دراسة عددية وتجريبية لخزان الثلج في منظومات التكييف

د. حسن كريم عبد الله * د.نزار فرج أنطوان * محمد عبد الخبير علي *

تاريخ التسلم: ٢٠٠٥/٥/٣
تاريخ القبول: ٢٠٠٧/٣/١٤

الخلاصة

اجريت دراسة عملية و نظرية لتصميم و تحليل اداء منظومة تكييف لبناية عامة تعمل وفق تقنية خزان الثلج (ice storage system). ولوجود عدة انماط من احمال التبريد فقد تم تصميم المنظومة لتعمل على الانماط الثلاثة و تلبي حاجات حمل التبريد للبناية. و قد تم اختيار بناية و حددت ساعات اشغالها و ساعات عدم اشغالها حيث تم تشغيل منظومة شحن خزان الثلج اثناء فترة عدم الاشغال و لحساب سمك الثلج المتكون حول الانابيب استخدمت طريقة الانثالبي مع نظام مطابقة الاحداثيات كما تم اختبار النتائج عمليا و ذلك ببناء جهاز عملي مختبري لقياس سمك الثلج المتكون حول الانبوب مع الزمن . اعطيت النتائج تطابقا جيدا مع الطرقة النظرية و ظهر بعض الانحراف في قيمة السمك و ليس في تصرف المخطط بسبب اهمال انتقال الحراة بالحمل في الحسابات النظرية. اما عند ساعات اشتغال منظومة التكييف (ساعات اشغال البناية) فقد تم عمل عدة تصاميم و ذلك بتغيير نوع ترتيب الانابيب داخل الخزان (ترتيب خطي و متخالف) وتم اختيارعدة انواع من النسب بين مراكز الأنابيب " الخطوات الطولية (S_L) و الخطوات العرضية (S_T) ". ثم تم تحليل كل نمط لمعرفة المتغيرات و افضل التصاميم لكل نوع من انماط حمل التبريد. بينت الدراسة ان استخدام الترتيب المتخالف لكل النسب يعطي حجم خزان اصغر نسبيا من الترتيب الخطي للانابيب.كما ان زيادة النسب تودي الى زيادة واضحة في حجم الخزان و ذلك لان هذه الزيادة تقلل معامل انتقال الحرارة. و بينت الدراسة ايضا ان نمط حمل التبريد له اثر كبير على حجم خزان الثلج اللازم لمنظومة التكييف.

Numerical and Experimental Study of Ice Storage in Air Conditioning Systems

Abstract

An experimental and numerical study done to design and analysis ice storage in air conditioning system on building with three types of cooling load. The design system was active to produced thermal comfort to the building. The non-operating hours of the building was defining and used to collect ice on the out surface of pipes in the ice storage system. To predict the radius of the formatted ice an enthalpy method used with B.F.C. system used and the results compared with the experimental results from measuring the radius of the ice formatted in a rig build and run with the same boundary conditions. The theoretical results shown good coincident and the small deviation in the magnitude and not the distribution of the results is because we canceled the convection effect. In the operating hours of the building many types of pipes arrangement was examined (parallel and staggered), and many ratios of (S_L) and (S_T) in the ice storage. The study shows that the staggered arrangement is better for the three types of cooling load and always gives smaller volume of ice storage. In addition, the study shows that any increase in (S_L) and (S_T) cause increasing in the volume of ice storage. In addition, the study shows that the type of cooling load has great effect on the volume of ice storage.

* قسم هندسة المكائن والمعدات / الجامعة التكنولوجية/ بغداد -العراق

https://doi.org/10.30684/etj.25.2.12
2412-0758/University of Technology-Iraq, Baghdad, Iraq
This is an open access article under the CC BY 4.0 license http://creativecommons.org/licenses/by/4.0

١ - قائمة الرموز

A1 المسافة الأفقية والعمودية بين سمك الثلج لكل أنبوبين متجاورين و لكلا لترتيـــــــبين المتخالف والخطي (m) .

A2 المسافة القطرية بين سمك الثلج لكل أنبوبين متجاورين للترتيب المتخالف فقط (m).

AL نمط الحمل الحراري التنازلي للبناية (kW) .

A_S المساحة السطحية للثلج حول الأنبوب (m^2) .

A_C المساحة العمودية لدخول الماء الراجع الى الخزان (m^2) .

BL نمط الحمل الحراري التصاعدي للبناية (kW) .

CL نمط الحمل الحراري المتوسط للبنانية (kW) .

D قطر الأنبوب (m) .

DL نمط الحمل الحراري الحقيقي (العام) للبناية (kW) .

D_o قطر الثلج حول الانبوب (m) .

H الأنثالبي (kJ/kg) .

h_p معامل انتقال الحرارة الحملي للماء الداخل إلى الخزان بصورة جزئية ($W/m^2.℃$) .

h_t معامل انتقال الحرارة الحملي للماء الداخل إلى الخزان بصورة كلية ($W/ m^2.℃$) .

h_{fg} الحرارة الكامنة للانصهار (kJ/kg) .

$\bar{h}_o$ متوسط معامل انتقال الحرارة الحملي للجريان المتقاطع ($W/ m^2. ℃$) .

(i,j) نقاط توليد الشبكة .

K الموصلية الحرارية ($W/ m. ℃$).

L_t طول الانبوب داخل الخزان (m).

L_w عرض الخزان (m).

L_h إرتفاع الخزان (m).

m^o_{bi} معدل التدفق الكتلي للماء الداخل إلى الخزان بصورة جزئية (kg/s) .

m^o_{bT} معدل التدفق الكتلي للماء الداخل إلى الخزان بصورة كلية (kg/s) .

m_p كمية الثلج حول كل انبوب (kg) .

N عدد الانابيب الكلي داخل الخزان.

N_r عدد الصفوف الموجودة داخل الخزان.

N_t عدد الانابيب الموجودة في الصف الواحد.

Q_c طاقة التبريد المسحوبة التي يوفرها الخزان والمناظرة لكل حمل حراري نهاري وحسب حالة دخول الماء الى الخزان جزئياً أو كلياً (kW) .

q_{exa} الحمل الحراري النهاري الفعلي المطلوب أزالته حسب كل نمط (kW) .

q_p طاقة التبريد التي يوفرها الخزان لكل حمل في حالة دخول الماء الراجع بصورة جزئية للخزان (kW) .

q_t طاقة التبريد التي يوفرها الخزان لكل حمل في حالة دخول الماء الراجع بصورة كلية للخزان (kW) .

(R_1,R_2,R_3,R_4) النسب المستخدمة للخطوات الطولية والعرضية بين مراكزالأنابيب .

S_D المسافة القطرية بين مراكز الانابيب (m).

S_L المسافة بين مراكز الانابيب الواقعة في الصفوف المتجاورة طوليا (m).

S_T المسافة بين مراكز الانابيب الواقعة في الصفوف المتجاورة عرضيا (m).

t الزمن (s) .

T_f درجة حرارة الانصهار والأنجماد للماء (℃).
T_S درجة الحرارة في الطور الصلب (℃).
T_L درجة حرارة الماء الأبتدائية فوق الأنابيب داخل الخزان (الطور السائل) (℃).
V_∞ سرعة إنسياب الماء داخل الخزان (m/s).
V_{MAX} أعظم سرعة للماء داخل الخزان (m/s).
V_s حجم الخزان (m^3).
x,y الأحداثيات الكارتيزية في المجال الفيزيائي (m) .
η , ζ الاحداثيات العمومية اللابعدية في المجال الحسابي .
r الكثافة (kg/m^3) .
$Re_{D.MAX}$ أعظم عدد رينولدز عند اعظم سرعة .
Nu_D متوسط عدد نسلت.
Pr عدد برانتل.

٢ - المقدمة

كان نتيجة التفاوت والتذبذب الكبير الحاصل لأشكال الحمل الحراري النهاري في العديد من التطبيقات كما في (أماكن الصلاة ، المطاعم، المكتبات،...الخ)، حيث تتمثل هذه الأماكن بوجود ساعات محددة فقط لحدوث الحمل الأقصى(peak load) أثناء النهار ، أستوجب الأمر الى إستخدام تقنية خاصة لتقليل الكلفة التشغيلية لمحطة التبريد المركزية، وهي تقنية خزن الطاقة الحراري (TEST). إن أنظمة تكييف الهواء بأستخدام تقنية الخزن الحراري تستخدم معدات تقوم بأنتاج الثلج خلال فترة معينة وصهره في فترة أخرى لتغطية الأحمال الحرارية للبناية، ولتصميم مثل هذه الأنظمة فإن إحدى إستراتيجيتي التشغيل يجب أن تؤخذ بنظر الأعتبار وهما: أستراتيجية الحمل الكلي وأستراتيجية الحمل الجزئي. في أستراتيجية الحمل الكلي فإن الحمل الحراري النهاري اليومي يتم تغطيته بأستخدام الطاقة المجهزة من قبل الخزان فقط. أما في أستراتيجية الحمل الجزئي، فإن كل من جهاز التثليج والخزان يعملان على تغطية الحمل. والشكل (1) يوضح منظومة خزن الثلج النموذجية.

لقد إقتصر كل من الباحثين (Cary) [1] -إلى التطرق حول تصميم وحجم مكونات نظام خزن الثلج وأوضحوا بأنها لاتعتمد فقط على نوع إستراتيجية التشغيل وطاقة التبريد الكلية اليومية، وإنما أيضاً على عوامل أخرى مثل :أقصى حمل يحدد كمية التبريد المطلوبة عند أي وقت، الوقت الذي يحدث فيه اقصى حمل مهم جداً لأن معدل التبريد المجهز من قبل الخزان ليس ثابت، وإنما يقل بنقصان مستوى الخزين بمرور الوقت. وتوصلوا إلى وجود علاقة بين شكل حمل البناية وحجم الخزان وسعة جهاز التثليج. بينما قام[2] (Mohammed) بدراسة تأثير ربط وحدات الخزن مع نظام التثليج وبما إن الكلفة الأولية والكلفة الجارية هما المتعلقتان بالموضوع فقد إختار ثلاثة أنواع من أحمال التبريد هي على التوالي: الحمل الحراري اليومي، الحمل الحراري النهاري والحمل الحراري النهاري المنخفض. كما إستخدم إستراتيجيتي الحمل الجزئي والكلي ووجد بأن الإدخارات التي يمكن الحصول عليها من إستعمال إستراتيجية الخزن الجزئي مع أحمال التبريد النهارية أكبر من تلك التي يمكن الحصول عليها من أحمال التبريد اليومية. قدّم [3] (Duda) تقنية عددية للتعامل مع مسائل إنتقال الحرارة المتضمنة تغير الطور. طريقة الحل العددي إستخدمت لحل المعادلات ذات الصلة بالمسائل متعددة الأبعاد. أما [4] (Hirata & Matsui) فقد أجريا تجريبياً تكون الثلج وظاهرة الإنصهار في عملية إنتقال تزامنية (transient) لإسطوانات مرتبة بشكل متخالف (stagger) وخطي (in-line).

دراستهما بينت بأن معدل تكون الثلج يعتمد بصورة قوية على رقم رينولدز (Reynolds number)، درجة حرارة التبريد ، ودرجة ميل الإسطوانة العمودي على إتجاه الجريان. بينما قام [5] (Vick) بدراسة عملية الإنجماد والإنصهار على السطح الخارجي لأنبوب، وكانت درجة الحرارة عند مدخل الأنبوب(مائع التشغيل) أعلى أو أقل من درجة حرارة الإنجماد (T_f) لمادة تغير الطور (PCM). وقد إستخدم طريقة (Boundary element) للحصول على الحل التزامني(transient solution) في كل قطعة محورية.

في هذه الدراسة تم اختيار استراتيجية الحمل الكلي حيث يتم شحن الخزان باستخدام محلول ملحي مكون من الماء وكتلة الإيثالين بتركيز (30%) يستخدم هذا المحلول كمبرد(coolant) داخل الأنابيب بدرجات حرارة أقل من درجة حرارة الإنصهار للماء (T_f) خلال فترة ساعات(off-peak) وتكوين الثلج بشكل قطري حول الأنابيب والذي يتم إذابته خلال فترة من ساعات النهار (on-peak) لتغطية الحمل الموجود عن طريق تصميم خزان يلائم هذا الحمل ، وتتم عملية الإنصهار من خلال دخول الماء الى الخزان بدرجات حرارة ومعدلات مختلفة فوق حزمة من الأنابيب ولترتيبين للأنابيب المتخالف(stagger) والخطي (in-line) أي أن جريان الماء خارج الأنابيب ويفترض أن إنموذج الجريان يعيد نفسه من سطر الى السطر الذي يليه للتنظيمين الخطي والمتخالف.

٣ - الجانب النظري

إن أنظمة الخزن الحراري بإستخدام الثلج تستخدم الحرارة الكامنة للانصهار، حيث يحتاج الثلج الى ($335.5 kJ \setminus kg$) ليتحول الى ماء. تضمن الجانب النظري مرحلتين أساسيتين تمثلت الأولى : توضيح الإنموذج الرياضي لإيجاد تصميم مناسب وبشكل عام لخزان ثلج (ice-storage) عن طريق إيجاد أبعاد وحجم الخزان وكذلك عدد وترتيب الأنابيب داخل الخزان وللترتيبين الخطي والمتخالف وأختيارأفضل حالة لعدة نسب من الخطوات الطولية والعرضية ($\frac{S_L}{D_o}, \frac{S_T}{D_o}$) على التوالي وهي

$$R1 = (\frac{S_L}{D_o} = 1.1, \frac{S_T}{D_o} = 0.9))\ ،$$

$$R2 = (\frac{S_L}{D_o} = 1.25, \frac{S_T}{D_o} = 1)\ ،$$

$$R3 = (\frac{S_L}{D_o} = 2, \frac{S_T}{D_o} = 1.5)\ ،$$

$$R4 = (\frac{S_L}{D_o} = 1.5, \frac{S_T}{D_o} = 1.5)$$

بأستخدام عدة أقطار للإنبوب داخل الخزان(D= 10 ,12 , 20 cm) ولحالتي دخول الماءالراجع بصورة جزئية وكلية الى الخزان بحيث يضمن هذا الخزان تغطية الأحمال الحرارية المختلفة الشكل(النمط) أثناء فترة الإنصهار (on-peak) لنفس عدد الساعات وللأنماط المختلفة التالية : الحمل الحراري التنازلي (AL) (الحمل الأقصى في بداية اليوم) ، التصاعدي (BL) (الحمل الأقصى في نهاية اليوم)، المتوسط (CL) (الحمل الأقصى في منتصف اليوم)، والعام (DL) (الحمل الأقصى حسب موقعه خلال اليوم) . حيث إن الحمل الوحيد المتوفر لدينا هو الحمل العام(DL) لبناية عامة وقد تم تعميمه للأنماط المذكوره الأخرى للخروج بحصيلة حول كيفية وضع أسس التصميم النهائي لأي نمط من الأحمال الحرارية الذي يضمن تغطيتها هذا الخزان ولكل ساعة.

أما المرحلة الثانية، فقد تضمنت الحل العددي بأستخدام طريقة الأنثالبي لمسائل تغير الطور حول إنبوب آيزوثرملي محاط بمادة تغير الطور(PCM) وهو الماء

عند درجات حرارة ($T_L = 10,20,25\ ^{o}c$) لإيجاد سمك الثلج المناسب واللازم للتصميم في المرحلة الأولى .

١ - ٣ المرحلة الأولى (تصميم الخزان)

١ - ١ - ٣ تصميم الخزان ذو الترتيب المتخالف

تم ترتيب الأنابيب في هذا الخزان بشكل متخالف والشكل(2) يوضح أبعاد ومتغيرات الخزان ، وعليه حسب هذا الترتيب الموضح يمكن إيجاد العلاقات الخاصة بأبعاد وحجم الخزان بعد إختيار كل من النسب للخطوة الطولية($\frac{S_L}{D_o}$) والعرضية($\frac{S_T}{D_o}$) وكذلك حساب معامل إنتقال الحرارة الحملي الخارجي ($\bar{h}_o$) للجريان المتقاطع وبالتالي طاقة التبريد المتحررة(Q_C) والتي من المفروض تعادل أو تفوق الأحمال الحرارية النهارية. ويتم حساب الأبعاد كما يلي :-

$$S_L = \frac{L_W}{N_t} \qquad \text{.....(1)}$$

وكذلك

$$S_T = \frac{L_h - D_o}{N_r - 1} \text{.....(2)}$$

وعليه يمكن حساب حجم الخزان(V_S) بعد معرفة أبعاده وإضافة إرتفاع قليل للخزان مقداره($0.1 * L_h$) لدخول وتوزيع الماء الراجع من البناية .

$$V_S = L_t * L_W * (1.1 * L_h) \quad \text{.... (3)}$$

ويمكن إيجاد متوسط معامل إنتقال الحرارة الحملي الكلي ($\bar{h}_o$) للجريان المتقاطع من العلاقة الأتية:-

$$\bar{h}_o = \frac{\bar{Nu}_D * D_o}{k_W} \qquad \text{..... (4)}$$

حيث إن (k_w) الموصلية الحرارية للماء الراجع من البناية ، أما قيم (Nu_D) فيمكن إيجادها من المعادلات التجريبية الأتية[6] بالنسبة للترتيب المتخالف والتي تحتوي على نسبة خطأ ($\pm 15\%$):-

$$\bar{Nu}_D = 1.04 C_n \, \mathrm{Re}_{D.MAX}^{0.4} \mathrm{Pr}^{0.36} \left(\frac{\mathrm{Pr}}{\mathrm{Pr}_W}\right)^{\frac{1}{4}}$$

$$\text{For } \mathrm{Re}_{D.MAX} = (1-500) \qquad \text{... (5-a)}$$

$$\bar{Nu}_D = 0.71 C_n \, \mathrm{Re}_{D.MAX}^{0.5} \mathrm{Pr}^{0.36} \left(\frac{\mathrm{Pr}}{\mathrm{Pr}_W}\right)^{\frac{1}{4}}$$

$$\text{For } \mathrm{Re}_{D.MAX} = (500 - 10^3) \text{ ... (5-b)}$$

$$\bar{Nu}_D = 0.35 C_n \, \mathrm{Re}_{D.MAX}^{0.6} \mathrm{Pr}^{0.36} \left(\frac{\mathrm{Pr}}{\mathrm{Pr}_W}\right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{S_L}{S_T}\right)^{0.2}$$

$$\text{For } \mathrm{Re}_{D.MAX} = (10^3 - 2*10^5) \text{ ... (5-c)}$$

$$\bar{Nu}_D = 0.031 C_n \, \mathrm{Re}_{D.MAX}^{0.8} \mathrm{Pr}^{0.36} \left(\frac{\mathrm{Pr}}{\mathrm{Pr}_W}\right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{S_L}{S_T}\right)^{0.2}$$

$$\text{For } \mathrm{Re}_{D.MAX} = (2*10^5 - 2*10^6) \text{ ... (5-d)}$$

ويتم خلال كل (Δt) تغيير قطر الثلج و تتغير بذلك السرعة و رقم رينولد و تتغير المعادلة المستخدمة ايضا لحساب معامل انتقال الحرارة و يمثل (Pr_w) عدد برانتل عند السطح ويعتبر (C_n) قيمة ثابتة تساوي واحد ، بينما طاقة التبريد الكلية kW(Q_C) في كل ساعة لكل حمل للأنماط الأربعة والتي يتم مقارنتها مع كل حمل للأنماط المذكورة لمعرفة قابلية الخزان في إمكانية تغطيتها أم لا فتوجد من خلال العلاقة الأتية

$$Q_C = \bar{h}_o * A_S * N * \Delta T_{LMTD} * 10^{-3} \text{ ... (6)}$$

ويمكن حساب قيمة المتوسط اللوغارتيمي (ΔT_{LMTD}) لفرق درجات الحرارة بين الماء الداخل للخزان وسطح الثلج (ΔT_1) من جهة والخارج من الخزان وسطح الثلج (ΔT_2) من جهة أخرى بالعلاقة التالية :-

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \quad \dots (7)$$

٢ - ١- ٣ تصميم الخزان ذو الترتيب الخطي

تم ترتيب الأنابيب داخل الخزان في هذه الحالة بشكل خطي والشكل(3) يوضح أبعاد ومتغيرات الخزان، وعليه حسب هذا الترتيب الموضح يمكن إيجاد العلاقات الخاصة بأبعاد وحجم الخزان بعد إختيار كل من النسب للخطوة الطولية($\frac{S_L}{D_o}$) والعرضية($\frac{S_T}{D_o}$) وكذلك حساب معامل إنتقال الحرارة الحملي الخارجي ($\bar{h}_o$) للجريان المتقاطع وبالتالي طاقة التبريد المتحررة(Q_C) .

ولحساب الأبعاد كما يلي :-

$$S_L = \frac{L_W - 2 * A1 - D_o}{N_t - 1} \quad \dots (8)$$

وكذلك

$$S_T = \frac{L_h - D_o}{N_r - 1} \quad \dots (9)$$

وعليه يمكن حساب حجم الخزان(V_S) بعد معرفة أبعاده وإضافة إرتفاع قليل للخزان مقداره ($0.1 * L_h$) لدخول وتوزيع الماء الراجع من البناية .

$$V_S = L_t * L_W * (1.1 * L_h) \quad \dots (10)$$

ولإيجاد متوسط معامل إنتقال الحرارة الحملي ($\bar{h}_o$) لكامل مجموعة الأنابيب لهذا الترتيب ، فقد وجد من المعادلات التجريبية الأتية[6] قيم($\overline{Nu}_D$) والتي تحوي على نسبة خطأ ($\pm 15\%$) :-

$$\overline{Nu}_D = 0.9 C_n \, \mathrm{Re}_{D.MAX}^{0.4} \, \mathrm{Pr}^{0.36} \left(\frac{\mathrm{Pr}}{\mathrm{Pr}_W} \right)^{\frac{1}{4}}$$

For $\mathrm{Re}_{D.MAX} = (1 - 10^2)$ … (11-a)

$$\overline{Nu}_D = 0.52 C_n \, \mathrm{Re}_{D.MAX}^{0.5} \, \mathrm{Pr}^{0.36} \left(\frac{\mathrm{Pr}}{\mathrm{Pr}_W} \right)^{\frac{1}{4}}$$

For $\mathrm{Re}_{D.MAX} = (10^2 - 10^3)$ … (11-b)

$$\overline{Nu}_D = 0.27 C_n \, \mathrm{Re}_{D.MAX}^{0.63} \, \mathrm{Pr}^{0.36} \left(\frac{\mathrm{Pr}}{\mathrm{Pr}_W} \right)^{\frac{1}{4}}$$

For $\mathrm{Re}_{D.MAX} = (10^3 - 2 * 10^5)$ ... (11-c)

$$\overline{Nu}_D = 0.033 C_n \, \mathrm{Re}_{D.MAX}^{0.8} \, \mathrm{Pr}^{0.4} \left(\frac{\mathrm{Pr}}{\mathrm{Pr}_W} \right)^{\frac{1}{4}}$$

For $\mathrm{Re}_{D.MAX} = (2 * 10^5 - 2 * 10^6)$ ..(11-d)

وكماأستخدم للترتيب المتخالف من معادلات لحساب كل من ($\bar{h}_o$)، (ΔT_{LMTD}) وأخيراً (Q_C) .

٢ -٣ المرحلة الثانية(حسابات سمك الثلج)

تمثلت هذه المرحلة إستخدام الطرق العددية (طريقة الأنثالبي) لحل معادلة إنتقال الحرارة التزامنية(transient) لبعدين مع تغير الطور حول أنبوب آيزوثرملي محاط بمادة تغير الطور لإيجاد سمك طبقة الثلج المتكون خلال فترة من الزمن(15 ساعة) أثناء شحن الخزان خلال فترة (off-peak) باستخدام إستراتيجية الحمل الكلي والذي على ضؤءه(سمك الثلج) صمم الخزان . ولكون معادلة إنتقال الحرارة التزامنية مع تغير الطور في العمل الحالي تتفاعل مع أشكال غير منتظمة(irregular) ، فقد تم إستخدام إسلوب التوليد الشبكي للحالة التي تم دراستها ، وتمت عملية تحويل المعادلات من إحداثياتها الكارتيزية (x,y) الى الإحداثيات العامة (General Coordinate) (z ,h) وبما يلائم إستخدام نظام مطابقة إحداثيات الجسم (B.F.C) .

ومن الشكل(٤) فإن معادلة موازنة الطاقة للطاقة المنتقلة مع تغير الطور للبعدين (ξ,η) يمكن أن تكتب بصيغة

الإنثالبي(H) وكمايلي :-

$$\left.\begin{aligned} &A.k\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+2B.k\frac{\partial^2 T}{\partial x\partial h}+C.k\frac{\partial^2 T}{\partial h^2}\\ &+D.k\frac{\partial T}{\partial x}+E.k\frac{\partial T}{\partial h}\end{aligned}\right\}=r\frac{\partial H}{\partial t}$$

---(12)

حيث

$$A=\left(\frac{\partial^2 x}{\partial x^2}\right)^2+\left(\frac{\partial^2 x}{\partial y^2}\right)^2$$

$$B=\frac{\partial x}{\partial x}\frac{\partial h}{\partial x}+\frac{\partial x}{\partial y}\frac{\partial h}{\partial y}$$

$$C=\left(\frac{\partial h}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial h}{\partial y}\right)^2$$

$$D=\frac{\partial^2 x}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 x}{\partial y^2}$$

$$E=\frac{\partial^2 h}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 h}{\partial y^2}$$

حيث إن كل من الموصلية الحرارية (k) والكثافة (r) دالة لدرجة الحرارة (T)، وترتبط درجة الحرارة بالأنثالبي بالعلاقة الآتية :-

$$T=\begin{cases}H/C & H\le C.T_f\\ T_f & C.T_f\le H\le C.T_f+h_{fg}\end{cases}$$

...(13)

حيث إن (C) هي الحرارة النوعية $(kJ\setminus kg.^{o}c)$. ويمكن كتابة المعادلة(13) بالشكل الآتي :-

$$H(T)=\begin{cases}CT & T\ \mathbf{p}\ T_f\\ CT+h_{fg} & T\ \mathbf{f}\ T_f\end{cases}$$

... (14)

تم إختيار معادلات لابلاس لتحويل المجال الفيزيائي(x,y) (أسطوانة دائرية داخل أخرى) الى المجال الحسابي بدلالة (z,h) من خلال حل نوع من مسائل إنتقال الحرارة التوصيلي في الحالة المستقرة لبعدين مع إستخدام الشروط الحدية لدرخلت(Dirichlet) ويعطي حلها شبكة ناعمة وغير متقاطعة . ويمكن تمثيل معادلات لابلاس المتحولة من خلال العلاقتين :-

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 z}{\partial y^2}=z_{xx}+z_{yy}=0\ldots.\ (1^{o})$$

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 h}{\partial y^2}=h_{xx}+h_{yy}=0\ldots(16)$$

إن حل المجموعة أعلاه من المعادلات ينتج شبكة الإحداثيات المنحنية للمجال الحسابي (z,h) بحيث أن الحدود في المجال الفيزيائي(x,y) تنطبق مع واحد أو أكثر من خطوط الإحداثيات الحسابية . ويمكننا الآن إيجاد سمك الثلج (D_o) المتكون حول كل إنبوب بعد وضع الشروط الحدية الملائمة من خلال جعل سمك الثلج يمثل الحالة التي تكون فيها $(T_f=0)$ ، وبالتالي حساب كمية الثلج اللازمة لتصميم الخزان الحراري والمتكونة حول كل إنبوب (m_P) بالمعادلة الأتية:-

$$m_P=\frac{p}{4}\left[D_o^2-D^2\right]*r_{ICE}*L_t\ldots(19)$$

٤ - الجانب العملي

تم بناء جزء تكميلي للجهاز المختبري لغرض مقارنة النتائج النظرية المستحصلة من حل معادلة إنتقال الحرارة المزمن مع تغير الطور مع النتائج العملية الحقيقية. والذي هو عبارة عن إنبوب دائري مفرد موضوع بشكل أفقي داخل صندوق من زجاج البيرسبكس الشفاف متصل بوحدة التثليج التي تجهز مائع التشغيل (المبرد). المبرد يدور بدرجة حرارة أقل من درجة حرارة إنصهار الماء (T_f) داخل الأنبوب، ومن ثم يتكون الثلج حوله بمرور الزمن. خلال هذا الإختبار التجريبي تم قياس سمك الثلج المتكون مع الزمن من خلال إستخدام مسطرتين إحداهما مثبتة في الجانب العلوي من الصندوق بحيث أن الرقم (صفر) فيها يمثل بالضبط بداية الشق والذي يبدأ من

نصف قطر الإنبوب الداخلي المار في مركز الصندوق، بينما تتحرك المسطرة الأخرى بصورة عمودية على الأولى خلال الشق لقياس سمك الثلج الناتج بشكل دقيق تقريباً من خلال التدريجات الموجودة على المسطرة لفترات معينة من الزمن. ويوضح الشكل(5a,b) الجهاز المختبري وسمك الثلج المتكون على التوالي.

٥ - النتائج والمناقشة

تمثلت نتائج المرحلة الأولى طريقتين في تصميم الخزان الحراري ، حيث توضح الأشكال (6 و7) الطاقة الحرارية المتحصلة من الخزان في حالة دخول الماء بصورة جزئية وكلية إلى الخزان (q_t , q_p) بإستخدام الطريقة الأولى مقارنة مع حالة إستخدام النمط العام فقط (q_{exa}) للترتيبين الخطي في الأشكال (6a,b) والمتخالف في(7a,b)لنسبتين فقط من النسب الموضحة سابقاً وهي النسبة ($R1$) في الأشكال(6,7 a) والنسبة ($R3$) في(6,7 b) والتي أظهرت جميعاً مشكلة عدم تغطية الأحمال الحرارية النهارية للساعات الأخيرة في نهاية اليوم . حيث تم التصميم في هذه الطريقة على أساس اختيار كل من (N) ، (N_t) ، (N_r) ومن ثم إيجاد المساحة العمودية العامة (A_C) على الجريان وتم إختيار قطر الثلج ($0.196\ m$) الناتج من إختيار درجة حرارة مادة تغير الطور (الماء) (PCM) ($T_L = 10\ ^{o}c$) عند قطر آيزوثرملي ($D = 6\ cm$) .

نلاحظ من هذه الطريقة بأن قيمة الطاقة المسحوبة(q_p , q_t) من الخزان ذو الترتيب المتخالف (7a,b) أكبر منها للترتيب الخطي(6a,b) لنفس الساعة والنسبة والنمط المستخدم وهذا بسبب الزيادة التي تحدث في إضطراب الجريان الناجم من ضرورة التغلب على عقبة التنظيم المائل ذو الشكل المتموج بحيث إن هذه الهيئة تمنع تكون مناطق إنفصال كبيرة ، كما إن مساحة الخزان العمودية (A_C) لدخول الماء الراجع تكون أقل بقليل مما عليه للترتيب الخطي بسبب نقصان (L_w) في المعادلة(1) لما عليه للترتيب الخطي في المعادلة (8) مما يزيد كل من $(q_t, q_p\ , h_t, h_p, Nu, \mathrm{Re}_{D\max}, V_{MAX}, V_\infty)$ وكذلك فإن طبيعة معادلات (Nu) للترتيب المتخالف تكون ذات قيمة أكبر مما للترتيب الخطي لنفس مدى ($\mathrm{Re}_{D\max}$) لزيادة الثابت فيها وبالتالي زيادة كل من(h_p , h_t ,q_p ,q_t). كما نلاحظ مشكلة ازدياد عدد الساعات التي لايتم تغطيتها في نهاية اليوم عند زيادة النسب المستخدمة ($R3$) كما في الأشكال(6,7b) لكلا الترتيبين وبصورة أكبر الترتيب الخطي في الشكل (6 b) والتصرف الذي تظهر به الأشكال أعلاه نتيجة ازدياد كل من المسافات الطولية والعرضية (S_L, S_T) بين الأنابيب مما يزيد من المساحة العمودية لدخول الماء (A_C) وبالتالي إنخفاض قيم كل من $(q_t, q_p\ , h_t, h_p, Nu, \mathrm{Re}_{D\max}, V_{MAX}, V_\infty)$

ويمكن ملاحظة تأثير النسب للترتيب المتخالف كما في الترتيب الخطي ولكن الفرق في نهاية اليوم يكون أقل وأقرب إلى(q_{exa}, h_{exa}) وذات قيم أكبر في بداية النهار لأن طبيعة حساب (h_p, h_t) تعتمد على كون (V_{MAX}) للساعات الأولى محسوبة من المعادلة ($\frac{S_L}{2(S_D - D_o)}$) التي تزيد من قيمة (V_{MAX}) عما عليه ($\frac{S_L}{S_L - D_o}$) للترتيب الخطي، وكذلك فإن ($V\infty$) أكبر مما عليه للترتيب الخطي لأن (L_w) في المتخالف تكون أقل .

بينما توضح الأشكال (8 و9) إستخدام الطريقة الثانية لنفس نسب الترتيبين أعلاه وتوضح هذه الطريقة الصيغة الخاصة للتصميم والحل لمشاكل الطريقة الأولى في كلا الترتيبين والتي تضمن تغطية الأحمال

الحرارية النهارية بشكل كامل ولكافة الأنماط، حيث أعتمدت الحسابات على إيجاد وإستخدام مساحة واحدة فقط (A_C) محسوبة لآخر ساعة حمل حراري نهاري وتثبيتها لكافة الساعات الأخرى، وهذه المساحة تتغير حسب كل نمط لإختلاف الحمل عند آخر ساعة. نلاحظ زيادة واضحة في قيم كل من(h_p , h_t) في جميع الساعات عما عليه في الأشكال(6 و7) في الطريقة الأولى وبنفس سلوك وتصرف المنحنيات، وهذا نتيجة نقصان المساحة العمودية (A_C) من إستخدام الحل العكسي لآخر ساعة حمل وتعتمد الزيادة في القيم أعلاه حسب (A_C) المعتمدة بدورها على الحمل الموجود في آخر ساعة لكل نمط . كما يلاحظ للأشكال (8 و9)تطابق كل من(q_p) و(q_{exa}) في آخر ساعة دائماً وذلك لتطابق كل من (A_S)، ΔT_{LMTD} و($\dot{m}^o_{bi}$)عند نفس قيمة (A_C) .

ولكلا الطريقتين فإن مقدار الطاقة الناتجة في حالة دخول الماء الراجع الى الخزان كلياً (q_t) تكون أكبر من الطاقة لحالة الجريان الجزئي(q_p) وهذا يعود الى أن كتلة الماء الراجع للجريان الكلي($\dot{m}^o_{bT}$) هي أكبر قيمة للماء محسوبة عند أعظم حمل خلال ساعات النهار والتي تبقى ثابتة لكل الساعات مما هي عليه للجريان الجزئي($\dot{m}^o_{bi}$) والتي تتغير في كل ساعة حسب الحمل الموجود ، وبالتالي فإن زيادة ($\dot{m}^o_{bT}$) تزيد كل من

$(q_t, h_t, Nu, \mathrm{Re}_{D\max}, V_{MAX}, V_\infty)$

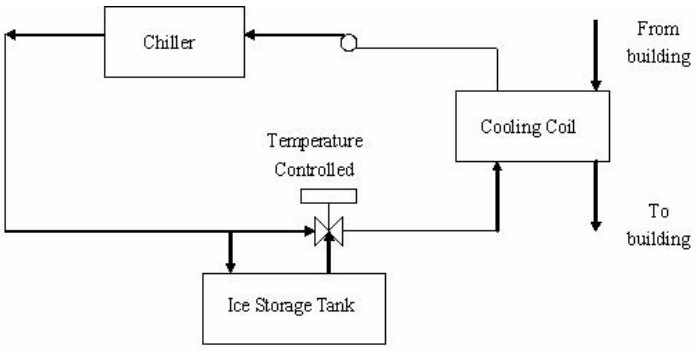
أما الشكل(10) فيوضح نقصان المساحة السطحية (A_S) بمرور الوقت للنمط الحراري العام نتيجة نقصان سمك الثلج (D_o)، كما يبين زيادة واضحة في قيمة ($A1$) بين مراكز الأنابيب لكلا الترتيبين.

فيما يوضح الشكل(11a,b) حجم الخزان ذو الترتيب المتخالف والخطي على التوالي للأنماط والنسب الأربعة الموضحة سابقاً. والتي تظهر بأن حجم الخزان يزداد بأزدياد النسب المستخدمة نتيجة زيادة كل من الخطوات الطولية والعرضية (S_L, S_T) وبالتالي زيادة أبعاد الخزان المصمم ، كما يلاحظ بأن حجم الخزان المطلوب للترتيب المتخالف أقل منه للترتيب الخطي وهذا يعود الى إسلوب حساب المساحة العمودية (A_C) للمتخالف والتي تكون أقل منه للخطي مما يقلل الحجم عند نفس النسبة والنمط المستخدم للترتيبين

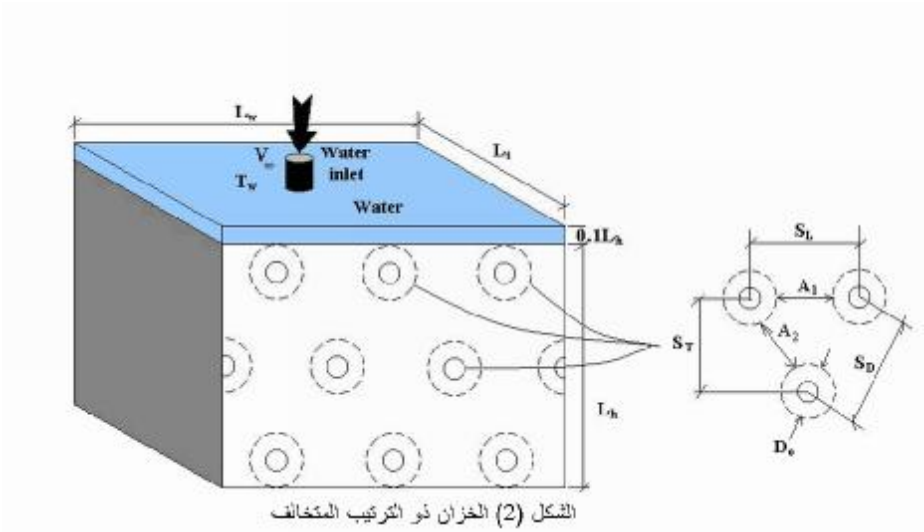
أما مايتعلق بنتائج المرحلة الثانية ، فقد لوحظ من الشكل(12) أن تأثير درجة حرارة الماء الأبتدائية (T_L) لمادة تغير الطور(PCM)على قطر سمك الثلج (D_o) المتكون قليل نسبياً لنفس قطر الأنبوب الآيزوثرملي (D) المستخدم وإن زيادة قطر الأنبوب تزيد من قطر سمك الثلج (D_o) وبالتالي حجم الخزان لكلا الترتيبين. فيما أظهرت النتائج العملية لحساب سمك الثلج في الشكل(13) نفس سلوك وتصرف ما ينتج من الجانب النظري، إلاّ إن النتائج غير متطابقة لعدة أسباب منها : أستخدام ظروف مثالية للحل العددي في الجانب النظري، كفرض العزل التام لسطح الأنبوب الخارجي وجعل سطح الأنبوب الداخلي آيزوثرملياً ، بينما لايكون ذلك مع الجانب العملي .كما ان اهمال انتقال الحرارة الحر من الاسباب التي ادت الى عدم تطابق النتائج و كذلك فإن غلق وفتح ماكنة التثليج يسبب التذبذب في سمك الثلج الناتج، كما إن عدم الدقة في قياس سمك الثلج ووجود الفتحة العلوية في الخزان يؤثران على السمك الناتج عملياً .

٦ - المصادر

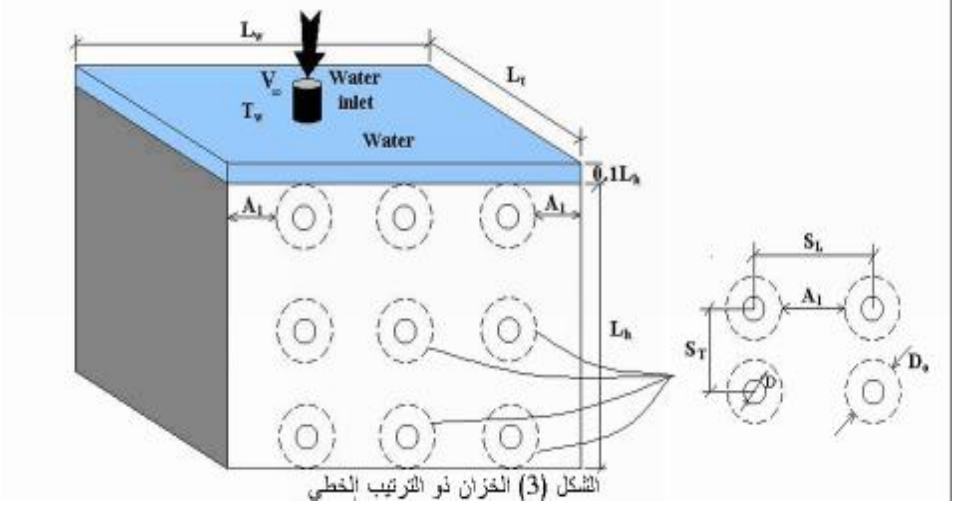
1. Cary C. W., Mitchell J. W., And Beckman W. A., 1995 , "The Control Of Ice Storage Systems" ASHRAE J. PP. 54-58.
2. Mohammed S. A., 1998, " Optimum Ice – Storage Assisted Air Conditioning System in Public Buildings ", M. Sc., Thesis College Of Engineering, University Of Mosul.
3. Duda J. L., Malone M. F. & Notter R. H., 1975, "Analysis of Two–Dimensional Diffusion–Controlled Moving Boundary Problems", J. *Heat Mass Transfer*, Vol. 18, PP. 901– 910.
4. Hirata T. And Matsui H., 1992, "Freezing And Thawing Heat Transfer With Water Flow Around Isothermally Cooled Cylinders In Staggered And Aligned Arrangements ", J. *Heat Mass Transfer* , Vol. 114, PP. 681- 687.
5. Vick B., Nelson D. J. & XYu , 1998, " Freezing And Melting With Multiple Phase Fronts Along The Outside Of A Tube ", J. *Heat Mass Transfer* , Vol. 120, PP. 422 - 429.
6. Bejan A., 1993, "Heat Transfer ", John Wiley & Son, Inc.



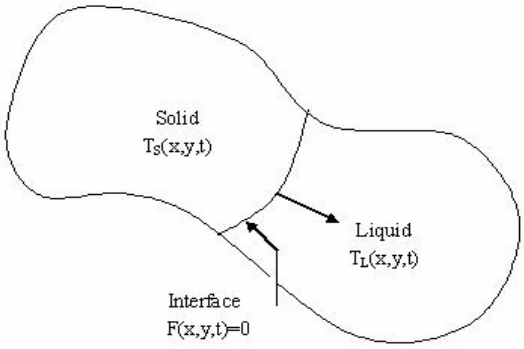
. الشكل (1) منظومة خزن الثلج النموذجية



الشكل (2) الخزان ذو الترتيب المتخالف



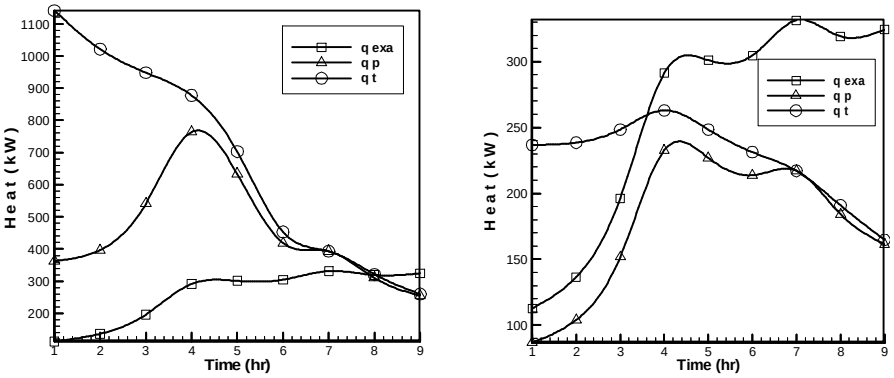
الشكل (3) الخزان ذو الترتيب الخطي



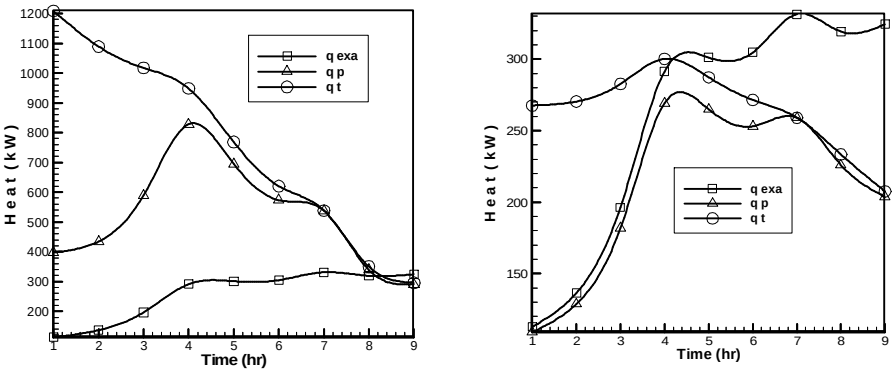
الشكل (4) يوضح عملية الإنجماد مع حركة الحد الفاصل (interface) لبعدين (x,y) مع الزمن .

a b

الشكل (5) (a) الجهاز المختبري . (b) عملية تكوين الثلج

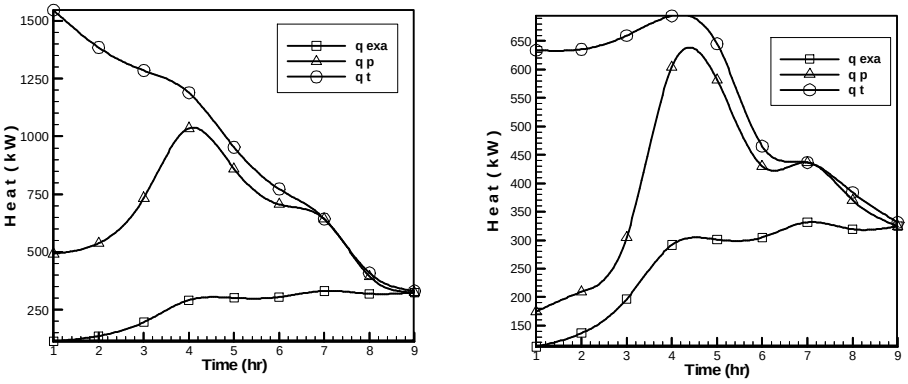


الشكل (٦) الطاقة المتحصلة من الخزان ذو الترتيب الخطي في الطريقة الأولى
(a) عند أستخدام النسبة الأولى . (b) عند أستخدام النسبة الثالثة .



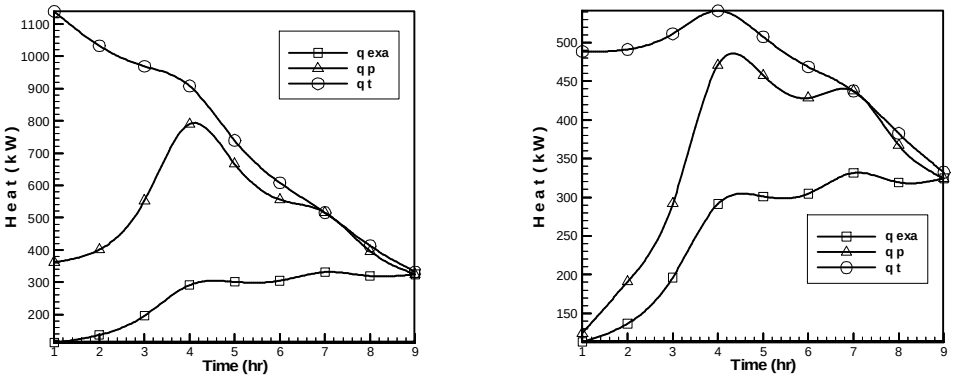
(a) (b)

الشكل (7) الطاقة المتحصلة من الخزان ذو الترتيب المتخالف في الطريقة الأولى
(a) عند أستخدام النسبة الأولى . (b) عند أستخدام النسبة الثالثة .



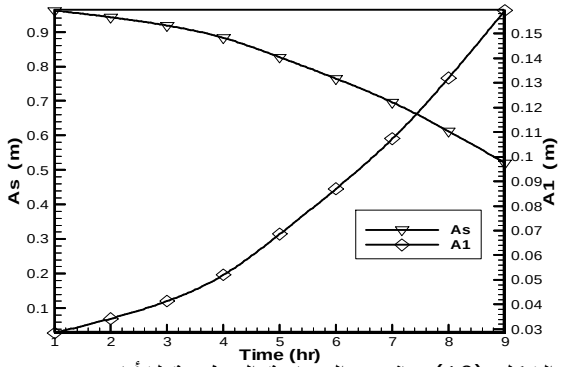
(a) (b)

الشكل (8) الطاقة المتحصلة من الخزان ذو الترتيب الخطي في الطريقة الثانية
(a) عند أستخدام النسبة الأولى . (b) عند أستخدام النسبة الثالثة .

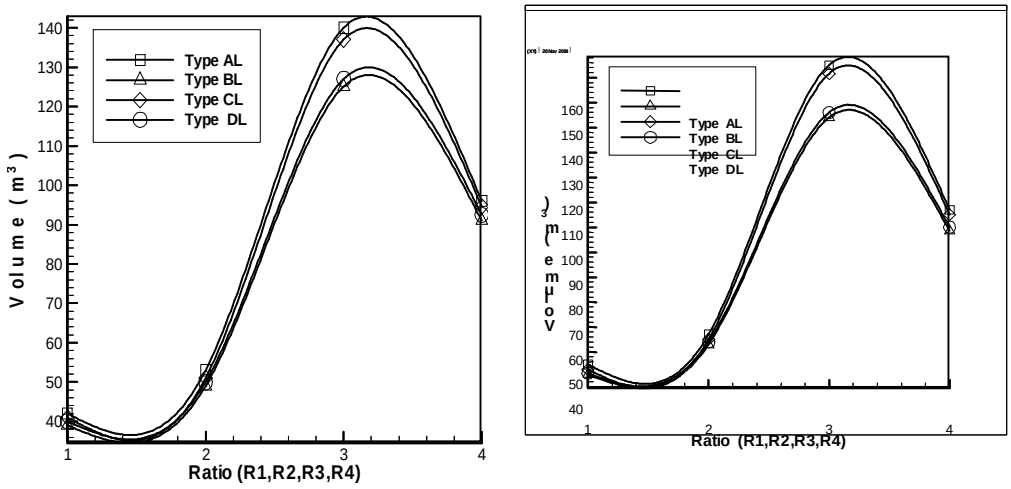


(a) (b)

الشكل (9) الطاقة المتحصلة من الخزان ذو الترتيب المتخالف في الطريقة الثانية
(a) عند أستخدام النسبة الأولى . (b) عند أستخدام النسبة الثالثة .

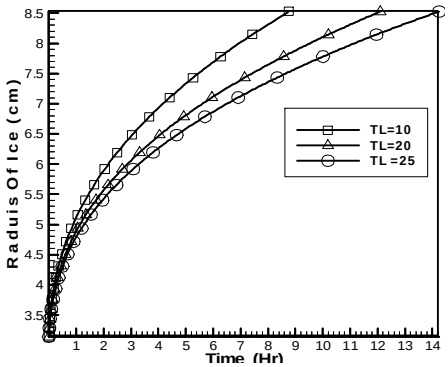


الشكل (10) تناقص المساحة السطحية للأنابيب بمرور الوقت .

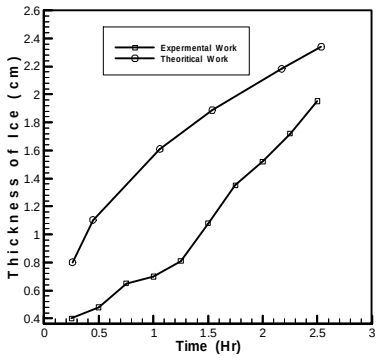


(a) (b)

الشكل (11) تغيرحجم الخزان مع النسب المستخدمة
(a) للترتيب المتخالف . (b) للترتيب الخطي .



الشكل (12) تأثير درجة حرارة الماء الأبتدائية على سمك الثلج الناتج .



الشكل (13)المقارنة بين النتائج العملية والنظرية .