مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية
المجلد42 العدد (3) – 2026: 337- 352

Damascus University Journal for engineering sciences
Vo 42 number (3) -2026: 337-352

# تحليل الأداء الحراري لجدار ترومب (حالة دراسية لمبنى المعهد العالي للترجمة والترجمة الفورية في دمشق)

**ثناء حسن**[1*]

[1*] مدرسة، دكتورة، مهندسة، قسم هندسة الميكانيك العام، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة دمشق، علم الطاقة والبيئة.
t.hassan@damascusuniversity.sy.edu

**الملخص:**

في ظل ارتفاع أسعار الوقود وعدم توفرها واحتمال نضوبها في المستقبل أصبحت الحاجة ملحة لاعتماد إجراءات معينة في تصميم وإنشاء المبنى من أجل التقليل من استهلاك الطاقة وبالتالي تقليل نسبة الانبعاثات الغازية الناتجة عن حرق الوقود ودون اهمال تحقيق الراحة الحرارية للقاطنين. يعد جدار ترومب (جدار التخزين الحراري) أحد تقنيات التسخين الشمسي الذاتي للمباني والتي تتمتع ببساطة التركيب والكفاءة العالية وبدون كلفة تشغيلية. قمنا في هذا البحث بتحليل الأداء الحراري لجدار ترومب الموجود في مبنى المعهد العالي للترجمة والترجمة الفورية في مدينة دمشق وتقييم التعديلات الممكن إجراؤها على الجدار من أجل تحسين الأداء الحراري له، بالاعتماد على برمجيات عددية متقدمة TRNSYS. بينت النتائج أنه عند تطبيق العزل الحراري للسقف وزيادة مساحة جدار ترومب إلى 70 % من مساحة الجدار الجنوبي ينخفض حمل التدفئة السنوي للمنطقة الحرارية المدروسة بنسبة 94 %. كما قدم البحث مجموعة من التوصيات التي تخص البارامترات التصميمية للجدار وتأثيرها على تخفيض الطاقة المطلوبة للتدفئة.

**الكلمات المفتاحية:** جدار ترومب، محاكاة الأبنية، TRNSYS، الأداء الحراري، التسخين الشمسي الذاتي.

تاريخ الإيداع: 2023/9/29
تاريخ القبول: 2023/12/6

حقوق النشر: جامعة دمشق – سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب CC BY-NC-SA

# Thermal Performance Analysis of Trombe Wall (Case Study of Higher Institute of Translation and Interpreting Building in Damascus)

**Thana Hassan*[1]**

*1. Assistant professor, Dr, General Mechanics Engineering Department, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Damascus university, Energy and Environment.

t.hassan@damascusuniversity.sy .

Received: 29/9/2023
Accepted: 6/12/2023

Copyright: Damascus University- Syria, The authors retain the copyright under a
CC BY- NC-SA

## Abstract:

In light of the increasing fuel prices, their scarcity, and the possibility of their depletion in the future, the need has become urgent to adopt certain measures of designing and constructing buildings in a way that reduces energy consumption and thus decreases the percentage of gas emissions resulting from burning fuel, while ensuring thermal comfort for the residents of those buildings. Among numerous passive technologies, Trombe wall (thermal storage wall) is one of the classical passive solar heating, which has the features of simple construction, high efficiency, and zero operation cost. In this research, the thermal performance of Trombe wall located in the Higher Institute of Translation and Interpreting Building in Damascus was simulated and the possible modifications to the wall were evaluated in order to optimize performance based on advanced simulation packages (TRNSYS). Results showed that when insulating the roof and increasing the area of Trombe wall to 70 % of the southern wall, the heating demand of the studied thermal zone decreases by 94 %. The research also presented a set of recommendations related to wall design parameters and their impact on reducing heating energy.

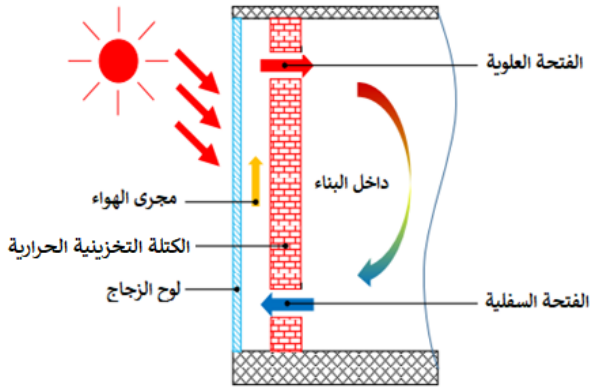
**Key words:** Trombe wall, Building simulation, TRNSYS, Thermal performance, Passive solar heating.

## المقدمة:

يعد قطاع البناء من أكثر القطاعات استهلاكاً للطاقة بنسبة 38 % من اجمالي استهلاك الطاقة في العالم (خضور 2020) و (WBG, 2017). تستهلك أنظمة التدفئة والتهوية وتكييف الهواء (HVAC) 33–55 % من امدادات الطاقة في الأبنية من أجل الحفاظ على بيئة داخلية مريحة (Tian, 2019)، لذلك فإن تقليل استهلاك طاقة التدفئة والتكييف هو دائماً محور اهتمام للحفاظ على الطاقة في المباني. وأحد أفضل الطرق لتحقيق هذا الهدف هو استخدام نظام التسخين الشمسي الذاتي الذي يعتمد على التصميم المعماري للبناء ذاته دون استخدام أجهزة ميكانيكية أو كهربائية. يعد جدار ترومب من التّصاميم الهندسيّة الهامّة لاستثمار الطّاقة الشّمسيّة، لما له من كفاءة عالية وبساطة في التّصميم. جدار ترومب اقتُرح على يد العالم الفرنسي Trombe في العام 1880، وقد حصل على براءة اختراع في نفس ذلك العام. ومن ثم طرأ الكثير من التعديلات على التصميم التقليدي لجدار ترومب، وكان الهدف من كل منها هو زيادة كمية الحرارة المختزنة، بالإضافة إلى الحد من الضياعات الحرارية إلى الوسط الخارجي.

يتألف التصميم التقليدي لجدار ترومب (الشكل 1) من جدار ذو كتلة تخزينية حرارية (يصنع عادة من الإسمنت عالي الكثافة)، ويتم طلي الجدار من الجهة الخارجيّة بلون داكن أو أسود، وذلك لزيادة قابليّة الجدار على امتصاص الأشعة الشّمسيّة السّاقطة عليه، ويحوي على فتحتين لدخول وخروج الهواء، تتوضّعان أعلى وأسفل الجدار. يتوضّع أمام الجدار من الجهة الخارجيّة لوح من الزّجاج أو البلاستيك مؤلف من طبقة أو طبقتين (وهو الأفضل والأكثر شيوعاً)، ويُترك فراغ هوائيّ بين جدار ترومب ولوح الزّجاج. يتم تركيب جدار ترومب على الواجهة الجنوبيّة للمبنى لاكتساب أكبر مقدار من الإشعاع الشّمسيّ السّاقط (Duffie et al, 2006).

عند سقوط الإشعاع الشّمسي على الواجهة الجنوبيّة تنفذ الأشعة الشّمسيّة عبر لوح الزّجاج، فتقوم بتسخين الهواء البارد المتواجد بين الجدار ولوح الزّجاج ممّا يؤدي لانخفاض كثافته وصعوده للأعلى، وهذا يسبب خروج هواء بارد من داخل المكان المراد تدفئته عبر الفتحة السّفليّة لجدار ترومب ليحل محل الهواء السّاخن الذي تحرك للأعلى، وهذا بدوره يجعل الهواء السّاخن يدخل إلى المكان المراد تدفئته وذلك عبر الفتحة العلوية للجدار.




**الشكل (1) بنية جدار ترومب**

تلعب برامج المحاكاة دوراً هاماً في تقييم التصاميم الشمسية الذاتية. حيث تسمح للباحث أو المصمم في التنبؤ بالأداء الطاقي للمبنى تحت ظروف المناخ المختلفة على مدار عام كامل، وبأن يغيّر البارامترات الفيزيائية ويحصل على التصميم ذي الأداء الحراري الأفضل. برنامج محاكاة الأنظمة الحرارية العابرة TRNSYS (Transient System Simulation Program) هو أحد برامج المحاكاة التي تمتاز بموثوقيتها العالية وتساعد المهندسين على اتخاذ القرار بحيث تكون التصاميم المقترحة أكثر كفاءة طاقياً من النماذج التقليدية الحالية، حتى أنه يستخدم في الولايات المتحدة الامريكية لمنح شهادات ورخص بناء عالمية (Klein et al, 2004). الهدف من


http://journal.damascusuniversity.edu.sy/index.php/index/index
ISSN (online): 2789-6854

البحث هو تحليل الأداء الحراري لجدار ترومب وفق الشـــروط المناخية لمدينة دمشق. ومن أجل ذلك سوف نقوم بمحاكاة مبنى المعهد العالي للترجمة والترجمة الفورية كحالة دراســـية كونه يحتوي على جدار ترومب في الطابق الأخير، وذلك باســتخدام برنامج المحاكاة TRNSYS.

## 1- الدراسات السابقة:

يعد جدار ترومب أحد التّصـاميم الشـمسـية الذاتية الهامة التي جذبت اهتمام الباحثين والمهندســين، لما له من دور فعال في توفير الطاقة وحماية البيئة وتحقيق التنمية المستدامة. تم اجراء العديد من الدراســات حول التعديلات التحديثية والتجارب والنمذجة وتحســين أداء جدار ترومب. قدم الباحث Wang وآخرون (2020) نظرة عامة منهجية لأبحاث جدار ترومب في العقدين الماضـيين، ولخص التصـنيف والتقييم التجريبي وطرق النمـذجـة ومعـايير تقييم الأداء لجـدار ترومـب المـذكورة في الأدبيات الحالية. ولاحظ الباحثون وجود في الســنوات الأخيرة تصاميم مطورة عن جدار ترومب التقليدي لتحسين أدائه وجعله يؤدي وظائف متعددة مثل جدار ترومب الكهرضـــوئي وجدار ترومب لتنقية الهواء. كما صـــنف الباحثون طرق نمذجة جدار ترومب الى طريقتين تتضـــمن نموذج التدفق البســيط ونموذج ديناميك الســوائل الحاســوبي CFD. وأوصـــوا في الابحاث المستقبلية بتحسين القيمة الجمالية لجدران ترومب الحالية وإزالة العوائق التي تحول دون انتشارها في قطاع الأبنية.

تم اجراء العديد من الدراســات في أنحاء مختلفة من العالم من أجل دراســة الأداء الحراري للمباني المجهزة بجدار ترومب (Abbassi et al, 2015)؛ (Jaber et al, 2011)؛ (Rabani et al, 2015). في البرازيل درس الباحث Fernando وآخرون (2020) امكانية وفعالية اســتخدام جدار ترومب في البرازيل وذلك بتقييم الأداء الحراري لمبنى سكني افتراضـي مزود بجدار ترومب بتصـاميم مختلفة وفق الشـروط المناخية لمناطق مختلفة في البرازيل بالاعتماد على ســلســلة من عمليات المحاكاة الحاسـوبية باسـتخدام برنامج EnergyPlus. بينت الدراسـة أن اســتخدام جدار ترومب يؤدي إلى تحســين الراحة الحرارية للمســتخدمين في المباني الموجودة في البرازيل كما أوصــت الدراســة ببارامترات تصــميمية معينة تتعلق بجدار ترومب وتتناســب مع الشــروط المناخية لعدة مدن في البرازيل. قام الباحث Fares (2012) بتصميم برنامج بلغة الجافا يتيح حساب الحمل الحراري والربح الشمسـي والطاقة المسـاعدة (الأحفورية) التي يتطلبها المبنى عند كل تغيير ممكن للبارامترات التصميمية لجدار ترومب ودراسة تأثير البارامترات التصـميمية على الحمل الحراري في المبنى وتوصلت الدراسة إلى أنه يمكن توفير الطاقة بنسبة تصل إلى 83 % عند استخدام جدار ترومب في سوريا. في هذا البحث سوف نقوم بمحاكاة مبنى المعهد العالي للترجمة والترجمة الفورية في دمشق والذي يحتوي على جدار ترومب في الواجهة الجنوبية منه ودراســة تأثير وجود جدار ترومب على الطاقة المطلوبة للتدفئة وامكانية تحســين الأداء الحراري له. سـوف نسـتخدم برنامج المحاكاة TRNSYS لأنه يتيح دراسـة الأداء الحراري للنظام عند تغيرات مناخية ســاعية على مدار العام، وسـنسـتخدم ملف الطقس لمدينة دمشـق الذي يتم توليده من برنامج Meteonorm ويحتوي على بيانات الطقس الوسطية لســنة نموذجية على مدار فترة زمنية تمتد لعشــرات الســنين مأخوذة من محطات الرصد العالمية.

## 2- مواد البحث وطرائقه:

### 1.2 النموذج الرياضي لجدار ترومب:

برنامج TRNSYS هو بيئة متكاملة لمحاكاة الأنظمة الحرارية المتغيرة مع الزمن. يضم النظام الشمسي عدة مكونات موصولة مع بعضها لكي تؤدي مهمة محددة. يحاكي برنامج TRNSYS هذا النظام بربط المكونات مع بعضـها تماماً كما يتم في النظام الفيزيـائي الحقيقي، وكـل مكون هو عبـارة عن برنـامج فرعي Subroutine يدعى Type (Klein et al, 2004). يُســتخدم البرنـامج TRNBuild لادخـال البيانـات التفصـــيلية المتعلقة

بتوصـــيف المبنى المـدروس وكـل البيـانـات تُخزن في ملف (BLD.*) يتم قراءتـه من قبـل النموذج الـذي يحـاكي الأداء الحراري للمبنى المدروس (Type 56). ويمكن الحصـــول على الطاقة المطلوبة للتدفئة والتبريد من خرج النموذج Type 56 بعد أن يقوم بقراءة الملف (BLD.*).

يحســـب نموذج الأبنية متعددة المناطق (Type 56) الحمل الحراري الفعلي (وليس الأعظمي أو التصـــميمي) أي كميـة الطاقة الحرارية اللازمة للوصـــول بدرجة حرارة هواء الغرفة إلى درجـة الحرارة المطلوبـة المحـددة من قبـل المســـتخـدم آخـذاً بالحســـبان جميع الشـــروط الحرارية الفعلية الداخلية (من أرباح حرارية داخلية والتسرب والتهوية وغيرها) والخارجية (من اشعاع شـمسـي وشـروط المناخ الخارجية المتغيرة سـاعياً على مدار العام). تمثل كل منطقة حراريـة في النموذج Type 56 عقدة هوائية لكامل حجم هواء الغرفة. يتم حســـاب التدفق الحراري بالحمل إلى العقدة الهوائية من المعادلة (1) (Klein et al, 2004):

$$\dot{Q}_i = \dot{Q}_{inf} + \dot{Q}_{ven} + \dot{Q}_{g,c,i} + \dot{Q}_{cplg,i} \quad (1)$$

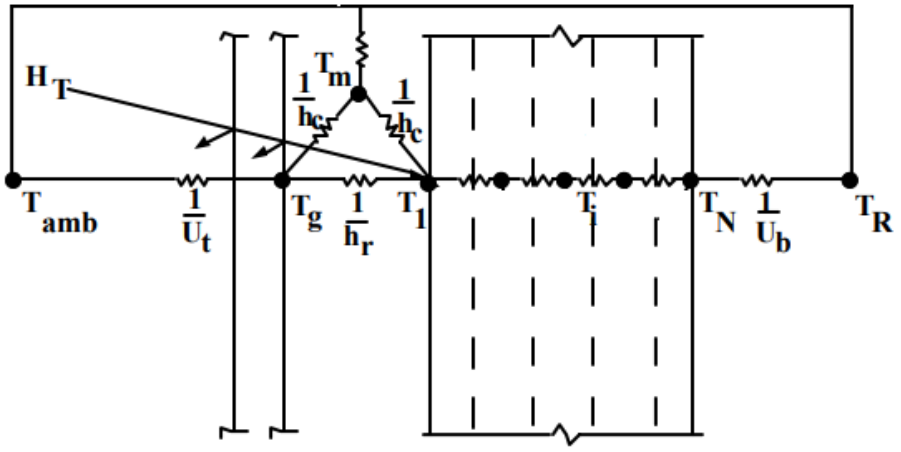
حيث: $\dot{Q}_{inf}$ الربح الناتج عن التسرب، $\dot{Q}_{ven}$ الربح الناتج عن التهويـة، $\dot{Q}_{g,c,i}$ الارباح الحراريـة الـداخليـة النـاتجـة عن الاشخاص والاضاءة والمعدات وغيرها، $\dot{Q}_{cplg,i}$ الربح الحراري الحملي الناتج عن تدفق الهواء من المنطقة المجاورة.

وأما التدفق الحراري بالاشـــعاع للجدار (ممثلاً بعقدة حرارية) فيعطى بالمعادلة (2):

$$\dot{Q}_{r,wi} = \dot{Q}_{g,r,wi} + \dot{Q}_{sol,wi} + \dot{Q}_{long,wi} + \dot{Q}_{wall-gain} \quad (2)$$

حيث: $\dot{Q}_{g,r,wi}$ الارباح الحرارية الداخلية بالاشـــعاع، $\dot{Q}_{sol,wi}$ الربح بالاشـــعاع الناتج عن الاشـــعاع الشـــمســـي عبر النوافذ، $\dot{Q}_{long,wi}$ تبادل الاشـــعاع طويل الموجة بين الجدار والجدران الاخرى، $\dot{Q}_{wall-gain}$ هو تدفق الحرارة لسطح الجدار والمحدد من قبل المستخدم. جميع الكميات في المعادلتين 1 و2 مقدرة بـ kJ/h، ويتم الحســاب على اســاس خطوة زمنية مقدارها ســاعة واحدة.

Type 36 هو النموذج المســـتخـدم في برنـامج TRNSYS لمحاكاة جدار ترومب. الشـــبكة الحرارية المســـتخدمة لنمذجة جدار التخزين الحراري في TRNSYS مبينة في الشـــكل 2 (Klein et al, 2004). يقسم الجدار إلى N عقدة مرتبطة سوية بواسطة الشبكة الحرارية ولكل منها درجة حرارة وسعة حرارية.




**الشكل (2) مخطط الشبكة الحرارية لجدار ترومب في Type 36**

(حيث أن: $T_{amb}$– درجة حرارة الوسط المحيط، $U_t$– معامل انتقال الحرارة بين الزجاج والوسط المحيط، $U_b$– معامل انتقال الحرارة بين السطح الداخلي للجدار وهواء الغرفة، $T_g$– درجة حرارة الطبقة الزجاجية الأولى، $T_m$– درجة الحرارة الوسطية لهواء الفجوة، $T_R$– درجة حرارة هواء الغرفة، $h_c$– معامل انتقال الحرارة للهواء الموجود في الفجوة، $h_r$– معامل انتقال الحرارة بالإشعاع بين الجدار والزجاج، $T_N$– درجة حرارة السطح الداخلي للجدار، $T_1$– درجة حرارة السطح الخارجي للجدار، $H_T$– شدة الاشعاع الشمسي الساقط على السطح الخارجي للجدار)

تعطى المقاومة الحرارية لتدفق الطاقة بين الفجوة والغرفة بالمعادلة (3) (Klein et al, 2004) :

$$R = \frac{A\left[\left(\frac{\dot{m}\,c_{pa}}{2h_c\,A}\right)\left(\exp\left(-\frac{2h_c\,A}{\dot{m}\,c_{pa}}\right)-1\right)-1\right]}{\dot{m}\,c_{pa}\left[\exp\left(-\frac{2h_c\,A}{\dot{m}\,c_{pa}}\right)-1\right]} \qquad (3)$$

حيث $\dot{m}$: معدل التدفق الكتلي للهواء الموجود في الفجوة (kg/s). $C_{pa}$: الحرارة النوعية للهواء (kJ/kg ˚C). A مساحة كتلة التخزين الحراري ($m^2$). $h_c$ معامل انتقال الحرارة لهواء الفجوة (W/$m^2$ ˚C).

إن الهواء المتدفق قد يكون مدفوعاً من قبل مروحة أو بفعل السيفون الحراري. ينتج السيفون الحراري من كون درجة الحرارة في الفتحة أعلى منها في الغرفة. إن هذه الطريقة في تحريك الهواء لايمكن قياسها بسهولة والنموذج الناتج يشمل عدة افتراضات. اقتصرت الدراسة التحليلية لهواء السيفون الحراري على حالة التدفق الصفائحي وأهملت فواقد الضغط في مداخل ومخارج الفتحات. من أجل حساب معدل التدفق الكتلي الثيرموسيفوني للهواء (المعادلة 4)، يتم تطبيق معادلة برنولي على نظام الهواء المتدفق ضمن الفجوة (الفراغ الهوائي)، وللتبسيط يفترض بأن كثافة ودرجة حرارة الهواء في الفجوة تتغير بشكل خطي مع الارتفاع. حل معادلة برنولي لسرعة الهواء الوسطية في الفجوة ($\bar{V}$) مبين بالمعادلة (5) (Duffie et al, 2006):

$$\dot{m} = \bar{\rho}\ \bar{V}\ A_g \qquad (4)$$

$$\bar{V} = \sqrt{\frac{2gh}{C_1\left(\frac{A_g}{A_V}\right)^2+C_2} \times \frac{(T_m-T_r)}{|T_m|}} \qquad (5)$$

حيث: $\bar{\rho}$ الكثافة الوسطية للهواء في الفجوة (kg/$m^3$).

$T_r$ درجة حرارة هواء الغرفة (˚C). و$T_m$ درجة الحرارة الوسطية في الفراغ الهوائي (˚C).

h: ارتفاع الجدار (m)، g: تسارع الجاذبية الأرضية (m/$s^2$).

$C_1$ و $C_2$: ثوابت تجريبية لابعدية.

$A_g$: مساحة المقطع العرضي للفجوة ($m^2$)، $A_V$: مساحة مخرج الفتحة ($m^2$).

عند حساب الحمل الحراري بوجود جدار ترومب يضاف معدل تدفق الطاقة من الجدار للغرفة على شكل ربح اضافي للغرفة (المتمثل في المعادلة 2: $\dot{Q}_{wall-gain}$) ويعطى بالمعادلة (6):

$$Q_R = Q_V + Q_b \qquad (6)$$

حيث: $Q_b$: معدل تدفق الطاقة من السطح الداخلي للجدار الى الغرفة و $Q_V$: معدل تدفق الطاقة لهواء الفراغ الهوائي:

$$Q_V = 2\,\dot{m}\ C_{pa}\ (T_m - T_r) \qquad (7)$$

2.3. توصيف البناء المدروس في TRNBuid

البناء هو المعهد العالي للترجمة والترجمة الفورية في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية في جامعة دمشق. وهو مؤلف من ثلاثة طوابق: القبو والطابق الأرضي والطابق الأول الفني (الشكل 3). مساحة كل طابق (389.18 $m^2$) وارتفاع المبنى فوق سطح الأرض [m] 7.45، نوافذ المبنى مضاعفة الالواح.


http://journal.damascusuniversity.edu.sy/index.php/index/index
ISSN (online): 2789-6854

**الشكل (3) المعهد العالي للترجمة والترجمة الفورية في جامعة دمشق**

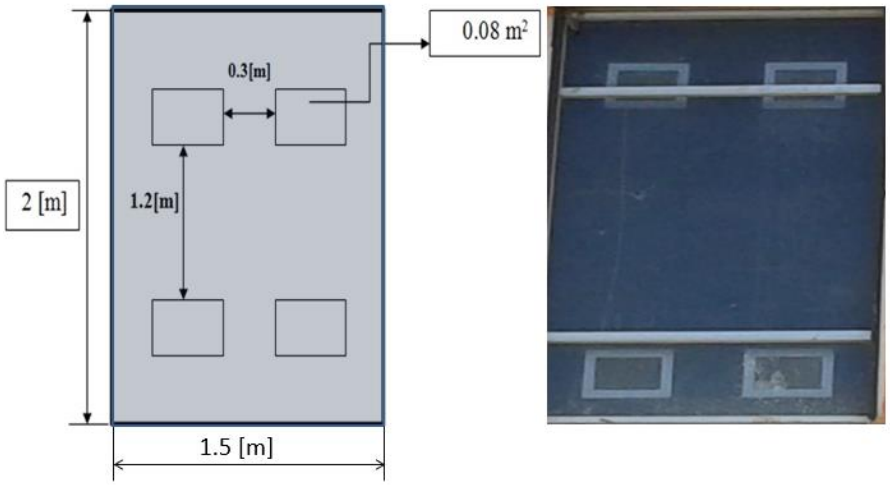
يحتوي على أربعة جدران ترومب يتوضع اثنان منها في الطابق الأول الفني واثنان منها في الطابق الأرضـــي، مســـاحة الجدار الواحد $3\ m^2$ (الشـكل 4). مواصـــفات جدار ترومب مبينة في الجـدول 1. الجـدران الخـارجيـة للمبنى معزولـة بطبقـة من البوليســترين ســماكتها (5 cm) ومكســية بالحجر على الواجهة الجنوبية فقط، أما سقف المبنى فهو غير معزول. المبنى مظلل على الواجهة الجنوبية فقط بمانعات شـمسـية رأسـية ثابتة تمتد مســـافة (0.8 m). يبين الجدول 2 قيم معاملات انتقال الحرارة الكلّيّة لعناصر المبنى المدروس.

**الجدول (1) مواصفات جدار ترومب**

| عرض الكتلة التخزينية الحرارية [m] | ارتفاع جدار التخزين الحراري [m] | ثخانة الكتلة التخزينية الحرارية [m] | عمق الفراغ الهوائي [m] | مادة الجدار | عدد الواح الزجاج | الايصالية الحرارية لمادة الجدار [kJ/h.m.K] | الحرارة النوعية لمادة الجدار [kJ/kg.K] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1.5 | 2 | 0.25 | 0.2 | الاسمنت | 2 | 5.04 | 1 |

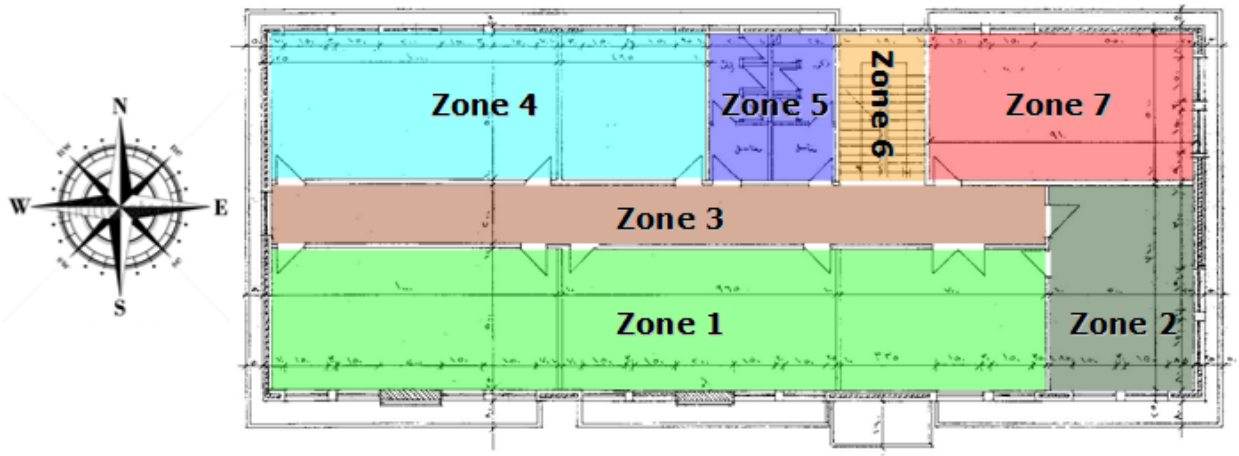
**الجدول (2) قيم معاملات انتقال الحرارة الكلّيّة لعناصر المبنى المدروس**

| نوع العنصر | الجدران الخارجية الجنوبية | الجدران الخارجية الشمالية | الجدران الخارجية الغربية/الشرقية | الجدران الداخلية | السقف/ الأرضية | النوافذ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| معامل انتقال الحرارة الكلي $[W/m^2\ K]$ | 0.539 | 0.543 | 0.528 | 2.912 | 2.926 | 2.83 |



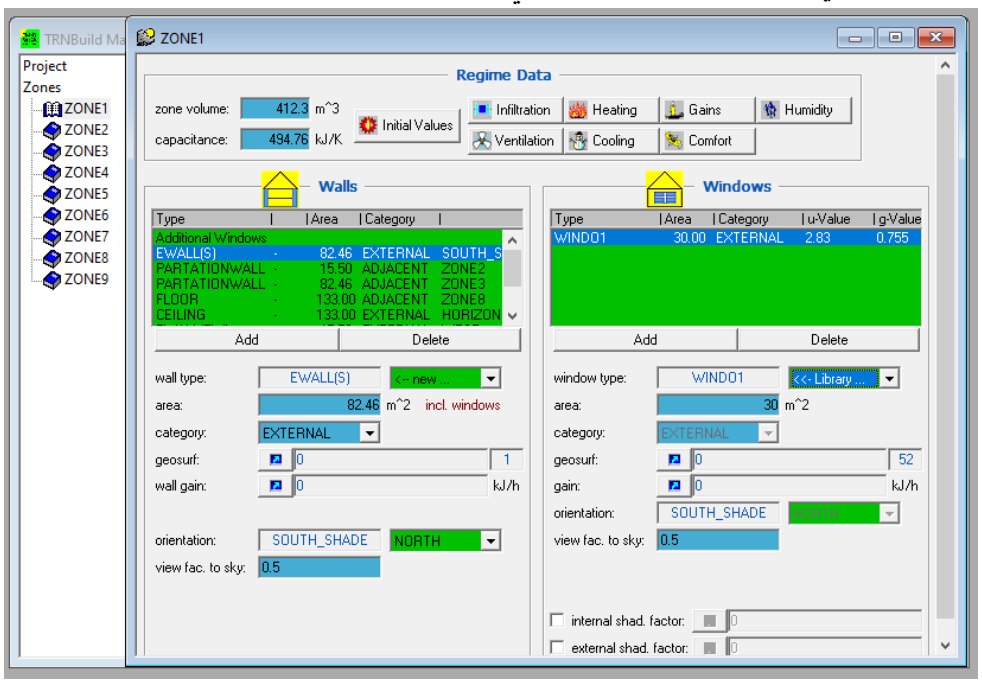

**الشكل(4) أبعاد جدار ترومب**

سـوف تركز الدراسـة على الطابق الأخير كونه الأكثر تأثراً بالتغيرات المناخية وبشـروط الطقس الباردة. لذلك تم تقسـيم المبنى إلى 9 منـاطق حراريـة واعتبـار كلاً من القبو والطـابق الأرضـي منطقة حرارية واحدة. أما الطابق الأول الفني فقد تم تقسيمه الى سبع مناطق حرارية كما في الشكل 5




**الشكل (5) تقسيم الطابق الفني الأول إلى سبع مناطق حرارية**

يبين الشكل (6) المنطقة الحرارية الاولى ZONE1 كما تبدو في TRNBuild.




**الشكل (6) المنطقة 1 في TRNBuild**

تتضمن البيانات التفصيلية لكل منطقة حرارية والتي تم ادخالها في كل منطقة حرارية في TRNBuild مايلي:

1- حجوم المناطق الحرارية للمبنى المدروس.

2- الجدران الموجودة وتحديد اتجاهاتها ومساحاتها.

3- الخصائص الحرارية للمواد التي تتألف منها طبقات الجدران، وتحديد معاملات انتقال الحرارة بالحمل على السطح الداخلي والخارجي.

4- النوافذ الموجودة من حيث نوعها ومساحتها.

5- عدد مرات تغير الهواء في الساعة بفعل التسرب Infiltration والتهوية Ventilation.

6- الأرباح الحرارية الداخلية Gains الناتجة عن القاطنين (حسب نوع النشاط الذي يقومون به) والمعدات الكهربائية وأجهزة الانارة المستخدمة. وبما أن طبيعة استخدام المبنى تدريسية فقد تم أخذ ساعات العمل والدوام للموظفين والطلاب بالحسبان مع اعتبار يومي الجمعة والسبت أيام عطلة.

7- درجة الحرارة المطلوبة للتدفئة وهي 20 ˚C وذلك من أجل حساب حمل التدفئة السنوي الفعلي، لذلك أُخذ زمن المحاكاة أشهر الشتاء (3-2-1-12-11). ولم يتم اعتماد درجة الحرارة المطلوبة للتكييف لأن البحث يهتم بتخفيض الحمل الفعلي للتدفئة وليس حمل التكييف.

بعد توصيف المناطق الحرارية بشكل مفصل ودقيق في TRNBuild، يتم استيراد الملف إلى النموذج الذي يحسب الطاقة المطلوبة لتدفئة المبنى (Type 56a). يتم وصل النماذج الضرورية للحساب وادخال البارامترات المناسبة في لوحة المحاكاة Simulation studio (الشكل 7). النماذج المستخدمة في لوحة المحاكاة هي:

Type 109-TMY2 (Weather data processor): يقرأ هذا النموذج بيانات الطقس للمدينة المدروسة وقد تم استيراد ملف الطقس الخاص بمدينة دمشق والذي يحتوي على بيانات الطقس الوسطية لسنة نموذجية على مدار فترة زمنية تمتد لعشرات السنين مأخوذة من محطات الرصد العالمية.

Type 56a (Multi-Zone Building): هو النموذج الذي يحاكي الأداء الحراري للمبنى المدروس.

Type 33e (Psychometrics): يقوم بحساب درجة حرارة نقطة الندى.

Type 69b (Effective Sky Temperature): يقوم بحساب درجة حرارة السماء.

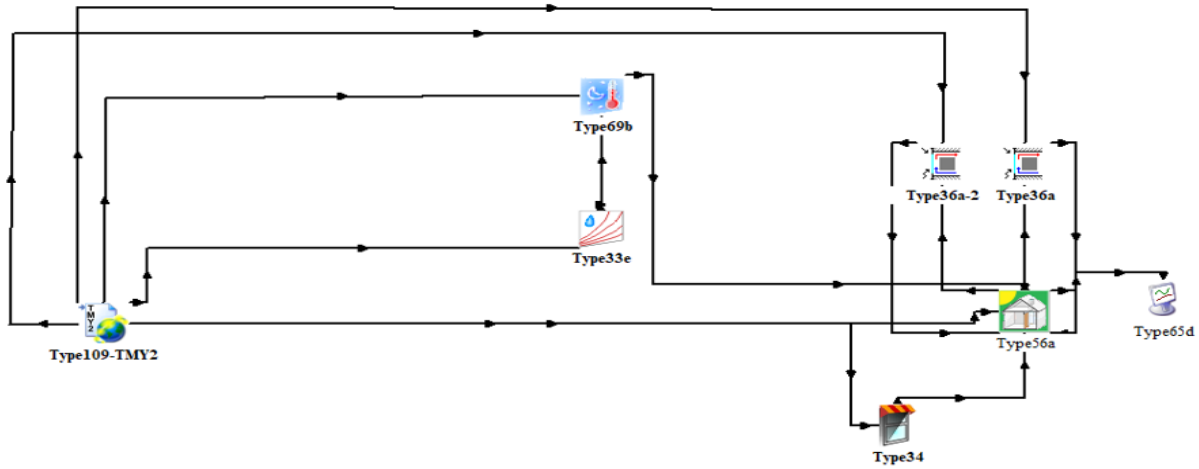
Type 36 (Thermal Storage Wall): يحاكي أداء جدار ترومب.

Type 34 (Overhang and Wingwall Shading): يحاكي أداء المانعات الشمسية الرأسية والجانبية.

Type 65c (Online plotter): يُستخدم لإظهار نتائج المحاكاة.



http://journal.damascusuniversity.edu.sy/index.php/index/index
ISSN (online): 2789-6854

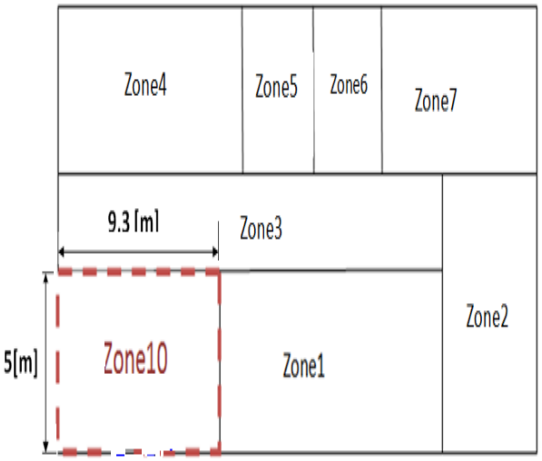



**الشكل (7) لوحة المحاكاة**

### 3.3 منهجية دراسة الأداء الحراري لجدار ترومب:

من أجل دراســـة الأداء الحراري لجدار ترومب قمنا بالخطوات التالية:

1- تحليل تأثير جدار ترومب على حمل التدفئة الســنوي. ومن أجل ذلك قمنا بتقسيم المنطقة 1 إلى منطقتين حراريتين كما في الشـــكل (8) بحيث تكون المنطقة المحتوية على جدار ترومب هي المنطقة 10 وســـتتم مقارنة الطاقة المطلوبة لتدفئة المنطقة 10 مع وبدون وجود جدار ترومب.




**الشكل(8) توضع المنطقة 10 المحتوية على جدار ترومب**

2- عزل الســقف بمادة الفوم Foam والذي يتمتع بالخصــائص الحرارية المبينة في الجدول (3).

**الجدول (3) المواصفات الحرارية للعازل Foam**

| الكثافة $kg/m^3$ | السعة الحرارية kJ/Kg K | الايصالية الحرارية [kJ/h.m K] |
|---|---|---|
| 10 | 1.4 | 0.14 |

تكمن أهميـة هـذه الخطوة في جعـل نظـام الربح الحراري غير المباشـر يعمل بكفاءة طاقية عالية، كون الســقف غير المعزول يؤدي إلى ضــياعات حرارية كبيرة من المبنى ويؤثر ســلباً على أداء النظام. وقد تم تطبيق العازل بثلاث ثخانات وهي: (0.05, 0.08, 0.1 m) للتوصل للثخانة المثلى.

3- دراســة تأثير العديد من البارامترات على أداء جدار ترومب في المنطقة 10، من أجل اختيارها بدقة بما يضـــمن تحقيق الأداء الأمثل له. وذلك بحســاب حمل التدفئة الســنوي عند كل بارامتر ومقارنتها مع الحالة المرجعية.

تتضمن حالات الدراسة البارامترات التالية وهي مبينة في الشكل (9):

ثخانة الكتلة التخزينية الحرارية: (0.4, 0.6, 0.8 m).

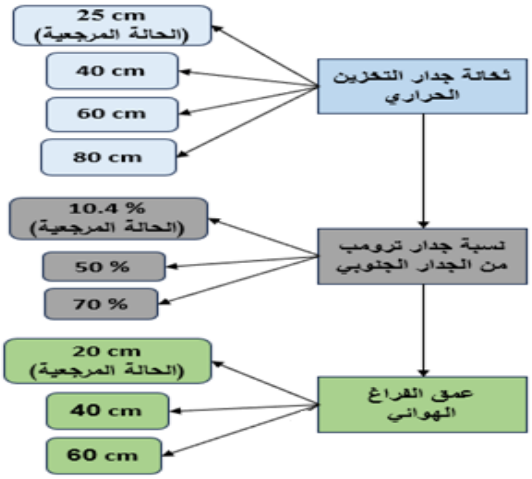


http://journal.damascusuniversity.edu.sy/index.php/index/index
ISSN (online): 2789-6854

– النسبة المئوية لمساحة جدار ترومب من الجدار الجنوبي (50, 70 %).

– عمق الفراغ الهوائي أي المسافة الفاصلة بين جدار التخزين الحراري ولوح الزجاج (0.4, 0.6 m).

ملاحظة: الحالة المرجعية تتضمن مواصفات جدار ترومب الحالية في مبنى المعهد العالي للترجمة والترجمة الفورية والمبينة بالجدول (1) ولكن بعد عزل السقف بمادة الفوم.

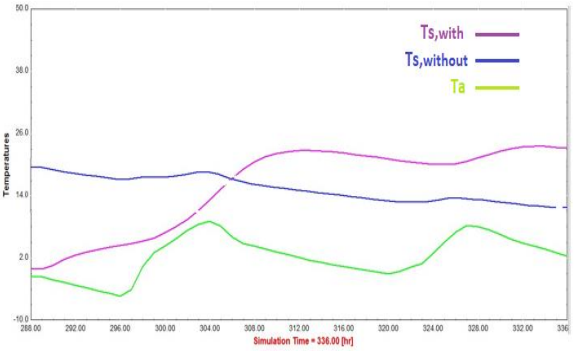



**الشكل (9) حالات الدراسة**

## 4. النتائج والمناقشة:

### 1.4 تأثير وجود جدار ترومب على الراحة الحرارية:

سوف نعرض تأثير وجود جدار ترومب على درجة حرارة السطح الداخلي للجدار الجنوبي في المنطقة 10 خلال اليوم الثاني عشر والثالث عشر والرابع عشر من شهر كانون الثاني. يبين الشكل (10) أن درجات حرارة السطح الداخلي للجدار الجنوبي في المنطقة 10 في حال عدم وجود جدار ترومب تتراوح بين [°C] (11.32-19.07) بينما تتراوح درجات حرارة السطح الداخلي في حال وجود جدار ترومب بين [°C] (26–21). أي أن وجود جدار ترومب أدى الى سلوك حراري ايجابي لأن زيادة درجة حرارة السطح الداخلي تخفض من معدل الطاقة الإشعاعية الصادرة عن جسم الإنسان باتجاه السطح الداخلي للجدران مما يؤمن الراحة الحرارية المطلوبة.

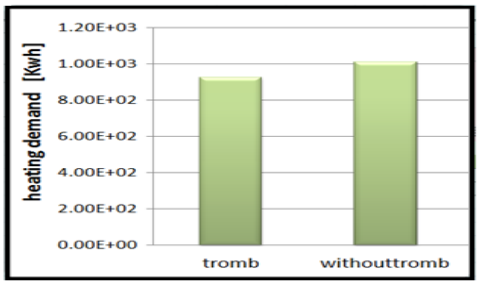



**الشكل (10) درجات الحرارة خلال اليوم الثاني عشر والثالث عشر والرابع عشر من شهر كانون الثاني**

(حيث: $T_s$ درجة حرارة السطح الداخلي للجدار الجنوبي، $T_a$ درجة حرارة الوسط الخارجي)

### 2.4 تأثير جدار ترومب على حمل التدفئة السنوي:

يبين الشكل (11) حمل التدفئة السنوي للمنطقة 10 مع وبدون جدار ترومب. وكما يتضح من الشكل فإن جدار ترومب أدى الى تخفيض حمل التدفئة السنوي من 1008 kWh الى 924.3 kWh أي بنسبة 8.3 %. تعد هذه النسبة مقبولة لأن جدار ترومب يشكل 10.4 % فقط من مساحة الجدار الجنوبي للمنطقة 10.




### 3.4 السماكة المثلى للعازل:

يبين الجدول (4) حمل التدفئة السنوي لمبنى المعهد العالي للترجمة والترجمة الفورية لدرجة حرارة 20 °C عند سماكات عزل مختلفة.

**الشكل (11) تأثير وجود جدار ترومب على حمل التدفئة السنوي**

**الجدول (4) حمل التدفئة السنوي عند سماكات عزل مختلفة**

| Annual heating demand [kWh] | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Zone number | Insulation: 0.05 m | Insulation: 0.08 m | Insulation: 0.1 m | without insu. |
| zone1 | 1545.24 | 1353.87 | 1280.7 | 7279.3 |
| zone2 | 769.89 | 703.22 | 677.8 | 2445.1 |
| zone3 | 3800.5 | 3599.4 | 3518.5 | 7448.3 |
| zone4 | 2702.1 | 2521.8 | 2449.8 | 6481.3 |
| zone5 | 1698.1 | 1617.8 | 1585.2 | 3123.7 |
| zone6 | 1419.4 | 1365.5 | 1343.8 | 2367.8 |
| zone7 | 1568.7 | 1445.2 | 1408 | 3697.6 |
| zone8 | 17845 | 17568 | 17455 | 21069 |
| zone9 | 22840 | 22757 | 22723 | 23734 |
| 1 st floor | 13503.93 | 12606.79 | 12263.8 | 32843.1 |
| total | 54188.93 | 52931.799 | 52441.8 | 77646.1 |

ويبين الجدول (5) نسبة الانخفاض بالحمل عن الحالة البدائية (السقف غير معزول) للطابق الأول وللمبنى بالكامل عند سماكات العزل المدروسة.

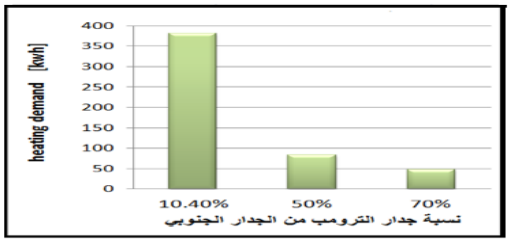
**الجدول (5) نسبة الانخفاض بحمل التدفئة السنوي عند عزل السقف بسماكات مختلفة**

| سماكة العازل [m] | نسبة الانخفاض بالحمل | |
|---|---|---|
| | الطابق الأول | كامل المبنى |
| 0.05 | 58 % | 30 % |
| 0.08 | 61 % | 31 % |
| 0.1 | 62 % | 32 % |

يتضح من الجدولين 4 و5 أن السماكة المثلى للعازل هي 5 (cm، وذلك لأن مقدار الانخفاض في حمل التدفئة عند زيادة سماكة العازل ضئيل جداً لا يتجاوز 2 % وهو لا يتناسب مع الكلفة الاقتصادية المترتبة على زيادة سماكة العزل. وبالنسبة للمنطقة 10 المحتوية على جدار ترومب بمجرد عزل السقف بمادة الفوم وبسماكة 5 cm ينخفض حمل التدفئة من 924.3 kWh الى 363.1 kWh أي بنسبة 61 %. من أجل التوصل لتوصيات تخص البارامترات التصميمية للجدار والتي من شأنها تحسين الاداء الحراري لجدار ترومب وتخفيض طاقة التدفئة كان لابد من اعتبار الحالة المرجعية هي الغرفة المحتوية على جدار ترومب والمعزولة لأن نظام الربح الحراري غير المباشر (جدار ترومب) لا يعمل بكفاءة طاقية عالية الا في حالة عزل جميع الجدران في المبنى وهي الخطوة الرئيسية والأولى التي يجب اتباعها قبل تركيب الجدار، كون الجدران غير المعزولة تؤدي إلى ضياعات حرارية كبيرة من المبنى وتؤثر سلباً على أداء النظام.

### 4.4 تأثير مساحة جدار ترومب:

يبين الشكل (12) حمل التدفئة السنوي عند نسب مختلفة لمساحة جدار ترومب من الجدار الجنوبي للمنطقة 10.

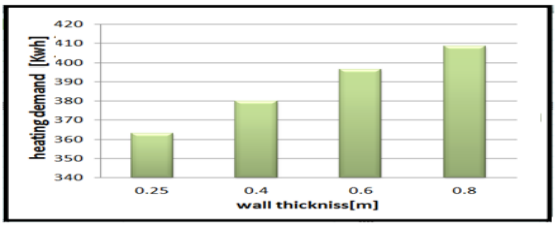



**الشكل (12) حمل التدفئة السنوي عند مساحات مختلفة لجدار ترومب**

إن زيادة نسبة مساحة جدار ترومب حتى 50 % أدى إلى تخفيض حمل التدفئة السنوي بنسبة 77 %، أما زيادة النسبة السابقة إلى 70 % أدت إلى تخفيض الحمل بنسبة 87 %. إن انخفاض الطاقة المطلوبة للتدفئة مع زيادة مساحة جدار الترومب هو أمر طبيعي حيث بزيادة المساحة نزيد فعالية الجدار عبر زيادة مساحة التبادل الحراري بين الجدار وهواء الغرفة وزيادة حجم التخزين بالجدار.

### 5.4 تأثير ثخانة كتلة التخزين الحراري:

يبين الشكل (13) حمل التدفئة السنوي للمنطقة 10 لأجل ثخانات مختلفة لكتلة التخزين الحراري.




**الشكل(13) حمل التدفئة السنوي عند ثخانات مختلفة لكتلة التخزين الحراري**

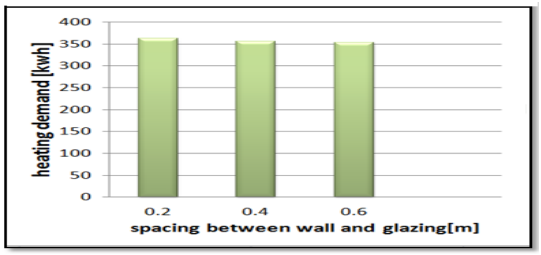
ويبين الجدول (6) مقدار الزيادة بحمل التدفئة عند زيادة ثخانة الكتلة التخزينية عن الحالة المرجعية كنسبة مئوية. نلاحظ أن زيادة ثخانة الكتلة التخزينية تؤدي إلى زيادة الطاقة المطلوبة للتدفئة. ويمكن تفسير ذلك بأن الجدران السميكة تأخذ وقتاً أطول لإيصال التأثير الحراري المطلوب لداخل الغرفة لذلك تُستخدم لإعطاء الحرارة خلال الفترات الليلية بينما تُستخدم الجدران الأقل سماكة لرفع اقتصادية المبنى وكذلك عندما يكون التسخين مطلوباً خلال فترة النهار فقط. وبما أن مبنى المعهد العالي للترجمة والترجمة الفورية يُستخدم نهاراً لذلك فإن الثخانة المثلى هي (0.25 m) وهي ثخانة الكتلة التخزينية الموجودة حالياً.

**الجدول (6) تأثير ثخانة كتلة التخزين الحراري على حمل التدفئة السنوي**

| ثخانة الكتلة التخزينية [m] | حمل التدفئة السنوي [kWh] | نسبة الزيادة بالحمل |
|---|---|---|
| 0.25 | 363.1 | - |
| 0.4 | 379.9 | 4 % |
| 0.6 | 396.5 | 9 % |
| 0.8 | 408.7 | 12 % |

### 6.4 تأثير عمق الفراغ الهوائي:

يبين الشكل (14) حمل التدفئة السنوي للمنطقة 10 عند قيم مختلفة لعمق أو سماكة الفراغ الهوائي بين جدار التخزين الحراري والزجاج. أظهرت النتائج انخفاض الحمل بنسبة 2% عند تغيير السماكة إلى (0.4 m) وبنسبة 3% عند سماكة (0.6 m). هذا يعني انخفاض حمل التدفئة بنسب ضئيلة عند زيادة عمق الفراغ الهوائي.




**الشكل (14) حمل التدفئة السنوي عند قيم مختلفة لعمق الفراغ الهوائي**

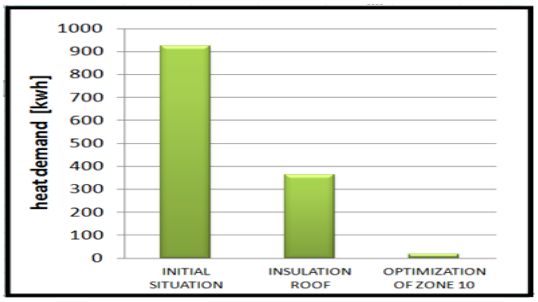
### 7.4 الأداء الحراري للمنطقة 10 بعد جمع جميع التعديلات المقترحة:

بعد دراسة العديد من الإجراءات التي تم شرحها سابقاً وعرض مدى تأثيرها على حمل التدفئة السنوي وبالأخذ بالحسبان الكلفة المصروفة على التغيير مقابل مقدار التخفيض المحتمل في الطلب على الطاقة فقد تم اقتراح التعديلات التالية:

1- عزل السقف: وينتج عنه انخفاض حمل التدفئة من 924.3 [kWh] إلى 363.1 [kWh].

2- زيادة نسبة مساحة جدار ترومب إلى 70% من مساحة الجدار الجنوبي: وينتج عنه انخفاض حمل التدفئة من 363.1 [kWh] إلى 16.84 [kWh].

يبين الشكل (15) مقدار الانخفاض في الطاقة المطلوبة لتدفئة المنطقة 10 عند جمع التعديلين المقترحين بنسبة 94 % عن الحالة الموجودة حالياً.




**الشكل (15) حمل التدفئة السنوي عند جمع التعديلات المقترحة**

## 5. الاستنتاجات والتوصيات:

لا يوصى بأن تكون ثخانة كتلة التخزين الحراري كبيرة في الأبنية التي تستخدم نهاراً لما لها من أثر سلبي على الطاقة المطلوبة للتدفئة.

لا يوصى بزيادة سماكة الفراغ الهوائي بين جدار التخزين الحراري والزجاج لأن زيادته تؤدي الى انخفاض حمل التدفئة بنسب ضئيلة جداً.

زيادة نسبة مساحة جدار ترومب من الجدار الجنوبي تؤدي إلى انخفاض كبير في الطاقة اللازمة للتدفئة.

حتى يعمل نظام الربح الحراري غير المباشر (جدار ترومب) بكفاءة عالية يجب أولاً عزل الجدران الخارجية والسقف.

عزل سقف مبنى المعهد العالي للترجمة والترجمة الفورية يؤدي إلى تخفيض الطلب على طاقة التدفئة لكامل المبنى بنسبة 30 % تقريباً، وللطابق الأخير بنسبة تصل إلى 60 %.

يوصى بعزل السقف في مبنى المعهد العالي للترجمة والترجمة الفورية بمادة الفوم بسماكة 5 cm وزيادة مساحة جدار ترومب إلى 70 % من مساحة الجدار الجنوبي لما لهذين الاجراءين من أثر كبير على انخفاض الطاقة المطلوبة للتدفئة.

زيادة سماكة العازل عن (5 cm) تؤدي إلى انخفاض صغير جداً في الطاقة المطلوبة للتدفئة لا تتناسب مع الكلفة الاقتصادية المترتبة عن زيادة سماكة العزل.

يوصى باعتماد جدار ترومب على الواجهة الجنوبية للمباني في مدينة دمشق لأنها يمكن أن توفر من طاقة التدفئة للمنطقة الحرارية بنسبة تصل لـ 61 %.

اهتم البحث بدراسة تأثير جدار ترومب على تخفيض حمل التدفئة السنوي. ولتجنب التسخين الزائد صيفاً يمكن اغلاق الفتحات السفلية للجدار واسدال العازل أمام الجدار نهاراً ورفعه ليلاً للسماح للحرارة المتجمعة داخل المبنى من الخروج للخارج من خلال فتحة خارجية فوق الجدار.

يمكن في المستقبل استخدام النموذج الذي تم بناؤه في بيئة TRNSYS لمتابعة البحث فيما يخص رفع كفاءة الطاقة في الأبنية وتخفيض الطلب على طاقة التبريد أو لاختبار تصاميم جديدة ذاتية يتم اقتراحها ودراسة أثرها على الأداء الطاقي للمباني بما يتوافق مع الشروط المناخية لمدينة دمشق.

**التمويل:** هذا البحث ممول من جامعة دمشق وفق رقم التمويل (501100020595).

## References:

[1] خضــور، لينا. (2020). إطار اســتراتيجي متعدد المعايير لتحســين كفاءة الطاقة التشــغيلية للأبنية الســكنية في ظل إعادة الاعمار(حالة دراسية لأبنية السكن الشبابي في دمشق). مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية. 36 (1).

[2] Abbassi F., Dehmani L. (2015). Experimental and numerical study on thermal performance of an unvented Trombe wall associated with internal thermal fins, Energy Build. 105.

[3] Duffie, J and Beckman, W. (2006). Solar engineering of the thermal processes, 3rd ed.; John Wiley & Sons Inc.: New York, NY, USA.

[4] Fares, A. (2012). The Effect of Changing Trombe Wall Component on the Thermal Load. Energy Procedia 19. doi: 10.1016/j.egypro.2012.05.181.

[5] Fernando A., Rosana M. (2020). Analysis of the potential use of Trombe walls in Brazil: design recommendations. Sust. Build. 5(4). https://doi.org/10.1051/sbuild/2020003.

[6] Jaber, S., Ajib, S. (2011). Optimum design of Trombe wall system in Mediterranean region. Sol. Energy 85, 1891–1898. doi:10.1016/j.solener.2011.04.025.

[7] Klein, S.A., Duffie J., Mitchell J., Kummer J., Thornton J., Beckman W., Duffie N., Braun J., Urban R., Blair N., Bradley D., Mitchell J., Freeman T., Evans B., Fiksel A., and Williams P. (2004). TRNSYS 16—A TRaNsient SYstem Simulation program, User Manual. Madison: University of Wisconsin-Madison, Solar Energy Laboratory.

[8] Rabani M.K., V. Dehghan, Faghih A.A., A.K. Faghih, (2015). Experimental study of the heating performance of a Trombe wall with a new design, Solar Energy 118, 359–374.

[9] Tian Z, Si B, Shi X, Fang Z. (2019). An application of Bayesian Network approach for selecting energy efficient HVAC systems. Journal of Building Engineering; 25(3):100796. DOI:10.1016/j.jobe.2019.100796.

[10] Wang D., Hu L, Du H., Liu Y., Huang J., Xu Y., Liu J. (2020). Classification, experimental assessment, modeling methods and evaluation metrics of Trombe walls, Renewable and Sustainable Energy Reviews. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109772.

[11] WBG. (2017). The Toll of War: The Economic and Social Consequences of the Conflict in Syria Online: http://www.worldbank.org/en/country/syria/publication/the-toll-of-warthe-economic-and-social-consequences-of-theconflict-in Syria. (Accessed on 9/2018).