

The effect of the use of the heat storage wall with a water network on cooling loads in the building

(Received 31 / 8 / 2017. Accepted 24 / 10 / 2017)

□ ABSTRACT □

The research is a software study and an experimental practical study to study the effect of the use of the heat storage wall with a water pipe network on cooling loads in the buildings, which in turn reduces the consumption of conventional energy and improves the sense of thermal comfort of the residents in construction, In the climatic conditions of Lattakia.

The software study showed by using simulation program TRNSYS ,the best direction for the heat storage wall is the south direction, As the flow of water within the pipe network increases, the total cooling load drops, and we gain an increasing the saving ratio by 3[%] when increasing the flow from 30[L/h.m²] to 110[L/h.m²]. The total cooling load decreases as the pipe spacing is lower, so the optimum value of the spacing is 0.1[m] by saving ratio 50[%].

The research showed that the optimum value of the external diameter of the pipes is 0.02[m] , and the saving ratio is 52.6% . As the external diameter increases, the increase in the saving ratio becomes less than 0.5% and we get a better saving ratio when the temperature of the water entering the pipes decrease.

The research showed that the use of the heat storage wall with a water network led to a decrease in the temperature of the internal air clearly, which provides a feeling of comfort for the residents of the building.

The experimental practical study showed a approximate match of the results obtained through the software study when using the program, and confirmed the low internal air temperature clearly, which in turn leads to a decrease in total cooling load.

Key words: Heat storage wall, Thermal energy storage, Passive cooling, TRNSYS program.

تأثير استخدام الجدار الخازن للحرارة المزود بشبكة مائية على أحمال التبريد في المبنى

الدكتور رامي جورج*

سلفانا سهيل جنبلاط**

(تاريخ الإيداع 31 / 8 / 2017. قُبِلَ للنشر في 24 / 10 / 2017)

□ ملخّص □

نقدم في هذا البحث دراسة برمجية وتجريبية لتأثير استخدام الجدار الخازن للحرارة المزود بشبكة مائية على أحمال التبريد في المباني، والذي يؤدي بدوره إلى ترشيد استهلاك الطاقة التقليدية، وتحسين الشعور بالراحة الحرارية للقاطنين في البناء، عند الشروط المناخية لمدينة اللاذقية.

أظهرت الدراسة البرمجية عن طريق برنامج المحاكاة TRNSYS، أن أفضل توضع للجدار الخازن للحرارة هو اتجاه الجنوب، وأنه مع زيادة تدفق الماء ضمن شبكة الأنابيب ينخفض حمل التبريد الكلي، حيث وصلت الزيادة في نسبة التوفير [3%] عند زيادة التدفق من $30 \text{ [L/h.m}^2\text{]}$ إلى $110 \text{ [L/h.m}^2\text{]}$. ووجدنا أيضاً أن حمل التبريد الكلي ينخفض كلما كان التباعد بين الأنابيب أقل، وتبين أن القيمة المثلى للتباعد هي 0.1 [m] بنسبة توفير [50%]. كما أظهر البحث أن القيمة المثلى للقطر الخارجي للأنابيب هي 0.02 [m] ، وتكون نسبة التوفير [52.6%]، حيث مع زيادة القطر الخارجي عن هذه قيمة يصبح مقدار الزيادة في نسبة التوفير أقل من [0.5%]. ونحصل على نسبة توفير أفضل عند انخفاض درجة حرارة دخول الماء إلى الأنابيب.

أظهر البحث أن استخدام الجدار الخازن للحرارة المزود بشبكة مائية أدى إلى انخفاض في درجة حرارة الهواء الداخلية بشكل واضح، مما يؤمن الشعور بالراحة للقاطنين في البناء.

أظهرت الدراسة التجريبية العملية تطابق تقريبي للنتائج التي تم الحصول عليها من خلال الدراسة البرمجية عند استخدام برنامج TRNSYS، وأكدت على انخفاض درجة حرارة الهواء الداخلية بشكل واضح، وهذا بدوره يؤدي إلى انخفاض حمل التبريد الكلي.

الكلمات المفتاحية: أنظمة الطاقة الشمسية السلبية، الجدار الخازن للحرارة، تخزين الطاقة الحرارية، التبريد

السلبى، برنامج محاكاة TRNSYS.

* أستاذ - قسم هندسة القوى الميكانيكية الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية الكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

** طالبة دراسات عليا (ماجستير) - كلية الهندسة الميكانيكية الكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

مقدمة

أصبح الطلب على الطاقة متزايداً نتيجة زيادة عدد السكان، وارتفاع أسعار الوقود التقليدي، وتوقع نفاذه في المستقبل القريب، إضافة للتلوث الناتج عن مخلفات هذا الوقود. مما دعى للبحث عن مصادر بديلة للطاقة (طاقة رياح، طاقة شمسية، طاقة نووية....).

يمكن استخدام الطاقة الشمسية لتوفير ظروف راحة حرارية مناسبة داخل المباني السكنية بطريقتين رئيسيتين أولاً: بأنظمة الطاقة الشمسية الفعالة وهي تعتمد على استغلال الطاقة الشمسية وبشكل غير مباشر عن طريق تدوير الوسيط بواسطة مضخة أو مروحة، وتبذل فيها طاقة خارجية لتحويل الأشعة الشمسية إلى طاقة حرارية. ثانياً: أنظمة الطاقة الشمسية السلبية وهي تقوم باستغلال الطاقة الشمسية بشكل مباشر، حيث لا تستخدم فيها طاقة خارجية وهي تسمح للحرارة بالجريان إلى النظام المدروس بطريقة طبيعية بدون وجود نظام ميكانيكي، وذلك عن طريق عناصر المبنى من المواد والواجهات والنوافذ [1].

يبقى موضوع فيزيائية البناء وعناصره الإنشائية ومكوناته الأساسية من صلب اهتمامات المهندسين الباحثين الذين يدرسون أساليب تأمين الراحة الحرارية للحيز الداخلي للبناء، وتسهم الإجراءات التصميمية المعمارية والإنشائية لاستغلال الطاقة السلبية على نحو واسع في تغطية احتياجات التدفئة أو في توفير المياه الساخنة.

حيث أجريت الكثير من الأبحاث العالمية بهدف تخفيض الأحمال الحرارية للأبنية، ورفع كفاءة استخدام المباني إلى مستوى أعلى، والوصول إلى المباني المستدامة من خلال التطبيق الملائم لاستراتيجيات التصميم السليبي والنشط واستخدام الطاقات المتجددة [2]. بالإضافة إلى إيجاد حلول مبتكرة تهدف إلى تحسين أداء الطاقة في البناء مثل التحسين في تصميم جدار ترومب من خلال جوانب مختلفة، وقاموا بإجراءات إضافية لتحسين الأداء الحراري للجدار صيفاً (التظليل بأنواعه، التهوية، واستخدام الستائر) [3][4]. وأجريت أبحاث لتطوير المباني المستدامة من خلال دمج جدار ترومب مع خلايا الشمسية [5]. كما أنجزت أبحاث أخرى لدراسة استخدام المواد متغيرة الطور في الجدران الخارجية للمباني، حيث أكدت هذه الأبحاث على أن وجود هذه المواد تساعد على التقليل من الطاقة اللازمة لنظام التكييف في فصل الصيف، وتبين أن إدراج طبقة من هذه المواد يحسن من أداء الجدران الخازنة للحرارة، ويؤمن الراحة الحرارية بشكل مدهش في فصل الشتاء أيضاً [6][7]. أما التوجه الأكثر حداثة كان إلى تزويد جدار البناء بشبكة أنابيب شعرية ودراسة السلوك الحراري لجدار المبنى وتحديد المتغيرات المثلى لهذه الشبكة مع التحليل الأمثل لموقع الشبكة ضمن الجدار [8][9].

انطلاقاً مما سبق يجب التنبيه إلى أن تقليل في الأحمال الحرارية لا يقتصر فقط على احتياجات الطاقة في التدفئة بل أيضاً إلى ضرورة التقليل من احتياجات الطاقة للتبريد، حيث أنها تصل في البلدان ذات المناخ الحار من 2 - 3 مرات من الحاجة للتدفئة السنوية. فيمكن للراحة الحرارية أن تكون محققة في الأبنية ذات معدل حرارة أعظمي حوالي 31.7°C ، وذلك بوسائل تصميمية لمبنى مناسب، والتي تجعل الاستخدام المتكرر لوحدات تكييف الهواء غير مبرراً في هذه الأبنية، حيث أجريت أبحاث كثيرة ومختلفة مثل استخدام الأسطح الباردة [10] أو عن طريق تطبيق لاقط شمسي سقفي [11] لتحسين الظروف الحرارية في الأماكن غير المكيفة، وأظهرت الأبحاث أن هذا النوع من الأسطح هو حل فعال في تكنولوجيا المباني المستدامة.

يبين الجدول (1) الرموز والمصطلحات.

جدول (1) الرموز والمصطلحات

الرمز	المصطلح
Q_c	حمل التبريد الكلي
\dot{m}	تدفق الماء
s	التباعد بين الأنابيب
d	القطر الخارجي للأنابيب
$T_{w(in)}$	درجة حرارة دخول الماء
T_w	فرق درجات الحرارة للماء
t	الزمن
[%]	نسبة التوفير

أهمية البحث وأهدافه

تعتبر واجهات البناء وخصوصاً الواجهة الجنوبية من أهم عناصر البناء التي تستخدم لامتنصص كمية من الطاقة الشمسية الساقطة عليها، وذلك عن طريق إدخال تقنيات هندسية حديثة مثل جعل هذا الجدار جداراً خازناً للحرارة مزود بشبكة من الأنابيب بحيث يكون هذا الإجراء متكاملًا مع الشكل المعماري، والتوصل إلى تشييد مباني مستدامة ذات استهلاك منخفض للطاقة (عن طريق تأمين الماء الساخن أو التدفئة أو التبريد) ومتلائم مع الاحتياجات الحرارية المطلوبة (الجدار الخازن للحرارة) للسكان فيها.

يعتبر الجدار الخازن للحرارة المزود بشبكة مائية نوع جديد من تكنولوجيا استخدام الطاقة الشمسية السلبية، وذلك من خلال استخدام الهياكل الخرسانية المكشوفة كماصات للطاقة الشمسية من أجل أن يتم استخدامها كلاقط حراري شمسي منخفض التكلفة في المباني السكنية. يتكون اللاقط الشمسي الخرساني المقترح من لوح خرساني عمودي يتضمن أنابيب، وتكمن الفائدة من هذا النوع السليبي من الجدران بامتصاص الطاقة الشمسية الساقطة على الجدران الجنوبية نهاراً، وتسخين الماء المار ضمن الأنابيب، وأيضاً استخراج الحرارة من البيئة المحيطة ليلاً من خلال امتصاص هذه الحرارة من قبل الماء البارد المتدفق في الأنابيب.

يهدف البحث إلى نمذجة مبنيين سكنيين، ضمن برنامج (TRNSYS) [12] أحدهما تقليدي والأخر يحوي جدار خازن للحرارة مزود بشبكة أنابيب مائية، ومن ثم إجراء المحاكاة (Simulation) لهذين المبنيين بغية المقارنة بين نتائجهما المعبرة عن السلوك الحراري للمباني من خلال متغير وسطي يومي سنوي (درجات الحرارة) لإظهار تأثير الجدار الخازن للحرارة في تخفيض أحمال التكييف، وبالتالي ترشيد استخدام الطاقة التقليدية، وتحديد كفاءته في المحافظة على شروط الراحة الحرارية للقاطنين في المباني، كما يهدف البحث إلى دراسة بعض المتغيرات ذات الصلة بشبكة الأنابيب المائية عند الشروط المناخية لمدينة اللاذقية.

طرائق البحث ومواده

استخدمنا بغية انجاز هذا البحث أولاً برنامج المحاكاة (TRNSYS)، والذي يعد من برامج المحاكاة الأكثر انتشاراً في العديد من مراكز الأبحاث العالمية لتقييم السلوك الحراري للأبنية، حيث يأخذ بالحسبان تأثير متغيرات متعددة

كالمعطيات المناخية ومكونات واتجاه البناء، بالإضافة إلى تأثير استخدام الجدار الخازن للحرارة وخواصه. حيث يقوم البرنامج بإجراء محاكاة لسلوك الحراري للبناء خلال فترة زمنية محددة وفقاً للمتغيرات السابقة، وفي نهاية المحاكاة نستطيع معرفة مقدار الانخفاض في أحمال التبريد، وأيضاً الارتفاع في درجة الحرارة الداخلية من أجل خواص، ومتغيرات مختلفة للجدار الخازن للحرارة، وبالتالي نستطيع التوصل إلى نتائج مثلى لتجاوز بعض المشاكل التصميمية كتحديد المتغيرات، وتلعب دوراً مهماً في تصميم شبكة الأنابيب المائية كالفطر الخارجي للأنابيب، والتباعد بين الأنابيب، التي يصعب تجريبياً الإحاطة بها لأن ذلك يتطلب تكلفة كبيرة. ثانياً التطبيق التجريبي من أجل التأكد من فعالية الجدار الخازن للحرارة المزود بشبكة أنابيب مائية في تخفيض درجة الحرارة الداخلية للمباني وصحة النتائج التي توصلنا إليها عند إجراء المحاكاة.

لتحقيق الهدف الأول من البحث وهو المحاكاة قمنا بنمذجة غرفتين متشابهتين أبعاد كل منهما $(3 \times 3 \times 3)$ [m] وتحوي كل منهما على نافذة أبعادها (1×1.5) [m] على الجدار الشرقي، أما مكونات البناء فهي الجدران الخارجية (الشمالية/الشرقية/الغربية/الجنوبية) للغرفة المرجعية تتكون من ثلاث طبقات: طبقة وسطى مؤلفة من بلوك أسمنتي مفرغ سماكة 20 [cm] وتوريق أسمنتية سماكة 2 [cm] لكل من الطبقة الداخلية والطبقة الخارجية، أما بالنسبة للجدران الخارجية للغرفة المزودة بجدار خازن للحرارة المزود بشبكة أنابيب مائية فهي مماثلة لما سبق، ولكن الجدار الخارجي الخازن للحرارة المزود بشبكة أنابيب مائية لهذه الغرفة يتكون من ثلاث طبقات: طبقة مؤلفة من صفين من بلوك أسمنتي المفرغ سماكة 10 [cm] تثبت شبكة الأنابيب بينهما لتشكيل الطبقة النشطة وتوريق أسمنتية سماكة 2 [cm] لكل من الطبقة الداخلية والطبقة الخارجية، بنية السقف للغرفتين مكونة من ثلاث طبقات، الطبقة الداخلية توريق أسمنتية سماكة 1.5 [cm] بلوك أسمنتي مفرغ هوردي سماكة 20 [cm] وبيتون مسلح سماكة 10 [cm]، أما الأرضية للغرفتين الطبقة الأولى من البلاط 5 [cm]، الطبقة الثانية من جص رملي سماكة 2.5 [cm] والطبقة الأخيرة من خرسانة إنشائية سماكة 40 [cm].

تم إجراء المحاكاة الساعية لكلا الغرفتين عند نفس المعطيات المناخية لمدينة اللاذقية، ثم تم مقارنة نتائج المحاكاة بين الحالتين من أجل خواص مختلفة للجدار النشط الخازن للحرارة المزود بشبكة أنابيب مائية.

يبين الجدول (2) الخواص الفيزيائية الحرارية (الفيزيائية الحرارية) لمواد البناء.

يبين الجدول (3) خواص شبكة الأنابيب المائية والجدران والسقف والأرضية للبناء.

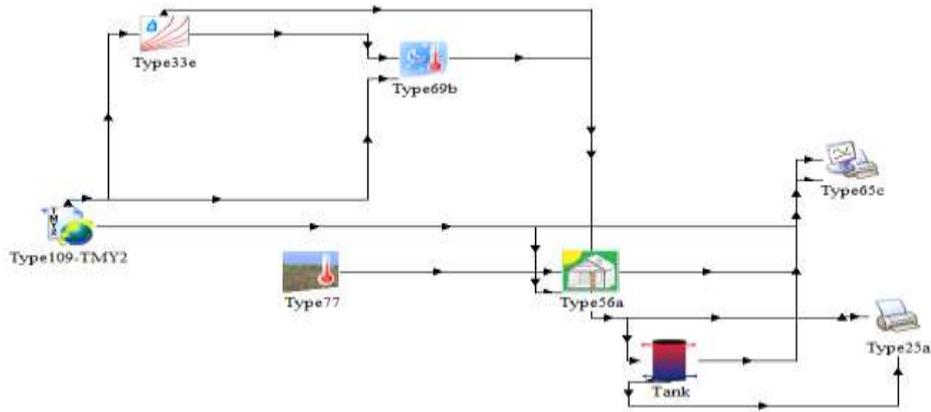
جدول (2) الخصائص الفيزيائية لمواد البناء

المادة	الايصالية الحرارية λ [kJ/h.m.K]	السعة الحرارية النوعية C_p [kJ/kg.K]	الكثافة P [kg/m ³]
توريق أسمنتية	2.16	1	1200
بلوك إسمنتي عادي . مفرغ	4.68	0.365	1800
خرسانة إنشائية	7.56	1	2400
بلوك إسمنتي عادي . هوردي	3.42	0.88	1400
بلاط بحصة	5.76	0.95	2450
جص رملي	6.26	0.84	2240

الجدول (3) خواص شبكة الأنابيب المائية والجدران والسقف والأرضية

البيان	القيم	الواحدة
سماكة الجدار	0.2	m
عامل انتقال الحرارة الكلي للجدران	2.315	W/m ² K
سماكة السقف	0.24	m
عامل انتقال الحرارة للسقف	2.416	W/m ² K
سماكة الأرضية	0.32	m
عامل انتقال الحرارة للأرضية	2.125	W/m ² K
التباعد بين الأنابيب	متغيرة	–
تدفق الماء ضمن شبكة الأنابيب	متغير	[L/h.m ²]
السعة الحرارية النوعية للسائل ضمن الأنابيب (الماء)	4.18	kJ/kg K
درجة حرارة دخول الماء للأنابيب	متغيرة	°C
القطر الخارجي للأنابيب	متغير	m
الايصالية الحرارية لمادة الأنابيب (البلاستيك)	0.24	W/m K

يبين الشكل (1) مخطط لمكونات النظام وفق برنامج المحاكاة TRNSYS الخاص بالبناء المدروس، ورقم كل مكون وعملية ربط هذه المكونات مع بعضها البعض من أجل محاكاة السلوك الحراري للبناء. إن كل مكون هو عبارة عن برنامج جزئي يدعى عادة Type ويعرّف كل Type برقم مميز يرمز إلى وظيفة المكون. إن المكون الرئيسي في نظام المحاكاة TRNSYS الخاص بالبناء هو Type56a ويرمز إلى البناء متعدد المناطق الحرارية (Multi-Zone building)، ويتم فيه إنشاء البناء المدروس، وإدخال أبعاد وخواص مكوناته. والمكون Type69b يرمز إلى درجة حرارة السماء الفعالة (درجة الحرارة الرطبة) التي هي أقل دائماً من درجة حرارة الهواء. والمكون Type77 يرمز إلى درجة الحرارة السطحية للأرض. والمكون Type25a يرمز للطابعة والمكون Type65d يرمز إلى الراسم لإظهار النتائج التي يتم الحصول عليها من البرنامج بعد إدخال الثوابت والمتغيرات المتعلقة بكل مكون. تم الحصول على قيم الإشعاع الشمسي اللحظي الساقط على سطح أفقي، والمعطيات المناخية لمدينة اللاذقية باستخدام برنامج Meteonorm. حيث يتم الحصول على ملف المعطيات المناخية بالتنسيق المعياري TMY والذي تتم قراءته من قبل برنامج TRNSYS باستخدام مكون (Type109-TMY2) الذي يقوم بحساب شدة الإشعاع الشمسي الساقط على جدران البناء.



الشكل (1) لوحة محاكاة البناء وفق برنامج TRNSYS

أما من أجل تحقيق الهدف الثاني من البحث قمنا بتنفيذ نموذجين مصغرين بأبعاد $[1*1*1]$ بنفس مكونات الغرفتين المستخدمتين في المحاكاة، حيث سنعتمد القيم المثلى لشبكة الأنابيب المائية التي تم الحصول عليها من خلال إجراء المحاكاة السابقة وهي تدفق الماء ضمن الأنابيب، التباعد بين الأنابيب، القطر الخارجي للأنابيب، لدرجة حرارة دخول الماء إلى شبكة الأنابيب المائية. تبين الأشكال (2)(3) مراحل تشييد الغرفة المرجعية التي تمثل الغرفة (غير المزودة بجدار خازن للحرارة).



الشكل (3) تشييد الغرفة المرجعية
(إكساء بالمونة الاسمنتية)



الشكل (2) تشييد الغرفة المرجعية
(بناء)

تبين الأشكال (4)(5)(6)(7) مراحل تشييد الغرفة ذات الجدار خازن للحرارة المزود بشبكة أنابيب مائية.



الشكل (5) تشييد الغرفة ذات الجدار الخازن للحرارة
(تركيب الأنابيب)



الشكل (4) تشييد الغرفة ذات الجدار الخازن للحرارة
(بناء)



الشكل (7) تشييد الغرفة ذات الجدار الخازن للحرارة
(إكساء بالمونة الاسمنية)

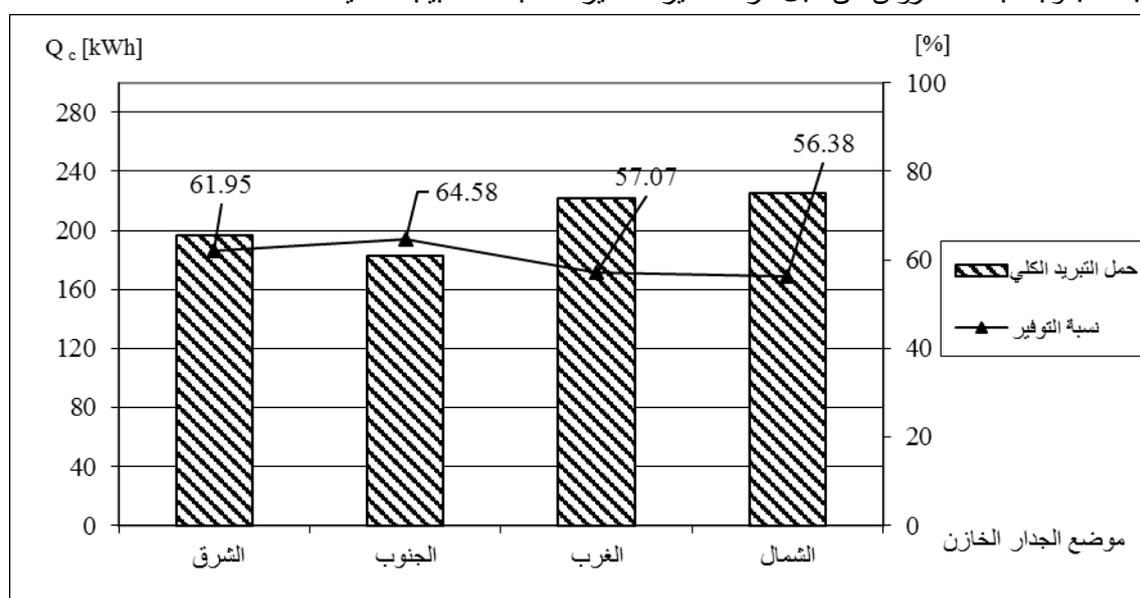
الشكل (6) تشييد الغرفة ذات الجدار الخازن للحرارة
(تركيب الأنابيب)

النتائج والمناقشة

1- تأثير اتجاه الجدار الخازن للحرارة المزود بشبكة أنابيب مائية على حمل التبريد الكلي:

تم إجراء المحاكاة الساعية باستخدام البرنامج TRNSYS خلال كامل فصل الصيف لغرفتين الأولى بجدار خازن للحرارة مزود بشبكة أنابيب مائية والثانية مرجعية، حيث ينجز برنامج المحاكاة حساب أحمال التبريد الساعية، و يقوم البرنامج أيضاً بحساب حمل التبريد الكلي في فصل الصيف من أجل اتجاهات مختلفة للجدار الخازن للحرارة المزود بشبكة أنابيب مائية، ومقارنتها مع حمل التبريد الكلي للغرفة المرجعية من أجل حساب نسبة التوفير في حمل التبريد.

يبين الشكل (8) تأثير موضع الجدار الخازن للحرارة المزود بشبكة أنابيب مائية على حمل التبريد الكلي ونسبة التوفير في هذا الحمل في فصل الصيف للغرفة المدروسة. نلاحظ من الشكل (8) أن أفضل اتجاه للجدار الخازن للحرارة المزود بشبكة أنابيب مائية هو الجنوب حيث ينخفض حمل التبريد الكلي بمقدار [64.58%]. إن نسبة التخفيض لبقية الاتجاهات موضحة في الشكل (8). بناءً على ذلك تم اعتماد الجدار الخازن للحرارة المزود بشبكة أنابيب مائية باتجاه الجنوب للبناء المدروس من أجل دراسة تأثير المتغيرات لشبكة الأنابيب المائية.



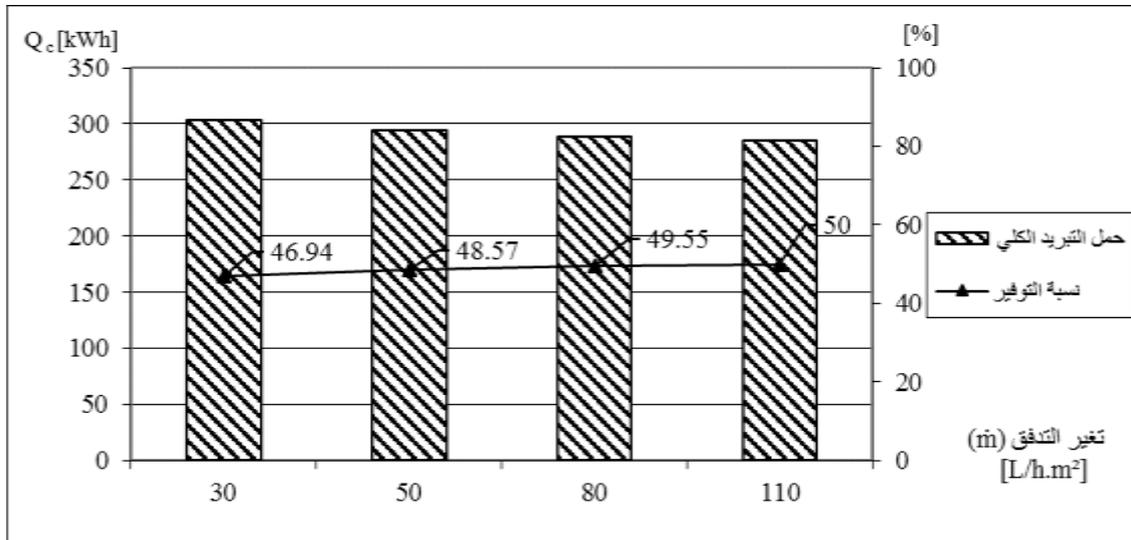
الشكل (8) تأثير اتجاه الجدار الخازن للحرارة المزود بشبكة أنابيب مائية على حمل التبريد الكلي ونسبة التوفير

2- تأثير تدفق الماء ضمن شبكة الأنابيب للجدار الخازن للحرارة على حمل التبريد الكلي:

يبين الشكل (9) تأثير تغير تدفق الماء ضمن شبكة الأنابيب للجدار الخازن للحرارة، وذلك وفقاً لمغيرات محددة لشبكة الأنابيب المائية (القطر الخارجي للأنابيب [10mm]، وتباعد الأنابيب [10cm]، درجة حرارة دخول الماء إلى الأنابيب [20 °C])، حيث تم إجراء المحاكاة الساعية باستخدام البرنامج TRNSYS خلال كامل فصل الصيف للغرفة المزودة بجدار خازن للحرارة عند تدفقات مختلفة للماء.

نلاحظ من الشكل أن نسبة الانخفاض في حمل التبريد الكلي [46.94%] عند تدفق [30 L/h.m²] بينما تكون نسبة الانخفاض [48.57%] عند تدفق [50 L/h.m²] وعند زيادة التدفق إلى [80 L/h.m²] ينخفض حمل التبريد الكلي بنسبة [49.55%] ونلاحظ أن نسبة التخفيض تزداد عند زيادة التدفق حيث تبلغ [50%] عند تدفق [110 L/h.m²]. لذلك نستنتج من الشكل (9) أنه مع زيادة التدفق سينخفض حمل التبريد الكلي وهذا يعود إلى أن الماء يقوم بامتصاص الإشعاع الشمس الساقط على الجدار الجنوبي ويسخن بدلاً عنه وبالتالي تقل كمية الحرارة

الممتصة من قبل الجدار والتي هي حسب ما هو متعارف سوف تنتقل إلى داخل المبنى وأنه عند زيادة التدفق سيتم تبريد الجدار بشكل أفضل وتقليل كمية الحرارة المنتقلة إلى داخل المبنى والتي سوف تؤدي إلى رفع درجة الحرارة الداخلية.



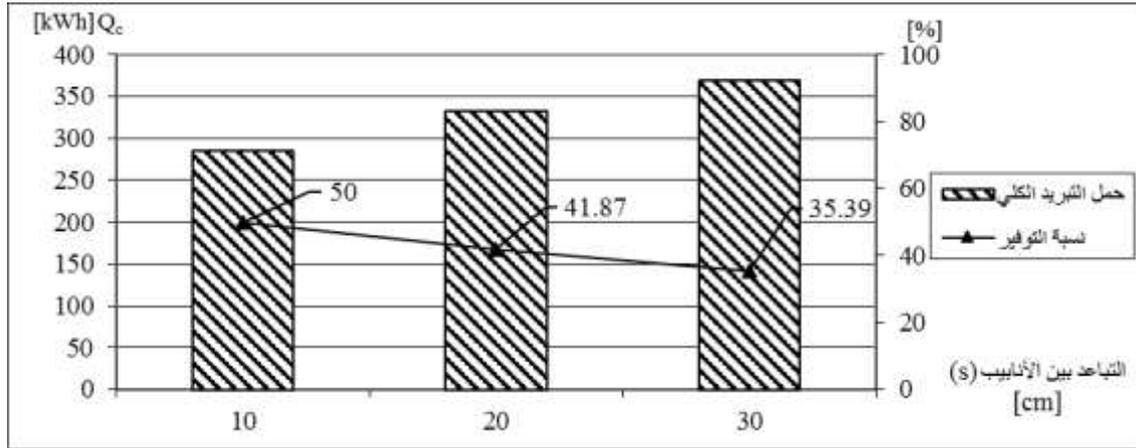
الشكل (9) تأثير تغير تدفق الماء ضمن شبكة الأنابيب للجدار الخازن للحرارة المزود بشبكة أنابيب مائية على حمل التبريد الكلي ونسبة التوفير.

3- تأثير التباعد بين الأنابيب ضمن شبكة الأنابيب للجدار الخازن للحرارة على حمل التبريد الكلي:

تم إجراء المحاكاة الساعية باستخدام البرنامج TRNSYS خلال كامل فصل الصيف للغرفة ذات الجدار خازن للحرارة المزود بشبكة أنابيب مائية لحساب حمل التبريد الكلي في فصل الصيف، من أجل تحديد التباعد الأمثل بين الأنابيب، عند التدفق الأعظمي الأمثل $110 [L/h.m^2]$ ، والذي حصلنا عليه وفقاً لنتيجة المحاكاة السابقة، أما بالنسبة لقطر الأنابيب الخارجية فتم اختياره $10[mm]$ ، درجة حرارة دخول الماء إلى الأنابيب $20 [^{\circ}C]$.

يبين الشكل (10) أنه مع زيادة التباعد بين الأنابيب يزداد حمل التبريد، وبالتالي تتخضع نسبة التوفير، بسبب نقص مساحة شبكة الأنابيب، وبالتالي الكمية الماء المتواجد أصبحت أقل، مما يسمح للجدار بامتصاص كمية أكبر من الطاقة الشمسية، وبالتالي انتقال كمية حرارة أكبر إلى داخل الغرفة.

نلاحظ من الشكل (10) أن التباعد الأمثل هو $0.1[m]$ حيث تبلغ نسبة التوفير في حمل التبريد الكلي $50[%]$ ، بينما تصل إلى $41.8[%]$ عند تباعد $0.2[m]$ ، أما عند تباعد $0.3[m]$ بين الأنابيب سيكون مقدار الانخفاض في حمل التبريد الكلي بمقدار $35.4[%]$ فقط.

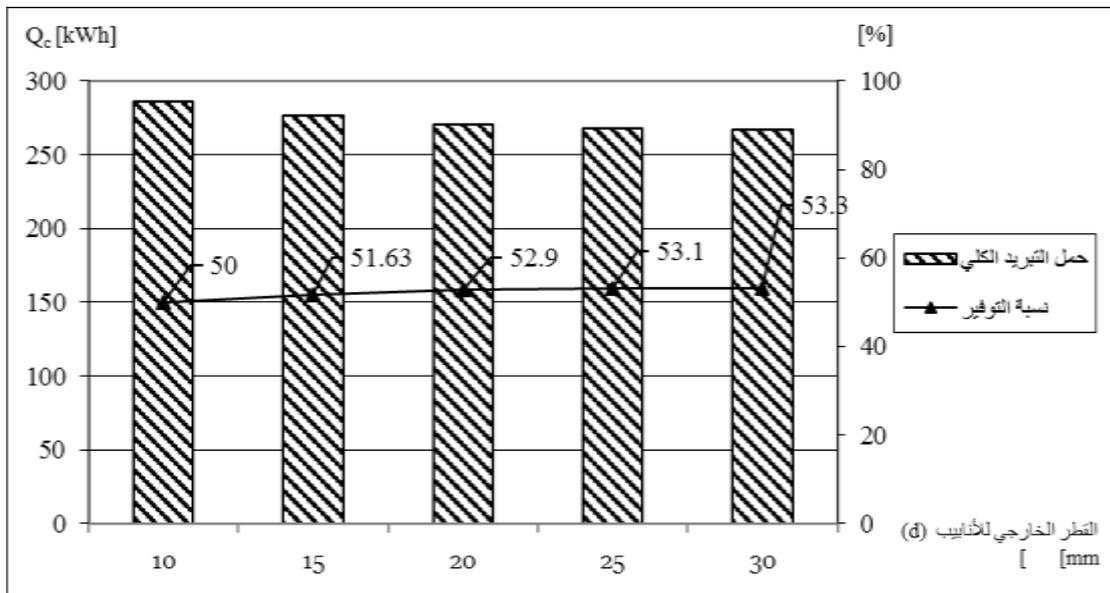


الشكل (10) تأثير التباعد بين أنابيب الشبكة المائية للجدار الخازن للحرارة على حمل التبريد الكلي ونسبة التوفير

4- تأثير القطر الخارجي للأنابيب ضمن الشبكة المائية للجدار الخازن للحرارة على حمل التبريد الكلي:

تم إجراء المحاكاة الساعية باستخدام البرنامج TRNSYS خلال كامل فصل الصيف للغرفة ذات الجدار الخازن للحرارة المزود بشبكة أنابيب مائية، وقيم مختلفة للقطر الخارجي للأنابيب لتحديد القطر الخارجي الأمثل، وذلك بعد اعتماد المتغيرات المثلى السابقة.

نلاحظ من الشكل (11) أن نسبة التوفير في حمل التبريد الكلي هي [50%]، [51.6%]، [52.6%] عند أقطار خارجية للأنابيب [10mm]، [15mm]، [20mm] على التوالي. ونستنتج من ذلك أن القطر المثالي هو [20mm]، وأنه عند أي زيادة في القطر الخارجي عن هذه القيمة يكون مقدار الزيادة في التوفير [0.5%]، وبالتالي من الناحية الاقتصادية تكون هذه النسبة غير مجدية.

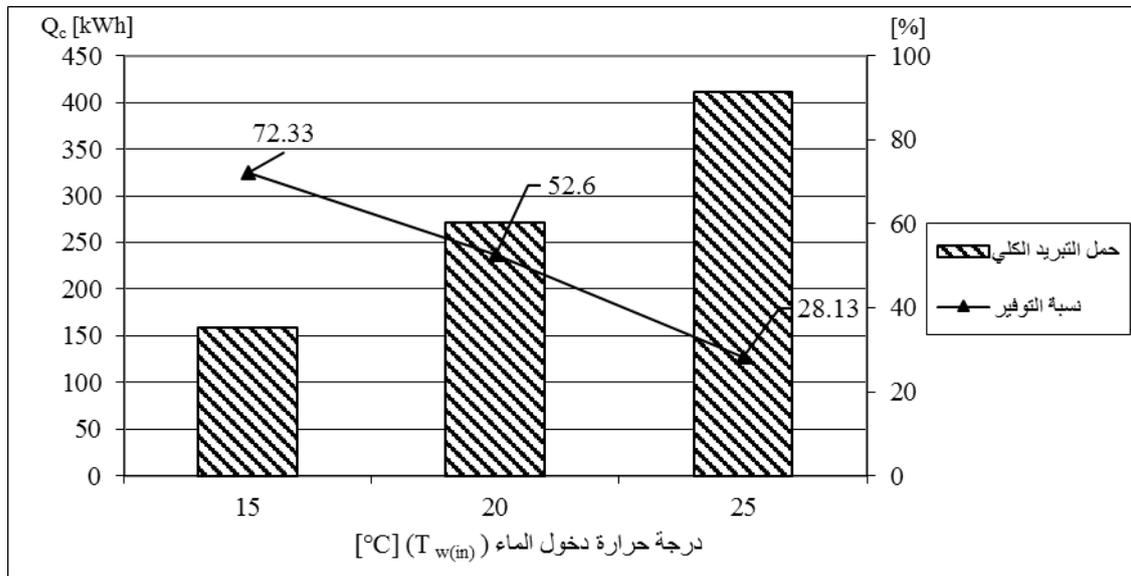


الشكل (11) تأثير القطر الخارجي للأنابيب ضمن الشبكة المائية للجدار الخازن للحرارة المزود بشبكة أنابيب مائية على حمل التبريد الكلي ونسبة التوفير.

5- تأثير درجة حرارة دخول الماء إلى أنابيب الشبكة المائية للجدار الخازن للحرارة على حمل التبريد الكلي:

لقد تم إجراء المحاكاة الساعية باستخدام البرنامج TRNSYS خلال كامل فصل الصيف للغرفة ذات الجدار خازن للحرارة المزود بشبكة أنابيب مائية من أجل درجة حرارة دخول ماء مختلفة إلى أنابيب الشبكة المائية، وذلك عند أخذ القيم المثلثي لشبكة الأنابيب المائية التي تم الحصول عليها من المحاكاة السابقة.

نلاحظ من الشكل (12) أنه كلما انخفضت درجة حرارة الماء الداخل إلى الأنابيب ينخفض حمل التبريد الكلي وبالتالي تزداد نسبة التوفير الإجمالية حيث تبلغ [%]72.3 عند درجة حرارة الماء [°C]15، تبقى نسبة التوفير جيدة عند ارتفاع حرارة الماء إلى [°C]20 حيث تصبح [%]52.6، وتصبح [%]28.13 عند درجة حرارة دخول [°C]25. وهذا ناتج عن إمكانية امتصاص أكبر للإشعاع الشمسي الساقط على الجدار وسحب حرارة أكبر من الجدار لمنع انتقالها إلى داخل الغرفة.

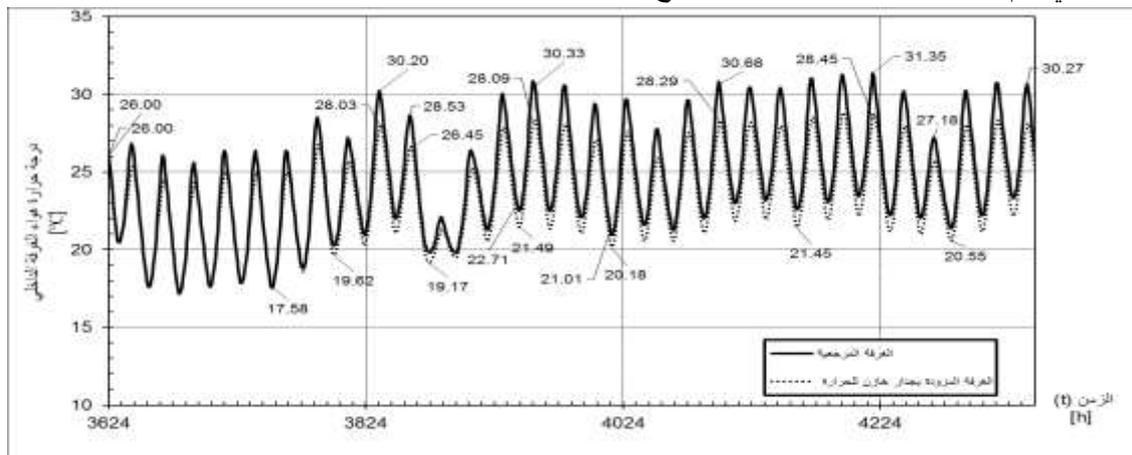


الشكل (12) تأثير درجة حرارة دخول الماء إلى أنابيب الشبكة المائية للجدار الخازن للحرارة المزود بشبكة أنابيب مائية على حمل التبريد الكلي ونسبة التوفير.

6- تأثير استخدام الجدار الخازن للحرارة على درجة حرارة الهواء الداخلية:

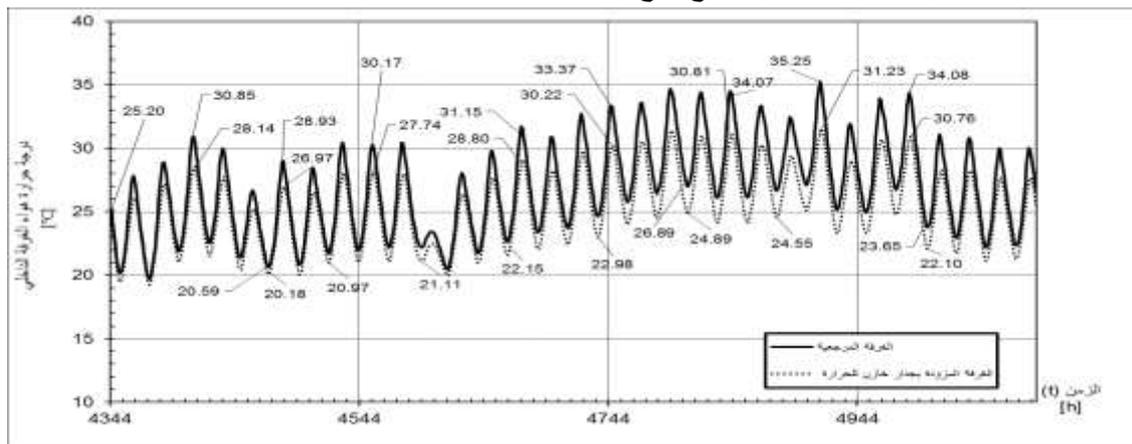
تبين الأشكال (13) و(14) و(15) و(16) تأثير استخدام الجدار الخازن للحرارة على درجة حرارة الهواء الداخلي للغرفة المدروسة خلال أشهر فصل الصيف. نلاحظ من الأشكال السابقة الانخفاض الواضح في درجة حرارة هواء الغرفة المزودة بالجدار الخازن للحرارة مقارنة بالغرفة دون الجدار الخازن، نتيجة دور الجدار الخازن للحرارة في التبريد السلبي من خلال امتصاص وتخزين الحرارة في الماء المتدفق ضمن الأنابيب المائية، ومنع انتقالها إلى داخل الغرفة، حيث يقوم الماء بامتصاص الحرارة بالحمل والإشعاع من السطح الخارجي للجدار الخازن نهاراً، ليتم بذلك تسخين الماء بدلاً من تسخين الهواء الداخل للغرفة، أما ليلاً يقوم الماء بامتصاص الحرارة بالحمل والإشعاع من السطح الداخلي للجدار الخازن للحرارة وبالتالي تخفيض درجة الحرارة الداخلية، وهذا ما يضمن تحقيق الشعور بالراحة الحرارية للقاطنين داخل البناء.

نلاحظ من الشكل (13) أن أعلى مقدار للفرق في درجة حرارة الهواء الداخلية بين الغرفتين خلال الشهر السادس في يوم 25 حزيران الساعة 6 [p.m] وبلغ 2.9°C .



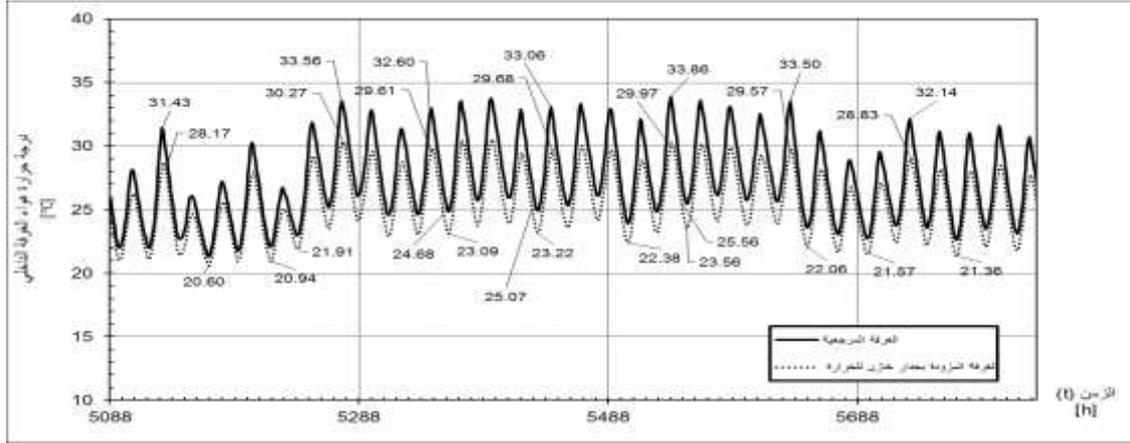
الشكل (13) تغير درجة حرارة الهواء الداخلي للغرفتين بدون ومع جدار خازن للحرارة خلال الشهر السادس لعام 2016

نلاحظ من الشكل (14) أنه في يوم 24 تموز عند الساعة 5 [p.m] حصل أعلى مقدار للفرق في درجة حرارة الهواء الداخلية بين الغرفتين خلال الشهر السابع وبلغ 4.02°C .



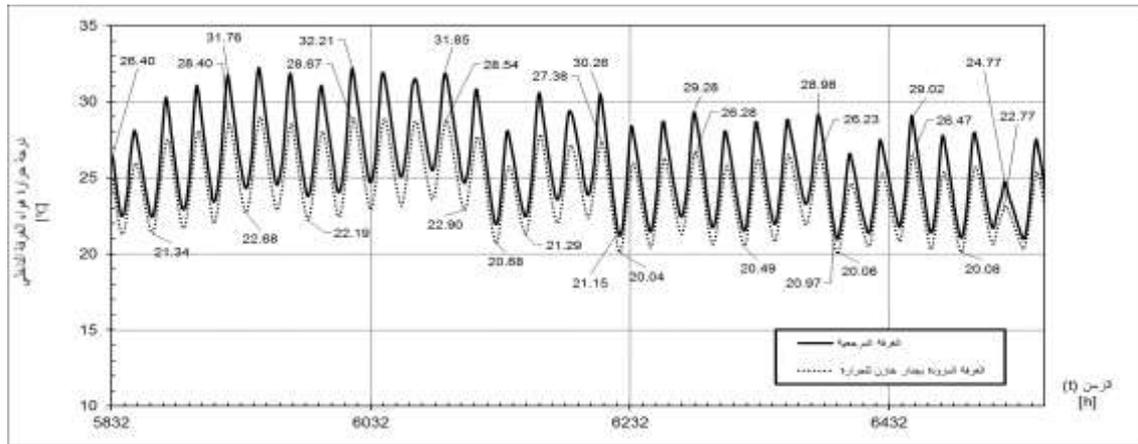
الشكل (14) تغير درجة حرارة الهواء الداخلي للغرفتين بدون ومع جدار خازن للحرارة خلال الشهر السابع لعام 2016

نلاحظ من الشكل (15) أنه في يوم 19 اب عند الساعة 4 [p.m] حصل أعلى مقدار للفرق في درجة حرارة الهواء الداخلية بين الغرفتين خلال الشهر الثامن وبلغ 3.93°C .



الشكل (15) تغير درجة حرارة الهواء الداخلي للغرفتين بدون ومع جدار خازن للحرارة خلال الشهر الثامن لعام 2016

نلاحظ من الشكل (16) أنه في يوم 8 أيلول عند الساعة 5[p.m] حصل أعلى مقدار للفرق في درجة حرارة الهواء الداخلية بين الغرفتين خلال الشهر التاسع وبلغ $3.76 [^{\circ}\text{C}]$.



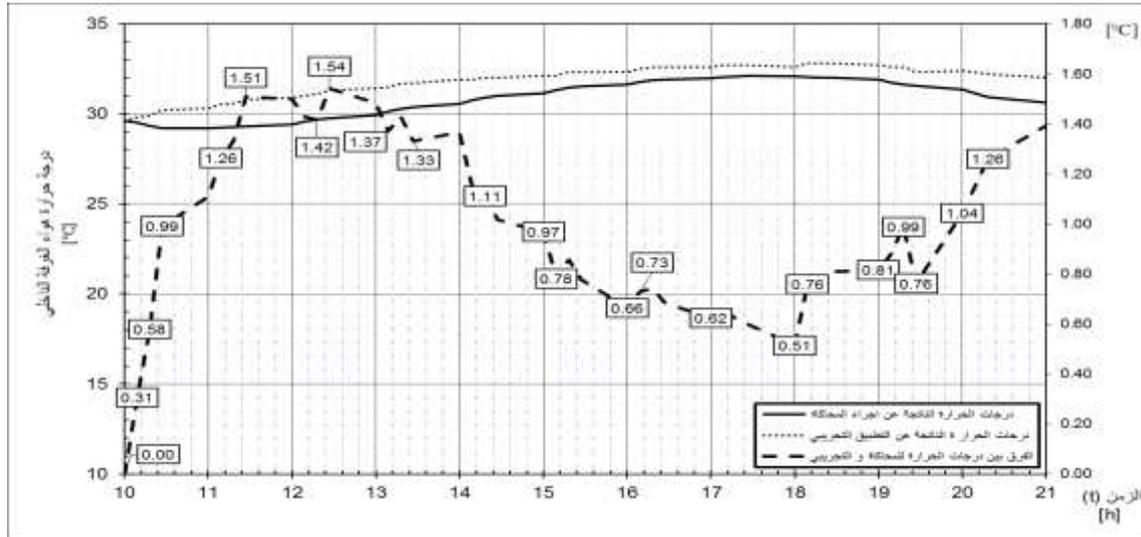
الشكل (16) تغير درجة حرارة الهواء الداخلي للغرفتين بدون ومع جدار خازن للحرارة خلال الشهر التاسع لعام 2016

نلاحظ مما سبق أن استخدام الجدار الخازن للحرارة المزود بشبكة مائية أدى إلى انخفاض في درجة حرارة الهواء الداخلية بشكل واضح، مما يؤمن الشعور بالراحة للقائنين في البناء، ويصل أعلى مقدار للفرق في درجة حرارة الهواء الداخلية بين الغرفتين إلى $4.02 [^{\circ}\text{C}]$ وذلك في يوم 24 تموز الساعة 5[p.m].

7- الدراسة التجريبية:

تم تشييد غرفتين متشابهتين أبعاد كل منها $1*1*1 [m]$ إحداهما مزودة بجدار خازن للحرارة (جدارها الجنوبي مزود بشبكة أنابيب مائية)، والأخرى مرجعية (جدارها الجنوبي غير مزودة بشبكة أنابيب مائية)، أما بالنسبة لمتغيرات شبكة الأنابيب المائية فهي كما تم تحديدها في نتائج المحاكاة السابقة وهي تدفق الماء ضمن الأنابيب $20 [L/h.m^2]$ ، التباعد بين الأنابيب $0.1 [m]$ ، القطر الخارجي للأنابيب $20 [cm]$. وتم إجراء قياس درجات الحرارة الداخلية للغرفتين باستخدام حساسات حرارية لقياس درجات الحرارة، ثم مقارنة هذه النتائج مع نتائج المحاكاة، وذلك في يوم 30/7/2017.

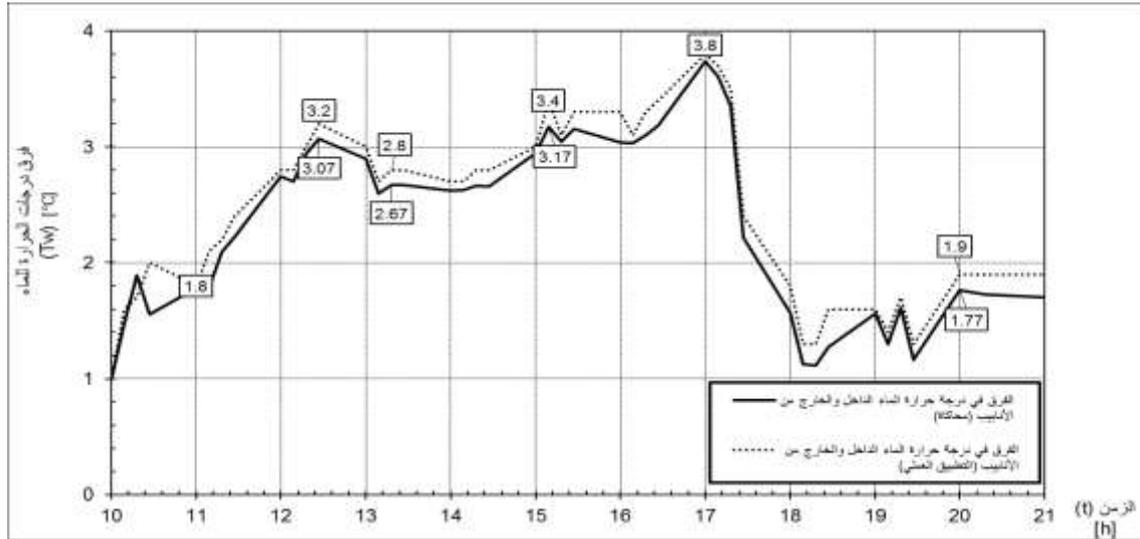
يبين الشكل (17) مقارنة بين درجة حرارة الهواء الداخلية للغرفة المزودة بجدار خازن للحرارة التي حصلنا عليها من خلال اجراء المحاكاة من ناحية، والنتيجة عن التطبيق العملي للجدار الخازن للحرارة من ناحية أخرى، حيث نلاحظ تقارب بالنتائج عند ساعات مختلفة من النهار، ولكن هذه النتيجة ليس على مدار ساعات اليوم، حيث نلاحظ من الشكل (17) أن أعلى قيمة للفرق بين درجات الحرارة قد بلغ [1.54°C] وذلك عند الساعة 12:45، بينما في أغلب ساعات المقارنة كان الفرق أقل من [1°C] .



يبين الشكل (17) مقارنة بين درجة حرارة الهواء الداخلية للغرفة المزودة بجدار خازن للحرارة الناتجة

عن إجراء المحاكاة ودرجة حرارة الهواء الداخلية للغرفة المزودة بجدار خازن للحرارة الناتجة عن التطبيق التجريبي والفرق بينهما.

يبين الشكل (18) مقارنة بين فرق درجة حرارة دخول الماء إلى شبكة الأنابيب وخروجه (برمجياً وعملياً)، حيث نلاحظ من الشكل (18) التقارب بالنتائج بشكل واضح .
 نلاحظ من الشكل (18) أن فرق درجات الحرارة بين دخول الماء وخروجه عملياً يتراوح بين [1-3.8] °C، حيث يبلغ عند الظهيرة هذا الفرق أكثر من [3°C] . وهذا يؤكد ما ذكرناه سابقاً عن الدور الفعال الذي يقوم به الماء لتخفيض درجة الحرارة الداخلية والذي ينعكس بدوره على تخفيض أحمال التبريد، وإمكانية استخدام هذا الماء بشكل أفضل من خلال توجيهه إلى لاقط شمسي وهذا ينعكس بشكل ايجابي على مردود اللاقط الشمسي.



يبين الشكل (18) مقارنة بين الفرق في درجة حرارة الماء الداخل والخارج من الأنابيب للغرفة المزودة بجدار خازن للحرارة الناتجة عن إجراء المحاكاة والفرق الناتجة عن التطبيق التجريبي.

الاستنتاجات والتوصيات

- بعد إجراء المحاكاة على غرفتين لدراسة تأثير استخدام الجدار الخازن للحرارة (المزود بشبكة أنابيب مائية) باستخدام برنامج المحاكاة TRNSYS نستنتج ما يلي:
- إن أفضل اتجاه للجدار الخازن للحرارة هو الاتجاه الجنوبي حيث نحصل على أكبر نسبة توفير في حمل التبريد تصل إلى [%]64.58.
- ينخفض حمل التبريد الكلي مع زيادة تدفق الماء ضمن شبكة الأنابيب للجدار الخازن للحرارة حيث عند تدفق $30 \text{ [L/h.m}^2\text{]}$ نحصل على نسبة توفير قدرها [%]46.94 بينما عند تدفق $110 \text{ [L/h.m}^2\text{]}$ تكون نسبة التوفير [%]50 أي بزيادة مقدارها [%]3.
- ينخفض حمل التبريد الكلي كلما كان التباعد بين الأنابيب أقل، فعند اخذ التدفق ضمن الأنابيب مساوي $110 \text{ [L/h.m}^2\text{]}$ ، والقطر الخارجي للأنابيب 10 [mm] وتباعد بين الأنابيب 0.3 [m] نحصل على نسبة توفير وقدرها [%]35.4 وعند تقليل التباعد بين الأنابيب إلى 0.1 [m] نحصل على زيادة في نسبة التوفير قدرها [%]15.
- انخفاض حمل التبريد الكلي مع زيادة القطر الخارجي للأنابيب المائية، والقيمة المثلى للقطر الخارجي هي 0.02 [m] ، وتكون نسبة التوفير [%]52.6، حيث أن أي زيادة في القطر الخارجي عن قيمة 0.02 [m] تكون زيادة في نسبة التوفير بمقدار أقل من [%]0.5.
- تزداد نسبة التوفير في حمل التبريد الكلي بمقدار [%]24 عند انخفاض درجة حرارة الماء الداخل إلى الأنابيب من $25 \text{ [}^\circ\text{C]}$ إلى $20 \text{ [}^\circ\text{C]}$.
- تنخفض درجة حرارة الهواء الداخلية بشكل واضح عند استخدام الجدار الخازن للحرارة مما يؤمن الشعور بالراحة للقائمين في البناء.
- تطابق نتائج المحاكاة مع نتائج التطبيق العملي في يوم 30/7/2017 بشكل تقريبي، من حيث درجة حرارة الهواء الداخلية للغرفة ذات الجدار الخازن للحرارة المزود بشبكة مائية، ودرجة حرارة خروج الماء من الأنابيب.

- نوصي بمتابعة البحث في دراسة تأثير المتغيرات الأخرى للجدار الخازن للحرارة المزود بشبكة أنابيب مائية على حمل التبريد (القطر الداخلي للأنابيب، امتصاصية الجدار، نوع الأنابيب المستخدمة...).
- نوصي بدراسة تأثير دمج الجدار الخازن للحرارة المزود بشبكة أنابيب مائية مع لاقط شمسي أو مقطر شمسي.
- نوصي أن تتم دراسة تأثير الجدار الخازن للحرارة المزود بشبكة أنابيب مائية على أحمال التدفئة في الشتاء.

المراجع

- [1]. جورج، رامي؛ ناعمة، وجية؛ قاسم، طلال؛ آرا صايغ، بورس؛ المصري، رضوان؛ عجيب، سليمان، المرجع في مبادئ الطاقة الشمسية الحرارية وتطبيقاتها. الطبعة (الأولى)، مطبعة جامعة البعث، سورية، 2009، 1-670.
- [2]. STEVANOVIC, S. *Optimization of passive solar design strategies: a review*. Renew Sustain Energy Rev, Vol. 25, 2013, 177-196.
- [3]. SHEN, J. *et al. Numerical study on thermal behavior of classical or composite Trombe solar walls*. Journal of Energy and Buildings, Vol. 39, 2007, 962-974.
- [4]. PERNA *et al. Trombe wall management in summer conditions: An experimental study*. Journal of Solar Energy, Vol. 86, 2012, 2839-2851.
- [5]. KASHIF, I. *et al. Performance evaluation of PV-Trombe wall for sustainable building development*. Journal of Procedia CIRP, Vol. 26, 2015, 624-629.
- [6]. IZQUIERDO, B. *et al. A numerical study of external building walls containing phase change materials (PCM)*. Journal of Applied Thermal Engineering, Vol. 47, 2012, 73-85.
- [7]. JIN, X.; ZHANG, S.; XU, X.; ZHANG, X. Effects of PCM state on its phase change performance and the thermal performance of building walls. Building and winter of Environment. Vol. 81, 2014, 334-339.
- [8]. SUN *et al. The applicability of the wall implanted with heat pipes in China*. Journal of Energy and Buildings. Vol. 104, 2015, 36-46.
- [9]. YU *et al. A thermo-activated wall for load reduction and supplementary cooling with free to low-cost thermal water*. Journal of Energy. Vol. 99, 2016, 250-265.
- [10]. KOLOKOTSA *et al. Numerical and experimental analysis of cool roofs application on a laboratory building in Iraklion, Crete, Greece*. Journal of Energy and Buildings, Vol. 55, 2012, 85-93.
- [11]. HASSAN & BELIVEAU. *Design, construction and performance prediction of integrated solar roof collectors using finite element analysis*. Journal of Construction and Building Materials, Vol. 21, 2007, 1069-1078.
- [12]. KLEIN, S. A. *et al., TRNSYS: a transient simulation program, User Manual*. University of Wisconsin-Madison, 2006, version 16.1, USA.