

دراسة تجريبية لتقييم الأداء الحراري لجدار ترومب المركب في التدفئة والتكييف الشمسي السلبي

د. لانا كنجو*

قمر الزمان نجار**

(تاريخ الإيداع 1 / 4 / 2021. قَبِلَ للنشر في 10 / 10 / 2021)

□ ملخص □

يتناول هذا البحث دراسة تجريبية لأداء جدار ترومب الخازن للحرارة في مدينة اللاذقية. وتم لإجراء هذه الدراسة تصميم ثلاثة نماذج تجريبية بحجم (1 [m] × 1 [m] × 1 [m]) لكل نموذج، يمثل أحدهم غرفة اختبار مرجعية تحاكي منزلاً عادياً معزولاً، بينما صُممت الواجهة الجنوبية للنموذج الثاني بحيث تحاكي جدار ترومب التقليدي، وصُممت الواجهة الجنوبية للنموذج الأخير لتحاكي جدار ترومب المركب. تم قياس درجات الحرارة المثوية داخل النماذج الثلاثة، وتم تقييم أدائها الحراري خلال فصلي الصيف والشتاء.

أظهرت النتائج أفضلية جدار ترومب المركب، فقد بلغ فرق درجات الحرارة بينه وبين الوسط المحيط صيفاً حوالي [°C] 3.6، وبلغ هذا الفرق شتاءً حوالي [°C] 10.6. كما تمت دراسة تأثير تغيير بعض البارامترات التي من شأنها أن تحسن أداء الجدار المركب. وبعد مقارنة النتائج وجدنا أن القيم المثلى للحصول على أفضل أداء حراري لجدار ترومب المركب كانت لسماكة بقيمة [cm] 2 للفجوة بين الزجاج والجدار الخازن، وسماكة بقيمة [cm] 4 للفجوة بين الجدارين العازل والخازن مقارنة بالقيم المختبرة الأخرى.

الكلمات المفتاحية: الطاقة الشمسية، الأنظمة الشمسية السلبية، التدفئة والتكييف الشمسي، الجدران الخازنة للحرارة، جدار ترومب المركب، جدار ترومب التقليدي، المدخنة الحرارية.

* أستاذة مساعد - قسم هندسة القوى الميكانيكية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

(iana.kenjo@gmail.com)

** طالبة ماجستير - طاقة شمسية - قسم هندسة القوى الميكانيكية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية . (kamar.najjar91@gmail.com).

An Experimental Study to Evaluate the Thermal Performance of Composite Trombe Wall in Passive Solar Heating and Cooling

Dr. Lana Kenjo*
Kamar al-Zaman Najjar**

(Received 1 / 4 / 2021. Accepted 10 / 10 / 2021)

□ ABSTRACT □

This research presents an experimental study of the performance of storage Trombe wall in Lattakia. To do that, three experimental models of (1 [m] × 1 [m] × 1 [m]) size for each were designed. The first one represents a reference test room that simulates a normal, isolated house. The southern façade of the second model was designed to simulate classic Trombe wall, while the southern façade of the latter was designed to simulate composite Trombe wall. The temperature was measured within these models, and the thermal performance was evaluated during summer and winter.

The results showed that composite Trombe wall was the best of all, as the difference between its temperature and the ambient temperature was about 3.6 [°C] during summer, and about 10.6 [°C] during winter time. The influence of some parameters that can affect the performance of composite wall was also studied. The results showed that the optimum values for the best thermal performance of the composite Trombe wall were for a thickness of 2 [cm] for the gap between the glass and the massive wall, and for a thickness of 4 [cm] for the gap between the insulating wall and massive wall.

Keywords: Solar energy, Passive Solar Systems, Solar heating and cooling, thermal storage walls, Composite Trombe wall, Classic Trombe wall, Solar chimney

* Associate Professor, Mechanical Power Engineering Department, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria. (lana.kenjo@gmail.com)

** Postgraduate Student (Master) - Energy Engineering - Mechanical Power Engineering Department - Faculty of Mechanical and Electrical Engineering - Tishreen University - Lattakia - Syria. (kamar.najjar91@gmail.com)

مقدمة:

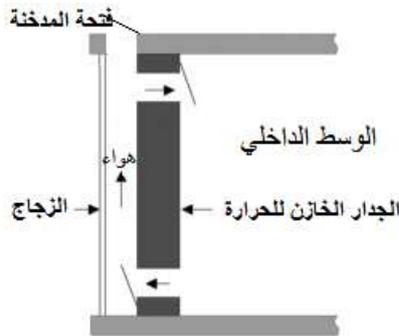
يواجه العالم واحدة من أخطر أزمات الطّاقة لهذا العقد، فمن المتوقع بحلول العام 2050 أن تصل انبعاثات غازات ظاهرة الاحتباس الحراري إلى أكثر من الضعف، وذلك في حال الاستمرار بالاستخدام غير المسؤول لوسائل الطاقة التقليدية. كما أصبحت العديد من الدول متأثرة بهذه المشاكل المترافقة مع نزوب الوقود، فمثلاً تستوجب المحافظة على راحة ساكني المباني في وقتنا الحالي استهلاكاً أكثر من 40 % من الطاقة العالمية المسؤولة عن 30 % من انبعاثات غازات الاحتباس الحراري. لهذا يعدّ هذا القطاع أكثر القطاعات استهلاكاً للطاقة، حيث تستهلك عمليات التدفئة والتكييف المنزلي حوالي خمس الطاقة الإجمالية الناتجة من الوقود الأحفوري العالمي [1]. لذلك وبسبب الأزمات المحليّة المتزايدة للطاقة تركّز اهتمام المهندسين على مصادر الطاقات المتجددة بكافة أنواعها، وتشير الدراسات الحديثة إلى أنّ الاعتماد على الطاقات المتجددة وخاصة الطاقة الشمسيّة سيساهم في تقليل انبعاثات الغازات بنسبة 40 % حتى عام 2050. [2]

تعدّ الطاقة الشمسيّة بشكل خاص مصدراً هاماً من مصادر الطّاقة المتجددة، حيث يمكننا اعتبارها الخيار الأكثر شعبيّة واستخداماً، وتتميّز بأنها مصدر مجاني للطاقة ويمكن الاستفادة منها في العديد من المجالات، كعمليات التدفئة والتكييف الشمسية السلبية للأبنية، حيث تعتمد هذه الأنظمة على استثمار المناخ المحليّ بالاعتماد على كافة عناصر المبنى من المواد والشكل المعماري لالتقاط الإشعاع الشمسي. وستنظرّق في بحثنا هذا إلى دراسة أحد هذه الأنظمة الشمسيّة السلبية ممثلاً بالجدار الخازن للحرارة أو ما يعرف بجدار ترومب. وقد سعى الباحثون إلى دراسة الجدران الخازنة للحرارة بكافة أنواعها من حيث التصميم والأداء وكيفية الاستفادة منها بأفضل الطرق، فقد أجريت دراسة استخدم فيها تصميم جديد لجدار ترومب يسمح بتلقي الإشعاع الشمسي من ثلاث جهات (الجنوب - الشرق - الغرب) بالتالي يصبح أكثر قدرة على تلقي الإشعاع الشمسي بحوالي 16 % من النموذج التقليدي شتاءً [3]. كما تمّت مقارنة الأداء الطّاقّي بين ثلاث نماذج من جدار ترومب تختلف من ناحية تركيب زجاج الواجهة الجنوبية (مزوّد بلوح PV، زجاج مفرد أو زجاج مزدوج) [4]، وأظهرت الدراسات التي قيّمت أداء جدران ترومب أنّ الجدار قد تمكّن من تعديل الرطوبة الداخلية للوسط الداخلي للنموذج المختبر [5]، وأنّ جدار ترومب المركب الذي يتكون من جدار خازن للحرارة بالإضافة إلى جدار عازل، أبدى أداءً أفضل من نظيره التقليدي في الأيام الماطرة والغائمة [6]. كما أجريت دراسات لتقييم أداء جدار ترومب صيفاً، بعضها قارن بين استخدام التظليل بأنواعه (الكواسر والمصراع والحواجر المصمتة) أو التهوية والعزل [7] ومنها استخدم الدمج بين نظام المدخنة الحرارية ونظام رشّ الماء لزيادة الفعالية الحرارية للنظام المدروس [8]. يعرض هذا البحث دراسة تجريبية لنوعين من أنواع الجدران الخازنة للحرارة، هما جدار ترومب التقليدي وجدار ترومب المركب، حيث تمّ تقييم الأداء الحراري للجدارين ومقارنته مع النموذج المرجعي خلال فصلي الصيف والشتاء في مدينة اللاذقية ($35.5407^{\circ} N$, $35.7953^{\circ} E$)، ودراسة تأثير بعض البارامترات على هذا الأداء.

1. مبدأ عمل جدار ترومب التقليدي (Classic Trombe Wall) : [6]

يتألّف من جدار مكوّن من مواد خازنة للحرارة بسماكة كبيرة نوعاً ما، مطليّ باللون الأسود لزيادة الكسب الحراري الشمسي، يتوضّع على مسافة صغيرة من لوح زجاجي، عليه فتحتا تهوية تسمحان بمرور الهواء من وإلى الغرفة. وفقاً لمفهوم الدارة الحراريّة فإنّ الجدار الخازن ذو السطح الأسود سوف يمتصّ الإشعاع الشمسي المارّ من اللوح الزجاجي نهاراً وسترتفع درجة حرارته، بالتالي فإنّ الهواء المحصور في الفجوة ما بين الجدار والزجاج سوف يسخن فتتخفّف كثافته ممّا يحفّز تشكّل دارة حمل حرّ داخل الفجوة: حيث يدخل الهواء البارد من الغرفة إلى الفجوة من خلال

فتحة التهوية السفلية ويعود بعد تسخينه إلى الغرفة من خلال فتحة التهوية العلوية، كما هو مبين بالشكل (1). وبعد غياب الشمس يتم إغلاق فتحات التهوية بغية التقليل من الضياع الحراري بالحمل، لكن خلال الليل وعندما تصبح درجة حرارة الجدار الخازن أقل من درجة حرارة الغرفة سوف تنتج دارة حرارية عكسية بالتالي سيحدث انتقال الحرارة بشكل عكسي من الغرفة إلى الفجوة الهوائية.



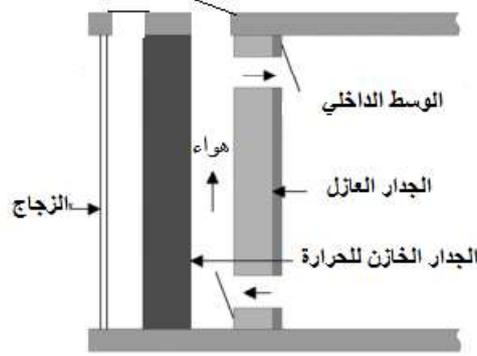
الشكل (1) جدار ترومب التقليدي

ويمكن خلال فصل الصيف الاستفادة من هذا التصميم لتكييف المنزل، حيث يمكن إنشاء فتحة تهوية سقفية متصلة مع الوسط الخارجي تفتح صيفاً وتغلق شتاءً. وبعد إغلاق فتحة التهوية العلوية الموجودة على الجدار الخازن والمتصلة مع الوسط الداخلي للغرفة، وحسب مبدأ عمل المدخنة الحرارية (solar chimney)، فإن الحرارة المختزنة بواسطة الجدار الخازن ستعمل على تسخين الهواء الموجود في قناة الجدار فتقل كثافته ويخرج من فتحة المدخنة، بالتالي سيتم تحفيز تدفق هواء الغرفة من الفتحة السفلية للجدار باتجاه المدخنة الحرارية وطرحه إلى الخارج وذلك بسبب فرق درجة الحرارة بين غرفة الاختبار ذات الحرارة الأقل والفراغ الهوائي ذو الحرارة الأعلى [9].

2. مبدأ عمل جدار ترومب المركب (Composite Trombe Wall) : [10] [11]

يوجد تشابه كبير بين آلية عمل كل من الجدارين. حيث يتكوّن الجدار المركب من لوح زجاجي وجدار خازن للحرارة مطلي باللون الأسود تفصل بينهما فجوة هوائية مغلقة لا تسمح بحدوث دارة حمل حراري عبرها، بالإضافة إلى جدار عازل يحتوي على فتحتي التهوية العلوية والسفلية، يتوضع على مسافة صغيرة من الجدار الخازن للحرارة، كما هو موضح بالشكل (2). ترسل الطبقة الأولى الشفافة المقدار الأكبر من الأشعة الشمسية الواردة إليها إلى الجدار الخازن للحرارة عن طريق التوصيل الحراري ضمن الفجوة الهوائية المغلقة، حيث يمتصّ الجدار مقدراً من الطاقة الشمسية المكتسبة وترتفع حرارته فينشرها إلى الحيز الداخلي نهاراً عن طريق دارة حمل حراري حرّ متشكّلة ضمن الفجوة الهوائية بين الجدارين الخازن للحرارة والعازل. كما يتم تخزين قسم من الحرارة في الجدار الخازن ليعبثها إلى الحيز الداخلي ليلاً عن طريق الإشعاع الحراري. خلال الليل يتم إغلاق فتحات التهوية في الجدار المركب فتشكّل مع الجدار العازل حاجزاً يمنع الدارة العكسية والضياع الحراري.

ويمكن الاستفادة من هذا التصميم في تأمين الراحة الحرارية للمبنى خلال فصل الصيف بعد إنشاء فتحة سقفية وإغلاق فتحة التهوية العلوية، وذلك بالاعتماد على مبدأ المدخنة الحرارية كما في جدار ترومب التقليدي.



الشكل (2) جدار ترومب المركب

أهمية البحث وأهدافه:

تكمُن أهمية هذا البحث في الاستفادة من الطاقة الشمسية كمصدر مجاني ونظيف بيئياً في عمليتي التدفئة والتكييف في مدينة اللاذقية، وذلك عن طريق استثمار إحدى واجهات البناء وهي الواجهة الجنوبية في امتصاص وتخزين الطاقة الناتجة عن الإشعاع الشمسي، بالتالي الاستفادة منها في تأمين شروط الراحة الحرارية داخل المباني السكنية، وذلك من خلال نظام الجدار الخازن للحرارة الشمسي السلبي. فحسب الدراسات يمكن للجدران الخازنة للحرارة أن تقلل استهلاك الطاقة للمبنى الواحد حتى % 30 ولذلك تعدّ من أهم أشكال العمارة المستدامة. [12]

ويهدف البحث إلى إجراء دراسة تجريبية لتقييم الأداء الحراري لنظام الجدران الخازنة للحرارة ومدى فعاليتها في مدينة اللاذقية، وذلك من خلال دراسة نوعين من أنواع هذا النظام هما جدار ترومب التقليدي وجدار ترومب المركب خلال فصلي الصيف والشتاء، ومقارنتهما مع نموذج مرجعي يحاكي منزلاً عادياً معزولاً. كما يهدف إلى تسليط الضوء على جدار ترومب المركب بشكل خاص باعتباره حلاً للدائرة الحرارية العكسية التي تحدث في الجدار التقليدي عند انخفاض درجة حرارته إلى قيمة أقل من درجة حرارة الوسط الداخلي. ويتطرق هذا البحث إلى دراسة تأثير عدّة متغيرات من شأنها أن تحسّن من تصميم جدار ترومب المركب بالتالي تحسّن من أدائه صيفاً وشتاءً.

طرائق البحث ومواده:

اعتمدنا في بحثنا المنهج التجريبي نظراً لأهميته من حيث التطبيق المباشر على المواضيع البحثية التي يراد دراستها. وتمّ من أجل ذلك تصميم ثلاث نماذج لغرف اختبار بأبعاد متماثلة. وصنعت جدران وأسقف النماذج الثلاثة المُصممة من ألواح الجبس (gypsum board) ذي السماكة $1.5 [cm]$ ، وتمّ عزلها بألواح من الستيريوبور ذات السماكة $2 [cm]$. بينما صُممت أرضية النماذج الثلاثة لغرف الاختبار من البينتون المسلح بسماكة قدرها $6 [cm]$ ، وعُزلت أيضاً بطبقة من الفلين بنفس سماكة عزل الجدران. وتمّ فتح نوافذ في الواجهات الشمالية والشرقية للنماذج الثلاثة بأبعاد قدرها $(30 [cm] \times 30 [cm])$ ، وتم أيضاً فتح باب في الواجهة الغربية لكل نموذج بأبعاد قدرها $(60 [cm] \times 30 [cm])$.

تمّ قياس درجات الحرارة المثوية باستخدام ترمومترات رقمية ذات حساس داخل هذه النماذج ومقارنة النتائج بغية تقييم أدائها الحراري.

1. توصيف النموذج المرجعي:

صُمم هذا النموذج بأبعاد $1 [m] \times 1 [m] \times 1 [m]$ ليحاكي منزلاً عادياً معزولاً واجهته الجنوبية ليست خازنة للحرارة، ولا يحوي على أي من أساليب التدفئة السلبية. كما هو موضح بالشكل (3).

2. توصيف جدار ترومب التقليدي المدروس في البحث:

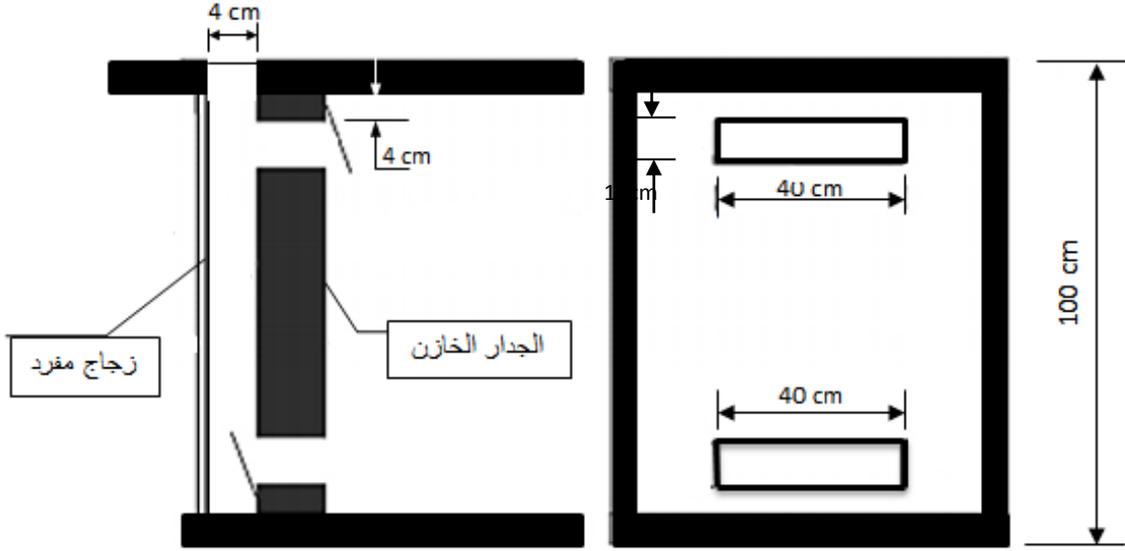
تم إنشاء جدران هذا النموذج وفق المواصفات المذكورة سابقاً بأبعاد $1 [m] \times 1 [m] \times 1 [m]$ ، لكن واجهته الجنوبية صُممت لتحاكي جدار ترومب التقليدي بأبعاد محددة وفق الدراسات المرجعية [13] [14]، حيث تم صنع الجدار الجنوبي للنموذج من البنتون المسلح المطلي باللون الأسود بسماكة $10 [cm]$ ، يتوضع على مسافة $4 [cm]$ منه لوح من الزجاج المفرد، وتم إنشاء فتحتي تهوية علوية وسفلية بأبعاد $10 [cm] \times 40 [cm]$ تبعد كل منهما عن السقف والأرضية مسافة $4 [cm]$. أما الفتحة السقفية فقد أنشئت على امتداد الفجوة الهوائية بأبعاد $4 [cm] \times 40 [cm]$ قابلة للتغيير حسب عرض الفجوة. كما هو موضح بالشكلين (3) و (4).

3. توصيف جدار ترومب المركب المدروس في البحث:

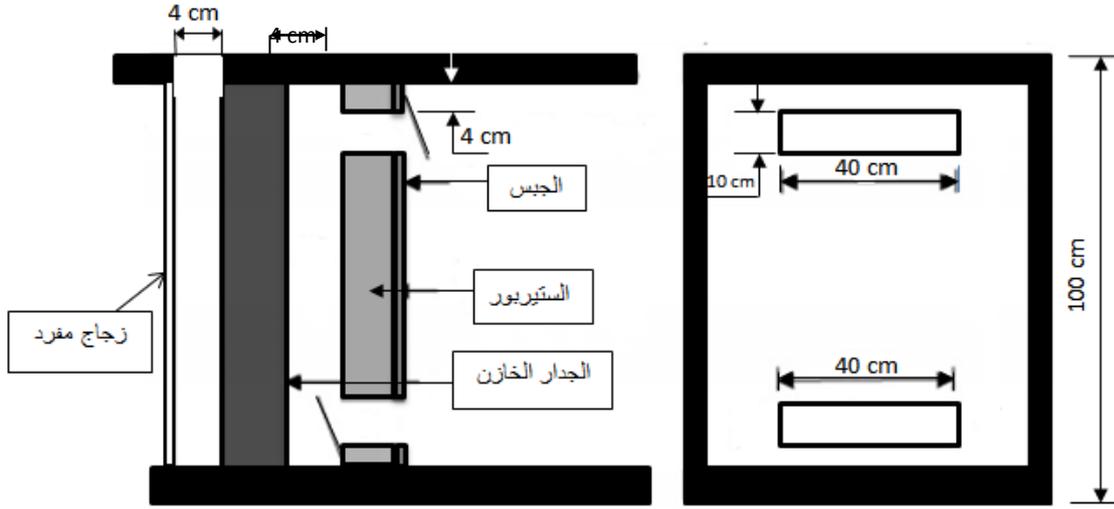
تم أيضاً إنشاء النموذج بأبعاد $1 [m] \times 1 [m] \times 1 [m]$. وصممت واجهته الجنوبية بأبعاد محددة وفق الدراسات المرجعية لتحاكي جدار ترومب-ميشيل (المركب) [13] [14]، وتم إنشاء الجدار الجنوبي من البنتون المسلح المطلي باللون الأسود ذو السماكة $10 [cm]$ ، وتوضع لوح الزجاج المفرد على مسافة $4 [cm]$ منه من جهة الخارج، كما توضع جدار من الستيريوبور العازل بسماكة $5 [cm]$ على مسافة $4 [cm]$ من جهة الغرفة أضيف إليه لاحقاً لوح من الجبس بسماكة $1.5 [cm]$ ، وتم فتح فتحتي التهوية على الجدار العازل بأبعاد $10 [cm] \times 40 [cm]$ على بعد $4 [cm]$ من السقف والأرضية أيضاً، أما الفتحة السقفية فقد أنشئت على امتداد الفجوة الهوائية بأبعاد $4 [cm] \times 40 [cm]$ ، كما هو موضح بالشكلين (3) و (5). وتم لاحقاً في هذا النموذج إنشاء فتحة سقفية خارجية على امتداد الفجوة الهوائية المغلقة؛ بأبعاد $4 [cm] \times 40 [cm]$.



الشكل (3) النماذج المختبرة على أرض الواقع (المرجعي، ذو ترومب التقليدي، ذو ترومب المركب) على الترتيب



الشكل (4) مخطط توضيحي لأبعاد جدار ترومب التقليدي المدروس



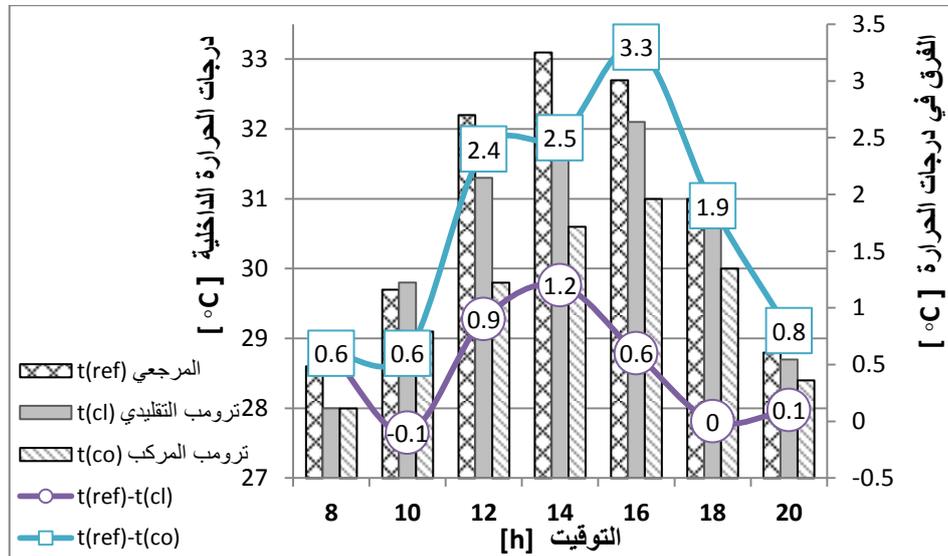
الشكل (5) مخطط توضيحي لأبعاد جدار ترومب المركب المدروس

النتائج والمناقشة:

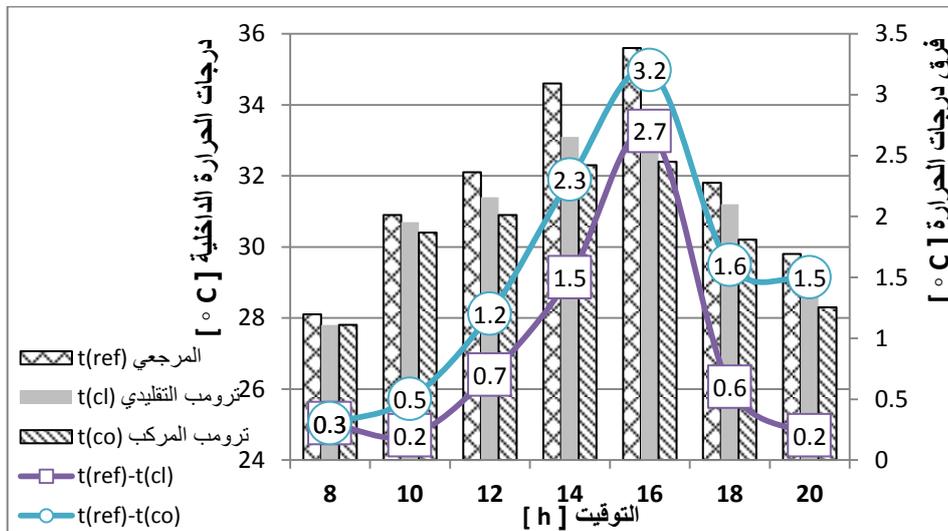
1. نتائج التجارب التي أجريت في فصل الصيف:

أجرينا العديد من التجارب الاختبارية خلال صيفي 2017 و 2018 بهدف تقييم الأداء الحراري للنماذج المختبرة في ظل الظروف المناخية لمدينة اللاذقية، وتمّ قياس درجات الحرارة المثوية للوسط الداخلي في النماذج الثلاثة (النموذج المرجعي، النموذج ذو ترومب التقليدي والنموذج ذو ترومب المركب) وأيضاً للوسط الخارجي في الظل والشمس، وذلك لمدة 12 ساعة في كلّ تجربة بمعدّل قراءة كل ساعتين، بدءاً منذ الساعة الثامنة صباحاً حتى الثامنة ليلاً. وأظهرت النتائج فعالية نظام جدار ترومب بنوعيه التقليدي والمركب صيفياً بالمقارنة مع النموذج المرجعي، ويوضح الشكلان (6) و(7) تغييرات درجات الحرارة الداخلية للنماذج الثلاثة المختبرة في يومي 21/7/2018 و 11/8/2018 على الترتيب،

وتغيرات الفوارق في درجات الحرارة بين النموذج المرجعي وبين كل من النموذجين (ذي جدار ترومب المركب والتقليدي) في يومي إجراء التجريبتين.



الشكل (6) تغيرات درجات الحرارة الداخلية للنماذج الثلاثة، وتغيرات فرق درجات الحرارة بين النموذج المرجعي وكل من نمودجي ترومب التقليدي والمركب في يوم 21/7/2018



الشكل (7) تغيرات درجات الحرارة الداخلية للنماذج الثلاثة، وتغيرات فرق درجات الحرارة بين النموذج المرجعي وكل من نمودجي ترومب التقليدي والمركب في يوم 11/8/2018

نلاحظ من الشكلين (6) و(7) انخفاض درجة الحرارة الداخلية للنماذج المزودة بجداري ترومب المركب والتقليدي خلال معظم ساعات النهار بالمقارنة مع درجة حرارة النموذج المرجعي، وذلك لأن كلا النموذجين المذكورين يستفيدان من ظاهرة المدخنة الحرارية (المتشكلة بين الجدار الخازن للحرارة والزجاج في النموذج التقليدي، وبين الجدارين العازل والخازن للحرارة في النموذج المركب) التي تعمل على تحفيز سحب هواء الغرفة من الفتحة السفلية للجدار باتجاه الفتحة

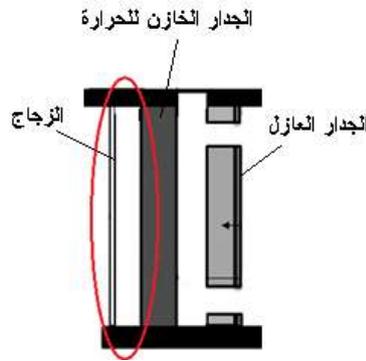
السقفة وطرحه إلى الخارج، بينما يفترق النموذج المرجعي إلى وجود مثل هذه التقنية. ومن جهة أخرى نلاحظ أنّ النموذج التجريبي المزود بجدار ترومب المركب قد أبدى أداءً حرارياً أفضل من نظيره المزود بجدار ترومب التقليدي، فقد بلغت أعلى قيمة لفرق درجات الحرارة بين النموذج المرجعي ونموذج ترومب المركب ($t_{ref} - t_{co}$) في يوم 21/7 عند الساعة الرابعة بعد الظهر مقدار $[3.3 \text{ } ^\circ\text{C}]$ ، بينما بلغت أعلى قيمة لفرق درجات الحرارة بين النموذج المرجعي ونموذج جدار ترومب التقليدي ($t_{ref} - t_{cl}$) وعند الساعة الثانية ظهراً $[1.2 \text{ } ^\circ\text{C}]$. وفي يوم 11/8 بلغت أعلى قيمة لهذا الفرق في جدار ترومب المركب مقدار $[3.2 \text{ } ^\circ\text{C}]$ ، بينما بلغت أعلى قيمة لفرق درجات الحرارة في النموذج التقليدي مقدار $[2.7 \text{ } ^\circ\text{C}]$. واستمرّ النموذج ذو جدار ترومب المركب يبدي أداءً حرارياً أفضل من النموذجين (المرجعي والمزود بجدار ترومب التقليدي) حتى الساعة الثامنة مساءً.

1.1. دراسة تأثير سماكة الفجوة المغلقة بين الزجاج والجدار الخازن للحرارة في جدار ترومب المركب:

قمنا من أجل دراسة تأثير سماكة الفجوة المغلقة بين الزجاج والجدار الخازن للحرارة في جدار ترومب المركب (التي يظهرها الشكل (8)) على الأداء الحراري للنموذج التجريبي المزود بهذا الجدار، بتغيير السماكة ثلاث مرات بحيث كانت القيم المختبرة هي $[2, 3, 4 \text{ cm}]$ وذلك من خلال ثلاث تجارب كانت في الأيام الآتية:

- يوم 21/7/2018 الموافق للسماكة $[2 \text{ cm}]$.
- يوم 21/8/2018 الموافق للسماكة $[3 \text{ cm}]$.
- يوم 30/8/2017 الموافق للسماكة $[4 \text{ cm}]$.

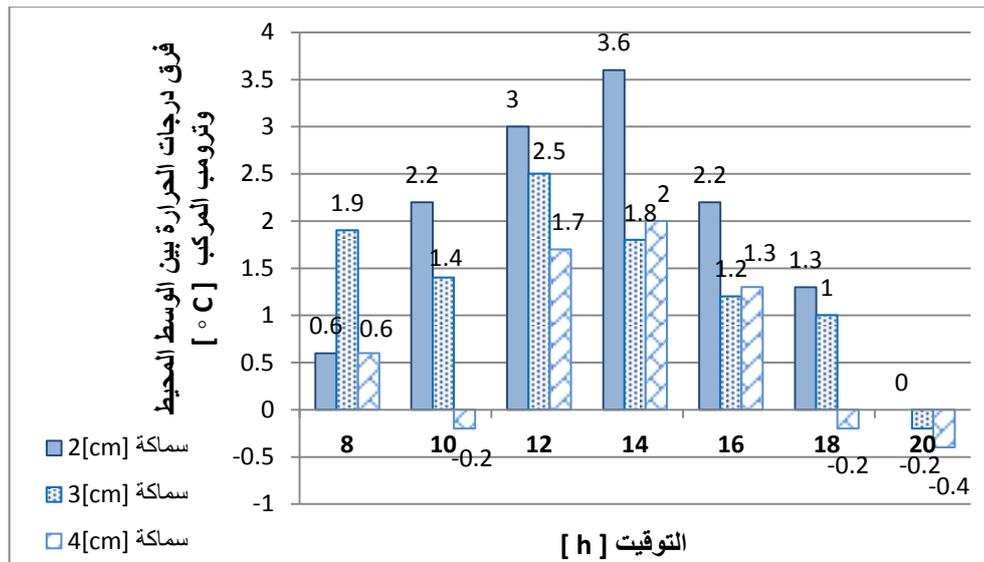
وكانت الشروط في التجارب السابقة متماثلة، من حيث سماكة الفجوة الهوائية بين الجدار الخازن للحرارة والجدار العازل والتي كانت $[4 \text{ cm}]$.



الشكل (8) مخطط تمثيلي لجدار ترومب المركب يظهر الفجوة المغلقة بين الزجاج وبين الجدار الخازن للحرارة

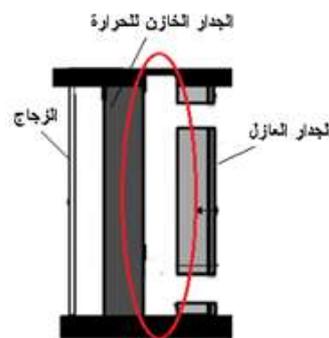
يظهر الشكل (9) تغيرات الفوارق في درجات الحرارة بين الوسط المحيط والوسط الداخلي للنموذج ذي جدار ترومب المركب ($t_{amb} - t_{co}$) من أجل ثلاث سماكات مختلفة للفجوة المغلقة بين الزجاج وبين الجدار الخازن للحرارة. وقد وجدنا أن أكبر فرق في درجات الحرارة بين الوسط المحيط والوسط الداخلي للنموذج كان من أجل سماكة للفجوة المغلقة بين الجدار الخازن للحرارة والزجاج قدرها $[2 \text{ cm}]$ ، حيث بلغ الفرق مقدار $[3.6 \text{ } ^\circ\text{C}]$ عند الساعة الثانية بعد الظهر وعند نفس التوقيت ومن أجل سماكة قدرها $[3 \text{ cm}]$ كان الفرق في درجات الحرارة قدره $[1.8 \text{ } ^\circ\text{C}]$ ، بينما كان الفرق يبلغ $[2 \text{ } ^\circ\text{C}]$ من أجل سماكة قدرها $[4 \text{ cm}]$. وبقي هذا الفرق في درجات الحرارة من أجل السماكة $[2 \text{ cm}]$ هو الأكبر من أجل أغلب ساعات النهار، وبالتالي السماكة $[2 \text{ cm}]$ هي الأفضل للحصول على أداء حراري جيد للنموذج

ذي جدار ترومب المركب. يمكن تفسير ذلك بأنه بقدر ما تكون سماكة الفجوة الهوائية المغلقة بين الزجاج والجدار الخازن للحرارة قليلة فإن نظام انتقال الحرارة ضمن الفجوة يكون أقرب إلى التوصيل الحراري منه إلى الحمل الحراري. يساعد ذلك على زيادة تسخين الجدار الخازن للحرارة والذي بدوره سيساعد على تسخين الهواء في الفجوة الهوائية بين الجدار الخازن والجدار العازل، التي تشكل مدخنة حرارية تطرح الهواء الساخن إلى الخارج عبر الفتحة السقفية محرضة سحب المزيد من الهواء من الوسط الداخلي للنموذج في النهار، والذي بدوره سيساعد على تخفيض درجة الحرارة الداخلية.



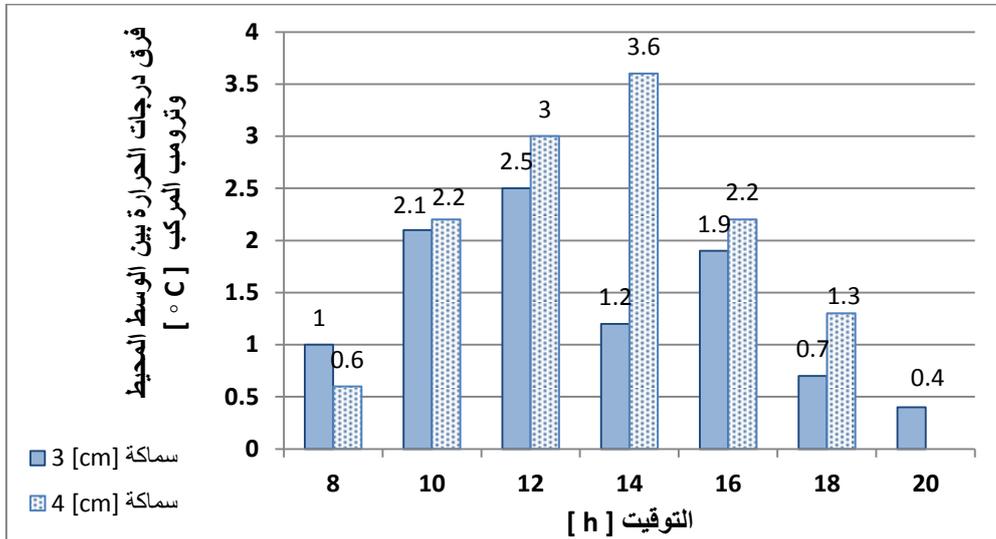
الشكل (9) تغيرات الفوارق في درجات الحرارة (للوسط المحيط والوسط الداخلي للنموذج ذي جدار ترومب المركب) من أجل ثلاث سماكات مختلفة للفجوة المغلقة بين الزجاج وبين الجدار الخازن للحرارة

2.1. دراسة تأثير سماكة الفجوة الهوائية بين الجدار العازل والجدار الخازن للحرارة في جدار ترومب المركب:
 قمنا من أجل بيان تأثير تغيير سماكة الفجوة الهوائية بين الجدار العازل والجدار الخازن للحرارة على الأداء الحراري للنموذج المدروس (الموضحة بالشكل (10))، بالمقارنة بين نتائج تجربتين إحداهما يوم 21/7/2018 وكانت السماكة فيها 4 [cm]، والأخرى هي التجربة المنجزة يوم 1/9/2018 وكانت فيها السماكة بمقدار 3 [cm]. وكانت الشروط في كلتا التجربتين متماثلة، من حيث سماكة الفجوة المغلقة بين الجدار الخازن للحرارة والزجاج والتي كانت 2 [cm].



الشكل (10) مخطط تمثيلي لجدار ترومب المركب يظهر الفجوة الهوائية بين الجدار العازل وبين الجدار الخازن للحرارة

ويظهر الشكل (11) نتائج المقارنة بين التجريبتين المذكورتين من خلال عرض الفرق في درجات الحرارة للوسط المحيط ودرجة الحرارة الداخلية ضمن النموذج المدروس في الحالتين (من أجل سماكة للفجوة الهوائية بين الجدار العازل وبين الجدار الخازن للحرارة قدرها $4 [cm]$ وسماكة أخرى قدرها $3 [cm]$). نلاحظ انخفاض الأداء الحراري للنموذج المركب بعد تقليل سماكة الفجوة الهوائية من $4 [cm]$ إلى $3 [cm]$ في معظم ساعات النهار مع ثبات قيمة الفجوة المغلقة بين الزجاج والجدار الخازن للحرارة على قيمة $2 [cm]$. حيث بلغ أكبر فرق لدرجات الحرارة ($t_{amb} - t_{co}$) من أجل السماكة $4 [cm]$ قيمة $3.6 [^{\circ}C]$ عند الساعة الثانية بعد الظهر، بينما كان هذا الفرق من أجل السماكة $3 [cm]$ وعند التوقيت نفسه $1.2 [^{\circ}C]$. يعود ذلك إلى أن استخدام جدار ترومب في تأمين الراحة الحرارية صيفاً يعتمد على مبدأ تحفيز التهوية، بالتالي فإنه بزيادة سماكة الفراغ الهوائي بين الجدار الخازن والجدار العازل حتى حد معين يزداد حجم التدفق الهوائي الساخن عبر المدخنة الحرارية باتجاه الوسط المحيط، مما يساعد على زيادة سحب الهواء المتجدد إلى الغرفة [8].



الشكل (11) تغيرات الفوارق في درجات الحرارة بين الوسط المحيط والوسط الداخلي للنموذج ذي جدار ترومب المركب من أجل سماكتين مختلفتين للفجوة الهوائية بين الجدار الخازن للحرارة وبين الجدار العازل

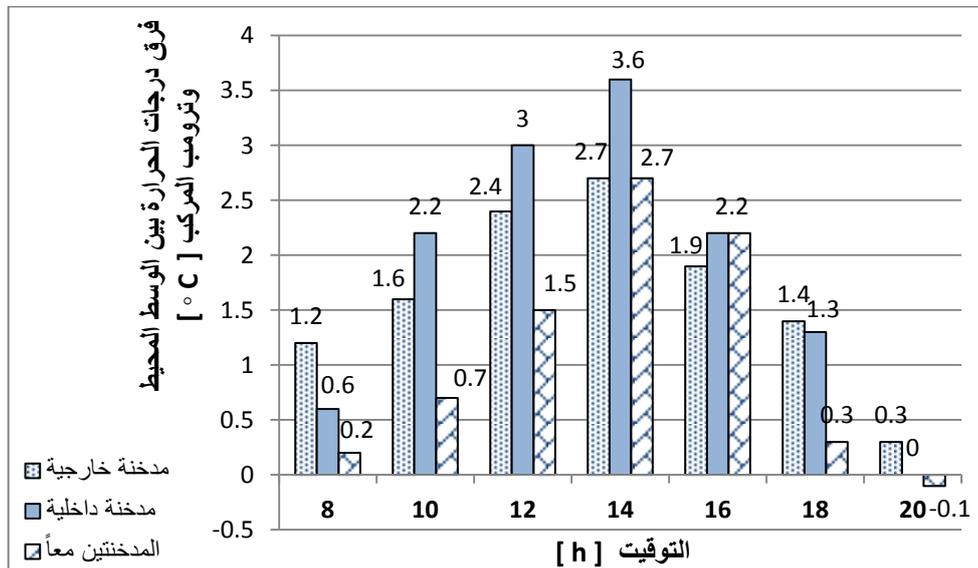
3.1. دراسة تأثير فتح أو إغلاق المداخل الحرارية:

ذكرنا سابقاً أن النموذج التجريبي المزود بجدار ترومب المركب يحتوي على فجوتين هوائيتين فيه، إحداها خارجية غير مهواة (مغلقة) تقع بين الزجاج وبين الجدار الخازن بينما تقع الفجوة الأخرى الداخلية بين الجدارين الخازن والعازل (كما تظهر الأشكال (8) و (10)). وكما ذكرنا أيضاً أن الفجوة الداخلية المهواة تلعب دور المدخنة الحرارية ضمن النموذج، حيث تم تزويدها بفتحة علوية أبعادها $4 \times 15 [cm]$ لتصريف الهواء الساخن إلى الوسط المحيط وفتحة سفلية للتزود بالهواء الأقل سخونة. قمنا أيضاً بفتح الفجوة الخارجية المغلقة ودراسة إمكانية استخدامها كمدخنة حرارية بإحداث فتحة علوية في أعلى تلك الفجوة وفتحة سفلية بنفس أبعاد فتحات الفجوة الهوائية المهواة.

يظهر الشكل (12) المقارنة بين نتائج ثلاث تجارب تم فيها استخدام إما الفجوة الهوائية الداخلية فقط كمدخنة حرارية أو الفجوة الخارجية فقط أو الاثنين معاً، وذلك من خلال عرض الفرق في درجات الحرارة للوسط المحيط ودرجة الحرارة

الداخلية ضمن النموذج المدروس في الحالات الثلاث، بغية دراسة تأثير فتح أو إغلاق تلك الفجوات على الأداء الحراري للنموذج المزود بجدار ترومب المركب.

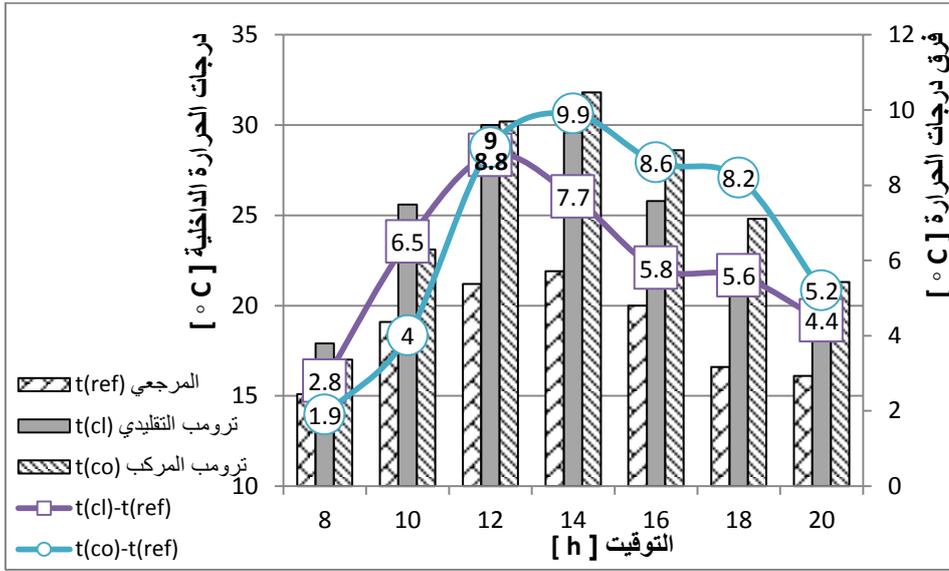
- التجربة المنجزة يوم 21/7/2018 في حالة استخدام الفجوة الهوائية الداخلية فقط كمدخنة حرارية.
 - التجربة المنجزة يوم 3/8/2018 في حالة استخدام الفجوتين الهوائيتين (الداخلية والخارجية) كمدخنين حراريين تعملان مع بعضهما في الوقت نفسه.
 - التجربة المنجزة يوم 4/8/2018 في حالة استخدام الفجوة الهوائية الخارجية فقط كمدخنة حرارية.
- وتميزت التجارب الثلاثة السابقة بالتماثل في البارامترات الأخرى فكانت سماكة الفجوة المغلقة الخارجية بمقدار $2 [cm]$ ، بينما كانت قيمة الفجوة الداخلية بمقدار $4 [cm]$ في كل التجارب، كما كانت درجات الحرارة الخارجية متقاربة. ونلاحظ من الشكل (12) أن استخدام المدخنة الحرارية الداخلية الموافقة للفجوة الهوائية بين الجدارين العازل والخازن للحرارة كان هو الأفضل حرارياً في الحصول على فرق درجات حرارة $(t_{amb} - t_{co})$ أكبر في معظم ساعات التجربة (خاصةً ساعات الذروة) وبالتالي تأمين راحة حرارية أفضل ضمن النموذج المدروس، حيث بلغ أكبر فرق في درجات الحرارة مقدراً قدره $3.6 [^{\circ}C]$ عند الساعة الثانية بعد الظهر، بينما كان $2.7 [^{\circ}C]$ في حالتي استخدام المدخنة الخارجية فقط واستخدام المدخنتين الداخلية والخارجية معاً وعند التوقيت نفسه. ويعود سبب أفضلية عمل الفجوة الهوائية الداخلية فقط كمدخنة حرارية، لأنها على تماس مباشر مع غرفة الاختبار بالتالي يتم سحب الحرارة من الداخل بواسطة دارة المدخنة الحرارية، علاوة على وجود الجدار العازل الذي يحول دون وصول الحرارة المختزنة في الجدار الخازن للحرارة إلى الغرفة وخاصة في أوقات بعد الظهر.



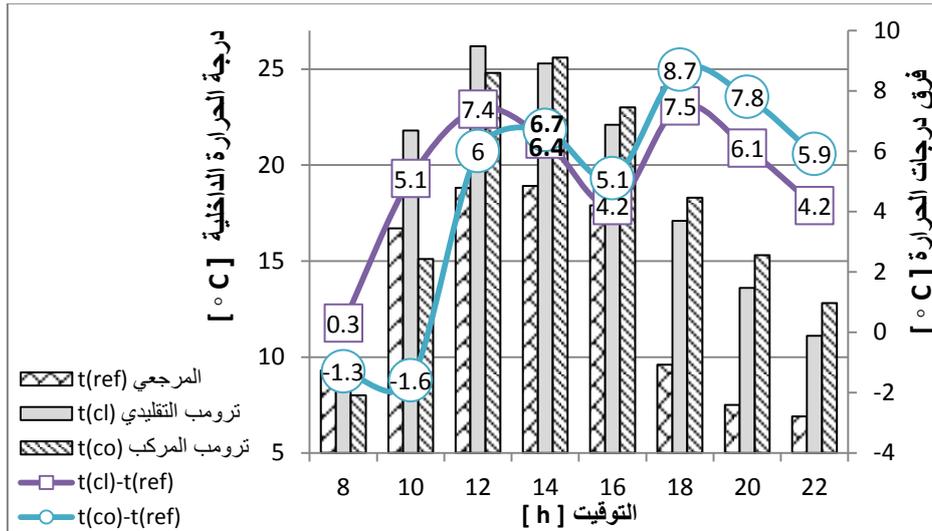
الشكل (12) تغيرات الفوارق في درجات الحرارة للوسط المحيط والوسط الداخلي للنموذج ذي جدار ترومب المركب من أجل ثلاث حالات مختلفة (استخدام المدخنة الحرارية الداخلية فقط ، استخدام المدخنة الحرارية فقط، استخدام المدخنتين الحراريين الداخلية والخارجية)

2. نتائج التجارب التي أجريت في فصل الشتاء:

أجرينا العديد من التجارب الاختبارية خلال فصلي الشتاء لعامي 2018 و 2019 بعد أن تم إحكام إغلاق فتحات المداخل الحرارية السقفية والجانبية التي صممت لغرض التكييف صيفاً. وأيضاً تم قياس درجات الحرارة المئوية للوسط الداخلي في النماذج الثلاثة وللوسط الخارجي في الظل والشمس بمعدل قراءة كل ساعتين في كل تجربة، بدءاً منذ الساعة الثامنة صباحاً. ويوضح الشكلان (13) و(14) تغيرات درجات الحرارة الداخلية للنماذج الثلاثة المختبرة في يومي 16/3/2018 و 18/1/2019 على الترتيب، وتغيرات الفوارق في درجات الحرارة بين كل من النموذجين (ذي جدار ترومب المركب والتقليدي) وبين النموذج المرجعي في يومي إجراء التجريبتين.



الشكل (13) تغيرات درجات الحرارة الداخلية للنماذج الثلاثة، وتغيرات فرق درجات الحرارة بين النموذج المرجعي وكل من نمودجي ترومب التقليدي والمركب في يوم 16/3/2018



الشكل (14) تغيرات درجات الحرارة الداخلية للنماذج الثلاثة، وتغيرات فرق درجات الحرارة بين النموذج المرجعي وكل من نمودجي ترومب التقليدي والمركب في يوم 18/1/2019

أظهرت النتائج أنّ الأداء الحراري لنموذجي ترومب التقليدي والمركب كان أفضل من النموذج المرجعي في كافة ساعات النهار وذلك على اعتبارهما وسيلتان من وسائل التدفئة الشمسية السلبية. ونلاحظ من الشكلين (13) و(14) أنّ درجات الحرارة داخل النموذجين المزودين بجداري ترومب المركب والتقليدي كانت أعلى من نظيرتها في النموذج المرجعي، حيث أنّ النموذج التجريبي ذو جدار ترومب التقليدي قد سجّل أعلى فرق لدرجات الحرارة مع النموذج المرجعي $(t_{cl} - t_{ref})$ بقيمة $8.8 [^{\circ}\text{C}]$ عند الساعة الثانية عشرة ظهراً في يوم 16/3/2018، بينما بلغ أعلى فرق لدرجات الحرارة بين النموذج ذو جدار ترومب المركب وبين النموذج المرجعي $(t_{co} - t_{ref})$ في نفس اليوم قيمة $9.9 [^{\circ}\text{C}]$ عند الساعة الثانية بعد الظهر. أما في يوم 18/1/2019 فقد كان أعلى فرق لدرجات الحرارة $(t_{cl} - t_{ref})$ بقيمة $7.5 [^{\circ}\text{C}]$ ، بينما سجّل النموذج المركب أعلى قيمة للفرق $(t_{co} - t_{ref})$ بمقدار $8.7 [^{\circ}\text{C}]$ عند نفس الساعة. كما لاحظنا أنّ نموذج ترومب المركب قد أبدى أداءً حراريًا أفضل من نظيره التقليدي ابتداءً من ساعات الظهيرة وحتى ساعات الليل بينما كان النموذج التقليدي أفضل صباحاً، ويعود ذلك إلى أنّه عند ساعات الصباح الأولى يتم الكسب الحراري المباشر لكلا النموذجين بواسطة الإشعاع الشمسي الذي ينفذ عبر الزجاج والذي يعمل على تسخين الهواء في الفجوات الداخلية لكلا النموذجين، لكنّ دارة الحمل الحرّ للهواء والمتشكّلة ضمن الفجوة الهوائية في نموذج ترومب التقليدي عبر فتحتي التهوية العلوية والسفلية تبدأ مباشرة بعملية تدفئة الحيز الداخلي للنموذج، وبنفس الوقت يبدأ الجدار الخازن بتخزين الحرارة الممتصة ليعبثها لاحقاً إلى داخل الحيز الداخلي بعد غياب الشمس والتي لا تستمر لفترة طويلة. بينما يتأخر تسخين الهواء الداخلي ضمن النموذج المزود بجدار ترومب المركب، لأنّ الإشعاع الشمسي الذي ينفذ عبر الزجاج يسخّن الهواء الموجود في الفجوة المغلقة أولاً ومن ثم يبدأ بتسخين الجدار الخازن للحرارة والذي يقوم خلال ساعات الصباح بمرحلة تخزين الحرارة فقط، وعند ساعات بعد الظهيرة وبعد أن يكون الجدار قد أشبع بالحرارة يبدأ التدفق الحراري عبر سطحه الداخلي إلى الفجوة الهوائية الداخلية ومنها إلى الحيز الداخلي للنموذج، وعندها تبدأ عملية التدفئة بينما يستمرّ الجدار الخازن بكسب الحرارة وتخزينها، وبعد غياب الشمس تستمر عملية تسخين الهواء ضمن الفجوة الداخلية وبالتالي ضمن الحيز الداخلي لفترة أطول منها في النموذج التقليدي بسبب وجود الجدار العازل وهذا له أهميته الكبيرة في التدفئة التي تكون في أكثر الأحيان في فترات بعد الظهر والمساء.

1.2. دراسة تأثير سماكة الفجوة المغلقة بين الزجاج والجدار الخازن للحرارة:

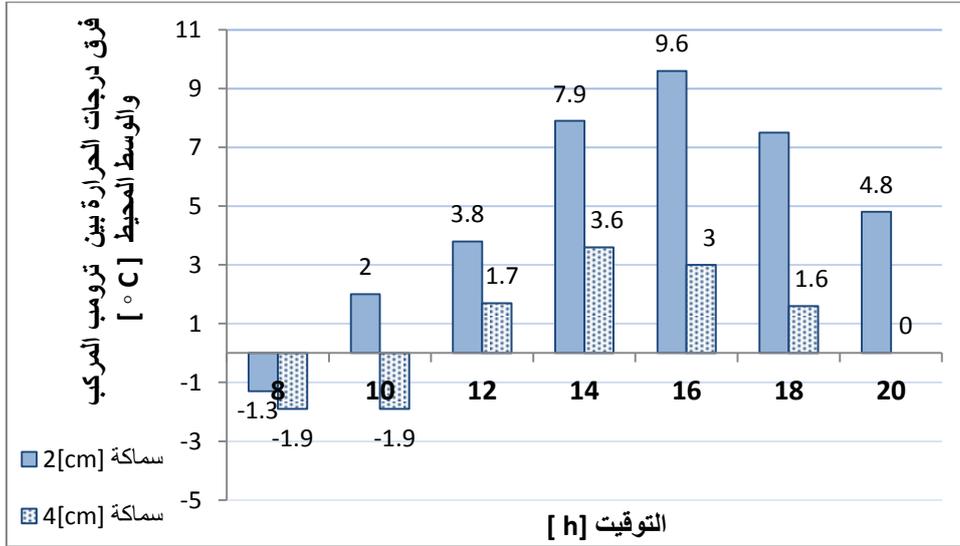
قمنا من أجل دراسة تأثير سماكة الفجوة المغلقة بين الزجاج والجدار الخازن للحرارة في جدار ترومب المركب الموضحة في الشكل (8) على الأداء الحراري للنموذج المزود بهذا الجدار شتاءً، باختبار قيمتين لهذه السماكة بناءً على نتائج التجارب الصيفية هما $[cm] (2,4)$ ، وذلك من خلال التجارب التي قمنا بها في الأيام الآتية:

- التجربة المنجزة يوم 15/3/2018 الموافق للسماكة $2 [cm]$
- التجربة المنجزة يوم 2/1/2018 الموافق للسماكة $4 [cm]$

وقد كانت الشروط التي أجريت فيها التجارب نفسها فكانت سماكة الفجوة الهوائية بين الجدارين العازل والخازن مقدرة بقيمة $4 [cm]$ وكانت الظروف المناخية بما فيها درجات حرارة الوسط المحيط متقاربة.

ويظهر الشكل (15) تغيرات فروقات درجات الحرارة بين الوسط الداخلي للنموذج ذي جدار ترومب المركب والوسط المحيط $(t_{co} - t_{amb})$ من أجل سماكتين مختلفتين للفجوة المغلقة بين الزجاج وبين الجدار الخازن للحرارة. حيث أنّ أكبر فرق لدرجات الحرارة بين الهواء داخل النموذج ذي جدار ترومب المركب وبين الوسط المحيط كان من أجل سماكة للفجوة المغلقة بين الجدار الخازن للحرارة والزجاج قدرها $2 [cm]$ ، حيث بلغ هذا الفرق مقدار $9.6 [^{\circ}\text{C}]$ عند الساعة الرابعة

بعد الظهر، أما من أجل سماكة قدرها [cm] 4 فقد كان الفرق قدره [°C] 3. وبقي هذا الفرق في درجات الحرارة من أجل السماكة [cm] 2 هو الأكبر عند مختلف ساعات النهار، بالتالي فإن هذه السماكة كانت هي الأفضل للحصول على أداء حراري جيد للنموذج ذي جدار ترومب المركب. يمكن تفسير ذلك بأنه كما ذكرنا في نتائج الصيف فإن نظام انتقال الحرارة ضمن الفجوة المغلقة يجب أن يكون أقرب إلى التوصيل الحراري مما يساعد على زيادة تسخين الجدار الخازن للحرارة بالتالي سيساعد على تسخين الهواء في الفجوة الهوائية بين الجدار الخازن والجدار العازل.



الشكل (15) تغيرات فوارق درجات الحرارة بين الهواء داخل النموذج ذي جدار ترومب المركب وبين الوسط المحيط من أجل سماكتين مختلفتين للفجوة المغلقة بين الزجاج والجدار الخازن للحرارة

2.2. دراسة تأثير سماكة الفجوة الهوائية بين الجدار الخازن للحرارة والجدار العازل:

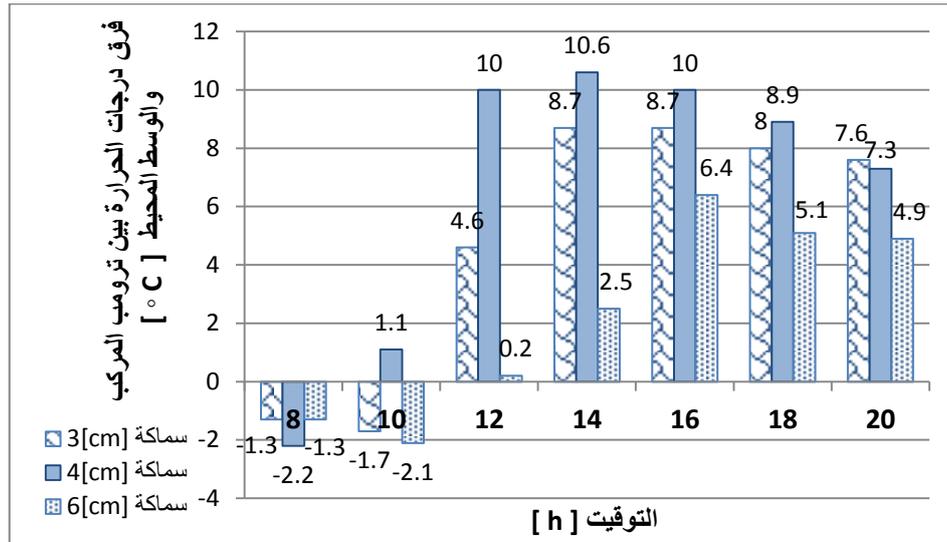
قمنا من أجل بيان تأثير تغيير سماكة الفجوة الهوائية بين الجدار الخازن للحرارة والجدار العازل المبيّنة بالشكل (10) على الأداء الحراري في التدفئة للنموذج التجريبي ذي جدار ترومب المركب باختبار ثلاث قيم لهذه السماكة هي [cm] (3,4,6)، وذلك من خلال التجارب التي قمنا بها في الأيام الآتية:

- التجربة المنجزة يوم 2/2/2019 الموافق للسماكة 3 [cm]
- التجربة المنجزة يوم 18/1/2019 الموافق للسماكة 4 [cm].
- التجربة المنجزة يوم 21/1/2019 الموافق للسماكة 6 [cm]

وأيضاً كانت الشروط في التجارب الثلاث متماثلة من حيث سماكة الفجوة المغلقة بين الزجاج والجدار الخازن للحرارة والتي كانت بمقدار [cm] 2، ومن ناحية الظروف المناخية بما فيها درجات الحرارة التي كانت متقاربة.

ويظهر الشكل (16) تغيرات فروقات درجات الحرارة بين الوسط الداخلي للنموذج ذي جدار ترومب المركب والوسط المحيط $(t_{co} - t_{amb})$ من أجل السماكات الثلاثة المختبرة للفجوة الهوائية بين الجدارين الخازن للحرارة والعازل. ونلاحظ أن أكبر قيمة لفرق درجات الحرارة في معظم ساعات النهار كانت من أجل سماكة للفجوة الهوائية بين الجدارين الخازن للحرارة والعازل قدرها [cm] 4، حيث بلغ هذا الفرق مقدار [°C] 10.6 عند الساعة الثانية بعد الظهر، وبلغ الفرق قيمة [°C] 10 عند الساعة الثانية عشرة ظهراً والرابعة بعد الظهر. أما من أجل سماكة قدرها [cm] 3 فقد بلغت

أعلى قيمة لهذا الفرق عند الساعة الثانية بعد الظهر قيمة قدرها $8.7[^\circ\text{C}]$. ومن أجل سماكة قدرها 6 [cm] كانت أكبر قيمة لهذا الفرق عند الساعة الرابعة بعد الظهر وكانت قيمتها $6.4[^\circ\text{C}]$. بالمحصلة وبما أن الفرق في درجات الحرارة من أجل السماكة 4 [cm] كان هو الأكبر عند مختلف ساعات النهار، بالتالي نستنتج أن تلك السماكة للفجوة الهوائية بين الجدارين الخازن والعازل هي الأفضل للحصول على أداء جيّد للجدار المركب، حيث أنّ هذه الفجوة الهوائية يجب أن تسمح بحدوث دارة الحمل الحراري الحرّ المسؤول عن التدفئة، لكن يجب ألا تزيد عن حدّ معين لأن ذلك سيّب انخفاض في معدّل تدفق الهواء ضمن الفجوة بسبب زيادة مقاومة التدفق. [9]



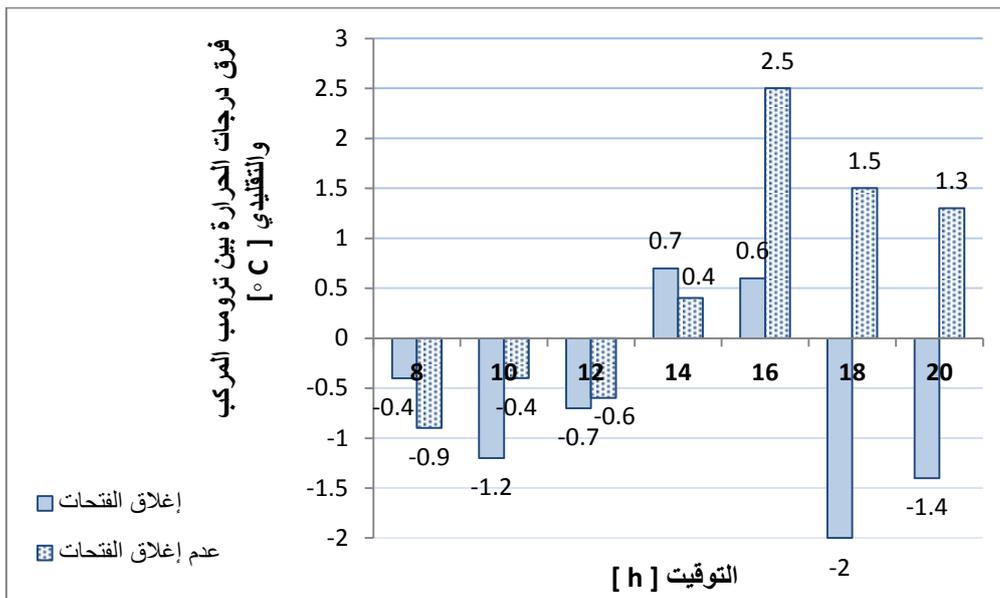
الشكل (16): تغيرات فوارق درجات الحرارة بين الهواء داخل النموذج ذي جدار ترومب المركب وبين الوسط المحيط من أجل ثلاث سماكات مختلفة للفجوة الهوائية بين الجدارين الخازن للحرارة والعازل

3.2. دراسة تأثير فتح أو إغلاق فتحات التهوية العلوية والسفلية المتوضعة على الجدار العازل في جدار ترومب المركب بعد غياب الشمس على درجة حرارة الغرفة (دراسة مدة إشعاع جدار ترومب المركب): سيتم تقييم تأثير إغلاق الفتحات وفتحها بعد غياب الشمس مباشرةً على درجة الحرارة الداخلية لنموذج ترومب المركب التجريبي من خلال التجريبتين التاليتين اللتين تم انجازهما وفق شروط متماثلة من حيث قيم البارامترات الأخرى حيث كانت سماكة الفجوة المغلقة بين الزجاج والجدار الخازن في التجريبتين مقدرة بقيمة 2 [cm] ، أما سماكة الفجوة الهوائية بين الجدارين العازل والخازن فكانت بقيمة 4 [cm] .

- التجربة المنجزة يوم 3/3/2018 وقد تمّ فيها إغلاق فتحات التهوية عند الساعة الخامسة بعد الظهر.
- التجربة المنجزة يوم 15/3/2018 حيث لم يتمّ إغلاق فتحات التهوية .

ويظهر الشكل (17) تغيرات فروقات درجات الحرارة بين النموذج ذي جدار ترومب المركب والنموذج ذي جدار ترومب التقليدي ($t_{co} - t_{cl}$) في يومي إجراء التجريبتين. ونلاحظ أنّ النموذج التجريبي ذي جدار ترومب المركب قد أبدى أداءً حرارياً أفضل من نظيره التقليدي في ساعات المساء عند عدم إغلاق فتحات التهوية العلوية والسفلية في الجدار العازل بعد غياب الشمس، حيث بلغ أعلى فرق لدرجات الحرارة بين النموذجين عند الساعة الرابعة بعد الظهر قيمة قدرها $2.5\text{ [}^\circ\text{C]}$ ، ولاحظنا أنّ هذا الفرق استمرّ لصالح النموذج المركب حتى ساعات الليل، فعند قياس درجة حرارة

الوسط الداخلي للتموجين المزودين بجداري ترومب التقليدي والمركب عند الساعة العاشرة والنصف ليلاً في يوم 15/3/2018 كانت قيمة الفرق بينهما $(t_{co} - t_{ci})$ بمقدار $1.2 [^{\circ}C]$ ، أي أنّ مدّة الإشعاع الحراري للجدار الخازن في جدار ترومب المركب قد استمرت حتى ساعات الليل وتمت الاستفادة منها في تدفئة الهواء ضمن النموذج المركب بالمقارنة مع النموذج التقليدي. ويعود ذلك إلى أنّ إغلاق فتحات التهوية المتوضّعة على جدار ترومب المركب بعد غياب الشمس مباشرة يحول دون وصول الحرارة المختزنة نهاراً ضمن الجدار الخازن إلى الحيز الداخلي وخاصة بوجود الجدار العازل، مما يسبّب انخفاض درجات الحرارة بعد إغلاق الفتحات مباشرة. بينما في النموذج ذي جدار ترومب التقليدي حيث يجب إغلاق الفتحات لتقليل الضياع الحراري العكسي وللحفاظ على حرارة الوسط الداخلي أطول فترة ممكنة، يتم الاستفادة من الحرارة المنبعثة من الجدار الخازن والمتلامس مع الحيز الداخلي بعد غياب الشمس. وللاستفادة من هذه الحرارة المختزنة في جدار ترومب المركب يجب عدم إغلاق فتحات التهوية مباشرة بعد غياب الشمس. أمّا ليلاً (في الساعات المتأخرة) فإنّ وجود الجدار العازل المتاخم للوسط الداخلي في النموذج ذي جدار ترومب المركب يقلّل من انخفاض درجة الحرارة الداخلية للهواء ضمنه والذي يحدث بسبب الدارة الحرارية العكسية الحاصلة التي تظهر عندما يصبح الجدار الخازن أبرد من الهواء الموجود في الحيز الداخلي، وبالتالي فإنّ الضياع الحراري من الوسط الداخلي الدافئ باتجاه الفجوة ذي درجة الحرارة الأخفض يكون أقلّ. من هنا تبرز أهمية النموذج ذي جدار ترومب المركب بالمقارنة مع التقليدي في التدفئة لأن الهدف المحافظة على حرارة الوسط الداخلي أطول فترة ممكنة.



الشكل (17) تغيرات فوارق درجات الحرارة بين الوسط الداخلي لترومب المركب وترومب التقليدي عند إغلاق فتحات التهوية للمركب بعد غياب الشمس وعند عدم إغلاقها.

الاستنتاجات والتوصيات:

بعد إجراء الدراسة التجريبية في ظلّ شروط مناخية متقاربة على ثلاثة نماذج متماثلة في الحجم أحدها يمثل غرفة اختبار مرجعية تحاكي منزلاً عادياً معزولاً، والنموذج الثاني واجهته الجنوبية مصمّمة بحيث تحاكي جدار ترومب التقليدي، بينما صُمّمت الواجهة الجنوبية للنموذج الأخير لتحاكي جدار ترومب المركب. وبعد تقييم أداء النماذج الحراري خلال فصلي الصيف والشتاء في مدينة اللاذقية وصلنا إلى ما يلي:

1- كان الأداء الحراري للنماذج التجريبية المزودة بجداري ترومب الخازنين للحرارة (التقليدي والمركب) أفضل من النموذج المرجعي خلال فصل الصيف، وخاصة النموذج ذو ترومب المركب، حيث بلغ فرق درجات الحرارة بين النموذج المرجعي والنموذج ذو ترومب المركب في يوم 11/8/2018 حوالي $[3.2^{\circ}\text{C}]$ عند الساعة الرابعة بعد الظهر، بينما بلغت قيمة الفرق في درجات الحرارة بين النموذج المرجعي والنموذج ذو ترومب التقليدي في نفس الوقت قيمة $[2.7^{\circ}\text{C}]$ ، وذلك بسبب إمكانية الاستفادة من ظاهرة المدخنة الحرارية وتحفيز دخول الهواء المتجدد إلى داخل غرفة الاختبار.

2- تمت دراسة تأثير بعض البارامترات على أداء جدار ترومب المركب صيفاً، وبيّنت نتائج التجارب أنّ استخدام سماكة بمقدار $[2\text{ cm}]$ للفجوة المغلقة بين الزجاج والجدار الخازن في نموذج ترومب المركب قد حسن من أداء الجدار، بينما كانت القيمة الأفضل لسماكة الفجوة الهوائية بين الجدارين العازل والخازن هي $[4\text{ cm}]$. ووجدنا بعد التجربة أنّ استخدام المدخنة الحرارية الداخلية الموافقة للفجوة الهوائية بين الجدارين العازل والخازن كان الخيار الأفضل لأداء حراري أفضل للنموذج ذو ترومب المركب.

3- بعد تقييم أداء النماذج التجريبية الثلاثة شتاءً وجدنا أيضاً أنّ الأداء الحراري للنموذجين المزودين بجداري ترومب هو الأفضل مقارنة بالنموذج المرجعي على اعتبارهما من وسائل التدفئة الشمسية السلبية. كما بيّنا أفضل أداء النموذج ذو جدار ترومب المركب بدءاً من ساعات الظهيرة حتى ساعات الليل نظراً لأهمية عملية التدفئة في فترات بعد الظهر والمساء. حيث بلغ فرق درجات الحرارة بين الوسط الداخلي لنموذج ترومب المركب والنموذج المرجعي حوالي $[8.7^{\circ}\text{C}]$ عند الساعة السادسة مساءً، وسجل قيمة قدرها $[5.9^{\circ}\text{C}]$ عند الساعة العاشرة ليلاً.

4- بعد دراسة تأثير بعض البارامترات المؤثرة على أداء جدار ترومب المركب وجدنا أنّ أفضل قيمة لسماكة الفجوة المغلقة بين الزجاج والجدار الخازن للحصول على أفضل أداء حراري شتاءً كانت بمقدار $[2\text{ cm}]$ ، وأنّ أفضل قيمة لسماكة الفجوة الهوائية بين الجدار الخازن للحرارة والجدار العازل كانت بمقدار $[4\text{ cm}]$ ، كما في نتائج فصل الصيف. ووجدنا أنّ مدة الإشعاع الحراري لجدار ترومب المركب قد استمرت حتى ساعات الليل لذلك يجب عدم إغلاق فتحات التهوية المتوضعة على الجدار بعد غياب الشمس بغية الاستفادة من الحرارة المختزنة في الجدار الخازن للحرارة وبالتالي استمرار عملية التدفئة ليلاً.

بعد تسليط الضوء على أهمية الجدران الخازنة للحرارة باعتبارها إحدى وسائل التدفئة الشمسية السلبية شتاءً، وكذلك إمكانية الاستفادة منها في عملية التكييف صيفاً، نوصي بمتابعة الدراسة عن أنواع أخرى من الجدران الخازنة للحرارة وإمكانية استخدام مثل هذه الأنواع في مدينة اللاذقية، كما نوصي باستكمال دراسة تأثير بارامترات أخرى من شأنها أن تؤثر على أداء هذه الجدران، كدراسة تأثير الاعتماد على واجهات أخرى بالإضافة إلى الواجهة الجنوبية.

References:

- [1] Dabaieh, M. ; Elbably, A. *Ventilated Trombe wall as a passive solar heating and cooling retrofitting approach; a low-tech design for off-grid settlements in semi-arid climates*. Solar Energy, Vol 122, 2015 , 820-833.
- [2] Jnblat, S. (2017) **Study the parameters influence on the thermal performance of storage wall provided with water tubes**. Mechanical Power Engineering Department, Tishreen University, Lattakia , Syria.
- [3] Rabani, M. ; Kalantar, V. ; Dehghan, A. A.; Faghih, A. K. *Experimental study of the heating performance of a Trombe wall with a new design*. Solar Energy, Vol 118 , 2015, 359–374.
- [4] Koyunbaba, B. K.; Yilmaz, Z. *The comparison of Trombe wall systems with single glass, double glass and PV panels*. Renewable Energy , Vol 45 , 2012,111-118
- [5] Chen, B. ; Chen, H.J. ; Meng, S.R. ; Chen, X.; Sun, P.; Ding, Y.H. *The effect of Trombe wall on indoor humid climate in Dalian, China*. Renewable Energy, Vol 31, 2006, 333–343 .
- [6] Shen, J. ; Lassue, S. ; Zalewski, L. ; Huang, D. *Numerical study on thermal behavior of classical or composite Trombe solar walls*. Energy and Buildings, Vol 39, 2007 , 962–974.
- [7] Stazi, F. ; Mastrucci, A. ; di Perna, C. *Trombe wall management in summer conditions: An experimental study*. Solar Energy, Vol 86 , 2012 , 2839 –2851.
- [8] Rabani, M. ; Kalantar, V. ; Dehghan, A.A. ; Faghih A. K. *Empirical Investigation of the Cooling Performance of a New Designed Trombe Wall in Combination with Solar Chimney and Water Spraying system*. Energy and Buildings, Vol (102), 2015, 45-57.
- [9] Mokheimer, E. M. A. ; Shakeel, M. R. ; Al-Sadah, J. *A novel design of solar chimney for cooling load reduction and other applications in buildings*. Energy and Buildings, Vol. 153 , 15 October 2017, 219-230.
- [10] ZRIKEM, Z.; BILGEN, E. *A simplified design tool for composite Trombe-Michel wall solar collectors* , Solar & Wind Technoloyr, Vol. 5, No. 5, 1988, 517- 523.
- [11] Yin, Z. (2016). **Simulation and Modification of a Composite Trombe Wall to Adapt to the Climate in Victoria, Canada**. Department of Mechanical Engineering, University of Victoria , Canada.
- [12] Saadatian, O. ; Sopian, K.; Lim, C.H.; Asim, N. ; Sulaiman, M.Y. *Trombe walls: A review of opportunities and challenges in research and development* . Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol 16 , 2012, 6340–6351.
- [13] YEDDER, R. B. ; Du, Z.-G.; BILGEN, E. *Numerical study of laminar natural convection composite Trombe Wall systems*. Solar & Wind Technology, Vol. 7, No. 6, 1990, 675-683.
- [14] YEDDER, R. B. ; BILGEN, E. *Natural convection and conduction in Tromb wall systems*. Heat Mass Transfer, Vol. 34, No. 4/5, 1991, 1237-1248.