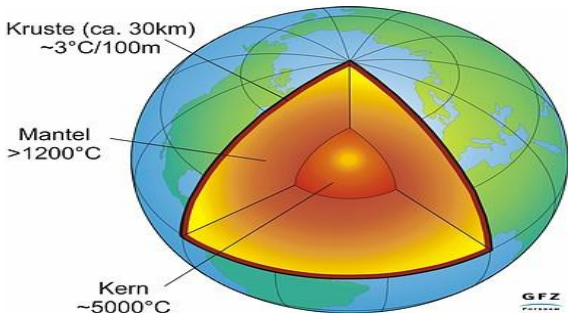
الفصل الرابع

الطاقـــة الجيوحرارية

4-1-مصدر الحرارة الجوفية

تحت قشرة الأرض تقع طبقة منصهرة تسمى الطبقة المَغِلّفة (الدثار) وتحت هذه الطبقة يقع لب الأرض الشكل (4-1)، ويخمن أن درجة حرارة قاعدة قشرة الأرض هي 200-1000 °C .

أن جزءاً فقط من كمية الحرارة الهائلة التي تحتويها قشرة الأرض يمكن أن يستفاد منها، ولقد قدرت الكمية الكلية للحرارة الجوفية المتوفرة على افتراض نظرياً سحب الحرارة من عمق أعظمي قدره 32 Km من سطح الأرض فأن كمية الحرارة ستساوي 3×10^{21} Kw h وإذا افترضنا أن سحب كمية الحرارة سيستغرق 1000سنة فأن كمية الطاقة المتوفرة سنوياً من هذا المصدر ستكون 3×10^{18} Kw h و هذا يساوي 10000مرة احتياجات الطاقة السنوية في العالم حالياً.

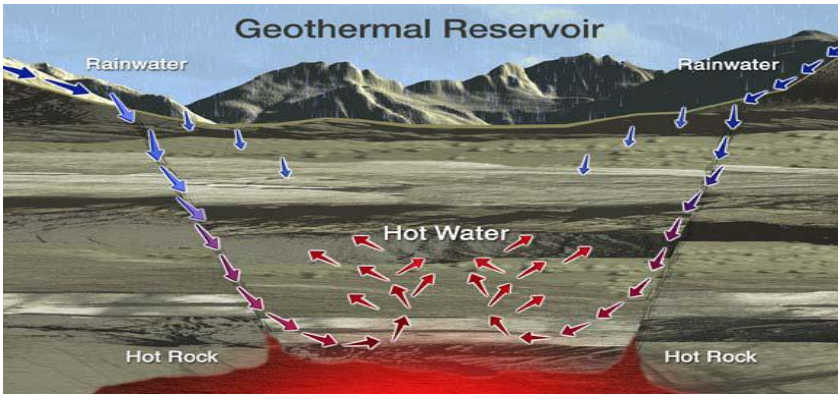


الشكل (4-1) طبقات الأرض

وهكذا يبدو لنا أن مصدر الطاقة هذا هو مصدر لن ينضب، ولكن حتى الوقت الحاضر لم تقترح خطة واعدة لجلب كمية الحرارة هذه إلى سطح الأرض بغية الاستفادة منها على نطاق واسع.

ويعتقد أن مصدر الحرارة في باطن الأرض هو نتيجة التحطم المستمر للعناصر المشعة الموجودة بداخلها، الأمر الذي يجعل نواة الأرض (اللب) في حالة منصهرة دوماً، وتنتقل هذه الحرارة باتجاه السطح بأشكال مختلفة، إلا أن هذا التدفق الحراري هو في معظم المناطق صغير جداً. هذا وتعتبر الطاقة الجيوحرارية أحد مصادر الطاقات البديلة إلا أنه مصدر غير متجدد.

أن الماغما الحارة هي المسؤولة عن توليد الماء الجوفي الساخن والبخار الجوفي وتسربه عبر الشقوق إلى سطح الأرض، وتمثل الشقوق خطوط هروب لكتلة الماء المتسربة والتي تلامس طبقات الصخور الحارة وتتحول إلى ماء ساخن أو إلى بخار. يبين الشكل (4-2) الذي يمثل حقل حرارة جوفية ويبين كيف يتحول الماء المتسرب إلى الأعماق إلى ماء ساخن أو بخار يخرج إلى سطح الأرض عبر الشقوق على شكل ينابيع حارة أو بخار جوفي.



الشكل (4-2) حقل حرارة جوفية

ويتدفق البخار الجوفي (الطبيعي) على سطح الأرض في مواقع عديدة من الكرة الأرضية، ففي (جنوب فلورنسا) استعمل البخار في القرن التاسع عشر لتوليد الطاقة الميكانيكية، ثم ومنذ عام 1913 لتوليد الطاقة الكهربائية، واليوم تولد ايطاليا استطاعة كهربائية قدرها 400MW من البخار الطبيعي.

وفي الولايات المتحدة، وفي منطقة شمال سان فراسيسكو تحفر الآبار العميقة للحصول على البخار الأرضي الذي يستعمل في محطات بخارية لتولد الطاقة الكهربائية.

4-2- منابع الطاقة الجيوحرارية

أذا حفرنا في عمق القشرة الأرضية نلاحظ أن درجة الحرارة تزداد وسطياً بمقدار 25-30 °C لكل Km، وقد تصل الزيادة في بعض المناطق (مثل المناطق البركانية ومناطق الزلازل) إلى 80°C لكل Km (ونقول أن التدرج الحراري في هذه المنطقة هو 80°C / Km)، وتغطى هذه المناطق حوالي 10% من سطح الأرض. وأهم مواقع حقول الحرارة الجوفية في العالم هي:

1- الشاطئ الغربي لأمريكا من الآسكا إلى التشيلي.

2- الحافة الغربية للمحيط الهادي من نيوزيلندة إلى اليابان عبر اندونيسيا والفلبين.

3- الوادي الانهدامي في إفريقيا (من كينيا واوغندا وإثيوبيا).

4- حوض البحر الأبيض المتوسط.

وينبغي أن نشير هنا إلى أن كل حرارة جوفية لا تعد مصدراً مفيداً للطاقة الجيوحرارية إلا أذا سمحت الظروف الجيوحرارية بتشكل خزانات جيوحرارية، وهذه الخزانات هي شبيهة بالمكامن الصخرية التي يتجمع فيها النفط أو الغاز الطبيعي أي صخور مسامية مغطاة بطبقة غير نفوذة، فالماء الجوفي المسخن يرشح نحو الأعلى إلى الخزان حيث يتجمع تحت الغطاء الصخري وإذا ما احتوى هذا الغطاء على تشققات فأن

الماء أو البخار يتسرب إلى سطح الأرض مشكلاً ينابيع ساخنة (ماء ساخن أرضي أو بخار أرضي).

وتتعلق درجة حرارة مياه الينابيع الجوفية بعمقها، ونظراً إلى أنها نادراً ما تتواجد بشكل طبيعي في أعماق تزيد عن 4Km فأن درجة حرارتها تبقى أقل من 300 C° وتكون نقطة غليانها أكبر من 100 C°إذا كانت تحت ضغط أكبر من الضغط الجوي.

3-4- تقنيات استثمار الطاقة الجيوحرارية

يوجد طريقتان للاستفادة من حرارة باطن الأرض:

1- استخدام الماء الحار أو البخار المتشكل بصورة طبيعية: وقد استفاد الإنسان من مصدر الطاقة هذا منذ 2000 سنة حيث استخدمت الينابيع الحارة للاستحمام. ويستفاد منها اليوم في تدفئة المباني السكنية، تدفئة البيوت الزجاجية الزراعية، تجفيف المنتجات الزراعية، توليد الطاقة الكهربائية بواسطة العنفات البخارية.

وتوجد في الطبيعة مواقع عديدة يتصاعد منها البخار من جوف الأرض، واستعمل هذا البخار منذ عهد الرومان لغايات التدفئة وفي الحمامات، وخلال القرن التاسع عشر كان هناك في Larderello حقل بخار استعمل للتدفئة ولتوليد الطاقة الميكانيكية. ويستعمل البخار الطبيعي الجوفي لغاية توليد الكهرباء في كل من الولايات المتحدة، إيطاليا، نيوزيلندة، روسيا، تركيا، اليابان، ايسلاندة والمكسيك. ويتم حالياً في ل كاليفورنيا توليد الكهرباء من الحرارة الجوفية في محطات استطاعتها 2000 MW.

ويمكن الوصول إلى الخزانات الجيوحرارية الطبيعية بحفر الآبار التي يتدفق منها الماء الساخن أو البخار، ويمكن استعمال المضخات لسحب المياه الدافئة في الحالات الأخرى.

2- استخلاص الحرارة من الصخور الجافة والحارة: يمكن الاستفادة من الحرارة الجوفية بشكل واسع في المستقبل بحفر آبار عميقة تصل إلى الصخور الجافة الحارة، ويمكن ضخ الماء في هذه الآبار للحصول على ماء ساخن أو بخار، إلا أن كلفة هذه العملية ما زالت مرتفعة بالإضافة إلى أن أماكنً محدودة فقط (هي عادة المناطق البركانية) يمكن أن تكون ملائمة للاستغلال التجاري لهذه الطاقة.

وقد اقترح العلماء في مخبر لوس الاموس Los Alamos العلمي في الولايات المتحدة أجراء تجربة توضيحية لمشروع الاستفادة من الحرارة الجوفية تتضمن حفر بئر عميقة (حتى عمق 8Km) تصل إلى طبقات الصخور الحارة الجافة وضخ الماء ليلامس الصخور الحارة وليتحول إلى بخار ينساب من بئر ثانٍ إلى سطح الأرض ويستعمل هذا البخار في محطة توليد طاقة بخارية.

وحسب المبدأ المقترح من قبل علماء Los Alamos سيتم تبطين الثقب المحفور بأنابيب فولاذية مزودة بثقوب على ارتفاع عدة مئات من الأمتار فوق قعر البئر. وتقوم مضخة عالية الضغط (1000 Bar) بإرسال الماء تحت هذا الضغط لتجبر الماء على التسرب عبر الثقوب الموجودة في الصخور ولتحدث تشققات فيها، وهكذا تتشكل لدينا منطقة صخور حارة متشققة، ويحفر بئر ثانٍ على بعد 1000m تقريباً من البئر الأول، ويضخ الماء بعدئذ من البئر الأول ليجول عبر شبكة التشققات التي كانت قد تشكلت ويتحول إلى بخار يصعد إلى السطح عبر البئر أو الثقب الثاني الشكل (4-3)، الذي يوضح تقنية الاستفادة من الحرارة الجوفية المستمدة من طبقة الصخور الجافة الحارة لتوليد الطاقة الكهربائية حسب المبدأ المقترح من علماء لوس الاموس. ويشير هذا الاقتراح عدة أسئلة تحتاج إلى بحث عميق وهي:

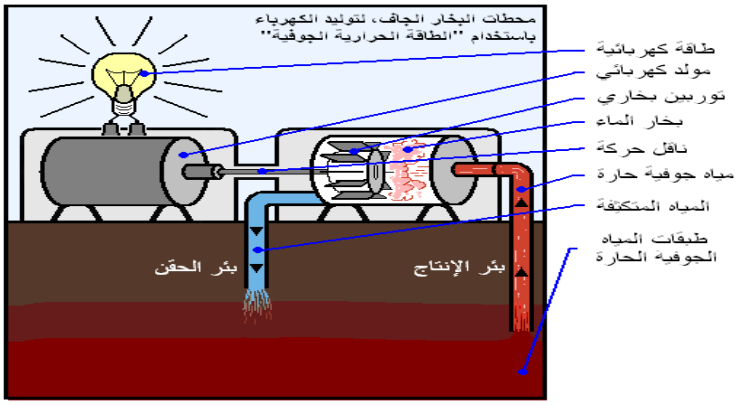
- هل ستنتشر تشققات الصخور كما هو متوقع لها؟

- هل ستنتج فعالية زلزالية عن هذه العملية؟

- هل ستؤدي البئر المستنفذة إلى هبوط على سطح الأرض؟

- هل يمكن التحكم بالإصدارات الغازية من البئر؟

- هل تسبب الأملاح المعدنية المنحلة والتي سيحملها الماء الساخن (البخار) معه تآكلا للأجزاء المعدنية من النظام؟



الشكل (4-3) تقنية الاستفادة من الحرارة الجوفية (اقتراح لوس الاموس)

أن الشوائب ينبغي أن تزال من وسيط العمل في دارة توليد الطاقة ولكن التخلص منها سيشير تحدياً جديداً. كذلك الفيض المنبعث من الماء الساخن أو من أنظمة البخار يمكن أن يلوث المياه الجوفية أو المياه السطحية مثل الأنهر و البحيرات، لهذا تشترط القوانين والأنظمة في الولايات المتحدة أن يعاد حقن الموائع المعترض عليها (والتي مصدرها باطن الأرض) ثانية إلى جوف الأرض، ويعتبر التخلص من الأملاح والشوائب التي فصلت عن البخار الجوفي من أهم المشاكل التي ترافق استعمال الحرارة الجوفية، والضرر الذي يمكن أن تسببه للطبيعة وللبيئة يكمن في أننا نجلب إلى سطح الأرض كميات كبيرة من الأملاح وغيرها من المواد الكيميائية بمعدات غير طبيعية في حالة الاستطاعات الكبيرة. أن محطة توليد الطاقة الكهربائية قد تبث في الجو ملوثات أقل

بكثير من الملوثات الناتجة عن حرق الوقود الاحفوري إلا أنها تصدر إلى الجو كميات أكبر بكثير من كبريت الهيدروجين.

ومن المخاوف التي يثيرها استعمال الحرارة الجوفية احتمال حدوث هبوط في الطبقات الأرضية نتيجة سحب المائع على شكل ماء ساخن أو بخار من جوف الأرض، وحدوث تقلصات في الصخور العميقة نتيجة سحب الحرارة بالإضافة إلى زيادة احتمال وقوع هزات أرضية وزلازل نتيجة حقن الماء البارد في الطبقات العميقة من مناطق الصدوع.

أن إمكانيات الاستفادة من الحرارة الجوفية تبدو جذابة لدرجة أننا نتسأل لماذا بقي موضوع الاستفادة منها وتطويرها بطيئاً حتى الآن؟ ويمكن الإجابة على هذا التساؤل بما يلي:

1- كان علينا حتى اليوم الاستفادة من الحرارة الجوفية حيث نجدها متوفرة، إن تجهيزات نقل هذه الطاقة من مواقع تواجدها و توفرها إلى مواقع الاستفادة منها هي مكلفة.

2- أن تقدير الاحتياطي من الطاقة الجيوحرارية كان أقل مما يستحق، ولكن نظراً إلى أن الماغما البازلتية تحت حرارة عالية هي متوفرة في كل مكان يمكننا أن نتصور (حتى في حالة غياب حقول البخار الجوفي أو المياه الساخنة الجوفية) إمكانية استخراج الطاقة الحرارية من باطن الأرض بطريقة حفر الآبار العميقة واستعمال تقنيات استخراج الحرارة مباشرة من هذه الطبقة.

أن كلفة الطاقة الحرارية الجوفية يمكنها أن تنافس كلفة الطاقة من مصادر أخرى، على سبيل المثال: أن كلفة الطاقة الكهربائية المولدة من البخار الجوفي في شمال كاليفورنيا هي بحدود 0.05$/KW-h بالمقارنة مع الكلفة الوسيطة للطاقة الكهربائية من المصادر التقليدية في كاليفورنيا التي هي بحدود 0.07$ / KW-h.

4-4- أمثلة على استثمار الطاقة الجيوحرارية

1- المثال الأول: منشأة تستعمل الطاقة الحرارية الجوفية لتوليد الكهرباء والتدفئة

أن محطة توليد الطاقة الكهربائية التي تستعمل الحرارة الجوفية في Monte Amiata (ايطاليا) باستطاعة $15MW_e$ هي قيد الاستثمار منذ عام 1968، وتستخدم البخار الأرضي الذي مصدره آبار جوفية بعمق 700m حتى 1000m، وشروط هذا البخار هي: درجة الحرارة 184 °C، الضغط 9.3 bar، مع محتوى عال للغازات غير القابلة للتكاثف (بشكل رئيسي CO_2) يبلغ 18% وزناً.

أن مقدار الطاقة الحرارية التي يمكن الاستفادة منها لتوليد الطاقة الكهربائية يبلغ 314 GJ/h وهذا يعادل 68000 طن مكافئ من البترول سنوياً كانت ستسهلك لتوليد هذه الطاقة الكهربائية.

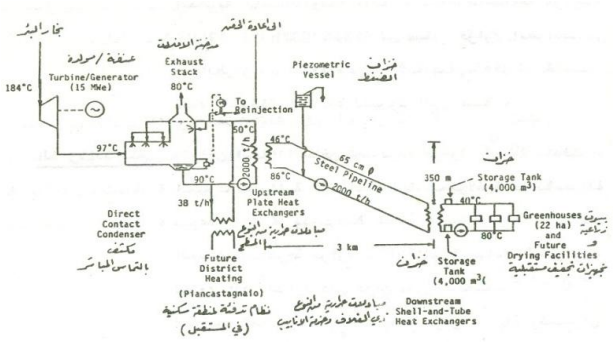
تستعمل المحطة مكثف من الطراز ذي التماس المباشر (مكثف بالمزج) وتبلغ درجة حرارة مياه التكاثف 90 C° الأمر الذي يبرر الاستفادة من محتوى هذه المياه من الطاقة الحرارية. ولهذه الغاية أضيف إلى المشروع مبادلات حرارية للاستفادة من هذه الطاقة الحرارية لغاية تدفئة البيوت الزراعية البلاستيكية ولتدفئة منطقة سكنية قريبة من محطة توليد الطاقة.

ونظراً إلى أن مياه التكاثف الساخنة تحتوي على الكبريت والكلور وغاز CO_2 فأنها تسبب تآكلاً شديداً إذا ما استعملت مباشرة، لذلك لجئ إلى استعمال مبادلات حرارية من النوع اللوحي المسطح ومن النوع الاسطواني ذي الغلاف وحزمة الأنابيب. الشكل (4-4) يمثل مخطط عمليات استرجاع الحرارة من مياه التكاثف ونظام نقل الطاقة الحرارية. لذلك يستعمل المنشأة عدة دارات حرارية هي:

1 - الدارة الأولى: وهي دارة مياه التكاثف، وتحتوي على مكثف بالتماس المباشر لتكثيف بخار الإفلات من العنفة البخارية ومبادل حراري غزارة المائع $2000m^3$ /h أن

الأنابيب في هذه الدارة ينبغي أن تكون مقاومة لتآكل لذلك اختير البلاستيك المضغوط المقوى بالصوف الزجاجي لصنع هذه الأنابيب.

2 - الدارة الثانية: وتقوم بنقل الطاقة الحرارية من محطة توليد الطاقة الكهربائية إلى البيوت الزراعية وتحتوي عل مبادل حراري سطحي وأنابيب فولاذية معزولة بقطر 65 Cm تنقل 2000t/h من الماء الساخن (بدرجة حرارة ماء) الذهاب°C 86 وماء الإياب °C 46 باستطاعة حرارية $1.13\ MW_{th}$ (314 GJ/h) إلى مبادل حراري أسطواني من الطراز ذي الغلاف وحزمة الأنابيب يستعمل لتسخين مياه التدفئة العائدة للبيوت الزراعية.



الشكل (4-4) مخطط عمليات استرجاع الحرارة من مياه التكاثف ونظام نقل الطاقة الحرارية

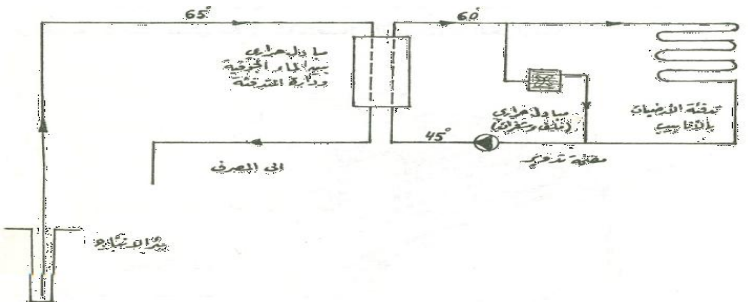
3- الدارة الثالثة: وتؤمن الماء الساخن تحت درجة حرارة °80C لتدفئة البيوت الزراعية، بواسطة أنابيب فولاذية عادية معزولة بسرعة 2 m/s وتحت ضغط 1.5 bar – 1 bar، وتقود المياه تحت درجة حرارة °40C إلى مبادل الحراري، تحتوي هذه الدارة على خزان معزول بسعة $4000m^3$ لتخزين الماء الساخن تحت درجة حرارة °80C وخزان ثان معزول أيضاً وبذات سعة التخزين للماء الراجع تحت درجة حرارة °40C، وتستعمل الطاقة الحرارية المخزونة لمجابهة طلب الذروة ولضمان الاستمرار

في تدفئة البيوت الزراعية في حال حدوث عطل أو لدى توقف منشأة توليد الطاقة الكهربائية عن العمل لسبب ما. هذه المنشأة تعطي مثالاً جيداً على الاستعمال المشترك للطاقة الحرارية الجوفية لغاية توليد الطاقة الكهربائية والاستفادة من الطاقة الحرارية للتدفئة.

2- المثال الثاني: منشأة تستعمل الطاقة الحرارية الجوفية للتدفئة

في فرنسا تتوفر مياه دافئة بدرجة حرارة C° 65-60 في منطقة باريس على عمق 2000m وقد أمكن استغلال هذه الطاقة الحرارية لغايات التدفئة. وبعد المشروع الرائد في Melun الذي وضع قيد الاستثمار عام 1970 أضيف إليه ثلاثة مشاريع مشابهة لتدفئة 13000 شقة سكنية تقع حول مدينة باريس وبينت الدراسات أن كلفة التشغيل (شاملة إطفاء الرأسمال) كانت أقل %[16-13] من كلفة التدفئة بالطرق التقليدية.

الشكل (4-5) يبين مبدأ عمل نظام تدفئة مركزية باستخدام الحرارة الجوفية، وتجدر الإشارة هنا إلى ضرورة استعمال مبادلات حرارية بين المياه الجوفية الدافئة ووسيط التدفئة، وإلى أن نظام التدفئة المستعمل هو النظام ذو درجة الحرارة المنخفضة الذي تكون فيه درجة الحرارة وسيط التدفئة بين °50 و °60.



الشكل (4-5) بعض أنظمة التدفئة باستخدام الحرارة الجوفية

الجدول (1-4) يبين الموصفات الفنية لمشروع تدفئة ضاحية قرب باريس بالطاقة الحرارية الجوفية:

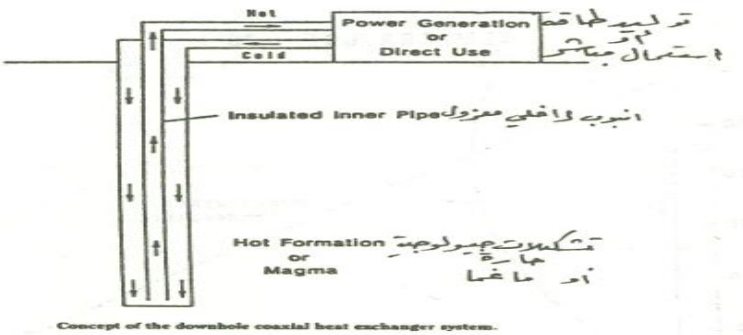
الجدول (1-4) الموصفات الفنية لمشروع تدفئة ضاحية قرب باريسة الجوفية

عدد البيوت التي تم تدفئتها بهذا المشروع	5809
غزارة المياه الجوفية الدافئة	280 m^3 /h
درجة حرارة هذه المياه	69 °C
عمق آبار السحب	1871m
عمق آبار أعادة الحقن	1952m
الضغط	9.4 bar
استطاعة المبادلين الحراريين بين مياه التدفئة و المياه الجوفية	9.6 MW
طول شبكة توزيع الحرارة	12 Km

3- المثال الثالث: نظام المبادل الحراري المحوري المركب في البئر

رأينا أن من المشاكل المتعلقة باستخدام الطاقة الجيوحرارية تتعلق في انطلاق الغازات والتي تسبب تلوث البيئة والتآكل، لذا اقترحت أنظمة عديدة للاستفادة من

الحرارة الجوفية مع تجنب نقل الملوثات إلى سطح الأرض وأهم هذه الأنظمة هي نظام المبادل الحراري المحوري المركب في البئر حيث يتم سحب الحرارة فقط من البئر. ويمكن استخدام هذا النظام الموضح في الشكل (4-6) في مجالات استخدام متعددة لتوليد الطاقة أو للاستعمال المباشر للطاقة الحرارية. وذلك ليس فقط في خزانات الحرارة الجوفية ذات الإنتاجية المنخفضة التي تولد كميات قليلة من البخار أو الماء الساخن لغايات التدفئة أو لتوليد الطاقة بل أيضاً في التشكيلات ذات درجات الحرارة العالية وبشكل خاص تلك القريبة من الصخر البركاني المنصهر Magma أو حتى من الماغما ذاتها.



Concept of the downhole coaxial heat exchanger system.

الشكل (4-6) مبدأ استعمال نظام المبادل الحراري المحوري المركب في البئر

ولنظام المبادل الحراري ضمن البئر عدة مزايا:

1- تقنية استخراج الحرارة هي الأكثر فعالية بين كافة الطرق التي تستعمل البئر الوحيد.

2- مجالات استخدام هذا النظام هي واسعة.

3- نظراً إلى أننا نسحب الطاقة الحرارية فقط من البئر، فأن الماء الذي يدور في النظام يبقى نظيفاً ويمكن استعماله مباشرة لغايات متعددة.

4-5- الطاقة الجيوحرارية في سورية

أن الدراسات المتوفرة في القطر، من مسح جيولوجي ومسح جيوفيزيائي مغناطيسي هي ذات طابع محلي، ولم توجه إلى دراسة مصادر الطاقة الحرارية الجوفية بشكل مفصل، واقتصرت على التعرض إلى بعض الظواهر السطحية التي تشير إلى إمكانية توفر هذه المصادر.

وقد تم التعرف على بعض ينابيع المياه المعدنية الساخنة ذات المحتوى العالي من الأملاح ومركبات الكبريت وذلك في عدة مناطق من القطر.

وهذه الينابيع عرفت منذ القديم واستخدمت في الماضي للاستحمام أو للاستشفاء وتتراوح درجة حرارة مياه هذه الينابيع بين °25 و °49 أم محتوى الأملاح فيها فيتراوح بين 2 و 2.5 غرام في الليتر. وأشهر هذه الينابيع:

1- نبع السخنة (30°C).

2- نبع أبو رياح (55°C).

3- حمامات الشيخ عيسى (في وادي العاصي شمال جسر الشغور) (30-40°C).

4- ينابيع الحمة بالقرب من نهر اليرموك في الجنوب وعددها 5 وتتراوح درجة حرارتها حوالي 49 °C.

ولا تتوفر الدراسات والقياسات في المنطقة الهامة الواقعة على امتداد الفالق العربي – الإفريقي الكبير (منخفض الغاب – سلسلة جبال الساحلية – منخفض عفرين) لمعرفة وجود خزانات ذات صخور ساخنة قد تكون مهمة في المستقبل للاستفادة منها كمصدر للطاقة في سورية.

الفصل الخامس

طاقة المد والجزر

المد والجزر ظاهرة طبيعية يومية تحصل في جميع بحار العالم ومحيطاته، أما مصدر طاقة المد والجزر فهو قوى الجاذبية لنظام الأرض – القمر – الشمس. إذ أن حركة القمر حول الأرض بالإضافة إلى دوران الأرض حول محورها، واختلاف الخصائص الفيزيائية من حيث الحجم والوزن لكل من الأرض والقمر والشمس فان قوى الجاذبية بين الشمس والأرض تختلف عنها بين الأرض والقمر، وأن اختلاف قوى الجاذبية المؤثرة هذا يشكل العامل الأساسي في حركة المد والجزر.

إن تغير منسوب مياه البحر يومياً بفعل حركتي المد والجزر يحدث كل 12 ساعة و 24 دقيقة، ويختلف ارتفاع المد من منطقة إلى أخرى، ففي البحر الأبيض المتوسط لا يرتفع المد إلا قليلاً ولكن في بعض الخلجان يصل ارتفاع المد حتى 17 متر.

وقبل عدة قرون استخدم الإنسان مصدر طاقة المد في تشغيل الطواحين المائية وكانت الفكرة تقوم على حجز المياه حين ارتفاعها في أحواض طبيعية، حيت يتم إثناء حركة المد إغلاق البوابات لحجز المياه في الأحواض، ثم فتح بوابات موجودة على قنوات تصل بين الأحواض والطواحين لتشغيل هذه الطواحين.

وتتركز الجهود حالياً على استغلال ظاهرة المد والجزر (في الأماكن التي تتوفر فيها) لتوليد الطاقة الكهربائية. ويستند مبدأ عمل هذه المحطات على حجز المياه أثناء ارتفاع منسوب مياه البحر أثناء المد في أحواض طبيعية بحيث تبقى في مستوى أعلى من مستوى مياه البحر في حالة الجزر، والاستفادة من فاروق الارتفاع لهذه المياه في تشغيل العنفات المائية لتوليد الطاقة الكهربائية.

أن الشروط الرئيسية التي ينبغي أخذها بعين الاعتبار عند دراسة إمكانية استغلال طاقة المد والجزر هي:

1 - أن يكون هناك فارق بين منسوبي المياه وقت المد والجزر.

2 - أن تتوفر مناطق طبيعية ملائمة لتشكيل حوض مائي بحيث لا يتطلب الأمر سوى إنشاء سد (سدود) بأبعاد معقولة وكلفة قليلة.

3 - موقع المنطقة الجغرافي الذي يلعب دوراً في تحديد ما إذا كان من الملائم إنشاء محطة توليد الطاقة في هذا الموقع، مثلاً قرب هذا الموقع أو بعده عن المراكز السكانية أو الصناعية والعوامل الاقتصادية المتعلقة بنقل الطاقة الكهربائية المولدة والاستثمارات المطلوبة لذلك.

4 - أن لا يتعارض مشروع طاقة المد مع الطرق الملاحية القائمة إذ أن بناء الحواجز والسدود وإغلاقها وفتحها يؤثر على الملاحة البحرية وقد يتطلب الأمر في بعض الحالات إعادة تنظيم الملاحة في المنطقة المدروسة.

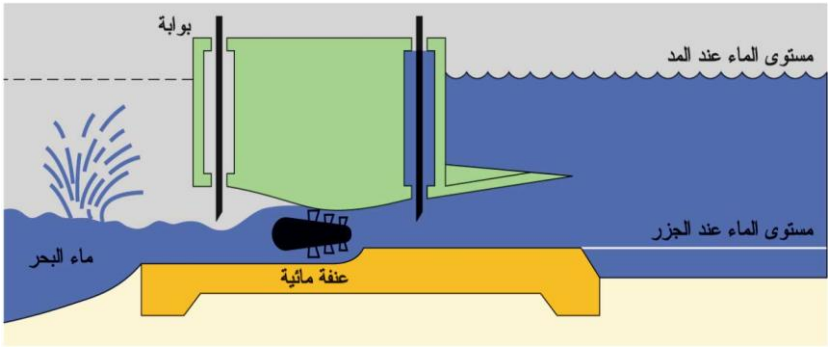
وقد يكون لبناء السدود والحواجز المائية جوانب إيجابية تتجلى في أن هذه السدود تقوم بربط أجزاء من اليابسة تسهل العبور من نقطة إلى أخرى باجتياز جسر قصير بدلاً من سلوك الطرق المحاذية للشواطئ الطويلة نسبياً فيما لو لم توجد مثل هذه الجسور.

1-5- محطات التوليد:

هناك أشكال مختلفة من محطات توليد الطاقة الكهربائية التي تعمل على حركة المد والجزر، وأهم هذه الأشكال التي تلائم موقع المحطة ونمط الاستهلاك هي:

1-المحطات وحيدة الخزان أحادية المفعول: وتتألف المحطة من حوض واحد يتم إنشاؤه بواسطة بناء سد وحاجز، ويتم تركيب محطة التوليد على هذا الحاجز على عدد من

المنافذ يتم فتحها أو إغلاقها حسب شروط العمل الشكل (5-1). أن امتلاء الحوض يتم بواسطة ارتفاع مستوى ماء البحر أثناء المد حيث تكون فتحات دخول الماء إلى الحوض مفتوحة، وعندما يصل مستوى الماء إلى أعلى منسوب له يتم إغلاق هذه الفتحات أو المنافذ، بعدئذ يأخذ مستوى ماء البحر بالانخفاض بينما يبقى مستوى ماء الخزان ثابتاً، وعندما يصبح الفرق بين منسوبي الماء في الحوض والبحر كافياً يتم توجيه مياه الحوض لتمر عبر العنفات المائية التي تأخذ بالعمل وبتوليد الطاقة الكهربائية، ويتم تشغيل العنفات المائية طالما بقي الفرق بين منسوب المياه في الحوض ومنسوب البحر ملائماً لهذا التشغيل، بعد ذلك يوقف جريان المياه من الحوض إلى البحر عبر العنفات، ويلي ذلك فترة انتظار يرتفع خلالها منسوب مياه البحر إلى مستوى أعلى من مستوى الماء في الحوض عندها يتم فتح منافذ دخول الماء ليصار إلى إملاء الحوض ثانية. وهكذا نرى أن عملية إملاء الحوض وتفريغه وبالتالي عملية توليد الطاقة الكهربائية في هذا النوع من المحطات هو ذو طبيعة متقطعة.



الشكل (5-1) المحطات وحيدة الخزان أحادية المفعول

2- المحطات وحيدة الخزان ثنائية المفعول: وهذا الطراز متطور من المحطات السابقة يتم فيها الاستفادة من حركة المياه في كلا الاتجاهين، أي توليد الطاقة الكهربائية أثناء إملاء الحوض وأثناء تفريغه، ويتطلب هذا النوع من المحطات عنفات مائية تعمل بحركة

المياه بغض النظر عن اتجاه الحركة، ويتم ذلك بتعديل اتجاه شفرات العنفات بما يلاءم مع اتجاه جريان المياه.

مبدأ عمل هذه المحطة يعتمد على ارتفاع مستوى مياه البحر حتى يبلغ مستوى أعلى من مستوى المياه في الحوض، عندئذ يتم فتح المنافذ وتدخل مياه البحر إلى الحوض عبر العنفات المائية حتى تصل المياه إلى أعلى مستوى لها عندئذ يتم أقفال المنافذ، ويتم تشغيل مضخات لرفع كميات إضافية من مياه البحر إلى الحوض لرفع مستوى المياه فيه. وتبقى المحطة في حالة انتظار حتى ينخفض مستوى ماء البحر عند الجزر عندئذ توجه مياه الحوض إلى العنفات المائية التي تقوم بتوليد الكهرباء وهكذا تستمر الدورة بحيث يتم الحصول على الطاقة الكهربائية بفعل حركة المياه في كلا الاتجاهين.

وقد تم تنفيذ عدة مشاريع مهمة للاستفادة من طاقة المد والجزر كان أهمها:

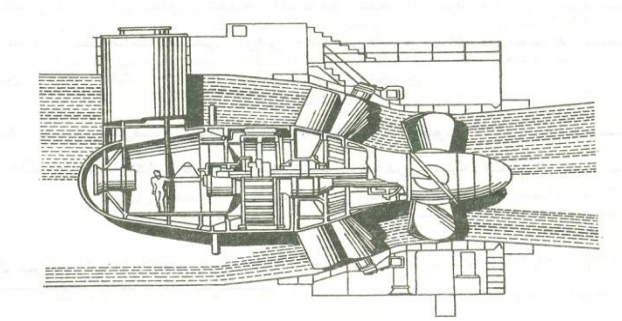
- مشروع La Rance:

أقيم هذا المشروع عند مصب نهر لارانس الذي يصب في بحر المانش شمالي فرنسا حيث يصل فرق الارتفاع بين أعلى و أخفض مستوى للمياه بفعل المد والجزر حوالي13،5m وكما هو معروف فأنه خلال 24 ساعة و50 دقيقة يحدث مدان وجزران، وأثناء المد الأعظمي تبلغ غزارة الماء التي تدخل مصب نهر لارانس $18 \times 10^3\ m^3/s$ وهي غزارة كبيرة.

صمم المشروع ليكون مزدوج الفعالية ويبلغ عرض السد الذي أنشئ 750m ويشكل خلفه بحيرة مساحتها $22\ Km^2$ بسعة $184 \times 10^6\ m^3$ واستخدام للإملاء والتفريغ 6 بوابات بعرض 15m وارتفاع 10m للواحدة.

جهز المشروع بحوالي 24 مجموعة كهربائية باستطاعة 10MWللمجموعة الواحدة (الاستطاعة الكلية للمشروع 240MW)، وصممت المجموعة على شكل آلة مائية قلوبة Reversible ضمن غلاف مغلق Capsule ذات محور أفقي (وتحتوي

ضمن الغلاف على المنوبة)، وأطلق على هذا التصميم اسم " GroupeBulbe " المجموعة على شكل كبسولة كما في الشكل (5-2).



الشكل (5-2) تصميم " GroupeBulbe " على شكل كبسولة

ويعتبر هذا التصميم تطوراً للنماذج السابقة التقليدية حيث كانت المنوبة تركب فوق العنفة الشاقولية وكانت العنفة المائية تحتاج إلى حلزون، ويتغير اتجاه الماء مرتين، ونظراً إلى أن ارتفاع السقوط هو صغير فأن أي ضياع سيؤثر على المردود. وأمكن اختصار أبعاد المنشأة وتبسيطها وبالتالي خفض كلفتها. وأهم العوائق الأساسية للاستفادة من طاقة المد والجزر هي:

1- الطاقة غير الثابتة لموجات المد خلال اليوم الواحد.

2- اهتزازات نظام المد والجزر وفق أطوار القمر وتغير ارتفاع موجة المد خلال أسبوعين وفقاً لأطوار القمر.

3- كلفة الإنشاء المرتفعة.

3- مشاكل التآكل الذي يسببها ماء البحر.

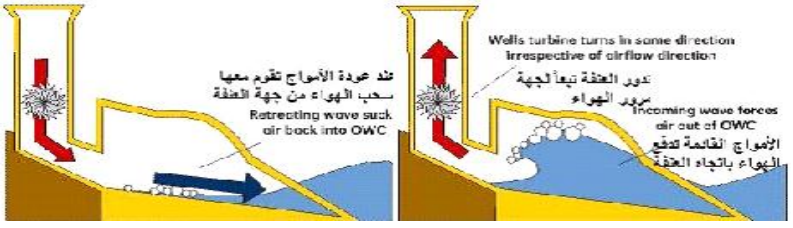
2-5- طاقة الأمواج:

تمت الاستفادة من طاقة من أمواج البحر، وذلك بصنع معدات خاصة توضع على سطح الماء، حيث تقوم الأمواج برفعها وخفضها باستمرار. وهذا يؤدي إلى توليد حركة ميكانيكية، يمكن تحويلها إلى طاقة كهربائية تُنقل عبر أسلاك للاستفادة منها. ويمكن الاستفادة من طاقة الأمواج السطحية باستخدام عدة طرائق:

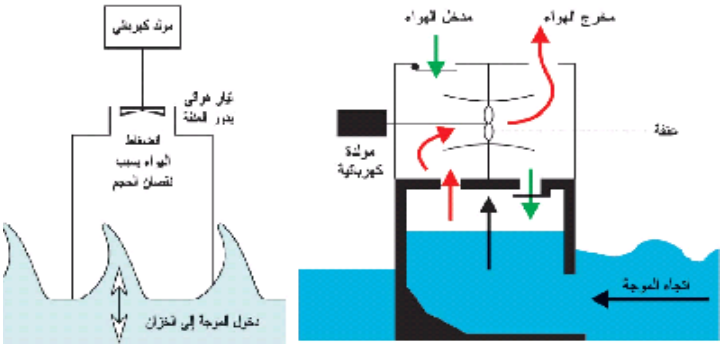
1- وحدة لتوليد الكهرباء تعوم على سطح المياه، وبسبب تحريك الأمواج لهذه الوحدة فإن هذه الحركة الميكانيكية يمكن تحويلها إلى طاقة كهربائية يستفاد منها الشكل (4-3).

الشكل (5-3) وحدة لتوليد الكهرباء تعوم على سطح المياه

2- باستخدام عنفات تركب بشكل ثابت أمام الموجة: يعتمد هذا النظام على تحريك العنفة بوساطة تيار الهواء الذي تدفعه الموجة باتجاهها الشكل(5-4) والشكل (5-5).



الشكل(5-4) عنفة تركب بشكل ثابت أمام الموجة



الشكل (5-5) عنفة تركب بشكل ثابت فوق الموجة

الفصل السادس

تخزين الطاقــة

أن مصادر الطاقة على سطح الأرض هي متوفرة بشكل كبير وأهمها: الوقود الاحفوري، المصادر المائية، طاقة الرياح، الطاقة الشمسية، الوقود النووي وطاقة الكتلة الحية. ويتعلق أمر الاستفادة منها ليس فقط باستخراجها أو التقاطها أو بتحويلها إلى أشكال أخرى بل بنقلها وتخزينها أيضاً.

أن الطبيعة تقوم ومنذ ملايين السنين بتخزين الطاقة المستمدة من الشمس، فالفحم والبترول والغاز الطبيعي ليست سوى طاقة مخزنة على شكل وقود احفوري، فلنحاول إذن تقليد الطبيعة، ولو على مقياس أصغر، بعملية تخزين الطاقة.

فإذا ما أخذنا مثلاً موضوع الاستفادة من الطاقة الشمسية، نرى أن هذه الطاقة بطبيعتها المتقطعة وغير الثابتة تتطلب حلولاً خاصة لمشاكل تخزينها، ويكتسب موضوع تخزينها أهمية متزايدة نظراً إلى أن التوسع في استخدام الطاقة الشمسية يتوقف على إيجاد حلول هندسية اقتصادية ملائمة لتخزينها.

6-1- تخـزين الطـاقة:

يوجد أربع طرق أساسية تقنية (غير بيولوجية) لتخزين الطاقة و ذلك على شكل: طاقة حرارية، طاقة كهربائية، طاقة ميكانيكية وطاقة كيميائية.

أن الطاقة الحرارية يمكن أن تخزن على شكل حرارة محسوسة (بخار – ماء ساخن – صخور ساخنة) أو على شكل حرارة كامنة (صهر الصودا أو البوتاس أو بعض الأملاح) أو على شكل تفاعلات كيميائية عكوسة. أما الطاقة الكهربائية فتخزن عادة في المدخرات الكهربائية أو على شكل طاقة كهرطيسية، والطاقة الميكانيكية يمكن

أن تخزن على شكل طاقة حركية في الدواليب المعدلة أو على شكل طاقة كامنة في الهواء المضغوط أو بواسطة الضخ الهيدروليكي، والهيدروجين يخزن على شكل غاز مضغوط أو غاز سائل أو على شكل هيدرايد.

6-2- دراسة أنظمة تخزين الطاقة: لدى دراسة أي نظام لتخزين الطاقة ينبغي أخذ العوامل التالية بعين الاعتبار:

- شكل الطاقة في الداخل والخرج (طاقة حرارية، طاقة كهربائية، طاقة ميكانيكية).

- كمية الطاقة في الدخل والخرج (مردود المبدأ الأول للترموديناميك).

- جودة الطاقة في الدخل والخرج (مردود المبدأ الثاني للترموديناميك).

- الاستطاعة اللازمة للدخل والخرج.

- مدة دورة التخزين.

- سعة التخزين (مقدار الطاقة المخزنة في واحدة الحجم).

- كلفة التأسيس لواحدة الطاقة في الخرج.

- كلفة التأسيس لتجهيزات التخزين.

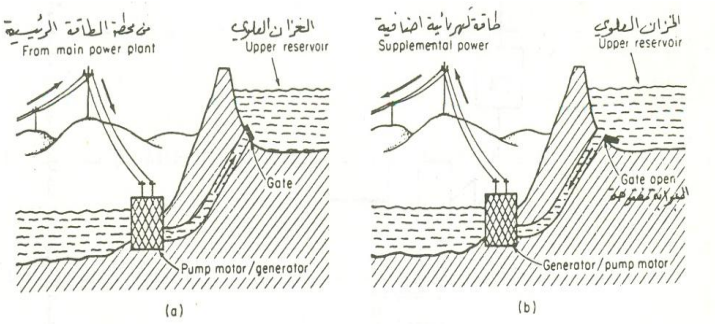
- نفقات التشغيل والصيانة لتجهيزات التخزين.

وأثناء استعراضنا لمختلف طرق تخزين الطاقة سنبين ملائمة استخدام كل طريقة لتخزين نوع معين من الطاقة مع أخذ العوامل السابقة بعين الاعتبار.

6-3– طرق تخزين الطاقة

1– التخزين بالضخ الهيدروليكي: استعملت طريقة تخزين الطاقة بالضخ منذ أمد بعيد، وفي هذه الطريقة المعروفة يتم إملاء خزان ماء طبيعي أو اصطناعي أثناء ساعات

انخفاض الطلب على الطاقة الكهربائية، ثم يستعمل الماء المخزن العلوي لتوليد الطاقة الكهربائية بواسطة عنفة مائية خلال ساعات الذروة الشكل (6-1).



الشكل (6-1) نظام تخزين طاقة بالضخ

a - يستمد التيار من محطة توليد حمل الأساس وتستعمل المولدة لتشغيل المضخة لإملاء الخزان العلوي.

b - عند الحاجة إلى الطاقة في ساعات الذروة، نفتح البوابة ويشغل الماء العنفة والمولّدة.

وتتجه الدراسات إلى تحقيق الضخ الهيدروليكي الجوفي (تحت الأرض) باستعمال خزانين أرضيين في منسوبين مختلفين، أن طريقة تخزين الطاقة بالضخ تناسب الاستطاعات الكبيرة وتكتسب أهمية خاصة في اقتصاد توليد الطاقة.

2– مدخرات البخار: بشكل مشابه للتخزين المائي استعملت مدخرات البخار المضغوط مع العنفات البخارية لتخزين الطاقة الكامنة للبخار. وهذا النوع من تخزين الطاقة على شكل بخار ماء مضغوط ضمن خزانات فولاذية معروف منذ عام 1920. ويوجد في برلين مدخرة بخار بسعة تخزين 670 MWh تعمل منذ عام 1929.

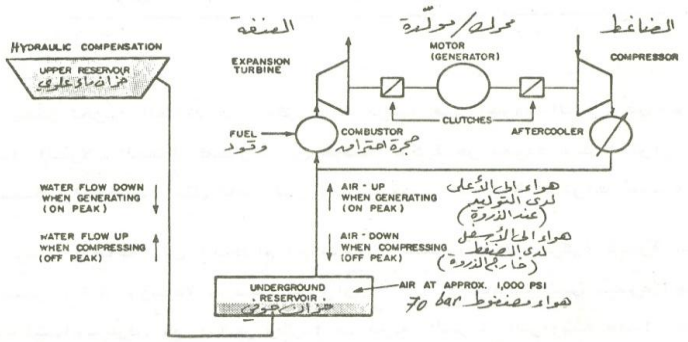
أن المشاريع الحالية لاستخدام مدخرات البخار ترتبط مع تطور إنشاء المحطات البخارية كبيرة الاستطاعة، وذلك لتمرير قسم من البخار المولد، عند انخفاض الحمل على العنفة البخارية، إلى عدد من الخزانات تقوم بتخزين هذا البخار ليصار إلى استعماله

في تشغيل عنفة أخرى عند زيادة الطلب على المحطة. وقد أمكن تعيين الضغوط المناسبة لتخزين البخار لمدة ساعتين وسعة الخزانات اللازمة لهذه الغاية وذلك كتابع لاستطاعة المحطة ولتغيير الحمل على المحطة. وتبين أنه يمكن استخدام هذه الطريقة في تخزين الطاقة في المحطات الكهرشمسية عند استعمال البخار كوسيط عمل في الدارة.

3– تخزين الطاقة بالهواء المضغوط: أن فكرة تخزين الطاقة على شكل هواء مضغوط هي بسيطة وقديمة في الوقت ذاته، وهي متشابهة لاستخدام طريقة الضخ الهيدروليكي، حيث نقوم بتخزين الهواء المضغوط المولّد أثناء توفر الطاقة، ويستعمل هذا الهواء المضغوط في دارة عنفة غازية لتوليد الطاقة الكهربائية.

ومن المعروف أنه في دارة العنفة الغازية يتم استهلاك ثلثي الاستطاعة الكلية للعنفة من قبل الضاغط لضغط الهواء وأقل من ثلث الاستطاعة من قبل المنوبة، أذن وعند انخفاض الحمل الكهربائي يمكن تشغيل المولدة كمحرك موصول بالضاغط لتوليد الهواء المضغوط الذي يخزن في خزانات معدنية أو في خزانات أرضية كبيرة السعة (كهوف أرضية – مناجم ملح قديمة)، ويتم ذلك أثناء ساعات انخفاض الطلب على الطاقة الكهربائية، وفي ساعات الذروة يتم أعداد العنفة الغازية بالهواء المضغوط المخزن، مع حرق الكمية اللازمة من الوقود في حجرة الاحتراق. وقد صممت شركة BBC في ألمانيا محطة توليد لعنفة غازية باستطاعة 280MW مع استخدام كهف أرضي لتخزين الهواء المضغوط، وتم الحصول على نتائج مرضية. كما صنعت في السويد وحدة تجريبية باستطاعة 100MW تقوم بتخزين الهواء المضغوط بسعة تخزين تكفي لمدة تشغيل قدرها 4 ساعات.

وتتم في الولايات المتحدة الدراسات العائدة لنظام توليد بعنفة غازية يستعمل التخزين في خزان جوفي من الصخر الصلد مع تعويض الضغط بواسطة خزان مائي علوي الشكل (6-2).



الشكل (6-2) عنفة غازية يستعمل التخزين في خزان جوفي من الصخر الصلد

وتتجه الأبحاث الحالية إلى دراسة المواضيع التالية:

- اختيار كهوف وتجاويف أرضية مناسبة لتخزين الهواء المضغوط بسعات كبيرة.
- دراسة أنظمة التحكم بضغط الهواء أثناء تخزينه وأثناء سحبه من الخزان.
- ضياعات التسرب للهواء المضغوط.
- الدراسات الاقتصادية المتعلقة بكلفة الإنشاء وكلفة الاستثمار.

4- تخزين الطاقة بواسطة الدولاب المعدل(على شكل طاقة حركية): يمكن تخزين الطاقة على شكل طاقة حركية في الدولاب المعدل، وأن استعمال الدولاب المعدل كجهاز تخزين طاقة حركية هو معروف منذ اختراع الآلة المكبسية، واستخدمت مثل هذه الدواليب لتخزين الطاقة لفترات قصيرة.

وعند الحاجة إلى استخدام دولاب معدل لتخزين طاقة حركية كبيرة سنحتاج إلى تكبير القطر وزيادة سرعة الدوران، إلا أن الاجهادات التي يتعرض لها الدولاب تتناسب طرداً مع القطر ومع مربع السرعة الزاويّة؛ وهذا يحد من زيادة سرعة الدوران لتخزين كمية كبيرة من الطاقة، بالإضافة إلى إلا أن قسماً من هذه الطاقة المخزنة سيضيع بسبب

الاحتكاك (ضياعات في مساند المحور وضياعات احتكاك مع الهواء). حيث يمكن التغلب على هذه الصعوبات بالأمور التالية:

1- استعمال مواد صنع متطورة تتحمل الاجهادات العالية (مواد راتنجية أو من البوليمر).

2- تدوير الدولاب المعدل في الفراغ باستخدام محاور تعليق مغناطيسية.

وأمكن صنع دواليب معدلة تستطيع تخزين الطاقة لعدة ساعات يمكن الاستفادة منها لتوليد الكهرباء في فترة الذروة ومن أجل استطاعات صغيرة.

5- تخزين الطاقة الكهربائية بواسطة المدخرات: وهذه الطريقة هي من أقدم الطرق المستعملة لتخزين الطاقة الكهربائية، وتستعمل حالياً وعلى نطاق واسع البطاريات الكيمائية. ولهذه الطريقة موثوقية عالية، و أعطالها قليلة نسبياً، وهي رخيصة الكلفة من أجل سعات التخزين الصغيرة. ويجري حالياً تطوير أنواع جديدة من البطاريات مثل بطاريات (الكادميوم / النيكل) و(الفضة / التوتياء) و(الليثيوم / كلورايد الفضة)، ويبدو لنا أن التقدم في هذا المجال هو بطيء بالإضافة إلى الكلفة المرتفعة للأنواع الجديدة من البطاريات. حيث تبقى المدخرات الرصاصية المصممة لسعات التخزين الكبيرة أرخص الأنواع المتوفرة حالياً.

كذلك تجري دراسات لتطوير مدخرات ذات درجات الحرارة العالية للحصول على كثافة طاقة عالية، وفيها يكون الالكترولايت في حالة منصهرة، وأهم أنواعها: بطارية الصوديوم – الكبريت التي تعمل تحت درجة حرارة °350 وبطارية الليثيوم – ألمنيوم / سلفايد الحديد التي تعمل تحت درجة حرارة °425، حيث جرى تطويرها في مخابر أرغون الوطنية في الولايات المتحدة .

أن الكثافة العالية لطاقة المدخرة في مثل هذه البطاريات يمكن أن تكون جذابة لاستعمالها في السيارات الكهربائية، إلا أننا في الاستخدامات الأخرى لتخزين الطاقة الكهربائية نهتم بعمر وكلفة البطارية أكثر من اهتمامنا بكثافة طاقة المدخرة.

6- تخزين الطاقة الكهرطيسية: وذلك باستعمال مواد فائقة التوصيل تحت درجات الحرارة المنخفضة، وهذه الطريقة ذات كلفة تأسيس مرتفعة جداً ومازالت في مراحل التجارب المخبرية.

7- تخزين الطاقة على شكل هيدروجين: أن المنشآت المائية التي تستعمل الضخ لتخزين الطاقة هي مرتفعة الكلفة، لذلك اتجهت الدراسات إلى استعمال الطاقة الكهربائية في فترات انخفاض الطلب (الطاقة خارج أوقات الذروة لتوليد الهيدروجين وتخزينه على شكل سائل أو غاز مضغوط ثم لاستعماله في توليد الكهرباء أثناء فترة الذروة. وعلى نطاق تجريبي يتم الحصول على الهيدروجين بالتحليل الكهربائي ثم يعاد استعماله بحرقه أما في خلية وقود أو عنفة غازية عادية.

وقد شمل برنامج الأبحاث في مركز بروكهافن الوطني في الولايات المتحدة صنع وحدة تجريبية باستطاعة 26MW لتوليد الهيدروجين وتخزينه ثم إعادة استعماله لتوليد الطاقة الكهربائية، ونلاحظ انه مع ازدياد عدد المحطات النووية ذات الاستطاعات الكبيرة ونفقات التشغيل المنخفضة نسبياً هناك اتجاه لتشغيل هذه المحطات الحديثة كمحطات حمل أساس، بحيث يمكن استعمال الطاقة الكهربائية الفائضة في ساعات انخفاض الحمل لتخزين الطاقة على شكل هيدروجين، ويمكن أن يمثل هذا الحل حلاً اقتصادياً في المستقبل.

ويبدو لنا الهيدروجين في حالته السائلة أو الغازية سيكون أكثر أنواع الوقود الاصطناعي ملائمة للاستعمال في تخزين الطاقة، وسيلعب دوراً متزايد الأهمية في اقتصاد توليد وتوزيع الطاقة في المستقبل

6-4- تخزين الطاقة الحرارية: أن تخزين الطاقة على شكل طاقة حرارية هو أهم الحلول عند تخزين الطاقة الشمسية. ونظراً إلى أن استعمال أنظمة الخلايا الشمسية لتوليد الطاقة الكهربائية حتى الآن محدود، لذلك فأن الطرق المستعملة للاستفادة من الطاقة

الشمسية هي: اللواقط الشمسية المسطحة أو ذات التركيز المحرقي ومراكز توليد الطاقة الكهرشمسية.

ولا شك أن تخزين الطاقة الشمسية على شكل طاقة حرارية يمثل الحل المباشر والأبسط، ويختصر مشاكل تحويل هذه الطاقة إلى أنواع أخرى من الطاقة، كما يتجنب المواضيع المتعلقة بمردود هذا التحويل. ويتم تخزين الطاقة الحرارية على بشكلين: على شكل حرارة محسوسة وعلى شكل حرارة كامنة. وأهم مزايا تخزين الطاقة الحرارية على شكل حرارة كامنة هي:

1- أن تقديم الطاقة إلى الوسيط الذي يختزن الحرارة، ثم سحب هذه الحرارة منه يتمان تحت ذات مستوى درجات الحرارة تقريباً، وهذا يسمح بالحصول على مردود ترموديناميكي جيد وسعة توليد ثابتة.

2- أن سعة التخزين في واحدة الوزن (أو في واحدة الحجم) هي اكبر بكثير.

3- تحتاج هذه الطريقة إلى وسيطين الأول للتخزين والثاني كوسيط عمل، ويتطلب النظام استعمال مبادل حراري بين الوسيطين.

4- أن تخزين الحرارة بواسطة الماء الساخن هو أبسط الطرق المستعملة لتخزين الطاقة الحرارية، ونميز هنا بين نوعين من التخزين:

- التخزين بسعة صغيرة وهو المستعمل للتخزين اليومي.

- التخزين بسعات كبيرة وهو المستعمل للتخزين الموسمي.

وإذا كان موضوع تخزين الحرارة بسعات صغيرة يمكن اعتباره محلولاً بشكل مرض من قبل الصناعة، فأن موضوع التخزين الموسمي ما زال قيد البحث والتجربة من قبل الشركات و الهيئات الرسمية والجامعات.

ونكتفي بالإشارة إلى أن مشاريع عديدة في الولايات المتحدة وألمانيا الاتحادية والنمسا عائدة لتخزين الطاقة الشمسية على شكل طاقة حرارية لفترات طويلة هي قيد التجربة، منها مثلاً استعمال البحيرات بعد تجهيزها بطبقة عازلة في القعر وبغطاء شفاف عائم على السطح (لإنقاص الضياعات الحرارية ولمنع تلوث الماء)، وذلك لتخزين الحرارة في ماء البحيرة لفترة طويلة بغية استعمالها في التجمعات السكنية.

ومن هذه المشاريع أيضاً استعمال البحيرات المسماة البحيرات الشمسية الطبيعية أو الاصطناعية ذات التدرج الشاقولي لتركيز الملاح لتخزين الطاقة الشمسية على شكل طاقة حرارية. ويمكن أن نذكر أيضاً استعمال أحواض السباحة لتخزين الطاقة الحرارية اللازمة لمدة أسبوع أو أكثر لغايات التدفئة.

6-4-1– المدخرات الحرارية

أن العوامل التي تحدد اختيار نوع معين من المدخرات الحرارية المناسبة لوجهة استعمال معنية هي: مستوى درجات الحرارة، سعة التخزين، عامل التوصيل الحراري، الاستقرار الحراري، التآكل، التبادل الحراري، العزل الحراري وكلفة وسيط التخزين.

1 - مستوى درجات الحرارة: وهو من أهم العوامل في اختيار المدخرة الحرارية المناسبة، ويتعلق هذا المستوى الحراري للمنبع الذي نملكه من جهة وبدارة التحويل وبأشكال الطاقة اللاحقة والمستوى الحراري الذي نرغب في الحصول عليه من جهة أخرى. ونميز بين 4 مستويات لدرجات الحرارة: مستوى درجات الحرارة المنخفضة، المعتدلة، المرتفع والمرتفع جداً.

2 - سعة التخزين الحراري: تتعلق سعة التخزين بالصفات الحرارية وبكميته، وأهم الصفات الفيزيائية لمواد التخزين الحراري فهي: الحرارة النوعية، حرارة الانصهار، عامل التوصيل الحراري، تغيرات الحجم أثناء تغير الحالة، عامل التمدد الحجمي، الاستقرار الحراري وضغط البخار تحت درجات الحرارة المعتبرة.

في حين أن أهم الصفات الهندسية لهذه العوامل المواد هي: الكثافة، اللزوجة تحت درجة الحرارة المعتبرة، التآكل وخطر حدوث حريق أو انفجار.

كذلك ينبغي أن تؤخذ الضياعات الحرارية عبر السطوح الخارجية الحرارية بعين الاعتبار، ويفضل زيادة سعة التخزين المحسوبة نظرياً بمقدار 30%.

3 - عامل التوصيل الحراري: من الناحية العملية ينبغي أن يكون عامل التوصيل الحراري لوسيط التخزين جيداً لكي تتم عملية التبادل الحراري بين وسيط التخزين ووسيط العمل بسرعة وعبر سطح تبادل حراري صغير وبحيث يتم استخدام جيد لحجم التخزين بكامله. فالأملاح لها عامل توصيل حراري منخفض في حين أن المعادن تتمتع بعامل توصيل حراري مرتفع.

4 - الاستقرار الحراري: أن المواد المختارة للمدخرات الحرارية ينبغي أن تمتع بالاستقرار الحراري في مجالات درجات حرارة الاستعمال وأن لا يصيبها أي تفكك كيميائي أو تغير في صفاتها الفيزيائية عند استعمالها لمدة تؤخذ عادة 20 سنة.

5 - التآكل: وهو من أهم العوامل في اختيار وسيط التخزين الحراري، وقد لا يلعب دوراً هاماً تحت درجات الحرارة المنخفضة، حيث أن استعمال الماء أو الأملاح المائية أو البخار لهذه الغاية لا ترافقه صعوبات متأتية من التآكل، إلا أنه في مجال درجات الحرارة 300-500C° تنتج معظم المشاكل بسبب التآكل. أن التآكل هو الذي يحدد عمر المدخرات الحرارية، ويسبب ارتفاع كلفتها مازالت دراسته تحتاج إلى أبحاث كثيرة.

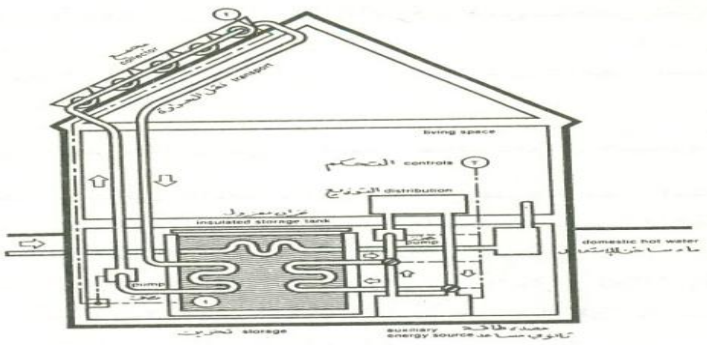
6 - التبادل الحراري: أن التبادل الحراري أثناء تخزين الحرارة و أثناء سحبها ينبغي أن يتم بأسرع ما يمكن وبحيث يتم هذا التخزين أو السحب بغزارة معينة. فمثلاً يمكن أن يكون لبعض الأجسام ذات الحرارة النوعية العالية أو ذات حرارة الانصهار المرتفعة عامل توصيل حراري منخفض، وهذا يعني أننا نحتاج إلى سطح تبادل حراري أكبر في هذه الحالة، مما يزيد في الكلفة ومن احتمالات حدوث التآكل.

7 - العزل الحراري: أن تخزين الحرارة ضمن مادة معينة وتحت درجة حرارة معينة يتطلب عزل المادة المخزونة للحرارة بشكل فعال وبأقل كلفة، حيث أن عزل المدخرة الحرارية ينبغي أن تؤخذ بعين الاعتبار عند أخذ مستوى درجة حرارة التخزين.

8 - كلفة وسيط التخزين: عند تخزين الحرارة على شكل حرارة محسوسة تجرى مقارنة المقادير التالية للمواد المتوفرة وهي: من واحدة الوزن ($/Kg)، الكثافة (Kg/ m^3)، الحرارة النوعية، عامل التوصيل الحراري (W / m °C)، السعة الحرارية (MJ/ m^3 . °C)، كلفة واحدة السعة (cost/ C_p). بحيث تختار المادة التي تحقق الشروط الحرارية المطلوبة مع أقل كلفة لواحدة السعة الحرارية.

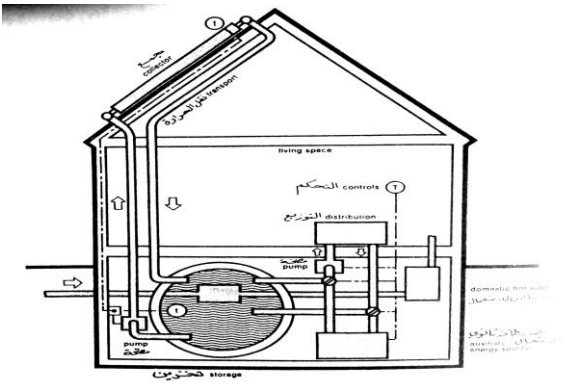
6-4-2– تخزين الطاقة الحرارية تحت درجات الحرارة المنخفضة:

1 - بواسطة الماء الساخن: أن تخزين الحرارة بواسطة الماء الساخن هو أبسط الطرق المستعملة لتخزين الطاقة الحرارية، وهذه الطريقة الحرارية مستعملة منذ سنوات الشكل(6-3) و الشكل(6-4) في عديد من البلدان لغايات التدفئة وتحضير الماء الساخن وتخزينه.



الشكل(6-3) نظام تخزين الطاقة الحرارية بواسطة الماء الساخن

(وسيط التخزين مستقل عن الوسيط الناقل للحرارة)



الشكل(6-4)) نظام تخزين الطاقة الحرارية بواسطة الماء الساخن

(وسيط التخزين هوالوسيط الناقل للحرارة)

وتتجه الدراسات إلى زيادة سعات التخزين واستعمال حجوم كبيرة من الماء الساخن تخزن ضمن كهوف خاصة (طبيعية أو اصطناعية) لتخزين الحرارة لفترات تصل إلى عدة أشهر.

2 - بواسطة الأملاح المنصهرة لتخزين الحرارة: أن تخزين الحرارة في الماء على شكل حرارة محسومة سيؤدي إلى استعمال حجوم كبيرة، لذلك فأن استعمال المدخرات الحرارية التي تعتمد الحرارة الكامنة للانصهار أو حرارة التفاعل يمكن أن يسمح باستعمال حجوم أصغر لتخزين ذات كمية الحرارة.

أن انصهار الأملاح المائية يرافقه تفكك أيوني وتجفيف وتغيير في الحالة، لذلك يمكن تخزين كمية أكبر من الحرارة في واحدة الحجم، ويؤدي ذلك أيضاً إلى أن تكلفة العزل ستكون أقل. أن حجم الأملاح اللازمة لتخزين ذات كمية الحرارة سيكون أقل بمقدار 3 إلى 10 مرات من حجم الماء اللازم لهذه الغاية حسب نوع الملح المستعمل. وأهم الأملاح التي تناسب استعمالات تخزين الطاقة الحرارية هي: سلفات الصوديوم المائية التي تنصهر تحت 32 °C وتخزن 100 Wh/L، فوسفات الصوديوم المائية التي

تنصهر تحت 35°C وتخزن 120 Wh/L وكبريتات الصوديوم المائية التي تنصهر تحت 48 °C وتخزن Wh/L . وثمن هذه الأملاح زهيد مما يسمح بتحقيق سعات تخزين كبيرة.

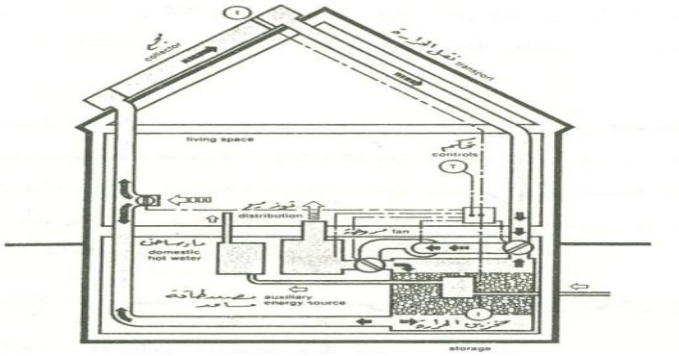
أن التجارب التي تمت في جامعات الولايات المتحدة على استعمال الأملاح المنصهرة منذ منتصف الستينات أدت إلى بناء الشمسي الشهير Solarone في جامعة Delaware عام 1973 حيث أمكن تخزين 235 MWh من الطاقة الحرارية تحت درجة الحرارة 50 °C في 4 أطنان من الملح $Na_2S_2O_3$. $5H_2O$ و 41MWh من الطاقة الحرارية تحت درجة الحرارة 30 °C في 7.0 طن من الملح Na_2SO_4 .$10H_2O$ كما نفذت تصاميم مشابهة في أقطار مختلفة. ولكن أهم الصعوبات التي رافقت استعمال الأملاح المنصهرة تحت درجات الحرارة منخفضة هي:

- التآكل وأمكن التغلب عليه باستعمال الأملاح على شكل كرات مغلفة بغلاف رقيق من البلاستيك.

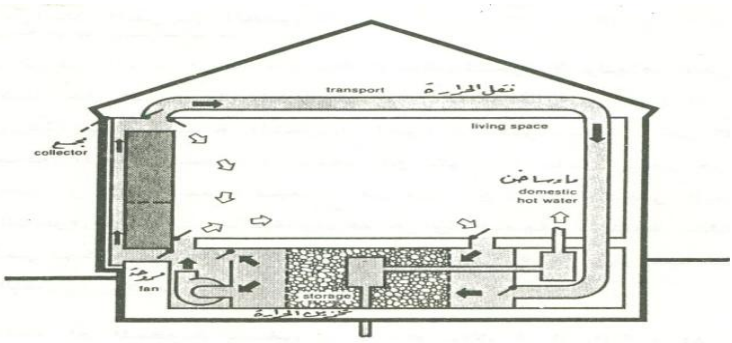
- التأخر في أعادة التبلور.

3 - بواسطة الأجسام الصلبة (كمدخرات حرارية تحت درجات حرارة منخفضة): هذه الطريقة في التخزين معروفة وتستعمل لتخزين الحرارة لمدة قصيرة، وهي تناسب تجهيزات التدفئة التي تستعمل الهواء كوسيط ناقل للحرارة. وأهم هذه الأجسام هي: البتون، الصخور، البحص وحديد الصب قوالب المغنيزيا الشكل (6-5) والشكل (6-6)، وتجري حالياً دراسات لتخزين الطاقة الحرارية في حجوم كبيرة من الصخور للتخزين الموسمي.

6-4-3- تخزين الحرارة تحت درجات حرارة متوسطة:



الشكل (6-5) نظام تخزين الحرارة المستمدة من اللواقط الشمسية بواسطة الصخور



الشكل (6-6) تخزين الحرارة بواسطة الصخور

ونعني بهذه التسمية تخزين الحرارة أعلى من 100°C وفي مجال يمتد حتى 500°C وبشكل خاص تحت درجة حرارة 300°C، هذا المحتوى يتجاوز مجال اللواقط الشمسية التي لاتتجاوز درجة الحرارة فيها عمليا90°C.

أن مجال استعمال هذا المستوى من درجات الحرارة هو المحطات الشمسية لتوليد الكهرباء باستطاعات صغيرة، ولا نتوقع الحصول على مردود ترموديناميكي يزيد عن 25%، أن مثل هذه المحطات يمكن أن ينتشر في البلدان النامية ذات الإشعاع الشمسي الكبير والتجمعات السكانية المنعزلة التي تملك بعض الصناعات الخفيفة ومن

أجل استطاعات بين 1MW و5MW. أن تخزين الطاقة في مستوى درجات الحرارة المذكور يمكن أن يتم:

1 - بواسطة الماء الساخن المضغوط.

2 - بواسطة الموائع العضوية: التي هي في الوقت ذاته الوسيط الناقل للحرارة، ولهذه الطريقة ميزة خاصة إذ أننا نصل إلى درجة الحرارة ° 280 - °340 بدون ضغط المائع أو تحت ضغط منخفض، وهذا يجعل عملية التخزين الحراري أكثر بساطة وأقل كلفة.

ونظراً إلى أن المائع الناقل للحرارة ينبغي أن يكون ذو عامل توصيل حراري مرتفع ولزوجة منخفضة ويتمتع بصفات ضخ جيدة. في حين أن مواد الادخار الحراري ينبغي أن تكون ذات حرارة نوعية عالية ودرجة حرارة انصهار مرتفعة، لذلك فأن الموائع العضوية التي يمكن استعمالها كوسيط ناقل للحرارة هي غير مناسبة للاستعمال في تخزين الحرارة إلا من أجل السعات الصغيرة.

هذه الموائع العضوية ينبغي أن تتمتع بالاستقرار الكيميائي وانخفاض الكلفة، وأن تكون غير قابلة للحريق وأهم الأنواع المتوفرة منها هي: Caloria، Caliague، Gilotherm و Dowtherm، التي يمكن أن تستعمل أيضاً لتخزين الحرارة لأمد قصير.

3 - بواسطة الأجسام الصلبة: بغية الاستفادة من الصفات الجيدة للموائع الناقلة للحرارة اقترحت أنظمة مزدوجة تستعمل المائع العضوي أو الماء المضغوط كوسيط ناقل للحرارة والأجسام الصلبة والمواد النارية (على شكل حصى أو بلورات أو قرميد) كوسيط مخزن للحرارة.

وقد أجرت شركات عديدة ومنذ عدة سنوات تجارب على هذه الأنظمة المزدوجة، نذكر منها تجارب شركة Kocketdyne في لوس أنجلوس حيث تم استعمال مائع عضوي هو Caloria HT 43 ومزيج من الصخور والبحص. حيث أمكن تخزين

5MWh من الطاقة الحرارية باستعمال $500\ m^3$ من الزيت تحت درجة حرارة 300 °C و $2500\ m^3$ من الصخور، وقد تبين أن كلفة التخزين بهذه الطريقة هي أقل منها بالطرق الأخرى.

4 - بواسطة المدخرات الحرارية على شكل حرارة كامنة: أن التخزين في مستوى درجات الحرارة المتوسطة يمكن أن يتم على شكل حرارة كامنة باستعمال الصودا أو البوتاس التي تمثل مواد رخيصة وسهلة الانصهار. وتتميز الصودا بشكل خاص بالصفات التالية: سعة تخزين حرارية عالية تحت درجة الحرارة 319 °C، حرارة نوعية مرتفعة نسبياً 0،52، عامل توصيل حراري جيد، استقرار كيميائي جيد وتوفرها بكميات كبيرة وبسعر منخفض.

أن مشكلة التآكل الذي يسببه استعمال الصودا أو البوتاس في المدخرات الحرارية والتي كانت تشكل في السنوات الماضية عقبة رئيسية تعتبر اليوم محلولة مع التطور التقني. وتتوفر في الولايات المتحدة مدخرات حرارية لتخزين الحرارة حتى درجة حرارة 500°C تكفلها الشركات الصانعة لمدة عشرين عاماً.

أن معدات التخزين الحراري التي تستعمل الصودا أو البوتاس والتي تنتج اليوم على نطاق صناعي كانت قد دخلت مرحلة الاستعمال منذ الخمسينيات حيث استعملت لتخزين الطاقة الحرارية لغايات التدفئة بالهواء الساخن مستفيدة من التعرفة المنخفضة للطاقة الكهربائية في ساعات انخفاض الطلب عليها ليلاً.

6-4-4- تخزين الحرارة تحت درجات الحرارة العالية

ويعني ذلك تخزين الحرارة تحت درجات حرارة أعلى من 500°C وهذا يقابل استعمال مولدات البخار ذات خواص الأداء العالية وكذلك استعمال مراجل الصوديوم. أن مجال درجات الحرارة هذا سيكون في المستقبل القريب مجال تشغيل مراجل المحطات الكهرشمسية بغية الحصول على مردود عال. ولا يمكن التفكير باستخدام الموائع

العضوية، حيث أن استعمالها هو محصور بدرجة حرارة قصوى قدرها 325°C لذلك ينبغي التفكير باستخدام موائع أخرى هي أقل استعمالاً حالياً أو أنها غير مألوفة الاستعمال في الميدان الصناعي. وتتجه الأبحاث حالياً إلى استخدام المعادن السائلة والأملاح القابلة للانصهار لهذه الغاية.

1 - المعادن المنصهرة: أن المعادن التي يمكن التفكير باستعمالها ينبغي أن تكون في الحالة السائلة بين درجات الحرارة 800°C- 400، أن لا تكون سامة، أن لا تكون مرتفعة الثمن وأن لا يكون ضغط بخارها عالياً. ويبين الجدول (6-1) أهم المعادن التي يمكن التفكير باستعمالها.

الجدول (6-1) المعادن المستخدمة في تخزين الحرارة تحت درجات الحرارة العالية

المعدن	ألمنيوم	باريوم	مغنسيوم	توتياء	قصدير	صوديوم	رصاص
درجة حرارة الانصهار	658°	710°	657°	419°	231°	98°	327°
درجة حرارة الغليان	2500°	1630°	1102°	906°	2430°	883°	1750°

نرى من الجدول أنه ينبغي استبعاد الرصاص والزئبق بسبب السمية، وأيضاً استبعاد التوتياء بسبب درجة الغليان المنخفضة وضغط بخاره المرتفع، كذلك تبين أن معادن الصوديوم والقصدير يمكن أن تستخدم كموائع ناقلة للحرارة وليس كأحجام مدّخرة للحرارة. وهكذا لا يبقى لدينا سوى الألمنيوم المنصهر وخلائطه (وأهمها Mg Al) و الصوديوم كوسيط تخزين في مجال درجات الحرارة العالية.

2 - الأملاح المنصهرة: في المستقبل القريب سيكون موضوع تخزين الحرارة تحت درجات حرارة مساوية أو أعلى من 500°C محصوراً باستعمال الأملاح المنصهرة، والميزة الرئيسية لهذه المواد أنه يمكن صنعها حسب الطلب كتابع لدرجة حرارة الاستعمال المطلوبة.

ويتوفر لدينا حالياً عدد كبير من الأملاح تتراوح نقطة انصهارها بين 400°C و 700°C، حيث أنجز حتى الآن العديد من الأبحاث النظرية التجريبية لتحديد الصفات الرئيسية لهذه المواد، كما قامت شركات عالمية عديدة بالاستناد إلى نتائج الأبحاث المخبرية بتصنيع تجهيزات تجريبية لتخزين الحرارة بواسطة الأملاح المنصهرة وذلك من أجل:

1- تعيين أداء هذه المدخرات الحرارية.

2- تطوير الإضافات المقاومة للتآكل اللازمة عند استعمال هذه الأملاح.

3- تصميم المبادلات الحرارية المناسبة التي تستعمل الحرارة والمدخرة.