

الاستخدام السلبي للطاقة الشمسية في تدفئة المباني

Passive Solar Energy for Heating Buildings

عبد السلام داود محمد حسن

نبيل فرج الحسان

المعهد العالي للمهن الشاملة / مصراته - ليبيا (سابقا)

المعهد العالي للمهن الشاملة

كلية الهندسة - جامعة واسط (حاليا)

مصراته - ليبيا

Abstract;

This research includes the construction of a mathematical model for thermal equilibrium equations in different sections of wall collect and stores heat (Tromp Wall) that which consider one of the most important passive solar heating system. Differential equilibrium equations of this model were solved by using numerical solution based on control volume method with the help of computer program which has been developed for this purpose .In order to study the effect of some design parameters, such as thickness of wall and type of constructed materials, the solution has been applied for five types of this wall. Three of them which are made of concrete with different thicknesses 10 cm, 20 cm and 30 cm, and the two other are made of brick and stone with 20 cm thickness .The results of the solution that has been reached showed clearly that the wall made of concrete with 20 cm thickness is the best among these walls in term of collection, storage and transfer of heat to the space to be warmed.

الخلاصة:

تم في هذا البحث بناء نموذج رياضي يشمل معادلات الاتزان الحراري في مقاطع مختلفة من جدار جامع وخازن للحرارة (جدار ترمب) والذي يعتبر من أهم أنواع أنظمة التدفئة الشمسية السلبية. تم حل معادلات الاتزان الحراري التفاضلية لهذا النموذج باستخدام إحدى طرق الحل العددي المسماة بطريقة الحجم المحكوم وبمساعدة برنامج حاسوب تم وضعه لهذا الغرض استخدمت فيه لغة الفورتران. ولغرض دراسة تأثير بعض العوامل التصميمية على الأداء الحراري للجدار الجامع والخازن للحرارة، كسمك الجدار ونوع المادة المصنوع منه، فقد طبق الحل على خمس أنواع من هذا الجدار ثلاث منها مصنوعة من الخرسانة بأسمك مختلفة هي 10cm، 20 cm، و 30 cm واثنان مصنوعة من الطابوق والحجر بسمك 20cm. نتائج الحل التي تم التوصل إليها والخاصة بهذه الجدران بينت بأن الجدار الخرساني ذو سمك 20 cm هو الأفضل من بين هذه الجدران من ناحية تجميع وتخزين الحرارة ونقلها إلى الحيز المراد تدفئته.

قائمة الرموز:

C : الحرارة النوعية لمادة الجدار ($J/Kg.^{\circ}k$).

f : معامل الثقل (خالي الأبعاد)

ha : معامل انتقال الحرارة الحملية ما بين السطح الخارجي للجدار و هواء الفجوة ($wlm^2.^{\circ}k$) .

hi : معامل انتقال الحرارة الحملية للسطح الداخلي للجدار ($wlm^2.^{\circ}k$) .

Ho : معامل انتقال الحرارة الحملية ما بين الزجاج والهواء الخارجي ($wlm^2.^{\circ}k$) .

- HT : شدة الاشعاع الشمسي الكلي الساقط على اللوح الزجاجي (wlm^2) .
 K : معامل التوصيل الحراري لمادة الجدار ($wlm.^{\circ}k$) .
 Q : معدل الحرارة المنتقلة (w)
 t : الزمن (s) .
 T : درجة الحرارة ($^{\circ}k$) .
 Ta : درجة حرارة الهواء في الفجوة ($^{\circ}k$) .
 Tg : درجة حرارة الزجاج ($^{\circ}k$) .
 To : درجة حرارة الهواء الخارجي ($^{\circ}k$) .

قائمة الرموز الإغريقية:

- α_w : امتصاصية السطح الخارجي للجدار (خالي الوحدات) .
 ε_g : انبعاثية الزجاج (خالي الوحدات) .
 ε_w : انبعاثية سطح الجدار (خالي الوحدات) .
 ρ : كثافة مادة الجدار (kg/m^3)
 σ : ثابت أستييفان – بولتزمان ($wlm^2.^{\circ}k^4$)

قائمة الرموز السفلية:

- a : هواء
 g : زجاج
 i : داخلي
 o : خارجي
 r : غرفة أو حيز مدفاً
 w : جدار

المقدمة:

إن مفهوم تدفئة المنازل و الأبنية في فصل الشتاء للحصول على ظروف الراحة باستخدام الطاقة الشمسية عبارة عن مفهوم قديم بدأ استخدامه مع بدايات قيام الإنسان بإنشاء أماكن المعيشة ، وبشكل أساسي يمكن تقسيم منظومات التدفئة الشمسية إلى نوعين رئيسيين الأول يسمى منظومات التدفئة الفعالة و الآخر يسمى منظومات التدفئة السلبية.

ففي أنظمة التدفئة الشمسية الفعالة يتم تجميع الطاقة الشمسية باستخدام بعض أنواع المجمعات الشمسية المنفصلة ، ثم يتم تخزين الطاقة المجمعة في وحدات تخزين منفصلة أيضاً ربما تكون بهيئة مواد لخرن الحرارة المحسوسة أو بهيئة مواد لخرن الحرارة الكامنة أو أن تخزن في تفاعلات كيميائية ، ثم يتم توزيع هذه الطاقة في الحيز باستخدام مضخات أو مراوح تعمل كهربياً بالإضافة إلى المشعات و المعدات الأخرى .

أما في أنظمة التدفئة الشمسية السلبية فإن الفقرات المتعلقة بالطاقة الشمسية والمتمثلة في التجميع و الخزن و التوزيع فتتم بطرق طبيعية لا يستخدم فيها بشكل عام أي شكل من أشكال الطاقة الميكانيكية أو الكهربائية أو أي أجهزة سيطرة إلكترونية .

ولغرض تصنيف الأنظمة الشمسية السلبية هناك طريقتين [1] ، الأولى تستند على التصنيف الوظيفي أو العام حيث يتم بموجبها تقسيم الأبنية الشمسية السلبية إلى :-

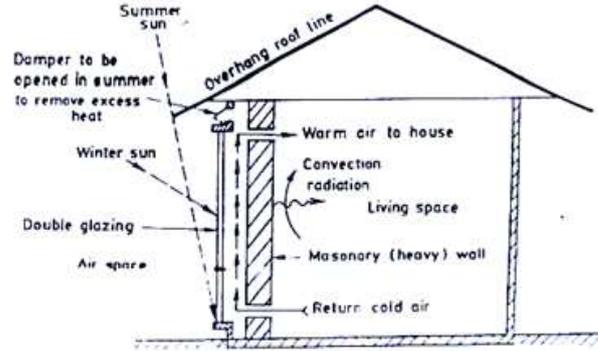
(الكسب المباشر ، الكسب غير المباشر ، المعزولة)

أما الطريقة الثانية في التصنيف والمستخدم بشكل واسع فتستند على التصنيف الفيزيائي ، حيث تصنف الأبنية الشمسية السلبية بموجب هذه الطريقة إلى :-

(الكسب المباشر ، الجدار الخازن للحرارة ، حيز شمسي ملاصق ، سقف خازن للحرارة ، الحلقة الحملية)

نظام الجدار الخازن للحرارة:

أن الطريقة الأكثر فاعلية في تدفئة هواء الغرفة وتقليل التذبذب الكبير في درجة حرارة الهواء فيها هي استخدام جدار خازن للحرارة يفصل ما بين طبقات الزجاج المزدوج المواجهة للجنوب والحيز (الغرفة) ، وفي هذه الحالة تستخدم المكونات التالية (شكل 1) :



شكل (1) : منظومة جدار ترمب أو الجدار الحراري

- طبقة أو طبقتين من الزجاج أو البلاستيك تغطي الجدار الجنوبي بالكامل مع ترك فجوة هوائية معينة ما بين الجدار والطبقة الزجاجية الداخلية .
- جدار خازن للحرارة موجه نحو الجنوب الجغرافي مصنوع من الخرسانة أو الطابوق بواجهة خارجية نحو الشمس مطلية باللون الأسود .
- في بعض الحالات وبدلاً من أن يكون الجدار الخازن للحرارة من الخرسانة أو الطابوق فإنه يصنع من خزانات أو حاويات أخرى مناسبة تملئ بالماء وتوضع على بعضها البعض، حيث تعمل على تجميع وخرن وتوزيع الحرارة ويسمى الترتيب في هذه الحالة بالجدار المائي أو الجدار الطيلي [1] .
- ضرورة وجود فتحات للهواء في أسفل الجدار وأعلى تكون موجهة باتجاه الحيز بالإضافة إلى فتحة أخرى للهواء في أعلى الجدار تكون موجهة نحو الخارج .
- أغشية متحركة على فتحات الدخول والخروج تستخدم أيضاً للسيطرة على جريان الهواء فعندما لا تكون هناك حاجة إلى الحرارة، فإن الحرارة الزائدة ستطرد خارجاً من فجوة الهواء عن طريق الفتحة أعلى الجدار والموجهة نحو الخارج .
- غطاء عازل متحرك عاكس يمكن استخدامه في بعض الأحيان مع جدار ترمب أو الجدار المائي يتم فتح الغطاء العازل خلال ساعات النهار وعندما تكون الشمس مشرقة حيث يقوم أيضاً بعكس جزء من الإشعاع الشمسي محسناً بذلك الإشعاع الساقط على الجدار . خلال ساعات الليل، فإن العازل المتحرك سوف يُرفع لتغطية الجدار بمساعدة آلة رفع يدوية أو جهاز آلي أو جهاز يعمل بخلية ضوئية لتقليل الفقدان الحراري من الجدار إلى الخارج .

في جميع الحالات السابقة فإن سطح الجدار الخارجي (الواجهة الجنوبية) تُظلي باللون الأسود مع وضع واجهة زجاجية مناسبة أمامه ويترك فجوة هوائية بينهما ، في بعض الأحيان يحتوي الجدار الخازن نفسه على نوافذ تسمح للإضاءة بالدخول مباشرة إلى الحيز بالإضافة إلى الكسب الحراري المباشر . نظام جدار ترمب قد تم تطويره اولاً من قبل الأمريكي Edward Morse في العام 1881 [2] ثم اعيد إحياءه في العام 1960 من قبل المهندس المعماري الفرنسي [3] Felix Tromp ، في الوقت الحالي تعتبر جدران ترمب أكثر فاعلية من السابق في تخفيض الطاقة المستهلكة خاصة في مجال التدفئة، عدد من البحوث قد أجريت تم التركيز فيها على الدراسة النظرية للتوصيل والحمل الحراري خلال جدران ترمب لغرض تحديد معالم ادائها الحراري [4-6] ، دراسات نظرية وعملية أخرى قد اظهرت بان ظروف الراحة داخل المناطق التي استخدمت فيها هذه الانواع من الجدران قد تحسنت بالإضافة الى التخفيض في الطاقة السنوية المصروفة في التدفئة من خلال التصميم الجيد للجدران [7-9] .

الباحث Jie وآخرون [10] درسوا طريقة لتحسين استخدام نظام جدار ترمب في انشاء الابنية بواجهات معزولة بعوازل حرارية مختارة، لقد اكدوا من خلال الدراسة بأن الكفاءة التشغيلية للطريقة المحسنة قد ارتفعت الى حدود 33.85% مما يمثل زيادة قدرها 56%.

الباحث Koyunbaba وآخرون [11] اجروا تحليلاً للطاقة لتحديد الاداء لنظام جدار ترمب ادمجت معه خلايا ضوئية (Photovoltaic Tromp wall System) تم وضعها في واجهة الحيز، لقد اظهرت الدراسة بان الكفاءات الكهربائية والحرارية اليومية المتوسطة لهذا النظام قد وصلت الى 4.5% و 27.7% على التوالي.

الباحث عباس [12] اجري دراسة عددية على بناية مدفئة شمسياً تستخدم جدار خزن حراري لغرض ايجاد افضل سمك وأفضل مادة للجدار، ثلاث مواد مختلفة قد تم استخدامها في الدراسة احدهما من الخرسانة والاخرتان من مواد متغيرة الطور، اثبتت النتائج بان مادة الخرسانة كانت هي الافضل من بين هذه المواد.

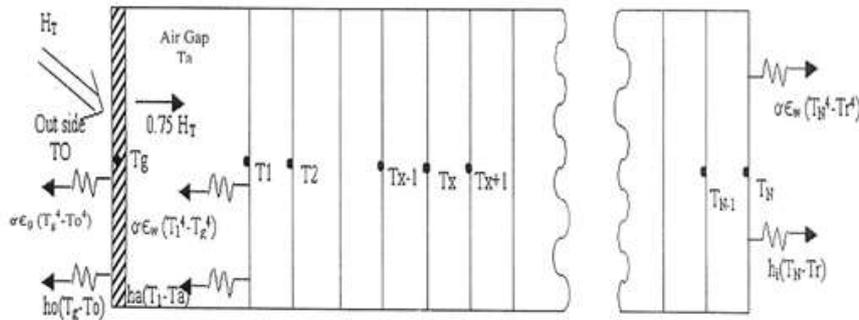
الباحث العبيدي [13] اختبر نظامين من انظمة جدران الخزن الحراري الأول من الخرسانة والثاني جدار مسامي من الحجر. تم صياغة نموذج رياضي يحتوي على المعادلات التفاضلية الحاكمة لانتقال الحرارة خلال الجدار بفيض حراري غير مستقر، تم حل هذه المعادلات عددياً لإيجاد توزيع درجات الحرارة خلال الجدار، بينت نتائج الدراسة بان اداء الجدار المسامي بسمك 10 cm افضل من اداء جدار الخزن التقليدي.

التحليل الحراري لجدار ترمب:

إن فكرة استخدام وتطوير جدار ترمب قد تم تناولها من قبل العديد من الباحثين خلال العقود القليلة المنصرمة ، كما وتم خلال هذه الفترة تطوير عدد من الطرق لغرض حساب وتحديد درجات الحرارة خلال الجدار تحت ظروف بيئية مختلفة .

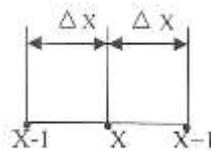
في هذا البحث حاولنا وضع علاقات لنموذج رياضي يمكن من خلاله دراسة أداء نظام جدار ترمب تحت ظروف بيئية مختلفة كما ويمكن عن طريقه دراسة تأثير بعض العوامل كسمك الجدار والمواد المكونة له على الأداء الحراري لهذا النظام .

ولغرض بناء هذا النموذج الرياضي للنظام سنفترض أولاً بأن عملية انتقال الحرارة خلال الجدار هي عملية انتقال غير مستقرة وبتجاه واحد فقط هو الاتجاه (X) على سبيل المثال ، كما وسنفترض أيضاً بأن المادة المكونة للجدار هي مادة متجانسة بخواص ثابتة . لذا فإن معادلات موازنة الطاقة في مقاطع الجدار المختلفة (شكل 2) يمكن التعبير عنها كما يلي:



شكل (2) : المقاطع المختلفة لجدار ترمب

أولاً: معادلة موازنة الطاقة (معادلة التوصيل) لمادة الجدار
معادلة موازنة الطاقة داخل مقطع من الجدار كالمقطع (X) الموضع في شكل (3) يمكن أن يعبر عنها بالشكل التالي :



شكل(3) : مقطع بداخل الجدار

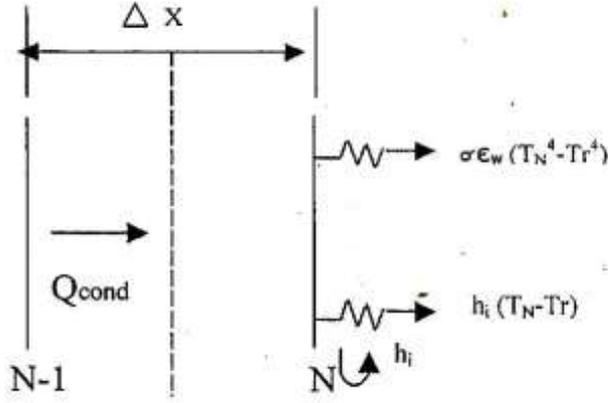
$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \rho C \frac{\partial T_x}{\partial t} \dots \dots \dots (1)$$

حيث:

T_x : درجة حرارة الجدار في المقطع (X).

ثانياً: معادلة موازنة الطاقة للسطح الداخلي للجدار.

شكل (4) يمثل مقطع السطح الداخلي للجدار (المقطع N) والمواجهة للحيز المدفأ (r) حيث يمكن كتابة معادلة موازنة الطاقة لهذا المقطع كما يلي:



شكل (4): مقطع للسطح الداخلي للجدار

$$(Q_{cond})_{N-1 \rightarrow N} - (Q_{conv})_{N \rightarrow r} - (Q_{rad})_{N \rightarrow r} = \rho C \frac{\partial T_N}{\partial t} \dots \dots \dots (2)$$

حيث:

$(Q_{cond})_{N-1 \rightarrow N}$: معدل الحرارة المنتقلة بالتوصيل من المقطع (N-1) إلى المقطع (N) والذي يمثل السطح الداخلي للجدار.

$(Q_{conv})_{N \rightarrow r}$: معدل الحرارة المفقودة بالحمل من المقطع (N) إلى الحيز المدفأ (r).

$(Q_{rad})_{N \rightarrow r}$: معدل الحرارة المفقودة بالإشعاع من المقطع (N) إلى الحيز المدفأ (r).

و بالتعويض عن الحدود في المعادلة (2) بما يساويها تصبح بالشكل التالي:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) - h_i(T_N - T_r) - \sigma \epsilon_w(T_N^4 - T_r^4) = \rho C \frac{\partial T_N}{\partial t} \dots \dots \dots (3)$$

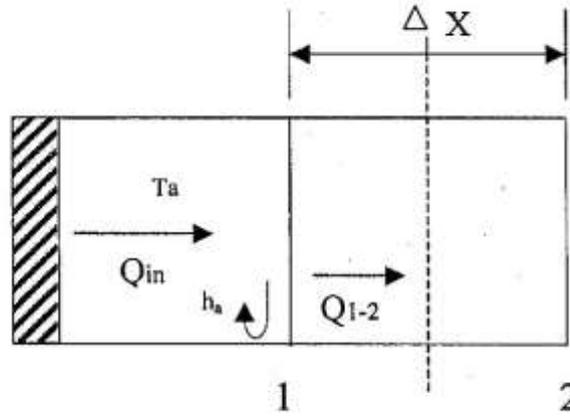
وفيها:

T_N : درجة حرارة السطح الداخلي للجدار.

T_r : درجة حرارة الهواء في الحيز المدفأ.

ثالثاً: معادلة موازنة الطاقة للسطح الخارجي للجدار

شكل (5) يمثل مقطع السطح الخارجي للجدار (المقطع 1) حيث يمكن كتابة معادلة موازنة الطاقة لهذا المقطع بالشكل التالي:



شكل (5) يوضح مقطع السطح الخارجي للجدار

$$Q_{in} - (Q_{conv})_{w \rightarrow a} - (Q_{rad})_{w \rightarrow g} - (Q_{cond})_{1 \rightarrow 2} = \rho C \frac{\partial T_1}{\partial t} \dots \dots \dots (4)$$

وفيها:

Q_{in} : الطاقة الشمسية الساقطة على السطح الخارجي للجدار والامتصة منه ، قيمة هذه الطاقة يمكن أن تؤخذ مساوية للمقدار $(0.75 \times H_T \times \alpha_w)$ [16].

$(Q_{conv})_{w \rightarrow a}$: معدل الحرارة المفقودة بالحمل من سطح الجدار الخارجي إلى الهواء في الفجوة ما بين اللوح الزجاجي والجدار .

$(Q_{rad})_{w \rightarrow g}$: صافي التبادل الحراري الإشعاعي ما بين السطح الخارجي للجدار واللوح الزجاجي .

$(Q_{cond})_{1 \rightarrow 2}$: معدل الحرارة السارية بالتوصيل من السطح الخارجي للجدار (المقطع 1) إلى المقطع الذي يليه (المقطع 2) .

بالتعويض عن الحدود في المعادلة (4) بما يساويها تصبح بالشكل التالي:

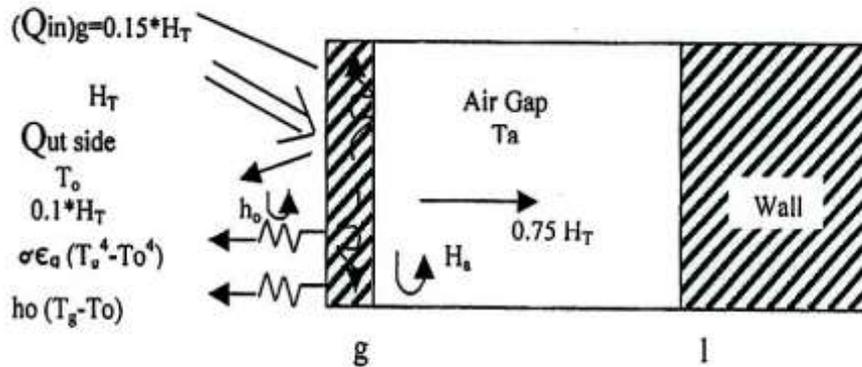
$$0.75 \times H_T \times \alpha_w - h_a (T_1 - T_a) - \frac{\sigma (T_1^4 - T_g^4)}{\frac{1}{\epsilon_w} + \frac{1}{\epsilon_g} - 1} - \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \rho C \frac{\partial T_1}{\partial t} \dots \dots \dots (5)$$

وفيها:

T_1 : درجة حرارة السطح الخارجي للجدار .

رابعاً: معادلة موازنة الطاقة لمقطع الزجاج .

معادلة موازنة الطاقة لمقطع الزجاج موضحة في الشكل التالي :



شكل (6): يمثل مقطع الزجاج حيث يعبر عن معادلة موازنة الطاقة .

$$(Q_{in})_g - (Q_{conv})_{g \rightarrow 0} - (Q_{rad})_{g \rightarrow 0} - (Q_{conv})_{g \rightarrow a} - (Q_{rad})_{g \rightarrow w} + (Q_{ref})_{w \rightarrow g} = (\rho C)_g \frac{\partial T_g}{\partial t} \dots \dots \dots (6)$$

حيث:

$(Q_{in})_g$: الطاقة الشمسية الممتصة في الزجاج.

$(Q_{conv})_{g \rightarrow 0}$: معدل الحرارة المفقودة بالحمل من الزجاج إلى المحيط الخارجي.

$(Q_{rad})_{g \rightarrow 0}$: معدل الحرارة المفقودة بالإشعاع من الزجاج إلى المحيط الخارجي.

$(Q_{conv})_{g \rightarrow a}$: معدل الحرارة المفقودة بالحمل من الزجاج إلى الهواء في الفجوة الهوائية.

$(Q_{rad})_{g \rightarrow w}$: صافي التبادل الحراري الإشعاعي ما بين الزجاج والسطح الخارجي للجدار.

$(Q_{ref})_{w \rightarrow g}$: نسبة الحرارة الشمسية الممتصة من الزجاج والمنعكسة من السطح الخارجي للجدار.

إن نسبة الحرارة الشمسية الممتصة من الزجاج والمنعكسة منه يمكن أن تؤخذ بحدود 15% و 10% على التوالي من شدة الإشعاع الشمسي الكلي (H_T) الساقط على الزجاج. وبالتالي فإن معادلة موازنة الطاقة أعلاه وبعد التعويض عن حدود هذه المعادلة بما يساويها يمكن أن تكتب بالشكل التالي [16]:

$$0.15 \times H_T - h_0 (T_g - T_0) - \sigma \epsilon_g (T_g^4 - T_0^4) - h_a (T_g - T_a) - \frac{\sigma (T_g^4 - T_1^4)}{\frac{1}{\epsilon_g} + \frac{1}{\epsilon_w} - 1} + 0.15 \times 0.75 \times H_T (1 - \alpha_w) = (\rho C)_g \frac{\partial T_g}{\partial t} \dots \dots \dots (7)$$

وفيها:

$(\rho C)_g$: حاصل ضرب كثافة الزجاج في حرارته النوعية.

باختيار طريقة عددية مناسبة يمكن من خلالها تحويل المعادلات التفاضلية في النموذج الرياضي أعلاه والتمثلة بالمعادلات (1،3،5،7) إلى معادلات جبرية ، ثم حل هذه المعادلات للحصول على توزيع درجات الحرارة في مقاطع الجدار المختلفة . من معرفة توزيع درجات الحرارة هذا سيكون بالإمكان معرفة وتحديد معدلات الحرارة السارية خلال الجدار والمنتقلة منه إلى الحيز المدفأ .

التحليل العددي لمعادلات نظام جدار ترمب التفاضلية:

المعادلة التفاضلية المنفردة التي يمكن مصادفتها ترمز في العادة إلى مبدأ محدد للحفظ، فكل معادلة تستخدم كمية فيزيائية محددة كمتغير تابع وتستوجب وجود حالة اتزان فيما بين المعاملات المختلفة المؤثرة على هذا المتغير . المتغيرات التابعة للمعادلات التفاضلية غالباً ما تكون بصورة خواص نوعية أي كميات مأخوذة على أساس وحدة الكتلة .
إن المعادلة التفاضلية عبارة عن مجموعة من الحدود ، كل حد من هذه الحدود يمثل تأثيراً على أساس وحدة الحجم ، وجميع الحدود مع بعضها تقتضي أو تتضمن التوازن والحفظ .
وإذا ما تم التعبير عن المتغير التابع بالرمز ϕ على سبيل المثال ، فإن المعادلة التفاضلية العامة يمكن أن تكتب بالصيغة التالية [17] :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \text{div}(\rho u\phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) + s \dots \dots \dots (8)$$

حيث Γ يمثل معامل الانتشار ، و s يمثل حد المصدر .
إن الحدود الأربعة في المعادلة أعلاه يمكن أن تمثل على التوالي حد عدم الاستقرار ، الحمل ، الانتشار ، والمصدر وإن الأسلوب المتبع لتحويل أي معادلة تفاضلية منفردة إلى الشكل العام يتلخص في معالجة هذه المعادلة لمتغير تابع معين حتى تصبح حدود عدم الاستقرار والحمل والانتشار متوافقة مع شكلها في الصيغة العامة . يمثل معامل $(\text{grad}\phi)$ في حد الانتشار بالرمز (Γ) في حين تؤخذ جميع الحدود المتبقية في الجهة اليمنى من المعادلة التفاضلية على أنها حد المصدر .
يشمل الحل العددي للمعادلة التفاضلية على مجموعة من الأعداد أو الأرقام التي يمكن فيها إنشاء توزيع للمتغير التابع (ϕ) .

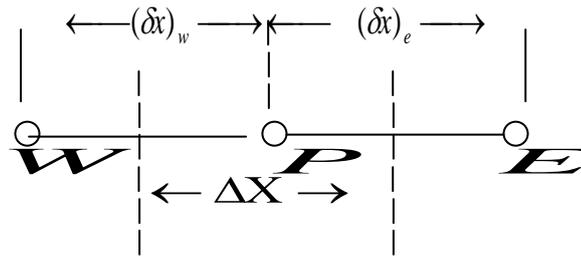
اشتقاق معادلات التجزئة - صيغة الحجم المحكوم:

إن الفكرة الأساسية لصيغة الحجم المسيطر هي في الواقع سهلة الإدراك والفهم حيث تقتضي بأن يقسم مجال الحساب إلى عدد من الحجم المحكومة غير المترابطة بحيث يكون هناك حجم مسيطر واحد حول كل نقطة عقدية يتم خلاله تكامل للمعادلة التفاضلية ، ولتقدير التكامل المطلوب يجب استخدام نوع معين من التوزيع عادة ما يكون بهيئة قطعة (Piecewise) لوصف التغير في قيم ϕ بين النقاط العقدية . إن نتيجة ذلك ستكون معادلات تجزئه تحتوي على قيم ϕ لمجموعة من النقاط العقدية [17].

ولتوضيح المبدأ المذكور أعلاه سنأخذ حالة التوصيل الحراري المستقر أحادي الاتجاه ، والتي يمكن أن تعطى علاقته التفاضلية بالشكل التالي:

$$\frac{d}{dx}(k \frac{dT}{dx}) + s = 0 \dots \dots \dots (9)$$

حيث S يمثل معدل التوليد الحراري لوحدة الحجم .
ولغرض اشتقاق معادلة التجزئة سيتم استخدام نظام النقاط العقدية الموضحة في الشكل التالي (شكل 7) :

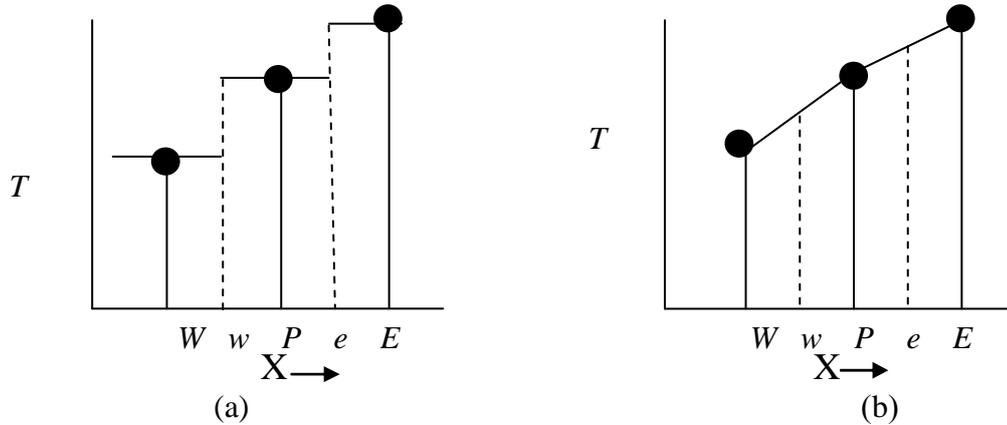


شكل (7) : نظام النقاط العقدية لمسألة أحادية الاتجاه

تبيين الخطوط المنقطة في الشكل أوجه الحجم المسيطر أما الحروف W و E فتشير إلى هذه الأوجه. بتكامل المعادلة (9) خلال الحجم المسيطر ذو السمك ΔX ، نحصل على :

$$\left(k \frac{dT}{dx}\right)_e - \left(k \frac{dT}{dx}\right)_w + \int_w^e S dx = 0 \quad \dots\dots\dots (10)$$

ولغرض التقدم أكثر في الحل ستكون هناك حاجة إلى توزيع افتراضي أو علاقة استكمال لدرجة الحرارة ، شكل (8) يبين توزيعين افتراضيين بسيطين ، التوزيع الأول يقترح بأن قيمة درجة الحرارة T في النقطة العقدية تسود خلال الحجم المسيطر المحيطة بهذه النقطة وبالتالي فإنه سيكون بهيئة التدرج الموضح في الجزء (a) من الشكل ، في هذا النوع من التوزيع تكون قيمة الميل dT/dX غير محدد أو معرفة عند أوجه الحجم المسيطر w و e . أما التوزيع الثاني والذي لا يعاني من هذه المشكلة والموضح في الشكل (b) فسوف يكون بهيئة قطعة وفيه تستخدم دالة استكمال خطية بين النقاط العقدية .



شكل (8) : توزيعين افتراضيين مبسطين لدرجة الحرارة
(a) توزيع بهيئة تدرج ، (b) توزيع بهيئة قطعة

بتقدير قيمة المشتقة dT/dX في المعادلة (10) باستخدام نوع التوزيع بهيئة قطعة ، نحصل على معادلة بالشكل :

$$\frac{K_e(T_E - T_p)}{(\delta x)_e} - \frac{K_w(T_p - T_w)}{(\delta x)_w} + \bar{S}\Delta X = 0 \quad \dots\dots\dots (11)$$

حيث \bar{S} يمثل القيمة المتوسطة لـ S خلال الحجم المسيطر ويعبر عن حد المصدر ، وسيكون من المفيد وضع معادلة التجزئة أعلاه (معادلة 11) بالشكل التالي :

$$a_p T_p = a_E T_E + a_w T_w + b \quad \dots\dots\dots(12)$$

حيث :

$$\left. \begin{aligned} a_E &= \frac{K_e}{(\delta x)_e}, a_w = \frac{K_w}{(\delta x)_w} \\ a_p &= a_E + a_w, b = \bar{S} \Delta X \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(13)$$

في الطريقة العددية المستخدمة ، يتم تحويل حد المصدر (\bar{S}) إلى صيغة خطية وذلك من خلال التعبير عن هذا الحد بما يلي :-

$$\bar{S} = S_c + S_p T_p \quad \dots\dots\dots(14)$$

حيث S_c يمثل الجزء الثابت من الحد S بينما S_p يمثل معامل لدرجة الحرارة T_p .
أما أسلوب معالجة حد عدم الاستقرار في المعادلة التفاضلية باستخدام صيغة الحجم المسيطر فسنحاول توضيحه من خلال اشتقاق معادلة التجزئة الخاصة بالتوصيل الحراري غير المستقر أحادي الاتجاه والذي يمكن التعبير عنه بالمعادلة التفاضلية التالية :

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (K \frac{\partial T}{\partial x}) \quad \dots\dots\dots(15)$$

والتي سنفترض فيها بأن قيمة حاصل الضرب ρc ثابتة .

نظرا لكون الزمن أحادي الاتجاه ، لذا فإننا سنحصل على الحل وذلك من خلال السير في الزمن انطلاقا من توزيع ابتدائي لدرجة الحرارة ، فعند خطوة زمن تقليدية ستكون المهمة إعطاء قيم لدرجة الحرارة في النقاط العقدية عند الزمن t ثم إيجاد قيم درجة الحرارة في هذه النقاط عند الزمن $t + \Delta t$ ، سيشار إلى القيم القديمة المعطاة لدرجة الحرارة في النقاط العقدية بـ T_p^0, T_E^0, T_w^0 ، أما القيم الجديدة (غير المعروفة) لدرجة الحرارة في الزمن $t + \Delta t$ عند هذه النقاط فسيشار إليها بـ T_p^1, T_E^1, T_w^1 ، سيتم الآن اشتقاق معادلة التجزئة وذلك بتكامل المعادلة (15) خلال الحجم المسيطر الموضح في شكل (7) وخلال فترة زمن من t إلى $t + \Delta t$ ، ليعطي :

$$\rho c \int_w^e \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial T}{\partial t} dt dx = \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{\partial}{\partial x} (K \frac{\partial T}{\partial x}) dx dt \quad \dots\dots\dots(16)$$

ولغرض تمثيل الحد $\partial T / \partial t$ سنفترض بأن قيمة درجة الحرارة في النقطة العقدية ستسود خلال الحجم المسيطر ، لذا فإن :

$$\rho c \int_w^e \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial T}{\partial t} dt dx = \rho c \Delta x (T_p^1 - T_p^0) \quad \dots\dots\dots(17)$$

أما الحد $K \frac{\partial T}{\partial x}$ في المعادلة (16) فسيتم معالجته بإتباع مبدأ الاستقرار والذي تم توضيحه سابقاً ، حيث سنحصل على :-

$$\rho c \Delta x (T_p^1 - T_p^0) = \int_t^{t+\Delta t} \left\{ \frac{K_e (T_E - T_p)}{(\delta x)_w} - \frac{K_w (T_p - T_w)}{(\delta x)_w} \right\} dt \quad \dots\dots\dots(18)$$

عند هذا المستوى من الحل سنكون بحاجة إلى افتراض حول تغير قيم درجات الحرارة T_w, T_E, T_p مع الزمن من t حتى $t + \Delta t$. عدد من الافتراضات ممكنة بعض منها يمكن تعميمه باقتراح أن :

$$\int_t^{t+\Delta t} T_p dt = [f(T_p^1) + (1-f)T_p^0] \Delta t \quad \dots\dots\dots(19)$$

وفيها f يمثل معامل الثقل والذي تتراوح قيمته بين 0 و 1 [17]. وباستخدام نفس الافتراض أعلاه (معادلة 19) في تكامل كل من T_w و T_E فإننا سنحصل من العلاقة (18) على :

$$\rho c \frac{\Delta x}{\Delta t} (T_p^1 - T_p^0) = f \left[\frac{K_e (T_E^1 - T_p^1)}{(\delta x)_e} - \frac{K_w (T_p^1 - T_w^1)}{(\delta x)_w} \right] + (1-f) \left[\frac{K_e (T_E^0 - T_p^0)}{(\delta x)_e} - \frac{K_w (T_p^0 - T_w^0)}{(\delta x)_w} \right] \quad \dots\dots\dots(20)$$

وبرفع الرمز العلوي 1 من المعادلة أعلاه مع التنكير بأن T_w, T_E, T_p تمثل القيم الجديدة لدرجة الحرارة T في الزمن $t + \Delta t$ ، فإن النتيجة تكون :

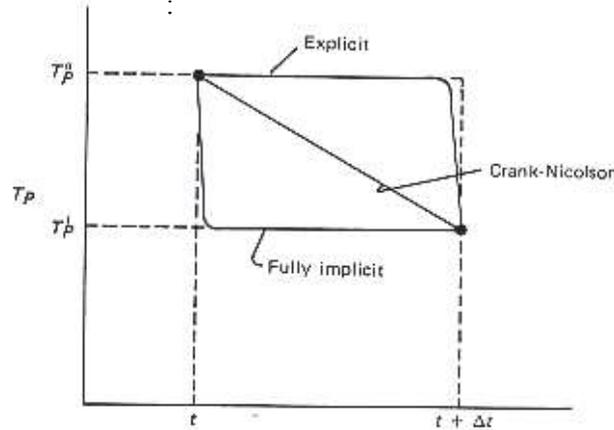
$$a_p T_p = a_E [fT_E + (1-f)T_E^0] + a_w [fT_w + (1-f)T_w^0] + [a_p^0 - (1-f)a_E - (1-f)a_w] T_p^0 \quad \dots\dots\dots(21)$$

حيث:

$$a_p^0 = \frac{\rho c \Delta x}{\Delta t}, a_p = f a_E + f a_w + a_p^0 \quad \dots\dots\dots(22)$$

باستخدام قيم نوعية محددة لمعامل الثقل (f) ، فإن معادلة التجزئة (21) يمكن اختصارها إلى أحد المخططات المعروفة جيداً للمعادلات التفاضلية ذات القطع المكافئ.

ف عند $f = 0$ نصل إلى المخطط الصريح ، وعند $f = 0.5$ نصل إلى مخطط كرانك نيكولسون ، وعند $f = 1.0$ نصل إلى المخطط الضمني التام ، شكل (9) يوضح تغير درجة الحرارة T_p مع الزمن t لهذه الأنواع من المخططات [17].



شكل (9) : تغير درجة الحرارة مع الزمن عند المخططات الثلاثة

في هذه البحث سيتم اختيار قيمة لمعامل النقل f تساوي 1 (أي اختيار المخطط الضمني) في الحل العددي ويعود السبب في ذلك إلى أن هذه القيمة سوف لن تسمح بوجود أي إمكانية تجعل معامل درجة الحرارة T_p^0 في المعادلة (21) تأخذ إشارة سالبة ، حيث أن وجود الإشارة السالبة في أحد معاملات معادلة التجزئة المتحصلة من الطريقة العددية المعتمدة على صيغة الحجم المسيطر يتنافى مع شروط تطبيق هذه الطريقة والتي تستوجب أن تكون جميع المعاملات في معادلة التجزئة موجبة الإشارة. بناءً على ما تقدم ، فإن معادلة التجزئة (21) وعند أخذ المخطط الضمني ($f = 1$) بعين الاعتبار ستصبح بالشكل التالي :

$$a_p T_p = a_E T_E + a_W T_b + b \dots \dots \dots (23)$$

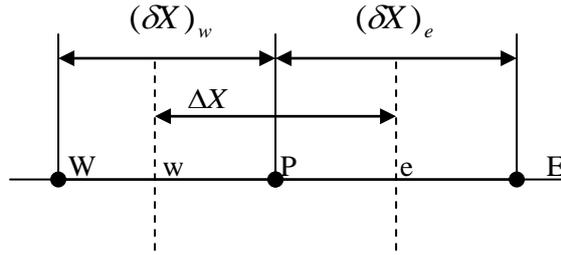
حيث :

$$\left. \begin{aligned} a_E &= \frac{K_e}{(\delta x)_e}, a_w = \frac{K_w}{(\delta x)_w}, a_p^0 = \frac{\rho c \Delta x}{\Delta t} \\ b &= sc \Delta x + a_p^0 T_p^0, a_p = a_E + a_w + a_p^0 - sp \Delta x \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (24)$$

تحويل المعادلات التفاضلية إلى معادلات جبرية:

سيتم في هذه الفقرة تحويل المعادلات التفاضلية لنظام جدار ترمب والتي تم ذكرها سابقاً من الدراسة إلى معادلات جبرية (معادلات تجزئة) وذلك باستخدام الطريقة العددية المستندة على صيغة الحجم المحكوم والتي تم إيضاحها في الفقرة السابقة .

- تحويل معادلة موازنة الطاقة (معادلة التوصيل) لمادة الجدار.



$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \partial \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right)$$

بعد أن يتم معالجة حد عدم الاستقرار وحده التوصيل أحادي الاتجاه نحصل على المعادلة التالية :

$$\rho c \frac{\Delta x}{\Delta t} (T_p - T_p^0) = f \left[\frac{K_e (T_E - T_p)}{(\delta x)_e} - \frac{K_w (T_p - T_w)}{(\delta x)_w} \right] + 1 - f \left[\frac{K_e (T_E^0 - T_p^0)}{(\delta x)_e} - \frac{K_w (T_p^0 - T_w^0)}{(\delta x)_w} \right] \dots(25)$$

المعادلة (26) يمكن أن تكتب أيضا بالصيغة التالية :-

$$a_p T_p = a_E [f T_E + (1 - f) T_E^0] + a_w [f T_w + (1 - f) T_w^0] + [a_p^0 - (1 - f) a_E - (1 - f) a_w] T_p^0 \dots\dots\dots (26)$$

حيث :

$$\left. \begin{aligned} a_E &= \frac{K_e}{(\delta x)_e}, a_w = \frac{K_w}{(\delta x)_w}, a_p^0 = \frac{\rho c \Delta x}{\Delta t} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(27)$$

$$a_p = f a_E + f a_w + a_p^0$$

وباستخدام المخطط الضمني التام (f=1) ، فإن المعادلة (26) ستصبح بالشكل :

$$a_p T_p = a_E T_E + a_w T_w + b \dots\dots\dots (28)$$

حيث :

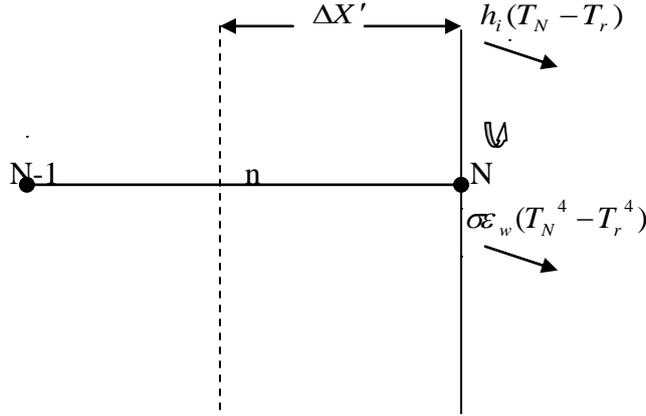
$$\left. \begin{aligned} a_E &= \frac{K_e}{(\delta x)_e}, a_w = \frac{K_w}{(\delta x)_w}, a_p^0 = \frac{\rho c \Delta X}{\Delta t} \\ b &= S c \Delta X + a_p^0 T_p^0, a_p = a_E + a_w + a_p^0 - S_p \Delta X \end{aligned} \right\} \dots\dots(29)$$

في معادلة موازنة الطاقة لمادة الجدار لا يوجد هناك حد للمصدر ، وبالتالي فإن قيمة S_c ستساوي صفر

وكذلك قيمة S_p

- تحويل معادلة موازنة الطاقة للسطح الداخلي للجدار

$$(Q_{cond})_{N-1 \rightarrow N} - (Q_{conv})_{N \rightarrow r} - (Q_{rad})_{N \rightarrow r} = \rho c \frac{\partial T_N}{\partial t}$$



$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) - h_i(T_N - T_r) - \epsilon_w(T_N^4 - T_r^4) = \rho c \frac{\partial T_N}{\partial t}$$

وبعد أن تتم معالجة الحدود في المعادلة أعلاه ، تصبح بالشكل :

$$\rho c \Delta X' (T_N - T_N^0) = f \frac{[K_i(T_{N-1} - T_N)]}{(\delta X)_n} + (1-f) \left[\frac{K_i(T_{N-1}^0 - T_N^0)}{(\delta X)_n} \right] + \bar{S} \Delta X \quad \dots(30)$$

حيث :

$$\bar{S} = h_i(T_r - T_N) + \epsilon_w(T_r^4 - T_N^4)$$

وبموجب الصيغة الخطية لحد المصدر (\bar{S}) فإنه سيساوي :

$$\bar{S} = S_c + S_N T_N$$

وفيها:

$$S_c = h_i T_r + \epsilon_w T_r^4$$

$$S_N = -(h_i + \epsilon_w T_N^3)$$

وبموجب المخطط الضمني التام ($f=1$) فإن معادلة (30) تصبح بالشكل:

$$a_N T_N = a_{N-1} T_{N-1} + b \quad \dots(31)$$



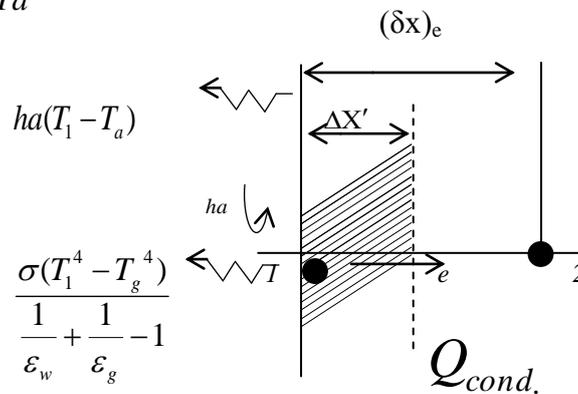
حيث :

$$\left. \begin{aligned} a_{N-1} &= \frac{K_i}{(\delta x)_n}, b = s_c \Delta x' + a_N^o T_N^o \\ a_N^o &= \frac{\rho c \Delta x'}{\Delta t}, a_N = a_{N-1} + a_N^o - s_N \Delta x' \end{aligned} \right\} \dots(32)$$

- تحويل معادلة موازنة الطاقة للسطح الخارجي للجدار

$$Q_{in} - (Q_{conv})_{1 \rightarrow a} - (Q_{rad})_{1 \rightarrow g} - (Q_{cond})_{1 \rightarrow 2} = \rho c \frac{\partial T_1}{\partial t}$$

(Gap Temp.) T_a



$$0.75 * H_T * \alpha_w - ha(T_1 - T_a) - \frac{\sigma(T_1^4 - T_g^4)}{\frac{1}{\epsilon_w} + \frac{1}{\epsilon_g} - 1} - \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \rho c \frac{\partial T_1}{\partial t}$$

وبمعالجة حدود المعادلة أعلاه ، تصبح بالشكل التالي :-

$$\bar{s} \Delta x - f \left[\frac{K_e (T_1 - T_2)}{(\delta x)_e} \right] + (1 - f) \left[\frac{K_e (T_1^0 - T_2^0)}{(\delta x)_e} \right] = \rho c \frac{\Delta x'}{\Delta t} (T_1 - T_1^0) \dots\dots\dots(33)$$

حيث :

$$\bar{S} = S_c + S_1 T_1$$

وفيها S_c و S_1 تأخذ القيم التالية :



$$Sc = 0.75H_T \alpha_w + haTa + \frac{\sigma Tg^4}{\frac{1}{\epsilon_w} + \frac{1}{\epsilon_g} - 1}$$

$$Sl = -\left(ha + \frac{\sigma T_1^3}{\frac{1}{\epsilon_w} + \frac{1}{\epsilon_g} - 1} \right)$$

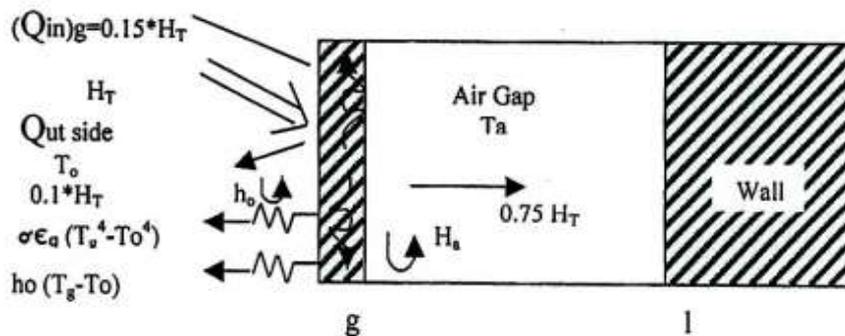
و بموجب المخطط الضمني التام (f =1) فإن معادلة (33) يمكن أن توضع بالشكل التالي :

$$a_1 T_1 = a_2 T_2 + b \dots\dots\dots (34)$$

$$\left. \begin{aligned} a_2 &= \frac{K_e}{(\delta x)_e}, b = Sc \Delta x' + a_1^0 T_1^0 \\ a_1^0 &= \frac{pc \Delta x'}{\Delta t}, a_1 = a_2 + a_1^0 - s_1 \Delta x' \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (35)$$

- تحويل معادلة موازنة الطاقة لمقطع الزجاج

$$\begin{aligned} & (Q_{in})_g - (Q_{conv})_{g \rightarrow o} - (Q_{rad})_{g \rightarrow o} - (Q_{conv})_{g \rightarrow a} \\ & - (Q_{rad})_{g \rightarrow 1} + (Q_{ref})_{1 \rightarrow g} = \left(\rho c \frac{\partial T}{\partial t} \right)_g \end{aligned}$$





$$0.15H_T - h_0(T_g - T_0) - \sigma \epsilon_g (T_g^4 - T_0^4) - ha(T_g - T_a) - \frac{\sigma(T_g^4 - T_1^4)}{\frac{1}{\epsilon_g} + \frac{1}{\epsilon_w} - 1} + 0.15 * 0.75 H_T (1 - \alpha_w) = (\rho_c)_g \frac{\partial T_g}{\partial t}$$

و بمعالجة حدود المعادلة أعلاه ، تصبح بالشكل التالي :

$$(\rho c)_g \Delta x'' (T_g - T_g^0) = \bar{S} \Delta x'' \dots \dots \dots (36)$$

حيث :

$$\bar{S} = S_c + S_g T_g$$

وفيها :

$$S_c = 0.15 * H_T + h_0 T_0 + \sigma \epsilon_g T_0 + ha T_a + \frac{\sigma T_1^4}{\frac{1}{\epsilon_g} + \frac{1}{\epsilon_w} - 1} + 0.15 * 0.75 * H_T (1 - \alpha_w)$$

$$S_g = - \left(h_0 + \sigma \epsilon_g T_g^3 + ha + \frac{T_g^3}{\frac{1}{\epsilon_g} + \frac{1}{\epsilon_w} - 1} \right)$$

وبالتالي فإن معادلة (36) يمكن أن تصبح بالشكل التالي :-

$$a_g T_g = b \dots \dots \dots (37)$$

حيث :-

$$b = S_c \Delta x'' + a_g^0 T_g^0$$

$$a_g^0 = (\rho c)_g \frac{\Delta x''}{\Delta t}$$

$$S_g a_g = a_g^0 - \Delta x''$$

درجة حرارة الهواء بداخل الفجوة الهوائية المحصورة بين الزجاج والسطح الخارجي للجدار (Ta) يمكن أن ترتبط مع درجة حرارة المحيط الخارجي To بالعلاقة التالية :

$$hos(T_a - T_0) = ha(T_1 - T_a) \dots\dots\dots (38)$$

حيث :-
Hos: معامل الفقدان الحراري الكلي من هواء الفجوة إلى الهواء الخارجي بدرجة الحرارة T_0 ويمكن أن يساوي:

$$\frac{1}{hos} = \frac{1}{ha} + \frac{x_g}{K_g} + \frac{1}{ho}$$

ومن المعادلة (38) فإن درجة الحرارة T_a تساوي :

$$Ta = h_m \left(\frac{1}{hos} T_1 + \frac{1}{ha} T_0 \right) \dots\dots\dots (39)$$

وفيها :

$$\frac{1}{h_m} = \frac{1}{hos} + \frac{1}{ha}$$

حل معادلات التجزئة الناتجة:

تم حل معادلات التجزئة الناتجة من النموذج الرياضي لجدار ترمب الحراري و الممثلة بالمعادلات المدرجة في الفقرة السابقة باستخدام الحاسب الآلي وذلك بواسطة برنامج للحاسوب أعد لهذا الغرض كتب بلغة الفورتران. الظروف المناخية الخارجية الساعية والمتمثلة بشدة الإشعاع الشمسي الكلي الساقط على سطح عمودي (H_T) ودرجة حرارة الهواء الخارجية T_0 والتي استخدمت في تشغيل البرنامج قد تم الحصول عليها من دائرة الأرصاد الجوي في مدينة مصراتة / ليبيا ليوم شتوي من شهر يناير 2006 .

نتائج الحل العددي:

تم تطبيق الحل العددي لمعادلات النموذج الرياضي للجدار الناقل و الخازن للحرارة (جدار ترمب) الموضحة في الفقرة السابقة على خمس أنواع من الجدران شملها البحث ، ثلاثة من هذه الجدران مصنوعة من الخرسانة (معامل التوصيل الحراري يساوي 1.37 w/m.k ، كثافتها تساوي 2100 kg/m^3 ، الحرارة النوعية تساوي 880 J/kg.k) بسمك مختلف 10 سم ، 20 سم ، و 30 سم ، أما الجدارين الآخرين فلهما سمك متساوي 20 سم و لكن الأول مصنوع من الطابوق (معامل التوصيل الحراري يساوي 0.69 w/m.k ، الكثافة تساوي 1600 kg/m^3 ، الحرارة النوعية تساوي 840 J/kg.k) والأخر من الحجر (معامل التوصيل الحراري يساوي 1.1 w/m.k ، الكثافة تساوي 2640 kg/m^3 ، الحرارة النوعية تساوي 820 J/kg.k) وذلك لغرض دراسة تأثير كل من سمك الجدار والمادة المصنوع منها على الأداء الحراري والذي يشمل توزيع (تغير) درجات الحرارة داخل الجدار خلال كل ساعة من ساعات اليوم (في عرض النتائج تم اختيار عدد محدد من ساعات اليوم لتبيان تغيرات درجات الحرارة داخل الجدار خلالها بعض من هذه الساعات تقع ضمن فترة توفر الإشعاع الشمسي والبعض الآخر يقع ضمن فترة زوال الإشعاع) بالإضافة إلى معدلات الحرارة المتنقلة من السطح الداخلي للجدار إلى الحيز المراد تدفنته أو العكس عند كل ساعة من ساعات اليوم الأربع والعشرين . النتائج التي تم التوصل إليها من هذا الحل موضحة في الأشكال البيانية .

مناقشة النتائج و الاستنتاجات :

نتائج الحل العددي لمعادلات النموذج الرياضي للجدران الناقلة والخازنة للحرارة المستخدمة في البحث موضحة في الأشكال البيانية من (10) ولغاية (16) .

الأشكال (10) ولغاية (14) توضح توزيع (تغيرات) درجة الحرارة داخل أنواع مختلفة من الجدران ، جدران مصنوعة من الخرسانة بسمك مختلف 10 سم ، 20 سم ، و 30 سم وجدران أخرى بسمك 20 سم مصنوعة من مواد مختلفة هي الخرسانة ، والطابوق الاعتيادي والحجر في ساعات مختارة من ساعات اليوم هي الساعات 02:00 ، 06:00 ، 10:00 ، 14:00 ، 18:00 ، 22:00 .

يلاحظ من هذه الأشكال بأن سمك الجدار ونوع المادة التي يصنع منها يؤثران بشكل كبير على توزيع درجات الحرارة داخله. فالأشكال (10) ، (11) و (12) والتي تبين توزيع درجات الحرارة داخل جدران من الخرسانة بسمك مختلف توضح أن التقليل من سمك الجدار ينتج عنها ارتفاع في درجات الحرارة داخله خلال ساعات الإشعاع الشمسي لتصل إلى مستويات عالية نسبياً بالمقارنة مع السمك الكبير، في حين تبدأ هذه الدرجات بالانخفاض وبسرعة بعد زوال الإشعاع بفترة قصيرة (شكل 10) ، إن التفسير المنطقي لهذه الحالة بسيط وهو أن الجدار ذو السمك القليل تكون له قابلية منخفضة على الخزن الحراري حيث تعتمد هذه القابلية على كتلة الجدار وحرارته النوعية ، وبالتالي فإن جداراً من هذا النوع سوف يسخن بسرعة مع وجود مصدر للحرارة في حين يفقد هذا الجدار الحرارة وبسرعة أيضاً عند زوال هذا المصدر .

إن زيادة سمك الجدار تعني زيادة قابليته على الخزن الحراري وبالتالي فإن الجدران ذات السمك الكبير سوف تسخن ببطء مع وجود الإشعاع الشمسي وترتفع درجات الحرارة داخلها إلا أن هذه الدرجات سوف لن تصل إلى نفس مستوى قيم درجات الحرارة التي تصلها الجدران ذات السمك القليل وهذا ما توضحه الأشكال (11) و (12) . و يجدر الإشارة أيضاً في هذه المرحلة بأن زيادة سمك الجدار تؤدي إلى زيادة مقاومته على نقل الحرارة بالتوصيل .

بعد زوال الإشعاع الشمسي تبقى الجدران ذات السمك الكبير محتفظة بالحرارة المكتسبة إلى فترات زمنية أطول وبالتالي يبقى لهذه الجدران القابلية على التسخين لفترات أطول بعد زوال الإشعاع بالمقارنة مع الجدران ذات السمك القليل .

الأشكال (13) و (14) توضح أيضاً توزيع درجات الحرارة داخل جدران بسمك 20 سم مصنوعة من الطابوق والحجر على التوالي ، إن لنوعية المادة التي يصنع منها الجدار وكما ذكر سابقاً تأثيراً واضحاً على توزيع درجات الحرارة داخله ، فعند مقارنة الشكلين المذكورين مع شكل (11) والذي يمثل توزيع درجات الحرارة خلال جدار من الخرسانة بسمك 20 سم يلاحظ بأن مادة الخرسانة هي الأفضل من بين المواد المصنوعة منها هذه الجدران حيث ترتفع درجة الحرارة أعلى مما هي عليه في الجدارين الآخرين المصنوعين من الطابوق والحجر حيث يلعب معامل التوصيل الحراري للمادة دوراً مهماً في نقل الحرارة خلال الجدار ، إضافة إلى ذلك فإن الجدار الخرساني له قابلية خزن حراري أعلى مما يعني احتفاظه بالحرارة المكتسبة لفترة زمنية أطول بالمقارنة مع المادتين الأخرتين وبالتالي فإن لهذا الجدار قدرة أفضل على التسخين.

شكل (15) يوضح مقارنة بين معدلات الحرارة المنتقلة بالحمل والإشعاع بوحدات الوات/المتر المربع من السطح الداخلي للجدار إلى الحيز المدفأ لثلاث أنواع من الجدران الخرسانية بسمك 10 سم ، 20 سم ، و 30 سم ، يلاحظ من هذا الشكل بأن السطح الداخلي للجدار الخرساني ذو سمك 20 سم يعطي بشكل عام أكبر معدل من الحرارة إلى الحيز المراد تدفئته عند مقارنته بأسماك أخرى.

عامل آخر مهم يؤثر على معدل الحرارة المنتقلة من السطح الداخلي للجدار إلى الحيز المدفأ هو نوعية المادة التي يتم منها تصنيع الجدار ، شكل (16) يوضح معدلات الحرارة المنتقلة من السطح الداخلي إلى الحيز المدفأ لثلاث أنواع من الجدران تختلف في نوع المادة ولكنها متساوية في السمك (20 سم) ، يلاحظ من الشكل بأن الجدار الخرساني يعطي بشكل عام أكبر معدل للحرارة بالمقارنة مع الجدران الأخرى .

من خلال النتائج المتحصلة ووفق لما ذكر أعلاه يمكن القول بأن الجدار المصنوع من الخرسانة بسمك 20 سم يعطي أفضل أداء حراري بالمقارنة مع الجدران الأخرى التي شملتها الدراسة .
من خلال النتائج يمكن استنتاج ما يلي:-

- أولاً : الجدران الناقلة والخازنة للحرارة تمثل وسيلة بسيطة وفعالة للتدفئة الشمسية .
ثانياً : يمكن الاستفادة من الجدار الناقل والخازن للحرارة في تدفئة حيز معين بأسلوبين هما :

أ- الاستفادة من حرارة الإشعاع الشمسي الساقطة على السطح الخارجي للجدار والتي تنتقل بالتوصيل خلاله إلى السطح الداخلي وبعدها تنتقل من السطح الداخلي إلى الحيز المراد تدفئته بواسطة الحمل والإشعاع.

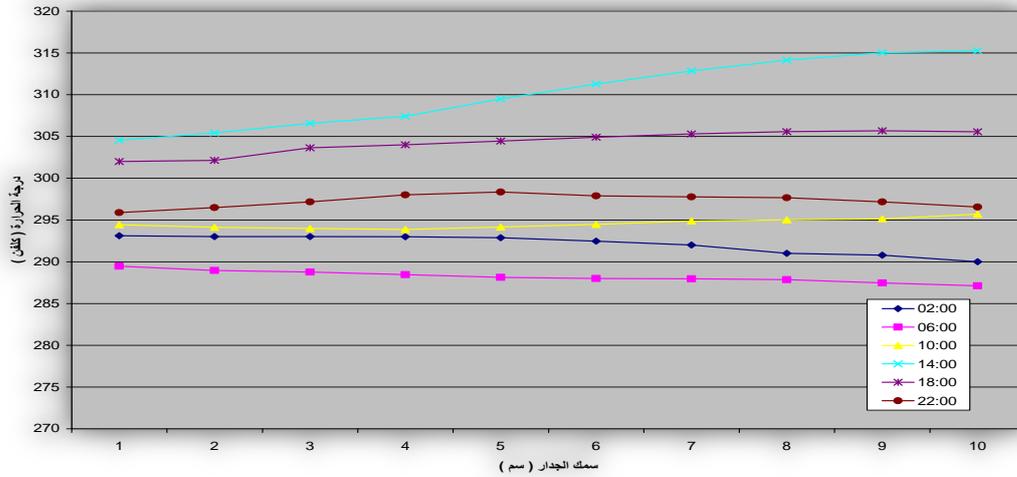
ب- إمرار هواء الحيز المراد تدفئته في الفجوة الساخنة المحصورة ما بين اللوح الزجاجي والسطح الخارجي للجدار.

ثالثاً : النموذج الرياضي للجدار الناقل والخازن للحرارة الذي تم اعتماده وحله في هذه الدراسة أخذ فقط أسلوب التسخين (أ) من الفقرة ثانياً أعلاه مع الأخذ بعين الاعتبار بأنه يتوقع أن يزداد مردود الجدار الحراري في التدفئة إذا ما تم أخذ الأسلوب (ب) أيضاً في الاعتبار .

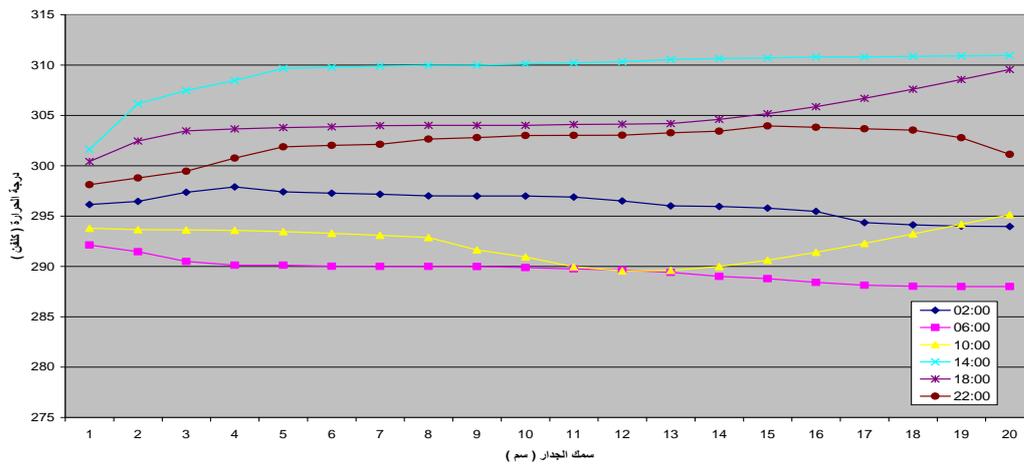
رابعاً : هناك سريان عكسي للحرارة خلال الجدار (حرارة مفقودة من الحيز المدفأ إلى الخارج) يحدث عندما تنخفض درجة حرارة السطح الداخلي للجدار عن درجة حرارة الحيز المدفأ خلال بعض ساعات الليل وكما توضحه الأشكال البيانية للنتائج ، يمكن تقليل هذا الفقدان بشكل كبير وذلك باستخدام عازل حراري متحرك يوضع أمام الواجهة الزجاجية للجدار خلال ساعات انعدام الإشعاع ثم يرفع هذا العازل عند الشروق .

خامساً : بموجب الظروف الجوية التي تم اعتمادها في الحل العددي للنموذج الرياضي للجدار الخازن و الناقل للحرارة فإن معدلات الحرارة المنتقلة بالإشعاع و الحمل من السطح الداخلي لأحد الجدران التي شملتها الدراسة (الجدار الخرساني بسمك 20 سم) إلى الحيز المدفأ قد وصلت في بعض ساعات توفر الإشعاع إلى قيم تجاوزت 150 وات/المتر المربع و التي تعتبر من المعدلات الجيدة للتدفئة لمثل هذا النوع من الجدران .

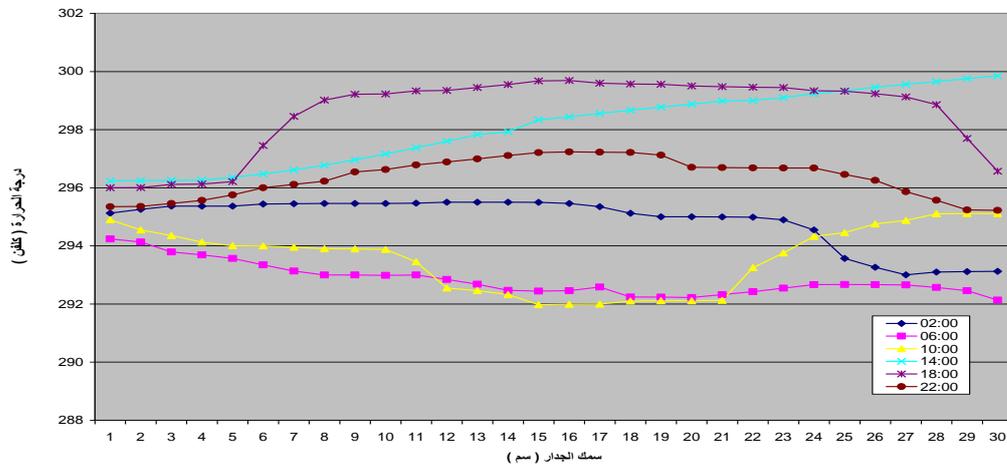
سادساً : عند مقارنة النتائج المتحصلة لأنواع المختلفة من الجدران الناقلة و الخازنة للحرارة التي شملتها الدراسة يظهر بأن الجدار الخرساني بسمك 20 سم هو الأفضل من بين هذه الأنواع .



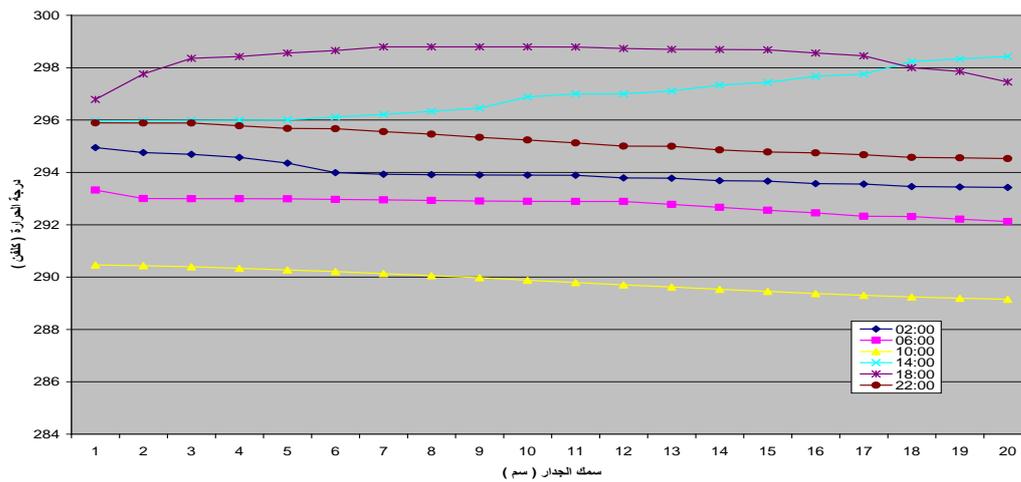
شكل (10): توزيع درجات الحرارة خلال جدار خرساني بسمك 10 سم



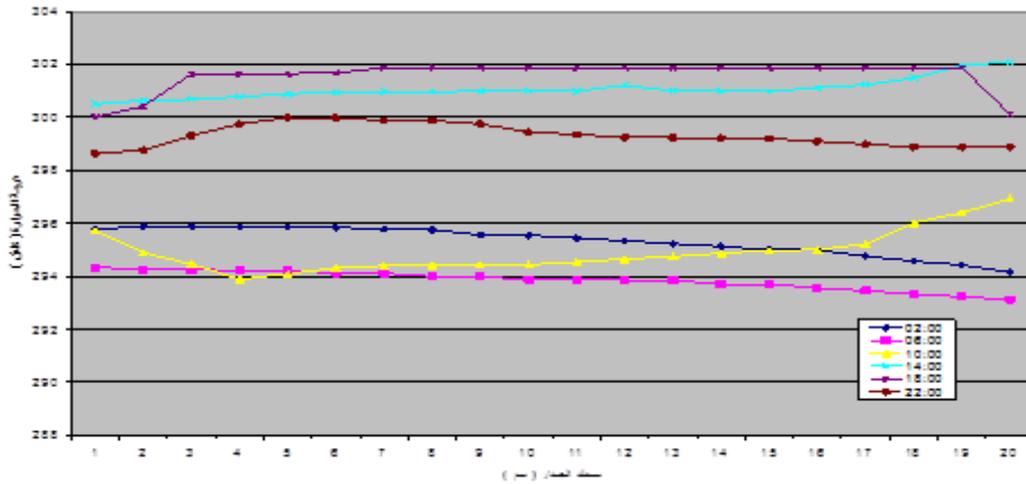
شكل (11): توزيع درجات الحرارة خلال جدار خرساني بسمك 20 سم



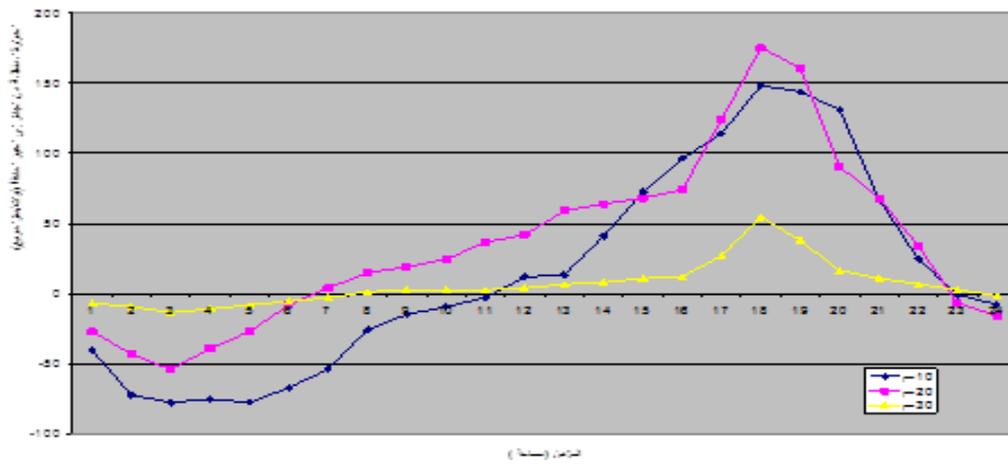
شكل (12): توزيع درجات الحرارة خلال جدار خرساني بسمك 30 سم



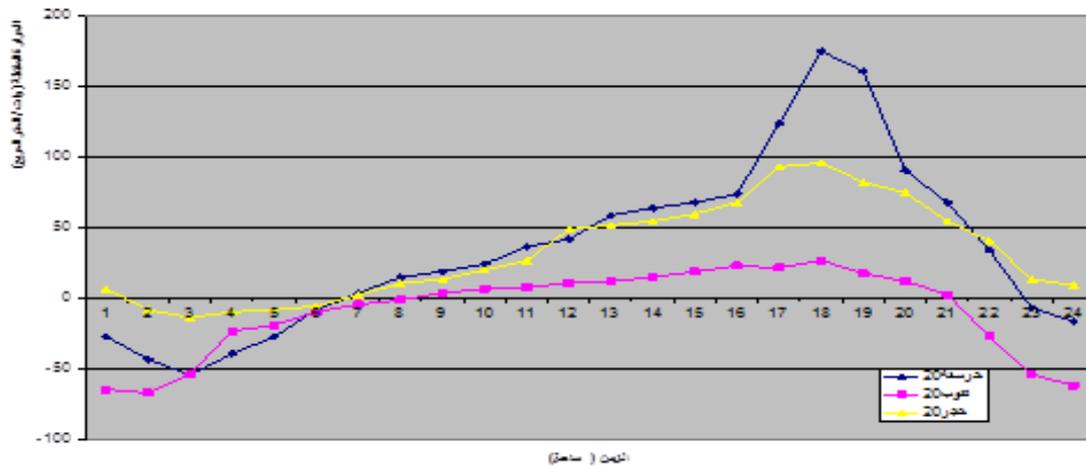
شكل (13): توزيع درجات الحرارة خلال جدار من الطابوق بسمك 20 سم



شكل (14): توزيع درجات الحرارة خلال جدار من الحجر بسمك 20 سم



شكل (15): الحرارة المنتقلة الى الحيز المدفأ من جدار خرساني بسمك مختلف



شكل (16): الحرارة المنتقلة الى الحيز المدفأ من جدار حراري مصنوع من مواد مختلفة بسمك 20 سم



المصادر :

1-Grog HP, advances In Solar Energy Technology (Volume 2), Redel Publishing Company, 1987.

2 – E.L. Morse, Warming & Ventilating Apartment by San's Ray, U.S. Patent 246, 1881.

3 – F. Trombe, Maisons solaire, technique de l'ingénieur, 1974.

4 – R.B. Yedder and E. Bilgen, "Natural convection and conduction in Trompe wall system", International Journal of Heat & Mass Transfer, Vol. 34, no 4-5, Pages 1237-1248, 1991.

5 – J.A. duffie and W.A. Beckman, "Solar Engineering of Thermal Process", Wiley-inter science, New York, NY, USA, 2nd edition 1991.

6 – B.A. Jubran, M.A. Hamdan, And W. Manfaloti, "Modeling free convection in a Trombe Wallm Renewable Energy", Vol. 1, no 3-4, Pages 351-360, 1991.

7 – T.G. Ozbalta and S.Kartal, "Heat gain through Trombe Wall using solar energy in a cold region of Turkey", Scientific Research and Essays, Vol. 5, no. 18, Pages 2768-2778, 2010.

8 – W. Smolec and A. Thomas, "Some aspect of Trompe Wall heat transfer models, Energy Conversion and Management", Vol. 32, no 3, Pages 269-277, 1991.

9 – J.D. Balcome, Passive Solar Buliding, the MIT Press, Cambridge, Mass, 1992.

10 – J. Jie, C.L. Luo, W. Sun, H.C. Yu, W. He, And G. Pie, "An improve approach for the application of Trombe Wall system to building construction with selective thermo-insulation facades", Chinese Science Bulletin, Vol. 54, No. 11, Pages 1949-1956, 2009.

11 – B.K. Koyunbaba, Z.Yilmaz, and K.Ulgen, "An approach for energy modeling of a building integrated photovoltaic (BIPV) Trombe wall system", Energy and building, 2011.

12 – عباس احسان فاضل، "مقارنة الاداء الحراري لعدد من أنظمة التدفئة العاملة بالاسلوب السلبي"، رسالة ماجستير مقدمة الى قسم هندسة المكنائن والمعدات، الجامعة التكنولوجية، 1999.

13 – عدنان محمد حسين، "تحليل اداء جدار الخزن الحراري المسامي لغرض التدفئة بالاستخدام السلبي للطاقة الشمسية"، رسالة ماجستير مقدمة الى كلية الهندسة / جامعة تكريت، 2002.



14 – Holman JP, Heat Transfer, Mc Graw Hill Book Company, 1981.

15 – Warren h," Principle of Engineering Heat Transfer", Van Nostrand, 1967.

16 – Jui Sheng Hsieh, "Solar Energy Engineering", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1986.

17 – Patankar Suhas, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Taylor & Francis.

18 – Paulson, Programming with Fortran 77, Granada Company, 1981.