

تقييم الأداء الحراري للستائر المتحركة في البيوت البلاستيكية خلال فصل الشتاء دراسة ميدانية في محافظة طرطوس

د. وسيم محمود مرشد*

د. عدنان علي الأحمد**

م. حلا محمد محت الرفاعي***

(تاريخ الإيداع ٢٠٢٥/١٠/٣٠ . قُبِلَ للنشر في ٢٠٢٥/١٢/١٧)

□ ملخص □

تعاني البيوت البلاستيكية من خسائر حرارية ليلية كبيرة تؤدي إلى انخفاض كفاءة الإنتاج خلال المواسم الباردة وارتفاع استهلاك الطاقة. تهدف هذه الدراسة الميدانية، المنقذة في محافظة طرطوس خلال الفترة (5-21 شباط 2025)، إلى تقييم الأداء الحراري لستارة متحركة من ثلاث الطبقات مكوّنة من بولي إيثيلين عالي الكثافة، طبقة ألومنيوم عاكسة، وبوليستر، ضمن بيت بلاستيكي نصف دائري.

اختُبر نمطان تشغيليان رئيسيان: الإغلاق الثابت ليلاً، والتشغيل المتقطع (فتح وإغلاق كل ساعتين)، مع تسجيل مستمر لدرجات الحرارة والرطوبة والإشعاع الشمسي باستخدام حساسات دقيقة متصلة بنظام تسجيل سحابي.

أظهرت النتائج أن الإغلاق الليلي الثابت حسّن التوازن الحراري الداخلي وخفّض الفقد بمعدل (6.5°) ، وارتفعت الرطوبة النسبية بنسبة (7.2%)، محققاً وفراً حرارياً نوعياً قدره (0.85 kWh/m^2) في المقابل، أدى التشغيل المتقطع إلى تذبذب حراري أكبر وتراجع في الطاقة المحفوظة إلى (0.21 kWh/m^2) كما تحسّن أداء الستارة في ظروف الإشعاع الشمسي المرتفع (400 W/m^2) وتراجع في الأيام الغائمة. الكلمات المفتاحية: عزل البيوت البلاستيكية، الستارة المتحركة، الأداء الحراري، توفير الطاقة، الإشعاع الشمسي، الزراعة الشتوية، بولي إيثيلين-ألومنيوم-بوليستر.

*أستاذ مساعد في كلية الهندسة التقنية - في جامعة طرطوس

**أستاذ مساعد في كلية الهندسة التقنية - في جامعة طرطوس

***طالبة ماجستير قسم كلية الهندسة التقنية - في جامعة طرطوس.

Evaluation of the Thermal Performance of Movable Curtains in Greenhouses During Winter A Field Study in Tartous Governorate

Dr: Waseem Mahmoud Morshed*

Dr Adnan Ali Al-Ahmad**

Eng Hala Mohamed Medhat Al-Rifai***

(Received 30/10/2025 . Accepted 17/12/2025)

□ ABSTRACT □

Plastic greenhouses suffer from substantial nocturnal heat losses, which lead to reduced production efficiency during cold seasons and increased energy consumption. This field study, conducted in Tartous Governorate during the period from (5 to 21 February 2025), aimed to evaluate the thermal performance of a three-layer movable curtain composed of high-density polyethylene, a reflective aluminum layer, and polyester, installed in a semi-circular plastic greenhouse.

Two main operational modes were tested: continuous night-time closure and intermittent operation (opening and closing every two hours). Air temperature, relative humidity, and solar radiation were continuously recorded using high-precision sensors connected to a cloud-based data logging system.

The results showed that continuous night-time closure improved the internal thermal balance and reduced heat losses by an average of 6.5 °C, while relative humidity increased by (7.2%), achieving a specific thermal saving of (0.85 kWh/m²). In contrast, intermittent operation resulted in greater thermal fluctuations and a decrease in stored energy to (0.21 kWh/m²). The curtain performance also improved under conditions of high solar radiation (400 W/m²) and declined during cloudy days.

Keywords: Greenhouse insulation, movable curtain, thermal performance, energy saving, solar radiation, winter agriculture, polyethylene-aluminum-polyester

*Assistant Professor at the Faculty of Technical Engineering - Tartous University

**Assistant Professor at the Faculty of Technical Engineering - Tartous University

***Master's student in the Department of Technical Engineering - Tartous University.

مقدمة :

تواجه البيوت البلاستيكية المستخدمة في الزراعة المحمية تحدياً حرارياً واضحاً يتمثل في الفقد الكبير للحرارة خلال فترات الليل الشتوية والارتفاع المفرط في درجات الحرارة نهاراً خلال الصيف، ما ينعكس سلباً على توازن المناخ الداخلي وكفاءة استهلاك الطاقة. ولتجاوز هذه المشكلة، طُورت تقنيات متعددة للتحكم بالمناخ الداخلي، من أبرزها استخدام الستائر المتحركة (Movable Thermal Screens) التي تؤدي دوراً مزدوجاً في الاحتفاظ بالحرارة ليلاً وتقليل الإشعاع الشمسي نهاراً.

انطلاقاً من هذه الأهمية، نُفذ مشروع بحثي متكامل في كلية الهندسة التقنية - جامعة طرطوس لدراسة التأثير الحراري للستائر المتحركة داخل بيت بلاستيكي مخصص لزراعة البندورة خلال فصل الشتاء، حيث تميز المشروع بالتجربة الميدانية العديدة، وقد جُمعت بيانات مناخية فعلية داخل البيت البلاستيكي (درجات الحرارة، الرطوبة، شدة الإشعاع الشمسي).

يهدف المشروع إلى تقييم كفاءة الستارة المركبة ثلاثية الطبقات (بولي إيثيلين عالي الكثافة + ألومنيوم + بوليستر) في الحد من فقد الحرارة وتحقيق استقرار حراري داخلي أفضل، مع التركيز على قابلية تطبيق هذا الحل في الظروف المناخية الساحلية المعتدلة لمحافظة طرطوس.

تأتي أهمية هذه الدراسة من كونها تطرح نموذجاً بحثياً عملياً قابلاً للتعميم في تصميم أنظمة العزل داخل البيوت البلاستيكية في المنطقة المتوسطة، وتسهم في دعم الزراعة المستدامة منخفضة الاستهلاك الطاقوي.



الشكل (1) يوضح بيت بلاستيكي بداخله ستارة أفقية

١. مشكلة البحث وأهميته

تتمثل مشكلة البحث في الارتفاع الكبير في معدلات الفقد الحراري داخل البيوت البلاستيكية خلال الليالي الشتوية الباردة، مما يؤدي إلى انخفاض درجة الحرارة الداخلية إلى مستويات تقل عن الحدود المثلى

نمو النباتات الحساسة كالمطاطم، ويجبر المزارعين على الاعتماد على وسائل تدفئة تقليدية مرتفعة الكلفة ومرهقة للطاقة. إن هذا الهدر الحراري لا ينعكس فقط على كفاءة المناخ الداخلي، بل يُترجم مباشرة إلى انخفاض في كفاءة استخدام الطاقة وزيادة في التكاليف التشغيلية، وهو ما يجعل تحقيق العزل الحراري الفعال ضرورة اقتصادية بقدر ما هو تقنية بيئية. من هذا المنطلق، تبرز أهمية البحث في سعيه لتقييم أداء ستارة عازلة متحركة متعددة الطبقات مصنعة من مواد محلية منخفضة الكلفة (بولي إيثيلين عالي الكثافة - ألومنيوم - بوليستر)، بهدف تقليل الفقد الحراري وتحسين استقرار المناخ الداخلي للبيت البلاستيكي، حيث إن ربط تحسين كفاءة العزل الحراري بتقليل استهلاك الطاقة وتخفيض النفقات التشغيلية ذو أهمية علمية واقتصادية قوية لاعتماد هذا النظام ضمن برامج تطوير الزراعة المحمية، بوصفه حلاً مستداماً يجمع بين الجدوى الطاقة والفعالية الإنتاجية في الظروف المناخية المتوسطة لمحافظة طرطوس.

٢. أهداف البحث

يهدف البحث إلى تحقيق ما يلي:

1. تحديد كفاءة المواد المستخدمة في تصنيع الستارة من حيث الانعكاسية والعزل من خلال :
2. تقييم التأثير الحراري لاستخدام ستارة متحركة داخل البيت البلاستيكي خلال فصل الشتاء.
3. مقارنة التغيرات في درجات الحرارة الداخلية والخارجية بين حالتها وجود الستارة وعدمها.
3. تحديد مقدار الفقد الحراري والوفورات في الطاقة الناتجة عن استخدام الستارة.

٣. الدراسات المرجعية :

تُعَدّ الدراسات السابقة حجر الأساس لفهم أداء البيوت البلاستيكية وتأثير الستائر الحرارية على المناخ الداخلي وكفاءة استخدام الطاقة والإنتاجية الزراعية.

قام الباحث Chavan وآخرون (2025) بإجراء دراسة علمية في جامعة ويسترن سيدني - أستراليا، هدفت إلى تحديد مواصفات الستائر في البيوت البلاستيكية المغطاة بأغلفة ضوئية مختلفة لتحقيق أعلى كفاءة طاقة. استخدم الباحثون ست حجرات تجريبية بمساحة $105 m^2$ لكل منها، مع أنظمة تحكم دقيقة لقياس درجات الحرارة، استهلاك الطاقة، ومستويات الإشعاع الحراري خلال موسمي الشتاء والصيف. اختُبرت ثلاثة أنواع من الأغلفة: الفيلم المحوّل للضوء (LSF)، الفيلم منخفض الانبعاثية (LBF)، وغلاف الزجاج المنتشر كمرجع. أظهرت النتائج أن فيلم (LBF) قلل استهلاك الطاقة بشكل ملحوظ، بينما أدى فيلم (LSF) إلى زيادة الاستهلاك بنسبة تصل إلى (33%) في الصيف، مما أبرز أهمية اختيار الأغلفة وفق الخصائص الموسمية لتحقيق كفاءة طاقة عالية.

في تركيا، قام الباحث S. Boyacı وآخرون (2023) بدراسة تأثير ستارة مركبة من شرائط أكريليك شفافة وألومنيوم على المناخ الداخلي وكفاءة الطاقة داخل بيت بلاستيكي. ركب الباحثون الستارة وقارنوا المؤشرات المناخية مثل درجة الحرارة، الرطوبة النسبية، والاستهلاك الطاقوي مع بيت مماثل دون ستارة. أظهرت النتائج رفع درجة الحرارة الداخلية بمقدار ($1.3C^{\circ}$) وزيادة الرطوبة النسبية بنسبة (10%) كما ساهم الإغلاق الليلي للستارة في تقليل معامل انتقال الحرارة (U-value) وتحقيق وفر طاقي يصل إلى (21%).

في شمال الصين، أجرى الباحث Li Yiming وآخرون (2023) تجربة ميدانية لتقييم أداء العزل الحراري الداخلي في بيت بلاستيكي شمالي، مزود بستارة عازلة داخلية متحركة ضمن هيكل فولاذي مستقل. أظهرت النتائج

زيادة الإشعاع الشمسي المحتجز وتحسين البيئة الحرارية، مع تقليل فقد الحرارة عند السقف الأمامي بنسبة (13.67%) وتوفير الطاقة الكلية بنسبة (8.75%)، ساهم تصميم السقف والستارة الداخلية في تحسين توزيع الحرارة والإنتاج الزراعي بشكل مستدام.

في كوريا الجنوبية، قام الباحث Zakir وآخرون (2022) بتحليل تأثير موضع الستارة الحرارية على المناخ الداخلي وإنتاج الفراولة في بيت زجاجي. أظهرت النتائج أن تغيير موضع الستارة لم يؤثر على متوسط درجات الحرارة أو استهلاك الطاقة الكلي، لكنه حسن توزيع الإشعاع الشمسي، ما انعكس إيجابياً على نمو وإنتاج المحصول، مشيراً إلى أهمية تحسين تصميم الستائر لتحقيق أقصى استفادة من الطاقة الشمسية.

أخيراً، في شمال الهند، أجرى الباحث Angmo وآخرون (2021) دراسة في بيت بلاستيكي سلبي بالطاقة الشمسية مزود بهوية طبيعية لتقييم تأثير التظليل واتساع مدى درجات الحرارة على النمو الفسيولوجي والكيميائي ومحصول البندورة. استخدم الباحثون ثلاثة نظم: بيت غير مظلل، بيت مظلل بشبكة حمراء، وزراعة في الحقل المفتوح. بينت النتائج أن التظليل أثر بشكل إيجابي على مؤشرات التمثيل الضوئي، النتج، كفاءة استخدام الماء، تركيز ثاني أكسيد الكربون، وخصائص النمو وجودة الثمار.

تظهر هذه الدراسات مجتمعةً أن فعالية الستائر تعتمد على خصائص المواد ونمط التشغيل، إلا أن الدراسات في المناخ المتوسطي الرطب كساحل طرطوس ما تزال محدودة، ما يبرر إجراء هذه الدراسة الميداني.

٤. مواد وطرائق البحث :

4-1- تصميم البيت البلاستيكي وإعداد التجربة

تم تنفيذ الدراسة في بيت بلاستيكي نصف دائري الشكل أنشئ خصيصاً للأغراض البحثية في محافظة طرطوس الواقعة على الساحل الشرقي للبحر الأبيض المتوسط بين خطي عرض (35.5°) شمالاً وطول (36.0°) شرقاً. تتميز المنطقة بمناخ متوسطي معتدل، شتاؤه دافئ ورطب وصيفه حار نسبياً، مما يجعلها بيئة مناسبة لدراسة الأداء الحراري للبيوت البلاستيكية.

بدأت التجربة بإعداد الأرض الزراعية داخل البيت لضمان استقرار التربة وتجانس توزيع العوامل البيئية، حيث تم تسوية الأرض ميكانيكياً وإزالة الشوائب والصخور الصغيرة، مع تعديل الميل الطفيف لتسهيل تصريف المياه، ثم أثريت التربة بالمواد العضوية والأسمدة اللازمة وفقاً لاحتياجات نبات البندورة، وقد تم اختيار صنف بندورة عالي الإنتاجية وزرع الشتلات على صفوف متوازية بمسافات مدروسة (50cm بين الشتلات 80cm بين الصفوف)، لضمان تهوية جيدة وتسهيل عمليات الري والمراقبة، باستخدام نظام ري بالتنقيط لضبط كمية المياه بدقة حسب مراحل نمو النبات.

تم اعتماد نظام ستائر أفقي لتغطية السقف الداخلي للبيت البلاستيكي، بهدف التحكم في الإشعاع الشمسي الداخل وتعديل الظروف الحرارية حسب الحاجة، حيث صُنعت الستارة من ثلاث طبقات (بولي إيثيلين، بوليستر، وألمنيوم) لتحقيق العزل الحراري والمرونة الميكانيكية حيث وتم تثبيت المقاطع باستخدام سفايف معدنية لضمان تماسكها أثناء الحركة. كما وُضع مسار إرشادي على جانبي الستارة لتحديد اتجاه الحركة ومنع الالتواء، مع تقسيم النظام إلى وحدتين متحركتين مستقلتين ("سيارتين") تتيح فتح أو إغلاق الستارة جزئياً أو كلياً. كما تم تركيب حلقات معدنية ومقابض يدوية لتسهيل التشغيل اليدوي دون الحاجة لأنظمة كهربائية، ما يوفر مرونة عالية وصيانة منخفضة.

صُمم البيت البلاستيكي بأبعاد (4*4 m) وارتفاع وسطي (2.2 m)، مع باب أمامي (1*1 m)، وهيكله مصنوع من أنابيب معدنية خفيفة الوزن مقاومة للتآكل، ومغطى بغلاف HDPE بسبك (180 μ) يتميز بنفاذية عالية للإشعاع الشمسي وتوزيع جيد للضوء. تم تركيب الستارة عند ارتفاع (1.7 m) لأنه يتوافق مع التوصيات العالمية التي توصي بتركيب الستارة فوق قمة النبات بـ (15-30 cm) لضمان كفاءة حرارية، كما يسمح هذا الارتفاع بمرور العمال بسهولة داخل البيت دون ملامسة الستارة أو عرقلة العمليات الزراعية، ولتعمل كحاجز حراري بين الطبقة الهوائية العليا ومنطقة الزراعة.

اشتملت التجربة على حالتين تشغيليتين:

فتح الستارة نهائياً وإغلاقها ليلاً لمحاكاة التشغيل الزراعي الاعتيادي.

فتح الستارة بالكامل ليوم كامل ثم إغلاقها ليوم كامل لدراسة الأثر الحراري المباشر لوضع الستارة على المناخ الداخلي للبيت البلاستيكي، ويوضح الشكل (2) الستارة وتركيبها في الموقع الميداني في محافظة طرطوس.



الشكل (2) الستارة وتركيبها في الموقع الميداني في محافظة طرطوس

2-4- المواد وخصائصها الحرارية:

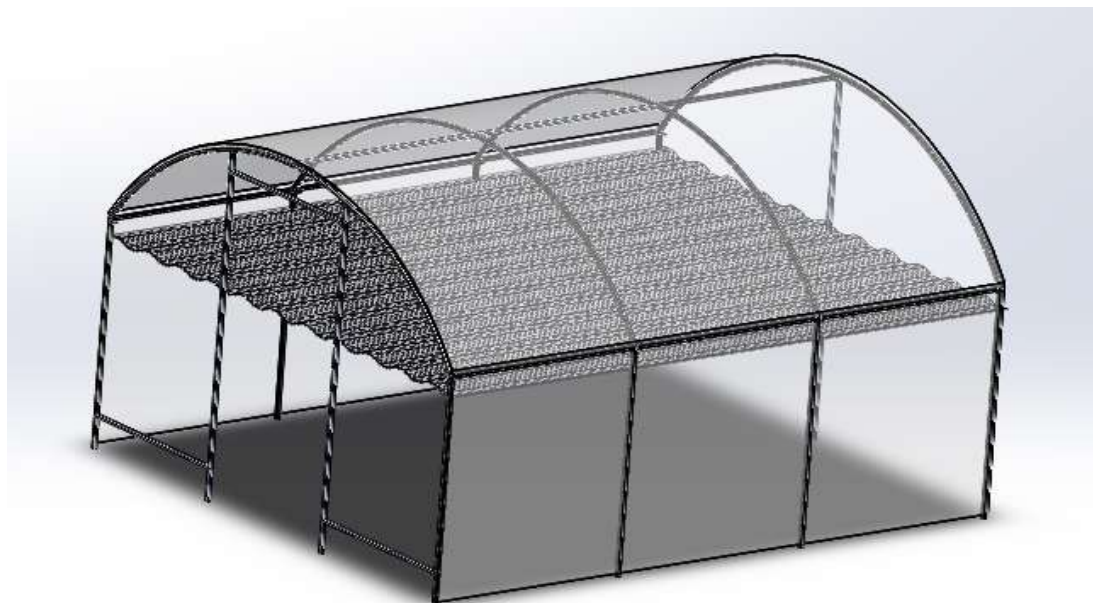
تتألف الستارة من ثلاث طبقات رئيسية، تم اختيارها بناءً على خواصها الفيزيائية والحرارية التي توازن بين الانعكاسية، العزل، والمرونة، يوضح الجدول التالي القيم الحرارية المعتمدة لكل مادة كما وردت في المراجع

القياسية العالمية (CRC Handbook of Chemistry and Physics) :

الجدول (1) يوضح القيم الحرارية المعتمدة لمواد الستارة

المادة	السماكة (μm)	الكثافة Kg/m ³	الحرارة النوعية (J/kg*K)	معامل التوصيل الحراري (W/m*K)	معامل الانعكاسية (ε)
بولي إيثيلين عالي الكثافة	90	950	1900	0.42	0.35
ألمنيوم	10	2700	900	250.0	0.07
بوليستر	10	1380	1250	0.16	0.65

تؤدي طبقة الألمنيوم الوسطى دور العاكس للإشعاع الحراري، مما يقلل الفقد الليلي ويحد من انتقال الحرارة بالإشعاع، بينما توفر طبقتا البولي إيثيلين والبوليستر العزل بالموصلية المنخفضة وتحافظان على توازن الرطوبة والحرارة ضمن الحيز الداخلي هذا التكوين يعكس الإشعاع الأرضي ليلاً بنسبة عالية، مما يؤدي إلى توازن حراري أفضل، يوضح الشكل (3) رسم توضيحي للبيت البلاستيكي المستخدم .



الشكل (3): رسم توضيحي للبيت البلاستيكي

3-4 معدات القياس: اعتمد البحث على منظومة قياس متكاملة مؤلفة من أجهزة ذكية عالية الدقة، لضمان

استمرارية المراقبة وتحقيق موثوقية في البيانات، ويوضح الجدول (2) أهم الأجهزة المستخدمة في القياس:

الجدول (2) : يوضح أهم الأجهزة المستخدمة في القياس

الجهاز	الوظيفة	الأهمية	الحساسية / الدقة
Radiometer LI-19	قياس شدة الإشعاع الشمسي الساقط (W/m^2)	تحديد الطاقة الشمسية الداخلة للبيت البلاستيكي	$\pm 2\%$
%Sonoff Zigbee LCD Smart Temperature & Humidity Sensor	قياس درجة الحرارة والرطوبة الداخلية	مراقبة الظروف الحرارية داخل البيت بدقة عالية	للحرارة و $\pm 0.3^\circ C$ والرطوبة $\pm 2\%$
Sonoff Zigbee Bridge Pro	ربط المستشعرات عبر Wi-Fi ونقل البيانات	تأمين تواصل مستمر بين eW e المستشعرات وتطبيق Link	
بطارية 12v	تغذية الأجهزة	ضمان استمرارية التسجيل دون توقف	
هاتف ذكي (Hotspot)	Wi-Fi نقطة بث شبكة	ضمان ربط الأجهزة بالإنترنت وتخزين البيانات	

كما يوضح الشكل (4) الأجهزة التي تم استخدامها في القياس :



الشكل (4) يوضح الأجهزة المستخدمة في القياس: (a) مقياس شدة الإشعاع الشمسي، (b) حساس درجة الحرارة والرطوبة الداخلية

4-4- إجراءات تنفيذ التجربة

تم تنفيذ التجربة من (5 إلى 21 شباط)، إذ أُغلقت الستارة ليلاً وفتحت نهاراً وفق نظام تشغيل منتظم.

شمل التنفيذ الخطوات التالية:

أولاً: ضبط الشروط الساكنة:

تم التأكد من إغلاق جميع الفتحات الجانبية للبيت البلاستيكي لمنع تسرب الهواء الخارجي، تُثبتت الأجهزة في مواقع ثابتة على ارتفاعات متوازية داخل الحيز المزروع لتجنب التحيز المكاني، حُدثت أوقات القياس بشكل منتظم لضمان المقارنة الزمنية الصحيحة بين الأيام.

ثانياً: تسجيل التفاعل البيئي:

تم مراقبة التفاعل بين درجات الحرارة والظروف المناخية الخارجية يومياً، سُجلت ملاحظات عن تكاثف الرطوبة على السطح الداخلي للبولي إيثيلين وتأثيرها على النقل الإشعاعي، حيث أُجري رصد لحظي لتبدلات الحرارة فور فتح وإغلاق الستارة لمتابعة ديناميكية الاستجابة الحرارية.

ثالثاً: إعادة التكرار وضمان الثبات:

أُعيدت بعض القياسات في الأيام المتوسطة من التجربة للتحقق من ثبات الأداء، حيث تمت مقارنة النتائج بين الأيام المتتالية للتأكد من عدم وجود تغيرات مفاجئة ناجمة عن تغير المناخ الخارجي.

رابعاً: ضبط العوامل المؤثرة:

تم تثبيت نوع الغطاء وسماكته والاتجاه الجغرافي للبيت البلاستيكي لتقليل المتغيرات الخارجية، حيث تمت مراقبة مستوى الإشعاع الشمسي لتوحيد ظروف المقارنة بين حالات الفتح والإغلاق.

٥. تحليل الأداء الحراري والرطوبة للستارة الأفقية في البيوت البلاستيكية :

1-5- مقدمة تحليلية

تم إجراء التجارب على بيت بلاستيكي نموذجي خلال الفترة من (5 إلى 21 شباط ، 2025) وتم اختيار هذه الفترة نظراً لكونها تمثل المرحلة الأبرد والأكثر استقراراً من حيث الظروف المناخية في محافظة طرطوس خلال فصل الشتاء، وهي الفترة التي تُسجل فيها البيوت البلاستيكية أعلى معدلات الفقد الحراري الليلي مقارنة ببقية أشهر الموسم، حيث يتيح هذا التوقيت تقييم فعالية الستارة الحرارية تحت أقصى الظروف الحراري، ما يجعل

النتائج أكثر تمثيلاً وكفاءة من الناحية العلمية، حيث تم تسجيل بيانات درجة الحرارة والرطوبة الداخلية لكل ساعة باستخدام جهاز قياس عالي الدقة، وتمت مقارنة الأداء مع حالات "الستارة مغلقة" و"ستارة مفتوحة". تم تحليل البيانات باستخدام المقارنة الزمنية والنسبية بين الحالتين (مع الستارة/بدونها) لتحديد مؤشرات الأداء

الهدف من التحليل هو تقييم كفاءة الستارة في الحفاظ على الحرارة والرطوبة، وتحديد الحالات التي نجحت فيها الستارة، والفشل المحتمل لأسباب فيزيائية وبيئية.

٦. النتائج والمناقشة :

1-6- الأداء الليلي للستارة

1-1-6- الحالة الأولى : ليل بارد (13-12 شباط 2025)

أجريت القياسات الحرارية خلال ليلتين باردتين كانت متقاربتين من حيث درجة الحرارة الخارجية من شهر شباط (12-13 شباط 2025) بهدف تقييم أداء الستارة العازلة أثناء الانخفاض الحاد في درجات الحرارة الليلية ، سُجّلت القيم التجريبية لدرجات الحرارة والرطوبة النسبية داخل البيت البلاستيكي في حالتين: الأولى دون استخدام الستارة، والثانية مع إغلاقها الكامل طوال فترة الليل (الستارة مغلقة من 18:00 إلى 06:00) ، يوضح الجدول (3) المقارنة الكمية بين القيم المتوسطة والصغرى لكل من الحالتين، إضافة إلى الفروقات الحرارية والرطوبة الناتجة عن وجود الستارة.

الجدول (٣): نتائج القياسات التجريبية لدرجات الحرارة والرطوبة داخل البيت البلاستيكي خلال ليلة باردة

(12-13 شباط 2025)

المؤشر	الفرق	بدون الستارة	مع الستارة
T_{avg} (°C)	-1.4	10.8	9.4
T_{min} (°C)	-1.1	9.0	7.9
RH_{avg} (%)	+6.9	86.3	93.2
ΔT الفرق الأقصى في T	-2.9	—	—

تظهر القيم الواردة في الجدول (3) أن متوسط درجة الحرارة الداخلية في حالة وجود الستارة كان أقل

بمقدار

($1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$) مقارنةً باليوم غير المزود بستارة حرارية مع العلم أن المقارنة تمت في أيام درجات الحرارة الخارجية كانت متقاربة بها، في حين انخفضت درجة الحرارة الصغرى بمقدار ($1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$)، وكانت الرطوبة النسبية بالحد المسموح به بنحو ($+6.9\%$) يعكس هذا السلوك أن الإغلاق الكامل للستارة خلال ساعات الليل قد حدّ من تبادل الهواء بين داخل البيت وخارجه، مما أدى إلى احتجاز بخار الماء وزيادة الرطوبة، لكنه في المقابل أعاق دخول الهواء الخارجي الذي كان أدفأ في الساعات الأولى من الليل.

يمكن تفسير الانخفاض السلبي في متوسط درجة الحرارة بعدة آليات حرارية:

(1) تشكل طبقة تكاثف مائي على السطح الداخلي للغلاف البلاستيكي أدى إلى فقد إشعاعي إضافي

مؤقت.

(2) توزيع غير متجانس للحرارة داخل الحيز الهوائي بسبب تقييد الحمل الحراري العمودي أسفل الستارة.

وعلى الرغم من هذا الانخفاض الطفيف، فإن الارتفاع الواضح في الرطوبة النسبية يدل على أن البيت البلاستيكي حافظ على جزء من الطاقة الكامنة للبخار، ما يشير إلى كفاءة مقبولة للعزل الإشعاعي للستارة في ظروف التبريد الليلي البارد.

من الناحية التطبيقية، يمكن تحسين الأداء عبر تعديل توقيت الإغلاق ليم بعد استقرار الحرارة الخارجية أو باستخدام نظام تحكم آلي يعتمد على الفرق الحراري بين الداخل والخارج، لضمان تحقيق أفضل توازن بين تقليل الفقد ومنع احتباس الهواء البارد.

6-1-2- الحالة الثانية نهار مشمس بعد ليلة باردة (15-16 شباط 2025):

تم رصد استجابة البيت البلاستيكي عند تعرضه لإشعاع شمسي مباشر خلال يوم مشمس هدفت القياسات إلى تحديد مدى قدرة الستارة العازلة على التحكم بدرجة الحرارة الداخلية أثناء ساعات النهار ذات الإشعاع العالي. جُمعت البيانات الحرارية والرطوبة بين الساعة (07:00 و 18:00) في حالتين: الأولى مع إغلاق الستارة خلال ساعات النهار، والثانية بدونها، لتقييم دورها في الحد من ارتفاع الحرارة الإشعاعية. يوضّح الجدول (4) الفروق المقاسة في متوسط درجات الحرارة بين الحالتين.

الجدول (4): درجات الحرارة المسجلة داخل البيت البلاستيكي في يوم مشمس بعد ليلة باردة

(15-16 شباط 2025)

الملاحظة	درجة حرارة مع ستارة °C	درجة حرارة بدون ستارة °C	الوقت
فرق °C -8.7	16.6	23.8	18:00
الستارة رفعت حرارة بمتوسط 1.2 °C	10 إلى 13	9 إلى 11	07:00-19:00

تظهر البيانات في الجدول (4) أن استخدام الستارة خلال النهار المشمس أدى إلى انخفاض واضح في درجة الحرارة الداخلية بمقدار (8.7- C°) مقارنة بالحالة المرجعية، وهو ما يعكس قدرة الطبقة الوسطى من الألمنيوم على عكس جزء كبير من الإشعاع الشمسي المباشر وبالتالي تقليل الحمل الحراري داخل البيت البلاستيكي. هذا التأثير العاكس يُعدّ إيجابياً من ناحية الحدّ من الإجهاد الحراري على النباتات ومنع تجاوز الحدود الحرارية المثلى لنمو البندورة، خصوصاً في منتصف النهار عندما تبلغ شدة الإشعاع أقصاها.

في المقابل، لوحظ أن إغلاق الستارة أثناء النهار ساهم في رفع درجة الحرارة الليلية اللاحقة بمقدار (1.2)°C، نتيجة احتفاظ الستارة بجزء من الحرارة المخزنة خلال النهار، يشير هذا السلوك المزوج إلى أن للستارة وظيفة ديناميكية حرارية متكاملة، إذ تعمل كعاكس نهارى ومخزن حراري ليلي في الوقت ذاته.

من الناحية الفيزيائية، يمكن تفسير الانخفاض النهاري الكبير بفضل انعكاس الإشعاع قصير الموجة عن سطح الألمنيوم وتشتته عبر طبقتي البوليستر والبولي إيثيلين، مما قلّل من انتقال الحرارة بالحمل داخل الحيز الهوائي. كما يعكس ارتفاع الحرارة المسائي قدرة النظام الطبقي على تقليل الفقد الحراري بالإشعاع طويل الموجة بعد غروب الشمس.

تؤكد هذه النتائج أن التحكم الزمني في فتح وإغلاق الستارة يمثل أداة فعالة لتنظيم المناخ الداخلي، إذ يمكن من خلاله تقليل درجات الحرارة المفرطة نهاراً مع الحفاظ على دفءٍ نسبي ليلاً، الأمر الذي يُحسّن من راحة النباتات وكفاءة استخدام الطاقة داخل البيت البلاستيكي.

6-1-3- الحالة الثالثة يوم غائم (19-18 شباط 2025):

تم تحليل البيانات المسجلة خلال يومين متتاليين من الطقس الغائم (18-19 شباط 2025) تميزت هذه الفترة بانخفاض واضح في الإشعاع الشمسي الكلي الأفقي مما يوفر سيناريو مختلفاً عن الأيام المشمسة هدفت القياسات إلى تحديد كفاءة الستارة في التحكم الحراري في ظروف الإشعاع المنخفض. تم رصد درجات الحرارة الداخلية نهاراً (11:00-16:00) وليلاً (17:00-18:00) في حالتها وجود الستارة وغيابها، كما يوضحها الجدول (5) أدناه.

الجدول (5): درجات الحرارة المسجلة داخل البيت البلاستيكي في يوم غائم (18-19 شباط 2025)

الملاحظة	درجة حرارة مع ستارة °C	درجة حرارة بدون ستارة °C	الوقت
الستارة خفضت نهاراً بمعدل 6.5 °C	27.6-16.0	27.8-26	11:00-16:00
الستارة رفعت حرارة ليلاً بمعدل 1.8 °C	21.2-10	10	17:00-18:00

على الرغم من انخفاض الإشعاع الشمسي الكلي، حافظت الستارة على قدرتها المزدوجة في التنظيم الحراري.

فقد قلت من درجة الحرارة النهارية بمعدل (6.5 °C) نتيجة امتصاص وانعكاس الإشعاع المنتشر، ورفعت درجة الحرارة الليلية بمقدار 1.8 °C بفضل العزل الإشعاعي طويل الموجة. هذا يدل على أن كفاءة الستارة لا تعتمد فقط على شدة الإشعاع المباشر، بل أيضاً على خصائصها المادية ذات الانبعاثية المنخفضة التي تضمن استمرار العزل حتى في الأجواء الغائمة.

6-1-4- الحالة الرابعة التشغيل المتقطع (فتح/إغلاق كل ساعتين):

عند تطبيق التشغيل المتقطع، لوحظ تنذب حراري كبير داخل البيت البلاستيكي، كما هو موضح في الجدول (6):

الجدول (6) يوضح مؤشر أداء الكمية

الحالات	زيادة الرطوبة %	طاقة المحفوظة KWh/m ²	انخفاض درجة حرارة نهاراً
ستارة ثابتة ليلية	+7.2	0.85	---
ستارة نهارية ثابتة	---	--	-6.5
فتح وإغلاق كل ساعتين	+2.1	0.21	-1.8

أظهرت النتائج أن نمط التشغيل المتقطع أضعف كفاءة العزل بنسبة تتجاوز (40%) مقارنة بالإغلاق الثابت.

ويُعزى ذلك إلى أن التبدلات السريعة في فتح وإغلاق الستارة تمنع تكوين توازن حراري مستقر داخل الحيز الهوائي، وتزيد من تبادل الهواء بالحمل مما يؤدي إلى خسارة حرارية متكررة وبالتالي، يُعد الإغلاق الليلي الثابت أكثر استقراراً وفعالية في الحد من الفقد الحراري وتحسين كفاءة الطاقة.

6-2- التحليل المقارن والتقييم الكمي للأداء:

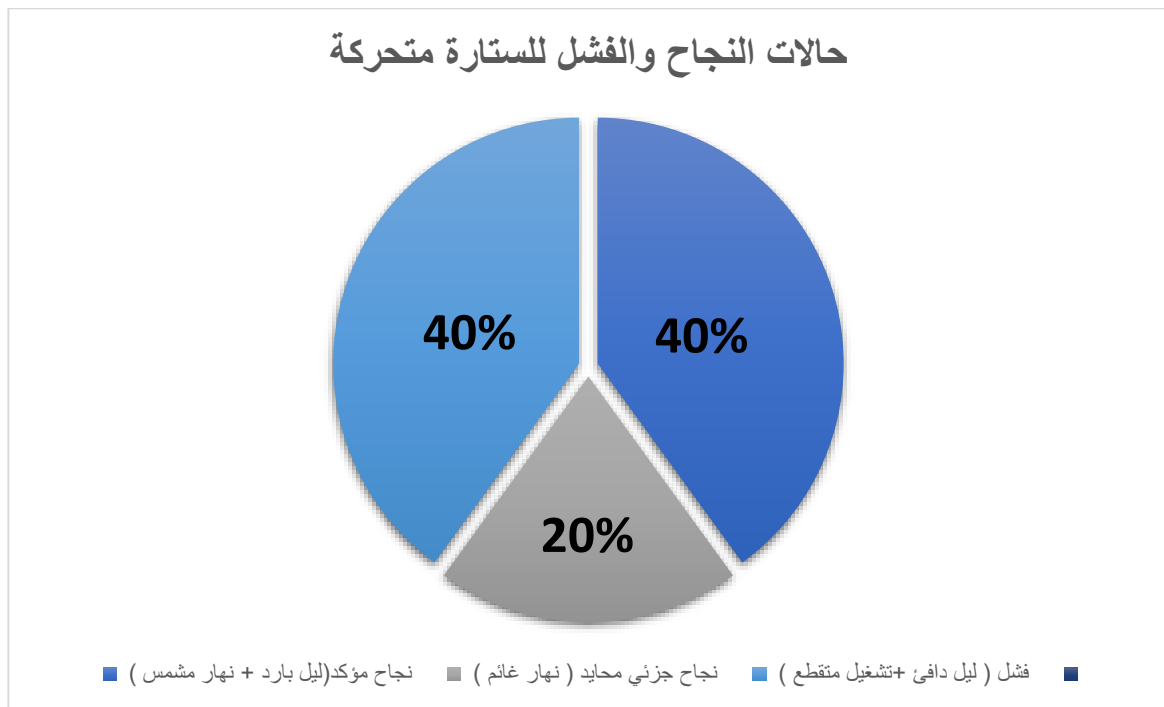
لتقييم كفاءة الستارة العازلة بشكل شمولي، تم تحليل أدائها ضمن الحالات تشغيلية وظروف جوية مختلفة (ليل بارد، ليل دافئ، نهار مشمس، نهار غائم، وتشغيل متقطع)، يوضح الجدول (7) خلاصة نوعية لحالات

نجاح وفشل الستارة في تحقيق الاستقرار الحراري المطلوب، مما يكشف عن سلوكها التكيفي الحراري الذي يعتمد بشكل أساسي على التوقيت ودرجة حرارة الهواء الخارجي والإشعاع الشمسي.

الجدول (7) خلاصة حالات نجاح وفشل التجربة.

السبب	النجاح	الفشل	الحالة
عزل فعال ضد فقدان الحرارة	نجحت	----	باردليل ($T_{out} < T_{in}$)
منعت دخول الهواء الدافئ	—	فشلت	دافئليل ($T_{out} > T_{in}$)
عكس الإشعاع بشكل فعال	نجحت	----	نهار مشمس ($GHI > 400 \text{ W/m}^2$)
تأثير ضعيف للإشعاع	—	محايدة	نهار غائم ($GHI < 100 \text{ W/m}^2$)
عدم استقرار حراري	—	فشلت	فتح وإغلاق كل ساعتين

تبيّن أن الستارة الثابتة الليلية هي النمط التشغيلي الأمثل من حيث كفاءة العزل وتوفير الطاقة، في حين أن التشغيل المتقطع يقلل الأداء ويزيد من التذبذب الحراري الداخلي. أما في الأجواء المشمسة، فقد أثبتت الستارة فعاليتها في الحد من الارتفاع المفرط للحرارة، مما يعزز مفهوم التحكم الحراري الذكي الذي يجمع بين العزل الليلي والانعكاس النهاري، يوضح الشكل (4) مخطط لحالات النجاح والفشل للستارة المتحركة.



الشكل (4) مخطط لحالات النجاح والفشل للستارة المتحركة

تشير النتائج المستخلصة من الدراسة إلى توافق كبير مع نتائج الدراسات السابقة، حيث أظهرت جميع الدراسات تحسناً في الاستقرار الحراري وزيادة كفاءة الطاقة باستخدام الستائر العازلة، حيث في دراسة Chavan وآخرون (2025)، تبين أن اختيار المواد المناسبة للستائر يمكن أن يقلل من استهلاك الطاقة بشكل كبير، وهو ما يتطابق مع ما تم ملاحظته في هذه الدراسة من تحسين أداء الستارة في البيوت البلاستيكية، كما أظهرت دراسة Boyacı وآخرون (2023) أن الإغلاق الليلي أسهم في تحسين درجة الحرارة الداخلية بنسبة (1.3°C)، وهو

مشابه لما لوحظ في هذه الدراسة من تأثير الستارة الثابتة في الليل. في المقابل، أظهرت النتائج أن التشغيل المتقطع كان أقل فعالية في تحقيق استقرار حراري، مما يتفق مع ما أشار إليه Zakir وآخرون (2022) من أن التصميم والتوقيت الأمثل للستارة هو المفتاح لتحقيق أقصى استفادة من الطاقة الشمسية. هذه النتائج تدعم أهمية التكيف مع الظروف المناخية والتوقيت الصحيح في تحسين فعالية الستائر العازلة.

٧. الاستنتاجات :

- درجة الحرارة: أدى الإغلاق الليلي الثابت للستارة إلى تحقيق أعلى أداء حراري، حيث خفض الفقد الحراري الداخلي بمعدل (6.5 °C) بينما عملت الستارة نهاراً كعاكس فعال لتقليل الحرارة المفرطة الناتجة عن الإشعاع الشمسي المباشر.
- الرطوبة: ساهم الإغلاق في زيادة الرطوبة النسبية داخل البيت البلاستيكي بنسبة (7.2%) وهو ما يجب معالجته بإضافة مراوح تهوية ليدعم نمو نباتات البندورة.
- الإشعاع وتوفير الطاقة: أدت كفاءة الستارة في العزل وتقليل الفقد الحراري بالإشعاع إلى توفير في الطاقة اللازمة للتدفئة بمعدل (0.85 KWh/m²) مما يبرز أهمية الاستمرارية في التشغيل الليلي.

٨. التوصيات المستقبلية:

- 1- دراسة مواد ستارة بديلة (بولي كربونات): يُنصح بالبحث في استخدام مواد جديدة مثل البولي كربونات كبديل للستائر الحالية. تتمتع هذه المواد بخصائص عزل حراري ممتازة وشفافية عالية، مما يمكن أن يعزز من فعالية العزل الحراري داخل البيوت البلاستيكية.
- 2- دمج مستشعرات رطوبة: يُوصى بتزويد البيوت البلاستيكية بمستشعرات رطوبة متطورة تعمل على مراقبة مستويات الرطوبة النسبية بشكل مستمر، يمكن أن تساعد هذه المستشعرات في الحفاظ على الرطوبة النسبية تحت (95%)، مما يساهم في تقليل مخاطر الأمراض الفطرية والحفاظ على صحة النباتات.
- 3- تطوير نظام تحكم ذكي: من المفيد تطوير نظام تحكم ذكي يدمج البيانات من المستشعرات المختلفة (الحرارة، الرطوبة، الإضاءة) لضبط الظروف المناخية داخل البيت البلاستيكي بشكل تلقائي، مما يزيد من كفاءة الإنتاج ويقلل من استهلاك الطاقة.
- 4- إجراء تجارب طويلة الأمد: يُفضل إجراء تجارب طويلة الأمد لتقييم أداء المواد الجديدة والتقنيات المستخدمة في ظروف مناخية متنوعة، مما يساعد في التوصل إلى حلول مستدامة ومناسبة للزراعة في البيوت البلاستيكية.
- 5- توعية المزارعين: يجب العمل على توعية المزارعين بأهمية استخدام التقنيات الحديثة في الزراعة المحمية وكيفية الاستفادة من هذه الابتكارات لتحسين الإنتاجية وتقليل المخاطر الصحية للنباتات.

المراجع :

- 1) Chavan, S. G., Samaranayake, P., Lan, Y.-C., Maier, C., Liang, W., Cazzonelli, C. I., Chen, Z. H., & Tissue, D. T. (2025). *Optimal energy-efficient shade screen and ventilation control settings for a greenhouse covered with light-altering films*. *Frontiers in Energy Research*, 13, 1515479
- 2) Boyacı, S., Atılğan, A., Jagosz, B., et al. (2023). *Determination of the Effect of a Thermal Curtain Used in a Greenhouse on the Indoor Climate and Energy Savings*. *Energies*, 16
- 3) Li, Y., Sun, D., Xia, T., Varbanov, P. S., Liu, X., & Li, T. (2023). *Performance of a novel internal insulation in Chinese solar greenhouse for the cleaner and energy-saving production in high latitudes and cold regions*. *Energy*, (published July 31, 2023)
- 4) Zakir, E., Ogunlowo, Q. O., Akpenpuun, T. D., Na, W.-H., Adesanya, M. A., Rabi, A., Adedeji, O. S., Kim, H. T., & Lee, H.-W. (2022). *Effect of Thermal Screen Position on Greenhouse Microclimate and Impact on Crop Growth and Yield*. *Nigerian Journal of Technological Development*, 19(4), 417–432.
- 5) Angmo, P., Phuntsog, N., Namgail, D., Chaurasia, O. P., & Stobdan, T. (2021). *Effect of shading and high temperature amplitude in greenhouse on growth, photosynthesis, yield and phenolic contents of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.)*. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 27(7), 1539–1546.
- 6) Haynes, W. M. (Ed.). (2014). *CRC Handbook of Chemistry and Physics (95th ed.)*. CRC Press.