مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الطبية المجلد (10) العدد (4) 2026
Tartous University Journal for Research and Scientific Studies – Medical Sciences Series Vol. (10) No. (4) 2026

الخواص الميكانيكية والنشاط المضاد للبكتيريا للأفلام الغذائية المصنوعة من الألجينات والمدمجة مع جسيمات أكسيد الزنك النانوية وزيت الأوريجانو العطري

وسام زم*

(تاريخ الإيداع 20/4/ 2026 – تاريخ النشر 12/7/ 2026)

□ ملخّص □

استهدفت هذه الدراسة تقييم الخصائص الميكانيكية، ونفاذية بخار الماء، والفعالية المضادة للبكتيريا لأفلام غذائية مصنوعة من الألجينات ومُطعّمة بجزيئات أكسيد الزنك النانوية (ZnO NPs) وزيت الأوريجانو العطري (OEO). استُخلص زيت الأوريجانو العطري من أوراق نبات الأوريجانو الشائع (Origanum vulgare) التي جُمعت من طرطوس، سوريا، وتم تحديد تركيبه الكيميائي باستخدام تقنية كروماتوغرافيا الغاز/مطياف الكتلة (GC/MS)، حيث تبين أن الكارفاكرول (66.23%) هو المكون الرئيسي. تم تصنيع جزيئات أكسيد الزنك النانوية باستخدام طريقة سول–جل، وأُضيفت إلى أفلام ألجينات الصوديوم بتراكيز 1 و3 و5% وزناً. أدى إضافة جزيئات أكسيد الزنك النانوية إلى تحسين خصائص العزل للأفلام بشكل ملحوظ، حيث انخفضت نفاذية بخار الماء من 4.627×10^{-10} إلى 3.628×10^{-10} غ/باسكال·متر·ثانية مع زيادة محتوى الجزيئات النانوية. أظهرت الاختبارات الميكانيكية تحسنًا في قوة الشد (من 3.28 إلى 4.98 ميجا باسكال) واستطالة مثالية عند الكسر عند إضافة 3% وزنيًا من أكسيد الزنك. وأظهرت الاختبارات المضادة للبكتيريا فعالية تثبيطية قوية ضد بكتيريا السالمونيلا المعوية *Salmonella enterica* والليستيريا المستوحدة *Listeria monocytogenes*، مع أعلى فعالية مُلاحظة في الأفلام التي تحتوي على 5% وزنيًا من أكسيد الزنك، حيث بلغت أقطار التثبيط 23.29±0.23 ملم و21.62±0.28 ملم على التوالي. تشير هذه النتائج إلى أن أفلام الألجينات/أكسيد الزنك/زيت الأوريجانو العطري المركبة تتمتع بخصائص وظيفية ومضادة للبكتيريا محسّنة، مما يُبرز إمكانية استعمالها كمواد تغليف فعالة لتعزيز سلامة الأغذية وإطالة فترة صلاحيتها.

الكلمات المفتاحية: أفلام الألجينات؛ النشاط المضاد للبكتيريا؛ التغليف الغذائي؛ زيت الأوريجانو العطري؛ نفاذية بخار الماء؛ جسيمات أكسيد الزنك النانوية.

*دكتوراه، عضو هيئة تدريسية، قسم الكيمياء التحليلية والغذائية، كلية الصيدلة، جامعة طرطوس

مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الطبية المجلد (10) العدد (4) 2026
Tartous University Journal for Research and Scientific Studies – Medical Sciences Series Vol. (10) No. (4) 2026

Mechanical properties and antibacterial activity of alginate-based edible films incorporated with zinc oxide nanoparticles and oregano essential oil

Wissam Zam*

(Received 20/4/2026.Accepted 12/7/2026)

□**ABSTRACT** □

This study investigated the mechanical properties, water vapor permeability, and antibacterial activity of alginate-based edible films incorporated with zinc oxide nanoparticles (ZnO NPs) and oregano essential oil (OEO). OEO was extracted from *Origanum vulgare* leaves collected in Tartous, Syria, and its chemical composition was characterized by GC/MS, revealing carvacrol (66.23%) as the major constituent. ZnO nanoparticles were synthesized using a sol–gel method and incorporated into sodium alginate films at concentrations of 1, 3, and 5 wt%. The addition of ZnO NPs significantly improved the barrier properties of the films, reducing water vapor permeability from 4.627×10^{-10} to 3.628×10^{-10} g/Pa·m·s as nanoparticle content increased. Mechanical testing showed enhanced tensile strength (from 3.28 to 4.98 MPa) and optimal elongation at break at 3 wt% ZnO. Antimicrobial assays demonstrated strong inhibitory effects against *Salmonella enterica* and *Listeria monocytogenes*, with the highest activity observed in films containing 5 wt% ZnO, producing inhibition zones of 23.29±0.23 mm and 21.62±0.28 mm, respectively. These findings indicate that alginate/ZnO/OEO composite films exhibit improved functional and antimicrobial properties, highlighting their potential as effective active packaging materials for enhancing food safety and extending shelf life.

Keywords: Alginate films; Antimicrobial activity; Edible packaging; Oregano essential oil; Water vapor permeability; Zinc oxide nanoparticles.

*Ph.D, Analytical and Food chemistry department, Faculty of Pharmacy, Tartous University

1- مقدمة

الأوريجانو (*Origanum vulgare*) عشبة عطرية واسعة الانتشار، تُستخدم تقليديًا في مناطق البحر الأبيض المتوسط لأغراض الطهي والعلاج. في السنوات الأخيرة، حظي زيت الأوريجانو العطري باهتمام كبير نظرًا لخصائصه القوية المضادة للبكتيريا والفطريات، والمضادة للأكسدة، والتي تُعزى في الغالب إلى أحاديات التربين الفينولية مثل الكارفاكرول والثيمول (Nostro *et al.*, 2004; Nostro and Papalia, 2012). تعمل هذه المركبات النشطة بيولوجيًا على تعطيل أغشية البكتيريا، وتغيير تدرجات الأيونات، وتثبيط مسارات الاستقلاب الأساسية، مما يجعل زيت الأوريجانو العطري مادة حافظة طبيعية واعدة لتطبيقات تغليف الأغذية (Prakash *et al.*, 2018). كما درست العديد من الأبحاث التركيب الكيميائي النباتي الغني والخصائص البيولوجية لأنواع الأوريجانو (Bouyahya *et al.*, 2016)، وأظهرت الإمكانات المضادة للبكتيريا للمركبات الفينولية المشتقة من الأوريجانو (Chun et al., 2005).

أدى الطلب المتزايد على مواد التغليف القابلة للتحلل الحيوي والصديقة للبيئة إلى تطوير أفلام غذائية مصنوعة من البوليمرات الحيوية. يُستخدم ألجينات الصوديوم، وهو عديد سكاريد طبيعي يُستخلص من الطحالب البنية، على نطاق واسع نظرًا لتوافقه الحيوي، وعدم سميته، وقدرته الممتازة على تشكيل الأفلام (Gómez-Estaca *et al.*, 2014). مع ذلك، تتميز أفلام الألجينات بطبيعتها المحبة للماء، وتُظهر خصائص ضعيفة في منع تسرب بخار الماء، وقوة ميكانيكية محدودة، مما يحد من استخدامها المباشر في تغليف المواد الغذائية (Senturk Parreidt *et al.*, 2018). وللتغلب على هذه المعوقات، أضاف الباحثون زيوتًا عطرية كارهة للماء، ومستخلصات نباتية، وجزيئات نانوية غير عضوية لتحسين الأداء الوظيفي لأفلام الألجينات (Wrońska *et al.*, 2023).

برزت جسيمات أكسيد الزنك النانوية (ZnO NPs) كإحدى أكثر المواد النانوية فعاليةً في التغليف النشط، وذلك بفضل نشاطها القوي المضاد للبكتيريا، وقدرتها على حجب الأشعة فوق البنفسجية، وقدرتها على تقوية مصفوفات البوليمر. وتشمل آلية عملها المضادة للبكتيريا إطلاق أيونات الزنك (Zn^{2+})، وتوليد أنواع الأكسجين التفاعلية (ROS)، والتفاعل المباشر مع أغشية البكتيريا، مما يؤدي إلى تلفها البنيوي وموتها (Ahmadi *et al.*, 2020; Galus *et al.*, 2025). إضافةً إلى ذلك، تُحسّن جسيمات أكسيد الزنك النانوية المتانة الميكانيكية وتُقلل نفاذية بخار الماء لأفلام البوليمرات الحيوية من خلال إنشاء مسارات انتشار متعرجة وتعزيز التفاعلات بين البوليمر والجسيمات النانوية (Espitia *et al.*, 2012).

يُوفر دمج جسيمات أكسيد الزنك النانوية مع زيت الأوريجانو العطري في مصفوفة الألجينات استراتيجيةً تآزريةً لتطوير أفلام غذائية متعددة الوظائف ذات خصائص حاجزية وميكانيكية ومضادة للبكتيريا مُحسّنة. أظهرت دراسات حديثة أن الأفلام النانوية المركبة الهجينة التي تحتوي على كلٍ من الزيوت العطرية وجزيئات أكسيد المعادن النانوية تتميز بنشاط مضاد للبكتيريا فائق واستقرار فيزيائي وكيميائي مُحسَّن مقارنةً بالأفلام التي تحتوي على مُكوِّن نشط واحد (Lopes *et al.*, 2025; Prakash *et al.*, 2018). مع ذلك، لم تتناول الأبحاث بشكلٍ مُحدد التأثيرات المُجتمعة لجزيئات أكسيد الزنك النانوية وزيت الأوريجانو العطري في الأفلام الغذائية المصنوعة من الألجينات، وخاصةً فيما يتعلق بأدائها ضد مُسببات الأمراض الرئيسية المنقولة بالغذاء مثل السالمونيلا المعوية *Salmonella enterica* والليستيريا المستوحدة *Listeria monocytogenes*، إلا أن الأبحاث الحالية محدودة.

1-1- أهمية البحث وأهدافه

تكتسب هذه الدراسة أهميتها من كونها تسهم في تطوير حلول مبتكرة ومستدامة في مجال تغليف الأغذية، وهو مجال يشهد تحولًا عالميًا نحو استخدام مواد قابلة للتحلل الحيوي وصديقة للبيئة. فالأفلام الغذائية التقليدية المصنوعة من البوليمرات الحيوية، مثل الألجينات، تعاني من محدودية في خصائصها الميكانيكية وارتفاع نفاذيتها لبخار الماء، مما يحد من فعاليتها في حماية المنتجات الغذائية. ومن هنا تنبع الحاجة إلى تعزيز هذه المواد بوسائل ترفع من كفاءتها وتوسع نطاق استخدامها.

تهدف هذه الدراسة إلى تطوير أفلام غذائية مصنوعة من الألجينات مُدعَّمة بجزيئات أكسيد الزنك النانوية وزيت الأوريجانو العطري، وتقييم خصائصها الميكانيكية، ونفاذية بخار الماء، ونشاطها المضاد للبكتيريا. يُساهم هذا العمل في تطوير أنظمة التغليف الهجينة الطبيعية النانوية، ويدعم تطوير بدائل أكثر أمانًا واستدامةً للتغليف الاصطناعي التقليدي.

2- طرائق البحث ومواده

2-1- مواد البحث

- خلات الزنك ثنائي الهيدرات (Loba chemie)
- ألجينات الصوديوم(Sigma-Aldrich)
- كلوريد الكالسيوم (Carl Roth)
- توين 80 (Himedia)
- كبريتات الصوديوم اللامائية (Himedia)
- هيدروكسيد الصوديوم (Himedia)
- الإيتانول (Sharlau)
- ماء مقطر معقم منزوع الأيونات
- بكتيريا السالمونيلا المعوية *Salmonella enterica* والليستيريا المستوحدة *Listeria monocytogenes*تم عزلها في مخبر خاص والتأكد بإجراء الفحوص البيوكيميائية اللازمة.
- وسط Tryptic Soy Broth (Sigma-Aldrich)
- وسط Müller–Hinton Agar (Himedia)

2-2- استخلاص الزيوت العطرية

تم جمع أوراق الأوريجانو من منطقة طرطوس، سوريا. وجُففت في الظل لمدة عشرة أيام تقريبًا.

لاستخلاص الزيوت العطرية، أُضيف 100 غرام من الأوراق المجففة إلى 800 مل من الماء المقطر في دورق سعة 2 لتر. أُجري التقطير المائي لمدة 4 ساعات بدءًا من أول قطرة من المُقطر. جُمعت الزيوت العطرية، وجُففت فوق كبريتات الصوديوم اللامائية لإزالة الرطوبة، وحُفظت في قوارير محكمة الإغلاق في الظلام، عند درجة حرارة 4 درجات مئوية، لحين استخدامها (Milovanović *et al.*, 2009).

2-3- فحص مردود الزيوت العطرية

تم التعبير عن مردود الزيوت العطرية بالغرامات نسبةً إلى 100 غرام من المادة الجافة؛ وحُسبت وفقًا للمعادلة التالية:

$$Yield\ (\%) = \frac{Amount\ of\ extracted\ oil\ (g)}{Amount\ of\ dry\ matter\ mass\ (g)} * 100$$

2-4- تحليل GC/MS

أُجري تحليل الزيت العطري باستخدام نظام Shimadzu QP-2010 GC-MS مزودًا بعمود AB-Innowax 7031428 WCOT (60 م × 0.25 مم × 0.25 ميكرومتر) موصول مباشرةً بجهاز مطياف الكتلة في مخابر هيئة الطاقة الذرية. استُخدم الهيليوم كغاز حامل، وضُبط معدل تدفقه على 1 مل/دقيقة. بُرمجت درجة حرارة الفرن بين 50 درجة مئوية و280 درجة مئوية بمعدل 5 درجات مئوية/دقيقة. سُجلت البيانات في وضع التأين الإلكتروني عند 70 إلكترون فولت، وفي وضع الفصل (نسبة الفصل 1:30). تم تحديد مكونات العينة بمطابقة زمن احتجازها مع زمن احتجاز المواد العيارية المرجعية، وأطياف كتلتها مع مدخلات قواعد بيانات أطياف الكتلة ((Adams, 2007), the NIST-08 MS library (Babushok *et al.*, 2011), and the NIST Chemistry WebBook (NIST, 2025)).

2-5- اصطناع جسيمات أكسيد الزنك النانوية

تم اصطناع جسيمات أكسيد الزنك النانوية باستخدام طريقة سول-جل كما وصفها Hasnidawani وآخرون (2016). باختصار، تم إذابة 2 غرام من أسيتات الزنك ثنائي الهيدرات في 15 مل من الماء المقطر عند درجة حرارة الغرفة مع التحريك المستمر لمدة خمس دقائق تقريبًا. ثم أُضيف 10 مل من محلول يحتوي على 8 غرام من هيدروكسيد الصوديوم إلى محلول أسيتات الزنك مع التحريك المستمر باستخدام محرك مغناطيسي لمدة خمس دقائق أخرى. بعد ذلك، أُضيف 100 مل من الإيثانول قطرة فقطرة إلى الخليط حتى تكوّن راسب أبيض. أخيرًا، رُشِّح الراسب، وغُسِل بكمية وافرة من الإيثانول، وجُفِّف عند 80 درجة مئوية لمدة 15 دقيقة على لوح تسخين، ثم خُضِّع للمعالجة الحرارية عند 300 درجة مئوية لمدة 60 دقيقة (Hasnidawani *et al.*, 2016).

2-6- اصطناع أفلام الألجينات/أكسيد الزنك/OEO

باختصار، أُضيف 3 غرامات من ألجينات الصوديوم تدريجيًا إلى 100 مل من الماء المقطر مع التحريك المستمر حتى الذوبان التام، وأُضيف 2 مل من الغليسرين كمُلدِّن لتحسين مرونة الغشاء (Kurt *et al.*, 2017). تم تشتيت كميات مختلفة من جسيمات أكسيد الزنك النانوية (1، 3، و5% وزناً) في المزيج، ثم خلطت مع 1 مل من زيت الأوريجانو العطري باستخدام توين 80 كعامل مستحلب (Senturk Parreidt *et al.*, 2018). وخضع المستحلب الناتج للمعالجة بالأمواج فوق الصوتية لمدة 30 دقيقة قبل تحضير الأفلام. كما تم تحضير محلول ألجينات شاهد بدون جسيمات أكسيد الزنك النانوية أو زيت الأوريجانو العطري. تمت إزالة الغازات من جميع المحاليل تحت الفراغ لمدة 10 دقائق، ثم صُبّت في أطباق بتري مربعة باستخدام 20 غرامًا من محلول تشكيل الأفلام، وجُففت في فرن عند 40 درجة مئوية لمدة 24 ساعة (Valdes *et al.*, 2017). بعد التجفيف، أُضيف 20 مل من محلول كلوريد الكالسيوم بتركيز 2% (وزن/حجم) إلى كل طبق، وتُركت الأفلام مغمورة لمدة 5 دقائق للسماح بانفصالها كما هو موضح في الشكل 1 (Kurt *et al.*, 2017).



الشكل1: الفلم الغذائي المصنوع من الألجينات المدمجة مع جسيمات أكسيد الزنط النانوية وزيت الأوريجانو العطري.

2-7- نفاذية بخار الماء

تم قياس نفاذية بخار الماء (WVP) للأفلام وفقًا لطريقة Ekrami and Emam-Djomeh (2014) مع تعديلات طفيفة. وُضعت 5 غرامات من كلوريد الكالسيوم اللامائي في بياشر، ثم غُطيت البياشر بالأفلام المختلفة وأُحكم إغلاقها باستخدام البارافين. وُضعت البياشر المغلقة في مجفف يحتوي على ماء مقطر للحفاظ على رطوبة نسبية 100% عند درجة حرارة 25 درجة مئوية. سُجل وزن كل بيشر كل ساعتين على مدار 12 ساعة. أُجريت جميع القياسات ثلاث مرات.

سُجل فقدان وزن البياشر ورُسم بيانيًا كتابع للزمن. حُسب معدل نفاذية بخار الماء من الأفلام (WVTR) من ميل الخط المستقيم (g/s) مقسومًا على مساحة الخلية (m^2).

تم حساب نفاذية بخار الماء باستخدام المعادلة التالية (Ekrami and Emam-Djomeh, 2014):

$$WVTR = Slope/A$$

$$WVP\ (g/m\ s\ Pa) = \frac{WVTR * D}{\Delta P}$$

حيث A هي المساحة (m^2)، وD هي سُمك الغشاء (m)، وΔP هو فرق ضغط بخار الماء بين جانبي الغشاء (باسكال).

2-8- الخواص الميكانيكية

تم قياس قوة الشد (TS، ميجا باسكال) والاستطالة عند الكسر (EB، %) للأفلام باستخدام محلل ميكانيكي (Shimadzu EZ LX، اليابان) وفقًا للطريقة الموصوفة من قِبل Zhang *et al.* (2020) مع تعديلات طفيفة. قُطعت عينات الأفلام إلى شرائح مستطيلة (10 مم × 100 مم) ووُضعت في ظروف مُهيأة عند درجة حرارة 1±23 درجة مئوية ورطوبة نسبية 5±50% لمدة 48 ساعة قبل الاختبار. أُجريت الاختبارات الميكانيكية بسرعة ثابتة للرأس المتحرك تبلغ 5 مم/دقيقة عند درجة حرارة الغرفة، مع مسافة فاصلة ابتدائية بين فكي التثبيت تبلغ 50 مم. تم تحليل ثلاث عينات لكل تركيبة فلم. أُجريت جميع القياسات ثلاث مرات واستُخدمت المعادلات التالية لحساب قوة الشد والاستطالة عند الكسر:

$$\text{Tensile strength (MPa)} = \frac{\text{Load at break}}{\text{Original width} * \text{Original thickness}}$$

$$\text{Percent elongation (\%)} = \frac{\text{Elongation at rupture}}{\text{Initial gauge length}} * 100$$

2-9- النشاط المضاد للبكتيريا لأفلام الألجينات/أكسيد الزنك/زيت الأوريجانو الأساسي

تم عزل بكتيريا السالمونيلا المعوية *Salmonella enterica* والليستيريا المستوحدة *Listeria monocytogenes* في مخبر خاص. عُزلت بكتيريا السالمونيلا المعوية *Salmonella enterica* باستخدام وسط SS agar وأجري عليها مجموعة من الاختبارات الكيميائية الحيوية أهمها اختبار TSI للتأكد من تخمر السكريات (غلوكوز، لاكتوز، سكروز) وانطلاق الغاز H_2S/. أما بكتيريا الليستيريا المستوحدة *Listeria monocytogenes* عزلت على وسط Blood agar بدرجة حرارة +4°م، لونت بصبغة غرام للتأكد من شكلها تحت المجهر وتم التأكد من حركتها في درجة حرارة الغرفة. أما فيما يخص الاختبارات الكيميائية الحيوية فقد طبق عليها اختبار الكاتالاز (نتيجة إيجابية) واختبار الأوكسيداز (نتيجة سلبية).

تم تقييم النشاط المضاد للبكتيريا للأفلام ضد بكتيريا السالمونيلا المعوية *Salmonella enterica* والليستيريا المستوحدة *Listeria monocytogenes* باستخدام طريقة انتشار القرص وفقًا للإجراءات العامة الموضحة من قِبل معهد المعايير السريرية والمخبرية (CLSI، 2020). في هذه العملية، قُطعت أفلام الألجينات/أكسيد الزنك/زيت الأوريجانو الأساسي إلى أقراص قطرها 6 مم، ووُضعت على أطباق Müller–Hinton Agar الحاوية على البكتيريا المُلقّحة مسبقًا بمُعلق بكتيري بتركيز 0.5 ماكفارلاند تقريباً ($1.5*10^8$ CFU/mL) محضر في وسط Tryptic Soy Broth. استُخدم السيبروفلوكساسين كمعيار إيجابي حيث أظهرت السلالات المستخدمة حساسية عالية له، إذ بلغ قطر منطقة التثبيط 22.45±0.25 مم لبكتيريا *Salmonella enterica* و 23.12±0.12 مم لبكتيريا *Listeria monocytogenes*. حُضنت الأطباق عند 37 درجة مئوية لمدة 24 ساعة. بعد ذلك، قيست أقطار منطقة التثبيط وعُبِّر عنها بالمليمتر علماً أن جميع القياسات أُجريت ثلاث مرات.

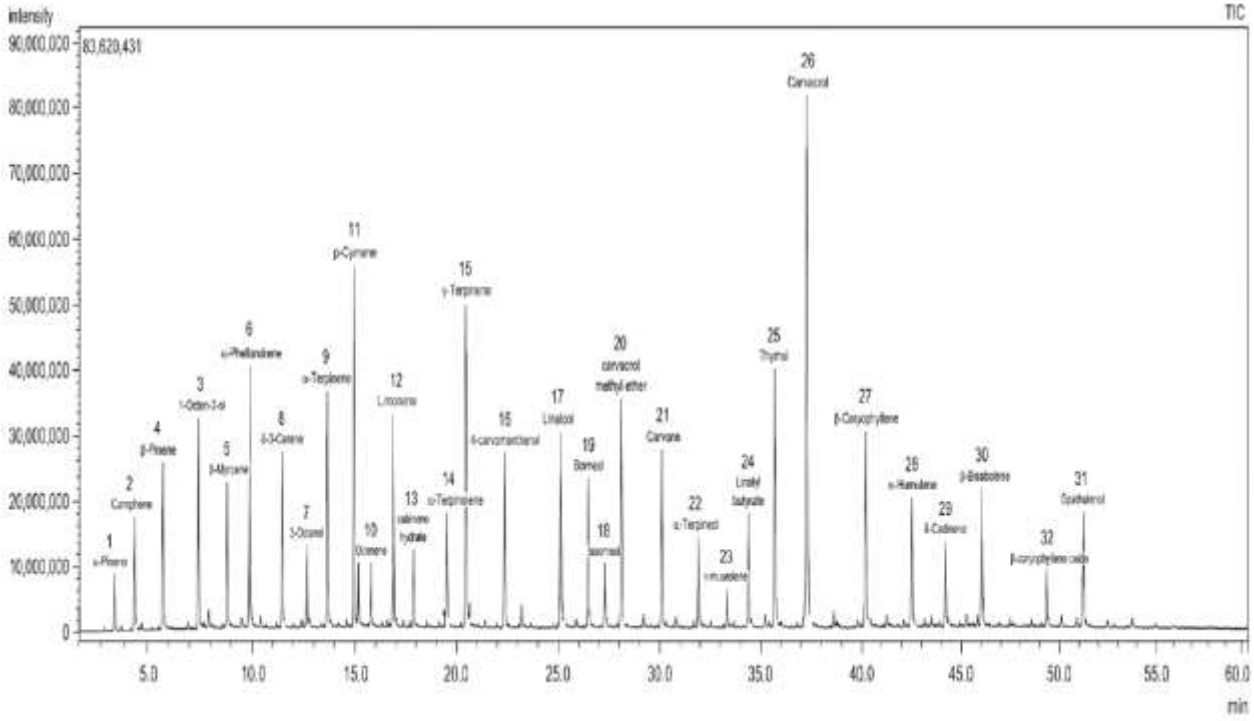
2-10- التحليل الإحصائي

عُرضت القياسات كمتوسط ± الانحراف المعياري. أُجري تحليل التباين أحادي الاتجاه (ANOVA) باستخدام برنامج SPSS بمستوى دلالة إحصائية $p<0.05$.

3- النتائج والمناقشة

3-1- مردود وتركيب زيت الأوريجانو العطري

بلغ متوسط مردود استخلاص زيت الأوريجانو العطري 1.68 ± 0.12% وزناً، وذلك بعد أربع ساعات من الاستخلاص. وأظهرت نتائج تحليل GC/MS لزيت الأوريجانو العطري (الشكل 2، الجدول 1) إمكانية تحديد 32 مركباً في زيت الأوريجانو. وكشف تحليل مفصل للتركيب الكيميائي لزيت الأوريجانو العطري أن الكارفاكرول هو المكون الرئيسي (66.23%) وتتوافق هذه النتائج مع التقارير السابقة التي تصف زيوت الأوريجانو العطرية الغنية بالكارفاكرول (Walasek-Janusz *et al.*, 2024; Ben Arfa *et al.*, 2006; Bouyahya *et al.*, 2016).



الشكل 2: مخطط تحليل GC/MS لزيت الأوريجانو العطري.

الجدول 1: التركيب الكيميائي (%) لزيت الأوريجانو العطري المختبر.

%	المركب
1.53	α-Pinene
0.24	Camphene
0.35	β-Pinene
0.36	1-Octen-3-ol
0.43	β-Myrcene
0.13	α-Phellandrene
0.12	3-Octanol
0.06	δ-3−Carene
0.52	α-Terpinene
0.14	Ocimene
13.45	*p*-Cymene
0.33	Limonene
0.03	sabinene hydrate
0.16	α-Terpinolene
5.32	γ-Terpinene
0.53	4-carvomenthenol
0.62	Linalool
0.28	Isoborneol
0.38	Borneol
0.43	carvacrol methyl ether
0.14	Carvone
1.03	α-Terpineol
0.06	γ-muurolene
0.16	Linalyl butyrate
3.56	Thymol
66.23	Carvacrol
1.00	β-Caryophyllene

0.19	α-Humulene
0.15	δ-Cadinene
0.53	β-bisabolene
0.03	Spathulenol
1.03	β-caryoplhyllene

3-2- نفاذية بخار الماء

تشير نفاذية بخار الماء إلى كمية بخار الماء التي يمكنها المرور عبر متر مربع واحد من الفلم خلال 24 ساعة في ظل ظروف محددة من ضغط البخار، وسماكة الفلم، ودرجة الحرارة، والرطوبة النسبية. تُعد هذه الخاصية بالغة الأهمية لتطبيقات تغليف المواد الغذائية، حيث يمكن أن تُسرّع الرطوبة العالية نمو البكتيريا وتؤدي إلى تلف سريع للأغذية (Qui *et al.*, 2022; Senturk Parreidt *et al.*, 2018). لذلك، يُعد تقليل نفاذية بخار الماء أمرًا ضروريًا لتقليل الخسائر الاقتصادية وتحسين جودة المنتج وفترة صلاحيته (Arfat *et al.*, 2017). تُشير التقارير عمومًا إلى أن أفلام الألجينات تُظهر نفاذية عالية لبخار الماء نظرًا لطبيعتها المحبة للماء؛ ومع ذلك، فإن إضافة أيونات الكالسيوم، أو مستخلصات نباتية كارهة للماء، أو زيوت عطرية يمكن أن تُقلل بشكل كبير من نفاذية بخار الماء (Wrońska *et al.*, 2023; Pavli *et al.*, 2019; Senturk Parreidt *et al.*, 2018). من خلال التدقيق في قيم نفاذية بخار الماء (WVP) المُقاسة في الجدول 2،

تُظهر النتائج وجود فروق معنوية عالية بين قيم نفاذية بخار الماء عند تراكيز ZnO المختلفةpde .($p < 0.05$) انخفضت قيم نفاذية بخار الماء بشكل واضح مع زيادة تركيز جسيمات أكسيد الزنك النانوية، مما يؤكد الدور الفعّال للجسيمات النانوية في تحسين الخصائص الحاجزية للأفلام، حيث تعمل هذه الجسيمات النانوية كحشوات غير منفذة تزيد من تعرج مسارات الانتشار وتُعزز بنية معقد أكسيد الزنك–الألجينات (Galus *et al.*, 2025; Espitia *et al.*, 2012; Prakash *et al.*, 2018). بالإضافة إلى ذلك، يتميز زيت الأوريجانو (OEO) بطبيعته الكارهة للماء، وبالتالي يُساهم في خفض نفاذية بخار الماء.

الجدول 2: نفاذية بخار الماء (WVP) لأغشية الألجينات المختلفة.

ZnO NPs (نسبة مئوية وزنية %)	نفاذية بخار الماء (10^{-10} g/Pa.m.s)
1	4.627 ± 0.025^{c}
3	4.126 ± 0.012^{b}
5	3.628 ± 0.018^{a}

3-3- الخواص الميكانيكية

يوضح الجدول 3 تغير الخواص الميكانيكية للأغشية (قوة الشد والاستطالة عند الكسر) مع إضافة جسيمات أكسيد الزنك النانوية بتراكيز مختلفة. يُلاحظ أنه مع إضافة جسيمات أكسيد الزنك النانوية إلى مصفوفة الفلم، زادت قوة الشد للأفلام المركبة من 3.28 إلى 4.98 ميجا باسكال، بينما كانت الاستطالة عند الكسر أعلى ما يمكن عند تركيز 3% من جسيمات أكسيد الزنك النانوية. يُعزى ازدياد قوة الشد على الأرجح إلى التفاعلات الجزيئية القوية بين جسيمات أكسيد الزنك النانوية ومصفوفة البوليمر، مما يُسهم في تكوين أفلام أكثر صلابة وتماسكًا (Galus *et al.*, 2025; Espitia *et al.*, 2012). مع ذلك، قد تُقيّد هذه التفاعلات أيضًا حركة سلاسل البوليمر، مما يؤدي إلى انخفاض الاستطالة عند الكسر.

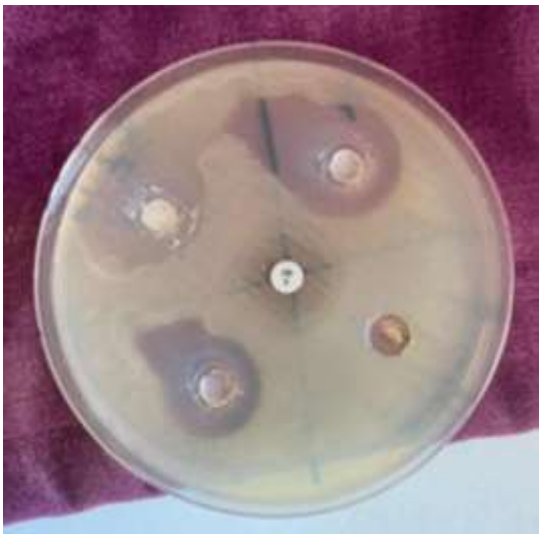
بالإضافة إلى ذلك، يُمكن لمحتوى الماء داخل بنية الفلم أن يُحسّن مرونته من خلال عمله كمُلدّن طبيعي (Gómez-Estaca *et al.*, 2014; Senturk Parreidt *et al.*, 2018). لذا، فإن انخفاض محتوى الماء الملاحظ في الجدول 3 بعد إضافة جسيمات أكسيد الزنك النانوية قد يُساهم أيضًا في انخفاض مرونة الأغشية المُحضّرة.

الجدول 3: الخصائص الميكانيكية (قوة الشد (ميجا باسكال) والاستطالة عند الكسر (%)) لأغشية الألجينات المختلفة.

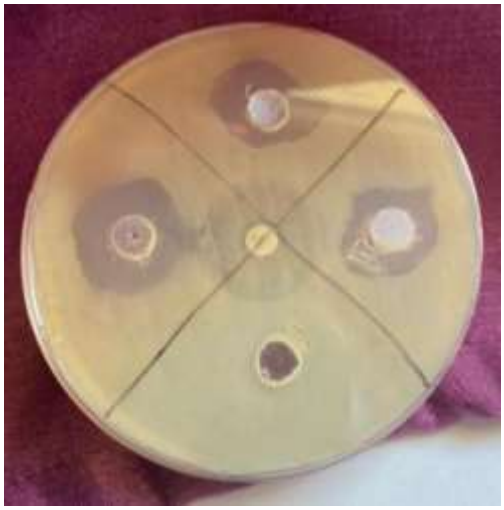
ZnO NPs (نسبة مئوية وزنية %)	قوة الشد (MPa)	الاستطالة عند الكسر (%)
1	3.28 ± 0.01^{a}	17.87 ± 0.12^{a}
3	4.19 ± 0.04^{b}	20.98 ± 0.09^{c}
5	4.98 ± 0.08^{c}	18.47 ± 0.24^{b}

3-4- النشاط المضاد للبكتيريا لأغشية الألجينات/أكسيد الزنك/زيت الأوريجانو الأساسي

خضعت أفلام الألجينات/أكسيد الزنك/زيت الأوريجانو الأساسي لاختبارات التلامس المضاد للبكتيريا ضد نوعين من مسببات الأمراض المنقولة بالغذاء (السالمونيلا المعوية *Salmonella enteric* والليستيريا المستوحدة *Listeria monocytogenes*). ازدادت مناطق التثبيط بشكل ملحوظ ($p<0.05$) مع زيادة تركيز أكسيد الزنك، كما هو موضح في الشكلين 4،3 والجدول 4. أظهرت الأغشية التي تحتوي على 5% من أكسيد الزنك أكبر مناطق تثبيط، حيث بلغت 23.29 ± 0.23 مم و21.62 ± 0.28 مم ضد السالمونيلا المعوية *Salmonella enteric* والليستيريا المستوحدة *Listeria monocytogenes*، على التوالي.



الشكل 3: النشاط المضاد لبكتيريا السالمونيلا المعوية *Salmonella enteric* لأفلام الألجينات/أكسيد الزنك/زيت الأوريجانو الأساسي.



الشكل 4: النشاط المضاد لبكتيريا الليستيريا المستوحدة *Listeria monocytogenes* لأفلام الألجينات/أكسيد الزنك/زيت الأوريجانو الأساسي.

الجدول 4: النشاط المضاد للبكتيريا لأفلام الألجينات/أكسيد الزنك/زيت الأوريجانو الأساسي (قطر منطقة التثبيط بالمليمتر).

السلالة البكتيرية	قطر منطقة التثبيط mm			
	(Ciprofloxacin)	ZnO NPs 1%	ZnO NPs 2%	ZnO NPs 3%
السالمونيلا المعوية *Salmonella enterica*	22.45±0.25^{c}	16.37±0.49^{a}	19.79±0.18^{b}	23.29±0.23^{d}
الليستيريا المستوحدة *Listeria monocytogenes*	23.12±0.12^{d}	14.68±0.29^{a}	18.09±0.52^{b}	21.62±0.28^{c}

تُعزى فعالية الأغشية المضادة للبكتيريا بشكل رئيسي إلى صغر حجم جسيمات أكسيد الزنك النانوية وإطلاق أيونات الزنك (Zn^{2+})، مما يُمكّنها من اختراق أغشية الخلايا البكتيرية والتفاعل مع مكوناتها الداخلية، وبالتالي تثبيط نمو البكتيريا (Sirelkhatim *et al.*, 2015; Raghupathi *et al.*, 2011; Kayani *et al.*, 2015). إضافةً إلى ذلك، تُنتج جسيمات أكسيد الزنك النانوية أنواع الأكسجين التفاعلية (ROS)، التي تُسبب تلفًا تأكسديًا لأغشية الخلايا البكتيرية (Applerot *et al.*, 2009). أما النشاط المضاد للبكتيريا لزيت الأوريجانو العطري (OEO) فيرتبط أساسًا بتركيبه الكيميائي، الذي يهيمن عليه الكارفاكرول (66.23%)، والباراسيمين (13.45%)، والغاما تربينين (5.32%)، والثيمول (3.56%) (Bouyahya *et al.*, 2016). تحتوي أحاديات التربين المؤكسجة مثل الكارفاكرول والثيمول على مجموعات وظيفية فينولية قادرة على تعطيل الطبقة الثنائية للفوسفوليبيد، مما يؤدي إلى تلف الغشاء وفقدان السلامة الخلوية (Burt, 2004; Xu *et al.*, 2008).

4- الاستنتاجات والتوصيات

بناءً على نتائج هذه الدراسة، تُظهر الأفلام الغذائية المصنوعة من الألجينات والمُدعّمة بجزيئات أكسيد الزنك النانوية وزيت الأوريجانو العطري إمكانات قوية للاستخدام كمواد تغليف غذائي نشطة. أظهرت الأفلام خصائص محسّنة في منع تسرب بخار الماء، وقوة ميكانيكية معززة، ونشاطًا مضادًا للبكتيريا ملحوظًا، لا سيما عند تركيزات أعلى من أكسيد الزنك، حيث بلغت مناطق التثبيط 23.29±0.23 مم ضد السالمونيلا المعوية *Salmonella enterica* و21.62±0.28 مم ضد الليستيريا المستوحدة *Listeria monocytogenes*. وبذلك تمثل الأفلام المؤلفة من الألجينات/أكسيد الزنك/OEO بديلاً قابلاً للتطبيق وصديقاً للبيئة لإطالة فترة صلاحية الأطعمة المعبأة وتحسين سلامتها.

ونظرًا لهذه النتائج الواعدة، يُوصى بأن تركز الدراسات المستقبلية على ما يلي:

- تقييم الأفلام في أنظمة غذائية حقيقية، وخاصة الأطعمة عالية الرطوبة مثل اللحوم الطازجة، للتحقق من أدائها في ظروف التخزين العملية.
- دراسة سلوك هجرة جزيئات أكسيد الزنك النانوية ومكونات الزيوت العطرية لضمان السلامة والامتثال للمواصفات القياسية.
- تحسين تركيبات الأغشية لتحقيق التوازن بين المرونة الميكانيكية وخصائص منع التسرب، لا سيما في نطاق تركيز أكسيد الزنك من 3 إلى 5% حيث يتغير سلوك قوة الشد والاستطالة.
- استكشاف تركيبات تآزرية مع مضادات بكتيرية طبيعية أخرى أو بوليمرات حيوية لتعزيز الوظائف بشكل أكبر.

5- المراجع

1. ADAMS RP. 2007, *Identification of Essential Oil Components by GC/MS*. 4th ed. Allured Publishing.
2. AHMADI A, AHMADI P, EHSANI A. 2020, *Development of an active packaging system containing zinc oxide nanoparticles for the extension of chicken fillet shelf life*. Food Sci Nutr. 8(10), 5461-5473.
3. APPLEROT G, LIPOVSKY A, DROR R, *et al.* 2009, *Enhanced Antibacterial Activity of Nanocrystalline ZnO Due to Increased ROS-Mediated Cell Injury*. Advanced Functional Materials. 5, 482–488.
4. ARFAT YA, BENJAKUL S, PRODPRAN T, *et al.* 2017, *Properties and antimicrobial activity of fish protein isolate/agar blend films incorporated with ZnO nanoparticles*. Food Hydrocoll. 62, 93–103.
5. BABUSHOK VI, LINSTROM PJ, ZENKEVICH IG. 2011, *Retention indices for frequently reported compounds of plant essential oils*. J Phys Chem Ref Data. 40(4), 1–47.
6. BEN ARFA A, COMBES S, PREZIOSI-BELLOY L, *et al.* 2006, *Antimicrobial activity of carvacrol related to its chemical structure*. LWT – Food Sci Technol. 39(10), 934–939.
7. BOUYAHYA A, JAMAL A, EDAOUDI F, *et al.* 2016, *Origanum compactum Benth: A Review on Phytochemistry and Pharmacological Properties*. Med Aromat Plants. 5(4), 1-6.
8. BURT S. 2004, *Essential oils: their antibacterial properties and potential applications in foods--a review*. Int J Food Microbiol. 94(3), 223–253.

9. CHUN SS, VATTEM DA, LIN YT, *et al.* 2005, *Phenolic antioxidants from clonal oregano with antimicrobial activity against Helicobacter pylori*. Process Biochem. 40(2), 809–816.

10. Clinical and Laboratory Standards Institute (CLSI). 2020, *Performance Standards for Antimicrobial Susceptibility Testing*. 30th ed. CLSI supplement M100. Wayne, PA: CLSI.

11. COATES J. 2000, *Interpretation of infrared spectra*. In: Meyers RA, editor. Encyclopedia of Analytical Chemistry. Wiley.

12. EKRAMI M, EMAM-DJOMEH Z. 2014, *Water Vapor Permeability, Optical and Mechanical Properties of Salep-Based Edible Film*. Journal of Food Processing and Preservation, 38, 1812-1820.

13. ESPITIA PJP, SOARES NFF, COIMBRA JSR, *et al.* 2012, *Zinc oxide nanoparticles: synthesis, antimicrobial activity and food packaging applications*. Food Bioprocess Technol. 5, 1447–1464.

14. GALUS S, PRZYBYSZEWSKA A, BARBOSA CH, *et al.* 2025, *Sustainable Zinc Oxide Nanoparticles as Active Compounds for Pectin Packaging Films*. Coatings. 15(9), 1024.

15. GÓMEZ-ESTACA J, GAVARA R, HERNÁNDEZ-MUÑOZ P, *et al.* 2014, *Encapsulation of food ingredients in edible films and coatings*. J Food Eng. 116(3), 508–517.

16. HASNIDAWANI JN, AZLINA HN, NORITA H, *et al.* 2016, *Synthesis of ZnO nanostructures using sol–gel method*. Procedia Chem. 19, 211–216.

17. KAYANI ZN, SALEEMI F, BATOOL I. 2015, *Synthesis and characterization of ZnO nanoparticles*. Materials Today: Proceedings. 2(10, Part B), 5619–5621.

18. KOŁODZIEJCZAK-RADZIMSKA A, JESIONOWSKI T. 2014, *Zinc oxide—from synthesis to application*. Materials. 7, 2833–2881.

19. KURT A, TOKER OS, TORNUK F. 2017, *Effect of xanthan and locust bean gum synergistic interaction on characteristics of biodegradable edible film*. Int J Biol Macromol. 102, 1035-1044.

20. LOPES AI, MELO A, AFONSO TB, et al. 2025, Alginate Edible Films Containing Essential Oils: Characterization and Bioactive Potential. Polymers. 17(9), 1188.

21. MILOVANOVIĆ I, MIŠAN A, SAKAČ M, *et al.* 2009, *Evaluation of a GC-MS method for the analysis of oregano essential oil composition Food Processing*. Quality and Safety 3(4), 75–79.

22. NIST Chemistry WebBook. *NIST Standard Reference Database 69*. Available from: https://webbook.nist.gov/chemistry/.

23. NOSTRO A, BLANCO AR, CANNATELLI MA, *et al.* 2004, *Susceptibility of methicillin-resistant staphylococci to oregano essential oil and its components carvacrol and thymol*. Lett Appl Microbiol. 39(2), 137–141.

24. NOSTRO A, PAPALIA T. 2012, *Antimicrobial activity of carvacrol: current progress and future prospectives*. Recent Pat Antiinfect Drug Discov. 7(1), 28-35.

25. PAVIA DL, LAMPMAN GM, KRIZ GS, *et al.* 2008, *Introduction to Spectroscopy, a Practical Approach*. 4th ed. Cengage Learning.

26. PAVLI F, ARGYRI AA, SKANDAMIS P, *et al.* 2019, *Antimicrobial Activity of Oregano Essential Oil Incorporated in Sodium Alginate Edible Films: Control of Listeria monocytogenes and Spoilage in Ham Slices Treated with High Pressure Processing*. Materials. 12(22), 3726.

27. PRAKASH B, KUJUR A, YADAV A, *et al.* 2018, *Nanoencapsulation: an efficient technology to boost the antimicrobial potential of plant essential oils in food system*. Food Control. 89, 1–11.

28. QIU Y, ZHOU Y, CHANG Y, *et al.* 2022, *The Effects of Ventilation, Humidity, and Temperature on Bacterial Growth and Bacterial Genera Distribution*. Int J Environ Res Public Health. 19(22), 15345.

29. RAGHUPATHI KR, KOODALI RT, MANNA AC. 2011, *Size-dependent bacterial growth inhibition and mechanism of antibacterial activity of zinc oxide nanoparticles*. Langmuir. 27(7), 4020–4028.

30. SANGEETHA G, RAJESHWARI S, VENCKATESH R. 2011, *Green synthesis of zinc oxide nanoparticles by Aloe barbadensis leaf extract*. Mater Res Bull. 46, 2560–2566.

31. SENTURK PARREIDT T, MÜLLER K, SCHMID M. 2018, *Alginate-based edible films and coatings for food packaging applications*. Compr Rev Food Sci Food Saf. 17(3), 624–653.

32. SILVERSTEIN RM, WEBSTER FX, KIEMLE DJ. 2014, *Spectrometric Identification of Organic Compounds*. 7th ed. Wiley.

33. SIRELKHATIM A, MAHMUD S, SEENI A, *et al.* 2015, *Review on zinc oxide nanoparticles: antibacterial activity and toxicity mechanism*. Nano-Micro Lett. 7, 219–242.

34. VALDÉS A, RAMOS M, BELTRÁN A, *et al.* 2017, *State of the Art of Antimicrobial Edible Coatings for Food Packaging Applications*. Coatings 7, 56.

35. WALASEK-JANUSZ M, GRZEGORCZYK A, MALM A, *et al.* 2024, *Chemical Composition, and Antioxidant and Antimicrobial Activity of Oregano Essential Oil*. Molecules. 29(2), 435.

36. WROŃSKA N, KATIR N, NOWAK-LANGE M, *et al.* 2023, *Biodegradable chitosan-based films as an alternative to plastic packaging*. Foods. 12(18), 3519.

37. XU J, ZHOU F, JI BP, *et al.* 2008, *The antibacterial mechanism of carvacrol and thymol against Escherichia coli*. Letters in Applied Microbiology 47, 174-179.

38. ZHANG Y, ZHOU L, ZHANG C, *et al.* 2020, *Preparation and characterization of curdlan/polyvinyl alcohol/ thyme essential oil blending film and its application to chilled meat preservation*. Carbohydr Polym. 247, 116670.