

" النمذجة الرياضية لخزان حراري متغير الطور للتخزين الحراري الكامن في الجليد لاستخدامه في أنظمة تكييف الهواء المركزي "

الدكتور محمد علي *

سعيد جوده **

(تاريخ الإيداع 29 / 8 / 2016. قُبِلَ للنشر في 29 / 11 / 2016)

□ ملخص □

تم البحث باعتماد النمذجة الرياضية لخزان حراري وذلك بإعداد تابع رياضي باستخدام برنامج الماتلاب (MATLAB) لطوري الشحن والتفريغ للخزان وذلك لتغطية جزء من أحمال التكييف خلال وقت الذروة ، تم تطبيق استراتيجية التخزين الجزئي (Partial Storage) على مبنى افتراضي يقع في مدينة تدمر في البادية السورية حمل الذروة (420 kW) وذلك بتخزين (1420 Kw-h) ضمن خزان حراري سعته (32 m³) بحيث يتم تخزين الجليد ليلاً وانصهاره بتقنية الانصهار الخارجي (External Melt) في أوقات الذروة الحرارية والكهربائية في اليوم التالي. أظهرت النتائج جدوى إجراء النمذجة الحرارية للخزان لتغطية حمولة التكييف المطلوبة ، كما بينت النتائج نقل لجزء من الحمولة الكهربائية اليومية لمبرد الماء حوالي (576 Kw-h) مع انخفاض واضح باستطاعة التجهيزات الميكانيكية والكهربائية مع توفير باستخدام الطاقة الكهربائية لفصل صيفي واحد حوالي (1376 kW-h/Season) مع تحسين معامل الحمل الكهربائي اليومي (DLF) ما يحقق استقرار للمنظومة الكهربائية. يقدم هذا البحث نتائج يمكن تعميمها على مشاريع كبيرة في المناطق الحارة تساعد في إزاحة الذروة الحرارية واستهلاك الطاقة.

الكلمات المفتاحية : تخزين الطاقة الحرارية في الجليد، المواد متغيرة الطور ، المبادلات الحرارية الاسترجاعية

* أستاذ مساعد - قسم هندسة القوى - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية
** طالب دراسات عليا (ماجستير) - قسم هندسة الآلات الحرارية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية

" Mathematical Modeling Of Phase Change Thermal Storage On Latent Ice Thermal Storage For Using in HVAC Systems"

Dr.Mohammad Ali*
Saed Jida**

(Received 29 / 8 / 2016. Accepted 29 / 11 / 2016)

□ ABSTRACT □

This research was done by using a mathematical modeling for a heat storage tank by the preparation a mathematical function using MATLAB software for charging and discharging phase of the storage tank . it was applied partial storage strategy on a default building located in the city of Palmyra in the Syrian desert. peak cooling load (420 kW) and storing (1420 kw-h) within a storage tank size of "30m³" So that the store of ice at night and melting using outer fusion technology (External Melt) in thermal and electrical peak hours in the next day .

The results showed the feasibility of a thermal modeling of the tank to cover the air-conditioning load cooling load required ,the results also showed the shift of part of the electrical daily load of the chiller about (576 Kw-h) with a clear reduction of mechanical and electrical equipment with the provision of using electrical energy to a summer season about (1376 kW-h/Season) and improving the daily electrical factor (DLF) achieves stability of the electric system.

This paper presents the results can be generalized to large projects in the tropics help in thermal and power consumption peak shift

Key words : Ice thermal energy storage , Phase change materials , Recovery heat exchanger

* Associate Professor, Department of Power Engineering , Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Syria .

** Postgraduate Student, Department of mechanical power, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Syria.

مقدمة :

تشكل الطاقة الكهربائية المستخدمة لتغطية استطاعة تجهيزات التكييف القسم الأكبر من الحمولة، حيث يتطلب تكييف الهواء في الأبنية بالمناطق الحارة طاقة كهربائية كبيرة تتراوح بين (40-60%) من الاستهلاك المنزلي وتكون الحاجة للتكييف في النهار كبيرة وخصوصاً بعد الظهر وفي هذا الوقت تكون درجة حرارة الهواء الخارجي مرتفعة ويكون تخزين الحرارة الناتجة عن الإشعاع الشمسي في كتلة البناء كبيراً، وعند هذه الظروف يرتفع الطلب على الاستطاعة التبريد في المبنى وبالمقابل تتخفف كفاءة تجهيزات التكييف نتيجة لارتفاع درجة حرارة هواء خارجي التي تصل إلى حوالي (48 °C) في البادية السورية، تستمر درجة الحرارة المرتفعة لساعات طويلة في الصيف من الثانية عشرة ظهراً وحتى الثامنة مساءً وبعد الساعة الثامنة تبدأ درجة حرارة الهواء الخارجي بالانخفاض تعتبر محطات الطاقة الكهربائية التقليدية هي المعنية في تأمين الجزء الأكبر من الطاقة المستهلكة في تكييف الهواء وبما إن تغير الطلب على الطاقة الكهربائية خلال اليوم يكون كبيراً حيث يكون الطلب الأعظمي لاستهلاك الطاقة (حمولة الذروة) في الظهيرة والساعات الأولى من المساء بينما يكون استهلاك الطاقة الكهربائية متدني (حمولة الحضيض) مساءً وفي ساعات الصباح الباكر.

لقد وضع هذا الاستهلاك الهائل الكثير من القلق والتفكير الجدي على الخطط المستقبلية لقطاع الطاقة، فكان لا بد من البحث عن حلول لردم الهوة بين تنامي الطلب على الطاقة من ناحية وإنتاجها وتأمينها من ناحية أخرى، لقد تم تطوير العديد من الطرق لترشيد الطاقة منها استخدام أنظمة التخزين الحراري للجليد (Ice Thermal Storage) في تكنولوجيا تكييف الهواء حيث أن استخدام التخزين الحراري يخفف من انبعاثات (CO₂) ويوفر من استهلاك الطاقة ويرفع كفاءة تجهيزات التكييف بنسبة كبيرة.

• فكرة البحث :

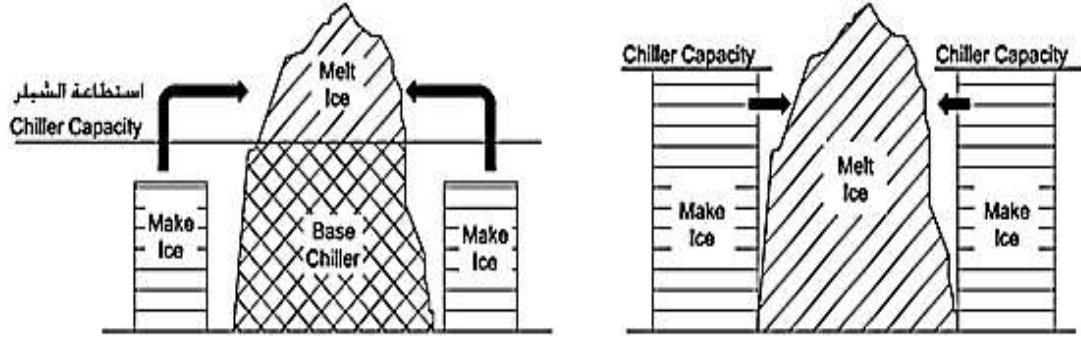
تتصف المواد متغيرة الطور [2] - PCM - (Phase Change Materials) - بقيمها العالية لإنتاجية الانصهار حيث تتجمد وتتصهر عند درجة حرارة معينة بالإضافة إلى قدرتها العالية لتخزين وتحرير كمية كبيرة من الحرارة حيث تمتص الطاقة عند تحولها من طور الحالة الصلبة (التجمد) إلى الحالة السائلة ولذلك تصنف هذه المواد على أنها وحدات تخزين الحرارة الكامنة - LHS - (Latent Heat Storage).

إن تخزين الجليد في تكييف الهواء هو عملية استخدام الثلج لتخزين الطاقة الحرارية وهي طريقة عملية بسبب الحرارة الكبيرة لانصهار الجليد، حيث يمكن تخزين (334 MJ) من كمية الحرارة ضمن واحد متر مكعب من الجليد أي ما يعادل (93 Kw-h) من كمية الحرارة اللازمة لصر طن واحد (متر مكعب) من الجليد في فترة 24 ساعة تسمى طن تبريد وتساوي 3.52 kW .

تعتمد فكرة البحث على تقنية تخزين الجليد في الليل (طور الشحن - Charge Period -) عندما تكون درجة حرارة الهواء الخارجي منخفضة حيث يكون استهلاك الطاقة الكهربائية منخفضاً و خصوصاً في الأماكن الصحراوية التي تتميز بمجال يومي كبير لدرجات الحرارة و انخفاض في درجات الحرارة ليلاً و انصهار كمية الجليد المخزنة في أوقات الذروة الحرارية و الكهربائية (طور التفريغ - Discharge Period -) [3]

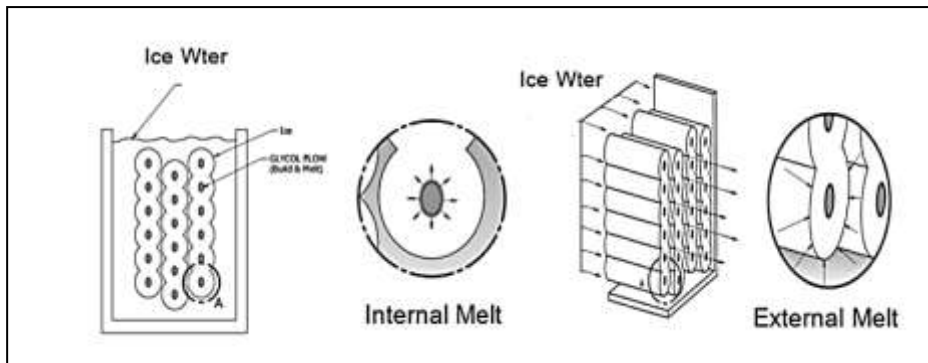
تعتمد استراتيجية التخزين الحراري بشكل عام على مبدئين أساسيين في تغطية الحمولة هما التخزين و الكلي، في التخزين الكلي (Partial Storage) يتم تغطية جزء من أحمال التكييف في وقت الذروة لليوم التالي أما التخزين الكلي (Full Storage) فيتم تغطية كامل حمولة الذروة من خلال الخزان الحراري، أجريت العديد من الأبحاث

بخصوص إيجاد الطريقة الأنسب لتغطية حمولات التكييف [4] لقد بينت النتائج أن استخدام التخزين الجزئي يتطلب استطاعة مبرد ماء (شيلر) ثلث الاستطاعة المطلوبة بالتخزين الكلي ($Q_{1\text{ chiller}} = \frac{1}{3} Q_{2\text{ chiller}}$) و حجم خزان أصغر بحوالي 60% أما التخزين الكلي فيحقق نقل للحمولة الكهربائية و الحرارية أكثر بكثير مقارنة بالتخزين الجزئي و لكن ما يعيبه الكلفة التأسيسية الكبيرة، يظهر الشكل (1) مقارنة بين مبدأ التخزين الجزئي و الكلي في تغطية حمولات التكييف .



الشكل (1) مقارنة التخزين الجزئي والكلي في تغطية حمولات التكييف

تعتمد تقنية التخزين الحراري من ناحية طبيعة انصهار الجليد في طور التفرغ بشكل عام على مبدأين أساسيين هما الانصهار الخارجي للجليد حيث يتم الانصهار لأسطوانة الجليد المتشكلة من الخارج باتجاه الداخل نتيجة انسياب الماء حول الأنابيب أما الانصهار الداخلي للجليد فيتم فيه انصهار أسطوانة الجليد من الداخل باتجاه الخارج ، أجريت العديد من الأبحاث للمقارنة بينهما [5] و[6] . أشارت معظم النتائج إلى أن استخدام تقنية الانصهار الخارجي يتيح الحصول على درجة حرارة للماء البارد في طور التفرغ حوالي (1°C) وبالتالي انخفاض في استطاعة التجهيزات الميكانيكية وحجم الأنابيب ووزن شبكة إرسال الهواء، يبين الشكل (2) توضيح لمبدأ انصهار الجليد لكلتا الحالتين المذكورتين .



الشكل (2) مقارنة تقنية الانصهار الداخلي والخارجي للجليد

أهمية البحث وأهدافه :

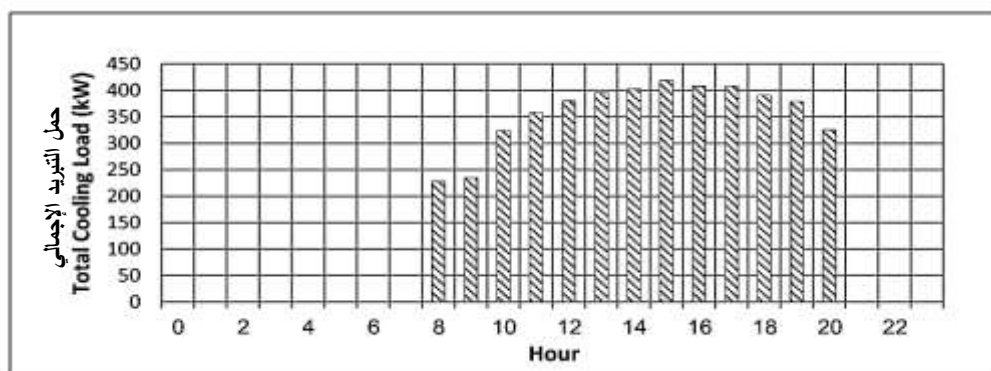
يكتسب البحث أهميته كونه يندرج ضمن محاور بحثية بخصوص ترشيد استهلاك الطاقة الكهربائية باستخدام تقنية التخزين الحراري و إن الهدف من هذا البحث هو بيان أهمية التخزين الحراري في أنظمة تكييف الهواء ، كما يهدف البحث أيضاً إلى المساهمة في تخفيض حمولة الذروة لاستهلاك الطاقة الكهربائية .

منهجية البحث:

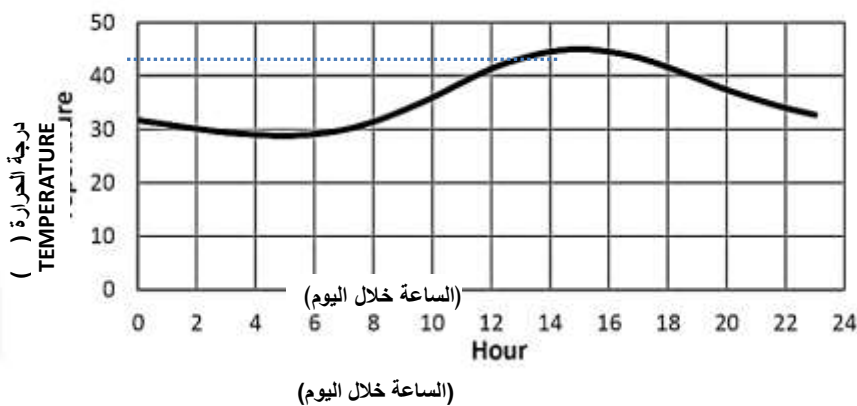
تعتبر منهجية البحث تحليلية حيث تم وضع نموذج رياضي لتصميم خزان حراري للجليد ضمن مبنى افتراضي يقع في مدينة تدمر حيث تم إعداد خوارزمية لدراسة أداء الخزان الحراري في طور الشحن والتفريغ وحلها باستخدام برنامج الماتلاب (MATLAB) وذلك لمراقبة أداء الخزان الحراري خلال الطورين المذكورين .

أولاً - الفرضيات التصميمية للبحث :

أ - يقع البناء في مدينة تدمر في البادية السورية ، يوضح الشكل (3) مخطط أحمال التكييف للمبنى وذلك في اليوم التصميمي (20 August) يبلغ حمل الذروة (420 kW) ، أما الشكل (4) يظهر منحنى تغير درجات الحرارة خلال ساعات اليوم التصميمي في مدينة تدمر حيث تم على أساسه تحديد ساعات شحن الخزان الساعة التاسعة مساءً (21) والساعة السابعة صباحاً (7) و تفريغ الخزان بين الساعة العاشرة صباحاً (10) والثامنة مساءً (20) .



الشكل (3) مخطط أحمال التكييف للمبنى في اليوم التصميمي

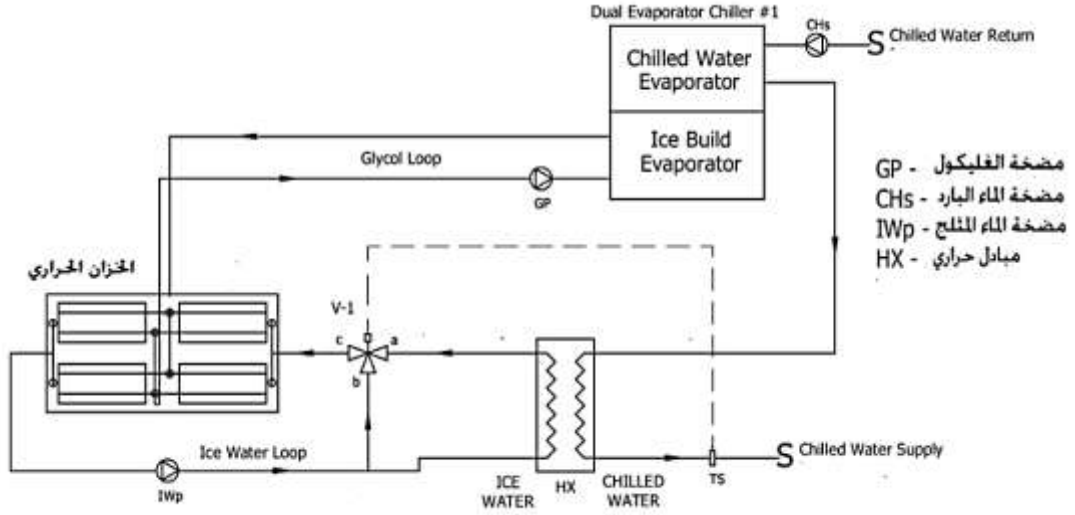


الشكل (4) تغير درجات الحرارة خلال ساعات اليوم في اليوم التصميمي

ب- تم اعتماد استراتيجية نظام التخزين الجزئي (Partial Storage) وتقنية الانصهار الخارجي في طور التفرغ (External Melt) .

ج- الاستطاعة الاسمية لمبرد الماء (250 kW) .

د- تم اعتماد دائرة التخزين الحراري بحيث تتألف من مبرد ماء واحد بمبخر مزدوج متصل مع منظومة التخزين ووحدات المعالجة للبناء كما هو موضح بالشكل (5) .

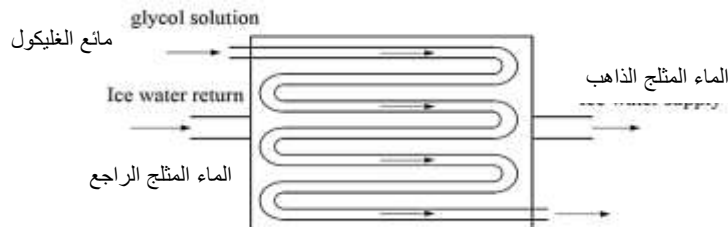


الشكل (5) مخطط توصيل مبرد الماء مع نظام التخزين والتكييف

هـ- حمل التبريد المراد تغطيته (1420 Kw-h) بالفترة (10 AM- 20 PM) وبالتالي كمية الجليد المطلوب تخزينها (16 m^3) وحسب توصيات الجمعية الأمريكية لمهندسي التكييف [5] فإن حجم خزان الجليد المطلوب (32 m^3) .

و- وصف الخزان (Tank Description) :

إن خزان الجليد المفترض عبارة عن مبادل حراري أنبوبي يجري مائع المحلول الملحي - الغليكول (Ethylene Glycol 25 %) - داخلها القطر الخارجي للأنابيب ($d_o = 32 \text{ mm}$) ، الأنابيب و غلاف الخزان مصنوعين من الفولاذ المغلفن (Galvanize Steel) ، الخزان معزل من الخارج بالصوف الزجاجي ، الأنابيب في الخزان مغمورة بالماء درجة حرارته الأولية ($5 \text{ }^\circ\text{C}$) حجم الماء بالخزان (32 m^3) .



الشكل (6) النموذج الفيزيائي للخزان الحراري

الدراسة الحرارية و التصميمية لخزان الجليد :

أولاً - دراسة طور الشحن (Charge Period) :

آلية انتقال الحرارة في خزان الجليد الحراري خلال طور الشحن :

إن عملية انتقال الحرارة داخل أنابيب الخزان هي عملية مركبة ناتجة عن جريان قسري لوسيط التبريد

(Glycol) داخل أنابيب الخزان وجريان حر للماء داخل الخزان المحيط بالأنابيب و سطح الأنابيب - [7] .

يقسم طور الشحن داخل الخزان لمرحلتين أساسيتين :

- مرحلة الشحن المحسوس (Sensible Charging) :

في هذه المرحلة تنخفض درجة حرارة الماء داخل الخزان حتى تصل للدرجة (0 °C) نقطة التجمد للماء .

تعطى المعادلة التفاضلية لانتقال الحرارة ضمن الخزان في طور التبريد المحسوس بالعلاقة التالية [8] :

$$Q_C + Q_{gain} = m_w \cdot C_p \cdot \frac{dT_w}{dt} \quad (kW) \quad (1)$$

حيث :

. Q_C : طاقة التبريد الممتصة من أنابيب الخزان (kW) .. Q_{gain} : الطاقة الحرارية المنتقلة من الوسط الخارجي للخزان (kW) .. C_p : السعة الحرارية للماء داخل الخزان ($\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$) .. m_w : كمية الماء داخل الخزان (kg) .. $\frac{dT_w}{dt}$: تغير درجة حرارة الماء داخل الخزان خلال واحدة الزمن .تعطى علاقة طاقة التبريد الممتصة من أنابيب الخزان Q_C بالعلاقة التالية :

$$Q_C = K_{tot} \cdot A_{tot} \cdot \Delta T_{log} \quad (kW) \quad (2)$$

حيث :

. K_{tot} : معامل انتقال الحرارة الكلي ($\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$). A_{tot} : المساحة الإجمالية الخارجية للأنابيب ضمن الخزان ($\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$). ΔT_{log} : فرق درجات الحرارة اللوغاريتمية ضمن الخزان (°C)يعطى معامل انتقال الحرارة الكلي (K_{tot}) بالعلاقة التالية :

$$K_{tot} = \left[\frac{r_o}{\alpha_i r_i} + \frac{r_o}{\lambda_{coil}} \ln \left(\frac{r_o}{r_i} \right) + \frac{1}{\alpha_o} \right]^{-1} \left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right) \quad (3)$$

حيث :

. λ_{coil} : الإيصالية الحرارية لأنابيب الخزان المصنوعة الفولاذ المغلفن ($\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$). α_i : معامل انتقال الحرارة بالحمل للجريان القسري ضمن الأنابيب ($\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$). α_o : معامل انتقال الحرارة بالحمل للجريان الحر بين ماء الخزان والسطح الخارجي للأنابيب ($\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$). r_i : نصف القطر الداخلي لأنابيب الخزان (m). r_o : نصف القطر الخارجي لأنابيب الخزان (m)

أما علاقة معامل انتقال الحرارة بالحمل للجريان القسري داخل أنابيب الخزان بإحدى العلاقتين التاليتين:

$$\alpha_i = \frac{0.23 Pr_b^{0.4} Re_b^{0.8} \lambda_b}{2 r_i} Re_b \geq 2100 \quad \left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right) \quad (4)$$

$$\alpha_i = \left\{ 3.65 + \frac{0.0668 Pr_b Re_b \frac{2 r_i}{l_{tube}}}{1 + 0.04 (Pr_b Re_b \frac{2 r_i}{l_{tube}})^{2/3}} \right\} \frac{\lambda_b}{2 r_i} Re_b < 2100 \quad \left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right) \quad (5)$$

حيث :

Pr_b : رقم برانتل للغليكول داخل أنابيب الخزان .

Re_b : رقم رينولدز للغليكول داخل أنابيب الخزان .

λ_b : الإيصالية الحرارية للغليكول داخل أنابيب الخزان $\left(\frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right)$.

l_{tube} : طول الأنبوب في الخزان (m) .

و علاقة معامل انتقال الحرارة بالحمل للجريان الحر خارج أنابيب الخزان بالعلاقة التالية :

$$\alpha_i = \frac{0.53 (Gr_w Pr_w)^{0.25}}{2 r_o} \lambda_w \quad 10^4 < Gr_w Pr_w < 10^8 \quad \left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right) \quad (6)$$

حيث :

Gr_w : رقم غراشوف للماء .

Pr_b : رقم برانتل للماء في الخزان .

λ_w : الإيصالية الحرارية للماء في الخزان $\left(\frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right)$.

أما المساحة الإجمالية الخارجية للأنابيب :

$$A_{tot} = \pi d_o l_{tube} N_{tube} (m^2) \quad (7)$$

حيث :

N_{tube} : عدد الأنابيب الإجمالي داخل الخزان .

بينما يعطى فرق درجات الحرارة اللوغاريتمية (ΔT_{log}) بالعلاقة :

$$\Delta T_{log} = \frac{(T_{bo} - T_{bi})}{\ln [(T_w - T_{bo}) / (T_w - T_{bi})]} \quad (^\circ C) \quad (8)$$

حيث :

T_{bo} : درجة حرارة خروج المحلول الملحي (Glycol) من أنابيب الخزان $(^\circ C)$.

T_{bi} : درجة حرارة دخول المحلول الملحي (Glycol) لأنابيب الخزان $(^\circ C)$.

T_{tank} : درجة حرارة الماء ضمن الخزان $(^\circ C)$.

مرحلة الشحن الكامن (Latent Charging) :

في هذه المرحلة تبدأ اسطوانة الجليد بالتشكل حول أنابيب الخزان للوصول للسماكة المطلوبة ، يتأثر انتقال

الحرارة بشكل كبير بسماكة الجليد حيث يتناقص انتقال الحرارة تدريجياً مع مرور الزمن كلما ازدادت سماكة الجليد

تعطى المعادلة التفاضلية لانتقال الحرارة ضمن الخزان في طور التبريد الكامن بالعلاقة التالية :

$$Q_C + Q_{gain} = -H_{i,f} \cdot \frac{dM_i}{dt} \quad (kW) \quad (9)$$

حيث :

Q_C : طاقة التبريد الممتصة من أنابيب الخزان (kW) .

Q_{gain} : الطاقة الحرارية المنتقلة من الوسط الخارجي للخزان (kW) .

$H_{i,f}$: الحرارة الكامنة لإنصهار الجليد ($\frac{kJ}{kg}$) .

$\frac{dM_i}{dt}$: تغير كمية الجليد داخل الخزان خلال واحدة الزمن .

تم مناقشة علاقة طاقة التبريد الممتصة من أنابيب الخزان في الفقرة السابقة مع اختلاف في علاقة معامل انتقال الحرارة الإجمالي بسبب وجود حد إضافي يمثل المقاومة الحرارية للجليد نتيجة تشكله حول الأنابيب .

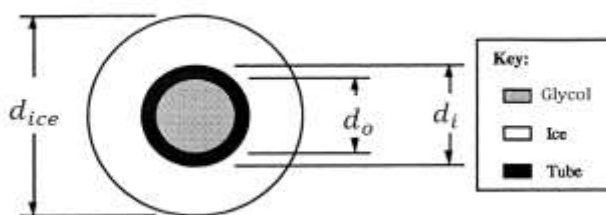
يعطى معامل انتقال الحرارة الكلي (K_{tot}) بالعلاقة التالية :

$$K_{tot} = \left[\frac{r_{ice}}{\alpha_i r_i} + \frac{r_{ice}}{\lambda_{coil}} \ln \left(\frac{r_o}{r_i} \right) + \frac{r_{ice}}{\lambda_{ice}} \ln \left(\frac{r_{ice}}{r_o} \right) + \frac{1}{\alpha_o} \right]^{-1} \left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right) \quad (10)$$

حيث :

r_{ice} : نصف قطر اسطوانة الجليد المتشكلة حول الأنابيب (m) .

λ_{ice} : الإيصالية الحرارية للجليد المتشكل حول الأنابيب ($\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$) .



الشكل (7) يوضح قطر الأنابيب مع قطر اسطوانة الجليد المتشكل حوله

- نمذجة الخزان خلال طور الشحن :

تم وضع خوارزمية الحل بناءً على المعادلات الرياضية وفق تسلسل حل العمليات الحسابية والمنطقية لطور الشحن للخزان حسب طريقة " محاكاة أداء مبرد الماء " لتغير الاستطاعة المسحوبة من الأنابيب ، و عليه تم وضع تابع رياضي بلغة الماتلاب (MATLAB) لحساب بارامترات الخزان .

- تسلسل خوارزمية أداء الخزان خلال طور الشحن :

1 تقوم بإدخال البيانات التالية :

$(T_{bi}, T_{bo}, Flow_p, T_{tank}, M_{ice-max}, Chi_{def})$.

2 - يقوم البرنامج بحساب الخصائص الحرارية للمحلول الملحي (Glycol) و الماء داخل الخزان تبعاً

لتغير درجة الحرارة مع الزمن .

3 - يقوم البرنامج بمقارنة القيم و تعديل استطاعة مبرد الماء تبعاً لتغير درجة حرارة الخروج من المبرد

(T_{bi}) على اعتبار أن وسيط التبريد هو مائع الغليكول (Ethylene Glycol 25 %) فإنه وحسب توصيات الشركة

المصنعة أدنى درجة حرارة موصى بها ($T_w \geq -5.55^\circ C$) وبالتالي حسب توصيات (Ashrae) فإن كل

زيادة أو نقصان (0.5°C) زيادة أو نقصان (1.5%) أيضاً
زيادة أو نقصان . [9]

4 - إدخال معادلات الخصائص الحرارية للماء والجليكول تبعاً لدرجة الحرارة .

5 - حساب $(\alpha_i, \alpha_o, K_{tot}, Q_c)$.

6 - حساب درجة حرارة خروج الجليكول المعدلة من الخزان :

$$T_{b,o} = T_{b,i} + \frac{Q_c}{Flow_w C_p} (^\circ\text{C}) \quad (11)$$

7 - محاكاة منطقية تتضمن مقارنة استطاعة مبرد الماء (chi - mod) مع استطاعة التبريد المسحوبة

من الأنابيب في الخزان (Q_c) مع إجراء تغيير على درجة حرارة خروج الماء من مبرد الماء (أو دخوله للخزان) $T_{b,i}$.

8 - حساب درجة حرارة الماء بالخزان (T_{tank}) الوصول لدرجة حرارة التجمد للماء علماً أن معادلة

التغير في درجة الحرارة للماء داخل الخزان :

$$dT_{tank} = (Q_c \cdot dt) / (M_w \cdot C_p) \quad (12)$$

9 - كمية الجليد المتشكل (M_{ice}) حتى الوصول لكمية الثلج الأعظمية المطلوبة $(M_{ice-max})$ ، علماً

أن معادلة تغير كمية الجليد داخل الخزان تعطى بالمعادلة التالية

$$dM_{ice} = (Q_c \cdot dt) / (H_{i,f}) \quad (13)$$

10 - إخراج قيم البيانات المطلوبة مع رسم البروفايلات المطلوبة .

ثانياً - دراسة طور التفريغ (Discharge Period) :

يعتبر طور التفريغ هو الأهم ويسمى الطور الاستثماري الذي يتم خلاله الانصهار الكامن للجليد الذي تشكل خلال مرحلة الشحن وذلك لتغطية القسم المطلوب من الحمل الحراري للتكييف ، يتم ذلك من خلال مرور ماء قادم من المبادل الحراري ليمر بين أنابيب الخزان ما يؤدي لانصهار الجليد حول الأنابيب، تتعلق كمية الجليد المنصهرة بشكل أساسي بمعدل تدفق ودرجة الماء القادم من المبادل الحراري .

إن معادلة التوازن الترموديناميكية لعملية انتقال الحرارة أثناء انصهار الجليد تعطى كما يلي [10]:

$$V_w C_p \frac{dT_{tank}}{dt} = Flow_w C_p \rho_w (T_{in} - T_{tank}) - A_x \alpha_o (T_w - 0) \quad (14)$$

حيث :

V_w : حجم لماء داخل الخزان (m^3) .

C_p : السعة الحرارية للماء داخل الخزان $(\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C})$.

$\frac{dT_w}{dt}$: تغير درجة حرارة الماء داخل الخزان خلال واحدة الزمن .

$Flow_w$: تدفق الماء داخل الخزان $(\frac{m^3}{s})$.

ρ_w : كثافة الماء $(\frac{m^3}{kg})$.

T_{in} : درجة حرارة الماء الداخل إلى الخزان من المبادل الحراري $(^\circ C)$.

T_w : درجة حرارة الماء داخل الخزان $(^\circ C)$.

A_x : مساحة سطح الجليد داخل الخزان (m^2) .

α_o : معامل انتقال الحرارة بالحمل بين الماء حول الأنابيب و سطح الجليد $(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C})$.

تعطى معادلة معامل انتقال الحرارة بالحمل بين الماء حول الأنابيب و سطح الجليد بالمعادلة التالية :

$$\alpha_{o-in} = \frac{0.5 (Pr_w)^{0.30} (Re_w)^{0.6} \lambda_w}{d_{ice}} \left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right) \quad (15)$$

حيث :

λ_w : الإيصالية الحرارية للماء المتدفق في الخزان $(\frac{W}{m \cdot ^\circ C})$.

Re_w : رقم رينولدز للماء المتدفق حول في الخزان .

Pr_w : رقم برانتل للماء المتدفق حول في الخزان .

d_{ice} : قطر اسطوانة الجليد حول الأنابيب (m) .

-نمذجة الخزان خلال طور التفريغ :

تم إعداد خوارزمية رياضية تتضمن سير العمليات المنطقية والحسابية لطور التفريغ ضمن الخزان ، تم إدخال المعطيات وحسابها عن طريق برنامج الماتلاب (MATLAB) ، حيث تم إعداد تابع رياضي ببارامترات إدخال افتراضية للحصول على المعطيات المطلوبة مثل (درجة حرارة الماء ضمن الخزان ، تغير كمية الجليد ضمن الخزان ، الطاقة الحرارية المقدمة من الخزان ،) .

- تسلسل خوارزمية أداء الخزان خلال طور التفريغ :

1 تقوم بإدخال البيانات التالية :

$(T_{in}, Load - Arry, d_{ice}, dis - hour)$.

2 إنشاء حلقة تكرارية تشمل إدخال الأحمال الحرارية المراد تغطيتها على شكل مصفوفة رياضية .

3 حساب $(A_{min}, Flow_{water}, V_i, Re, \alpha_o)$.

4 حساب التغير في درجة حرارة الماء داخل الخزان وبالتالي حرارة الماء المعدلة (T_{w-new}) حسب المعادلة

التالية:

$$T_{w-new} = (V_w \cdot T_{w-old} + Flow_{water} \cdot T_{in} \cdot dt) / (V_w + (Flow_{water} + \frac{\alpha_o \cdot A_x}{C_p \cdot \rho_w})) \quad (16)$$

5 حساب التغير في كمية الجليد داخل الخزان وبالتالي كمية الجليد المعدلة $(M_{ice-new})$ حسب المعادلة

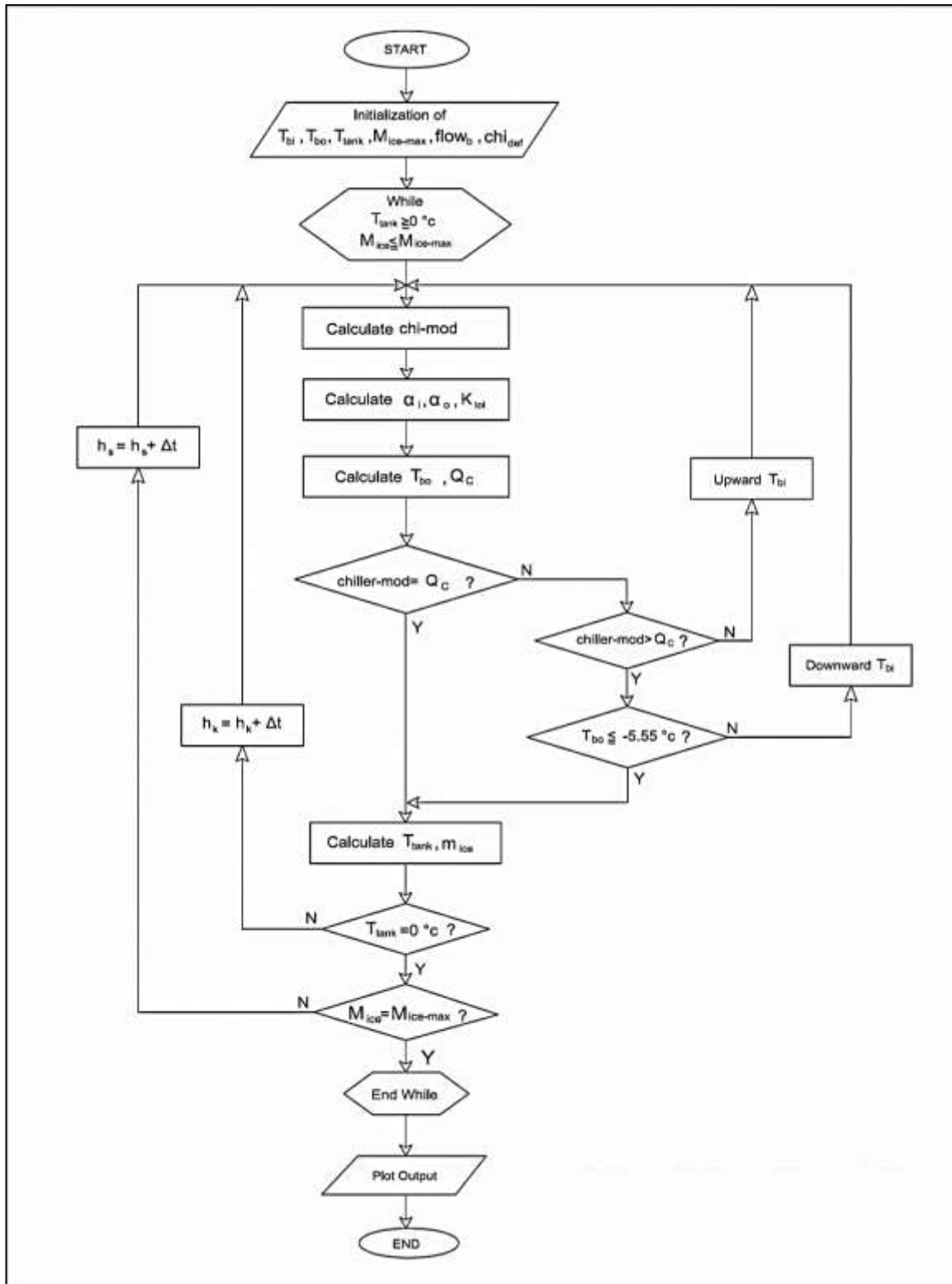
التالية:

$$\frac{dM_{ice}}{dt} = \frac{A_x \cdot \alpha_o \cdot (T_w - 0)}{H_{i,f} \cdot \rho_{ice}} \quad (17)$$

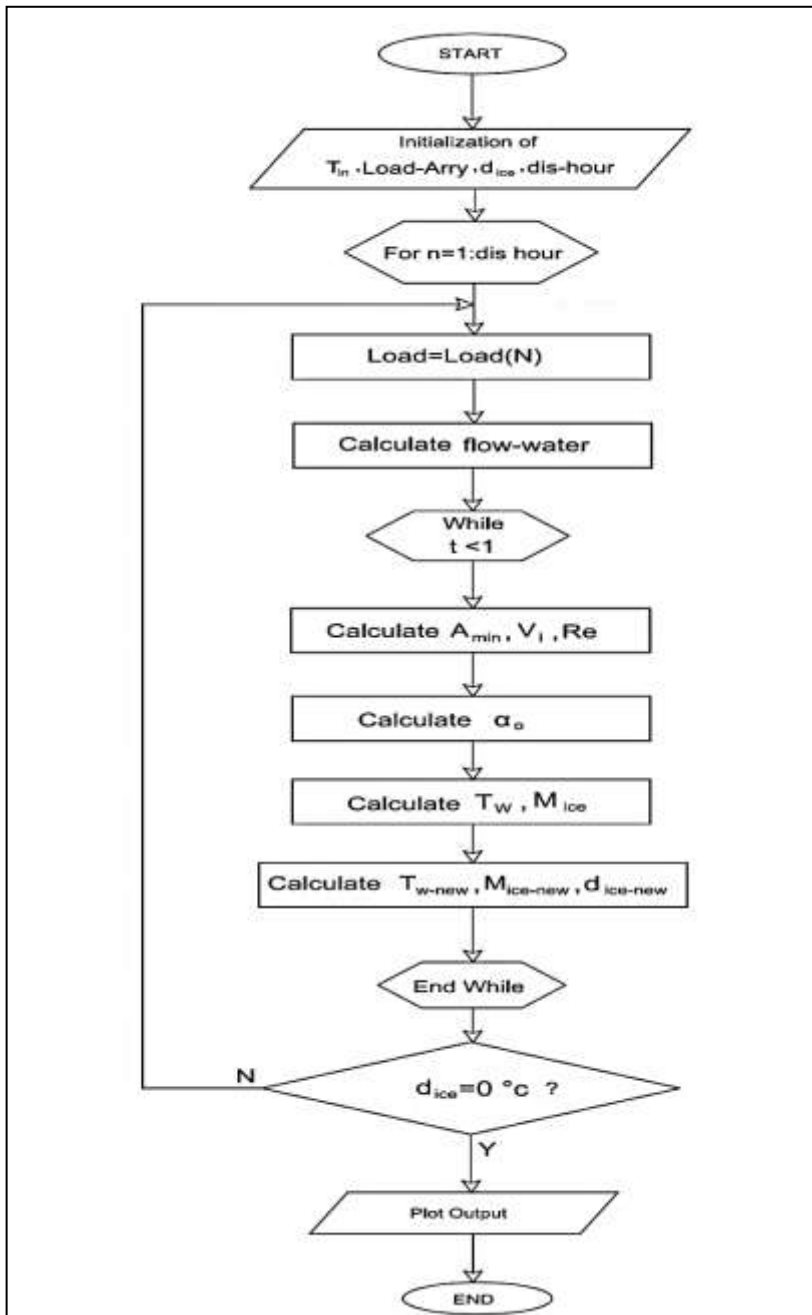
6 إخراج قيم البيانات المطلوبة مع رسم البروفائلات المطلوبة .

7 إخراج قيم البيانات المطلوبة مع رسم البروفائلات المطلوبة .

الشكل (8) والشكل (9) يوضحان المخطط الصندوقي للتابع الرياضي لمرحلي الشحن والتفريغ تالياً .



الشكل (8) مخطط خوارزمية نمذجة خزان الثلج - طريقة محاكاة عمل مبرد الماء - خلال طور الشحن (Charge Period)

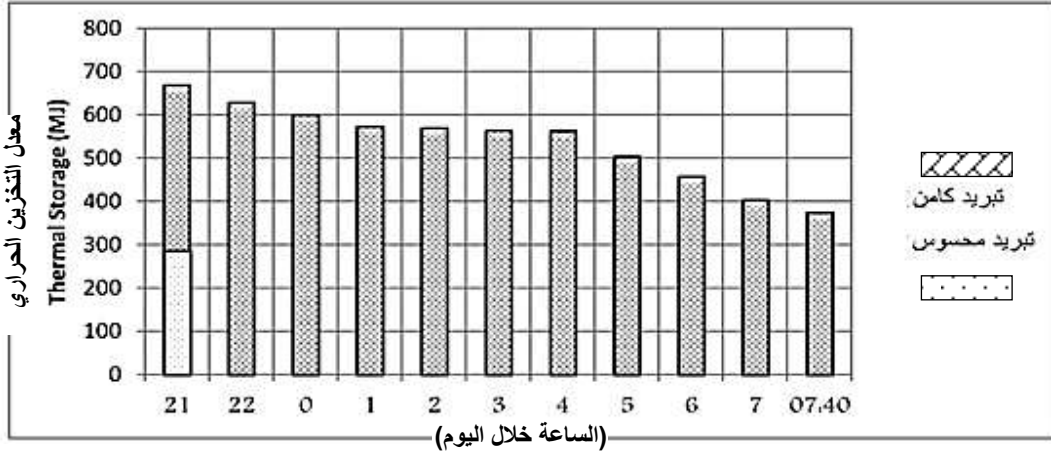


الشكل (9) مخطط خوارزمية نمذجة خزان الثلج - انصهار خارجي - خلال طور التفريغ (Discharge Period)

النتائج والمناقشة :

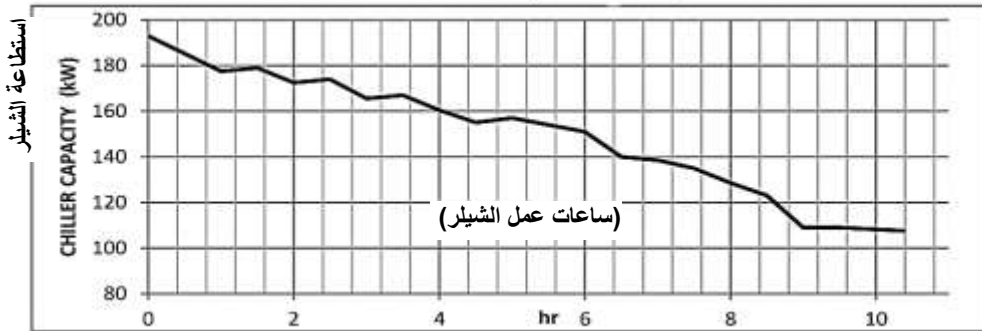
أولاً - طور الشحن للخزان :

يبين الشكل (10) تغير كمية الحرارة المحسوسة والكامنة للماء ضمن الخزان خلال الزمن حيث نلاحظ انخفاض كمية الحرارة الكامنة مع الزمن بسبب المقاومة الحرارية الإضافية نتيجة تكون اسطوانة الجليد حول الأنابيب ، كما نلاحظ أن التبريد المحسوس استغرق حوالي أربعون دقيقة (40 min) بينما استغرق الشحن الكامن للخزان حوالي (10 ساعات) ليبلغ الزمن الإجمالي لشحن الخزان (10hr:40min) وهذا الزمن مناسب للفترة التي تم اقتراحها سابقاً من التاسعة مساءً وحتى السابعة صباحاً .

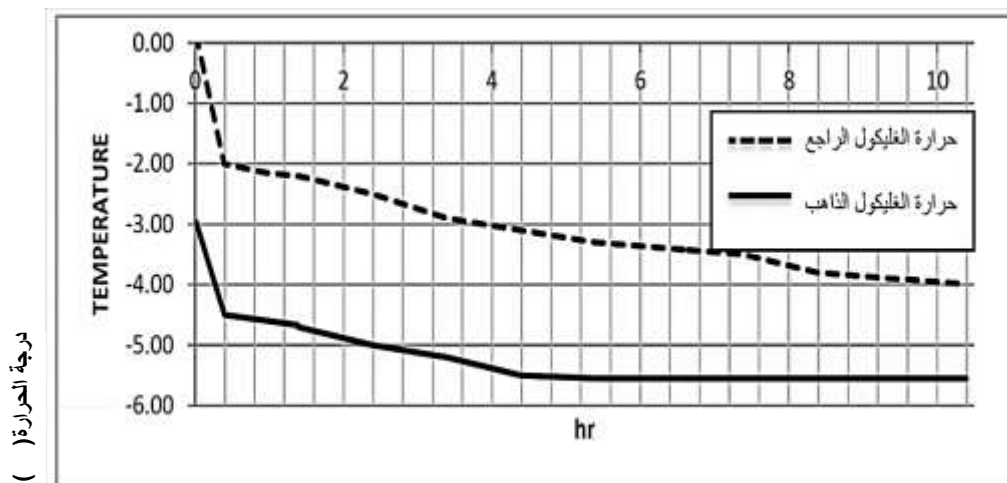


الشكل (10) كمية الحرارة المحسوسة والكامنة المسحوبة من أنابيب الخزان خلال طور الشحن

يبين الشكل (11) منحنى الأداء الحقيقي لعمل مبرد الماء خلال فترة شحن الخزان حيث نلاحظ تراجع استطاعة التبريد مع مرور الزمن نتيجة لانخفاض معامل انتقال الحرارة الإجمالي (K_{tot})، أما سبب التراجع صعوداً وهبوطاً في الاستطاعة المقدمة من قبل مبرد الماء (تتراوح بين $-3 \div -5.55^\circ\text{C}$) هو اختلاف درجة حرارة الوسيط (Glycol) عند مخرج ومدخل مبرد الماء كما في الشكل (12) بسبب اختلاف طاقة التبريد الممتصة من أنابيب الخزان (Q_c) .



الشكل (11) منحنى الأداء الحقيقي لعمل مبرد الماء خلال فترة شحن الخزان

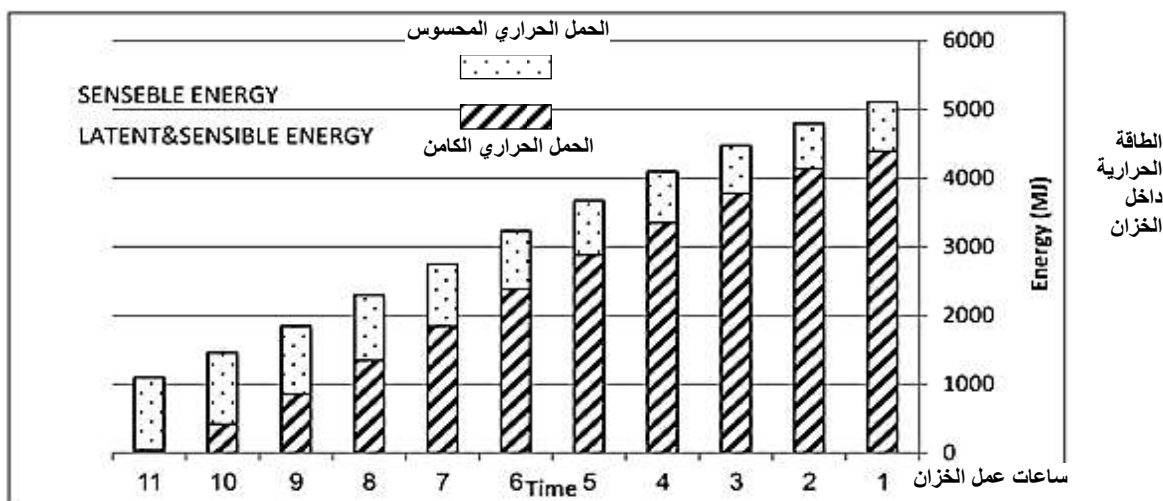


(ساعات عمل الشيلر)

الشكل (12) تغير درجة حرارة الغليكول عند مدخل ومخرج مبرد الماء خلال طور الشحن

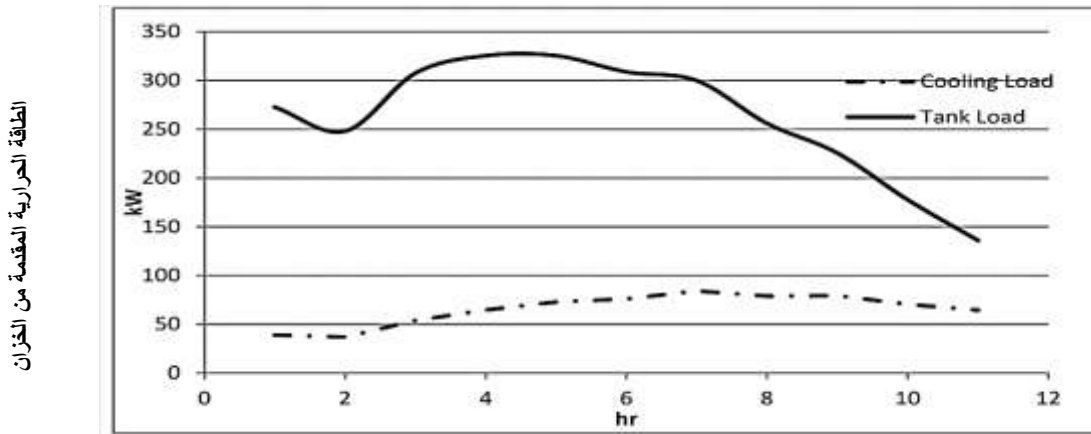
ثانياً - طور التفريغ للخران :

يبين الشكل (13) تغير كمية الحرارة المحسوسة والكامنة ضمن الخزان مع مرور زمن التفريغ حيث يتم سحب الحرارة من الخزان نتيجة انسياب الماء حول الأنابيب بدرجة حرارة دخول تتراوح بين $(8 \div 10^{\circ}\text{C})$ و خروج تتراوح بين $(1 \div 1.7^{\circ}\text{C})$ ، نلاحظ انخفاض كمية الحرارة الكامنة تدريجياً نتيجة انصهار الجليد لتغطية الحمل المطلوب ، بالمقابل تزداد كمية الحرارة المحسوسة نتيجة ذوبان الجليد وتحوله لماء ضمن الخزان ، يبين الشكل أيضاً قدرة الخزان على تغطية الأحمال المطلوب تغطيتها وقت الذروة .



الشكل (13) تغير كمية الحرارة داخل الخزان أثناء طور التفريغ

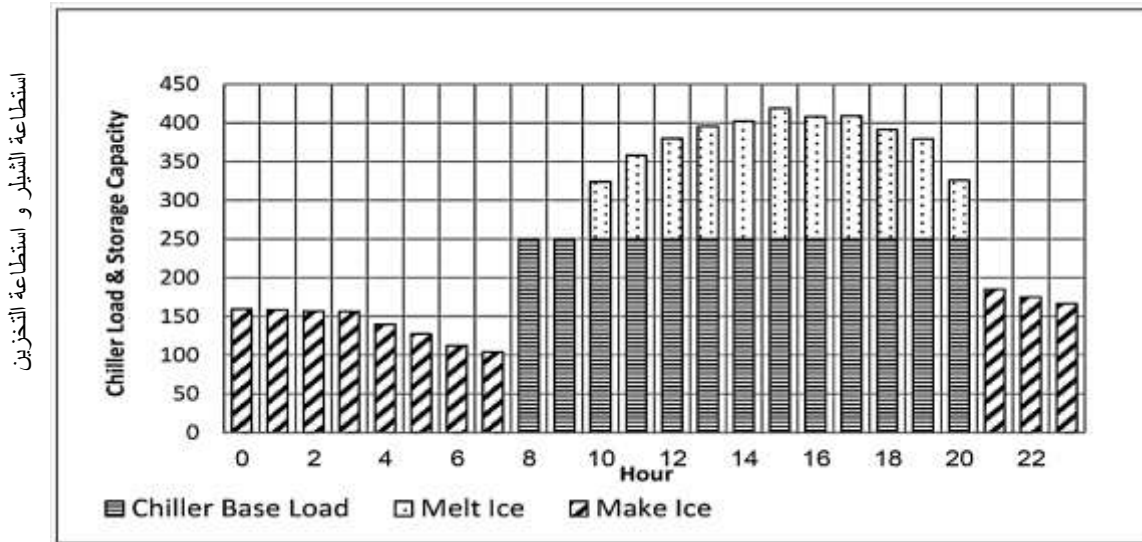
- يبين الشكل (14) الطاقة الحرارية المقدمة من الخزان (Q_o) بالمقارنة مع أحمال التكييف المراد تغطيتها حيث نلاحظ قدرة الخزان على تغطية الأحمال للساعة الأخيرة ، أما التآرجح في منحنى (Q_o) يعود لاختلاف تدفق الماء القادم من المبادل الحراري تبعاً لحمل التكييف المطلوب .



ساعات عمل الخزان (h)

الشكل (14) الطاقة الحرارية المقدمة من الخزان أثناء طور التفريغ

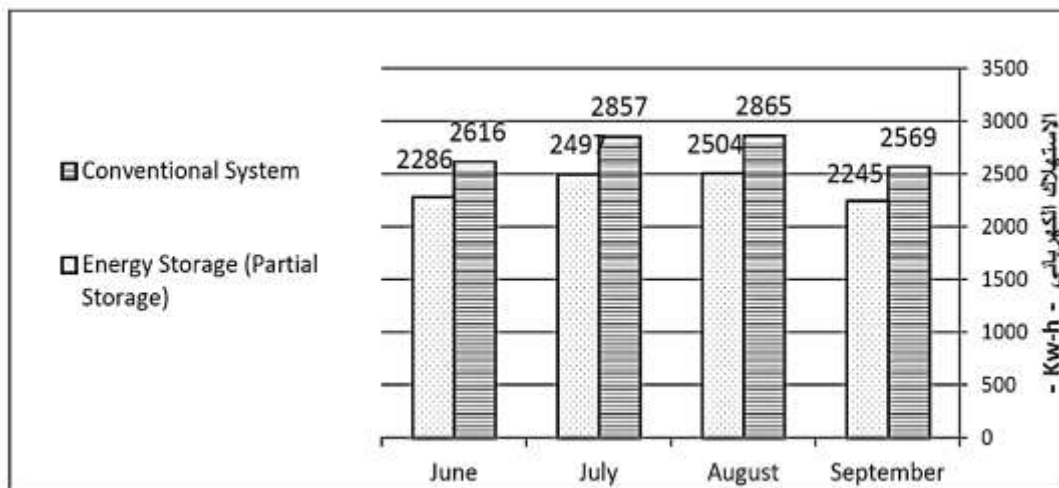
يبين الشكل (15) الجدوى الفعلية لنظام عمل التخزين الحراري في حالتي الشحن و التفريغ ، يتم تغطية جزء من حمل التبريد الأعظمي خلال فترة الذروة من خزان الجليد أما الحمل المتبقي فيتم تغطيته من مبرد الماء باستطاعة (250 kW) ، أما شحن فيتم بالفترة المسائية و ساعات الصباح الأولى عندما يكون الطلب على الطاقة في حدود الدنيا.



ساعات اليوم تشكل الجليد انصهار الجليد استطاعة الشيلر لحمولة التكييف

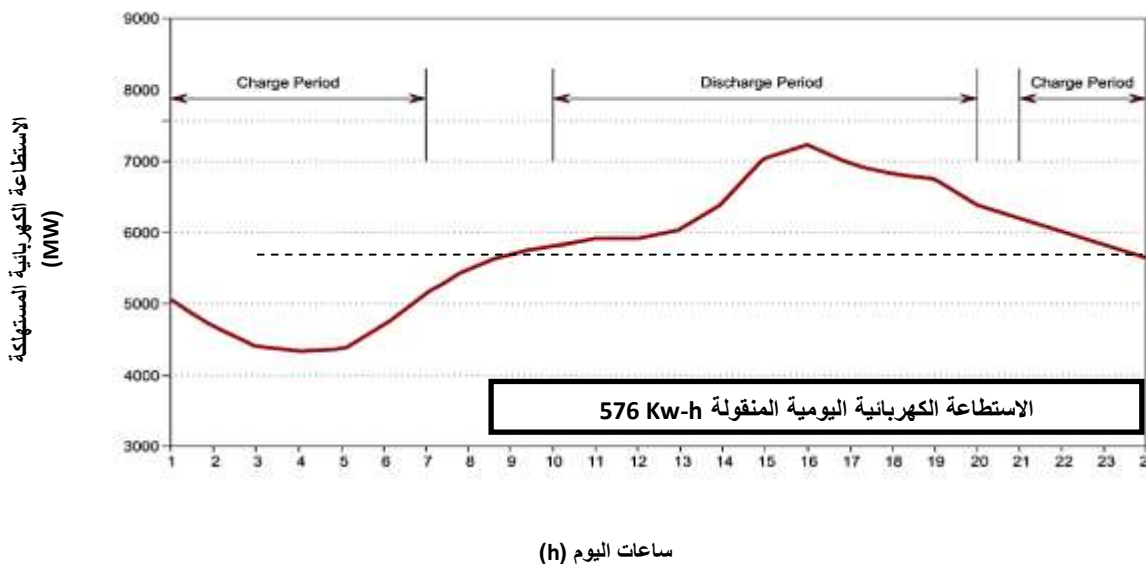
الشكل (15) نظام عمل التخزين الحراري في حالتي الشحن والتفريغ

- يظهر الشكل (17) انعكاس الاستهلاك الكهربائي خلال الأشهر الحارة (حزيران - تموز - آب - أيلول) نتيجة استخدام التخزين حيث يلاحظ وفر باستخدام الطاقة الكهربائية (1376 Kw/Season) مع توفير بالفواتير الكهربائية حسب التعرفة السورية حوالي (1031 \$/Season).



الشكل (17) مقارنة متوسط الاستهلاك الشهري للطاقة الكهربائية (Kw-h) في الأشهر الحارة

- أظهرت النتائج أيضاً تأثير استخدام التخزين الحراري للجليد على تحسين معامل الحمل الكهربائي اليومي (DLF) نسبة حمولة الفجوة الليلية إلى الذروة - هذا المؤشر يعبر وبشكل قاطع عن استقرار حمولة المنظومة الكهربائية. الشكل (18) يمثل بشكل تخطيطي تأثير نقل حمولة مبرد الماء الكهربائي على استقرار الشبكة الكهربائية.



الشكل (18) تأثير نقل قسم من استطاعة مبرد الماء على منحنى الحمولة اليومي للمنظومة الكهربائية

الاستنتاجات والتوصيات :

الاستنتاجات :

بيّنت نتائج البحث جدوى النموذج الرياضي لحساب زمن الشحن و التفريغ للخزان من حيث عدد الساعات المطلوبة لكلا الطورين .

بيّنت نتائج البحث أن نمذجة السلوك الحراري للخزان ضروري من حيث قدرته على تغطية حمل التبريد خلال الزمن المطلوب (11 hr.) .

أظهر نتائج البحث أن استخدام نظام التخزين الحراري يرفع معامل الأداء لمبرد الماء (COP) خلال العمل اليومي بسبب العمل على وتيرة ثابتة (Load Leveling) وخصوصاً في فترة الذروة .

إن استخدام تقنية التخزين الحراري في الجليد يحقق استقرار استهلاك الطاقة الكهربائية نتيجة لعمل مبرد الماء خلال ساعات الحضيض .

إن استخدام تقنية التخزين الحراري في الجليد يساعد على تحسين معامل الحمل اليومي ، حيث تم إحداث إزاحة في الاستطاعة الكهربائية اليومية لمبرد الماء المستخدم في البحث حوالي (576 Kw-h) .

التوصيات :

-إعداد دراسة حول أنظمة التخزين الحراري التي تستخدم استراتيجية التخزين الكلي (Full Storage) وتقنية الانصهار الداخلي (Internal Melt) ومقارنة النتائج .

-تطبيق منظومة التخزين الحراري في المشاريع الكبيرة في سوريا وخصوصاً في الأماكن الحارة بسبب نتائجها الاقتصادية والكهربائية .

-تقديم نتائج البحث إلى وزارة الكهرباء للتشجيع على استخدام تقنية التخزين الحراري و نتائجها الإيجابية .

المراجع :

- 1- ERCAN ,O . *Storage Of Thermal Energy* . 1st.ed., GAZI university mechanical engineering department , Ankara,1994,322.
- 2- ASHRAE. *Design Guide for Cool Thermal Storage*. 1st.ed., Air Conditioning Department , Atlanta ,1994,125.
- 3-TRANE, *Ice Storage Systems One of the Systems Series*. 1st.ed. , Air Conditioning Department, Atlanta ,2012 ,217
- 4-DORGAN, C.E.; ELLESON,J,S. *Design Guide for Cool Thermal Storage*. 1st.ed. ,New York, 1994,433.
- 5- Liu ,S. *Study on Discharging Characteristics of External Melt Ice-on-coil Thermal Storage System*. Elsevier U.S.A, Vol. 25 ,2002,177-189.
- 6- BINGXI, L; XINHAI,X .*Effects of initial parameters on the internal-melt ice-on-tube while icing* .Journal of Mechanical Science and Technology U.S.A,Vol. 23,2007,1808-1812.
- 7-JEKEL,T,B.*modelingofice storage tanks*. ASHRAE Journal U.S.A,Vol.99,1993,1061-1024.
- 8-SHASEJ. *Air Conditioning and Sanitary Engineering Handbook*. Maruzen Tokyo,Vol.12,1995,210-230.
- 9-Mingjie,Z. *Study on effective use of an ice thermal storage system with simulation*. Nagoya Journal Japan,2010 , 450-475.
- 10-WANG, Y. *Effects of initial parameters on the internal-melt ice-on-tube while icing*. Journal of Mechanical Science and Technology U.S.A,Vol.23,2010,1824-1836.