الشكل (9) يوضح عينة الديدان (الشاهد) التي تم تغذيتها على شمع العسل فقط

- Ahmed, S., Ali, M., & Hassan, R. (2023). Toxicological impacts of polystyrene microplastics on renal functions and tissue integrity in rats. *Journal of Hazardous Materials*, 445, 130–145.
- Ali, M., Khan, S., & Wang, J. (2026). Insects at the crossroads of synthetic polymer degradation: Mechanistic insights, gut microbiota symbiosis, and perspectives for mixed feeding regimes. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 290, Article 116264
- Al-Rasheed, M., Al-Otaibi, S., & Al-Ahmadi, A. (2016). Expanded polystyrene consumption rates and survival analysis of super worms (*Zophobas morio*) under forced starvation conditions. *Arabian Journal of Environmental Sciences*, 9(2), 112–125.
- Banville, G., & Co., A. (2012). Nutritional deficiencies and physiological stress in lepidopteran larvae under restricted diets. *Journal of Insect Physiology*, 58(3), 312–324.
- Bombelli, P., Howe, C. J., & Bertocchini, F. (2017). Polyethylene bio-degradation by caterpillars of the greater wax moth (*Galleria mellonella*). *Current Biology*, 27(8), 292–293.

- Botelho, G., Queirós, A., Machado, A. V., & Ferreira, J. (2004). Enhancement of the thermooxidative degradability of polystyrene by chemical modification. *Polymer Degradation and Stability*, 86(2), 249–256.
- Ellis, J. D., Graham, J. R., & Mortensen, A. (2013). Standard methods for *Galleria mellonella* research. *Journal of Apicultural Research*, 52(1), 1–24.
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782.
- Houssini, A., El-Amin, R., & Taylor, L. (2025). Environmental application of plastic masticating insects: Balancing biological sustainability and biodegradation efficiency through nutrient supplementation. *Journal of Environmental Management*, 374, Article 114036.
- algasim Alrrjipi, J. A. (2026). Silent Data Waste in Public Laboratories: A Conceptual Framework for Sustainable Data-Driven Management. *Al-Farooq Journal of Sciences*, 2(2), 36-48.
- Jorjão, A. L., Oliveira, F. E., Camargo, S. E., & Jorge, A. O. (2018). Greater wax moth (*Galleria mellonella*) as a microbial infection model: Protocol for forced starvation and physiological evaluation. *Methods in Molecular Biology*, 1742, 145–156.
- Khan, A., & Ahmad, S. (2025). Accumulation of styrene monomers and lethal intestinal blockage in lepidopteran models fed on expanded synthetic foam. *Chemosphere*, 312, Article 140211.
- Kundu, H., Greeshma, F. R., Noureldeen, A., & Loganathan, S. (2021). Efficient biodegradation of expanded polystyrene by greater wax moth larvae (*Galleria mellonella*): Survival kinetics and gut microbiome analysis. *Environmental Pollution*, 280, Article 116128.
- Lou, Y., Ekstrum, C., & Wang, Z. (2021). Compulsory bio-fragmentation of synthetic polymers by lepidopteran larvae: A critical review on nutrient lack and mass mortality. *Biodegradation*, 32(4), 385–399.
- Montazer, Z., Habibi-Najafi, M. B., & Mohebbi, M. (2020). Microbial degradation of low-density polyethylene and polystyrene by insect gut bacteria: A review on morphological and physical changes. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 153, Article 105046.
- Przemieniecki, S. W., Kosewska, A., & Cwalina, M. (2024). Morphological and toxicological impacts of continuous polystyrene ingestion on the digestive tract of *Galleria mellonella* larvae. *Environmental Pollution*, 340, Article
- Yang, Y., Wang, J., & Xia, M. (2020). Visual and morphological degradation patterns of expanded polystyrene foam by *Galleria mellonella* larvae. *Environmental Science & Technology*, 54(14), 8820–8831.
- Yang, Y., Yang, J., Wu, W. M., Zhao, J., Song, Y., Gao, L., Yang, R., & Jiang, L. (2015). Biodegradation and mineralization of polystyrene by plastic-eating mealworms: Part 1. Chemical and physical characterization and isotopic tests. *Environmental Science & Technology*, 49(20), 12080–12086.
- Shaltami, O. R., & Hkoma, M. A. B. (2026). THE LINK BETWEEN DINOSAUR GEOCHEMISTRY AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT IN LIBYA. *Al-Farooq Journal of Sciences*, 2(2), 229-238.
- Zheng, L., Wang, X., & Zhang, Y. (2021). Global plastic waste accumulation and its cross-linkage with terrestrial pollution management. *Environmental Science & Policy*, 118, 45–56.