اختيار نظام حراري كامن متعدد الطبقات في المحطات الشمسية المساعدة

د. بسام بدران*

الملخص

درسنا في هذا البحث دراسة تحليلية برمجية لخزان حراري كامن مؤلف من عدة طبقات من مواد متحولة (متغيرة) الطور غير العضوية، يخزّن طاقة حرارية بمقدار (MW) حراري بالاعتماد على دراسة واقعية في جامعة دمشق لمحطة حرارية شمسية مساعدة لدعم محطة دير علي الحرارية. تبيّن من التحليل العددي أن الخزان المناسب اسطواني الشكل أبعاده القطر :($14\ m$)، والارتفاع ($15\ m$)، ومؤلف من أربع طبقات، الطبقة الأولى من ($NaNO_3$) بارتفاع ($3\ m$)والطبقة الثانية من (KNO_3) بإرتفاع ($2\ m$) والطبقة الثالثة من الملح الشمسي ($60\%\ NaNO_3, 40\%\ KNO_3$) بارتفاع ($6\ m$)، والطبقة الرابعة ($MgCl_2.6H_2O$) بارتفاع (m) حيث تم ذوبان الخزان بشكل كامل بعد ست ساعات من التشغيل.

الكلمات المفتاحية: نظام التخزين الحراري الكامن، التخزين الحرراي، الحرارة الكامنة، المواد المتغيرة الطور، زعانف نحاسية.

*أستاذ مساعد، قسم هندسة الميكانيك العام، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة دمشق.

Selecting Latent Heat Thermal Storage System (LHTES) with Multilayers in Solar Assisted Power Plants

Dr. Bassam Badran*

Abstract

In this research, we have studies a Latent Thermal Heat Storage System (LTHSS) that consist of several layers of Non-Organic Phase change materials (PCMs) to store ($20\ MW_{th}$) based on actual study for parabolic trough solar concentrator to support Deir Ali Thermal Power Plant at Damascus University. It has been shown numerically that the dimensions of the tank were 14 meter in diameter and 15 meter in height and has four layers, the first one is ($NaNO_3$) with 3 meters height, the second one is (KNO_3) with 2 meters height, the third one is solar salt ($60\%\ NaNO_3, 40\%\ KNO_3$) with 6 meters height and the fourth is ($MgCl_2.6H_2O$) with 4 meters height where all layers melted after 6 hours of operation.

Keywords: Latent Heat Thermal Storage System (LHTES), Thermal Storage, Latent Heat, Phase Change Materials, Copper Fins.

* **Associate Prof, General Mechanical Engineering Depart, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering.**

1- المقدمة.

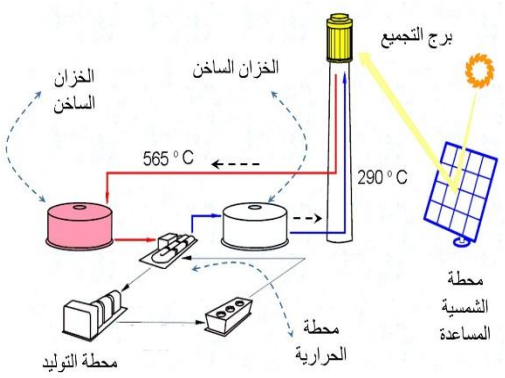
تعدّ المحطات الحرارية الشمسية المساعدة إحدى أهم الأدوات التي تقوم على حصاد الطاقة الشمسية النظيفة واستعمالها في توليد الطاقة الكهربائية المباشرة، أو تخزينها ضمن نظم خزانات حرارية Thermal Storage Systems مناسبة لكي تقوم لاحقاً بتوفيرها إلى المحطات الحرارية (الغازية أو البخارية) Power Plants للمحافظة على استقرار التغذية الكهربائية في أوقات الذروة وتخفيض التذبذب بين الاستهلاك والتوليد [1].

تقسم نظم التخزين الحراري إلى نظم تخزين كيميائي Thermo-chemical Storage، ونظم تخزين كامن Latent Heat Storage، ونظم تخزين محسوس Sensible Heat Storage. يبين الجدول (1) أنواع أنظمة التسخين الشمسي (TES)، الوسيط الناقل للحرارة من الحقل (HTF)، المواد التي تخزن الحرارة (Media) ودرجة الحرارة العظمى التي يمكن الحصول عليها (T_{max}). من أهم نظم التخزين الحراري المحسوسة المستخدمة في المحطات الشمسية القطعية المساعدة Parabolic Trough Power Plants هي نظام التخزين الحراري ذو الخزانين Direct Two Tank Storage بحيث تكون درجة حرارة الخزان الساخن Hot Tank بحدود (°C) ودرجة حرارة الخزان البارد Cold Tank بحدود (**250** °C)، كما في الشكل (1).

الجدول (1) الاستطاعة التخزينية وأبعاد الخزان.

TES	HTF	MEDIA	T_{max}
TWO TANKS DIRECT	BINARY NITRATE SALT	NITRATE SALT	650
TWO TANK INDIRECT	ORGANIC OIL	NITRATE SALT	400
SINGLE TANK THEROMCLINE	BINARY NITRATE SALT	SALT/ QUARTZ ROCK &SALT	650
HOT WATER STORAGE	WATER	WATER	100
CEMENT BLOCK STORAGE	ANY	CONCRETE	400
GRAPHITE BLOCK STORAGE	W/S	HIGH PURITY GRAPHITE	1800
PCM	W/S	NITRATE SALT	650
AMMONIA THEROMCLINE STORAGE	AMMONIA	AMMONIA	750

يبيّن الجدول (2) الاستطاعة التخزينية وأبعاد الخزانات التي تستخدم في هذه المحطات. المدة الزمنية اللازمة لتخزين ($\mathbf{105}\ MWh_t$) هي ثلاث ساعات ولتخزين ($\mathbf{588}\ MWh_t$) هي ست عشرة ساعة [2].



الشكل (1) مخطط لمحطة حرارية ومحطة حرارية شمسية مساعدة.

الجدول (2) الاستطاعة التخزينية وأبعاد الخزان.

الاستطاعة MWh_t	الخزان الساخن		الخزان البارد	
	الإرتفاع m	القطر m	الإرتفاع m	القطر m
105 (3h)	8.5	11.6	7.9	11.6
588 (16h)	12.5	18.9	12.5	18

مع تطور زيوت نقل الطاقة الحرارية Synthetic Heat Transfer Oil في المحطات الحرارية الشمسية المساعدة أصبحت نظم التخزين الحراري المحسوس ذات الخزانين غير اقتصادية، وبدأت نظم التخزين الحراري الكامن ذات الطبقات المتعددة من المواد المتغيرة الطور Cascaded Latent Heat Storage (CLHS) وبخزان واحد أكثر قبولاً [3].

قمنا في هذا البحث، بالاعتماد على دراسة معدة في جامعة دمشق [4] لتحديد الشكل الأمثل لتوزع اللواقط الشمسية القطعية، والاستطاعة العظمى التي يمكن الحصول عليها من هذه المحطة الحرارية، بتحديد:

1) حجم الخزان الحراري الكامن المناسب لتخزين الطاقة الناتجة عن المحطة الحرارية الشمسية المصممة سابقاً باستخدام برنامج ANSYS-16.5.
2) تحديد زمن التحول الطوري للمادة الموجودة في الخزان.
3) اختيار المواد المكونة للخزان الحراري المتكون من عدد من المواد على شكل طبقات مختلفة.

2- اختيار المواد المتحولة الطور.

بناءً على الدراسة التي أجريت في جامعة دمشق لتحديد كمية الطاقة الحرارية التي يمكن استخراجها من للواقط الشمسية القطعية نوع LS-3 الأمريكية على مساحة وقدرها 10 هكتارات لمحطة دير علي في الكسوة – دمشق، سورية، تبيّن أن الاستطاعة الحرارية التي يمكن الحصول عليها من هذه المحطة المساعدة هي حسب الجدول (3) كما يأتي:

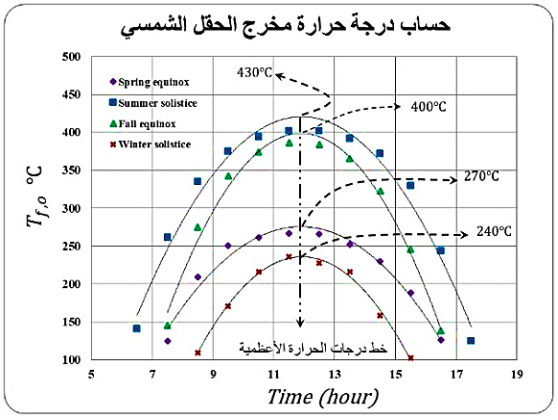
الجدول (3) الإستطاعة الحرارية التي يمكن الحصول عليها لبعض أشهر السنة.

الأشهر	درجة حرارة (T°C)	الاستطاعة (MW)	عند الساعة $Hour$
أذار	266.81	10.934	11:50
حزيران	402.1	19.805	11:50
أيلول	386.57	18.785	11:50
كانون الأول	235.95	8.911	11:50

نلاحظ من الجدول أن الطاقة الأعظمية قد تصل إلى 20 ميغاواط حراري في حزيران (صيفاً)، و9 ميغاواط حراري في كانون الأول (شتاءً). هذه الطاقة الناتجة عن المحطة الشمسية المساعدة يجب:

1) استخدامها فور خروجها من المحطة، ومن ثمّ مساعدة المحطة المشتركة Combined Cycle
2) القائمة في دير علي،
3) أو تخزينها لاستخدامها لاحقاً.

يعطي أيضا المرجع السابق منحنى تغير درجة حرارة مخرج الحقل الشمسي مع الزمن، كما في الشكل (2).



الشكل (2) منحنى تغير درجة حرارة مخرج الحقل الشمسي مع الزمن.

يبيّن المحور الشاقولي في الشكل (2) درجة حرارة خروج سائل التشغيل من المحطة الشمسية المساعدة بالدرجة سليزيوس، ويبيّن المحور الأفقي الزمن بالساعة. نلاحظ من الشكل أن:

- النقاط الموجودة على المخطط هي القيم المحسوبة حساباً حسب الدراسة، كما هو واضح في الجدول (3) أمّا المنحنى فهو منحنى الارتداد Regression Line الذي يعمل على إعطاء الموديل الرياضي للنقاط المحسوبة، فمثلاً معادلة منحنى درجة سائل وسيط النقل الحراري في فصل الصيف بدلالة الإشعاع الشمسي خلال الساعات من 5 صباحاً إلى 19 مساءً هي معادلة من الدرجة الثانية، وتعطى بالشكل:

$$T_{f,o} = -8.9364 * time^2 + 213.12 * time - 849.68$$

أمّا الرواسب Residuals فهي ($R^2 = 0.9752$) فيمكن الإفادة من هذا المنحنى

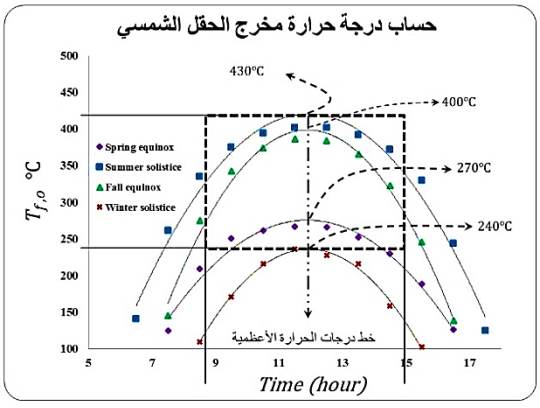
فـي تحديـد القـيم البينيـة لدرجـة حـرارة وسـيط التشـغيل الناقل للحرارة لكل مدةزمنية معينة.

- لكـي يـتم اختيـار 1) أبعـاد الخـزان الحـراري الكـامن، و2) زمن التحول الطوري، و(3) المادة أو المواد المتغيرة الطور، اخترنا أعظم درجة حرارة وأصغرها عاملة لوسيط التشغيل الناقل للحرارة والأزمنة المرافقة لها.

يبيّن الشكل (3) المنطقة المختارة في بحثنا هذا اذ انّ درجـة الحـرارة الأعظميـة هـي (**430** ℃)، والأصـغرية (**240** ℃) أمّـا الـزمن الموافـق لهـذه الـدرجات فهـو مـن الساعة التاسعة صباحاً وحتى الثالثة ظهراً، أي ست ساعات عمل للخزان الحراري الكامن.

تـدفق وسـيط النقـل الحـراري المعتمـد فـي الدراسـة [4] (السيليكون الحراري) هو $(\mathbf{4.74\ kg/sec})$ لخط واحد من اللواقط الشمسية الموصولة على التسلسل ومن ثمّ التدفق الكلـي لسـبعة خطـوط هـو $(\mathbf{33.18\ kg/sec})$ وهـو التدفق الذي سيدخل الخزان الحرارية الكامن. يجب أن تكون الأنابيـب المسـتخدمة فـي نقـل الوسـيط الحـراري مـن الفـولاذ المغلفن بطبقة من الكروم للحيلولة دون نفاعلها مع المواد المتغيـرة الطـور المسـتخدمة. بحسـب مواصـفات American Society of Mechanical Engineers (ASME) ذات المعايير standards B36.10M and B36.19M نجد أن أقطار الأنابيب تراوح بين:

- $(DN\ 6mm = NPS\ 1/8\ in)$
- $(DN\ 2200mm = NPS\ 88\ in)$



الشكل (3) زمن التخزين وحدود درجات الحرارة.

بمراجعـة المـواد المتغيـرة الطـور فـي المرجـع [5]، يبيّن الجدول (4) المواد غير العضوية Inorganic PCM المناسـبة لـدرجات الحـرارة العظمـى والصـغرى المقترحة سابقاً، والموافقة للموصفات الفيزيائية والحرارية المناسـبة للتطبيـق. هنـاك مجموعـة أخـرى مـن المـواد المتغيـرة الطـور، ولكـن بعـض مواصـفاتها الفيزيائيـة والحرارية غير معروفة.

الجـدول (4) المـواد المتغيـر الطـور المناسـبة للتطبيـق السابق.

المادة	درجة حرارة الانصهار (T℃)	الحرارة الكامنة (kJ/kg)
$NaNO_3$	307	172
KNO_3	333	266
$\begin{pmatrix}38.5\%\ MgCl\\61.5\%\ NaCL\end{pmatrix}$	435	328
$\begin{pmatrix}60\%\ NaNO_3\\40\%\ KNO_3\end{pmatrix}$	200	125
$(MgCl_2.6H_2O)$	117	168

3- بـارمترات المحاكـاة الحاسـوبية للخـزان المقترح.

مـن أجـل حسـاب أبعـاد الخـزان الحـراري المناسـب للقيم الواردة في الدارسـة المبيّنـة في المرجـع [4] التـي تبلـغ بحـدود (20 MW)، قمنـا باعتبـار أن الخـزان الحراري الكامن يتألف من طبقة واحدة فقط من أجل تحديد الحجم الابتدائي للخزان الذي يعمل فقط على ست ساعات، كما في الشكل (3). الجدول (5) يبين أبعـاد الخـزان الطـوري باسـتعمال المعـادلات الأساسـية الآتية:

$$Q = 20000 * 6 = 432 * 10^6\ kJ$$

$$Q = m * h \quad (kJ)$$

$$m = \frac{Q}{h} \quad (kg)$$

$$V = \frac{Q}{\rho * h} \quad (m^3)$$

إذ

$Q\ (kJ)$	كمية الحرارة من المحطة
$m\ (kg)$	كتلة المادة المتغيرة الطور
$h\ (kJ/kg)$	انتالبي المادة المتغيرة الطور
$\rho\ (kg/m^3)$	كثافة المادة المتغيرة الطور
$V\ (m^3)$	حجم الخزان الطوري

الجدول (5) حجم الخزان الحراري الكامن لمادة واحدة.

المادة	الكثافة (kg/m^3)	الحرارة الكامنة (kJ/kg)	الحجم الطاقي (m^3)
KNO_3	2110	266	770
$NaNO_3$	2260	172	1111
$\begin{pmatrix}60\%\ NaNO_3\\40\%\ KNO_3\end{pmatrix}$	1899	125	1800
$\begin{pmatrix}38.5\%\ MgCl\\61.5\%\ NaCL\end{pmatrix}$	435	328	3100

نلاحظ من الجدول (5) أننا يمكن اختيار خزان إسطواني بنصف قطر بمقدار 7 أمتار (قطر 14 متراً) وإرتفاع 15 متراً، أي بحجم $2300\ m^3$ يفي بالغرض كون أغلب الخزانات المستخدمة في نظام التخزين المحسوس بخزانين تراوح أبعادها بين 10 إلى 20 متراً بالقطر و10 إلى 20 متراً بالارتفاع [2]، وهذا يتناسب مع القيم الموجودة في الجدول (2).

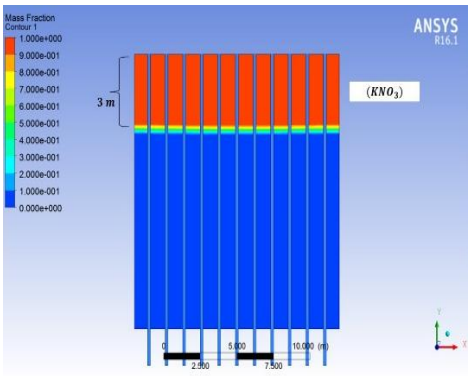
4- النتائج والمناقشة للمحاكاة العددية.

باستخدام برنامج ANSYS 16.5 أجريت محاكاة الخزان بعدد من العقد (Nodes) 11679 عقدة، و10242 عنصراً هرمياً وبعدد من التكرارات 1000 مرة للوصول إلى الخطأ المطلوب، فتبيّن أن الخزان ينصهر بالكامل بعد 6 ساعات عمل، وذلك بفرض أن الحرارة على سطح الأنبوب ثابتة عند أخذ الفرضيات الآتية:

1. لا توجد سماكة لقطر الأنبوب الناقل للحرارة ضمن الخزان.
2. تدفق وسيط التشغيل ثابتة ضمن الأنبوب الناقل للحرارة ضمن الخزان.
3. درجة حرارة دخول وسيط التشغيل $(400°C)$ وخروجه $(100°C)$ بحسب الدراسة.
4. الخزان أسطواني الشكل بأبعاد بقطر 14 متراً وإرتفاع 15 متراً.
5. زمن التشغيل ست ساعات لتخزين الطاقة الحرارية (MW).
6. اختيار قطر الأنبوب الناقل للحرارة $(200mm)$ لأنّ الدراسة العددية بيّنت أن قطر الأنبوب لا علاقة له بسماكة الطبقة المنصهرة حول الأنبوب.

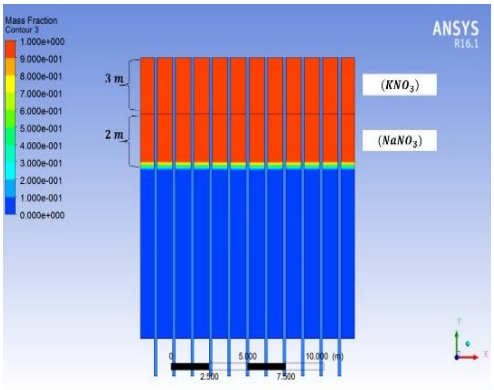
تبين من الدراسة العددية أن الخزان يتألف من أربع طبقات مختلفة من المواد المتغيرة الطور وهي:

- **الطبقة الأولى** هي من مادة نترات البوتاسيوم (KNO_3) بسماكة 3 أمتار تذوب ذوباناً كاملاً خلال المدة الزمنية المفروضة، وبدرجة حرارة دخول $(400°C)$ ودرجة حرارة خروج $(350°C)$، كما في الشكل (4-a).



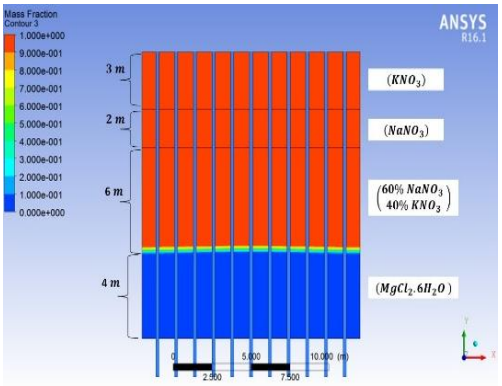
الشكل (4-a) ذوبان طبقة نترات البوتاسيوم بالكامل.

- **الطبقة الثانية هي من مادة نترات الصوديوم $(NaNO_3)$ بسماكة 2 مترين تذوب ذوباناً كاملاً خلال المدة الزمنية المفروضة وبدرجة حرارة دخول $(350°C)$ ودرجة حرارة خروج $(220°C)$، كما في الشكل (4-b).**



الشكل (4-b) ذوبان طبقة نترات الصوديوم بالكامل.

- **الطبقة الثالثة** هي من مادة نترات الصوديوم ونترات البوتاسيوم والذي يسمى الملح الشمسي بنسبة$(\mathbf{60\%\ NaNO_3\ and\ 40\%\ KNO_3})$ بسماكة 6 أمتار تذوب ذوباناً كاملاً خلال المدة الزمنية المفروضة، وبدرجة حرارة دخول $(\mathbf{220}^{\circ}\mathbf{C})$ ودرجة حرارة خروج $(\mathbf{130}^{\circ}\mathbf{C})$، كما هو واضح في الشكل (4-c).



الشكل (4-c) ذوبان طبقة نترات الصوديوم ونترات البوتاسيوم بالكامل.

- **الطبقة الرابعة** هي من مادة ماءات كلور المغنيزوم $(\boldsymbol{MgCl_2.6H_2O})$ بسماكة 4 متر تذوب ذوباناً كاملاً خلال المدة الزمنية المفروضة، وبدرجة حرارة دخول $(\mathbf{130}^{\circ}\mathbf{C})$، ودرجة حرارة خروج $(\mathbf{100}^{\circ}\mathbf{C})$.

5- الاستنتاجات والتوصيات.

تبيّن من الدراسة العددية أن الطاقة الحرارية التي يولدها الحقل الشمسي يمكن أن تخزن بخزان اسطواني:

1. بقطر 14 متراً وارتفاع 15 متراً تتناسب أبعاده مع الدراسات العالمية الموجودة.
2. تبيّن من الدراسة العددية، وبالاعتماد على حجم ثابت للخزان المبيّن في البند 1، أن الخزان ينقسم إلى أربع طبقات مختلفة من المواد المتغيرة الطور غير العضوية للحصول على ذوبان كامل للمادة، وتحقيق شروط دخول سائل التشغيل العامل في الحقل وخروجه.
3. حدّدت سماكات المواد المتغيرة الطور باختلاف درجة حرارة خروج سائل التشغيل (السيليكون الحراري) من الطبقة، بما يتناسب مع درجة حرارة التحول الطوري للطبقة التالية.
4. ساعات العمل هي فقط 6 ساعات للحصول على ذوبان كامل.
5. الاستطاعة الحرارية الأعظمية للخزان هي 20 ميغاواط حراري.

REFERENCES المراجع

[1] Vaivudh, S., Rakwichian, W., Chindaruksa, S. and Sriprang, N., 2006, "Heat Transfer of Charging and Discharging Experiment of High Thermal Energy Storage System by Thermal Oil as Heat Transfer Fluid." International Journal of Renewable Energy, 1, 17-21.

[2] Kelly, B., 2006, "Two Tank Direct Thermal Storage System, Solar Two and Solar Tres Central Receiver Power Plants." Nexant, Inc, San Francisco, California.

[3] Michels, H. and Pitz-Paal, R., 2007, "Cascaded Latent Heat Storage for Parabolic Trough Solar Power Plants." Solar Energy, 81, PP. 829-837.

[4] Hamadi, B., Tohma, S., and Mahmoud, I., 2015, "Implementation of Parabolic Trough Solar Concentrator to Support Deir Ali Thermal Power Plant and its Economic Efficiency." M.S. Thesis, Damascus University, Syria.

[5] Zalba, B., Marın, J., M., Cabeza, L. F., and Mehling, H., 2003, "Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications," Applied Thermal Engineering, 23, PP. 251–283.

Received	**2016/07/10**	**إيداع البحث**
Accepted for Publ.	**2017/05/11**	**قبول البحث للنشر**