جمهورية العراق
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
كلية الكوت الجامعة
مركز البحوث والدراسات والنشر

الطاقة المتجددة
الادارة والخزن

Renewable Energy Management and Storage

إعداد

أ.م.د. قاسم مهدي وادي
كلية المامون الجامعة
قسم هندسة تقنيات القدرة الكهربائية

د. طالب زيدان الموسوي
رئيس مجلس ادارة /كلية الكوت الجامعة

أ.م.د. ثامر عبد الجبار جمعة
جامعة النهرين
كلية العلوم / قسم الفيزياء

أ. م .د . حكمت نجيب عبد الكريم
كلية المامون الجامعة
قسم هندسة تقنيات القدرة الكهربائية

المـقـــدمـــة (Introduction)

يعرف مخزون الطاقة، هو طريقة لضبط متغيرات الحاجة للطاقة، وتلبية الحمل المطلوب في حالة انعدام التجهيز. طبقا الى فترة البرمجة المحددة وفق احتياج الجهات المستهلكة للطاقة. غالبا ماتسمح خصائص ومواصفات مصادر الطاقة الاساسية للاستجابة لأزمة تلبية الطلب على الطاقة في المكان والزمان المعنيين. ولتحقيق تطابق بين المعروض والطلب الفعلي من الطاقة، اذ لابد من تهيئة سعة كافية من الطاقة المخزونة. لذا يفضل دمج تقنيات التخزين مع منظومة انتاج الطاقة لكي يصبح توافق متبادل بين الانتاج الفعلي ذو مرونة واستقرار و جودة عالية مع تخزين الطاقة لتجنب انقطاع التيار الكهربائي والمحافظة على استقرار تجهيز الشبكة الكهربائية. نظرا للتطورات الاقتصادية والبيئية التي طرأت على ميدان الطاقة. فقد برزت الحاجة الى الطاقات المتجددة (البديلة) والتي ستؤثر بصورة فعالة في انتاج واستقرار منظومة الطاقة المستقبلية. يتوقف اعتماد مصادر الطاقة المتجددة بشكل كبير على عدة عوامل منها تكاليف الانتاج والتوزيع ومدى فعاليته، اذ يتوجب استخدام نظام كفوء يضمن خزن الطاقة ويعمل على تقليص التفاوت بين العرض والطلب. يعتمد تطوير واتساع مصادر الطاقة المتجددة على مدى انتاجها وكذلك على تقنيات التخزين. الطاقة المتجددة هي مصطلح شامل ومتعدد الانواع لعدد من مصادر الطاقة المتاحة للانسان على الارض. ان تحول الطاقة من صورة الى اخرى تلعب دورا مهما في حياة الانسان ضمن معيشته على كوكب الارض. فمنذ اكثر من خمسين عاما شغلت الطاقة المتجددة مساحة واسعة من التفكير الانساني لاستخدامها كبديل عن الطاقة الاحفورية الناضبة. يتضمن التخزين عدد من التقنيات القديمة والحديثة تركز على دائرة التخزين والامداد بالطاقة وطلب التخزين الآني لبعض الوقت او لفترة طويلة. عند تصميم وتشغيل نظم تخزين الطاقة يجب الأخذ بنظر الاعتبار كفاءة النظام، خواص الكثافة النوعية للمادة الخازنة، كلف التخزين، الاثر البيئي نتيجة عملية التخزين، خزن واسترجاع الطاقة. لغرض إغناء المكتبة الوطنية ببعض المعلومات الاولية والاساسية لاساليب خزن الطاقة. تم اعداد هذا الكتاب والمتكون من خمسة فصول. الفصل الاول يتضمن مفهوم الطاقة وطرق انتقالها وتحويلها من صورة الى اخرى. الفصل الثاني يتطرق الى شرح منظومات خزن الطاقة وتخمين كفاءتها. الفصل الثالث احتوى على صور خزن الطاقة من خلال خزن الحرارة واشكال خزن الطاقة عالية الجودة وكذلك تضمن الفصل الرابع اسلوب ادارة الطاقة وادارة الاحمال الكهربائية وكيفية ضبط الاستهلاك

المبرمج للطاقة وجمع وتحليل بيانات الاستهلاك لغرض تطوير انظمة الخزن. أما الفصل الخامس فيتضمن أدارة استهلاك الطاقة. نأمل ان يكون هذا المجهود ذو فائدة للقارىء والمتابع للتطورات العلمية في كافة مجالات الطاقة.

الـمــؤلفــون

الفصل الاول

الطاقة وتحويلها والتحليل العام للطاقة

Energy, Energy Transfer and General Energy Analysis

الفهرست

١-١: المقدمة (Introduction)

١-٢: مفهوم الطاقة (Energy Concept)

١-٢-١: الطاقة المجهرية (Microscopic Energy)

١-٢-٢: الطاقة العيانية (Macroscopic Energy)

١-٣: اشكال الطاقة (Energy Forms)

١-٣-١: الطاقة الداخلية (Internal Energy)

١-٣-٢: الطاقة المحسوسة (Sensible Energy)

١-٣-٣: الطاقة الكامنة (Latent Energy)

١-٣-٤: الطاقة الكيميائية (Chemical Energy)

١-٣-٥: الطاقة النووية (Nuclear Energy)

١-٣-٦: الطاقة الميكانيكية (Mechanical Energy)

١-٣-٧: الطاقة الكهربائية (Electrical Energy)

١-٣-٨: طاقة التدفق (الانسياب) (Flow Energy)

١-٣-٩: الطاقة الكهرومغناطيسية (Electromagnetic Energy)

١-٣-١٠: الطاقة الحرارية (Thermal Energy)

١-٤: التفاعلات الباعثة والماصة للحرارة (Endothermic and Exothermic Reactions)

١-٥: طرق انتقال الطاقة (Energy Transfer Methods)

١-٥-١: انتقال الطاقة بواسطة الحرارة (Energy Transfer by Heat)

١-٥-٢: انتقال الطاقة بواسطة الشغل (Energy Transfer by Work)

١-٦: طرق انتقال الحرارة (Mechanisms of Heat Transfer)

١-٦-١: التوصيل (Conduction)

١-٦-٢: الحمل (Convection)

١-٦-٣: الاشعاع (Radiation)

١-٧: محددات حفظ الطاقة (Limitation of Energy Conservation)

١-٧-١: القانون الاول للديناميكيا الحرارية (The First Law of Thermodynamics)

١-٧-٢: القانون الثاني للديناميكيا الحرارية (Second Law of Thermodynamic)

١-٨: كفاءة تحويل الطاقة (Energy Conversion Efficiency)

الفصل الثاني

خزن الطاقة (Energy Storage)

الفهرست

٢-١: المقدمة (Introduction)

٢-٢: خزن الطاقة الشمسية (Energy Solar Storage)

٢-٢-١: المخطط الأساسي لنظام خزن الطاقة الشمسية (Basic System Diagram for Solar Energy)

٢-٢-٢: اجزاء المنظومة (System Elements)

٢-٢-٢-١: منطقة تجميع الطاقة الشمسية (Solar Collection Area)

٢-٢-٢-٢: منظومة التخزين الحراري (Thermal Storage)

٢-٢-٢-٣: المبادل الحراري (Thermal Exchanger)

٢-٢-٢-٤: المحرك التوربيني (Turbine Motor)

٢-٢-٢-٥: المكثف (Condenser)

٢-٢-٢-٦: منظومة الخزن الكيميائي (Chemical Storage System)

٢-٣: الفوائد الايجابية لخزن الطاقة(Advantages of Energy Storage)

٢-٤: خزين السعة الحرارية (Heat Capacity Storage)

٢-٤-١: الخزن بالحرارة المحسوسة(Sensible Heat Storage)

٢-٤-٢: الخزن بالحرارة الكامنة (Latent Heat Storage)

٢-٥: الخزن المائي(Water Storage)

٢-٦: منظومات الخزن المشترك (Community Storage Systems)

٢-٧: الخزن بالصهاريج (Storage Tanks)

٢-٧-١: انصهار الملح (Salt Eutectics)

٢-٧-٢: صهريج المائع الحراري (Zoned Thermal Fluid Tank)

٢-٧-٣: صهريج الخزن الحراري الصخري (Rock Thermal Storage Tank)

٢-٧-٤: صهريج الخزن الحراري (Thermal Storage Tank Farm)

٢-٨: برك الطاقة الشمسية (Solar Ponds Storage)

٢-٩: خزن الطبقة الصخرية المائية (Aquifer Storage)

٢-١٠: الخزن بدرجات حرارة متوسطة وعالية (Medium and High Temperature Storage)

٢-١١: خزن الحرارة الكامنة ذات الصلة مع التغيرات التركيبية والطورية (Latent Heat Storage Associated With Structural or Phase Change)

٢-١٢: الاملاح المائية (Salt Hydrates)

٢-١٣: التفاعلات الكيمياوية (Chemical Reactions)

الفصل الثالث

خزن اشكال الطاقة عالية الجودة

Storage of High Quality Energy Forms

الفهرست

٣-١: المقدمة (Introduction)

٣-٢: التخزين بوساطة ضخ الماء المظغوط (Pumped Hydro Storage)

٣-٣: الدولاب الطائر او دولاب الموازنة (Fly Wheels)

٣-٣-١: قرص الاجهاد الثابت(The Constant Stress Disc)

٣-٣-٢: أشكال الدواليب الطائرة الاخرى (Other Flywheel Shapes)

٣-٣-٣: أداء دولاب الموازنة (Fly Wheel Performance)

٣-٤: خزن الغاز المضغوط(Compressed Gas Storage)

٣-٥: الخزن بثبوت درجة الحرارة (الادياباتيكي) (Adiabatic Storage)

٣-٦: خزن الهيدروجين (Hydrogen Storage)

٣-٦-١: انتاج الهيدروجين (Hydrogen Production)

٣-٦-٢: اشكال خزن الهيدروجين (Hydrogen Storage Forms)

٣-٦-٣: الخزن بالغاز المضغوط (Compressed Storage in Gascous Form)

٣-٦-٤: الخزن بالهيدروجين المسال (Liquid Hydrogen Storage)

٣-٦-٥: خزن الهيدريدات المعدنية (Metal Hydride Storage)

٣-٦-٦: خزن الميثانول (Methanol Storage)

٣-٦-٧: مخازن الغرافيت الليفي الجزيئي (Graphite Nanofibr Stores)

٣-٦-٨: اعادة توليد الطاقة من الهيدروجين (Regeneration of Power From Hydro)

٣-٧: البطاريات (Batteries)

٣-٧-١: بطارية الرصاص الحامضية(The Lead Acid Battery)

٣-٧-٢: البطاريات الالكتروليتية القلوية(Alkaline Electrolyte Batteries)

٣-٧-٣: بطاريات درجات الحرارة العالية (High Temperature Batteries)

٣-٧-٤: بطاريات ايون الليثيوم (Lithinum Ion Batteries)

٣-٧-٥: خلايا الوقود العكوسة (بطاريات التدفق)(Reversible Fuel Cells – Flow Batteries)

٣-٨: مفاهيم الخزن الأخرى (Other Storage Concepts)

٣-٨-١: التخزين البيولوجي(Biological Storage)

٣-٨-٢: الخزن المباشر للضوء (Direct Storage of Light)

٣-٨-٣: الخزن بالمواد فائقة التوصيل (Superconducting Storage)

الفصل الرابع

ادارة الطاقة الكهربائية

Electrical energy management

الفهرست

٤-١: المقدمة (Introduction)

٤-٢: مفهوم ادارة الطاقة (Energy Management Concept)

٤-٣: نظام ادارة الطاقة (Programmed of Energy Management)

٤-٤: اهمية تطبيق نظام ادارة الطاقة (Implementation Procedure)

٤-٥: مفاهيم اخرى لنظام ادارة الطاقة (Other Concept of Energy Management)

٤-٥-١: النظام ثلاثي الابعاد المستديمة (Three Dimensions Sustainable)

٤-٥-٢: البيئة (Environment)

٤-٥-٣: المجتمع (Society)

٤-٦: إدارة الحرارة مع وبدون تغير المرحلة (Heat Management with and Without Phase Change)

الفصل الخامس

ادارة استهلاك الطاقة

Management consumption of energy

الفهرست

٥-١: المقدمة (Introduction)

٥-٢: طـرق ادارة طـلـب الطـاقــة (Methods of Energy Requirements Management)

٥-٢-١: خفض ذروة الطلب (Peak Clipping)

٥-٢-٢: ملئ الجوانب المنفرجة (Valleys Filling)

٥-٣: طرق ازاحة الاحمال الكهربائية (Load Release Ways)

٥-٤: فوائد ادارة الحمل (Loading Management Benefits)

٥-٤-١: خفض الذروة (Peak Reduction)

٥-٤-٢: تقليل تكاليف توليدالقدرة (Generation Mining High Cost Power)

٥-٤-٣: طرح الحمل (Load Shedding)

٥-٤-٤: تشغيل الاحمال المفصولة (Cold Load Peak – Up)

٥-٥: الاجراءات المساعدة لتطبيق نظام ادارة الاحمال (Assistance Requirement for Load Management System Application)

٥-٦: حساب الآداء التفصيلي(Calculation of Detailed Performance)

٥-٧: الجمود الحراري (Thermal Inertia)

٥-٨: نموذج ضمان الاستخدام الامثل للطاقة الكهربائية لمؤسسة ما (Example for Insurance of Electrical Energy Use in Any Company)

الفصل الاول

الطاقة و تحويلها والتحليل العام للطاقة

Energy, Energy Transfer, and General Energy Analysis

١-١: المقدمة (Introduction)

الطاقة جزء مهم في الحياة اليومية و ان رفاهية الحياة واستمرارها يعتمد على توفر الطاقة. ومن الضروري معرفة مصادر الطاقة وتنوعها وسبل تحولها من شكل الى اخر. توجد الطاقة باشكال مختلفة مثل الطاقة الحرارية والكهربائية والكيميائية والنووية.....الخ. يمكن اعتبار الكتلة شكل من اشكال الطاقة (طاقة حبيسة). تنتقل الطاقة من والى النظام المغلق بشكلين مختلفين حرارة اوشغل. او من نظام تحت السيطرة بواسطة سريان الطاقة (او الكتلة). ان انتقال الطاقة من نظام مغلق او مفتوح نتيجة للاختلاف بدرجة الحرارة او الى الشغل بسبب القوة المؤثرة عليه وازاحته ازاحة معينة وسيتم التطرق الى المفاهيم اعلاه في هذا الفصل.

١-٢: مفهوم الطاقة (Energy Concept)

تعرف الطاقة هي قدرة النظام على انجاز شغل بواسطة الاجهزة والمكائن التي تعمل باستخدام احد انواع مصادر الطاقة كالنفط او الغاز او الكهرباء او المصادر المتجددة من الطاقة، ولها خصائص (Characteristics) مختلفة:-

أ- تتغير الطاقة من شكل الى اخر وتبقى الكمية الكلية ثابتة (الطاقة لا تفنى ولا تستحدث – القانون الاول للديناميكيا الحرارية) ويشير هذا القانون الى انه من الممكن حساب تحول الطاقة وخسائرها وما تسببه بدقة طالما تتحول الطاقة دون خسائر.

ب- يمكن خزن الطاقة ونقلها من نظام إلى أخر أو من مكان إلى أخر.

ج- وحدة قياس الطاقة (نيوتن. متر) أو جول او مشتقات هذه الوحدة مثل الكيلو جول (kJ=1000 J) وترافق الفيزياء النووية وحدة صغيرة جدا للطاقة هي الكترون – فولت (eV).

د– التغير في طاقة المنظومة (أو الجسم) يساوي الفرق بين الطاقة الداخلية (E_{in}) والطاقة الخارجية (E_{out}) وفق المعادلة الاتية :–

$$\Delta E = (E_{in} - E_{out}) \quad \dots (1-1)$$

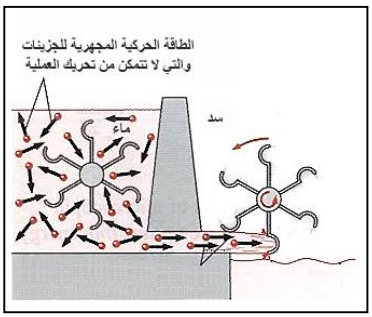
هـ– يمكن قياس الطاقة للمنظومة بوحدة الكتلة التي يرمز لها بالحرف (e) وذلك بقسمة الطاقة الكلية (E) على الكتلة (m) وتساوي:

$$e = E/m \quad (kJ/kg) \quad \dots (2-1)$$

لم تقدم الديناميكيا الحرارية (Thermodynamics) أية معلومات حول القيمة المطلقة للطاقة الكلية وإنما تعاملت فقط مع تغير الطاقة الكلية. يمكن تحديد مقدار كمية الطاقة الكلية للنظام بمقدار صفر (E=0) لنقطة مرجعية ملائمة. يعتمد تغير الطاقة الكلية على اختيار النقطة المرجعية (Reference point selected) فمثلا التناقص في الطاقة الكامنة للحجر الساقط تعتمد فقط على اختلاف ارتفاع السقوط وليس على اختيار المستوى المرجعيselected (Reference level). يساعد احيانا تحليل الديناميكيا الحرارية على تصور الاختلاف باشكال الطاقة الكلية للنظومة وتصنيفها في مجموعتين:–

١–٢–١: الطاقة المجهرية (Microscopic Energy)

ان هذا الشكل من الطاقة يعود الى التركيب الجزيئي للنظام ودرجة نشاطه، ولا يعتمد على المحيط الخارجي للمرجع (Reference). ان مجموع طاقات الاشكال غير المرئية للمنظومة تسمى بالطاقـة الداخلية (Internal energy) ويرمز لها بالحرف (U). ويطلق عليها احيـانا بـالشغـل الداخـلي (الـذاتي) (Internal work) او الشـغل البـاطني (غيـر الظـاهر) (Inner work)



شكل (١–١) يبين تاثير الطاقة الحركية المجهرية والطاقة المرئية التي تحرك العملية الدائرية.

١-٢-٢: الطـاقـة العيـانية (Macroscopic Energy)

هي عمليـات المنظـومـات (System processes) والتي تعود كليا الى بعض الاطر المرجعية الخارجية مثل الطاقة الحركية والطاقة الكامنة كما موضحة في الشكل (١-١) الذي يبين الطاقة العيانية لتغير الحالة مع السرعة والتعجيل. ان الطاقة العيانية للمنظومة تعود الى حركة او تاثير بعض القوى الخارجية المؤثرة مثل الجاذبية الكهرومغناطيسية او الشد السطحي. ان هذه الطاقة التي تمتلكها المنظومة نتيجة الحركة نسبة الى المحيط الخارجي (Reference frame) تسمى بالطاقة الحركية (KE) عندما تتحرك جميع اجزاء النظام بسرعة (ν) وكتلة (m) معينتان وتساوي :-

$$K.E = m\nu^2/2 \qquad (kJ) \qquad \ldots (1-3)$$

او بوحدة الكتلة (eV) وتساوي :-

$$K.e = \nu^2/2 \qquad (kJ/Kg) \qquad \ldots (1-4)$$

حيث ان (ν) تمثل سرعة النظام نسبة الى محيط مرجعي ثابت . ان طاقة الجسم الصلب الذي يدورحول محور معين تساوي :-

$$E = I\omega^2 \qquad \ldots (1-5)$$

حيث ان (I) تمثل عزم القصور الذاتي للجسم، (ω) تمثل سرعته الزاوية.

ان الطاقة التي يمتلكها النظام نتيجة وجوده في موقع مرتفع ضد مجال الجاذبية تسمى الطاقة الكامنة Potential Energy(PE) وتساوي:-

$$P.E = mgz \qquad \ldots (1-6)$$

$$P.E/m = gz$$

$$P.e = gz \quad kJ/kg \qquad \ldots (1-7)$$

حيث ان (g) تمثل التعجيل الارضي، (z) تمثل ارتفاع المنظومة (او الجسم) بالنسبة الى مستوى مرجعي مختار بشكل عشوائي، (E/m) تمثل وحدة الكتلة. ان تاثير المغناطيسية، الكهربائية، والشد السطحي ذو قيمة في حالات خاصة فقط. ويمكن ان يهمل بصورة عامة. في

حالة عدم وجود هذا التاثير فان الطاقة الكلية (E) للنظام تتكون من الطاقة الحركية (KE) والكامنة (PE) والطاقة الداخلية(U) وفق المعادلة الاتية:-

$$E= U+ K . E + P.E = U+ m \nu^2/2 + mgz \quad (kJ) \qquad \dots (8-1)$$

$$E/m =u /m + \nu^2/2+ Zg \qquad \dots (9-1)$$

بواسطة وحدة الكتلة:-

$$e = U+ v^2/2 + Zg \quad kJ/Kg \qquad \dots (10-1)$$

ان النظام المغلق يبقى مستقلا خلال العمليات، ولايحدث تغير في طاقته الحركية والكامنة عندما تكون سرعته وارتفاعه ثابتان، ويطلق عليه النظام المستقر. (Stationary System).

اما النظام المسيطر عليه (Control volume) الذي يحتوي على مائع جاري لفترة من الزمن والذي يطلق عليه معدل سريان المائع او معدل سريان الكتلة (Mass flow rate) ويرمز له (m) وهو عبارة عن كمية كتلة المادة خلال المقطع لوحدة الزمن والذي يطلق عليه معدل سرعة الجريان (Volume flow rate) (V) والذي يمثل حجم المائع المار خلال المقطع لوحدة الزمن و يمثل بالمعادلة الاتية :-

$$\dot{m} =\rho v =\rho A \nu_{avg} \qquad \dots (11-1)$$

حيث ان:-

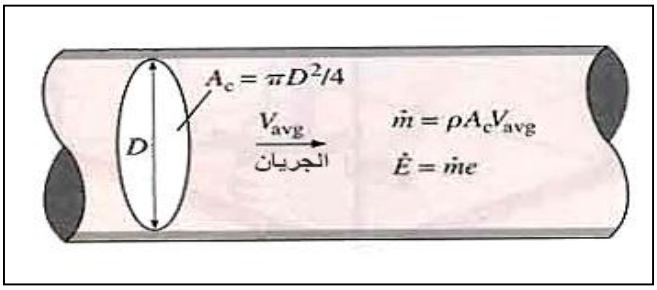
ρ=كثافة المائع

A_C= مساحة المقطع للجريان

ν_{avg}= معدل سرعة الجريان العمودي على (A_C)

ان النقطة فوق الرمز تشير الى معدل الوقت. ان معدل سريان الطاقة ($\dot{E}$) يتناغم مع جريان المائع بمعدل (m^0) كما في شكل (١-٢). ويمثل بالمعادلة الاتية:-

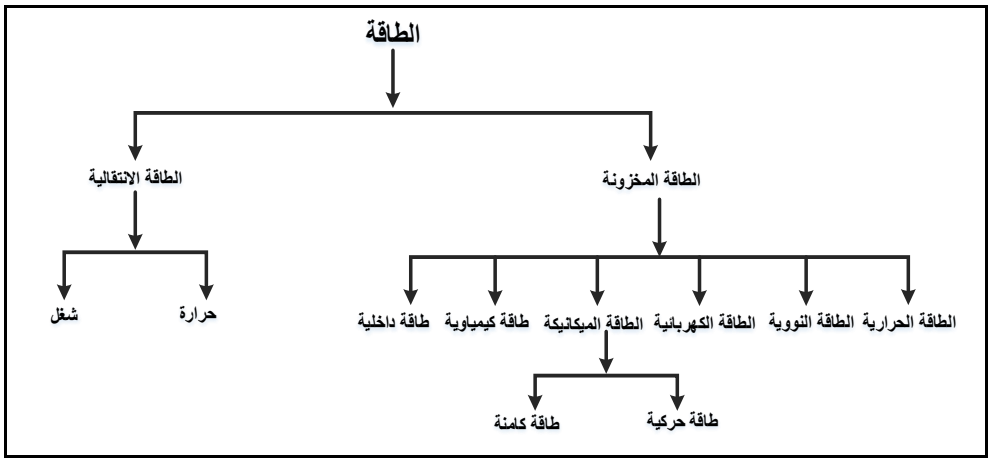
$$\text{or} \quad KW \quad \dot{E} = \dot{m}\, e \qquad kJ/s \qquad \dots (12-1)$$



شكل(١-٢): يعبر عن معدل سريان الكتلة والطاقة المتماثلان (المتناغمتان) في جريان السائل في انبوب قطره الداخلي(D) ومعدل سرعة المائع (v_{ave})

١-٣: اشكال الطاقة (Energy forms)

توجد الطاقة بشكلين وتكون اما المخزونة واما الانتقالية. والمخزونة منها تشمل الطاقة الميكانيكية، الطاقة الحركية، الطاقة الوضعية (الكامنة، الطاقة الكهربائية، الطاقة المغناطيسية، الطاقة الكيميائية، الطاقة النووية) اما الطاقة الانتقالية فتشمل طاقة الشغل. بكونها طاقة متحركة (وتكون على شكل حرارة او شغل) وتنتقل عبر حدود النظام كما هو الحال بالنسبة للطاقة الحرارية. اما الطاقة الكامنة فهي طاقة مخزونة داخل الكتلة وتتوافر على شكل كتلة او طاقة كيميائية، او موقع في مجال قوة الجاذبية والطاقة قيمة عددية وليست متجهة. والشكل (١-٣) يوضح تصنيف الطاقة:-



شكل(١-٣): يمثل اصناف الطاقة

١-٣-١: الطاقة الداخلية (Internal Energy)

الطاقة الداخلية (U) طاقة مخزونة في النظام على المستوى الجزيئي كما في الشكل (١-٤) ولعدم وجود ادوات لقياسها بشكل مباشر يمكن حسابها من خلال المتغيرات المجهرية القابلة للقياس كالحجم ودرجة الحرارة. وتشمل مكونات الطاقة الداخلية على:-

أ- الطاقة الانتقالية (Translational Energy)

هي الطاقة الناتجة من حركة الجزيئات السريعة. فمثلا جزيئات الغاز تتحرك بسرعة في الفضاء وبهذا تملك طاقة حركية وهي طاقة انتقالية كما في الشكل (١-٤أ).

ب- الطاقة الحركية الدورانية (Rotational Kinetic Energy)

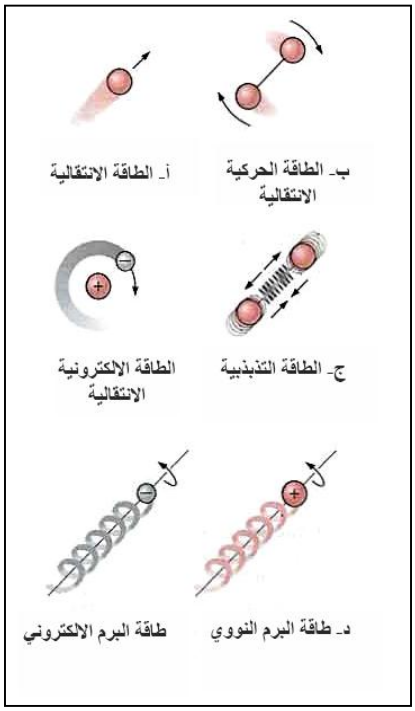
هي الطاقة الناتجة من دوران الجسم حول محور. فمثلا ان جزيئات ذرات البولمر تدور حول محور وتولد طاقة نتيجة حركة الدوران كما في الشكل (١-٤ب).

ج- الطاقة الحركية التذ بذبية (Vibrational Kinetic Energy)

هي الطاقة الناتجة من تذبذب مكونات الذرة الى الامام والخلف حول مركز ثقلها. ان الطاقة الحركية للغازات ناتجة من طاقة حركة الدوران والانتقال ولكن تذبذبها يؤدي الى ارتفاع درجة حرارتها كما في الشكل (١-٤ ج).

د- طاقة البرم (الغزل) (Spin Energy)

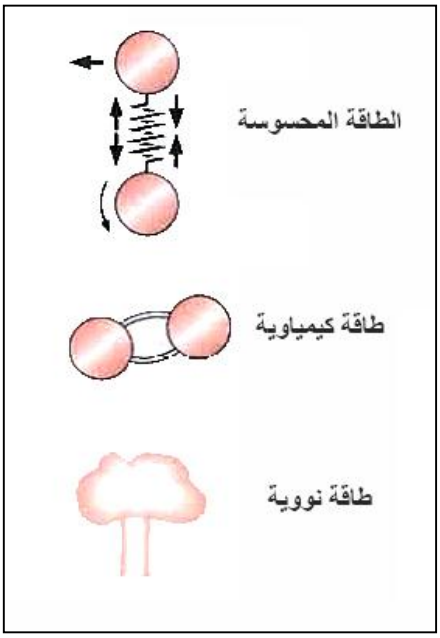
ان الكترون الذرة يدور حول النواة وبهذا يملك طاقة حركية وطاقة برم حول نفسه. فطاقة البرم الناتجة من الالكترون حول مداره وكذلك باقي جسيمات الذرة تملك طاقة برم كما في الشكل (١-٤د).



شكل(١-٤): يمثل انواع الطاقة، (أ) الطاقة الانتقالية، (ب) الطاقة الحركية الدورانية، (ج) طاقة الحركة التذبذبية، (د) طاقة البرم [١]

١-٣-٢: الطاقة المحسوسة (Sensible energy)

ان جزء من الطاقة الداخلية للنظام تظهر بشكل طاقة حركية للجزيئات وتسمى الطاقة المحسوسة كما في الشكل (١-٥). ان معدل السرعة ودرجة حرية الجزئيات تتناسب مع درجة الحرارة. تمتلك الجزيئات طاقة حركية عالية عند درجات الحرارة العالية ونتيجة لذلك يملك النظام طاقة داخلية عالية. ان الطاقة الداخلية تظهر مع تغير قوى الربط بين الجزيئات واجزاء الذرة. القوة التي تربط الجزيئات بعضها مع بعض تكون قوية في الصلب وضعيفة في الغاز. اذا اضيفت طاقة كافية الى جزيئات الصلب او المائـع تؤدي الى زيـادة سـرعة حـركة هـذه الجـزيئات وتقـلل مـن القـوة الـرابـطـة لها مغيرة حالتها وتحـول الصـلـب الى مـائـع والمـائـع الى غاز وهـذا يسمى بعمليـة تغير الاطـوار (Phase – Change – Process) نتيجة لاضافة هذه الطاقة فالنظام في طور الغاز يكون في مستوى طاقة داخلية اكثر من الصلب او طور السائل.



شكل(١-٥): يمثل (أ) الطاقة المحسوسة (ب) الطاقة الكيمياوية (ج) الطاقة النووية [١]

١-٣-٣: الطاقة الكامنة (Latent energy)

هي الطاقة الناتجة من تغير الطور لمواد متغيرة الطور (Phase Change Material) وهي طريقة مفضلة لخزن الطاقة الحرارية وباقل فقدان عند نقل وتحويل الطاقة من شكل الى اخر. او تكون الحرارة المخزونة اعلى كثافة وذات شدة اعلى ومتوازنة حراريا بمرور الزمن وذات تصرف حراري ثابت ومناسب.

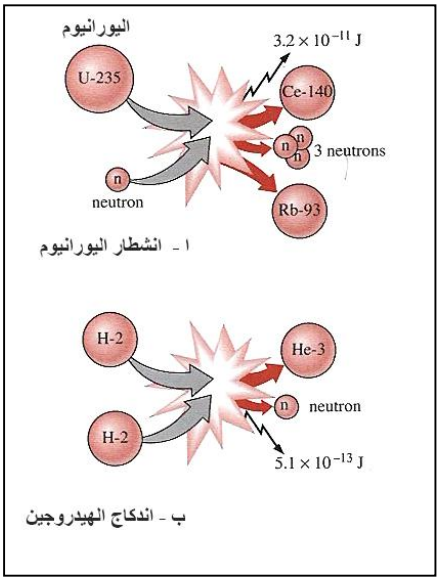
١-٣-٤: الطاقة الكيميائية (Chemical Energy)

هي الطاقة المتحررة نتيجة لتفاعل ذرتين او جزيئتين اواكثر او خليط منها لتتحد مع بعظها لانتاج مركب كيمياوي اكثر استقرارا. وتوجد الطاقة الكيميائية على شكل طاقة مخزونة فقط ويسمى التفاعل الذي يطلق الحرارة بالتفاعل باعث للحرارة (Extho thermic reaction) اما التفاعل الذي يمتص حرارة فيسمى بالتفاعل الماص للحرارة . في حالة بعض التفاعلات الماصة للحرارة (Endo thermic) ويعتبر الاحتراق تفاعل كيمائي طارد للحرارة وهو اكثر مصادر طاقة الوقود المستخدمة من قبل الانسان. كما في الشكل (١-٥ب).

١-٣-٥: الطاقة النووية (Nuclear Energy)

هي نوع اخر من الطاقة الموجودة على شكل طاقة مخزونة فقط ويتم تحريرها من خلال التفاعلات النووية المختلفة (شكل ١-٥ ج). تقاس الطاقة المخزونة من التفاعل النووي عادة بالميكا الكترون – فولت (MeV) لكل تفاعل وبشكل عام هناك ثلاث انواع من التفاعلات النووية وتشمل الانحلال الاشعاعي (Radioactive decay) والانشطار النووي (Nuclear fission) والاندماج النووي (Nuclear fusion) شكل (١-٦) ان تفاعل الاندماج (Fusion) هو التفاعل الناتج من اندماج اربع ذرات هيدروجينية لانتاج نواة ذرة الهليوم و٢ بوزترون.

$$4_1H^1 \rightarrow H_1e^4 + 2e_1^0 \quad \ldots (13-1)$$



شكل(١-٦): يمثل (ا) طاقة الانشطار النووي (ب) طاقة الاندماج.

اما الانشطار النووي (Nuclear Fission) فتتحرر منه طاقة هائلة بقيم مختلفة حيث ان انشطار نواة U238 او U235 يحرر طاقة قدرها ٢٠٠ MeV.

١-٣-٦: الطاقة الميكانيكية (Mechanical Energy)

هي شكل من اشكال الطافة التي يمكن تحويلها الى شغل ميكانيكي مباشرة بوساطة المعدات الميكانيكية مثل التوربين. ان الطاقة الكامنة والطاقة الحركية هي الاشكال المالوفة للطاقة

الميكانيكية، الطاقة الحرارية هي ليست طاقة ميكانكية حيث لايمكن تحويلها مباشرة الى شغل متكامل (القانون الثاني للداينميكيا الحرارية) فمثلا المضخة تحول الطاقة الميكانيكية الى طاقة هيدروليكية من خلال اختلاف الضغط الذي يسبب دفع السائل الى التوربين والذي يسحب الطاقة الميكانيكية من المائع بواسطة انخفاض ضغطه. ان ضغط المائع الجاري يرافق الطاقة الميكانيكية. والطاقة الميكانكية للمائع الجاري يمكن حسابها مقدرة بوحدة الكتلة بالمعادلة الاتية:-

$$E_{mec} = P/\rho + v^2/2 + g\,Z \qquad \dots (14-1)$$

حيث ان (P/ρ) تمثل طاقة الجريان، و ($v^2/2$) تمثل الطاقة الحركية، و(gZ) تمثل الطاقة الكامنة ويمكن كتابتها بوحدة الكتلة حيث تكون:-

$$\Delta e_{mec} = P_2 - P_1/\rho + (v_2^2 - v_1^2)/2 + g\,(Z_2 - Z_1)\ kJ \qquad \dots (15-1)$$

ان الطاقة الميكانيكية هي شكل مفيد جدا من اشكال الطاقة لانه يمكن تحويلها بسهولة وكفاءة عالية الى اشكال اخرى للطاقة.

١-٣-٧: الطاقة الكهربائية (Electrical Energy)

ان الالكترونات تقطع حدود المنظومة لانجاز شغل عليها. حيث تتحرك الالكترونات تحت تاثير المجال الكهربائي، اما حركتها في الموصل تكون تحت تاثير القوة الدافعة الكهربائية و يكون ناتجها شغل. عند مرور (n) من الشحنات الكهربائية خلال فرق جهد (v) فانها تنجز شغلا = $We = vn$ ويمكن وصفها بصورة شغل بعد (W) $W_e = vI$

كما في شكل (١-٧)

حيث ان W_e = القدرة الكهربائية.

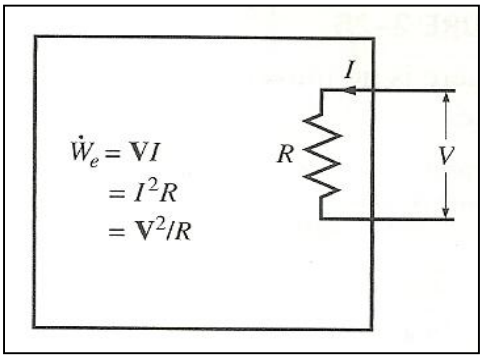
I=عدد الشحنات الكهربائية المارة خلال وحدة الزمن (التيار الكهربائي)

ان التيار(I) والفولتية (v) يتغيران مع الزمن والشغل المنجز خلال فترة زمنية (Δt) يمثل.

$$W_e = \int_1^2 v\,I\,dt \qquad kJ \qquad \dots (16-1)$$

وبثبوت التيار(I) والفولتية (v) خلال فترة زمنية Δt يمكن وضع المعادلة (١-١٦) بالشكل الاتي:

$$W_e = v\,I\Delta t \qquad kJ$$



شكل(١-٧): يمثل الطاقة الكهربائية

ويمكـن تخـزين الـطـاقـة الكهـربـائـية كـطـاقة مجـال كـهـربـائي سـاكن (مسـتـقـر) (Electrostatic field) او طاقة مجال محتث (Inductive filed) والطاقة الكهربائية كالطاقة الميكانيكية تعتبر شكلا مرغوبا به من اشكال الطاقة لامكانية تحويلها بسهولة وكفاءة الى اشكال اخرى من الطاقة.

١-٣-٨: طاقة التدفق (الانسياب) (Flow Energy)

اذا انتقلت مادة نظام ما الى داخل او خارج انظمة اخرى فان هنالك طاقة مبذولة عند عبور حدود النظام تسمى طاقة الانسياب وهي طاقة المائع الناتجة من الضغط او الشغل المبذول من المائع المتدفق كتلته (m) داخل وخارج النظام.

$$F.E = P\,V \qquad (j) \qquad \ldots (17-1)$$

$$F.E = P\,mV \qquad kw \qquad \ldots (18-1)$$

حيث P = الضغط

V = الحجم

١-٣-٩: الطاقة الكهرومغناطيسية (Electromagnetic Energy)

هي الطاقة المصاحبة للاشعاع الكهرومغناطيسي وتقاس بوحدات الالكترون – فولت (eV) او الميكاالكترون – فولت (MeV) وتعتبر هذه الطاقة شكلا نقيا للطاقة حيث لايصاحبها اي كتلة وتتوافر على شكل طاقة انتقالية فقط تنتقل بسرعة الضوء وتحسب الطاقة (E) المتوافرة في الامواج الكهرومغناطيسية من المعادلة

$$E=hc/\lambda \quad \ldots (19-1)$$

حيث: h يمثل ثابت بلانك

f يمثل تردد الاشعاع الذي طول موجته λ ، c سرعة الضوء (سرعة الاشعة الكهرومغناطيسية)

١-٣-١٠: الطاقة الحرارية (Thermal Energy)

هي الطاقة المصاحبة لاهتزازات الذرات والجزيئات للمادة وتعتبر شكلا اساسيا من اشكال الطاقة من حيث انه بالامكان تحويل كافة اشكال الطاقات الاخرى بشكل كامل الى طاقة حرارية في حين ان العملية العكسية يحددها القانون الثاني من الديناميكا الحرارية بشكل كبير والشكل الانتقالي للطاقة الحرارية هو الحرارة (Heat) ويمكن تخزين الطاقة الحرارية في معظم المواد على شكل حرارة محسوسة (Sensible heat) او حرارة كامنة (Latent heat) والحرارة كما اشرنا سابقا شكل من اشكال الطاقة التي تتدفق بين جسمين بسبب اختلاف درجة حرارتيهما. كما يمكن تعريفهما ايضا بانها دالة المسار المتوافق مع الجزء المتدفق من الطاقة عبر الحدود الخارجية لمنظومة ما نظرا لاختلاف درجات الحرارة بين تلك المنظومة ومحيطها. ومن الغير الممكن خزن الحرارة او خلقها من العدم وانما يمكن تحويلها عن طريق التوصيل (التماس المباشر بين جسمين احدهما ساخن والاخر بارد) او الحمل الحراري (تدفق الكتلة مع اختلاف درجات الحرارة كتحرك المياه التي يجري تسخينها او الاشعة من خلال الامواج الكهرومغناطيسية دون تحويل الكتلة او التماس المباشر بين الجسمين كما هي الحالة عند اصطدام ضوء الشمس بسطح ما.

١-٤: التفاعلات الباعثة والماصة للحرارة

(Endothermic and Exothermic Reactions)

تعتبر التفاعلات الكيمياوية مصدر جديد للحرارة، ففي حالة النظام غير المعزول ولا تتغير درجة الحرارة داخل النظام عندها يحدث تدفق آني للحرارة من النظام الى المحيط وعلى العكس من ذلك ففي حالة النظام معزول (مغلق) فلن يكون هنالك انتقال للحرارة من النظام الى محيطه مما يؤدي الى تسخين النظام لدرجات حرارة عالية. ان صورة لطاقة النظام والتي يمكن خزنها تسمى الطاقة المستقرة (Statics energy). اما صور طاقة النظام التي لايمكن خزنها يطلق عليها الطاقة المتغيرة (Dynamics energy)، او طاقة التفاعل (Interaction). ان الصور المتغيرة للطاقة ترافق محيط النظام الذي يحيطها وتمثل الربح او الخسارة خلال عمليات النظام.

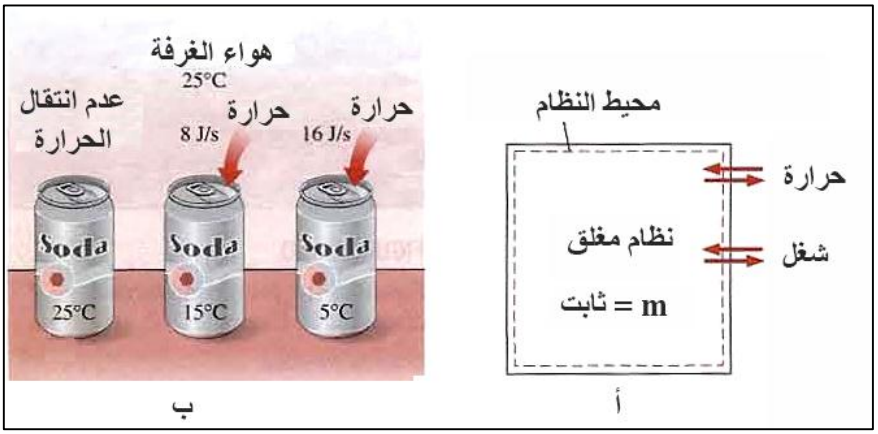
هناك نوعين من اشكال الطاقة المتفاعلة التي ترافق النظام وهما الحرارة والشغل المنجز. الطاقة المتفاعلة هي حرارة منتقلة ناتجة عن تاثير قوة متولدة من اختلاف درجة حرارة النظام او عن الشغل المنجز. ان النظام المفتوح يمكن ان تنتقل الطاقة او الكتلة منه الى محيطه والى نظام اخر مجاور. ان طاقة اي نظام تمثل طاقة المادة المنتظمة والتي ترافق حركة الجزيئات باتجاه واحد مستقيم او حول محور الحركة. لذلك تكون طاقة جزيئات النظام عشوائية وغير منتظمة. ان الطاقة المنتظمة متوفرة اكثر من الطاقة المبعثرة وهي قابلة للتحويل. ان تطبيقات الديناميكية الحرارية هو تحويل الطاقة المبعثرة الى طاقة منتظمة.

١-٥: طرق انتقال الطاقة (Energy Transfer Methods)

يمكن ان تنتقل الطاقة بالاشكال الاتية :-

١-٥-١: انتقال الطاقة بواسطة الحرارة (Energy transfer by heat)

يمكن لنظام مغلق ان يتبادل الطاقة مع محيطه او مع نظام اخر بشكلين مختلفين هما الشغل اوالحرارة الشكل (١- ٨) يوضح الفرق بين هذين الشكلين من الطاقة. الحرارة بشكل عام هي شكل من اشكال الطاقة وتنتقل بين اجزاء المنظومة ومحيطها الخارجي.



شكل(١-٨): (أ ، ب) يمثل انتقال الطاقة والشغل بين المنظومة ومحيطها الخارجي.

نتيجة للاختلاف في درجة الحرارة بين النظام ومحيطه او بين نظام ونظام مجاور له كما في الشكل (١-٨أ) فان الحرارة تنتقل من النظام بالدرجة الحرارية المرتفعة الى النظام ذو الدرجة الحرارية الواطئة. اذ لايمكن للحرارة ان تنتقل بين نظامين متساويين بدرجة الحرارة. ان العمليات

التي تنتقل خلالها الحرارة تسمى العمليات المعزولة حراريا (**Adiabatic**) شكل (١-٨ب) يوضح ذلك.

ان كمية الحرارة المنتقلة خلال العملية بين نظامين واحد او اثنين يتمثل بالرمز (**Q**). الحرارة المنتقلة بواسطة وحدة كتلة النظام يرمز لها (**q**) وتحسب بالمعادلة الاتية:-

$$q = Q / m \qquad (kj / kg) \qquad \ldots (20-1)$$

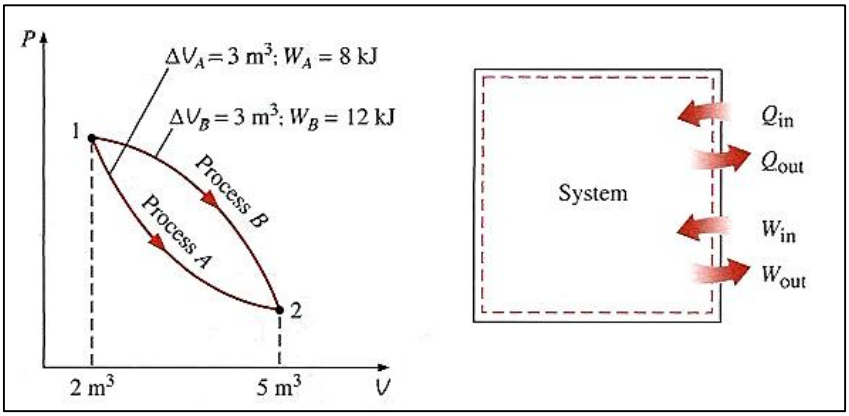
ان معدل الحرارة المنتقلة يحسب بالمعادلة الاتية:-

$$Q = \int_1^2 Q dt \qquad (kj) \qquad \ldots (21-1)$$

١-٥-٢: انتقال الطاقة بواسطة الشغل (Energy transfer by work)

الشغل يشبه الحرارة وهو طاقة تفاعل بين المنظومة ومحيطها الخارجي حيث ان الطاقة يمكنها اختراق ما يحيط بالمنظومة المغلقة بشكل شغل او حرارة ولهذا اذا كانت الطاقة تحيط المنظومة المغلقة ليس بشكل حرارة فتكون بشكل شغل. الحرارة بسهولة يمكن اعتبارها هي قوة ناتجة من الاختلاف بين درجات حرارة المنظومة ومحيطها الخارجي. وفي حالة عدم ذلك يمكن اعتبارها شغل. الشغل هو طاقة منتقلة تتلائم مع القوة العاملة خلال ازاحته. ارتفاع المكبس ودوران العمود واختراق السلك الكهربائي خلال محيط المنظومة كلها تنسجم مع اشكال الشغل وتقاس وحدة الشغل بالكيلو جول (**k. J**). فالشغل الكلي المنجز خلال العملية بين النقطة (١) والنقطة (٢) يرمز له بـ (W_{12}). فالشغل المنجز لوحدة كتلة المنظومة فيعبر عنه بالمعادلة الاتية:-

$$W = W / m \ (kj / kg) \qquad \ldots (22-1)$$



شكل(١-٩): يمثل خواص الحرارة كدالة للنقطة وان الشغل دالة للازاحة

ويطلق على الشغل المنجز بوحدة الزمن بالقدرة كما موضحة في الشكل (١ –٩) ويرمز له بـ (W) ووحدته (kw j) او (kj / s)

١–٦: طرق انتقال الحرارة (Mechanisms of heat transfer)

تنتقل الحرارة بثلاث طرق وكل طريقة تتطلب وجود فرق في درجات الحرارة وكون الانتقال من الوسط عالي درجة الحرارة الى الوسط واطئ الحرارة وكما يلي :–

١–٦–١: التوصيل (conduction)

التوصيل عبارة عن انتقال الطاقة من جزيئات المادة الى الجزيئات المجاورة لها ذات الطاقة الاقل نتيجة للتفاعل بينهما. ويتم في الصلب، السائل والغاز وهو نتيجة للتصادم بين الجزيئات خلال حركتها العشوائية. وفي الاجسام الصلبة يتم التوصيل نتيجة اتحاد الجزيئات المتذبذبة في الشبكة والطاقة المنتقلة بواسطة الالكترون. ان معدل توصيل الحرارة والذي يمثل بالرمز (Q_{con}) خلال طبقات السطح ذات السمك(ΔX) يتناسب طردياً مع فرق درجات الحرارة (ΔT) خلال الطبقات والمساحة العمودية ذات سمك ثابت (ΔX)على اتجاه انتقال الحرارة، وتحسب بموجب

$$Q_{con} = K_I A \, d T/dx \qquad (W) \qquad \ldots (23–1)$$

العلاقة بين الشغل والحرارة الاتية:

حيث ان:– A= المساحة السطحية، K_I = الموصلية الحرارية للمعدن.

وفي حالة (ΔX) $\leftarrow$ O تكون المعادلة بالصيغة الاتية:–

$$Q_{Con} = - K_I A \, d T /dx \qquad (W) \qquad \ldots (24–1)$$

وتسمى هذه المعادلة بقانون فور ير (Fouriers law) للتوصيل الحراري.

١–٦–٢: الحمل (Convection)

ان انتقال الحرارة بواسطة الحمل يتم بين السطح الصلب والسائل و الغاز المجاور له عند الحركة ويشمل:–

أ– التاثير الناتج عن التوصيل وحركة المائع نتيجة لأنتقال الحرارة بالتوصيل. وفي حالة غياب حركة المائع يكون انتقال الحرارة بين السطح الصلب والمائع المجاور له و يكون توصيل تام. ويسمى الحمل بالحمل المضطرب نتيجة وجود قوة دافعة.

ب– عندما يجبر المائع على الجريان في الانبوب او على السطح يسمى الحمل الحر(الطبيعي).
اما اذا كانت حركة المائع نتيجة قوة الدفع الناتجة من اختلاف الكثافة بتاثير تغير درجة حرارته في المائع عندئذ يسمى بالحمل المضطرب. ويكون معدل الحرارة المنتقلة بواسطة الحمل (Q_{conv}) تحسب بالمعادلة الاتية:–

$$Q_{CONV} = HcA\ (T_2 - T_1) \qquad \ldots (25–1)$$

حيث ان:– Hc يمثل معامل (معامل الحمل الحراري) وهو معدل الطاقة الحرارية المتنقلة عبر مساحة /م^2 بتأثير فرق درجات الحرارة الاشعاع، مساحة سطح الحرارة المنتقلة، T_2 درجة حرارة السطح T_1 درجة حرارة المائع.

١–٦–٣: الاشعاع (Radiation)

تنبعث الطاقة من المواد الساخنة بشكل موجات كهرومغناطيسية كنتيجة للتغيرات في توزيع الكترونات الذرات الى الذرات او الجزيئات. انتقال الطاقة بواسطة الاشعاع لايحتاج الى وسط ناقل كما موضح في الشكل (١ –٩). ان سرعة انتقال الطاقة بواسطة الموجات الكهرومغناطيسية تعادل سرعة الضوء ولا تعاني اي نقصان في الفراغ وهذا يشبه انتقال الطاقة من الشمس الى الارض. ان الاشعاع الحراري هو شكل للاشعاع المنبعث من الاجسام الساخنة. ويختلف عن اشكال الاشعاع الكهرو مغناطيسية مثل الاشعة السينية، اشعة كاما، الاشعة القصيرة والامواج الراديوية والتي لاتعود الى درجة الحرارة. جميع الاجسام ذات درجات الحرارة اعلى من الصفر المطلق تبعث الاشعاع الحراري، الاشعاع ظاهرة حجمية (Volumetric). ان جميع المواد الصلبة والسائلة والغازية تبعث وتمتص او تنقل الاشعاع بدرجات متفاوتة. الاشعاع يمكن اعتباره ظاهرة سطحية للمواد الصلبة المعتمة للاشعاع الحراري مثل المعادن، الخشب، الحجر لان انبعاث الاشعة يتم من خلال المناطق الداخلية لمثل هذه المواد التي لايمكن ان يصل الى السطح. وعند سقوط الاشعاع على الاجسام يمتص ضمن اجزاء غير مرئية من السطح. ان مقدار معدل اشعاع (Q) المنبعث من السطوح (A) في الدرجة المطلقة (T_s) يحسب بواسطة قانون استيفان – بولتزمان والذي يصف التدفق الحراري للطاقة الاشعاعية وينص على ان كمية الطاقة المنبعثة من الجسم الاسود تناسب مع القوة الرابعة لدرجة حرارة الجسم من وحدة مساحة السطح.

$$Q_{cont-max} = E\,\sigma A\,T^4 \qquad W \qquad \ldots (26–1)$$

حيث ان $Q_{cont-max}$ الطاقة الممتصة للجسم الاسود.

(E) معامل الانبعاث.

A ثابت استيفان – بولتزمان.

ان السـطـح المثـالي الـذي يبعث الاشعـاع باقصـى معـدل يسـمى الجسـم الاسـود (Black body) ان الاشعاع المنبعث من السطوح الحقيقية اقل من الاشعاع المنبعث من الاجسام الصلبة السوداء المثالية في نفس درجة الحرارة.

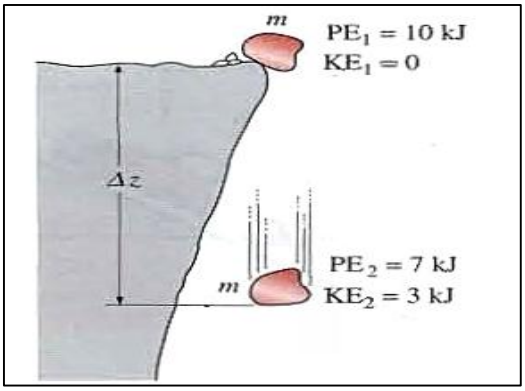
١-٧: محددات تحول الطاقة (limitation of Energy Conservation)

يتم تحويل الطاقة من شكل الى اخر بموجب القوانين الاتية:-

١-٧-١: القانون الاول للديناميكيا الحرارية (The First Law of Thermodynamics)

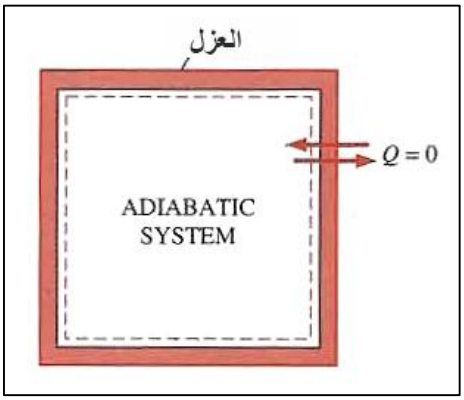
ينص القانون الاول للداينميكيا الحرارية على ان الطاقة لاتفنى ولا تستحدث خلال العمليات وانما تتحول من شكل الى اخر كما موضح في الشكل (١-١٠). وتتراكم اجزائها خلال العمليات. ان الجريان الخالص للطاقة خلال محيط النظام مساويا الى تغير طاقة النظام وكما في المعادلة الاتية:-

$$U_2 - U_1 = Q - W \qquad \dots (27-1)$$



شكل(١-١٠): يبين ان الطاقة لا يمكن خلقها(تكوينها) او اتلافها ولكن يمكن تحويلها من شكل الى اخر (القانون الاول للديناميكية الحرارة)

حيث ان U= الطاقة الداخلية للنظام (Internal energy) وهي دالة لحالة النظام فقط. فمثلا ان الحجر الموضوع على ارتفاع معين يمتلك طاقة كامنة وعند سقوطه يتحول جزء منها الى طاقة حركية كما موضح في الشكل (١-١٠). حيث يبين ان نقصان الطاقة الكامنة ($\mathbf{Mg\ \Delta z}$) = تماما الزيادة في الطاقة الحركية (($\frac{1}{2}\mathbf{M}\ (\mathbf{V_2^2 - V_1^2})$) عند اهمال مقاومة الهواء. ان المنظومة التي تمر بسلسة من العمليات الاديابادتيكية (Adiabatic) وتتحول من حالة (١) الى حالة (٢) كما موضح في شكل (١-١١) فخلال هذه العمليات لا يصاحبها اي انتقال حراري وانما يصاحبها انواع متداخلة من الشغل. حيث ان الشغل الخالص نفسه في كل العمليات الاديباتيكية (Adiabatic) وان هذا التغير يعتمد على خاصية النظام. لايكون القانون الاول للثرمو دينمك مرجع الى القيمة الكلية لطاقة النظام المغلق وانما يحدد ببساطة ان التغير في الطاقة الكلية خلال العمليات الاديباتيكية تساوي الشغل المنجز. ان بعض العمليات التي تشمل انتقال الحرارة وليس توليد الشغل فمثلا (تسخين البطاطة الموضوعة داخل الفرن) كنتيجة لانتقال الحرارة الى البطاطة مما يسبب زيادة سخونتها نتيجة زيادة في الطاقة الكلية ومن خلال فقدانها الرطوبة. ان الزيادة في الطاقة الكلية للبطاطة تساوي كمية الحرارة المنتقلة اليها فمثلا اذا كان ٥ كيلو جول من الحرارة انتقلت الى البطاطة فان الطاقة في البطاطة تصبح ايضا ٥ كيلو جول. ان الماء الساخن في قمة وعاء مقداره (١٥) كيلو جول. تبين ان كمية الحراره المنتقلة الى الماء من سخان مقدارها (٣) كيلو جول ولا يوجد خسارة او فقدان من حرارة الماء الى هواء المحيط الخارجي. ان الفرق في الطاقة تساوي (١٢) كيلو جول. ان الغرفة المعزولة جيدا (Adiabatic) لو سخنت بواسطة سخان كهربائي كنتيجة للشغل المعطى تزيد من طاقة النظام. وبما ان النظام لايسمح بانتقال الحرارة من الغرفة الى المحيط الخارجي او بالعكس تكون كمية الحرارة تساوي صفر. ان حفظ الطاقة يبين ان الشغل الكهربائي المنجز على الغرفة يساوي التغير في طاقة المنظومة.



شكل(١-١١): يمثل العمليات الاديا باتيكية

١-٧-٢: القانون الثاني للديناميكيا الحرارية (Second Law of Thermodynamic)

ينص القانون الثاني للداينامیكية الحرارية بانه من غير الممكن استخدام كافة اشكال الطاقة بنفس الكفاءة اي هناك دائما خسائر في عملية تحويل الطاقة وليس هناك عملية قابلة للعكس ١٠٠%.

١-٨: كفاءة تحويل الطاقة (Energy Conversion Efficiency)

يعتمد تحليل انظمة الطاقة على القانون الثاني من الديناميكيا الحرارية الذي يحسب التغيرات في جودة الطاقة او الانتروبي(Enthropy). ويقل اداء الطاقة للنظام عندما تفقد العملية جودتها. توازن اداء الطاقة للنظام يحسب بالمعادلة الاتية :-

$$E_{in} = E_{out} - E_l \quad (kW) \qquad \ldots (28-1)$$

حيث ان :-

E_{in} مقدار الطاقة الداخلية (kW)

E_{out} مقدار الطاقة الخارجية المفيدة (kW)

E_l معدل استهلاك الطاقة او الطاقة المفقودة (kW)

ان كفاءة اداء الطاقة μ لنظام تحويل الطاقة هي نسبة الاداء الفعلي للنظام والاداء المثالي له ويحسب بالمعادلة الاتية:-

$$\mu = E_{out} \setminus E_{in} = 1 - E_L \setminus E_{in} \qquad \ldots (29-1)$$

حيث ان:- μ الكفاءة الميكانيكية، E_{out} تمثل الطاقة اليكانيكية الخارجة، E_{in} تمثل الطاقة المكانيكية الداخلة E_L تمثل فقدان الطاقة الميكانيكية.

ان محددات تحويل الطاقة المحكومة بالقانون الثاني للثرموداينمك والذي ينص على انه لايمكن لعملية تحويل حرارية ان تكون كاملة تماما فالبخار في محطة قدرة مثلا لايمكن تحويله كليا الى شغل او طاقة كهربائية. ان نظام الحياة الفعلي للتحويل الكامل يتطلب الاحتفاظ بالمحيط عند الصفر المطلق اضافة الى عدم وجود اي خسارة او اي احتكاك فمثلا عند شراء سخان ماء فالبائع يخبر المشتري بان كفاءة السخان حوالي ٩٠% حيث ان كفاءة سخان الماء تعني النسبة بين الطاقة المجهزة الى المسكن بالماء الساخن الى الطاقة التي يستهلكها السخان او ان البائع يتحدث عن كفاءة العازلية ٩٤% وان اداء احتراق التجهيز يمكن ان يعرف بخصائص كفاءة الاحتراق والمتمثلة بالصيغة الاتية: -

كفاءة الاحتراق= كمية الحرارة المتحررة خلال الاحتراق (Q) الى كمية حرارة الوقود المحترق (HV). فمثلا يستلم توربين 20كغم/ث من البخار (يحتوي) على حرارة مقدارها 2800 كيلو جول/ كغم في الساعة ويطلق نفس المقدار المكثف من الضغط المكثف يحتوى على حرارة مقدارها 2500كيلو جول/ كغم في الساعة فاقدا 5% من حرارته التي تذهب الى المحيط الخارجي والقدرة الناتجة عن التوربين سوف تكون ($100\% - 10\%$) × ($2800 - 2500$) × $P=20$ $5400KJ\backslash S$ = وهذا يمثل القوة المقدرة T اي ($100\% - 10\%$) ان الخسارة بمقدار10%مما تعادل 400 kW وهكذا يدخل في المنظومة ويخرج منها في الساعة ($5000+400$) kWh وبكفاءة 90%.

الفصـل الثـاني

تخـزين الحـرارة

Heat Storage

٢-١: المقدمة (Introduction)

يعتبر خزين الطاقة حلقة اساسية ضمن سلسلة حلقات منظومة الطاقة الحالية واعتمادها في المستقبل من الامور الضرورية. غالبا لاتسمح خصائص مصادر الطاقة الاولية (الناضبة وغير الناضبة) بالاستجابة لأزمة الطلب على الطاقة في المكان والزمان المعنيين. ولتحقيق تطابق فعلي بين المتاح (المعروض) والمطلوب على الطاقة لابد من توفر قدرات مهمة من الطاقة المخزونة. اكتسب تخزين الطاقة في السنوات الاخيرة قدرا كبيرا من الاهمية بسبب التقدم الذي تحقق في اساليب تخزين الطاقة واستخدام مصادر طاقة متجددة مثل الرياح والطاقة الشمسية ... الخ. لتصميم وتشغيل انظمة خزن الطاقة تتوقف على العوامل الاتية :-

اولاً- الطاقة القصوى لتخزين المنظومة وتشمل :-

أ- الوقت المتوقع اعتماده على احتمالات توفر مصادر الطاقة.

ب- طبيعة الاحمال المتوقعة.

ج- درجة الاعتمادية المطلوبة.

د- طريقة التجهيز بالطاقة الاضافية.

ثانياً- كفاءة المنظومة متضمنة عملية الشحن (charging) وقواعد التخزين.

لوجود العديد من تقنيات التخزين و الاستمرار بعمليات البحث والتطوير لزيادة كفاءة التخزين وعامل الاعتمادية وتقليل كلفة التخزين والاثار البيئية الناجمة عن التخزين. يفضل دمج تقنيات التخزين في منظومة انتاج الطاقة ويصبح تدبير الانتاج فعال واكثر مرونة واستقرار وذو جودة عالية. ويعتمد عموما تخزين الطاقة لتجنب انقطاع التيار الكهربائي وتحقيق استقرار توفر التجهيز للشبكة الكهربائية. يشمل التخزين التقنيات القديمة والحديثة و تتركز بالاساس على دائرة التخزين والامداد بالطاقة بصورة مستمرة ويمكن ان يلبي التخزين الطلب على الطاقة لبعض الوقت او لفترة طويلة. ان

مجال تطبيق هذه التقنيات متعدد وواسع وادناه اهم المجالات الممكنة في استعمال انظمة الخزن الحرارية:-

١- مجال انتاج الطاقة الكهربائية او مجال العمليات الصناعية. وهنا تتم عملية خزن الطاقة الشمسية بشكل بخار او ماء حار او باستعمال بعض الاملاح الخاصة وكذلك عملية تخزين الهواء المضغوط او الطاقة الحركية او الطاقة الكيميائية او الكهروكيميائية ... الخ.

٢- مجال خدمة المجتمع للاغراض التالية:-

أ- تهيئة الماء الحار لغرض الاستعمال.

ب- التدفئة والتبريد.

ج- لتجفيف المحاصيل الزراعية.

د- لتوليد الطاقة الكهربائية للاستخدامات المنزلية.

تستخدم المواد التالية في عملية التخزين مثل الماء، الحصى، الزيت، الاملاح المتميعة، الهيدروجين والمعادن الاخرى.

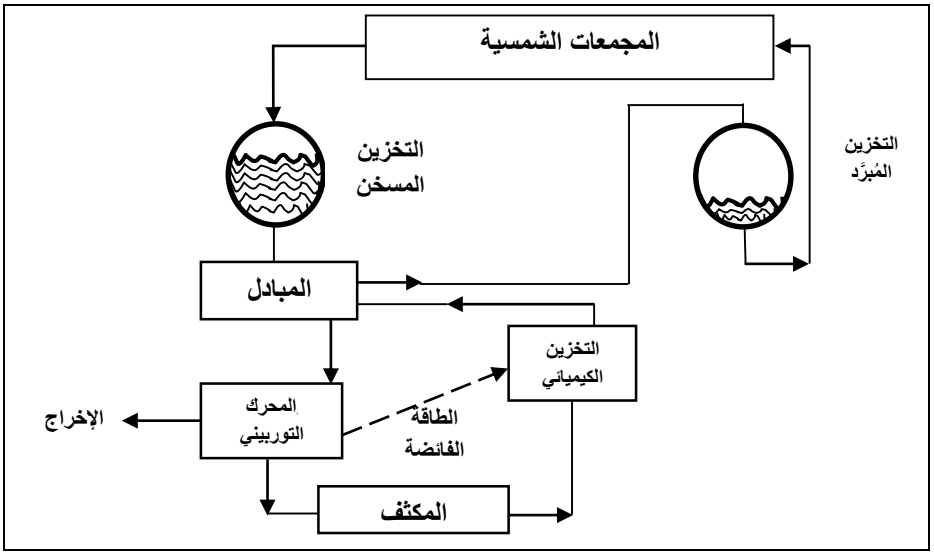
٣- مجال نقل الطاقة المخزونة من مكان وجود الفائض منها الى المكان الذي يحتاج طاقة وذلك مثلا بواسطة تفاعل مادة او اكثر كتفاعل الميثان مع ثاني اوكسيد الكبريت.

٢-٢: خزن الطاقة الشمسية (Energy solar storage)

تتألف منظومات خزن الطاقة الشمسية من العناصر الاساسيه و التي تشكل مع منطقة تجميع الطاقة الشمسية المنظومة المستخدمة. ان تخزين الطاقة هو أحد الجوانب الرئيسية لجعل مجمع الطاقة الشمسية نظاما مفيداً. ان أنظمة الدوران الحركية ذات درجات الحرارة المتوسطة و التي من الممكن أن يستفاد من الماء الحار الناتج عنها بواسطة مجمعات الطاقة الشمسية. ان منظومة دورة رانكين (Rankin) النوع المستخدم في المجمعات عالية التركيز والملائمة لتحويل البخار أو منظومات التوربين النووية ذات درجات الحرارة العالية تكون متطابقة بشكل أساسي لأنظمة المحركات التوربينية البخارية التقليدية أو النووية.

٢-٢-١: المخطط الأساسي لنظام خزن الطاقة الشمسية (Basic System Diagram for Solar Energy)

النظام الأساسي لخزن الطاقة الشمسية يتكون من منظومات فرعية معينة والشكل (٢-١) يبين مخطط للعناصر الاساسيه للنظام الحراري.



شكل (٢-١): يبين العناصر الأساسية لنظام ثرموديناميكي يستخدم الحرارة الشمسية كمصدر للطاقة. مجهز الطاقة المخزونة مشار اليه كوقود كيميائي أو وقود منتج من الطاقة الشمسية الزائدة خلال الصيف.

٢-٢-٢: اجزاء المنظومة (System elements)

٢-٢-٢-١: منطقة تجميع الطاقة الشمسية (Solar collection area)

يتم تصميم المجمع الشمسي على جزئين، الجزء الاول مصمم لامتصاص الاشعاع الشمسي الساقط و الجزء الثاني مصمم لاغراض نقل الطاقة الى الوسط المتصل به لنقل الحرارة. هناك نوعان من المجمعات الشمسية هما المجمع ذو لوح مستوي (Flat plate) ومجمع التركيز(Focusing) وتعتبر اكبر منظومة فرعية من حيث الحجم والكلفة. ان كلفة المنظومة الفرعية تتضمن كلف ما يلي :-

- اجزاء المجمع.
- خطوط نقل المائع البارد إلى المجمع و تجميعه و نقله إلى مكان التسخين.

٢-٢-٢-٢: منظومة التخزين الحراري (Thermal storage)

كل نظام طاقة شمسية يمتلك سعة تخزين طاقة حرارية بدرجة ما، أما أن تكون مجهزة تصميميا لتخزين طاقة كافية لتخفيف التذبذبات أو التقلبات في التدفق الداخل، أو خلال القصور الذاتي للنظام الذي يشمل على المجمعات و وسط (مائع) نقل الحرارة. إن التخزين الحراري مفيد فقط لفترة قصيرة تقاس بالساعات أو بأفضل الحالات بأيام قليلة، و التي تكون بشكل عام غير كافية لاستمرار النظام خلال أسوء حالات الطقس. مبدئياً يمكن التخزين الحراري بسعة كبيرة. كلفة التخزين تكون باهضة جدا ما عدا في حالة حوض المحلول الملحي الشمسي والذي هو عبارة عن مجمع طاقة شمسية و تخزين حراري يكفي لأسابيع من استيعاب الحرارة للخزين المبرد اوللخزين الساخن.

٢-٢-٢-٣: المبادل الحراري (Thermal exchanger)

تحتوي منظومة التخزين على مبادل حراري يعمل بين السائل الناقل للطاقة الشمسية (دورة مفتوحة) و مائع المنظومة المستخدمة (دورة مغلقة). ويعمل كرابط بين تجميع الطاقة والأنظمة الفرعية للتخزين ومواقع الاستخدام.

٢-٢-٢-٤: المحرك التوربيني (Turbine motor)

المنظومة الفرعية للمحرك التوربيني تمثل النظام الفرعي للاستهلاك. مثل هذا النظام قد يكفي لتدفئة منزل وإلى تشغيل التوربين. هذا النظام الفرعي يوفر للزبون الطاقة اللازمة المطلوبة من منظومة تجميع الطاقة الشمسية.

٢-٢-٢-٥: المكثف (Condenser)

المنظومة الفرعية للمكثف ضرورية عند استخدام دورة ديناميكية حرارية. وهي من منظومات المحرك التوربيني و يستخدم عند الحاجة الى نظام تبريد بواسطة امتصاص الغاز، مع الاخذ بنظر الاعتبار تاثيراته البيئية لان الحرارة غير المستخدمة منه تطرح الى البيئة المحيطة وخاصة اذا كانت هذه المكثفات ذات درجات حرارة عالية وفائضة عن الاستخدام. ويمكن اضافة منظومات اخرى للاستفادة من هذه الحرارة الفائضة عند الحاجة لمهام التسخين والتبريد او حتى في تشغيل الحقول المغلقة بيئيا.

٢-٢-٢-٦: منظومة الخزن الكيميائي (Chemical storage system)

أن النظام الفرعي للخزن الكيميائي بشكل عام مناسب للاستخدامات ذات درجات الحرارة العالية والمتوسطة. وكذلك يشمل خزن طاقة في درجات الحرارة الاعتيادية لمدة طويلة دون اي فقدان حرارة او جهد لنقل الطاقة خلال مسافات بعيدة. وتحدث التفاعلات الكيميائية بواسطة عامل مساعد او بدون عامل مساعد. حيث تتحول الطاقة الشمسية في الصيف الى وقود كيميائي مخزون على شكل الهيدروجين أو ألمنيوم حبيبي يستخدم خلال الشتاء عندما يجتمع النهار القصير مع الجو الغائم لخلق مشاكل لمنظومة الطاقة الشمسية.

٢-٣: الفوائد خزن الطاقة(Advantages of Energy storage)

إن تخزين الطاقة ذات أهمية بالغة لنجاح أي مصدر طاقة يحقق متطلبات الاستهلاك. ان تخزين الطاقة يعتبر ذا اهمية كبيرة خاصة بالنسبة للطاقة الشمسية لأن التخزين مطلوب أكثر عندما تكون الطاقة الشمسية غير متاحة او قليلة في الشتاء. ان عدم امكانية تخزين الطاقة يُعَرقل الانتفاع منها للاسباب الاتية:-

أ- المنظومة الفرعية لتخزين الطاقة يجب أن تكون كفوءة لدعم النظام خلال الفترات التي تكون فيها أشعة الشمس غير كافية على المدى القصير، ان الطاقة الشمسية يمكن أن تدمج في نظام بديل يضمن تجهيز طاقة، كالفحم و النفط وطاقة الرياح. على أي حال لا يمكن للطاقة الشمسية أن تحقق كفاءة جيدة للبرهنة على قدرتها بتجهيز الطاقة دون اي بديل في الوقت الحاضر.

ب-ان ما ينجم من معوقات نتيجة تخزين الطاقة هو أن نظام التجميع الأساسي يجب أن يكون كفوء لتوفير الطاقة المخزونة خلال الفترات غير المشمسة واستثمارها خلال الفترات الغائمة. مساحة التجميع الإضافية هذه تعني زيادة كلفة الانتاج. فعند دراسة نتائج شهر مثالي لسطوع أشعة الشمس يتضح أنه حتى في الصحراء تكون فترات الجو الغائم و الصحو متباعدة بشكل متساوي أي تكون قليلة من أحدهم وتتبع بأيام قليلة من الآخر. الأيام الغائمة تظهر جزئياً في التحليل لجعل الفرق بين تخزين الطاقة العملي و الغير عملي، عند استخلاص الطاقة الكلية ليوم غائم جزئياً، إذاً فالفترات التي تتطلب تخزين الطاقة تقل بشكل ملحوظ وهنا تكمن المشكلة. الانظمة المركزية التي يجب أن تتعامل مع طبيعة

التشغيل و الإطفاء خلال ضوء الشمس المباشر في يوم غائم. ويعتمد هذا على تصميم المرجل لتجنب مشكلة الاحتراق عندما تعود الشمس فجأة بكامل سطوعها. اما في حالة النظام الغير مركزي فالمشكلة أساسية تكمن في المحاولة لتوفير كفاءة عالية في درجات الحرارة المتوسطة لينتج طاقة خارجة بكلفة منطقية. بما أن كلف تخزين الطاقة يجب أن تكون منطقية لهذا تصبح المشكلة كلفة وسط التخزين مقارنةً بكلفة مواد النظام الفرعي للتخزين.

٢-٤: خزين السعة الحرارية (Heat capacity storage)

توفر السعة الحرارية الإمكانية على خزن الطاقة قبل تحويلها الى شكل اخر. فخزن كيلو واط بالساعة يمكن أن يتم بواسطة رفع طن متري واحد من الماء لإرتفاع (٣١٤) متر أو رفع درجة حرارة طن متري واحد من الماء بمقدار (٠،٨٦) درجة سليليزية.

الخزن الحراري يمكن أن ينجز بطريقتين أساسيتين:-

٢-٤-١: الخزن بالحرارة المحسوسة(Sensible heat storage)

ويشمل مادة تقع ضمن نطاق عدم تغير الطور مع درجة الحرارة ليكون محسوباً في عملية التخزين. مقدار الحرارة المخزونة في كتلة من المادة تعطى بالمعادلة الاتية :-

$$Q=mC_p\Delta T \quad \dots (1-2)$$

حيث أن C_p هي سعة الحرارة النوعية للمادة عند ضغط ثابت و ΔT هي الفرق بدرجات الحرارة فوق الدرجة الصغرى للنظام. إذا كان لدينا حجم محدد للحاوية الخاصة بالمادة، فالطاقة تحسب بالمعادلة الاتية:

$$\rho C_p \Delta T = Q \setminus V \quad \dots (2-2)$$

حيث أن V هو حجم الحاوية.،ρ كثافة الماء

ان القابلية على خزن الحرارة المحسوسة في حاوية معلومة الحجم يعتمد على قيمة ناتج ضرب ρC_p. مع العلم ان الماء يمتلك أعلى قيمة للسعة الحرارية النوعية. بعض قيم المواد التي لها فائدة محتملة لتطبيقات التخزين مبينة في الجدول (٢ -١). المادة يجب ان لاتكون غالية الثمن ولديها مقدار سعة حرارية جيدة (ρC_p) ولكون الماء رخيص ومتوفر و سائل في مدى درجات حرارة واسع لذا يجب أن يحفظ في حاويات ذات نوعية جيدة. فمثلا يستخدم الماء في نظام التدفئة

الشمسي في منازلنا وكونه وسط خزن حراري كذلك الحجر مادة تخزين حراري جيدة أخرى من حيث الكلفة، لكن سعته الحرارية حوالي نصف سعة الماء. صندوق التخزين الحجري الذي أستخدم من قبل (جورج لوف) في نظام تسخين الهواء في منزله يعتبر عمليا. إن ميزة الصخور على الماء هي أن من الممكن استخدامها بسهولة لتخزين الحرارة الأكثر من (١٠٠) درجة سليليزية.إن معدل ضخ او سحب الحرارة مهم في التخزين الحراري الذي يستخدم التسخين المحسوس. إن قدرة المادة على خزن الحرارة هي أيضاً دالة للإنتشار الحراري (معامل التوصيل الحراري). ان قيم الإنتشار الحراري مبينة في الجدول (٢-١). ان الانتشار الحراري للحديد هو k ويعتبر الحديد وسط خزن حراري ممتاز يمتلك سعة حرارية عالية والتوصيل الحراري العالي. الحديد واوكسيد الحديد الاحمر جيدان للتخزين الحراري عند الدرجات الحرارية العالية الذي يصل إلى عدة مئات من الدرجات السليليزية وبكلفة مقبولة.

الجدول (٢-١): تخزين الحرارة لبعض المواد

المادة	ρ g/cm^3 density الكثافة	الحرارة النوعية cal /gc^0 C	سعة الحرارة الحجمية cal/cm^{3}c^0	التوصيل الحراري cal/cm c^{0}sce	الانتشار الحراري cm^2/sec
الماء	١,٠٠	١,٠٠	١,٠٠	٠,٠٠١٤	٠,٠٠١٤
الحديد	٧,٦٠	٠,١١	٠,٨٤	٠,١١٢	٠,١٣٤
أوكسيد الحديد	٥,٢٠	٠,١٨	٠,٩٤	٠,٠٠٧٠	٠,٠٠٧٤
الكرانيت	٢,٧٠	٠,١٩	٠,٥٢	٠,٠٠٦٥	٠,٠١٢٧
الرخام	٢,٧٠	٠,٢١	٠,٥٧	٠,٠٠٥٥	٠,٠٠٩٧
الخرسانة	٢,٤٧	٠,٢٢	٠,٥٤	٠,٠٠٥٨	٠,٠١٠٧
أوكسيد الالمنيوم	٤,٠٠	٠,٢٠	٠,٨٠	٠,٠٠٦٠	٠,٠٠٧٥
الطابوق	١,٧٠	٠,٢٠	٠,٣٤	٠,٠٠١٥	٠,٠٠٤٤
الأرض الجافة	١,٢٦	٠,١٩	٠,٢٤	٠,٠٠٠٦	٠,٠٠٢٥
الأرض	١,٧٠	٠,٥٠	٠,٨٦	٠,٠٠٦٠	٠,٠٠٧٠

الحديد و أوكسيده يتساويان في الأداء، فإن التأكسد البطيء للمعدن في نظام سائل أو هواء ساخن جدا سوف لن يخفض الأداء. السعة العالية لتخزين الحرارة للماء تجعله مناسب كوسط لخزن الحرارة، تنجز السعة الحرارية او خزن (الحرارة المحسوسة) بتغير درجة حرارة المادة بدون تغير حالتها او تركيبها الكيمياوي. ان كمية الطاقة المخزونة بتسخين قطعة مادة ذات كتلة مقدارها($\mathbf{m}$) عندثبوت الضغط و تغير درجة الحرارة من ($\mathbf{T_1}$) الى ($\mathbf{T_2}$) وتحسب بالمعادلة الاتية :-

$$\mathbf{E= \int_{t_1}^{t_2} m C_p dt} \qquad \dots (3-2)$$

حيث ان ($\mathbf{C_p}$) هي سعة الحرارة النوعية بثبوت الضغط، ان مخزون الطاقة عند درجات حرارة واطئة في الانظمة المتجددة كمجمع شمسي يوصل حرارة الى المسكن او الماء الساخن او لاغراض الطبخ يكون مطلوباً لأنظمة الطاقة المتجددة. مثلا عند استخدام حرارة الفضاء الناتجة من خلال امتصاص الطاقة الشمسية، للحصول على الماء الحار او طهي الطعام عند درجة الحرارة (١٠٠) درجة مئوية. ان الاجهزة الفعلية لخزن الحرارة قد تكون من الاحجام – المتوسطة – التي تهدف الى تجهيز الحرارة خلال الليل بعد يوم مشمس او قد تكون اكبر من ذلك بحيث تكون قادرة على تلبية الطلبات المحددة خلال الايام المتعاقبة. واخيرا فان نظام الخزن قد توفر خزين موسمي او فصلي كما هو مطلوب عند درجات حرارية متفاوتة حيث هناك متغيرات فصلية في اشعة الشمس وتكون بدرجة عالية انذاك، واكثر من ذلك فان نقل الحرارة الى مدى معين يكون عكوسا وذات علاقة ترابطية مع طول النهار. حالة اخرى من حالات خزن الطاقة لدرجة حرارة واطئة (مثلما موجود في اشكال الطاقة الاخرى) وهي الحالات اللامركزية مثل ان العديد من انظمة الطاقة الشمسية يوجد بشكل مناسب على سطوح البيوت اي بطريقة لامركزية. ان خزن الطاقة الحرارية المحسوسة قد تفقد الحرارة من حاوياتها سواء كانت معزولة او غير معزولة هذا الفقدان يتناسب مع مساحة السطح. ان فقدان الحرارة النسبية تكون قليلة، كلما كانت ابعاد الخزن واسعة او كلما كانت معدات الخزن مركزية اكثر. مثلاً:- ان مساحة الانظمة الشمسية المعروفة على سطوح المنازل قد يجعل التفوق في النصب والانشاء الخاص بالمواطنين محسوسا. ان هذه الانظمة تعتمد على الموازنة الاقتصادية بين فائدة الحجم والكلف الاضافية لتحويل خطوط نقل الحرارة الى الانشاءات الفردية او المؤسسات ذات الصلة بالمنشآت الخاصة بالخزن المركزي. ينبغي على المرء ان ياخذ بنظر الاعتبار العديد من العوامل الاخرى قدر الامكان لتحقيق الفائدة القصوى في فحص وتدقيق التجهيز

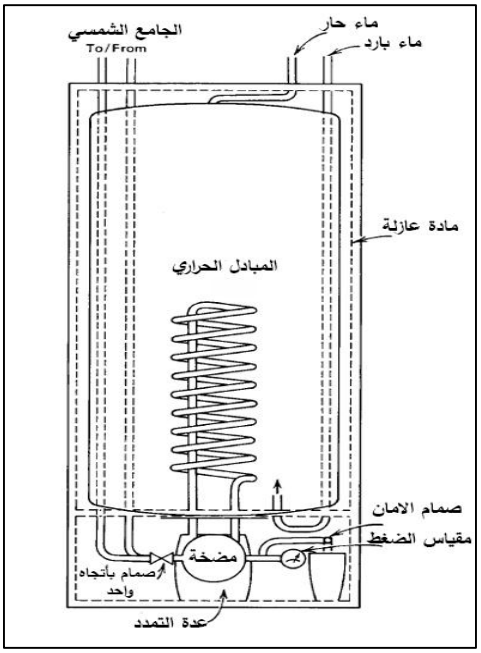
المقدمة من خلال منشاة الخزن العامة (والتي يمكن ان يكون قادراً على تقديم الحرارة الى البنايات مع مجمعات او(مخازن الجمع) الطاقة الشمسية غير الفعالة:

٢-٤-٢: الخزن بالحرارة الكامنة (Latent heat storage)

ان خزن الطاقة بواسطة الحرارة الكامنة(Latent heat storage) المتعلقة بتغييرات الطور هي طريقة مهمة لتخزين الحرارة. يوجد هناك أنواع متعددة من تغيرات الطور التي تمتلك كميات كبيرة كافية من الحرارة الداخلية المفيدة. التغير الأكبر في الطور هو ذلك الذي يحدث في تحول الماء إلى بخار، يخزن (٥٤٨) سعرة /غرام، أو أقل، بالإعتماد على درجة الحرارة التي يحدث فيها التبخر. مع ذلك يعتبر بخار الماء وسط صعب الإحتواء، و محاولات لخزن البخار في أوعية ضغط عملاقة قد حدثت وتم التخلي عنها لأنها غير عملية وخطيرة. و بشكل عام نحن نريد تغير بالطور من الحالة الصلبة إلى الحالة السائلة بدلاً من التغير من الحالة السائلة إلى الحالة الغازية. تغيرات الطور من الحالة الصلبة إلى السائلة تتطلب طاقة أقل من تلك التي من الحالة السائلة إلى الحالة الغازية ولكن بعض التحولات من الصلب إلى السائل تبقى توفر كميات مفيدة من إحتمال التخزين. الجدول ٢-٢ يوضح بعض المواد التي لها درجة إنصهار عالية والتي من الممكن أن تكون مفيدة. درجة الحرارة التي يحدث فيها تغير الطور تكون مهمة لأنها يجب أن تكون متوافقة مع درجات حرارة النظام الذي يدمج فيها النظام الفرعي. من المفيد أيضاً إدراج حرارة الإنصهار كدالة لدرجة الحرارة. كما مبين في الجدول (٢-٢) فإن أغلب درجات حرارة تغير الطور تكون عالية جداً لأغلب التطبيقات المحتملة للطاقة الشمسية. ان هيدروكسيد الليثيوم و هيدروكسيد الصوديوم وثلاثي أوكسيد البورون ونترات البوتاسيوم و كلوريد الألمنيوم تعتبر من المواد المهمة والمستخدمة في عمليات تحول الطور. ان كيفية بناء صندوق خزن حراري لتغير الطور هو وضع المواد الكيميائية متغيرة الطور في "علب مشروبات" معلقة بأسلاك في كل الخزان. يجري السائل الناقل للحرارة بحرية داخل الصندوق المليء بالعلب ولكن لا يختلط أبداً مع المواد متغيرة الطور. يكون التوصيل الحراري خلال كل علبة سريعاً سواء كانت المحتويات صلبة أم سائلة. أن المركبات انفة الذكر لها اهمية بالغة عند استخدام الطاقة الشمسية خصوصا مع التدوير المستمر للعلب المغلقة. المشكلة الأساسية هو أنه بعض المركبات تذوب و تتجمد بشكل متطابق و أخرى بشكل غير متطابق.

٢-٥: الخزن المائي(Water storage)

تستخدم تقنية الخزن المائي بشكل واسع لخزن الطاقة عند الذروة، واعادة استخدامها عند احتياجها خلال ذروة التحميل. إنها ببساطة تستخدم سداً بأرتفاع هيدروستاتيكي كافي ليصبح محطة توليد كهرومائية. يعاد الماء إلى الخزان خارج أوقات الذروة ويعاد استخدامه خلال أوقات طلبات الذروة. المتطلبات الأساسية هي وجود سد وماء وفتحة عند قاعدته، أو سدين بإرتفاعين مختلفين. الطاقة المطلوبة لضخ الماء صعوداً تسترد بكفاءة حوالي ٦٥ – ٧٥%. الخزن المائي مثالي لتخزين الطاقة الشمسية عند الانتاج والاستخدام وخزن الفائض منها.ان محطة الطاقة الشمسية تنتج الطاقة بأعلى معدل خلال النهار وتكون مهيأة خلال الليل او عند الحاجة. معظم حرارة الفضاء وانظمة الماء الساخن للبنايات الخاصة بالافراد تحتوي على خزانات لتخزين الماء بحاويات حديد عازلة بسعات مختلفة لاستخدامات الماء الساخن والبارد كما موضح في الشكل (٢-٢). مثلا لعائلة واحدة تسكن في العراق فانها تحتاج الى خزان سعة (١م^3) ويعتبر خزان نموذ جي كما هو الحال في الدول العربية.

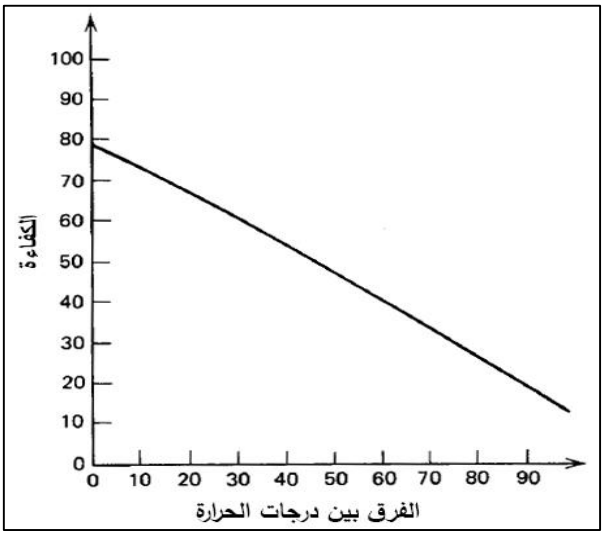


شكل (٢-٢): يمثل سخان ماء اسطواني الشكل

ومن اجل الحصول على درجة حرارة مناسبة ومرضية فلابد ان يكون الخزان جزء من منظومة الطاقة الشمسية. ان اختلاف وتفاوت درجات الحرارة حتى ٥٠ درجة مئوية بحيث يمكن المحافظة عليها لعموم المحتوى المائي للخزن. عند اجراء بعض التحسينات الضرورية والجوهرية (اكثر من ١٥%) في اداء و تشغيل نظام مجمع التسخين بالطاقة الشمسية يكون ملزما و ضروريا لان اداء وكفاءة تحويل الجامع للطاقة الشمسية قد تهبط مع تفاوت في درجات الحرارة بين الماء القادم من الجامع ودرجة حرارة محيطه الخارجي. وهكذا فان الماء البارد الداخل من الجزء السفلي من قاعدة الخزان والذي يضاف الى الخزين الموجود من الماء الاحتياطي والذي سوف يستخدم كماء داخل الى الخزان في دائرة الجامع للطاقة الشمسية. ومن ثم يسحب الماء الساخن من مستودعات الطاقة بدرجات حرارة عالية من خزان التجميع وفي الغالب يكون في اعلى الخزان. ومن جانب اخر فان الماء البارد سوف يخرج من الخزان من اجل التحميل بشكل مباشر او من خلال تغير درجة حرارة الماء الساخن الذي يقع في اعلى الخزان الى درجات حرارة عالية. ان وجود الخزان الحديدي في المنظومة الطاقة الشمسية سوف يكون قادرا على تغطية الحمل لفترات طويلة من السنة (ومن المحتمل لعموم السنة).

لناخذ حالة نموذجية فعند درجات حرارة واطئة في فصل الشتاء يكون ضروريا على السوائل الناقلة للحرارة الى منطقة الاستهلاك اذ ان الطاقة الشمسية لاتكون كافية على تلبية الطلب ورفع درجة حرارة الخزين الى درجات حرارة عالية وهذا يعني ان درجة الحرارة المطلوبة والمرضية في حاويات تخزين المياه تكون عاملا مساعدا قي الغالب لرفع كفاءة النقل الحراري. ان ادنى درجة حمل لدرجات الحرارة الداخلة الى الخزانات التي تحتوي على المياه تكون حوالي (٤٥ – ٥٠ درجة مئوية) للتسخين الشمسي من خلال المشعات المنتشرة على السطح. وكذلك المسخنات بالحمل الحراري فقط عند درجة حرارة (٢٥ – ٣٠ درجة مئوية) لانظمة التسخين في خزانات السطوح المليئة بالمياه لتسخينها المعتمد على الهواء وانظمة قنوات التهوية. ما يخص توفير الماء الحار لعائلة واحدة باستخدام انظمة الطاقة الشمسية مع بضع امتار مكعبة من المياه في المجمع الخاص به (١ م^3 في الاجواء المشمسة و ٣– ٥ م^3 في المناطق الاقل تعرضا لضوء الشمس) وقد يكون هناك حاجة الى خزانات اكبر اذا ما تم توقع ان تكون الايام المتعاقبة فيها امتصاص الطاقة الشمسية صفر.. مثلاً:– من اجل الحصول على ماء ساخن وتكون انظمة الطاقة الشمسية ذات العلاقة

بالجو ومتطلبات التخزين للمياه يمكن ان تكون ضرورية جدا لتلبية الحاجة في جميع الأوقات وان اشعة الطاقة الشمسية اذا ما تم التحميل في معظم الأوقات مع وجود بعض التغيرات وحسب المواسم والأجواء. في غالبية انظمة التجميع الخاصة بالطاقة الشمسية تهدف الى توفير كل من الماء الساخن والتدفئة لعائلة واحدة تسكن بشكل مناسب في مكان مناسب وبحجم بناية تكفي العائلة والتي تعتمد على الحصول على الماء الساخن من خلال الطاقة الشمسية والطرق الاعتيادية. هذه هي نتيجة المبادلة الاقتصادية بسبب التقليص السريع في الحصول على الطاقة الشمسية من خلال اجهزة او حاويات التجميع مع تزايد التغطية أي الطاقة المجهزة من خلال اخر متر مكعب من الماء المخزون في الحاويات الخاصة والمضافة الى النظام حيث اصبحت صغيرة كلما زادت منطقة التجميع الكلية. في طبيعة الحال ان المكتسب الحراري سيكون كثيرا مع زيادة التخزين لمنطقة التجميع الثابتة وذات الحجم المناسب. الشكل (٢–٣) يوضح منحني الكفاية لحاوية تجميع الطاقة الشمسية مصنوع من المعدن حيث ان درجات الحرارة تختلف بين معدل درجة حرارة السائل الناقل الذي يقوم بالعمل على التبادل الحراري بين الحاوية الخاصة بخزن الماء ومحيطه. ان المنحنى يعتمد على ابعاد خزانات المياه سعة ٨٠٠ م^{3}من الماء والفرق بدرجات الحرارة بين الخزان ومحيطه بحيث تكون زواية سقوط الاشعاع الشمسي اقل من ٣٠ درجة.



شكل (٢–٣): يمثل كفاءة التبادل الحراري كدالة لفرق درجات الحرارة.

لهذا السبب فان العديد من انظمة التسخين الموجودة على السطوح والتي تستخدم الطاقة الشمسية فانها تمتلك خزين يومي كافي من الماء الساخن ومن اجل تجنب الغليان عندما يكون مستوى اشعاع الطاقة الشمسية عالية في النهار فعليه ينبغي ايقاف تدوير الخزان باتجاه الشمس خصوصا عندما تكون درجة حرارة ماء الخزان قد تجاوزت ٨٠ درجة مئوية وهذا بسبب ايقاف تدوير ماء الخزان بحيث تكون فترة تسخين الماء اكبر من فترة استهلاكه. يمكن القول هنا انه لا توجد مشاكل او معوقات بالنسبة الى حاويات واماكن خزن المياه البسيطة ذات الطبقة الواحدة المزججة او المصقولة وتكون عناصر الامتصاص مصبوغة بالصبغ الاسود ولكن المشكلة مع خزانات ذوات الطبقات المتعددة المغطاة او ذوات سطوح مطلية فان درجات الحرارة في الغالب تكون عالية جدا وبناء على ذلك تصبح مادة الخزانات تالفة ومعرضة جدا الى الاضرار اذا ما سمحت لها تلك الظروف. وبدلا من ذلك فان حجم الخزين قد يزيد الى قيمة معينة بحيث يستمر تدوير ماء الخزان من خلال وجود خزانات عديدة للماء والتي يمكن المحافظة عليها خلال الايام المشمسه دون اجراء خروقات في متطلبات درجات حرارة الخزين للحد الاقصى في اي وقت خلال السنة. اذا كانت مجمعات المياه المخزونة كافية بحيث يكون لها مكسب صافي فوق درجة حرارة (١٠٠) درجة مئوية كما هو الحال والمعروض في الشكل رقم (٢–٣)، ان هذا الكسب الحراري يجب ان يتوازن بواسطة الفقدان الحراري القسري من الانابيب ومن الماء المخزون نفسه. او قد يكون الخزين كبيرا الى درجة الكفاية لزيادة السعة الحرارية خلال فترات النهار وتكون اكثر تاثيرا بحيث يكون مقبولاً من الناحية العملية. اما في المناطق ذات المناخ الحار القريبة من خطوط العرض يمكن تحقيق ذلك مع خزين قليل من المياه اقل من بضع امتار مكعبة واما بالنسبة الى مناطق الجمع يصل الى حوالي ٥٠م^{3}. ان الكميات الكبيرة من الخزين قد تكون مفيدة اذا كانت ايام الشتاء مشمسة، ولكن بعض الايام المتعاقبة لاشعاعات الطاقة الشمسية الضئيلة قد تحدث من فترة لاخرى.

جدول (٢-٢): درجة حرارة تغير الطور ونقطة التحول لبعض المواد

المادة	تغير الطور	نقطة التحول C^o	حرارة التغير cal/g
الماء	سائل – غاز	١٠٠	٥٤٠
كلوريد البريليوم	صلب– سائل	٥٤٧	٣١٠
فلوريد الصوديوم	صلب – سائل	٩٩٢	١٦٨
كلوريد الصوديوم	صلب – سائل	٨٠٣	١٢٣
هيدروكسيد الليثيوم	صلب– سائل	٤٦٢	١٠٣
نترات الليثيوم	صلب – سائل	٢٦٤	٨٨
كلوريد البوتاسيوم	صلب– سائل	٧٧٦	٨٢
أوكسيد البورون	صلب – سائل	٤٤٩	٧٦
كلوريد الألمنيوم	صلب – سائل	١٩٠	٦٣
كلوريد الحديد	صلب – سائل	٣٠٦	٦٢
هيدروكسيد الصوديوم	صلب – سائل	٣١٨	٤٠
حامض الهيبوفوسفوريك	صلب – سائل	٢٦	٣٥
نترات البوتاسيوم	صلب – سائل	٣٣٧	٢٨
كبريتات الصوديوم عشاري الهيدروجين (ملح جلوبير)	صلب – سائل	٣٢	*٥٦
كلوريد الكالسيوم	صلب – سائل	٣٠	*٤١

٢-٦: منظومات الخزن المشترك (Community storage systems)

مع زيادة حجم حاويات خزن المياه فان فقدان الحراره من خلال السطح – لسمك عزل محدد– سوف يؤدي الى خفض مقدار وحدة الحراره المخزونه. هناك حالتين يمكن الاشارة اليهما اعتمادا على الوسط المحيط بالحاوية (الهواء، التربة وغيرها).

أ– حالة حاوية الخزن المحاطة بالهواء.

قد تكون الحاوية اسطوانية كما موضح في الشكل (٢−٢) حيث ان معدل فقدان الحرارة يتناسب مع مساحة سطح الحاوية و الفرق بدرجات الحرارة بين الداخل والخارج فان ثابت التناسب يرمز له (k) ويمكن التعبير عنه بالصيغة الاتية:−

$$k=1/(x/\lambda + \mu)_r \qquad \dots (4-2)$$

حيث ان (x) يمثل سمك العازل، وان λ يمثل الموصلية الحرارية للمادة العازلة (حوالي ٠،٠٤ صوف غير عضوي)، وان μ تساوي حوالي 0، ($1m^2w^{-1}$) ويحسب المعدل الكلي للحرارة المفقودة بالمعادلة الاتية:−

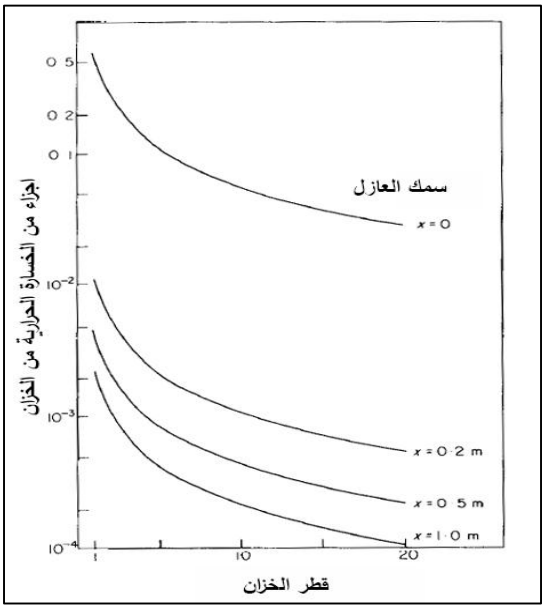
$$P^{loss} = 2\pi R\,(R+L)\,k\,(T_s - T_a) \qquad \dots (5-2)$$

ان R يمثل نصف القطر و L يمثل ارتفاع الاسطوانه (T_s) يمثل معدل الحرارة للماء الموجود في الخزان وان (T_a) هي درجة حرارة المحيط الخارجي. ان جزء الحرارة المفقودة لوحدة الزمن بحسب بالمعادلة الاتية:−

$$\frac{P_{loss}}{E_{sens}} = \frac{2k(1+R/L)}{RC_p\,\rho^{water}} \qquad \dots (6-2)$$

ان فقدان الحرارة لايعتمد على درجات الحرارة بل على الفرق بين درجات الحرارة ويتناسب عكسيا مع ابعاد المنظومة، سعة الحرارة النوعية (C_p) والكثافة (ρ)، حيث ان الشكل (٢−٢) يوضح $L = 3R$، نسبة معدل الحرارة المفقودة (P^{loss}) والطاقة المخزونة (E^{sens}) طبقا الى المعادلةفي (٢−٥) كدالة لسمك العزل و نصف القطر(R). ان حجم الخزانات الخاصة بالمجمعات قد تخدم وتفيد الاستخدام الجماعي لفترة اطول مع كميات مناسبة من العوازل. خزان الماء الساخن مع ($R=11.5m$ & $L= 32$) قد تم استخدامه منذ عام ١٩٧٨ الخاص بانتاج الكهرباء. ان مخزون الماء الساخن يستطيع توفير جميع الحرارة الضرورية خلال ساعات الاوج (الحاجة القصوى) في فصل الشتاء لانتاج الطاقة الكهربائية والتي تحاول كافة الشركات المنتجة زيادة قدرات الطاقة الكهربائية الى ابعد حد ممكن من الانتاج. عندما تكون سعة خزانات الماء الساخن كبيرة بدرجة معقولة فان وحدات تشغيل الطاقة ذات التوليد المركب بامكانها تلبية طلبات الطاقة الكهربائية المطلوبة والتي تكون اقل من الطلب الى الحرارة خلال ليالي الشتاء الباردة. اما الخزانات الخاصة بخزن المياه من الدرجة المعتدلة والتي تتراوح سعتها حوالي (١٣٠٠٠م^3) قد تخدم نظام الاستخدام الجماعي للطاقة الشمسية لاكثر من (٥٠−١٠٠) عائلة مرتبطة مع منشات

التخزين المشترك – العام من خلال خطوط التسخين المحلية داخل المناطق والمدن. وقد تكون مجمعات الطاقة الشمسية موجودة اعلى سقوف المنازل الاعتيادية للافراد او قد تكون مرتبطة بالخزان. في المسالة الاولى يتطلب الامر المزيد من العمل والانابيب وادوات النصب والبناء ولكن في الحالة الثانية يتطلب فقط الربط من الخزان الرئيس او المركزي، هذا من جانب ومن جانب اخر فان عامل الاداء ونوع الاداء كذلك يختلف في النظام الاول والثاني طالما ان التغطية بالطاقة الشمسية اقل من نسبة ١٠٠% وان مصدر الحرارة الثانوي يغذي خطوط التسخين للمنطقة او المدينة. ان سبب كون درجات التسخين اقل من الحد الادنى المطلوب هو ان مجمع الطاقة الشمسية المركزية تقدم اقصى ما لديها من كفاءة ولا توجد طاقات اضافية بموجب الوضع الحالي كي تزيد من الطاقة المطلوبة.



شكل (٢–٤): يبن فقدان الحرارة الجزئية من خزان الماء الاسطواني مع درجات مختلفة من العزل على افتراض حالات الخلط الجيد في الداخل والخارج للخزان.

الشكل (٢–٤) يمثل منحني الكفاءة لجامع الطاقة الشمسية المسطح كدالة لاختلاف معدل درجات حرارة مائع الناقل للحرارة من الجامع وحرارة هواء المحيط الخارجي. الكفاءة هي نسبة مئوية للاشعاع الحراري الممتص الذي ينتقل الى المائع. المنحني مبني على قياسات لسطح مجمع مختار لدرجات الحرارة ٤٥ درجة مئوية واشعاع شمسي مستلم مقداره ٨٠٠ WM^{-1}.

بينما تكون مجمعات الطاقة الشمسية التي تزود الافراد تكون اكبر حيث تستلم من مصدر الحرارة – التسخين – الاضافي او المساعد. وبديلا عن ذلك فان الحرارة المساعدة او الثانوية يستوجب اضافتها من قبل الفرد الى اعمال النصب والتاسيسات الخاصة به لزيادة الاحمال في النظام مالم تكون توليد التسخين الاضافي مربوطة بتوليد الطاقة الكهربائية وتكون هذه الحالة غير ملائمة اذا لا تمتلك المجمعات السكنية نظام التسخين الذي يعتمد على الوقود. معظم تخمينات التكاليف تتحدث بعيدا عن الحاويات الخاصة المستخدمة بالخزن (خزن الماء بالحاويات الموضوعة في الهواء الطلق). واذا كانت الخزانات او الحاويات مدفونة تحت الارض (مع ملامسة اعلى الخزان للسطح والجو) فان الحرارة تتسرب من سطح الحاوية التي لا تختلط بسرعة مع التربة او الصخور المحيطة. وبدلا من ذلك فان المناطق القريبة من الحاوية سوف تصل درجات الحرارة الى نسبة عالية وتنحدر نحو التربة والصخور بشكل بطيء. هناك استثناء في التربة التي فيها تسريب او ترشيح للمياة الارضية. هنا يقوم الماء المتحرك بمساعدة خلط الحرارة مع مياه الارض ثم تفقد الحرارة من الخزان وتتقلص تدريجيا وتعمل الصخور والتربة المحاطة بها بوظيفة تمديد حجم الخزين. مثلا:– لناخذ خزان مياه بشكل كروي مطمور ومحاط بشكل محكم بتربة متجانسة. ان نصف قطر الخزان يشير الى (R_t) اذ درجة حرارة الماء (T_s) ودرجة حرارة التربة تكون بعيدة من خزان الماء (T_o). اذا كان نقل الحرارة موصوفة بالمعادلة المنتشرة فان الحرارة الموزعة كدالة للمسافة من مركز حاوية الخزن والتي يمكن كتابة المعادلة كالاتي:–

$$T_r = T_o + (T_s - T_o)\, R/r \qquad \dots (7-2)$$

قد تكون المسافة (r) من المركز اكبر من نصف قطر الخزان (R) من اجل صلاحية التعبير وصحته. هنا يكون فقدان الحرارة كالاتي (المعادلة ٢–٨) حيث المسافة r من المركزيجب ان تكون اكبر من نصف قطر الصهريج R حتى يكون التعبير حقيقيا. وفقد الحرارة المماثل

$$rdA = -\lambda\ (T^s - T_.)\ 4\,\pi\,R\,r \qquad \dots (8-2)$$

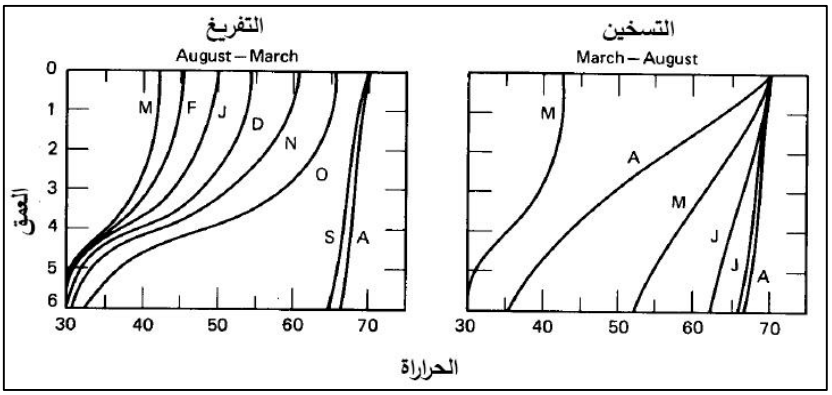
$$\rho_{series} = \int_{sphere} \lambda\, \partial T_{(r)} / \partial r dn = -\lambda (T_s - T_a) 4\pi R$$

حيث λ هي موصلية الحرارة للتربة و (٢–٨) يعطي تدفق الحرارة خارج اي مدار حول الخزن بنصف قطر $r > R$. التدفق مستقل من r. الفقد النسبي للحرارة المخزونة في الصهريج تحسب كما في المعادلة (٢– ٩)

$$P_{loss} / E_{sens} = -\lambda (R^2 C_{P\ water}\ \rho_{water}) \quad \ldots (9\text{–}2)$$

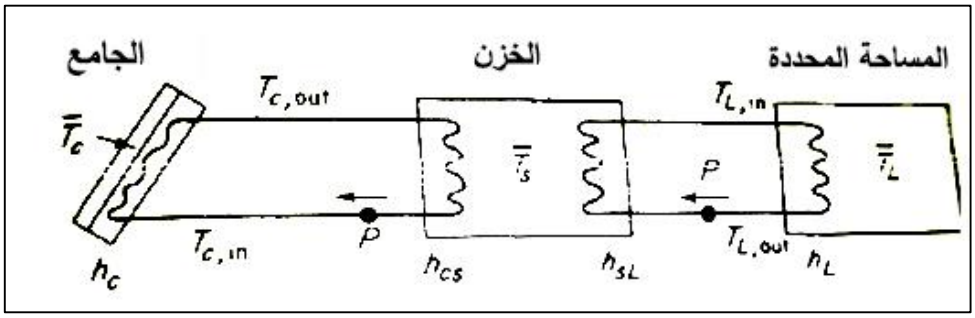
توصي الاعتبارات العلمية في بناء الخزانات مياه تحت الارض او جزئياً تحت الارض شكل مقلوب ومخروطي (او نصب عمودي) وعمق حوالي ١٠م لـ ٢٠٠٠٠م^3 من حجم الخزن. يوصف النصب العمودي بجوانب مائلة بميلان انحداري ملائما لنوع التربة المواجهة. ففي الوقت الذي تكون (λ) حرارة الواصلة للتربة وان المعادلة (٢–٧) تعطي سريان الحرارة من الفضاء والاجواء الموجودة بالقرب منه والمحيطة به (حول الخزان) فان الجريان لا يعتمد على (r) والخسارة النسبية للحرارة المخزونة في الخزان نفسه هو حسب المعادلة رقم (٢–٨). ان مقارنة معادلة (٢–٨) الى معادلة (٢–٦) يبدو ان فقدان نسبي للحرارة من الخزان المدفون في الارض تنخفض بشكل سريع مع زيادة حجم الخزن اكثر من فقدان الحرارة من خزان الماء في الهواء الطلق او الخزان المغلف عالي الجودة. ان الفقدان الجزئي تكون (R^{-2}) بدلا من (R^{-1}). ان الاعتبارات العملية تقضي الى ان يكون بناء الخزانات تحت الارض او جزئيا تحت الارض بالنسبة الى خزانات حفظ المياه توحي الى شكل الدائرة المقلوبة وعمق حوالي (١٠ متر) لحجم تخزين (٢٠٠٠٠ م^3). ان الدائرة تتصف بالجوانب المائلة مع انحدارات معقولة في ملاقات نوع التربة المحيطة به. ان اعلى نقطة في النصب(نهاية اكبر منطقة او اوسع مكان) سوف يكون في مستوى الارض مصنوع من اجزاء أساسية من الصوف المعدني كعازل بين الارض والانابيب الواصلة وان الجوانب والقاعدة محشى او محاط برقائق معدنية وبلاستيكية لايمكن للماء اختراقه. يمكن ان يكون العازل في السطح العلوي من خزان الماء مصنوع من رغوة عائمة، فاذا كانت مادة الرغوة غير نافذة اي لا يخترقها شئ فان في هذه الحالة يمكن تجنب نمو الطحالب في المياه. ويمكن وضع اتجاه السطح الخارجي للخزان مواجها لاشعة الشمس. يتم تزويد الحرارة لبناية مكتب معين لمنطقة ارضية بحدود (٥٠٠م^2). هناك نظام آخر للخزن في مدن عديدة تقوم بتقديم الخدمات الى (٥٥) دار بحيث تصل مجموع مجمعات الطاقة الشمسية للصحن المستوى او اللوحات المعروضة حوالي (٢٦٠٠م^2) لامتصاص الطاقة الشمسية موضوعة في اعلى سقوف المنازل. ان الخزين حوالي (١٠٠٠٠م^3) عشرة الاف

متر مكعب وموضوع في تربة صخرية. كلا النظامين يعملان منذ اكثر من ثلاثين سنة ويوفران نسبة كبيرة من الطاقة ويلبيان حاجة السكان.



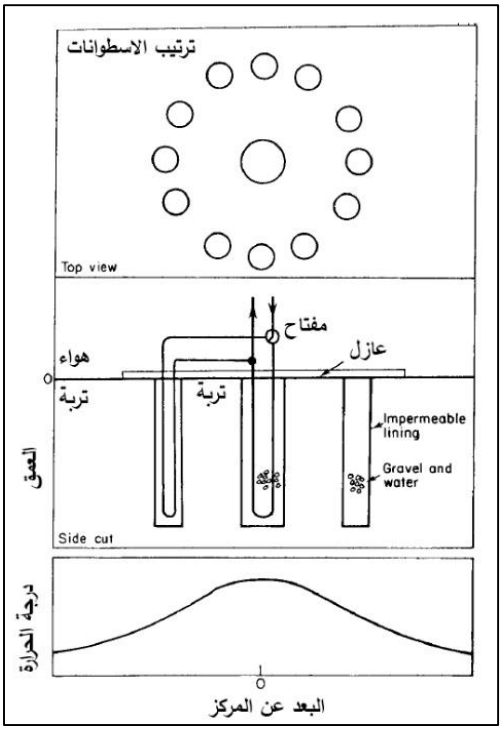
شكل (٢–٥): يمثل تغير درجات الحرارة خلال فصول السنة.

اذا جعلنا عامل الوقت ثانويا فان التكامل العددي سوف يضيف معلومات حول الوقت المطلوب للوصول الى حالة الثبات والاستقرار. ان افتراض ثبوت درجات الحرارة ثابتة ومستقرة في جميع خزان حفظ الماء قد لا يكون فعال ومؤثر وبشكل خاص في الخزانات الكبيرة بسبب المطابقة الطبيعية بحيث يكون الماء باردا في جميع مناطق الخزان. ان الخلط الاصطناعي من خلال العامل الميكانيكي قابل للتطبيق في مثل هذه الحالات ولكن يفضل ان تكون لطبقات حرارية عديدة تخلط في ان واحد. تستخدم هذه الحالة للاستفادة من خزانات حفظ المياه في منظومة التسخين في مجمعات الطاقة الشمسية كما في شكل (٢–٦).



شكل (٢–٦): يمثل نظام التسخين الشمسي مع خزن الطاقة و**H** يمثل مبادل حراري ، **P** مضخة دفع،**T**مقياس درجة الحرارة.

يغذى المجمع الشمسي بالماء البارد من الجزء السفلي من خزان المنظومة وبذلك تؤدي هذه الحالة الى تحسين الفاعلية والكفاءة الخاص بالمجمع الخاص بالطاقة الشمسية حيث ان (الشكل٢-٦) يوضح نظام التسخين الشمسي والخزن في درجات الحرارة المختلفة لعموم خزانات الماء الحار المستخدمة في العديد من بلدان العالم وخصوصا في المدن الباردة. ويكون هناك بديل وهو تقسيم الخزانات الى وحدات مفصولة ماديا، وهذا يتطلب نظام سيطرة محكمة من اجل ادخال وازالة الحرارة من الوحدات المختلفة بطريقة مثالية، واذا كانت هناك ضرورة لوضع العوازل في هذه الخزانات فهذا يتطلب وضع الوحدات المنفصلة ضمن الحدود العامة (مع السماح بتسريب ونقل بعض الحرارة الى المنطقة ما بين الوحدات) من اجل الاستبقاء على متطلبات العزل الكلي الى الاسفل. اما ما يخص انظمة التخزين للوحدات المتعددة قد تكون اكثر ملائمة في او على الارض استنادا الى مشاركة التربة ومساهمتها ووضعها بين الوحدات الخاصة بالخزن. الشكل (٢-٧) خزانات التسخين غير المعزولة في التربة مستندة على ترتيبات فتحات او حفر اسطوانية.



شكل (٢-٧): يمثل خزان حراري غير معزول في التربة مبني على فتحات دائرية.

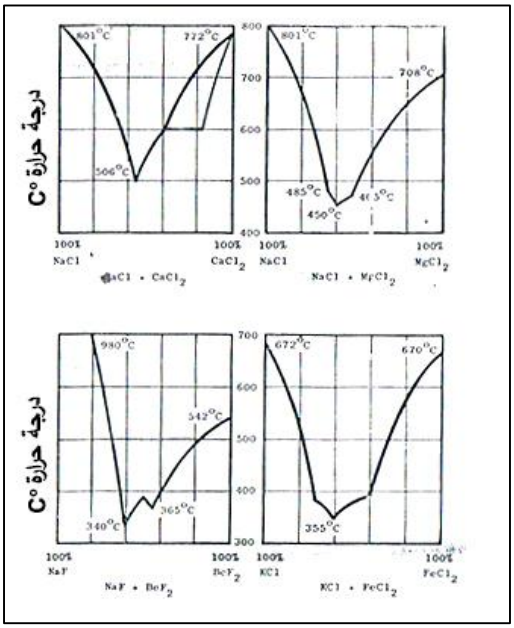
ان الشكل(٢–٧) يمثل خزانات تسخين غير معزولة موضوعة في التربة مستنده على قنوات او حفر أسطوانية محفورة باستخدام مثقاب المياه المتدفقة. ان استخدام مواد ومستلزمات اخرى مثل الحصى والصخور او التربة يمكن اخذها بنظر الاعتبار من انظمة التسخين في درجات حرارة مشابهه الى الماء. وبالرغم من محددات الحجم للتطبيق العملي كما في الشكل (٢ – ٣) (اعتمادا على الحجم الفارغ) فان هذه المواد قد تكون اكثر ملائمة من الماء لبعض التطبيقات الخاصة بهذه الانظمة. ان المشاكل الاساسية هي تاسيس وانشاء سطح ناقل للحرارة لدرجات حرارية مناسبة لنقل الطاقة من والى الخزانات. لهذا السبب تستخدم في اغلب الاحيان خزانات الحصى والصخور مع الهواء وبكميات كبيرة من خلال ضغطها وتسريبها في المواد كسائل ناقل للحرارة. من اجل الاستخدامات والتطبيقات في مديات درجات الحرارة الاخرى فان مثل تلك المواد تكون مفضلة. وكمثال على ذلك يكون الحديد (او نفاياته) تكون مناسبة لرفع درجات الحرارة الى مئات الدرجات المئوية.اضافة الى ان المواد ذات الاساس الصخري تكون سعتها الحرارية مختلفة وغير محددة وليس لها نقطة غليان ثابتة.

٢–٧: الخزن بالصهاريج (Storage tanks)

٢–٧–١: انصهار الملح (Salt eutectics)

يوفر انصهار الملح الصخري قابلية تخفيض درجات الحرارة لمرحلة التغيير تحت نقاط الاذابة العادية لاي من المركبات التي تشكل المزيج. يستخدم مصطلح (**eutectics** يوتكتك)، عموماً لوصف خليط كيميائي ذي سلوك حراري، و يشير المصطلح الى ذلك المزيج الخاص الذي تكون فيه نقطة الاذابة هي الادنى. بعض نقاط الاذابة الواطئة مفيدة كوسط لنقل الحرارة. ان علاقات خواص الخليط – الحرارة لانصهارين هي كما في الشكل(٢–٨). حيث ان درجة الحرارة الواطئة هي دالة حادة لبنية الخليط حول درجة حرارة الاندماج (او اذابة). ان بيانات الانتشار الحراري للخليط عند نقاط انصهارها يكون من الصعب الحصول عليها وليست لدينا القيم لاقتباس هذين الخليطين ذات مكونات بأوزان ذرية منخفضة. معظم المواد ذات درجات حرارة اندماج (او اذابة) عالية هي مواد غالية الثمن كمكونات البيوليوم والليثيوم. ان الاعتماد على المواد الرخيصة ذات درجات حرارة اندماج عالية واخرى ذات درجات حرارة اندماج واطئة يؤدي الى وجود قليل من المرشحات. المواد الشائعة كهيدروكسيد الصوديوم ($NaOH$) او نترات البوتاسيوم (KNO_3)

لديها اندماج حراري معتدل لكن خاصية معالجتها الكيميائية ضعيفة. ان انصهار كلوريد الالمنيوم ($Al_2 Cl_6$) مع الملح الشائع كلوريد الصوديوم (Nacl) يبدو كمرشح مقبول ما عدا ان كلوريد الالمنيوم تطايري (سريع الانتشار) ومتسامي. ان وضع كلوريد الالمنيوم في كبسولة سيتغلب على مشكلة التطاير (التبخر) ولكن بنفس الوقت ستزداد كلفة الانتاج.

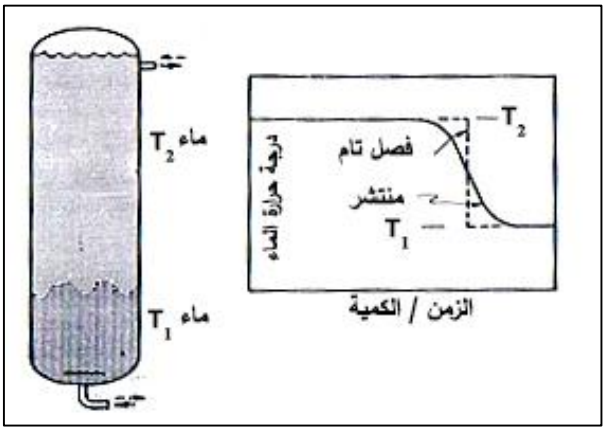


طاقتين عاليتين من خليط اتيتوك (eutectic) لتطبيقات درجات الحرارة

شكل (٢–٨): يمثل خليط من مادتين، سريعتي الانصهار.

٢–٧–٢: صهريج المائع الحراري (Zoned thermal fluid tank)

في أنظمة الخزن الحرارية الصغيرة (محددة الحجم) يمكن الاستفادة من استخدام صهريج واحد لخزن الماء الساخن والبارد، ويكون ذلك على اساس مبدأ فصل مكونات السوائل ذات الكثافة المختلفة، يكون الماء الحار ذو كثافة أوطأ من الماء البارد. الشكل (٢–٩) يمثل صهريج الخزن الحراري الامثل لهذا النوع. ان متطلبات الاداء الجيد هو بحقن الماء البارد اسفل الصهريج وليس بمزجه ديناميكياً (حركياً) بالماء الساخن الذي يشغل الحجم الاعلى للخزان، المطلب الثاني ان يكون وقت دورة الخزن قصيراً بما يكفي لمنع التذبذب الحراري للماء البارد صعوده الى منطقة الماء الساخن في اعلى الخزان.

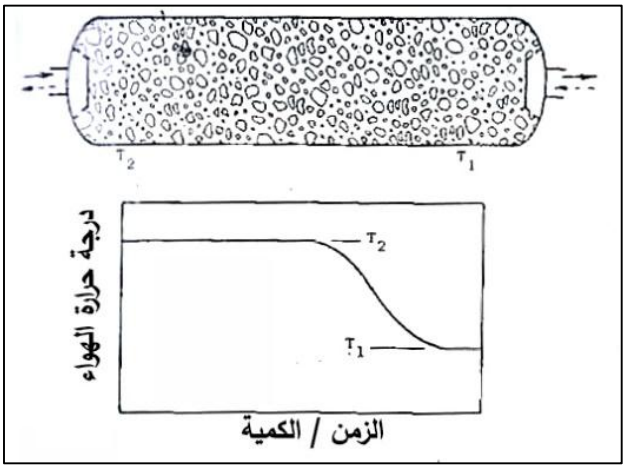


شكل (٢–٩): يمثل خزان حراري اسطواني.

الشكل (٢–٩) يمثل العلاقة بين درجة الحرارة والزمن. اذا كان الفصل مثالياً سيكون الماء المتدفق بدرجة حرارة ثابتة T_2 حتى انسحاب كل الماء الحار. في الحقيقة ان درجة حرارة الماء ستبقى ثابتة لبعض الوقت ثم تنخفض كلما تقترب السطوح البينية من بعضها كما مؤشر في المنحني بكلمة ينتشر (**diffuse**).

٢–٧–٣: صهريج الخزن الحراري الصخري (Rock thermal storage tank)

من الممكن خزن الحرارة من خلال تسخين الهواء في صندوق خزن عمودي او افقي حيث يمكن اهمال فعل الجاذبية في هذه الحالة. الصندوق الافقي مبين في الشكل (٢–١٠) ويلاحظ اننقال الهواء الحار الى الصخور، تاركاً الصهريج بارداً. وعندما تكون قابلية الصهريج واسعة في خزن الحرارة حينئذ يكون التجانس الحراري للهواء المخزون ثابتا وبنفس درجة حرارة الهواء الداخل للصهريج وعندما يسخن الهواء المخزون فسينعكس اتجاه التدفق. وسيقوم الهواء البارد بسحب الحرارة من الصخور ونقله الى الخزان عند درجة حرارة الخزن كما في الشكل (٢–١٠) والذي يمثل العلاقة لقابلية خزن الحرارة بفعل الهواء داخل الصهريج.



شكل (٢-١٠): يمثل صهريج الخزن الحراري الصخري.

من المناسب ان تكون حجوم الصخور داخل الخزان متقاربة وتتراوح من انج وثلاث انجات للتغلب على ظاهرة الرزم اثناء التعبئة، ومما يذكر ان الصخور صغيرة الحجم ستحتاج الى وقت اكبر لملء الصندوق او تفريغه وتؤثر سلبا في عملية نقل الحرارة. عند استخدام صندوق مملوء بقناني ماء والذي يعطي صورة او فكرة نقل الحرارة بدرجة معينة حيث ان المسافات البينية بين قناني الماء ستسمح للهواء التدفق خلالها وبذلك تسهيل عملية نقل الحرارة بين ماء القناني والهواء المحيط بها كما في الشكل (٢-١١). يسمح صندوق قناني الماء البارد بمضاعفة الخزن الحراري مع المحافظة على قيم. C،P (السعة الحرارية والضغط).

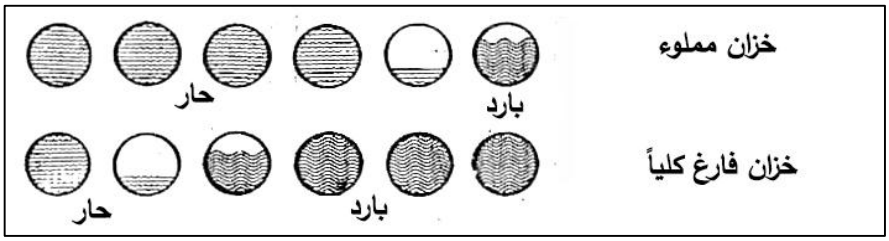
٢-٧-٤: صهريج الخزن الحراري (Thermal storage tank farm)

بالمقارنة مع فقرة خزن سائل نقل الحرارة ذو الصهريج المنفرد المذكور سابقا، يسمح هذا النوع من الصهاريج بأن يكون وسطا لفصل السوائل الساخنة عن الباردة. في هذه الحالة، أحد الصهاريج تكون فارغة للسماح بتبريد السوائل. حيث يسحب السائل الساخن من أحد الصهاريج ويتم معاملته خلال النظام المستخدم. يضخ السائل المبرد إلى الصهريج الفارغ، عندما يمتلئ ذلك الصهريج بالسائل المبرد فان الصهريج المهيأ لاستقبال السائل الساخن يكون فارغا بالاساس ليكون مستعدا لاستقبال السائل البارد القادم من الصهريج الجديد عند استخدام صهريجين فقط فأن كفاءة النقل الحراري ليست جيدة لأن نصف الخزانات تكون فارغة وبذلك تنخفض قابلية الخزان الى النصف في كل الأوقات. في هكذا موقف فمن الأفضل السماح لبعض التطاير (الفقدان) واستخدام

ممر الصهريج الواحد. إذا كان حقل الصهريج لديه عدد في الصهاريج، n، فان عامل الانتفاع يقترب من الواحد لأن:

$$k = (n-1)/n. \quad \ldots (10-2)$$

يظهر في الشكل (٢-١١) تخطيط إدارة حقل صهريج الخزن الحراري. تمثل موجات اللون الخفيف الماء الحار والألوان الداكنة الماء المبرد.



شكل (٢-١١): ترتيب صهاريج التخزين الحرارية تتطلب ان يكون صهريجا فارغا.

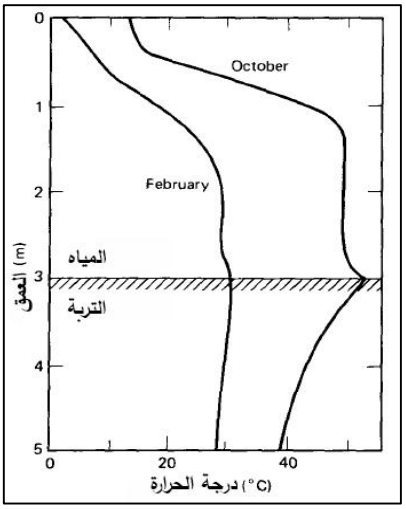
الصهريج يوفر الإدارة الجيدة لنظام طاقة شمسية كبيرة ذو انتفاعية جيدة وتوسع قابلية الخزن مع الوقت، بما تسمح به كلف الانتاج وبما يقلل توفير مصدر حفظ الحرارة العادي.

٢-٨: برك الطاقة الشمسية (Solar ponds storage)

ان بركة الطاقة الشمسية طبيعية كانت ام اصطناعية هي شبيهة بالانظمة السابقة ولكن سطح ماء البركة يعرض الى الاشعاعات الشمسية وعملها يشبه مجمع الطاقة الشمسية. ومن اجل بلوغ عمليتي الجمع والخزن في نفس الوسط يتوجب ان تكون الطبقات من الاعلى الى الاسفل (مقسمة الى طبقات وبشكل معكوس) اي تكون الطبقة الابرد في الاعلى والطبقة الساخنة في الاسفل، وهذا يعني ان المصعد الحراري معكوس الاتجاه اما بالوسائل المادية – الطبيعية مثل وضع حوا جز افقية من مواد بلاستيكية من اجل فصل الطبقات او ايجاد كثافة منحدرة (متدرجة) في البركة والتي بدورها تقوم قوى الجاذبية للتغلب على قوى الطفو. يمكن اجراء ذلك من خلال اضافة بعض الاملاح الى البركة والاستفادة من الكثافة العالية للمياه الاكثر ملوحة. كمثال على البركة الخاصة بالطاقة الشمسية يمكن أنشاء بركة على شكل مسلة بحجم (٥٢٠٠ م^3) وبعمق حوالي (٣ متر) والجزء العلوي منها توجد طبقة متدرجة ملحية من كلوريد الصوديوم(NaCl) تتباين من 0% في اعلى البركة الى ١٨،٥% عند ١،٥ متر عمق. ان الطبقة المنحدرة تعمل على نقل الحرارة الى الاعلى وتعمل بوظيفة عازل في الطرف الاعلى دون اعاقة اشعة الطاقة الشمسية. ان الطبقة السفلى –

القاع – لها تركيز املاح ثابتة بدرجة (١٨،٥%) والتي تحتوي على مبادلات التسخين لنقل الطاقة. في هذه الطبقة قد يحدث نقل الحمل الحراري دون اية مشاكل وان معظم حالات امتصاص الاشعاع الناتجة من مخزون الطاقة الشمسية تحدث في السطح السفلي (هذا هو السبب الذي يشير الى ان البركة لابد ان تكون ضحلة) وان الحرارة تطلق الى طبقة الحمل الحراري. في اعلى السطح هناك بعض حالات الامتصاص للطاقة الشمسية والاشعة تحت الحمراء. والتي قد تدمر تدرج درجات الحرارة كما في الشكل (٢–١٢) يبين نقل الحمل الحراري لبركة في منطقة باردة (مدن الشمال) خلال فترة التحميل الاولية (دون ربط التحميل). منذ بداية التشغيل في نهاية شهر اب فقد تم الحصول على اعلى درجات الحرارة مع بداية شهر تشرين الاول وبعدها تتناقص الى حدودها الدنيا في شهر شباط كما موضحة في الشكل (٢–١٢). ان قياس درجة الحرارة في جوف الارض تكون اقل من درجة حرارة البركة. في شهر تشرين الاول تكون اضطرابات الطبقة العليا ملحوظة ولكن في شهر شباط تكون غائبة بسبب تغطية الثلوج لسطح البركة لذا ان المعالجة العددية للخزين الكلي لبركة الطاقة الشمسية قد يكون في تزامن وقتي واحد او بشكل تقريبي بحيث يكون اشعاع الطاقة الشمسية ودرجة الحرارة البركة يكونان دالة لزاوية الزمن مع السعة والطور كمعياريمكن تحديدها. هذه تقديرات تقريبية جيدة بسبب الاستجابة البطيئة للخزان الموسمي الكبير والذي يبدو ان يكون دون احساس ملموس غير متاثر للتقلبات السريعة للاشعاعات اوظروف الطقس. عند سحب الحرارة من الخزان لابد ان يتم قياس درجة حرارة البركة بحيث لم يحدث نقل الحمل الحراري وبشكل خاص في ايام الشتاء حيث الماء بارد وتكون كمية استخراج الحرارة من البركة كبيرة. ان سحب حرارة البركة يمكن ان يتم باشكال واساليب متعددة ويمكن معرفتها من خلال زوايا الجيب واذا كانت هيئة درجة الميل لبقية البركة مستقرة فان مثل هذه الحسابات سوف تعطي نتائج حقيقية على مدى واسع فمثلا في مدن الشرق الاوسط تكون بركة توليد الطاقة الشمسية تعمل لتوليد الطاقة الكهربائية من خلال استخدام محركات دوران مع سوائل نقل حرارة كي تكون قادرة على قبول اختلافات في درجات الحرارة القليلة والمتوفرة في الموقع. عليه يجب قبول موضوع فاعلية وكفاءة الداينميكية الحرارية الواطئة. في حقيقة الامرقد تستطيع المياه الجوفية الموجودة في التكوينات الجيولوجية (كالحصى والصخور) على خزن الحرارة بداخلها وبالتالي يتم التبادل الحراري مع الانظمة المحيطة بالمياه الجوفية من خلال عمليات ربط تلك الانظمة مع بعض او الانتشار. في مثل هكذا

حالات يتم تقدير ان كفاءة وفاعلية الدوران العالية والتي تكون عند(٨٥%) ودرجة حرارة مرتفعة تصل الى اكثر من ٢٠٠% درجة مئوية واعلى من درجات حرارة طبقات الارض، (بحيث تصبح المياه تحت ضغط عالي جدا) والتي يمكن الحصول عليها من خلال فصل النظام عن محيطه.



شكل (٢-١٢): يمثل درجات الحرارة لبركة ميلزبيرغ خلال فترة تحميلها في البداية.

٢-٩: خزن الطبقة الصخرية المائية (Aquifer storage)

الشكل (٢-١٢) يمثل نظام خزن الطبقة الصخرية المائية عند ضغط عامل ثابت تقريبا متماثل مع الضغط الهايدروليكي لمتوسط عمق الجزء المملوء بالهواء من الطبقة الجوفية المائية. طبقا للشكل (٢-١٢) فأن الطاقة المخزونة في هذه الحالة تساوي ضغط **P** مضروبا بحجم الهواء الذي يحل محل الماء في الطبقة الصخرية المائية. هذا الحجم يعادل الحجم الطبيعي**V** مضروبا بالمسامية اي بحجم الفراغ الجزئي الذي يشغله في المسامات (قد تكون هناك فجوات اضافية لا يصل اليها الهواء القادم) لذا قد تكتب الطاقة المخزونة بالشكل التالي:

$$W=PVP_{os} \quad \ldots (11-2)$$

القيم المثالية هي $P_{os}=0.2$ و **P** هي حوالي $6 \times 10^6\ Nm^{-2}$ بأعماق 600م بأحجام مفيدة 10^9 الى 10^{10} م^3 لكل موقع. تم دراسة العديد من هكذا مواقع بفكرة خزن الغاز الطبيعي. من مميزات خزن طاقة الطبقة الصخرية المائية هو الوقت اللازم للشحن والتفريغ. ويتحدد هذا الوقت بنفاذية الطبقة الصخرية المائية.

تعتبر النفاذية عامل اساسي بين سرعة تدفق السائل او الغاز خلال الراسب ومنحني الضغط المسبب للتدفق. تكتب العلاقة المفترضة بالشكل التالي:

$$\nu = -K(\eta p)^{-1}\partial P/\partial s \qquad \ldots (12-2)$$

حيث ν سرعة التدفق و s لزوجة السائل او الغاز و ρ كثافته، P الضغط، S طول المسافة، K هي النفاذية. في النظام الدولي (SI) تقاس النفاذية بوحدة دارسي Darcy وكل Darcy تعادل $1\times 10^{12}\ m^2/s$ او m^2s^{-1}. وان وحدة اللزوجة هي $m^2\,s^{-1}$. اذا كان ملىء وتفريغ خزان الطبقة الصخرية المائية يحدث بغضون ساعات يكون افضل بكثير من اجراء العملية خلال ايام لذا فان قيمة النفاذية يجب ان تفوق $m^2\ 10^{11}$. تتواجد الرواسب كالحجر الرملي بنفاذية تتراوح من 10^{10} الى $3\times10^{12}\ m^2s^{-1}$.

تحدث عدة خسائر اثناء التجهيز الفعلي: قد لا يكون لدى سقف الطبقة الصخرية منافذ تصميمية فتؤدي الى خسائر تسرب محتمل. قد يسبب الاحتكاك بالانابيب التي تتجه من والى الطبقة الصخرية المائية فسيكون هناك فقدان للضغط كما هو الفقدان في الضاغط والتربين. ممكن توقع خسائر حوالي ١٥% بالاضافة لتلك الخسائر الناجمة عن آلية نقل الطاقة.

يمكن استخراج $3.5\times10^8\ m^3$ غاز بضغط 17 MPa. ويمكن خزن الغاز بقباب ملحية مجوفة بحجم اصغر قليلا لكي يسمح بـ $4.2\times10^8\ m^3$ من الغاز ان يستخرج عند 23 MPa.

٢-١٠: الخزن بدرجات حرارة متوسطة وعالية (Medium and high temperature storage)

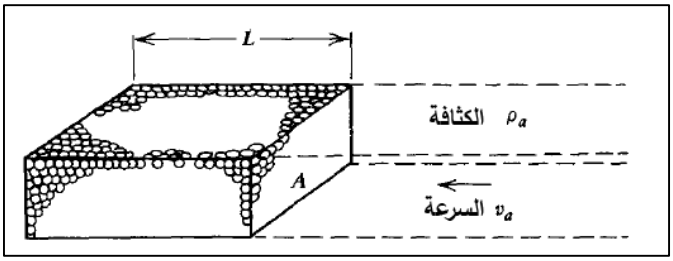
يمكن تحديد درجات الحرارة المتوسطة في العمليات الصناعية بين ١٠٠ درجة مئوية لغاية ٥٠٠ درجة مئوية، وان درجات الحرارة العالية تكون فوق ٥٠٠ درجة مئوية فاعلى. ان هذه التحديدات يمكن ربطها بعلاقة مع الخزين الحراري للطاقة، ولكن قد تكون مفيدة للمنشآت الصغيرة ذات درجات حرارة واطئة نسبيا تتراوح بين ١٠٠ درجة مئوية و٣٠٠ درجة مئوية كما سيتم توضيحها بالمناقشات التالية. ان المواد المناسبة للتخزين الحراري لابد ان تكون لها سعة حرارية كبيرة وان تكون مستقرة في الفواصل الحرارية وان تكون ملائمة لاضافة حرارة اضافية خصوصا عندما يتم سحب الحرارة من تلك المواد. ان هذه المتطلبات يمكن انجازها بطرق ووسائل مختلفة:

تمتلك هذه المواد توصلية حرارية جيدة كما هو الحال في المواد المعدنية وان تكون سهلة في نقل الحرارة بين سطوح تلك المواد وبعض الاوساط المناسبة. اذا كان الوسط الناقل للحرارة سائلاً او غازا فان بامكانه ان يمر على امتداد السطوح الناقلة بسرعة كافية لنقل الحرارة المطلوبة حتى لو كانت توصيلية السطح الناقل قليلة. فاذا تم ترتيب المواد الناقلة للحرارة بأبعاد صغيرة اذ يكون النقل الحراري على مراحل عديدة وهذه الطريقة تلائم عملية نقل الحرارة بأستخدام الهواء اذ يعتبر الهواء أقل توصيلا للحرارة من العديد من المواد المعروفة بتوصيلتها الجيدة للحرارة، وفي هذه الحالة يكون سطح المبادل واسعا وفعالا لنقل الحرارة ببطء وكمثال على ذلك نقل الحرارة من خلال الصخور والحصى والحبيبات المنتشرة. جدول (٢–٣) يبين قابلية نقل وسعات بعض المواد للحرارة. ان جميع تلك المواد ومهما كانت كمياتها تمتلك خواص حرارية وضغوط قياسية تجعل قابليتها للتسخين ونقل الحرارة جيدة وهي على العموم تكون اقل من السطوح الحبيبية والفراغات المملوءة بالهواء عند ١٠٠٠ درجة حرارة او اقل من ذلك بقليل.

جدول(٢– ٣): يبين قابلية نقل وسعات بعض المواد للحرارة.

المادة	Material	Temperature interval (°C)	Mass spec. heat (k) kg^{-1} $°C^{-1}$)	Volume spec. heat (M) m^{-3} °C)	Heat conductioity (W m^{-1} $°C^{-1}$)
الصلبة	Solids	< 800	0,92	3,0	Qb,c
كلوريد الصوديوم	Sodium chloride	< 1500	0,46	3,6	70^{c} – 34^{d}
حديد(صب)	Iron(cast)	< 1700	0, 79	3,3	$2,7^{b}$
حجر (غرانيت)	Rock(granit)		0,84	1,4	0,6
طابوق	bricks		0,79	1,0	1,0
ارض (جافة)	Earth(dry)				
سوائل	liquids				
ماء	water	0–100	4,3	4,3	
زيت (حراري)	Oil (thermal)	–50–330	3,4	1,9	0,6
صوديوم	sodium	98–880	1,3	1,3	0,1
غليكول ثنائي الاثيل	Diethylene gly col	–10–240	3,8	3,9	85^{c} – 60^{d}

ان هذه الاعتبارات تقع بعيدا عن الاساليب الخاصة بمفهوم خزن الحرارة والتي يستثنى منها المديات للمواد الخازنة الاساسية الموجودة في الجدول رقم (٢–٣). بعض تلك المواد تكون مواد صلبة ومعدنية وبهذا يكون النقل الحراري بوساطة التوصيل الحراري عبر تلك المواد. وبعض المواد الاخرى تكون كذلك صلبة وقد تكون على شكل حبيبات او صخور بحيث لديها توصيل حراري اكثر اعتدالاً وتشبه الى حد كبير خواص الغازات في النقل الحراري. اما المجموعة الثالثة فانها تكون من المواد السوائل بحيث يجري نقل الحرارة فيها بشكل اعتيادي (تحريك السائل بالكامل من والى موقع العمليات) وهنا يمكن ان تنجز الحالة من خلال (النقل القسري). اما المواد ذات الصفة التوصيلية العالية للحرارة مثل الوسط المكون من السائل فهنا مطلوب سطوح نقل محدودة وصغيرة ولكن للمواد الاخرى فانه من الضروري توفر سطوح تبادل الحرارة الكامنة قوية وذات كفاءة عالية. ان المواد الصلبة مثلا الحديد والمواد المعدنية الاخرى فانها تستخدم لخزن درجات حرارة عالية جدا في الصناعات والمعامل. ان نقل الحرارة وعملية التبادل الحراري واستخراجها يمكن ان تكون عبر امرار السائل من خلال القنوات المحفورة في المعدن. اما بالنسبة الى الوسط الحراري ذات مديات متباينة عند الدرجات الحرارية العالية وخواص الوسط الناقل للحرارة فقد تم توضيحها في الجدول رقم (٣–٣) والتي تتراوح بين ٢٧٠ و ٥٣٠ درجة مئوية عند اتصالها مع منظومة توليد البخار للعمليات الصناعية والمعامل ومحطات توليد الطاقة الكهربائية. ان الجانب الفيزياوي لنقل وتسخين المياه في الاجزاء المعدنية ومن خلال السوائل الناقلة في الانابيب والتي هي عبارة عن اشكال وصيغ قياسية وردت في العديد من الكتب الدراسية والبحوث الخاصة بها. الشكل رقم (٢–١٣) نلاحظ ان الحصى يعتبر بيئة مناسبة للتسخين الحراري. كما ان كثافة الهواء (ρ_a) وسرعته (V_a) قد يتغيران من خلال حبيبات الحصى والفراغات عبر القسم (A) وطوليا الى الجهة الاخرى. ويمكن عندئذ استخدام حبيبات الصخور او الحصى لتخزين الطاقة.



شكل (٢–١٣): يمثل الحصى مكان مناسب للتسخين.

وبالعودة الى الشكل رقم (٢–١٣) يمكن ملاحظة عملية ضخ الهواء من خلال منطقة المقطع العرضي بالكامل (المنطقة A) ويمكن تقديرها او حسابها وفقا للمعادلة التالية:

$$\Delta P = \rho_a V_a^2 L d_5^{-1} ms^2 (368 + 124 Re/m_5) (Re(1-ms)^3) \quad \dots (13-2)$$

حيث ان (ρ_a) يمثل الكثافة وان (v_a) يمثل السرعة التي من خلالها يتسرب الهواء في موضع ذات ابعاد ثابتة (d_s) مع الحصص الاخرى من المحيط الخاص بالخزين من الصخور واحتكاك الهواء، اما (R_e) فانها تمثل عدد رينولد بين قطع وحبيبات الصخور. وقد يكون (R_e) تقدر كما في المعادلة.

$$D_5 = (6\ ALms/\ n)^{1\backslash 3} \quad \dots (14-2)$$

حيث ان:(n) هي عدد الاجزاء في الحجم. لتقدير المعادلة (٢–١٥) يمكن اعتبار ان فرش الحصى والحبيبات متناسق والمنطقة تكون مشبعة. ان مجموع مساحة السطوح للاجزاء يعطى بالمعادلة الاتية:

$$As = 6\ ms\ AL\backslash d_5 = nLs_5^2 \quad \dots (15-2)$$

ان الخزين المثالي يتطلب انحدار حراري بين سطوح الجسيمات والجزيئات والتي تكون عادة صغيرة وان الضغط سوف ينخفض الى(٥ –١٠) ميكا باسكال وكلما كانت الحبيبات صغيرة الحجم يكون الانحدار الحراري افضل حيث تزداد عملية الاحتكاك بين الحبيبات وبذلك يزداد التوصيل الحراري. ان المواد العضوية مثل (ديثيلين غليكول) او بعض المنتوجات النفطية وفق الجدول (٣–٢) تكون مناسبة لتخزين الحرارة بدرجات عالية لمديات تتراوح بين (٢٠٠ و٣٠٠ درجة مئوية) والتي استخدمت في منشآت عديدة في اختبارات مجمعات الطاقة الشمسية في العديد من البلدان. وعند درجات حرارية اعلى من ٣٠٠ درجة مئوية تتحول مكونات مركبات النفط الى عناصها الاولية. بالرغم من الحجم الواطيء للقدرات الحرارية فان المواد التخزينية للحرارة والتسخين الحراري للمواد الغازية يمكن اخذها بنظر الاعتبار منها بخار الماء والتي غالبا ما يتم خزنه تحت ضغط مناسب عندما تكون بصيغة قوة اوطاقة حرارية والتي غالبا ما يتم من خلال اجراء العمليات الصناعية في المعامل ومحطات الطاقة الكهربائية وغيرها.

٢-١١: خزن الحرارة الكامنة ذات الصلة مع التغيرات التركيبية والطورية (Latent heat storage associated with structural or phase change)

من الممكن استخدام الطاقة ذات الصلة مع تغير الاطوار لنوع معين من المواد والتي يمكن ان تستخدم لخزن الطاقة. قد يكون تغير الطور اما بالاذابة او التبخر او قد يرتبط مع تغير بنيوي لتشكيل شبيكة والتي تكون اواصر شبيهة بتلك التي يكونها الماء مع البلورات، عندما يتم اضافة الحرارة او ازالتها من المواد المعينة.عند اضافة حرارة او سحبها من المواد ذات تغيرات متعددة متعاقبة او حالات متماثلة تشمل تحول الحالة وكذلك خزن الطاقة الناتجة عن الحركة المنبثقة عن الحرارة الكامنة والحرارة المحسوسة. ان مجموع الطاقة المخزونة في المادة تعطى بواسطة الحرارة الذاتية للمادة (**Enthalpy**) فعندما يتم اضافة الحرارة او ازالتها من المواد المعينة خلال مرحلة تسخين او خلال نقل الحرارة سواء حصلت تغيرات في المرحلة ام لا والتي يمكن لخزين الطاقة ان يتغير. المرحلة الخاصة بتحول المادة الصلبة المكونة من عنصر ذو نظام احادي او ثنائي او ثلاثي (ذات انظمة ثلاثية) ومثال على ذلك هو الكبريت الذي يتواجد بصيغتين او بلورتين مختلفتي الشكل – صيغة او شكل معين في درجة حرارة واطئة(**orthorhombic**) او شكل احادي في درجة حرارة عالية (**monoclinic**). ومع ذلك فان نظام الكبريت قد تم دراسته اكاديميا بالرغم من تناقض انظمة ذرات العنصر الواحد او المكون الواحد كما موضح في الجدول (٣-٣). من هذه الانظمة التي تمت دراستها والتي لها علاقة بخزن الحرارة ومثال على ذلك (Li_2SO_4) التي تمثل كلا من الانتقال العالي للحرارة (T_t) واعلى حرارة كامنة لتغير مرحلة الصلب– الصلب. ومثال اخر على مادة ذات مكون اوعنصر واحد حسب ما ورد في الجدول رقم (٢-٤) هي (Na_2SO_4) التي تمتلك اثنين من حالات انتقال الحرارة عند (٢٠١ و ٢٤٧ درجة مئوية) مع حرارة كامنة كلية لكلا الانتقالين وهي ($80KJ\ kg^{-1}$). تم مؤخرا دراسة خليط من تلك العناصرمن (Li_2SO_4) مع (Na_2SO_4 K_2SO_4) و($ZnSO_4$) و ايضا خليط ثلاثي يحتوي هذه العناصر واخرى تحتوي على هذه العناصر ومع عناصر اخرى من ضمنها كبريتات اخرى. اما المواد ذات نظامين فهي كثيرة مثل ($Li_2SO_4 - Na_2SO_4$): ٥٠وزن جزئي لكل واحد منهم اي (التي تحتوي على قيمة حرارية عالية) $T_t = 518\ °C$ & $60\%\ Li_2SO_4 - 40\%\ ZnSO_4$ $T = 459\ °C$ ولكن لهذه العناصر ميول عالية للتشوه او الانحراف خلال الدورة الحرارية. عدد

من الخلائط الملحية المحتوية على الثنائي الاكثر نجاحا من حيث المكونات التي خضعت للتجارب ولكن هذه التجارب تنقصها المعرفة لكل من المخطط البياني والتركيب من خلال عمليات اعادة التبلور.

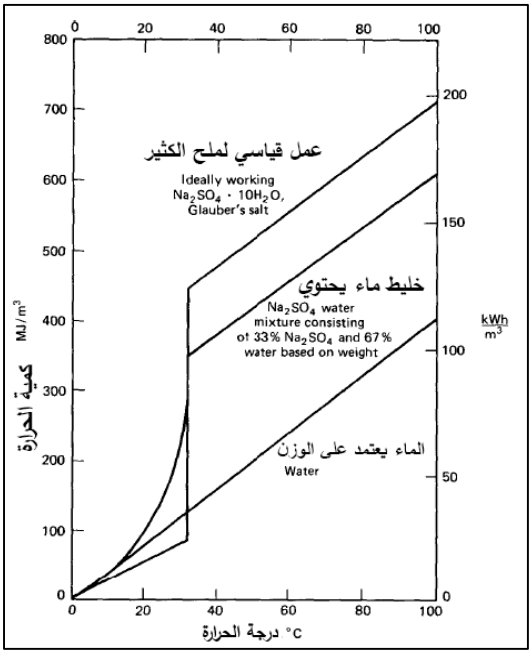
جدول(٢-٤): يبين درجة حرارة الانتقال الصلب – الصلب ΔHss

Material	Transition temperature T_p (°C)	Latent hea $t\Delta H_{ss}$ (kj kg^{-1})
V_3O_3	72	50
FeS	138	50
KHF	196	135
Na_3SO_4	310, 247	80
$Li_3\ SO_4$	578	214

٢-١٢: الاملاح المائية (Salt hydrates)

ان احتمالية خزن الطاقة بأستخدام تقنية ذوبان الملح في الماء قد جرى البحث والتقصي عنها منتصف القرن الماضي. ان الملح الذائب يتكون من محلول مهدرج مشبع باضافة بعض الاملاح غير الذائبة. وبسبب عدم كفاءة ذوبان الاملاح في الماء عند درجات حرارية معتدلة يتم تهيئة بلورات مائية لهذا الغرض.تم تطوير عملية ترسيب الاجسام الصلبة وتكون القشرة الصلبة للاوجه الداخلية بين الطبقات البلورية. واستجابة لتطبيق هذه الحالة يتم اجراء عملية التحفيز مثلاً:- من خلال جعل المادة تدور في اسطوانة حلقية واجراء بعض الاضافات الى المادة من اجل السيطرة على التكتل وبالتالي السيطرة على حجم البلورات. ويمكن اضافة المزيد من الماء من اجل منع الانفصال خلال مرحلة التكوين وهذا سوف يؤدي الى استقرار درجة الحرارة في انظمة التخزين. ويمكن ملاحظة بعض تلك الاملاح مع درجات حرارة الانتقال وحرارتها الكامنة مدونة في الجدول (٢-٤). فمثلا عند استخدام – ملح غلاوبر- ($Na_2\ SO_4.10H_2O$) يمكن ملاحظة سعة الخزن الحراري كما في الشكل (٢-١٤) لكل من الملح النقي الذائب مع خليط من الماء بنسبة ٣٣% وقد استخدمت في التجارب العملية. اجرت المجموعة الاوروبية الاقتصادية المزيد من البحوث والدراسات حول هذا الموضوع. ان نظام تخزين الماء الساخن يكون منطقي في الحدود الدنيا ويتاثر بتغير درجة حرارة الفضاء وبهذا يحتاج الى املاح ذائبة في الماء. عندما يتم تسخين الملح الذائب في الماءتنبعث الحرارة بدرجات مختلفة تحدث فيها التفاعلات وتختلف وتتباين بسبب

المكونات المختلفة والتي تتراوح بين ٣٠ الى ٨٠ درجة مئوية وهذا يجعل اختيار انظمة التخزين مختلفة وفقا الى نظام التسخين المعتمدة عليها تلك الانظمة كالتسخين بالطاقة الشمسية مثلا.

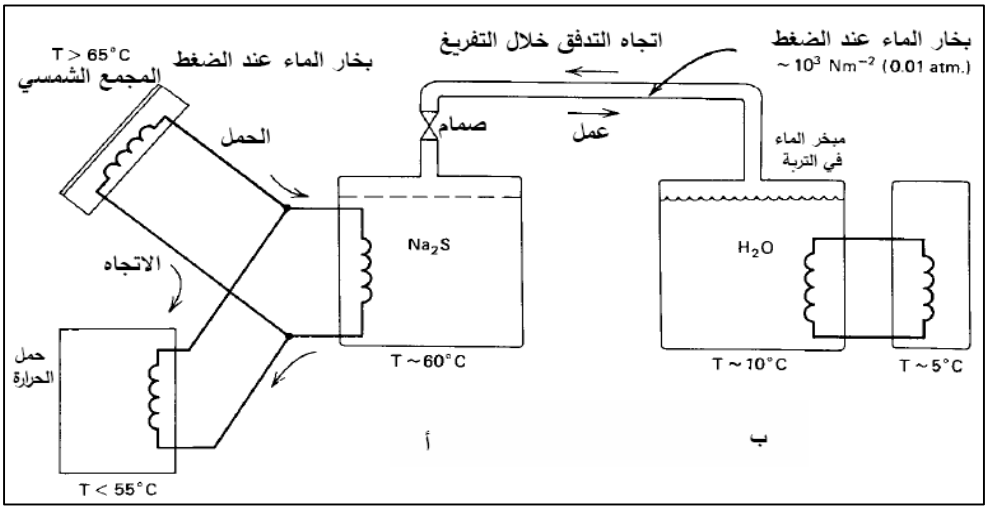


الشكل (٢– ١٤): يشير الى سعة الخزن الحراري كدالة لدرجة الحرارة لتحديد ذوبان ملح غلاوبرز بعد اضافة الماء النقي.

الجدول رقم (٢–٥) يبين درجات الحرارة (T_m) من الذائب اللامتطابق والحرارة شبه الكامنة Q لبض الاملاح الذائبة في الماء والتي تم دراستها بشكل جيد مع عمليات نظام خزن الحرارة. ان الاستخدام العملي للملح الذائب يواجه بعض المشاكل ذات الصلة بالامور الفيزياوية والكيمياوية والحرارية مثل: التبريد العالي، الذوبان غير المتطابق وصعوبات في نقل الحرارة عند درجات حرارية معينة من قبل تقنيات التوصيل للحرارة الواطئة. بشكل عام ان التخزين في النظام الكيمياوي مع مكونات ثنائية منفصلة والتي تسحب الحرارة بدرجات واطئة من البيئة المحيطة بها ومن مصادر اخرى (التي تمتص الحرارة) او مسلمات الحرارة بدرجة حرارة واطئة نسبيا (درجات الحرارة هنا تتراوح بين ٣٠ – ١٠٠ درجة مئوية) او متوسط درجات الحرارة والتي تتراوح بين ١٠٠–٢٠٠ درجة مئوية والتي تعود الى الضخ الحراري الكيمياوي.

جدول(٢–٥): يمثل خصائص ماء الملح.

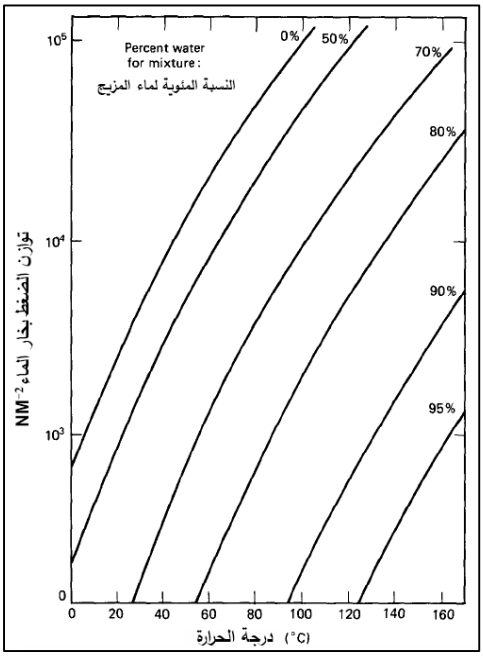
Hydrate	Incongruent melting point, Tm (°C)	Specific latent heat ΔH (M) m^{-3})
$CaCl_3.\ 6H_2O$	29	281
$Na_3\ SO_4.\ 10\ H_3O$	32	342
$Na_3\ CO_3 10\ H_3O$	33	360
$Na_3\ HPO_4.\ 12H_3O$	35	205
$Na_3\ HPO_4.\ 7H_3O$	48	302
$Na_3\ S_3O_3.\ 5H_3O$	48	346
$Ba\ (OH)_3.\ 8H_3O$	78	655



شكل (٢–١٥): يمثل صورة تخطيطية لمضخة الحرارة الكيميائية تعمل بين كبريتيد الصوديوم ووعاء ماء وهو على اساس تكوين ماء الملح ($5H_2O.\ Na_2$) لدرجات الحرارة المثالية.

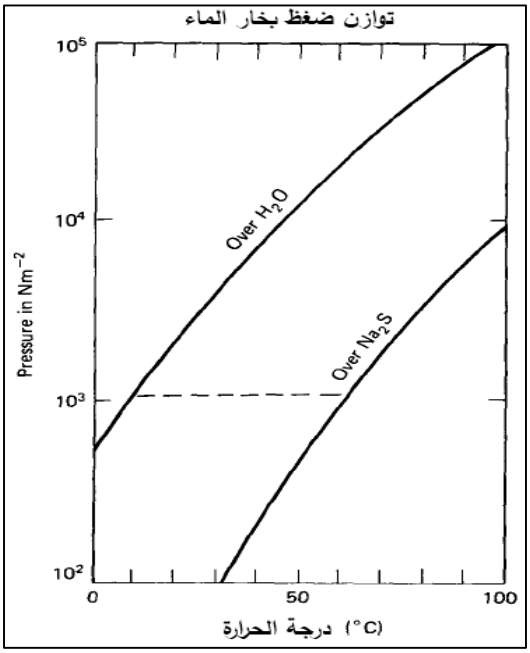
يتضح ان ضخ الحرارة الكيمياوية يحتاج الى استمرار وضع المواد المطلوبة في واحدة او اثنين من الحاويات. ومثال على ذلك المواد المطلوبة هي بخار الماء والحامض الكبريتي. لان الضغط على الحامض الكبريتي اقل بكثير من الضغط على الماء السائل راجع الشكل رقم (٢–١٥) فان بخار الماء يفضل الانتقال من سطح الماء الى سطح الحامض (H_2SO_4) حيث يتم امتصاصه هناك مع كسب حراري جزئياً من العملية المختلطة وجزئيا من حرارة التبخير. علماً ان درجة حرارة الخليط تكون اعلى من درجة الحرارة المطلوبة من المصدر المائي. يتم خزن الحرارة

عندما تكون درجات الحرارة الخاصة بحامض الكبريتيك/ ماء الحاوية اعلى بحيث يكون هناك ضغط متوازن من بخار الماء. ويعمل انحدار الضغط الى تحريك بخار الماء عند سطح الماء من اجل التكثيف. الشكل رقم (٢– ١٥) يوضح هذا الضخ الحراري الكيمياوي المحمول من قبل المفاعل. يتم اخذ حرارة التبخير من المياه الاحتياطية المحفوظة في الخزانات من خلال مد الانابيب عبر التربة بعمق معين لبضعة امتار (كما هو الحال في المضخات الحرارية الكهربائية التجارية مع جهاز تبخير الماء المدفون في المروج ومرتبط مع حاوية ماء بدرجة حرارة (١٠ درجة مئوية) (كما في الشكل ٢ – ١٥) بسبب خسائر المبادلات الحرارية. يتدفق بخار الماء نحو حاويات (Na_2S) (أ) من خلال شبكة الانابيب المتصل بها والتي قامت بتفريغ الغازات الموجودة في الانابيب وتبقي على بخار الماء ويكون ضغط بخار الماء عند ١% من ضغط الجو. خلال العملية فان الحرارة في كبريتات الصوديوم ترتفع الى (٦٥ – ٧٠ درجة حرارة مئوية) بسبب الحرارة الناشئة من خلال هذ العملية. عندما تكون الحرارة في الحاويات (أ) (ب) والضغط المتوازن من بخار الماء في نفس خط الافق فان مخطط البياني للحرارة سوف يكون مثل ما ورد في الشكل (٢– ١٦) حيث يقف الجريان وان الحاويات (أ) قد تم ملئها.



الشكل (٢–١٦): يوضح الضغط المسلط من قبل بخار الماء على الحامض الكبريتي/خليط الماء.

الشكل رقم (٢–١٦) يمثل علاقة تخطيطية لمضخة كيمياوية حرارية تعمل بين كبريتات الصوديوم وحاوية ماء مستندا على تكوين الملح المذاب في الماء وهناك مجهز حرارة من جهة اخرى مرتبطة بحاوية الماء من جهة ومع مصدر الحرارة (مجمع الطاقة الشمسية) من جهة اخرى بحيث يسمح المفتاح لكلا نوعية التحميل الحراري او يتم فقط ربط مجمع الطاقة الشمسية ومن اجل اطلاق الطاقة يجب ان تكون منطقة التحميل اوطأ من الحاوية (أ) المتصلة بها وانتقال الحرارة يتم من خلال المبادلات الحرارية. ان تخفيض الحررة عند (أ) يسبب ضغط انحداري لتكوين الانابيب المتصلة ويتم سحب الطاقة الجديدة من الحاويات (أ) و(ب). من اجل منع الاحتياطي من الحرارة المخزونة في التربة من الفقدان مما يستوجب اضافة حرارة اضافية جديدة للتعويض عن سحب الحرارة الموجودة. وهذه الحالة تستمر في نقل الحرارة الى سطح الموقع عبر انابيب المرتبطة بجهاز التبخير. ويحدث ذلك من خلال سحب الطاقة الشمسية من مجمع الطاقة الى حاويات سلفات الصوديوم عندما تكون مجمعات خزن الحرارة غير مطلوبة مباشرة في منطقة الحمل. عندما تكون الحاوية (أ) مرتفعة بهذه الطريقة فان الضغط الكامن فوق الملح سوف يكون باتجاه بخار الماء المدفوع الى الحاوية (ب) وهكذا يتم ازالة بعض الماء المتبلور من الملح.



الشكل رقم (٢– ١٧): يوضح ضغط بخار الماء على سلفات الصوديوم كدالة لدرجة حرارة المحلول الملحي.

ان درجة حرارة الماء تكون متكافئة مع درجة حرارة حاويات الملح كذلك ان هذه التقنية تشبه تقنية استخدام المضخة الكيمياوية الحرارية.ان التطبيقات المستقبلية قد تشكل خزانات حرارية قابلة للنقل طالما ان الحاوية (أ) منفصلة (بعد اغلاق الصمامات كما مؤشر في الشكل (٢– ١٧) والمحمول الى موقع اخر. في الوقت الذي تنفصل به الحاوية فان الحرارة المحسوسة قد تتسرب بسبب نقصان درجة حرارة الحاوية دون ٦٠ درجة مئوية اي اقل من درجة حرارة محيطها، ولكن هذه فقط عندما تكون من ٣ – ٤ % من الطاقة المخزونة في ($Na_2S.5H_2O$) .لابد الاشارة هنا ان هناك خسارة مماثلة سوف تحدث خلال استخدام وحدة الخزن بالترابط مع نظام التسخين للطاقة الشمسية. هذا بسبب الحاجة المتقطعة للخزن في هذه الحالة تزداد درجات الحرارة الى (٦٠ درجة مئوية)(يكون الصمام مفتوح طيلة الوقت)، باستخدام الطاقة لتجهيز الحرارة المناسبة والمحسوسة وكلما انتقلت جزء من الحرارة الى المناطق المحيطة كلما انخفضت درجة حرارة الحاوية مما تحتاج على درجات حرارة مستمرة من خلال غلق الصمام واعتمادا على درجة العازل في وحول الحاوية. ان النموذج الاصلي للانظمة ليس فاعلا وتاثير الكلفة يلعب دورا مهما، ولكن تقديرات لكلفة النظام في الانتاج الطبيعي هي (٤ – ٥ يورو لكل kWh) من الحرارة المجهزة لـ (١٥ م^3) من نظام الخزن للبيوت المنعزلة بحيث تكون نصف كلفة نظام مجمع الطاقة الشمسية والنصف الاخر بالخزن. بالرغم من ان تطبيقات المضخة الكيمياوية الحرارية المذكورة سابقا تفيد للتسخين او لنقل الحرارة فانها تكون ذا فائدة متساوية لتطبيقات التبريد كذلك، وهنا الحمل سوف يكون مرتبط بالحاوية الخاصة بالتبريد. هناك العديد من المشروع تحت الانشاء لدراسة المفاعلات الكيمياوية للغاز المسال التي تعتمد على انواع مختلفة من الضغط اما للتبريد لوحده او كلا من التسخين والتبريد. يتم اختيار المواد على اساس متطلبات استقرار الحرارة والتي تسمح باستمرارية تدوير الخزين. مثال على ذلك انظمة ($NaI–NH_3$) المستخدمة لاغراض التبريد.

٢–١٣: التفاعلات الكيمياوية (Chemical Reactions)

أستخدمت التفاعلات الكيمياوية ذات الدرجات الحرارة العالية في انظمة التخزين الحرارية. وهي حالة جديدة والى حد ما ترتبط بمحاولات الاستفادة من الدرجات الحرارية الضائعة من اجل تحسين اداء محطات الطاقة التي تعمل بالبخار. ان التفاعلات الكيمياوية التي تستخدم لخزن الحرارة تسمح بالتدرج الحراري من مستوى الحرارة الواطئة الى مستوى حراري اعلى وهي الخاصية

التي لا ترتبط بتغير الاطوار او اساليب السعة الحرارية. ان الاستهلاك التقليدي للوقود هو تفاعلات كيمياوية من حيث تفاعل الوقود مع الاوكسيد لتكوين منتوجات متفاعلة وحرارة زائدة. ان هذا النوع من التفاعلات الكيمياوية تعتبر تفاعلات غير العكوسة كذلك لاتوجد طريقة بسيطة من اجل عكس التفاعلات بحيث يمكن استعمالها من اجل خزن الطاقة الحرارية. ان عملية حرق الوقود هي تفاعلات كيمياوية حيث تعتبر الطاقة جزء منها(الطاقة الكيمياوية) وهي تتحول الى طاقة اخرى (حرارة) مصاحبة مع زيادة في الانتروبي (عامل رياضي يعتبر مقياسا للطاقة غير المستفادة في نظام ديناميكي حراري). من اجل استخدام مثل هذ التفاعلات الكيمياوية لتخزين الحرارة تتطلب عمليات عكسية بحيث يمكن الحصول على الحرارة من خلال اضافة الحرارة الى منتوجات التفاعل: ثاني اوكسيد الكاربون والماء، وبذلك فان استخدام التفاعلات الكيمياوية لتخزين الطاقة الحرارية يتطلب تفاعلات عكسية مناسبة. ان التغيير في طاقة الترابط للتفاعل الكيمياوي التفاعلات العكوسة، لذلك فقط تم تحديد عدد قليل من المرشحات مقبولة اقتصاديا وفنيا .ان التحديدات والقيود الفنية تشمل: الحرارة، الضغط، مكثفات الطاقة، مكثفات القوة والتوليد، والفاعلية الحرارية. بشكل عام ان التفاعلات الحرارية الكيمياوية عبارة عن عملية من خلالها يتم تحليل المركبات الكيمياوية من خلال امتصاص الحرارة وبعد ذلك اعادة تركيب وضم المنتوجات المتفاعلة واطلاق الحرارة المكتسبة(التي تم امتصاصها) مرة اخرى. ان تفاعلات الحرارة الكيمياوية المعكوسة او العكسية يمكن تقسيمها الى مجموعتين:

الاولى: تفاعلات تفكيك كيمياوي (فصل) حراري.يمكن وصفها حسب المعادلة رقم (٢ – ١٦).

$$\mathbf{AB\ (+\Delta H\ at\ T_1\ and\ p_1) \text{---} A + B\ (-\Delta\ H\ at\ T_2 and\ p_2)} \quad \ldots (16\text{–}2)$$

الثانية : تفاعلات تحفيزية (بوجود عامل مساعد).

وكما مؤشر ان التفكيك (الحل) الكيمياوي يحدث من خلال اضافة الحرارة الى الحاويات (أ) و (ب) عند درجة حرارة (T_1) والضغط (P_1)، بينما يتم اطلاق الحرارة في التفاعلات المعكوسة عند درجة حرارة (T_2) وضغط (P_2). ان التفاعلات المتبادلة (من اليمين الى اليسار) تحدث بشكل تلقائي اذا ما حدثت بعض المشاكل والعقبات امام حالة التوازن. ومن اجل تجنب تفاعلات معكوسة غير مسيطر عليها يجب فصل منتوجات التفاعل وخزنها في حاويات منفصلة. ان فصل منتوجات التفاعلات الكيمياوية ليس ضرورية في انظمة التفاعلات التحفيزية لان كلاهما (

كلا التفاعلين: من اليمين الى اليسار ومن اليسار الى اليمين) تحتاج محفزات من اجل الحصول على سرعة تفاعل عالية. واذا تم ازالة المحفز فلا يحدث اي من التفاعلات حتى وان تم اجراء التغيرات في الحرارة والضغط. ان هذه الحقيقة تقود الى فائدة كبيرة وهي ان وقت التخزين تكون كبيرة جدا ولكن مبدئيا غير محدود. فائدة اخرى هي ان استخدام التفاعلات الكيمياوية لم يستهلك طاقة وبسبب كثافة الطاقة العالية فان المركبات الكيمياوية مقبولة اقتصاديا لذا ان الاهتمام بالتفاعلات الكيمياوية ذات الحرارة العالية قد وجدت اهتماما من قبل الباحثين الالمان خصوصا تفاعلات الميثان حسب المعادلة الاتية:

$$Q + CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H\nu \qquad \dots (17-2)$$

(Q) تعني الحرارة المضافة. الجدول (٢–٦) يمثل تفاعلات كيمياوية لحلقة مغلقة للحرارة العالية وتكون مرشحات لخزن الطاقة والتي يمكن انجازها من خلال الاتي:– ((يتم امتصاص الحرارة من خلال عملية التطوير التي تمت بدرجات حرارة واطئة "الميثان والماء" والتي تتحول الى منتوجات حرارية عالية ((كاربون احادي الاوكسيد والهيدروجين)). بعد تبادل الحرارة الناتجة عن التفاعلات الكيمياوية ومن ثم يتم خزن المنتوجات في اوعية منفصلة عند درجة حرارة معينة على شكل حرارة كامنة. عندما يكون هناك حاجة الى الطاقة يتم استرداد المنتوجات من الخزين والمعكوس اساسا عن هذه التفاعلات والتي تتراوح درجات الحرارة بعض انظمة الحلقة المغلقة للحرارة العالية ومن ضمنها المفاعلات في الشكل(٢– ١٨) كما هو موضح في الجدول (٢–٦). ان اداء منتوجات النفط، البنزين ونظام الهيدروجين التي تم دراستها بشكل تفصيلي من قبل العلماء الايطاليين.ان تقديرات معامل ومصانع للخزين المصمم التي تتكون من الهيدروجين ومواد اخرى والمفاعلات – خزانات التخزين،عوازل وفواصل، مبادلات الحرارة وضاغطات متعددة المراحل. ان متطلبات الحرارة الديناميكية هي تامين استقلالية الانظمة ذات الحلقة المغلقة والتي تدور فيها النيتروجين داخل مكونات الهدروجين ووحدات والتحويل للميثان في موقع المستهلك حيث يتم توفير الحرارة للكهرباء وتدفئة المنطقة.

جدول(٢-٦): يمثل تفاعلات C – H – O الكيميائية ذات الحلقة المغلقة ودرجة الحرارة.

نظام الحلقة المنغلقة	السخونة a ΔH ($KJmoi^{-1}$)	مدى درجة الحرارة (k)
$Ch_4 + H_3O \leftrightarrow CO + 3H_3$	206 (250)[b]	700 – 1200
$CH_4 + CO_2 \leftrightarrow 2CO + 2H_2$	247	700 – 1200
$CH_4 + 2H_2O \leftrightarrow CO_2 + 4H_3$	165	500 – 700
$C_6H_{12} \leftrightarrow C_6H_6 + 3H_2$	207	500 – 750
$C_7H_{14} \leftrightarrow C_7H_8 + 3H_2$	213	450 – 700
$C_{10}H_{18} \leftrightarrow C_{10}H_8 + 5H_2$	314	450 – 700

عدد من الاملاح المعروفة تمزج مع النشادر وتقوم باطلاق النشادر بدرجات حرارية مختلفة بفترات متفاوتة كذلك ان فائدة تفاعلات الغاز هي للحصول على حرارة عالية و بفترات تفاعل قصيرة اي امكانية الحصول على طاقة عالية وكثافة طاقة بالرغم من فقدان بعض الحرارة وكثافتها عند عمليات الخزن والنقل. ان انظمة المعادن المهدرجة تعتبر خزين للهيدروجين. ان تكوين الهدرجة (المعدن + الهايدروجين) عبارة عن تفاعلات حرارية تلقائية وكما يلي:-

$$Me + \tfrac{1}{2}XH_2 \rightleftharpoons MeH + Q \qquad \dots (18-2)$$

والتي يمكن عكسها بسهولة من خلال استخدام كمية من الحرارة Q كما في المعادلة

$$Me + \tfrac{1}{2}XH \rightleftharpoons MeH_2 + Q \qquad \dots (19-2)$$

وهكذا فان نظام الحلقة المغلقة الذي لايستهلك فيه هيدروجين ولكي يتم ضخ الحرارة بين الوحدات المهدرجة المنفصلة والتي يمكن ان تستخدم كخزين للحرارة. ان درجات الحرارة المهدرجة العالية مثل (MgH_2، Mg_2NiH وTiH_2) تعود الى مكوناتها ذات درجات الحرارة العالية والتي تمتد من (١٠٠ الى ٦٠٠ درجة حرارة مئوية).

الفصل الثالث

خزن أشكال الطاقة عالية الجودة

(Storage of High Quality Energy Forms)

٣-١: المقدمة (Introduction)

قد يكون عدد من أنظمة الخزن مناسبة عمليا لخزن الطاقة "عالية الجودة" كالطاقة الميكانيكية أو الطاقة الكهربائية، إذا كانت الطاقة المخزونة ناتجة من التحول الأولي للطاقة الكهربائية، مثلا عند الحاجة الى نظام كفؤ لتخزين الطاقة والذي يسمح باعادة توليد الطاقة الكهربائية بكفاءة تدوير عالية أي بالاستفادة من جزء كبير من مدخول الطاقة المستعادة بشكل كهرباء. فقد يكون الخزن الحراري مناسب حتى في المعادن عند درجة حرارة عالية بالرغم من عدم التوصل الى درجة حرارة ١٥٠٠ او ٨٠٠ درجة مئوية بسبب حدود دورة كارنو لكفاءة التوليد الكهربائي وكذلك فقدان الخزن الحراري لعدم امكانية العزل التام...الخ. تتغذى المخازن الحرارية خلال سحب حرارة تستمد من صهريج مرجعي مناسب وقد تصل إلى كفاءة دورية متيسرة لا بأس بها.

جدول (٣-١): يبين كفاءة اشكال الخزن

شكل الخزن	Storage form	كثافة الطاقة Energy density		Cycle efficiency دورة الكفاءة
		Kj kg^{-1}	MJ m^{-3}	
وقود تقليدي	Conventional fuels			
نفط خام	Crude Oil	43000	3700	
فحم	Coal	33000	4300	
خشب جاف	Dry Wood	12500	10000	
الوقود المركب	Synthetic fuels			
هيدروجين ، غاز	Hydrogen, gas	120000	10	0.4-0.6
هيدروجين ، سائل	Hydrogen, liquid	120000	8700	
هيدروجين، هدرات معدنية	Hydrogen, metal hydride	2000-9000	5000-15000	
ميثانول	Methanol	21000	17000	
ايثانول	Ethanol	28000	22000	

جودة حرارية واطئة	Thermal–low quality	250	250	
الماء	Water,100°C→40°C	40–50	100–140	
الصخور	Rocks, 100°C→40°C	–30	–230	
الحديد	Iron, 100°C→40°C			
جودة حراربى عالية	Thermal – high quality			
صخور	Rocks,e.g., 400°C→200°C	–160	–430	
حديد	Iron,e.g., 400°C→200°C	–100	–800	
املاح لاعضوية، حرارة الصهر	Inorganic salts, heat of fusion>300°C	>300	>300	
ميكانيكية	Mechanical			
المضخة المائية المفرغة	Pumped hydro,100 m head	1	1 –15	0.65–0.8 0.4–0.5
هواء مضغوط	Compressed air	30–130	340–950	
دولاب الموازنة، فولاذ	Flywheels, steel	>300	>100	–0.95
دواليب الموازنة، المتقدمة	Flywheels, advanced			
الكيميائية الالكترونية	Electrochemical			
حامض– رصاص	Lead– acid	40–140	100–900	0.7–0.8
نيكل – كاديوم	Nickel– cadmium	–350	–350	varying
ايون الليثيوم (بطاريات متفرقة)	Lithiun ion (other advanced batteries)	700(>400)	1400(>300)	0.7(>0.8)
فرط الموصيلية	Superconducting		–100	–0.85

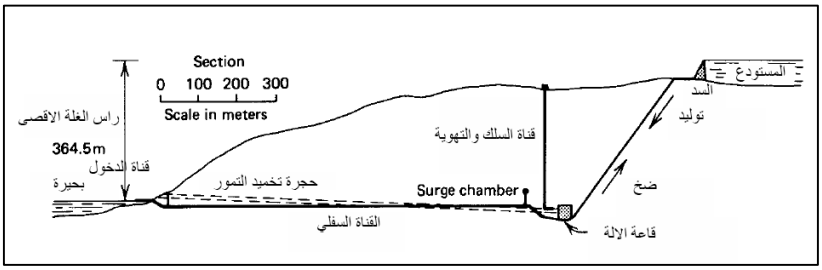
(الجدول ٣–١) يبين كثافة الطاقة بالوزن والحجم بأشكال خزن متنوعة على أساس بيانات أو توقعات عملية. لأن أشكال الخزن التي تهدف إلى خزن وتوليد طاقة ذات جودة عالية (كهرباء)، فقد تم تاشير كفاءة تلك الدورة. تؤخذ كثافة غاز الهيدروجين بضغط محدد ودرجة حرارة محدد كمرجع. ولخزن طاقة هواء مضغوطة، يتم شمول كل من الكهرباء ومدخولات الحرارة بالتساوي في تقييم كفاءة الدورة. قد يصل الخشب الجاف إلى قيم تصل إلى($20000\ \mathbf{kj\ kg^{-1}}$). الجدول(٣–١) يعطي الخزن الحراري بكثافة مختلفة بالنسبة لانواع مختلفة من الوقود مؤشرا لكثافات الطاقة التخمينية أو الفعلية وكفاءة الدورة لأنظمة الخزن المتنوعة. يكون الحد الأقصى النظري لكثافة الطاقة في بعض الحالات اعلى من القيم المأخوذة. للمقارنة يعطي الجدول كثافات

طاقة وخزن حراري لأصناف عديدة من الوقود. بعض الوقود مثل (ميثانول الخشب والهيدروجين) قد ينتج من مصادر الطاقة المتجددة (بدون الحاجة إلى انتظار ورود عمليات الحفر). تعرف كفاءة الدورة بافتراض أن شكل الطاقة المبدئي هو الكهرباء أو بشكل طاقة آخرى عالية الجودة والقيمة المأخوذة للهيدروجين هي على أساس التحليل الكهربائي للماء كخطوة أولى في دائرة الخزن. قد يتحلل الميثانول عكسيا ويتحول إلى هيدروجين وأوكسيد الكاربون وبذلك يلعب دورا اساسيا في دورة الخزن المغلقة. ان المؤشر الأكثر بروزا في موضوع خزن الطاقة هو كثافة الطاقة ذات الحجم الواطيء تقريبا عن كل مفاهيم الخزن للدورات المعكوسة المأخوذة بالاعتبار، مثل الوقود الحجري ليكون له دور مهم أوالوقود الصلب.

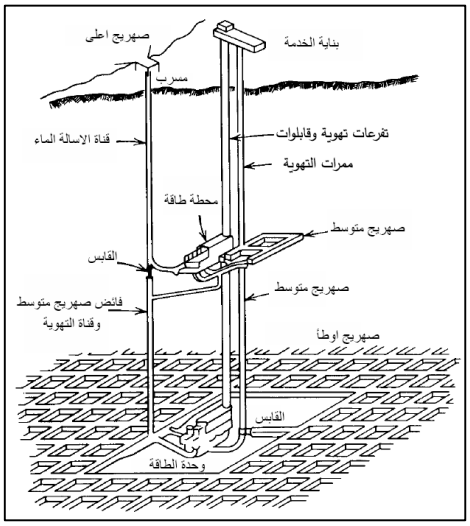
٣–٢: التخزين بوساطة ضخ الماء المظغوط (Pumped Hydro Storage)

إن الاستغلال الامثل للطاقة المائية الكامنة المخزونة و الممكن استثمارها تقدر بمقدار 10^{12} واط سنويا. ان الانهار تتدفق بقوة قادرة على توليد الطاقة الكهرومائية ولكن ليس لخزن الطاقة وان هذا السيل من التدفق بحاجة الى بزل ومع ذلك لايمكن اعتبارها من ضمن خيارات تخزين الطاقة. المستودعات المائية التي تغذي توربينات محطات الطاقة قد تستغل لخزن الطاقة الكهربائية المتولدة من محطات الطاقة غير المائية (مثلا الرياح أو محولات الطاقة الضوئية)، على أن ترتبط كل محطات الطاقة بالشبكة العامة وأن تكون سعة النقل كافية لاحتواء الحمل الإضافي الناتج من عملية الخزن للنظام. إن وظيفة الخزن في نظام من هذا النوع ممكن الحصول عليه باستبدال الحمل. وهذا يعني أن وحدات الطاقة الكهرومائية تعمل كإسناد للمحطات الكهربائية الاخرى اي تعمل على تجهيز الكهرباء عند حصول عجز في المحطات الكهربائية غير المائية. مع العلم يستغرق وقت التشغيل لتوربينات المحطات الكهرومائية (١/٢ – ٣ دقائق) مما يؤدي الى تقديم وقت التشغيل. عندما يكون هناك توليد طاقة كهربائية فائضة من الوحدات الاخرى غير المحطات الكهرومائية عندها يتضاءل توليد المحطات الكهرومائية وبذلك يمكن نقل الطاقة الكهربائية المتولدة من محطات انتاج الطاقة الاخرى غير الكهرومائية واستخدامها في مواقع الاستهلاك (الاحمال). وبذلك لا توجد ضرورة لضخ الماء الى اعلى صهاريج الخزن، طالما يبقى توليد الطاقة من محطات اخرى غير المائية واستخدامها في مواقع الاحمال. لإنجاز هذا الشرط يجب ان يكون اختيار حجوم المستودعات دقيق ويناسب أنواع مختلفة من وحدات التوليد. عندما تتجاوز الطاقة الفائضة التي يجب أن تخزن

المقدار المتوقع للاستهلاك في نموذج الاستبدال الموصوف في الأعلى، فيجب دراسة ضخ الماء إلى أعلى صهاريج الخزن باستخدام توربين حتى يتم خزن الطاقة واسترجاعها بنفس الوتيرة (الطريقة) وبصورة تبادلية، قد ينفع خزن الماء في المستودعات المشيدة صناعيا أو طبيعيا غير مرتبطة بأي محطة طاقة مائية قابلة للاستثمار. الشكل (٣–١) يوضح مثالا لمخطط لمنظومة خزن مائية و يعد جزء من النظام المشيد. فان اعداد المستودعات ليست جزءا من نظام جريان محطة مائية لأغراض الخزن قصير الأمد. قد تستخدم لأغراض ضبط استواء الحمل بتوفير ساعات قليلة لذروة طاقة الحمل الكهربائي لكل يوم وعلى أساس ضخ ليلي. وفيما يخص تغطية الحمل المعدل فأن استيعاب الخزن لهذه الإنشاءات هي دون ٢٤ ساعة. من ناحية أخرى، تعمل بعض المستودعات الطبيعية المرتبطة بمخطط خزن الطاقة بمعدل سنة او اكثر.

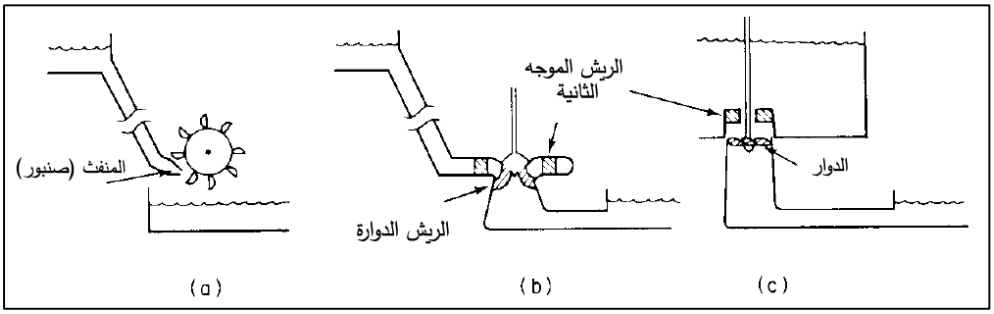


الشكل(٣–١): يمثل مخطط لنظام خزن محطة مائية في كرواشن في سكوتلندا.



(الشكل ٣–٢): نموذج تخطيطي لنظام خزن محطة مائية. إذا لم تكن هناك مستودعات طبيعية مرتفعة فقد يرتكز مخطط الخزن المضخي على مستودعات تحت الأرض أوطأ وصهاريج أعلى من مستوى سطح الارض.

قد تكون المستودعات المرتفعة بحيرات أو محيطات، يجب أن تكون الصهاريج الأوطأ مجوفة أو تستفيد من التجويفات الطبيعية أسفل الأرض. إذا كان التجويف ضروريا فقد يتم توظيف شبكة قنوات منجمية أفقية كالتي موضحة في الشكل (٣-٢) لأجل حفظ الثبات البنيوي ضد الانهيار. يتحدد اختيار العدة بحجم الرأس أي السقوط العمودي الموجود بين المستودع العلوي والسفلي. يمثل الشكل (٣-٣) رسم تخطيطي للانواع الثلاثة المشتركة لتوربينات المحطة الكهرومائية. يكون ملائم جدا للرؤوس الواطئة السفلى بأمتار قليلة. لدى الدوار شكل مناسب وكفاءة طاقة جاذبية متحولة إلى طاقة العمود العالية (أعلى من ٠،٩) ان معدل سرعة المياه عند التصميم أوطأ من سرعة المياه في واقع الحال. تنخفض الكفاءة بعيدا عن سرعة المياه التصميمية وسريعة بالنسبة لتوربين فاغلر، واقل من سرعة نموذج توربين كابلان . هذه التوربينات غير كفؤة للضخ للأعلى بالرغم من قابلية جعلها تقبل تدفق المياه من أي جانب. قد تستخدم محطة استبدال في "ترتيب تاندم"(أي توربين ومضخة منفصلتين). ممكن عكس المولد الكهربائي بسهولة حتى يخدم إما كمولد أو كمحرك. تستخدم توربينات فرانسيس وبيلتون للرؤوس الكبيرة. لدى توربينات فرانسيس مجموعة زعانف اساسية ثابتة تقود المياه باتجاه الزعانف الدوارة بزاوية عرضية بدرجة قصوى ويمكن استخدامها برؤوس مائية حتى إلى حوالي ٦٠٠م كالنموذج المبسط في الشكل(٣-b٣) غير انه لايمكن معاينة نماذج متعددة المراحل لسحب المياه خلال عدة مجاري. بهذه الطريقة يمكن قبول الرؤوس فوق ١٠٠٠ م و يمكن ان يكون الترتيب معكوسا كليا بخسائر متواضعة جدا.



شكل (٣-٣): يمثل رسما تخطيطيا للأنواع الثلاث المشتركه لتوربينات المحطة المائية
(a) Kaplan (Pelton) (b) Francis (c) water Turbines.

قد تكون كفاءة التوربين بتصميم يتدفق الماء بأعلى من ٠،٩٥ للضخ أو التوليد وعند تضائل التدفق فأن الكفاءة تتضاءل. إن الكفاءة الكلية المثالية لدائرة الخزن (ضخ الماء للأعلى باستخدام طاقة كهربائية إضافية، إعادة توليد طاقة كهربائية ترتكز على التدفق الى الاسفل خلال التوربينات) هي حوالي ٠،٨ لإنشاءات توربين فرانسس ذو المرحلة الواحدة المتوفر تجاريا. إن التحول من الضخ إلى التوليد يستغرق دقيقة واحدة. إذا كان رأس التوليد أكبر من حدود المرحلة المنفردة توفر وحدات تاندم توربينات فرانسس المعكوسة وهي بديل لتوربينات فرانسس ذات المراحل المتعددة والتي تشتمل على توربينات ومضخات نبضية منفصلة. إن وحدات الضخ الى الاعلى تعتمد على فروقات الارتفاع تفوق ١٠٠٠ م هي مضخات متعددة المراحل عادة لكفاءة تفوق ٠،٩ المتحققة. جزء التوربين النبضي هو من نوع بيلتون مشتملا على دولاب ذو دفع تسيرها بواحدة أو أكثر من نافورات المياه بواسطة تمرير المياه خلال الفوهات. إن قوة هذه العملية هي قوة الضغط المتولدة من عمود المياه من التوربينة الموضوعة في مستودع المستوى الأسفل إلى المستودع المستوى الأعلى. يمكن لطاقة الضغط أن تتحول جزئيا أو كليا إلى طاقة حركية خطية طبقا إلى متطلبات أنواع التربين المختلفة حسب المعادلة الاتية:-

$$\mathbf{Mg\ \Delta Z = W^{pot}_{inital} = 1/2\ \dot{m}\ U^2 + (m-\dot{m})^b\ \rho^{-1} = W^{kin} + H} \quad \dots (1-3)$$

هنا ترتبط الطاقة الكامنة بالرأس ΔZ وتتحول إلى طاقة حركية يرتبط جزء منها بكتلة جزئية mتتحرك بسرعة ν، وطاقة ضغط جزء منها بمحتوى حراري H التي تعطى عن طريق الضغط Pعلى كثافة الماء ρ، مضروبة بفرق الكتل $(m - \dot{m})$.كفاءة تحول توربينات بيلتون هي حوالي ٠،٩ على مدى واسع من مستويات الطاقة، او ترتيب مزدوج لتوربين ومضخة منفصلة (لكن المولد/ الماطور، توربين، والمضخة كلها توضع على عمود مشترك) تسمح بالانحراف السريع بين التوليد والضخ أو بالعكس.

إن فقدان التحول مرتبط جزئيا بـ "التسرب" أي بالماء المار حول التوربين بدون سيطرة على الطاقة، جزء من هذه الطاقة يفقد على شكل حرارة مثلا بسبب الاحتكاك. الفقدان الآخر مرتبط بتبخير المياه خصوصا من الصهاريج العلوية ذات التعريض الشمسي.

إن الحفر تحت الأرض لاغراض الخزن يحدد تطبيق الخزن قصير الأمد (حتى إلى حوالي ٢٤ ساعة للحمل المتوسط)، لأن الكلفة تتناسب تقريبا خطيا مع سعة الخزن. ولأجل مستودعات

طبيعية كبيرة يتطلب معاينة خزن الطاقة موسميا لأن كلفة المحتوى الكبير يتحدد بمتطلبات الحمل القصوى وبذلك تصبح مستقلة تماما عن سعة الخزن لما بعد نقطة معينة، حسب توفر المستودع.

٣-٣: الدولاب الطائر او دولاب الموازنة (Fly Wheels)

الدولاب الطائر كجهاز محتمل لخزن الطاقة. تم إيجاده كتطبيق عملي لخزن الطاقة بصورة مؤقتة ويتكون من مغانط كبيرة لاجل تسريع الجسيمات، يتم سحب الطاقة خلال ثوان قليلة لإعادة تنشيط المغانط. يمكن التحكم بنظام الطاقة لهذا النوع ببساطة عن طريق مفتاح كهربائي مناسب.و يستخدم المولد الكهربائي كمحرك لزيادة سرعة الدولاب، وتستخدم القطب الاخر للمولد لأجل سحب الطاقة من حركة الدولاب.

إن حجم الطاقة المخزونة في الدولاب الطائر قليل وتتفاوت بين (١ واط /الساعة) الى٢ واط/ساعة مما يساوي (١,٨) كغم من الكتلة تقريبا لدولاب طائر قطره (٢) متر ويدور بسرعة (٦٠٠٠) دورة بالدقيقة. هناك مواد جديدة، مثل مركبات ألياف الكاربون، تستطيع تحمل قوة طرد كبيرة، و تدور بسرعة عالية جداً أذ تقوم بخزن طاقة أكبر مما يستطيع دولاب الحديد توليدهُ خلال نفس الفترة الزمنية عند سرع الدوران العالية جداً تقوم بخزن طاقة أكبر مما يستطيع الحديد.

الطاقة المخزونة في الدولاب تحسب بموجب المعادلة كالآتي-:

$$E=1/2Iw^2 \quad \ldots (2-3)$$

حيث أن :-

I: - تمثل عزم القصور الذاتي

ω: - تمثل السرعة الزاوية للدوران. ان الطاقة المخزونة في العجلة (الدولاب) تشبه طاقة النابض الناتجة من الشد المتكون عند حافة العجلة بواسطة القوة الطاردة، و التي تزيد من قطر العجلة بشكل جزئي. قد تخزن الطاقة الحركية على شكل حركة دورانية تحت ظروف فقدان احتكاكي واطئ. دولاب الموازنة هو تركيب دوراني قادر على استلام وإيصال الجهد خلال قنوات التدوير الخاص به. يقل الاحتكاك باستخدام المنزلقات (Bearing) كأسطح أرتكاز وقد يحاط تركيب التدوير كاملا بفضاء فراغ جزئي أو يملأ بغاز خامل. إن كمية الطاقة المخزونة في جسم كثافته منتظمة $\rho(x)$ تدور حول محور ثابت بسرعة زاوية (ω) وباستخدام حيث دولاب دائري ان عزم قصور ذاتي (I) يحسب بالمعادلة الاتي:-

$$I=\int \rho(x) r^2 dx \qquad \dots (3-3)$$

تبين هذه المعادلات أن السرعة الزاوية العالية و الكتلة الواقعة بمسافة كبيرة r عن محور التدوير سيقود إلى كميات عالية من الطاقة المخزونة. السؤال هنا هو كيفية حصول كثافة طاقة عالية بأخذ مادة ذات متانة محدودة.

يمكن الاعتماد على متانة المواد كقوة جهد تمتلك ضغط عالي ولكن لا يؤدي إلى تشويه دائم أو كسر المادة. إذا كانت المادة غير متجانسة بشدة الكسر وتكون قوى الشد تختلف باتجاهاتها مختلفة. بالنسبة للمواد الليفية فأن هناك قوى شد مميزة باتجاه النسيج وبخطوط عمودية باتجاه الليفات السابقة في النسيج الليفي بعض الحالات تكون درجة الضخامة أكبر من اللاحقة.

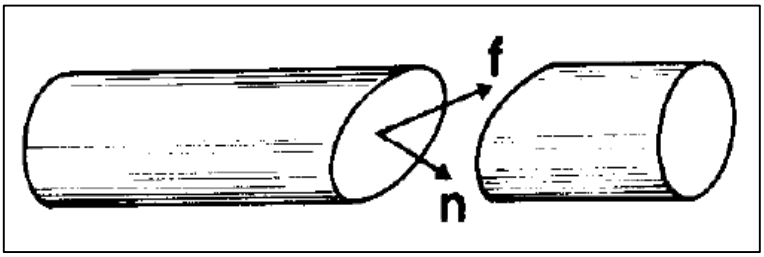
إن المكونات في اتجاهات x , y , z للقوة لكل وحدة حجم، f، ترتبط بكمية الشد الممتدة τ_{ij} بواسطة

$$f_i = \sum_j \partial\tau_{ij} / \partial x_j \qquad \dots (4-3)$$

وقوة الشد σ_1 في اتجاه محدد بـ i هي:

$$\sigma_1 = \max \text{ (أقصى) } (\sum_j \tau_{ij}\, n_j) \qquad \dots (5-3)$$

حيث n هي وحدة القوة العمودية على اتجاه المقطع (انظر الشكل٣-٤) وأن الضغط الأقصى باتجاه i موجود بتغيير اتجاه n أي تغيير زاوية الشريحة. بعبارة أخرى تختلف زاوية القطع حتى يكون الضغط باتجاه i أقصى ما يكون والقيمة الأعلى لهذا الشد الأقصى الذي لا يؤدي إلى توليد شد بأتجاه عكسي يحدد من قوة الشد المسلطة. إذا كانت المادة متجانسة الخواص فأن قوة الشد مستقلة في الاتجاه وتمثل بـσ.



الشكل(٣ -٤): يمثل تعريف قوة الشد الداخلي

لنأخذ الآن دولاب موازنة كالذي في الشكل ٣–٤ يدور بسرعة زاوية ω حول محور ثابت. التوزيع الكتلي متماثل حول محور التدوير، أي ثابت فيما يخص التدوير خلال أي زاوية θ حول المحور التدويري. بافتراض أن المادة متجانسة حتى يتحدد التوزيع الكتلي كليا بالكثافة الكتلية ρ واختلاف عرض القرص $b(r)$ كدالة للمسافة القطرية r عن المحور.

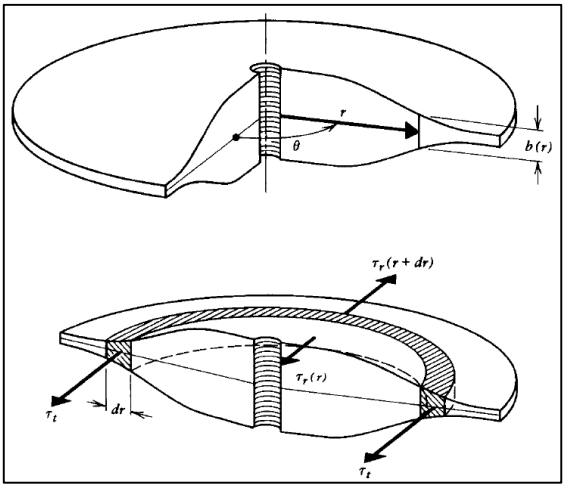
تحدد قوة الشد الداخلي بالمعادلة (٣–٤) زائدا أي قوة بحيث تكون سرعة الدولاب بالنسبة للموقع x كما يلي:

$$\rho \frac{d^2 x_i}{dt^2} = f_{ext,i} + \sum_j \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial_{xj}} \quad \ldots (6\text{–}3)$$

والتي هي معادلة نيوتن للحركة. متكاملة مع حجم معين V، تصبح القوة :

$$F_i = \int_v f_{ext,i}\, dx + \int_v \sum_j \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial_{xj}} dx = f_{ext,i} + \int_v \sum_j \tau_{ij}\, n_j\, da \quad \ldots (7\text{–}3)$$

حيث الخط الأخير يحول تكامل الحجم V إلى تكامل سطح A متضمن الحجم V ، حيث V تكون بالاتجاه العمودي على السطح.



الشكل (٣–٥): يمثل الاحداثيات والكميات التي تصنف الدولاب الدوار.

الشكل(٣–٥) يوضح الاحداثيات والكميات الأخرى المستخدمة في وصف دولاب الموازنة، يمثل النتوء المستدير النصفي المحدد بين أنصاف أقطار r و $r + dr$ المستخدم في تقييم الضغوط في اتجاه الخط العمودي للقطع).

٣-٣-١: قرص الاجهاد الثابت(The Constant Stress Disc)

لأجل تدوير متماثل (منتظم) بسرعة زاوية ثابتة(ω)، فان التعجيل في الجهة اليسرى من المعادلة (٣-٦) يكون قطري ويعطى بشكل$r\omega^2$ وبمسافة r من المحور. باهمال قوة الجذب، تكون القوة الطاردة المركزية متوازنه مع الاجهادات الداخلية ليخفف التوازن. حيث ان ايجاد الشروط اللازمة التي تكفل بان تتحمل جميع اجزاء المادة الاجهاد المسلط عليها وان هذا الاجهاد مساويا لاجهاد التجربة او اقل منه. وقد يتبع أحدها ليجد ان ظروف الاختبار تحدد بنفس قيمة اجهاد التجربة τ حيث τ تساوي قوة الشد σ أو احد مركباته لأجل الحصول على عامل سلامة (امان). عندها تستنفذ المادة اقصى طاقة مخزونة لديها لتكون الحد الذي يمكن انجازه باستخدام خواص المادة المعطاة.اذا اخذنا الحجم V المغلق بين نصف القطر r و $r + dr$ وبين الزاوية المركزية $\theta = -x/2$ و $\theta = x/2$ مع العرض الكامل $b(r)$ و $b(r + dr)$، فأن التوازن بين القوة الطاردة المركزية والجهد الداخلي يمكن الحصول عليها من المعادلات (٣-٦) و(٣-٧) ونحصل على المعادلة (٣-٨) على التوالي

$$\rho^2 r\,\omega^2 b(r) r\,dr = \tau^2((r + dr)b(r + dr) - rb(r) - b(r)\,dr) \quad \ldots (3\text{-}8)$$

إن العامل على الطرف الايمن من المعادلة (٣-٨) يشتق من الجهد النصف قطري.

في حين أن العامل الأخير يمثل الجهد التماسي على المقاطع الحلقية المحدبة المذكورة في الشكل (٣-٥) ان dr في المعادلة (٣-٨) قد تكتب من جديد بالشكل:

$$\rho^3 r^2 \omega^2 b(r) = \tau r\,db(r)/dr \quad \ldots (3\text{-}9)$$

ان سمك القرص الذي يؤول إلى الجهد الثابت ممكن إيجاده من المعادلة التالية

$$(r) = b.\ \exp(-1/2\ \rho r^2\omega^2/\tau) \quad \ldots (3\text{-}10)$$

مما يذكر بأن الشكل الأفضل هو قرص ممتد غير محدود ذي سمك أسي صغير.

٣-٣-٢: أشكال الدواليب الطائرة الاخرى (Other Flywheel Shapes)

يمكن دراسة المنهج المستخدم اعلاه بشكل اعمق. فبدلا من افتراض جهد ثابت، نفترض أن شكل دولاب الموازنة معرف $b(r)$ فعندما تكون المادة متجانسة والشكل متماثل حول محور الدوران ومثال على ذلك الانعكاس في جناح الطائرة منحدرة نحو المحور.

يمكن حساب الجهد كدالة لسرعة الدوران الزاوي ω. فأن هناك مركبتين للجهد يمكن دراستها، المركبة الاولى تكون باتجاه القطر وتسمى بالجهد القطري $\tau_r(r)$ والمركبة الاخرى تسمى بالجهد المماسي $\tau_r(r)$ وتعتمد فقط على المسافة r من محور الدوران. إن مكونات الجهد الموازية لمحور الدوران يمكن اهمالها. وعند دراسة نصف القبة كما في الشكل٣-٥، قد تكتب القوى العمودية على مقطع القبة كما في المعادلة (٣-١١):

$$\rho^2 r^2 \omega^2 b(r) r\, dr = 2(\tau_r((r+dr)b(r+dr)(r+dr) - r\,\tau_r(r)\,b(r) - \tau_t(r)\,b(r)\,dr) \quad \ldots (12\text{-}3)$$

dr عند ترتيب المعادلة اعلاه تنتج المعادلة، وهذا يعطي

$$\tau_t(r) = \rho r^2 \omega^2 + \tau_r(r) + d\,\tau_t(r)/dr + r\,\tau_r(r)\,db(r)/b(r)dr) \quad \ldots (11\text{-}3)$$

هذه معادلة واحدة تربط الجهد التماسي بالقطري. ولأجل تحديد الجهد يجب أيجاد علاقة ثانية. هذه العلاقة تربط بين الجهد والشد وتتطابق مع قانون هوك للمرونة. يقدم الشكل المعدل لوحدة البارامتر ε ، و ε للامتدادات التماسية والنصف قطرية بالتناسب

$$2\pi\Delta r = 2\pi\varepsilon_{tr} \quad \ldots (13\text{-}3)$$

$$d(\Delta r)/dr = \varepsilon_r = \varepsilon_t + r\,d\varepsilon_t/dr \quad \ldots (14\text{-}3)$$

حيث تعطي المعادلة الأولى(٣-١٣) الامتداد المماسي للقبة النصفية المحددة بين r و r + dr (انظر الشكل٣-٥) وتعطي المعادلة (٣-١٤) الامتداد النصف قطري الضمني. عندها ممكن كتابة علاقات الجهد – الشد.

$$\varepsilon_t(r) = \gamma^{-1}(\tau_t(r) - \mu\tau_t(r)) \quad \ldots (15\text{-}3)$$

$$\varepsilon_r(r) = \gamma^{-1}(\tau_r(r) - \mu\,\tau_t(r)) \quad \ldots (16\text{-}3)$$

حيث ان حركة الجهد y تسمى معامل يونك، m نسبة بواصون حيث (هي النسبة بين γ والكمية المتناسبة z لقياس قوة التمدد في الاتجاهات العمودية باتجاه الجهد. إزالة التشوهات من (٣-١٤) – (٣-١٦) يمكن الحصول على علاقة جديدة بين الجهد:

$$(1+\mu)(\tau_r(r) - \tau_t(r)) = rd\,\tau_t(r)/dr - r\mu/d\tau_r(r)/dr \quad \ldots (17\text{-}3)$$

إن تعويض(٣-١٦) إلى (٣-١٧) لاشتقاق معادلة تفاضلية لتحديد نتائج $\tau_r(r)$ وأن الحل يعتمد على خواص المواد خلال m, y, p وحالة الدوران خلال w وحالما يتحدد الجهد النصف قطري فأنه ممكن تخمين الجهد التماسي من المعادلة في(٣-٦).

كمثال اعتبر أن القرص المسطح للذراع r_{max} بفجوة مركزية لنصف القطر r_{min}' في هذه الحالة مشتقات $b(r)$ تختفي وأن حل (٣–١٢) و (٣–١٧) سيكون:

$$\tau_r(r) = (3+\mu)\rho\omega^2(r_{min}^2 + r_{max}^2 - r_{min}^2 r_{max}^2/r^2 - r^2)/8 \quad \ldots (18-3)$$

$$\tau_r(r) = (3+\mu)\rho\omega^2 (r_{min}^2 + r_{max}^2 + (r_{min}^2 r_{max}^2/r^2 - (1+3M) r^2/(3+M)/8$$

عند ارتفاع الضغط النصف قطري من الصفر عند الحافة الداخلية، يصل إلى حد أقصى عند $r = r_{min}^2 r_{max}^2$ وثم تضمحل إلى صفر عند الحافة الخارجية. وأن الضغط التماسي عند أقصى حد عند الحافة الداخلية يضمحل تدريجياً. تزداد قيمة الضغط النصف قطري لمعظم قيم البراميتر النسبية (μ هي حوالي ٠،٣ مثاليا).

إن مقارنة معادلة (٣–٢) مع معادلة (٣–١٢) وتعبير I ممكن ملاحظة أن كثافة الطاقة w في (٣–٤) ممكن تحصيلها بعزل الفقرة المتناسبة مع w^2 في (٣–١٢) ومضاعفتها الى بـ $1/2r$ والتكامل على r. إن تكامل الفقرات المتبقية مكون الضغط عليه يمكن استخدام التعبير الآتي:

$$W/M = \sigma k_m / P \quad \ldots (19-3)$$

حيث ان (M) كتلة دولاب الموازنة الكامل و (P) هوالضغط الأقصى قارن مع معادلة (٣–٥) تدعى k_m عامل الشكل ويعتمد فقط على التصميم الهندسي فإذا كانت كل الضغوط متساوية كما في "قرص الضغط المستمر" كما موضح في مثال القرص المسطح المؤشر في الشكل (٣–١٨) فلا يمكن تحليل عوامل خواص المادة والهندسة عموما. لكن ممكن استخراج الضغط الأعلى الوارد في دولاب الموازنة كما في (٣–١٩) ولأجل ان تكون الكمية k_m بلا أبعاد والتي تستخدم لوصف هيكل دولاب الموازنة.

يمكن الآن قراءة التعبير من المعادلة (٣–١٩) بالطريقة التالية: بإعطاء ضغط عالي مقبول σ فأن هناك كثافة خزن طاقة عليا في (٣–١٩)، لا تعتمد على w وهي الاعلى قيمة للمواد الخفيفة ولضغوط تصميم كبيرة σ اذ يتم انتقاء ضغط التصميم بصورة مثالية لتحقيق عامل أمان لقوة توترية. وإذا تم استخدام القوة التوترية نفسها في (٣–٢) فممكن الحصول على الحد الأعلى الفيزيائي لخزن الطاقة واستخدام (٣–٢) فأن التعبير يعطي القيمة الأعلى w تحقق عدم فشل دولاب الموزانة من خلال الابتعاد عن التشوه اللدن.

٣-٣-٣: أداء دولاب الموازنة (Fly Wheel Performance)

توجد بعض ألامثلة عن أشكال دولاب الموازنة وعوامل الشكل المحسوبة تصميمياً والمتطابقة مع قيم k_m في الجدول(٣-٢). لدى قرص الامتداد ذو الشد المستمر عامل شكل وحدة نظري، عملياً يمكن ان يحدد بحيث تكون قيمة k_m بحوالي ٠،٨ ولدى القرص الصلب المسطح عامل شكل بـ ٠،٦ لكن إذا تم عمل ثقب في الوسط فأن القيمة تقل إلى حوالي ٠،٣ فأن لدى عامل شكل ذو حافة خفيفة لا نهائية ٠،٥، وواحدة محددة حوالي ٠،٤ وقضيب نصف قطري أو فرشاة منشورة (قارن مع الشكل٣-٥) لديها k_m بما يعادل الثلث.

الجدول (٣-٢): عوامل شكل دولاب الموازنة.

الشكل	shape	k_m
قرص الاجهاد الثابت	Constant stress disc	1
قرص صلب مسطح	Flat, solid disc (μ=0.3)	0.606
قرص مسطح بفجوة مركزية	Flat disc with center hole	~0.3
حافة رقيقة	Thin rim	0.5
قضيب شعاعي	Radial rod	1/3
فرشاة دائرية او مدورة	Circular brush	1/3

طبقا إلى (٣-١٩) فأن العوامل الأخرى المحددة لكثافة الطاقة القصوى هي الشد الأقصى والكثافة الارتكازية في حالة المادة المتجانسة. يعطي الجدول (٣-٣) قوى الشد / أو ضغوط تصميم بضمنها عامل الأمان وكثافات لبعض المواد التي تستخدم في تصميم دولاب الموازنة.

وللأغراض الذاتية الحركة قد يتم الاعتماد على المواد ذات القيم σ / p الأعلى في التطبيقات المستقرة فأن الوزن والحجم تعتبر أقل أهمية وتصبح كلفة المادة الواطئة عاملا رئيسيا، وهذا هو سبب دراسة المادة السليلوزية. أحد الأمثلة هو أقراص الخشب الرقائقي حيث يتم تجميع القرص من طبقات ثنيات أحادية الاتجاه كل باتجاه مختلف.

باستخدام معادلة (٣-١٩) بقوى أحادية الاتجاه فيجب تقليل عامل الشكل بعامل ٣.

مثال آخر في هذا التصنيف هو دولاب موازنة مخطوطة الورق أي أشكال أسطوانية ومجوفة حيث يكون عامل الشكل هو

$k_m = (1+r_{min}/r_{max})/4$ وستكون كثافة الطاقة الخاصة حوالي $15\ kjkg^{-1}$ لبناء الخشب الرقائقي.

الجدول (٣–٣): خواص بعض المواد المستخدمة لدواليب الموازنة.

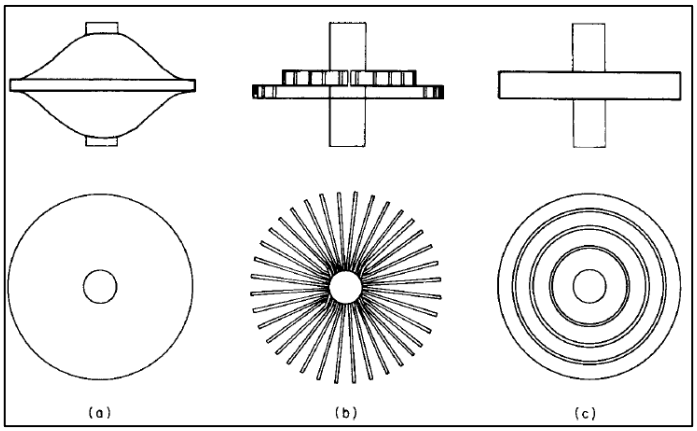
Material		الكثافة (قوة الشد) Density ($kg\ m^{-3}$)	مقاومة شدة الشد Tensile strength	الاجهاد المصمم Design stress ($10^6\ Nm^{-3}$)
خشب رقائقي	Birch plywood	700	125	30
سبيكة الالمنيوم	"Super–paper)	1100	335	
فولاذ طري	Aluminium alloy	2700	500	
الفولاذ المسلط	Mild steel	7800		300
زبيكة التيتانيوم	Maraging steel	8000	2700	900
ليف الكاربون	Titanium alloy	4500		650
ليف كأي–E	Carbon fibre (40%epoxy)	1550	1500	750
ليف كأس–S	E–glass fibre (40%epoxy)	1900	1100	250
ليف كيفلر	S–glass fibre (40%epoxy)	1900	1750	350
	Kevlar fibre (40%epoxy)	1400	1800	1000

قد تستخدم المواد ذات الاتجاه الواحد في التوزيع الهندسي لدواليب الموازنة المذكور في المعادلة (٣–١٩) بحيث الضغوط التماسية تكون مفقودة.

عموماً أن دواليب الموازنة المصنوعة من الشعيرات لديها فوائد فيما يخص الأمان لأن التفتت لعدد كبير من الخيوط المنفردة يجعل احتواء الفشل سهلا. قد تفشل دواليب الهواء الصلبة ذات الاجزاء الكبيرة عند استخدمها في الهواء الطلق لكن قد توضع تحت الأرض لاستخدامات مستقرة.

ليست جميع أشكال الضغط المستمر (قارن المعادلة ٣–١٩أ) كالحجم تكون كفوءة كألاقراص المسطحة. لذلك لكي يتم دراسة دواليب موازنة مركبة كالنوع الظاهر في المعادلة (٣–١٩). يتم فصل الحلقات المسطحة ذات العلاقة بمقياس المرونة الذي قد يزيل ضغوط الكسر عندما يصنع الدوران تمددا تفاضليا للحلقات المتاخمة. كل حلقة يجب أن تصنع من مادة مختلفة عن الاخرى لأجل حفظ الاختلافات في الضغط ضمن فاصل صغير. ممكن اشتقاق توزيع الضغط

داخل كل حلقة من التوضيحات المبينة في (٣–١٩) بافتراض ان مقياس المرونة يحدد بدقة اي تداخل بين الحلقات.



شكل (٣–٦): يمثل اشكال مختلفة من الدواليب الدوارة. الخط الاعلى يعطي منظرا جانبيا والخط الاسفل يعطي منظر سطحي.

وبصورة تبادلية ممكن معاملة مقاييس المرونة كحلقات إضافية وممكن عند تطبيق ظروف الحدود المناسبة قد تحصل دواليب الموازنة من النوع المذكور أعلاه على كثافات طاقة تصل إلى $200\ \mathbf{kjkg^{-1}}$ لكن المشكلة هي حماية الطاقة هذه من الفقدان الاحتكاكي، بحيث تكون سرع الدوران مثاليا (٣ – ٥) دورة كل ثانية. وأن الحل الشائع هو تشغيل دولاب الموازنة قرب الفجوة وتجنب أي نوع من أسطح الارتكاز الميكانيكية. وأصبح مؤخرا التعليق المغناطيسي ملائما للوحدات التي تصل إلى حوالي ٢٠٠ تسلا باستخدام حجر مغناطيسي دائمي مصنوع من مركبات الكوبالت النادرة الوجود في الأرض او من المغانط الكهربائية. ولأجل الحصول على مدخلات ومخرجات الطاقة يتم ادخال مولد يعمل بواسطة محرك بين مجموعة النوابض المغناطيسية ودوار دولاب الموازنة. فإذا تم وضع المحرك داخل الفجوة فمن المفضل أن يكون بلا فرشاة. ولأجل تطبيقات مستقرة فقد يتم تجنب حدود الوزن. قد يشتمل دولاب الموازنة على دولاب ذي إطار دوار أفقيا وأبعاد ووزن كبيرين بحيث ممكن تحقيق كثافات طاقة بحوالي $3000\ \mathbf{kjkg^{-1}}$ باستخدام مركبات السليكا المصهورة (قارن ألياف الجدول٣–٣).

٣-٤: خزن الغاز المضغوط(Compressed Gas Storage)

تتميز الغازات بقابلية انضغاط عالية واكثر بكثير من المواد الصلبة و السائلة. لذلك استخدمت الاوساط الغازية في تطبيقات خزن الطاقة المرنة على مقياس واسع.

عندما تكون كمية الطاقة المخزونة صغيرة نوعا ما عندئذ تستخدم الحاويات الفولاذية في عملية خزن الغاز المضغوط كتلك التي تستخدم في خزن الهواء المضغوط والشائع استخدامها في ابراج الاتصالات. في هذه التقنية يتم تثبيت الحجم وكمية الطاقة المخزونة مع ثبوت درجة حرارة وضغط الغاز. اذا عومل الهواء على انه غاز مثالي فان الضغط (الديناميكي الحراري) ودرجة الحرارة والحجم ترتبط وفق قانون بويل بالمعادلة الاتية:

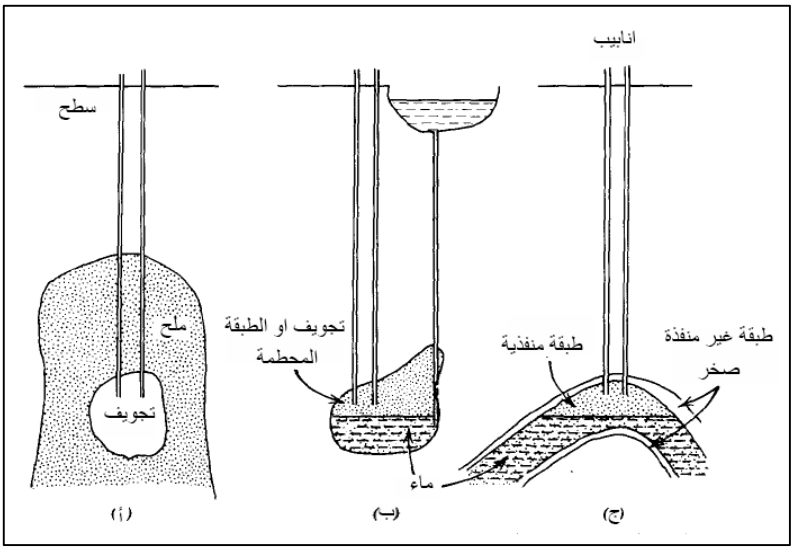
$$PV=nRT \qquad \dots (20-3)$$

V هو الحجم الذي يشغله الهواء، و $R=$ الثابت العام للغازات $80315\,JK^{-1}mole^{-1}$ ان الضغط P الذي يمثل الشد على جانبي المكعب المرن المضغوط (والاشارة المعكوسة تدل ان الضغط يعاكس الشد) عموما الضغط يعادل $P-$ زائدا الشروط المعتمدة على اللزوجة. قد يكون الصهريج الفولاذي على شكل اسطوانة تحتوي على مكبس يعمل على تسليط ضغط مناسب على الاوزان الجزيئية للغازات المضغوطة كالهواء، لذا فان الهواء المضغوط الناتج عن الكبس بضغط قياسي ودرجة حرارة المحيط وهذا يعني وجود قوة خارجية Fx مسلطة على المكبس لذا يتناقص الحجم من V_1 الى V_2 وتكون كمية الطاقة المخزونة هي:

$$W=A\int_{x.}^{2} f_x\, d_x = -\int_{v_0}^{v} pdv \qquad \dots (21-3)$$

حيث A هي مساحة المقطع العرضي للاسطوانة X_2، X_1هي احداثيات المكبس التي تتطابق مع V وV_0 وان P هو ضغط الهواء المحصور. تم اكتشاف تجويفات في باطن الارض, ودراسة امكانية استخدامها كخزانات غازية كبيرة ذات سعة كبيرة لخزن الطاقة. هنالك ثلاثة انواع من هذه التجويفات تمت دراستها وهي القباب الملحية وتجويفات في تشكيلات الصخور الصلبة وطبقات صخرية مائية. قد تتشكل التجويفات في الرواسب الملحية من خلال تدفق الماء خلال طبقات الملح. قباب الملح هي رواسب ملحية ترتفع للاعلى باتجاه السطح وبذلك تتشكل الفجوات اللاحقة باعماق معتدلة. قد تكون الفجوات الصخرية اما طبيعية او مجوفة وتكون الجدران مغلقة باحكام لضمان ضغط الغازات داخلها اما اذا كانت الفجوات مجوفة فتكون باهضة الكلفة واكثر من

كهوف الملح. تسمح الطبقات الصخرية المائية وهي طبقات ذات نفاذية عالية بتدفق الماء تحت الارض على طول الطبقة. ولاجل تحديد مجرى المياه للطبقة الصخرية المائية لا بد من وجود طبقات ذات نفاذية قليلة او معدومة فوق وتحت الطبقة الحاملة للماء. تكون الطبقات الصخرية المائية باعماق مختلفة وتتكون هناك مناطق مرتفعة قليلا حيث تصبح كمية هواء معينة مسحوبة بدون تدفق المياه، الشكل (٣–٧) يوضح الطبقات المختلفة و اشكال التجاويف.



الشكل (٣–٧) يوضح الطبقات المختلفة واشكال التجاويف أنواع خزن الهواء المضغوط تحت الأرض (أ) الخزن في تجويف ملحي، (ب) خزن صخري بصهريج سطح تعويضي، (ج) خزن طبقة صخرية مائية.

يوضح الشكل (٣–٧) اشكال خزن الهواء تحت الارض: (أ)الملح و (ب)الصخر و(ج)خزن الطبقة المائية الصخرية. في كل الحالات، اختيار الموقع والتهيئة هي عملية حساسة تماما. برغم ان الطبيعة الجغرافية للمنطقة معروفة، فان خواص التجويف التفصيلية لاتصبح كاملة حتى انتهاء الانشاء. ان استقرارية التجويف الملحي لاتحدد على التوقعات المعتمدة على تحليل عينة واختبارات الضغط عند تنقيب جزئي. من غير الواضح ثبات الكهف الصخري الطبيعي او المنطقة المحطمة بالمفرقعات او الطرق الهيدروليكية حتى يتم اجراء اختبارات ضغط بمقياس كامل حقيقي. وبالنسبة للطبقات الصخرية المائية ممكن عمل قياسات نهائية النفاذية فقط عند عدد محدد من الاماكن ولكن تبقى المفاجات محتملة بسبب التغير المنفذي السريع على الازاحات الصغيرة. يتاثر ثبات مغارة معينة بالسمات التصميمة التي ستتحدث عنها عملية نظام خزن الهواء المضغوط خصوصا عند تباين درجة

الحرارة والضغط. من الممكن حفظ درجة حرارة جدار المغارة ثابتة تقريبا اما بتبريد الهواء المضغوط قبل تركه في المغارة او بتسليط الضغط ببطء شديد حيث ترتفع درجة الحرارة فقط الى مستوى مناسب لجدران المغارة. التقنية الاخيرة غير عملية (ضغط بتساوي درجات الحرارة) لمعظم التطبيقات لان الطاقة الفائضة يجب ان تكون عند معدل سريانها. معظم الانظمة تتضمن واحدة او اكثر من خطوات التبريد. فيما يخص مشكلة التباين في الضغط وعند خزن كميات مختلفة من الطاقة فالحل هو خزن الهواء المضغوط بضغط ثابت لكن بحجوم متنوعة. في هذه الحالة اما ان يكون حجم الخزن ثابت وبذلك فيجب ان يتباين كما في خزن الطبقات الصخرية المائية (عند استبدال كميات متباينة من الماء) او يجب ربط المغارة تحت الارض بمستودع مفتوح كما في الشكل (٣-٧ ب) لكي يحافظ عمود الماء على كميات الهواء المتغيرة تحت ضغط متوازن ثابت عند عمق المغارة. هذا النوع من نظام خزن الطاقة مع سحب يحدث خلال توربين سحب الهواء اكثر من توربين سحب الماء.

٣-٥: الخزن بثبوت درجة الحرارة (الادياباتيكي) (Adiabatic Storage)

تصور تشغيل منظومة من نوع الضغط المتباين، فيكون ضغط الهواء المحيط بالنظام تقريبا يتغير بعملية اديباتيكية (ثابتة الحرارة) اي بدون تبادل الحرارة مع المحيط. يمثل الرمز (γ)النسبة بين المشتقات التفاضلية الجزئية للضغط الى الحجم عند ثبوت الانتروبي ودرجة حرارة وكما في المعادلة التالية.

$$(\partial P/\partial V)_s = \gamma(\partial P/\partial V)_T \quad \ldots (22-3)$$

يعطى قانون الغاز المثالي بالعلاقة التالية:

$$(\partial P/\partial V)_T = -P/V \quad \text{عند ثبوت } \gamma \quad (23-3)$$

$$PV^{\gamma} = P.V^{\gamma}. \quad \ldots (24-3)$$

عند ثبوت كل من الضغط والحجم عندئذ تكون القيم على يمين المعادلة ثابتة. عندما يكون الهواء بضغط ودرجة حرارة المحيط، تكون $\gamma = 1.40$ وهذه القيمة تقل بازدياد درجة الحرارة وتزداد بازدياد الضغط لذا فان المعادلة (٣-٢٣) ليست ملائمة بالكامل للهواء. عند ثبوت الضغط ودرجة الحرارة المتعلقة بالتطبيق العملي لخزن الهواء المضغوط فتتراوح قيمة γ بأقل من $\pm 10\%$ من قيمتها المتوسطة.

بتعويض(٣-٢٢) في (٣-٢٣) فسنحصل على كمية الطاقة المخزونة

$$W = -\int_{v.}^{v} P.\left(\frac{v.}{v}\right)^{\gamma} dv = \frac{p.v.}{\gamma-1}\left(\left(\frac{v.}{v}\right)^{\gamma} - 1\right) \quad \ldots (25-3)$$

او بالتبادل

$$W = \frac{p.v.}{\gamma-1}\left(\left(\frac{p}{p.}\right)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1\right) \quad \ldots (26-3)$$

وبدقة اكثر يكون العمل المطلوب للضغط الادياباتيكي لحجم الهواء الابتدائي لهذه العملية هو تسخين الهواء من درجة حرارته الابتدائية .$T.$ الى درجة الحرارة T التي يمكن ايجادها باعادة كتابة (٣-٢٦) كما في شكل التالي

$$T/T. = PV/(P.V.) \quad \ldots (27-3)$$

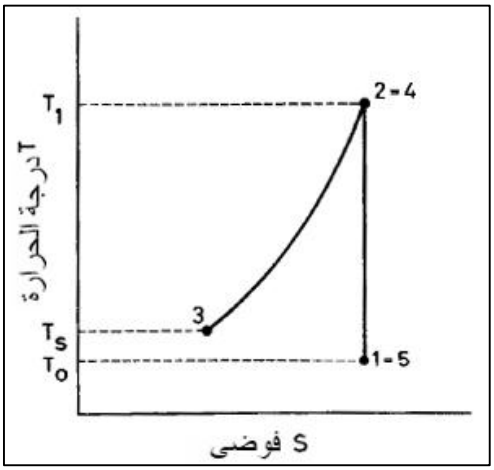
وبتطبيق الشرط الادياباتيكي

$$T = T.\left(\frac{P}{P.}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad \ldots (28-3)$$

ان نسبة الضغط المرغوبة في التطبيقات العملية ربما تكون اكثر من$P/P. = P.V.$ ، فمن الممكن ان نتوقع ان تكون درجات الحرارة العظمى تفوق المقدار ١٠٠٠ كلفن. وان اي تغير بدرجات الحرارة سوف يكون غير مقبول لمعظم انواع المغارات (الفجوات) المعروفة وان الهواء عندئذ سيبرد قبل نقله الى الفجوة. درجات حرارة المحيط للخزن تحت الارض يكون مثاليا حوالي ٣٠٠٠ كلفن لقباب الملح واعلى احيانا للخزن في مكونات جيولوجية اعمق. ومما تجدر الاشارة يمكن ازالة الحرارة عتد درجة حرارة T_{sf} عند تبريد الهواء الى T_s عند كميات ضغط ثابتة وكما في المعادلة الاتية:

$$H = C_p(T - T_S) \quad \ldots (29-3)$$

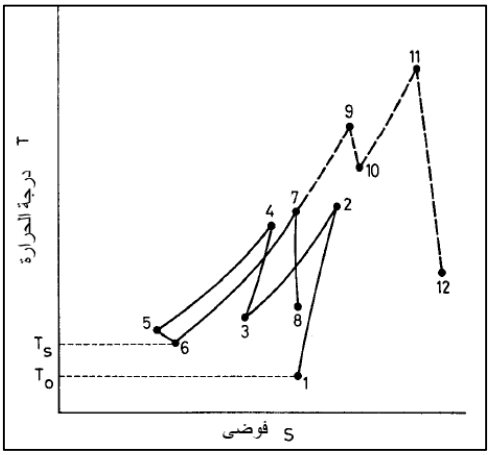
حيثC_p هي سعة الحرارة النوعية عند ضغط ثابت. يمكن ازالة الحرارة بشكل مثالي وحفظها بمخزن طاقة معزول حراريا بشكل جيد لكي نستطيع اعادة تسخين الهواء متى ما اخذت من المغارة لانجاز شغل من خلال تمدد التوربين مع انخفاض الضغط المرافق الى ضغط محيط العمل($P.$)، نظرا الى انها عملية ديناميكية حرارية في مخطط (T,S) انتروبي- درجة الحرارة فان الخزن وعمليات الاعادة في الحالة المثالية. تقودنا العملية الى الرجوع الى نقطة الانتهاء بالاشارة الى ان دورة الخزن هي بلا خسائر تحت الظروف المثالية المفترضة الى الان.



الشكل (٣–٨): عملية تشغيل مثالية لنظام خزن الهواء المضغوط اديباتيكيا.

اشواط التعبئة (العمل) (١–٢) ضغط اديباتيكي (٢–٣) بتبريد ثابت ويكون الضغط عند درجة حرارة المغارة. خطوات تفريغ الحمل كما في الخطوة (٣–٤) تسخين متساوي الضغط كما في الخطوة (٤–٥) يتبعها تمدد اديباتيكي خلال التوربين. يتبع المخطط كمية هواء معينة في حين ان مخزن الطاقة الحراري النهائي هو خارجي "للنظام" تحت الدراسة .T هي درجة حرارة محيط السطح، T_1هي درجة الحرارة بعد تسليط الضغط و T_s هي درجة حرارة المغارة.

عمليا، لدى الضاغطة خسارة (٥–١٠%) اي لا تستخدم كل مدخول الطاقة (طاقة كهرباء او طاقة ميكانيكية) لانجاز الشغل على الهواء. البعض يفقد بالاحتكاك على شكل حرارة. لايمكن ازاحة جميع الحرارة بعملية التبريد وايصالها لاعادة تسخين الهواء. يكون التبادل الحراري محدوداً ويمكن فقدانه من خلال خزين الطاقة الحرارية خلال الفترة الزمنية الفاصلة بين التبريد و اعادة التسخين، واخيرا فان الهواء المفرغ من التوربينات تكون درجة حرارته وضغطه اعلى من الظروف المحيطة. ومثاليا يكون مجموع الفقدان الحراري في التوربين بحدود٢٠% من مقدار الطاقة الداخلة عند ضغط اعلى بسبعين مرة من ضغط محيط العمل واذا كان مقدار الخسارة الحرارية اقل من ١٠% فان كفاءة دورة الخزين الكلية سوف تكون بحدود ٦٥%.



(الشكل ٣–٩): يمثل تشغيل انظمة خزن الهواء المضغوط مع فقدان حراري محدد.

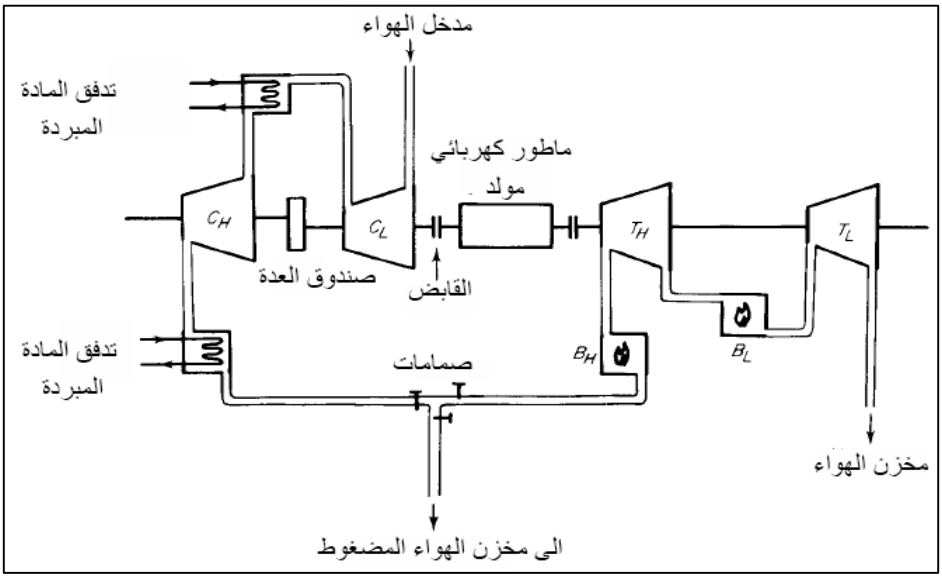
الخط المتصل يمثل مرحلتي انضغاط ومرحلتي تبريد بالنسبة الى درجة حرارة الهواء المخزون والخط المنقط يعتبر خط بديل يبدا من الخطوة ٧ الى الخطوة ١٢ وتتضمن مرحلتين وهي التسخين والتمدد والتي تتوافق مع الظروف التشغيلية في منشآت هانوفر في المانيا.

قد تبدو العملية في واقع الامر كما مؤشر في الشكل(٣–٩) الذي يمثل تغيرات درجة الحرارة مع الأنتروبي. فقدان الضاغط اثناء العملية الابتدائية ١–٢ يمثل الخط العمودي ليشمل زيادة في انترويبي علاوة على ذلك تقسم عملية الانضغاط الى مرحلتين (١–٢، ٣–٤) لتقليل درجات الحرارة القصوى. وبالمثل هناك خطوتي تبريد (٢–٣ و ٤–٥) يتبعها تبريد نهائي تدريجي يتم انجازه من قبل التجويف المحيط بالنظام (٥–٦). تتضمن عملية الاسترجاع في هذه الحالة خطوة واحدة وهي (٦–٧) باعادة التسخين باستخدام الحرارة المخزونة من عمليات التبريد (في بعض الحالات يتم توظيف اكثر من خطوة اعادة تسخين). اخيراً الخطوة (٧–٨) هي مرحلة التوربين التي تجعل الدورة مفتوحة بمنع وصول الهواء لدرجة الحرارة الابتدائية (والضغط) قبل مغادرة التوربين وتمتزج بالجو المحيط . تظهر مرحلة التمديد بعدة انحرافات اديباتيكية (بثبوت درجة الحرارة) مع زيادة الانتروبي كما موضح بالشكل (٣ –٢٠). بدايات استخدام الخزين المضغوط بكامل سعته منذ عام ١٩٧٨ في هانتورف في المانيا.وكان معدل الطاقة المنتجة بحدود **290 MW** وبمعدل حجم خزن ٣×١٠^{٥} متر مكعب. تلك العملية موضحة في الشكل (٥–٢١) وتتضمن المراحل (٧–٩–١٠–١١–١٢) حيث الخطوات (٧–٩ و ١٠–١١) تمثل عملية تسخين اضافية اساسها الوقود بينما

الخطوات (٩–١٠ و ١١–١٢) تؤشر عملية التمدد الحاصلة في التوربين. ولا يكون هناك استرداد للحرارة خلال العملية بل يكون لها مرحلتي تشغيل توربين اساسها الوقود متضمنة مرحلة تمدد نهائي وتحل محلها عند درجات حرارة اعلى من اية عملية تتضمن مراحل الانضغاط (كذلك عند اعلى ضغط)، واذا اضيف استرداد الحرارة كما في مشغل **110 MW** للشركة الكهربائية في الاباما منذ عام ١٩٩١ فان هذا سيدفع النقطة **V** الى الاعلى تجاه نقطة ٩ ونقطة ١١ تتحرك باتجاه ١٢ سوية لتمثل زيادة مدخول توربيني.

حساب الكفاءة سيتغير في حالة احتراق الوقود الاضافي، الحرارة الداخلة الاضافية ربما توضحها المعادلة (٣–٣٠) يصاحبها درجات حرارة مناسبة و مخزون حراري ابتدائي**H**. يمكن الحصول عليه بقسمة المخزون الحراري الابتدائي**H**. على الوقود اللازم لكفاءة التحويل الحراري وان الشغل الداخلي **Win** الى تغييرات الانضغاط في حالة ضاغط كفاءته تؤخذ من المعادلة (٣–٢٥).

$$W_{in} = \frac{P.V.}{\gamma-1}\left[\left[\frac{P}{P.}\right]^{(r-1)/(m_c)} - 1\right] \qquad \dots (30\text{–}3)$$



الشكل(٣–١٠): يمثل مخطط منظومة خزن هواء مضغوط في هانتورف، الضواغط مؤشرة بـ **C** والمواقد بـ **B** الرموز السفلية **H/L** تشير الى ضغط عال / واطيء.

ان الشغل الناتج من هواء التوربين المضغوط بضغط P_1 وحجم V_1 ويتم تفريغه بضغط P_2 وحجم المائع V_2، تحدد كفاءة التوربين من العلاقة (٣-٣٢) η_t هي

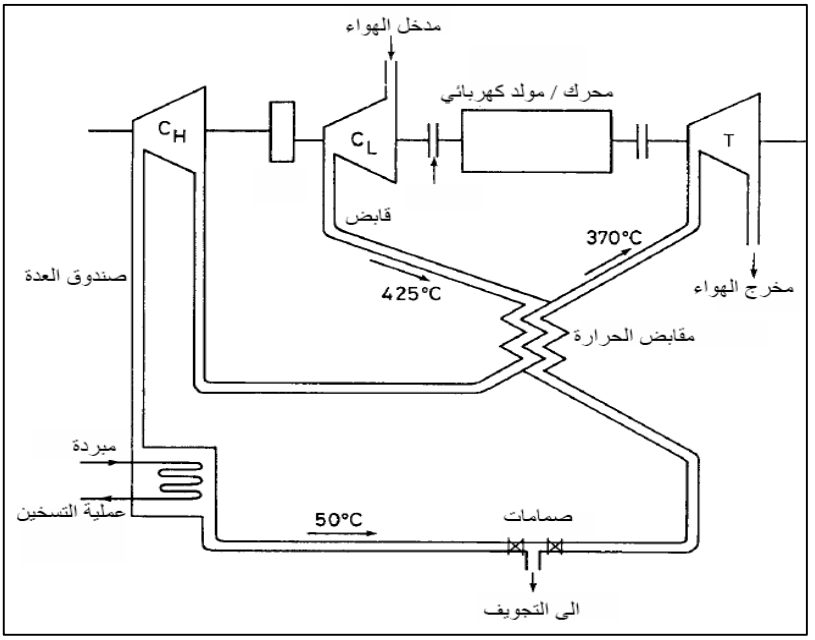
$$W_{out} = \frac{P_1 V_1}{\gamma - 1}\left[\left[\frac{P_2}{P_1}\right]\eta_t\,(\gamma - 1)/\gamma\right] \quad \ldots (31\text{-}3)$$

والان في حالة وجود ضاغط واحد فقط ومرحلة توربين واحدة فتكون كفاءة الدورة الكلية عدا ظهور η_t فقط في المعادلة (٣-٣١) والتي جاءة من اعادة ترتيب المعادلة (٣-٣٢) بضغط واحجام مناسبة يعاد كتابتها لضغوط وحجوم مناسبة.

$$\eta = W_{out}/\,(W_{in} + H.) \quad \ldots (32\text{-}3)$$

وفي حالة تركيب مخزن الهواء المضغوط الألماني المذكور سابقا فان η هي ٠,٤١ ومن الطبيعي فان الشغل الداخل الى الضاغط يشتق مباشرة او من خلال القدرة الكهربائية المجهزة W_{in} ربما يستبدل بالوقود الداخل W وكفاءة الوقود والتي تعرف بالمعادلة التالية:

$$\eta_{fuel} = W_{out}/\,(W. + H.) \quad \ldots (33\text{-}3)$$



(الشكل ٣-١١): يمثل مخطط منظومة خزن هواء مضغوط((متطورة)) مع استرداد حرارة بدون تجهيز وقود.

لو اخذنا W_{in}/W. تساوي فان ٠،٣٦ η_{fuel} للمثال تصبح ٠،٢٥ التي تمثل ٧١% من كفاءة التحول لانتاج الطاقة الكهربائية دون الاستعانة بالمخزن. يستخدم التركيب الالماني لتوفير طاقة ذروة على ايام الاسبوع ويشحن خلال الليالي و ايام العطل.

يمثل الشكل ٣–١٠ المخطط الفيزيائي للمنشأ الالماني ويمثل الشكل ٣–١١ مخطط تركيب اكثر تطورا بدون تجهيز وقود ليتطابق مع الطريقين المؤشرين في الشكل ٣–١١.

٣–٦: خزن الهيدروجين (Hydrogen Storage)

يمكن خزن الهيدروجين كالغازات الاخرى، يضغط الغاز في حاويات ملائمة قادرة على مواجهة انتشارية الهيدروجين العالية وكذلك المحافظة على الضغوط المطلوبة لجذب كثافة طاقة بمستويات مفيدة. ومع ذلك يمكن الهيدروجين الغازي الواطئ الكثافة باشكال خزن بديلة يتم التركيز عليها في الدراسة مثل الهيدروجين المسال والهيدروجين المصطاد داخل التراكيب المعدنية المهدرجة او انواع الانابيب النانوية الكاربونية الاخرى. الهيدروجين هو ناقل للطاقة ليس على شكل طاقة اولية. دورة خزن الهيدروجين تتضمن اذن من مصادر الطاقة الاولية والطاقة المستردة من عملية التحويل الثانية.

٣–٦–١: انتاج الهيدروجين (Hydrogen Production)

يكون انتاج الهيدروجين التقليدي بواسطة البخار المحفز للميثان (غاز طبيعي) او مع بخار الماء المشبع بالبانزين. تحدث هذه العملية عند٨٥٠ درجة مئوية وضغط ٢،٥× ١٠^{٦}بار وفق المعادلة الاتية:–

$$C_nH + n\,H_2O \longrightarrow nCO + (n + m/2)H_2 \qquad \ldots (3–34)$$

ولاحقا بواسطة التفاعل التحولي(الانجرافي)

$$CO + H_2O \longrightarrow CO_2 + H_2 \qquad \ldots (3–35)$$

يمكن ازالة CO_2 بواسطة غشاء فصل انتقائي او الامتصاص.ان الحرارة المنتجة في معادلة (٣–٣٣) لا تستخدم مباشرة في (٣–٣٤). للمواد الهيدروكاربونية الثقيلة التي تشمل غاز الفحم تستخدم عملية الاكسدة الجزئية والمستخدمة حاليا. انبثاق تقنية جديدة تكون على شكل قوس غازي من البلازما ترتكز على المنشأ الريادي يعمل بالغاز الطبيعي بدرجة ١٦٠٠م^{٥} الموجود في النرويج الذي يعمل على غاز طبيعي. فائدة هذه العملية هي خلط نواتج التفاعل (ضمن حدود الطاقة،

٤٨% هيدروجين، ٤٠% كاربون و ١٠% بخار ماء) وصولا الى تاثيرات بيئية قليلة الاثر. بما ان المنتجات الثلاثة الرئيسية مفيدة لنقل الطاقة وبكفاءة تحول هي ٩٨% ناقصا الطاقة المطلوبة للعملية. ان تحول الغاز الطبيعي الى كاربون غير مرغوب به. يستخدم البخار حقلياً في عملية التحول وبكفاءة ٤٨% وهي تكون مفيدة نوعاً ما. قد يتم انتاج الهيدروجين من كتلة احيائية بتخمير بايولوجي او بعملية غازية ذو درجة حرارة عالية مشابهة لتلك الموجودة في الفحم. وقد يتم انتاج الهيدروجين كهربائيا من الخلايا الشمسية او الطواحين الهوائية بواسطة التحليل الكهربائي التقليدي او بواسطة خلايا كهربائية انعكاسية القطبين، وتبلغ كفائتها حاليا حوالي ٧ ٠% وفوق ٩٠% على التوالي. يستخدم التحليل الكهربائي التقليدي الكتروليت قلوي مائي تنفصل الاقطاب الموجبة والسالبة برقائق مسامية صغيرة (لتحل محل رقائق الحرير الصخري السابقة)

$$H_{\gamma}O \longrightarrow H_{\gamma} + 1/2\ O_{\gamma} \qquad \ldots (36-3)$$

$$\Delta H = \Delta G + T\Delta S \qquad \ldots (37-3)$$

عند٢٥ درجة مئوية فان التغير في الطاقة الحرة هو$236KJmol^{-1}$ وسيتطلب التحليل الكهربائي اصغر كمية من الطاقة الكهربائية بحوالي$236KJmol^{-1}$ بينما يكون الفرق بين المحتوى الحراري والطاقة الحرة $\Delta H - \Delta G$، نظريا ممكن الحصول عليه من الوسط المحيط. ان محتوى طاقة الهيدروجين (المساوية لـ ΔH) هي $242KJmol^{-1}$ (قيمة تسخين اوطا) لذا ΔT يمكن ان تتجاوز ١٠٠% مع ذلك تم استخدام درجة حرارة عند ٢٥ درجة مئوية فان العملية سوف تزداد ببطئ. ان درجات الحرارة المستخدمة في المنظومات الفعلية تكون عالية جدا عندئذ ان التوازن الحراري يكون ايجابي وتاخذ دورة التبريد دورها في العمل. وهذه تمثل اهمية كبيرة للقطب عالي الفولتية سببها الرئيسي تاثيرات الاستقطاب. يمكن التعبير عن جهد الخلية V للتحليل الكهربائي بما ياتي:

$$V= V_T+V_a+V_c+R_j \qquad \ldots (38-3)$$

حيث Vهي جهد خلية عكوس. والفولتية الزائدة تقسم الى اجزاء القطب السالب والموجب Vaو Vc وان التيار j , R هي المقاومة الداخلية للخلية. تمثل الفقرات الثلاثة الاخيرة في (٣-٣٦) الخسائر الكهربائية وكفاءة الفولتية ηvللمحلل الكهربائي الذي يعمل بالتيار الذي يعطى jكما في المعادلة الاتية :-

$$\eta_u = V_r/V. \quad \ldots (39-3)$$

وحيث الكفاءة الحرارية هي :

$$\mu_c = \Delta H/\Delta G = |\Delta H/\mu_c V| \quad \ldots (40-3)$$

مع ثابت فاراداي = ٩٦٤٩٣ كولوم mol^{-1} و n عدد الحجوم المنتقلة خلال مرحلة التفاعل الكهروكيميائي والمرتبط بـΔG.

بذلت جهود لزيادة الكفاءة الحالية باكثر من ٥٠ الى ٨٠% (لمحلل كهربائي صغير الى كبير) بزيادة درجة حرارة التشغيل واكمال مواد القطب الكهربائي وتصميم الخلية؛ في تلك الحالة يجب ان تكون الكلف الاضافية اقل مما هي عليه للمحللات الكهربائية ذات الحالة الصلبة، التي هي اصلا خلايا كهربائية تعمل بطراز عكوس اي باستخدام الطاقة الكهربائية لانتاج الهيدروجين والاوكسجين من الماء. واذا كانت نفس خلية الوقود تسمح بالتشغيل بكلا الاتجاهين حينئذ تسمى خلية وقود عكوسة. اما الطريق الثالث لانتاج الهيدروجين من الماء هو التحليل الحراري للماء. وبما ان التحلل الحراري المباشر لجزيئة الماء يتطلب درجات حرارة تفوق ٣٠٠٠ درجة مطلقة وهو غير ممكن مع المواد المتوفرة حاليا، فان هناك محاولات لانجاز التحلل الحراري دون ٨٠٠ درجة مئوية بطريقة غير مباشرة باستخدام عمليات كيميائية دورية. مثل هكذا عمليات كيمياء–حرارية او دورات فصل الماء يتم تصميمها اساسا لتقليل درجة الحرارة اللازمة للتفاعل الى اقل قيمة ممكنة كالتي في المفاعلات النووية ولكن بالامكان طبعا اسخدام تقنيات توليد حرارية بحدود ٤٠٠ درجة مئوية. وكمثال على هذا التفاعل ثلاثي المراحل مايلي:

$$\left.\begin{array}{ll} 6FeCl_2 + 8H_2O \rightarrow 2Fe_3O_4 + 12HCl + 2H_2 & (85\ ^\circ C) \\ 2Fe_3O_4 + 3Cl_2 + 12HCl \rightarrow 6HCl + 6FeCl_3 + 6H_2O + O_2 & (200\ ^\circ C) \\ 6FeCl_3 \rightarrow 6FeCl_2 + 3Cl_2 & (420\ ^\circ C) \end{array}\right\} \quad (41-3)$$

يتطلب التفاعل الاول درجة حرارية عالية مع وجود حاجة تجهيز طاقة اضافة الى مشكلة تآكل المواد. ان البحث لا زال بعيدا عن انشاء تقنية عملية. لتفكك الماء ضوئيا الموضحة سابقا. وهناك محاولات عديدة لتكرار او اعادة عملية التفاعل الضوئي الطبيعية باستخدام مواد شبه موصلة واغشية لفصل الهيدروجين والاوكسجين بنيت بتطبيقات ضوئية. لحد الان لا يوجد برنامج تفاعل

قابل للتطبيق اما بالتفكيك الضوئي الاصطناعي او بعمليات التهجين باستخدام مفاعلات كيميائية وحرارية تتضمن عملية انتاج الهيدروجين ازالة الغبار والكبريت اضافة الى الملوثات الاخرى اعتمادا على مصدر المواد المستخدمة (مثلا CO_2 اذا كانت المادة البايولوجية هي المصدر).

٣-٦-٢: اشكال خزن الهيدروجين (Hydrogen Storage Forms)

ترتبط الاشكال المتعلقة بخزن الهيدروجين مع خواص الهيدروجين الفيزيائية، مثل كثافة طاقة الهيدروجين وفق هيئات خزنه كما في الجدول (٣-٤) والذي يتضمن خواص غاز الهيدروجين ومقارنته بغازات اخرى مثل الميثان، البروبان والبنزين. انتشارية الغاز العالية لها دلالة ضمنية مع هيكل الصهريج ومع مدى اللهب / الانفجار لكل التطبيقات الصناعية.

الجدول (٣-٤): يمثل اشكال الهيدروجين والمحروقات الأخرى ذات العلاقة بالامان.

property		Unit	Hydrogen	Methane	Propane	Casoline
الطاقة الأوطأ للاشتعال	Minimum energy for ignition	$10^{-3}J$	0, 02	0, 39		0, 24
درجة حرارة اللهب	Flame temperature	◦C	2045	1875		2200
درجة حرارة الاشتعال الثاني في الهواء	Auto-ignition temperature in air	◦C	585	540	510	230-500
سرعة اللهب القصوى	Maximum flame velocity	Ms-1	3, 46	0, 43	0, 47	
مدى الالتهاب في الهواء	Range of flammability in air	Vol.%	4-75	5-15	2, 5 – 9, 3	1, 0- 7, 6
مدى الانفجارية في الهواء الهواء	Range of exclusivity in air	Vol.%	13-65	6, 3 – 13, 5		1, 1 – 3, 3
معامل الانتشار في الهواء	Diffusion coefficient in air	$10^{-4}m^2s^{-1}$	0, 61	0, 16		0, 05

٣-٦-٣: الخزن بالغاز المضغوط (Compressed Storage in Gascous Form)

الكثافة الحجمية المنخفضة لغاز الهيدروجين عند ضغط بيئة العمل كما في الجدول (٣-٤) يجعل الانضغاط ضروريا في تطبيقات خزن الطاقة. تستخدم صهاريج الهيدروجين التجارية حاليا ضغوط بـ ٢٠-٣٠×١٠^{٦} Pa المتوافقة مع كثافات طاقة $2700-1900\times^{6}10\ m^{-3}$ لا تزال اقل من ١٠% من تلك في النفط. تم عمل ابحاث لزيادة الضغط لحوالي 7MPa .V^{+} باستخدام مواد متراكبة ذات قوة عالية مثل انسجة الياف كيفلر. البطانة الداخلية لالياف الكاربون (زجاجية / المنيوم) لتلبية متطلبات تقليل النفاذية. تؤثر متطلبات الطاقة المضغوطة كفاءة دورة الخزن و يستغرق نقلها وقت كثير. ان الشغل المطلوب في عمليات الانضغاط بثبوت درجات الحرارة من ضغط P_1 الى ضغط P_2 يعطى بالمعادلة التالية:

$$W = AT \log (P2 \setminus P1) \quad \ldots (42-3)$$

حيث A هو ثابت غاز الهيدروجين $4124\ JK^{-1}\ Kg^{-1}$ مضروبا بعامل تصحيح يعتمد على الضغط التجريبي. لاجل تحقيق الضغط يجب استخدام محرك يعمل بمعدل عند Bm، حيث mهي مدى الطاقة القصوى و B تعتمد على كفاءة المحرك، وهو حوالي ٢.

٣-٦-٤: الخزن بالهيدروجين المسال (Liquid Hydrogen Storage)

لكون درجة حرارة اسالة الهيدروجين هي 20 K (-253C°) فان اساس و متطلبات طاقة اسالة الغاز تكون جوهرية (يجب ان تكون الصهاريج وانابيب النقل معزولة بدرجة كبيرة). من ناحية اخرى، فترات النقل قليلة (حاليا ٣ دقائق تكفي لشحن سيارة مسافر). لا زالت كثافة الطاقة اوطأ بـ ٤-٥ مرات من الوقود التقليدي (انظر الجدول ٣-٤). ان عملية الاسالة تتطلب هيدروجين نظيف جدا وكذلك دورات متعددة من الضغط وتبريد النتروجين السائل والتمدد.

٣-٦-٥: خزن الهيدريدات المعدنية (Metal Hydride Storage)

يمكن انجاز عملية انتشار الهيدروجين في الخليط المعدني بكثافة حجمية اكثر بمرتين عنه في الغاز المسال ان كمية كثافة غاز الهيدروجين المخزونة لا زالت اقل من ١٠% من تلك التي يمكن تحقيقها في المحروقات التقليدية (الجدول٣-٤) مما يجعلنا ان نشكك بمفاهيم تطبيقات وسائط النقل بالرغم من الجوانب الايجابية للخزن عديم الخسائر عند ضغوط بيئة العمل 6-0) (MPaونقل يتاثر باضافة او سحب كميات معتدلة من الحرارة طبقا الى:

$$Me + 1/2xH_2 \leftrightarrow MeH_x \quad \ldots (43-3)$$

ربما تكون الهيدريدات على شكل تركيب مكعب متمركز الشبيكة حوالي ٦×١٠^٢٨ ذرة لكل m^3 (مثل $LaNi_5H_6$،$FeTiH_2$). يمكن انجاز اعلى كثافة حاليا كما في السبائك التي تمتص ذرتي هيدروجين لكل ذرة معدن. ان دورة امتصاص الشبيكة ايضا يمكن انجازها باستخدام تقنية تنظيف الغاز لان الشوائب الموجودة في غاز الهيدروجين تكون كبيرة جدا لكي تدخل الشبيكة.

٣-٦-٦: خزن الميثانول (Methanol Storage)

احدى الوسائل المستخدمة حاليا كوقود للمركبات هو وقود الهيدروجين والذي ينتج من الميثانول المخزون وان كان الوقود المطلوب هو الهيدروجين (لان المركبات تحتوي على خلايا كهربائية تقوم بتغذية المحركات بالهيدروجين. والسبب يعود الى سهولة خزن و تعبئة الميثانول. لكن على مدى التشغيل الطويل، تكون عملية تحويل الهيدروجين الى ميثانول وارجاعه تبدو غير كفوءة وتشبه الى حد ما اعادة ارتباط الميثانول مع خلايا وقودالميثانول بينما يتطلب ايجاد طرق بديلة و بسيطة لتشغيل المركبات التي تعمل بالهيدروجين.

٣-٦-٧: مخازن الغرافيت الليفي الجزيئي (Graphite Nanofibr Stores)

تعد التطورات الحالية في استخدام الالياف النانوية بامكانيات هندسية واسعة اخذين بنظر الاعتبار تهيئة البنية التركيبية و الكهربائية و تشمل خزين الذرات الغريبة في داخل تجويف الكرات والانابيب في هياكل الكاربون الكبيرة نوعا ما. تقودنا المؤشرات الى امكانية خزن الهيدروجين في انابيب نانوية بكميات تزيد عن تلك في هيدريد المعدن و باوزان اوطأ ولكن لا توجد تصاميم لحد الان.

٣-٦-٨: اعادة توليد الطاقة من الهيدروجين (Regeneration of Power From Hydro)

استرداد الطاقة من الهيدروجين المخزون قد يكون بواسطة احتراق تقليدي ذي كفاءة واطئة في محركات المركبات او توربينات الغاز او ربما تكون خلال خلايا وقود ذو كفاءة عالية.

٣-٧: البطاريات (Batteries)

يمكن اعتبار البطاريات كخلايا وقود حيث يخزن الوقود داخل هذه الخلايا وليس خارجها. تمتلك البطاريات سعة خزن عالية ولفترة زمنية طويلة نوعا ما وكمثال على ذلك بطاريات الصوديوم و الليثيوم، مبدئياً تكون سعة الخزن أكثر من ٢٠٠ واط. ساعة/كغم، و النيكل–كادميوم حوالي

١٢٠ واط .ساعة/كغم. بالإضافة الى قدرة البطاريات لتخزين الطاقة ايضا لها استخدام اخر وهو ان تكون كبديل للتزود بالطاقة. الجدول (٣–٥) يبين انواعا من البطاريات وسعتها الخزينة.

تأريخيا تمثل البطاريات أول مصدر للكهرباء مسيطر عليه مع وجود تصاميم مهمة تم تطويرها منذ بداية القرن التاسع عشر حيث تم اكتشاف اول خلية كهربائية وتم أنشاء مصنع لبطاريات الرصاص الحامضية. تستخدم حاليا مواد كثيرة في صناعة اقطاب البطاريات ومحاليل الكتروليتية مختلفة.

تستخدم حاليا البطاريات المتوفرة على نطاق واسع وهي المصنوعة من مواد الكترونية والكتروليتاتية لكن بالرغم من جهود التطور الكثيرة التي تهدف للانتفاع العام الكهربائي فان خزن البطاريات لا زال عمليا محدد النطاق (اجهزة الكترونية استهلاكية، سيارات ذو محركات، الخ).

جدول (٣–٥): يبين خصائص بطاريات مختارة.

النوع تجاري Type Commercial		Elec–trolyte	الكتروليت Energy efficiency ($Wh\ kg^{-1}$)	كفاءة الطاقة Energy density ($Wh\ kg^{-1}$)	كثافة الطاقة Power–densities		دورة الحياة Cycle life (cycles)	درجة حرارة الاشتغال Operating temperatures (°C)
					المحفوظة Peak ($W\ kg^{-1}$)	القمة ($W\ kg^{-1}$)		
حمضي رصاصي	Lead– acid	H_2SO_4	75	20–35	120	25	200–3000	–20 to 60
نيكل كادميوم	Nickel–cadmium	KOH	60	40–60	300	140	500–3000	–40 to 60
هيدرات نيكل والحديد	Ni– metal–hydride	KOH	50	60–80	440	220	<3000	10 to 50
ايون الليثيوم	Lithium– ion	LiPF	70	100–200	720	360	500–2000	–20 to 60
تحت التطور	Under development							
كبريت الصوديوم	Sodium–sulphur	B–Al_2O_3	70	120	240	120	2000	300 to 400
كبريتد الليثيوم	Lithium–sulphide	AIN	75	130	200	140	200	430 to 500
كلوريد الزنك	Zinc–chlorine	$ZnCl_2$	65	120	100			0
بوليمير الليثيوم	Lithium–polymer	Li–B–Alu	70	200			>1200	–20 to 60

خلايا الاصابة ١٩٧٧	1977 goal cells:					
طاقة عالية	High energy	65	265		55–100	2500
قوة عالية	High power	70	60	280	140	1000

بذلت جهود حثيثة لايجاد انظمة اداء افضل من بطاريات الحمض الرصاصية وبكثافة طاقة اوطا (انظر الجدول٣–٥) وفترة تشغيلية محدودة. طرحت البطاريات القلوية كخلايا النيكل الكادميوم عام١٩٠٠ وتم تسويقها تجاريا خلال السبعينات وهي اكبر ثاني سوق للاستخدام في معدات المستهلك الالكترونية وحاليا للمركبات الكهربائية. بالرغم من الكلفة العالية هناك تاثير سريع لبطاريات الليثيوم الايونية منذ انتاجها في عام ١٩٩١. وهي سريعة الشحن (اي الشحن قبل التفريغ الكامل) وبكثافة طاقة عالية مناسبة لمعدات الكترونية نموذجية ذات مقياس صغير.

تسمى بطاريات قابلة الشحن بالمخزن الكهربائي او بطاريات ثانوية وتسمى البطاريات ذات الاستخدام الواحد ببطارية اولية. يعطي الجدول ٣–٥) بعض خصائص انواع البطاريات المتنوعة المهمة. من الواضح ان اهداف البحث الموضوعة منذ ١٥ عاما مضت لبطاريات عالية القدرة وتم تسويقها تجاريا في الاسواق لكن لم تحقق الهدف المقصود بصناعة خلايا ذات متانة طاقة عالية. احد اسباب استمرار مشاركة السوق العالية للبطاريات الحامضية الرصاصية هو تقنيتها المتكاملة التي اخذت مكانتها في العقود الاخيرة.

لدى خلية الخزن الكهروكيميائية خواص تحددها ثوابت والزمن والتيار. يدعى قطبي أستلام القدرة من والى الخلية والذي يقوم بعملية تبادل الطاقة e_n و e_p (قطب سالب وموجب). ان التسميات التقليدية انود (القطب الموجب) والكاثود (القطب السالب) تكون مربكة في حالة بطاريات قابلة الشحن. تنتقل الايونات داخل البطارية بين القطب السالب والقطب الموجب خلال الالكتروليت. قد تكون الاقطاب صلبة، سائلة او نظريا قد تكون غازية. ان القوة الدافعة الكهربائية E_o هي الفرق بين جهد الالكترود الكهربائي لدائرة كهربائة خارجية مفتوحة،تعطى بالمعادلة التالية:

$$E_o = E_{ep} - E_{en} \quad \ldots (44–3)$$

حيث من المعتاد قياس كل الجهود نسبة الى حالة مرجعية. يستخدم مقياس للحالة المستقرة لطاقة التفاعلات الكيمياوية في وصف سلوك الخلية المفتوحة. عند تدفق التيار من والى الخلية فان التوازن الحراري الديناميكي لم يعد ساري المفعول وتثبت فولتية الخلية V_c في المعادلة الاتية :

$$V_c = E_o - \eta IR, \quad \ldots (45-3)$$

حيث I هو التيار بزمن معين، و R مقاومة الخلية الداخلية و "عامل استقطاب". يمثل الشكل (٣-١٢) رسم تخطيطي المستويات الممكنة المختلفة عبر الخلية لدائرة كهربائية خارجية مغلقة ومفتوحة.ومن اهم انواع البطاريات:-

٣-٧-١: بطارية الرصاص الحامضية(The lead acid battery)

في الكتروليت (المحلول المائي لحمض الكبريتيكك) يمكن ان تحصل ثلاثة تفاعلات في بطارية حامض الرصاص هي: -

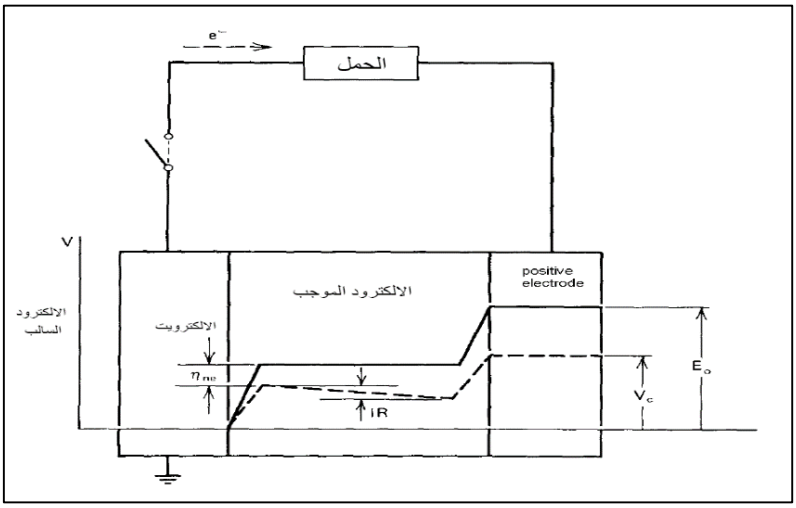
$$H_2O \leftrightarrow H^+ + OH^-$$
$$H_2SO_4 \leftrightarrow 2H^+ + SO_4$$
$$H_2SO_4 \leftrightarrow H^+ + HSO_4 \quad \ldots (46-3)$$

والتفاعلات بين الاقطاب (الرصاص واوكسيد الرصاص) هي:-

الالكترود السالب : $pb + SO_4^{-2} \leftrightarrow PbSO_4 + 2e^-$

الالكترود الموجب : $pbO_2 + SO_4^{-2} \leftrightarrow 4H^+ + 2e^- \leftrightarrow PbSO_4 + 2H_2O \quad \ldots (47-3)$

تتضمن تفاعلات الالكتروليت تاين الماء وتاين احادي او ثنائي لحامض الكبيريتي. تتشكل عند كلا القطبين، كبريتات الرصاص من اوكسيد الرصاص في القطب الموجب ومن الرصاص نفسه عند القطب السالب. شملت التطورات عزل الحاوية عن تركيب القطب، لانبوب رفيع وتدوير الالكتروليت. كنتيجة تتضاءل المقاومة الداخلية وتصبح البطارية عمليا بدون ادامة طيلة حياتها. تتزايد كثافة طاقة بطارية الحمض – الرصاص مع زيادة درجة حرارة وتتناقص مع معدل التفريغ (بحوالي ٢٥% متى ما نقصت من ١٠ ساعات الى ساعة تفريغ وتتناقص بحوالي ٧٥% متى ما نقصت من ساعة الى خمس دقائق عند التفريغ. تتطابق الاعداد الموجودة في الجدول (٣-٥) مع معدل التفريغ المتوسط و ٨٠% من عمر التفريغ.



الشكل (٣–١٢): التوزيع المحتمل للجهد خلال خلية كهركيميائية. الخط المجسم: دائرة كهربائية خارجية مفتوحة. الخط المقطع: ربط الحمل.

لا تستخدم تصاميم قطب اللوح الشبكي في بطاريات المركبات وفي تصاميم اللوح الانبوبي ذات العمر الطويل وفي المركبات الكهربائية حيث ازداد استخدامها في تطبيقات متعددة اخرى. زمن الاشتغال الافتراضي بحدود (٣٠ سنة) طبقا الى فحوصات دورية معززة لطرق شحن البطاريات الحامضية. ومما يذكر ان عمليات شحن البطاريات الحامضية تؤثر سلبا على عمر البطارية.

٣–٧–٢: البطاريات الالكتروليتية القلوية(Alkaline Electrolyte Batteries)

من بين البطاريات الالكترويتية القلوية المعروفة هنالك بطاريات النيكل والكادميوم التي تستخدم منذ حوالي عام ١٩١٠ ترتكز على اساس دراسات يونغز اثناء حقبة الـ ١٨٩٠ ومن مميزاتها العمر التشغيلي الطويل (حتى حوالي ٢٠٠٠دورة) يكون ادائها ثابت في حالة العناية بها تضمن ولا تعتمد كفاءتها على معدل التفريغ والعمر. ومع ذلك فانها لا تسمح بالشحن التقطيري (المتقطع) وسهولة انخفاض سعتها عند تطبيق تعليمات الاستخدام بصورة صحيحة. خلال الفترة من ١٩٧٠ – ١٩٩٠ تم اجراء اختبار واسع لاستخدام هذه البطاريات في معدات مثل كاميرات الفيديو، هواتف خليوية، وادوات محمولة وحواسيب محمولة لكن معظمها فقد من الاسواق وحلت محلها بطاريات ايون الليثيوم الاغلى ثمنا. ان بطاريات اوكسيد النيكل – الحديد التي كانت تستخدم الى حد بعيد في بداية القرن العشرين في السيارات الكهربائية لكفائتها وسعتها العالية ولفولتيتها الواطئة

ومقاومتها الداخلية العالية والتي تزيد من قابليتها او ميولها الى التفريغ الذاتي. يمكن تلخيص التفاعل النهائي كمايلي:

$$2NiOOH + 2H_2O + Cd \leftrightarrow 2Ni(OH)_2 + Cd(OH)_2 \quad \dots (3-48)$$

ان معدل دورة حياتها المؤشرة في الجدول (٣–٥) تعكس مدى حساسية بطاريات NiCd للصيانة المناسبة بضمنها التفريغ القسري المتكرر. لبعض التطبيقات ليس عمليا انخفاض نشاط البطارية المفاجيء الى الصفر قبل اعادة الشحن مرة ثانية. وهناك بديل وهو بطاريات الهيدرات المعدنية – النيكل التي تظهر كثافة طاقة عالية ودقة اعلى لكن لها دورة حياة اقل.

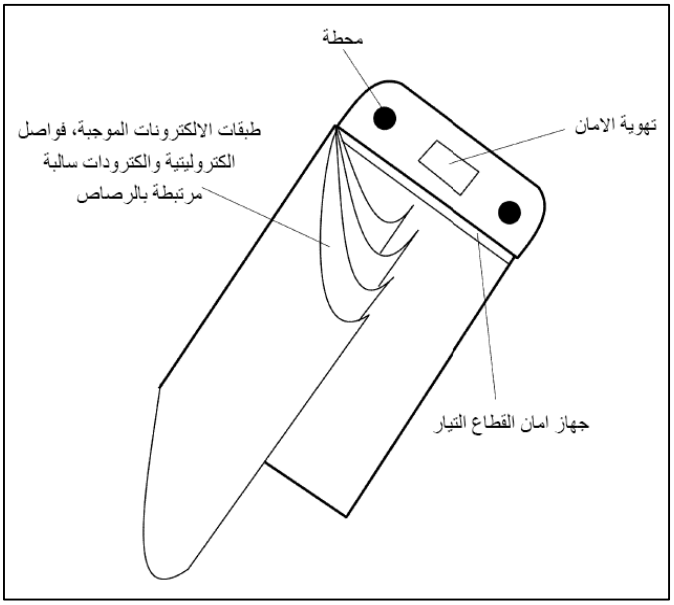
٣–٧–٣: بطاريات درجات الحرارة العالية (High Temperature Batteries)

اجريت بحوث على بطاريات درجات الحرارة العالية لاستخدامات كهربائية مفيدة (انظر الجدول٣–٥) ومنذ عدة عقود خلت وبدون توقف. تتميز هذه الخلايا كونها سريعة وكيميائية عكوسة، تسمح بمرور كثافة تيار عالية وبدون توليد حرارة مفرطة. ومن مشاكلها التآكل الخطير فمثلا بطارية الكبريت – الصوديوم.وهي بطاريات ذات الاقطاب المنصهرة والكتروليت الصلب عادة يكون شكله الانبوبي والمصنوع من مواد بيتا– الومينا في السلسلة السيراميكية. واجهت هذه البطاريات نفس المشاكل التي واجهتها بطاريات كبريتيات الليثيوم والكلور – زنك.

٣–٧–٤: بطاريات ايون الليثيوم (Lithinum Ion Batteries)

بطاريات قطب معدن الليثيوم جلبت الانتباه خلال العقود الماضية لامتلاكها جهد خزن ذو كثافة الطاقة العالية جدا. لكن مخاطر الانفجار كانت المسبب العائق لتسويقها، تم تطوير اسلوب عمل ايون الليثيوم الحالي من قبل شركة سوني في اليابان. مواد قطب البطارية هي $LiCoO_2$ و Li_xC_1 (كاربون او غرافيت) على التوالي، الكتروليت من فوسفات الليثيوم السداسية المنحلة في مزيج من كاربونات الاثيلين وكاربونات ثنائية المثيل.تصنع البطارية من طبقات متوالية من مواد قطبية تتارجح بينها ايونات الليثيوم دوريا كما موضح في (الشكل٣–١٣). ان امكانية خزن الخلية عالية، وتحتوي على وسيلة امان للتزويد بتهوية ذاتية في حالة الطوارئ. بهدف التطوير المستمر الى خفض سعر البطارية وتجنب استخدام الكوبالت السام مع الاحتفاظ بمستوى سلامة عال واداء افضل. يستخدم الالومينا مع سلسلة الليثيوم لتشكل الكتروليت ذو طبقة و $LiMn_2O_2$ او $LiMn_2$ كمادة قطبية موجبة كما مبينة في التفاعل الاتي :

$$\mathbf{Li}_{\mathbf{x_1}}\mathbf{MO_2} + (x_2 - x_1)Li \rightarrow \mathbf{Li}_{\mathbf{x_2}}\mathbf{MO_2} \qquad \ldots (49\text{–}3)$$



الشكل (٣–١٣): يبين مخطط بطارية إعادة الشحن ايون الليثيوم التجارية.

تهدف عملية التطوير الى خفض كلفة بطاريات بوليمر– الليثيوم الى حوالي ٢٠% من كلف بطارية ايون الليثيوم مما يؤدي الى استخدامها ليس فقط في معدات محمولة ذات احجام صغيرة لكن ايضا امكانية استخدامها في العجلات الكهربائية. اذا وصلت البطاريات لنقطة ملائمة للاستخدام في قطاع توفير الكهرباء فانها ستكون ملائما لخزن الطاقة لفترة قصيرة او متوسطة الامد. وتستخدم البطاريات لتزويد المناطق الريفية بالكهرباء في حالة ارتكازها على طاقة متجددة او محركات ديزل او كوسائل لدعم المنظومات الامنية. ان استخدامات بطارية بابعاد صغيرة شائع حاليا في قطاع الاستهلاك وهي تحمل احتمالية واعدة جدا في تخفيض التوازن بين الانتاج والحمل في قطاع تجهيز الكهرباء. ويمكنها تلبية اي طلب. اذا اصبح العديد من الاجهزة المنزلية تعمل بالبطارية. عند ذلك يصبح الطلب عليها ضروري لمعالجة احمال الذروة. وينطبق نفس الشيء على البطاريات التي تخدم قطاع النقل (المركبات الكهربائية). وعليه يمكن ان يعطي هذا التطور الحرية للمستهلك في استخدام البطارية الاقتصادية المفيدة بدلا من اسخدام مصادر الطاقة الثابتة.

٣-٧-٥: خلايا الوقود العكوسة (بطاريات التدفق) (Reversible Fuel Cells – Flow Batteries)

يمكن استبدال خلايا الوقود التي تعمل بشكل عكوس خلايا التحليل الكهربائي المنتجة للهيدروجين واذا كانت خلايا الوقود تعمل بكلا الاتجاهين المتعاكسين فأنها ستكون وسيلة مناسبة لخزن الطاقة. استمرت الدراسات لاستخدام الهيدروجين او الميثانول لتطوير خلايا تيار PEM (نظام طاقة بروتون proton energy system) الكهربائية كوسط اساسي للخزن. تعاني حاليا النماذج الاولية من خلايا هيدروجين – اوكسجين او هيدروجين – هواء المستخدمة كخلايا وقود عكوسة نوعPEM من عدم قابليتها في استمرار استخدامها لاغشية رقيقة لتجهيز طاقة بكفاءة عالية لكلا الطريقتين المذكورتين. بينما ان ٥٠% من الكفاءة تكون مقبولة لانتاج الكهرباء و فقط نفس الكفاءة ٥٠% كافية لانتاج الهيدروجين او بمعنى اخر أوطأ من التحليل الكهربائي المعتاد. وصلت كفاءة خلايا االوقود التي تعمل بنمطين منعكسين ما يقارب ١٠٠% لانتاج الهيدروجين باستخدام عدد قليل من اغشية رقيقة كبيرة حوالي ٠،٢٥ m^2 لكن هكذا خلايا ليست فعالة في انتاج الكهرباء. اجريت تطويرات مبكرة لخلايا الوقود العكوسة التي تدعى احيانا بطاريات التدفق ويطلق عليها فيما بعد بطاريات تفاعلات الاكسدة والاختزال بعدة مراحل تأين للفناديوم كاساس للطاقة الكيميائية المخزونة.

تتضمن التفاعلات في القطبين:

$$V^{+4} \rightarrow V^{+5} \quad \text{(القطب موجب)}$$

$$V^{+3} \rightarrow V^{+2} \quad \text{(القطب السالب)}$$

ستكون مادة القطب مصنوعة من ليف كاربوني وغشاء يوضع بين الاقطاب لضمان فصل الشحنة. سيكون خزن الطاقة النوعي حوالي ١٠٠ kg/kj وقد طرح حديثا ليحل محل عملية القطب الموجب بواسطة تفاعل ايوني كيميائي ثنائي مثل:

$$Br^- + 2Cl^- \leftarrow BrCl_2 + 2e^- \qquad \ldots (50\text{-}3)$$

لزيادة كثافة الخزن.جرى تطوير استبدال عنصر الفاناديوم الباهض الثمن بمركبات صوديوم اقل كلفة باستخدام تفاعلات مثل الفانديوم الثمين بمركبات الصوديوم الاقل ثمنا من خلال التفاعلات التالية:

$$3NaBr \rightarrow NaBr_3 + 2Na^+ + 2e^-$$
$$2e^- + 2Na^+ + Na_2S_3 \rightarrow 2Na_2S_2 \quad \ldots (51\text{–}3)$$

على المدى الاطول فان مخازن خلية الوقود العكوسة التي يكون اساسها الهيدروجين كوسط جيد للخزن ومثل هكذا وسط لخزن الطاقة سيوفر ميزة ايجابية لاستخدام تلك الخلايا في مجال قطاع الطاقة.

٣–٨: مفاهيم الخزن الأخرى (Other Storage Concepts)

٣–٨–١: التخزين البيولوجي(Biological Storage)

تخزين الطاقة على شكل مواد كيميائية عن طريق عمليات بيولوجية هي طريقة مهمة للتخزين لفترات طويلة، إن الكفاءة الكمية للعملية البيولوجية يمكن أن تزداد بمقدار (١٠%)، التحول الحيوي يحدث بمنظور يختلف كثيراً عما كانت عليه عندما كانت كفاءته(١%).

٣–٨–٢: الخزن المباشر للضوء (Direct Storage of Light)

ان خزن الطاقة بطريقه كيميائية ضوئية تعتمد اساسا على وجود الحقول الخضراء ولكن محاولات استنساخ هذه التقنية قد اثبتت صعوبتها بسبب طبيعة مكوناتها الاساسية؛ ان غشاء الخلية النباتيه المتكون من طبقتين هندسيتين بشكل ملائم لتمنع اعادة دمج المتفاعلات المخزونة والمتكونة منها عندما تصنع مختبريا بالاضافة الى ان الاغشية المصنعة بخواص مشابهة للخلية النباتية تكون صعبة الانتاج بمقاييس صناعية مختبريا. اضافة الى وجود خسائر ملحوظة في العمليات الصناعية والتي تكون مقبولة في الانظمة الطبيعية لكن تاثيرها يكون سلبيا على اقتصاد الانظمة الصناعية.

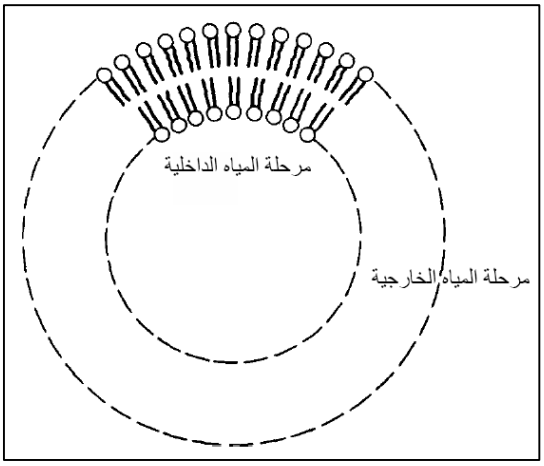
التفاعلات الكيميائية المهمة تكون ضرورية في تطبيقات خزن الطاقة المباشر من خلال استخدام الشعاع الشمسي الداخل في التفاعلات الكيميائية و الذي سوف يستخدم كطاقة استردادية كما في التفاعل التالي:

$$A + h\nu \rightarrow B$$
$$B \rightarrow A \text{ useful energy}$$

وكمثال هو امتصاص كمية الاشعاع الشمسي لغرض تحويل ثاني اوكسيد الكاربون الجوي لمركب معدني معقد مثلا مركب روثينيوم المعقد باضافة الماء مع التسخين عندئذ يمكن انتاج الميثانول كما في المعادلة:–

$$[M]CO_2 + 2H_2O + 713\ kj\ mol^{-1} \rightarrow [M] + CH_3OH + 1.5O_2 \quad \ldots (52-3)$$

يرمز للمركب المعدني المعقد بالرمز (M)في مخطط معادلة التفاعل. يستخدم الاشعاع الشمسي لاعادة تدوير المركب المعدني باعادة تشكيل المعقد المحتوي علىCO_2. منتجات التفاعل التي تتشكل بالتفاعل الكيميائي الضوئي تكون مشابهة للتفاعل العكسي اذا لم تمنع من فعل ذلك. والسبب يعود الى ضرورات التشكيل عند فواصل فضائية بمسافات متقاربة جدا وان التفاعل العكوس يكون مفضل من حيث الطاقة كما تحصل عادة بالطبيعة كالتفاعلات التي ينبغي منها خزن الطاقة. احدى الحلول لهذه المشكلة هو نسخ العمليات في النباتات الخضراء من خلال امتلاكها لمتفاعلات تستطيع أعادة الارتباط في الجوانب المتقابلة للغشاء. تحتوي الانظمة الصناعية على سلسلة كاربوهيدرات وهذه السلسلة تحتوي على ٥−٢٠ ذرة و في احدى نهايات السلسلة ترتبط بسهولة بجزيئة ماء مكونة ما يسمى (مجموعة تآلف مائي). الخلايا المؤلفة من طبقتين والتي تحتوي على مجموعة تآلف مائي تتقابل وبالاتجاه المعاكس مكونة غشاء رقيق، فاذا كانت مغلقة فانها تكون غشاء ويدعى بالخلية الصغيرة كما في شكل (٣−١٤).



الشكل (٣−١٤): يمثل خلية صغيرة الحجم من الماء بمدارين موضح بدائرة صغيرة وسلسلة من الجزيئات الهايدرو كاربونية ممثلة بخطوط قصيرة.

تصور الان التفاعل الكيميائي الضوئي الذي يحول A لحالة هيجان يتبعها تأين كما في المعادلة الاتية:

$$A + hv \rightarrow A^*$$
$$A^* + B \rightarrow A^+ + B^-$$

في الظروف الطبيعية ستكون لدى الايونين احتمالية عالية على اعادة الاتحاد ولن تكون عملية الخزن كفوءة جدا. لكن اذا كان A^* سيشكل جسيم غروي مشحون سلبيا فسيتفاعل الاكترون المعزول مع B ليشكل B خارج الجسيم ولن تكون B^- قادرة على التفاعل مع A^+. والامل بهذا الطريق هو القدرة على فصل الكميات العيانية للمواد المتفاعلة الذي يماثل مع خزن كميات مفيدة من الطاقة لاستخدامها لاحقا، لكن كفاءات عمليات التكوين الضوئي الصناعية بقيت واطئة. حدبثا تم تحديد عدد من التراكيب ذات الانسجة التي تؤخر التفاعل الرجعي بعدة ساعات او اكثر لكن هذا جعل استرداد الطاقة المخزونة اكثر صعوبة بشكل مماثل. المواد التي توضع هي مركبات الفايولوجين (مثلا N ، N^- ثنائي المثيل – ٤، ٤– كلوريد ثنائي البيريميدين، مثيل الفايولوجين او فوسفات الزركونيوم – مركبات الفايولوجين مع اقحام Cl و Br. ان البحوث في مجال الخزن الكيميائي الضوئي للطاقة تعتبر مرحلة مبكرة جدا وليس بالامكان تسويقها قريبا. اذا كان البحث ناجحا فستتوفر مجموعة جديدة من خيارات الخزن. ومع ذلك فأن كفاءة دائرة الخزن سوف لن تكون عالية جدا. بالنسبة للعمليات المحتثة ضوئيا فأن نفس المحددات تكون موجودة وكما في الخلايا الفولطائية، مثلا جزء من الطيف الشمسي يكون مفيد وتكون الخسائر مرتبطة بالانتقالات الذرية والجزيئية في مستويات الطاقة. وعلاوة على الخسائر التي تضمنتها عمليات نقل المواد الكيمياوية المخزونة الى طاقة مطلوبة.

٣–٨–٣: الخزن بالمواد فائقة التوصيل (Superconducting Storage)

المجال المغناطيسي يمثل نوعا من الطاقة المخزونة. عند شحن المغناطيس بواسطة ملف فائق التوصيلة (مثلا الملف اللولبي) علما انه ليست هنالك اي خسائر حرارية في الملف يمثل النظام كمخزن للطاقة الكهرومغناطيسية ولكنه سريع التفريغ. (يتطلب حفظ مواد الملف) النوع الثاني من فائق التوصيلية NbTi بدرجة حرارة الصفر المطلق يحتاج تبريد تحت درجة الصفر المئوي مثلا بواسطة الهيليوم السائل. بالاضافة الى التركيب المسند (المدعم). وكذلك الحماية ضد كثافات الدفق المغنطيسية العالية حول المحطة (او المشغل) يضاف اليها انشاء وتنصيب المحطة تحت الارض. يوجد مستوى خزن (Gj) في التركيب العلمي في منتصف السبعينات من القرن العشرين في مختبر الفيزياء الاوربي CERN في جنيف (يهدف الى حفظ الطاقة المغنطيسية عبر فواصل بين تجارب المعجلات المنجزة في المختبر). تم انشاء مخزن فرط الموصلية عند ١٠٠ Gj في

الولايات المتحدة من قبل قسم الدفاع الذي اراد استغلال حقيقة ان بامكان خزن جميع انواع الطاقة بمعدلات متوسطة واطلاقها اثناء فترات قصيرة جدا كما هو مطلوب في مفاهيم انظمة الدفاع المضادة للصواريخ حيث لا يزال هذا التطور يعتبر تطورا نموذجيا. لا زال هذا تطورا نموذجيا. يعتقد ان القابلية الاقتصادية تتطلب معدلات خزن ١٠ – ١٠٠ TJ ويامل احدهم ان يكون قادرا على توظيف موصلات مفرطة ذات درجة حرارة عالية لتقليل متطلبات التبريد (تحقق نجاح محدود بزيادة درجات حرارة حرجة). فقط "النوع الثاني" من الموصلات فائقة التوصيل مفيد لاغراض خزن الطاقة لانه فائق التوصيل عند درجة حرارة معينة $\mathbf{T}$(اقل درجة الحرارة الحرجة التي تحدد الانتقال بين المرحلة الطبيعية ومرحلة التوصيل الفائق) وتختفي اذا اجتاز المجال المغنطيسي القيمة الحرجة $\mathbf{B_2(T)}$ ("مجال مغنطيسي" او"كثافة الفيض المغناطيسي"، وهي كمية تقاس بوحدات تسلا (وحدة الحث المغنطيسي) = Vsm^{-2}) . يتميز النوع الثاني من موصلات فائقة التوصيل بـ $\mathbf{B_2(T)}$ بموصلية عالية بالمقارنة مع النوع الاول من الموصلات فائقة التوصيل.

يمثل المجال المغناطيسي مخزن للطاقة مع كثافة طاقة $\mathbf{W}$ مرتبطة بكثافة فيض مغناطيسي $\mathbf{B}$ (احيانا تسمى "الحث المغنطيسي") عن طريق:

$$W = \mathbf{B}^2/(2\mu.) \qquad \ldots (53-3)$$

حيث $\boldsymbol{\mu}$ ($=1,\ 26\times^{-6} 10,\ \mathbf{henry\ m^{-1}}$) هي نفاذية الفراغ. عند ربط الملف فائق الموصلية بمصدر الطاقة، ان المجال المغناطيسي المحتث يمثل عمليا نقل طاقة الخزن بلا خسائر عند نقلها الى الخزن المغناطيسي. وباستخدام مفتاح طاقة مناسب، وعندما يكون مصدر الطاقة غير موصول فان الطاقة سوف تتسرب عند توصيل الملف بدائرة الحمل. لن تكون كفاءة الدورة ١٠٠% على اية حال و يعزى ذلك الى الطاقة لتبريد المخزن.

الفصـــل الـرابـع
ادارة الطـاقـة الكـهـربائية
Electrical Energy Management

٤-١: المقدمة (Introduction)

الطاقة الكهربائية عامل اساسي لتحقيق برامج التنمية المستدامة في المجالات الاقتصادية والاجتماعية. ان التكامل بين ادارة الطاقة الكهربائية والتنمية المستدامة ناتج عن الوعي العالمي للحاجة الى نظام ادارة كفوء لتوفير الطاقة الكهربائية ورفع كفاءة استخدامها ونرشيد استهلاكها واعتبار التبذير نمط من انماط الاستهلاك غير المبرر. ان التخطيط لتطبيق برامج وتطبيقات متطورة لاستخدام وترشيد الطاقة الكهربائية وتحسين كفاءة ادارة الاحمال بازاحة ذروة الطلب او تغير شكل منحني الحمل يؤدي الى الاستخدام الامثل للطاقة الكهربائية. ان الهدف الاساسي لنظام ادارة الطاقة الكهربائية متمثلا بانتاج الكمية المطلوبة والنوعية الجيدة وبالسعر المناسب والوقت المحدد للطلب، وتقوية العلاقة والتعاون بين مؤسسات انتاج الطاقة الكهربائية والمستهلكين والحد من هدرها من خلال الاستهلاك العقلاني لها وتعزيز فكرة ((المستهلك المنتج)) تقوم المؤسسة بوضع وتنفيذ وصيانة وتحسين وتوثيق نظام ادارة الطاقة وفق الاتي:-

أ- تحديد نشاطات النظام وتطبيقه في جميع اعمال المؤسسة.

ب- تعيين تسلسل هذه العمليات والتداخل فيما بينها.

ج- تعيين المعايير والطرق اللازمة لضمان هذه العمليات.

د- ضمان توفير الموارد المادية والبشرية والمعلومات الضرورية لدعم هذه العمليات ومراقبتها.

هـ- قياس ومراقبة وتحليل هذه العمليات.

و- تنفيذ الاعمال الضرورية لبلوغ النتائج المخططة.

٤-٢: مفهوم ادارة الطاقة (Energy Management Concept)

ادارة الطاقة الكهربائية عبارة عن اساليب وتقنيات تحكم عمليات انتاج ونقل وتوزيع وخزن الطاقة الكهربائية وفق احتياجات القطاعات المختلفة بالكمية المطلوبة والنوعية الجيدة والسعر المناسب والوقت المحدد لتلك الطلبات متضمنة الخطوات الاتية:-

أ- وضع سياقات واجراءات لضمان الانتاج والنقل والتوزيع والخزن للطاقة الكهربائية وفق المواصفات العالمية (انظمة الايزو) والخبرة العالمية.

ب-مراقبة وقياس الانتاجية وكفاءة النقل والتوزيع والخزن والاستهلاك.

ج- جمع البيانات عن العمليات اعلاه وتحليلها.

د- اجراء العمليات التصحيحية والوقائية وفق نتائج تحليل البيانات.

هـ- اتباع الطرق الكفوءة لتوفير الطاقة الكهربائية وتقدير مقدار الطاقة التي توفرها كل طريقة.

و- احتساب كمية الوفر من الطاقة عند استخدام الطرق البديلة باستخدام المعدات ذات الاستهلاك الواطيء والابنية ذات العزل الحراري.

ز- تحديث الاساليب والتقنيات المتبعة من خلال:-

١- متابعة التطورات الحاصلة في العالم.

٢- النتائج التي تم الحصول عليها من تحليل البيانات.

٣- الخبرة المكتسبة من خلال ممارسة العمل.

ح- رفع مستوى الوعي للمجتمع بترشيد استهلاك الطاقة الكهربائية من خلال :-

١- اقامة برامج التوعية المنظورة والمسموعة.

٢- اقامة الندوات العلمية والعملية بترشيد استهلاك الطاقة.

ي- تشجيع فكرة المستهلك المنتج من خلال :-

١- زرع خلايا الطاقة الشمسية على سطوح الابنية.

٢- استعمال الشبكات الذكية (العدادات) للسيطرة على توزيع الكهرباء في محلات العمل والسكن.

٣- وضع تشريعات تشجيعية وعقابية.

٤- المحافظة على البيئة وتقليل انبعاث الكاربون من خلال التطبيق المنتظم لنظام الادارة والتقنيات الفنية لتحسين كفاءة انتاج الطاقة وترشيد استهلاكها.

٤-٣: نظام ادارة الطاقة (Programmed of Energy Management)

ان التعامل مع الطاقة من قبل المجتمعات الانسانية معروف منذ القدم سواء في اماكن السكن الصغيرة او محلات العمل الكبيرة ولكنهم يجهلون ادارة الطاقة ويتبعون اجراءات عشوائية لانتاجها واستخدامها وترشيدها. ونظرا الى تطور الحياة وزيادة متطلباتها والحاجة الى ادارتها بصورة كفوءة ولغرض تحقيق هذه المتطلبات تم اعتماد انظمة ادارة متضمنة الاتي:-

١- توثيق النظام:-

أ- ضبط الوثائق المطلوبة للنظام وتحديد انواعها وملائمتها قبل اصدارها.

ب-مراجعة الوثائق عند الضرورة وتحد يثها واعادة اعتمادها.

ج- التاكد من اجراء التعديلات الحاصلة على الوثائق وتماثلها مع الاصدارات السارية لهذه الوثائق.

د- التاكد من كون الاصدارات الملائمة للوثائق المطبقة متوفرة في اماكن الاستخدام وتكون واضحة وسهلة التميز.

هـ- التاكد من ترميز الوثائق الخارجية وضبط اسلوب توزيعها.

و- منع الاستخدام غير المقصود للوثائق والملفات.

٢- ضبط السجلات:-

أ- تهئية وصيانة سجلات ادارة الطاقة وان تكون السجلات واضحة وسهلة التميز مع سهولة الحصول عليها.

ب-تحديد اسلوب الضبط لتميزها وخزنها وحمايتها واسترجاعها وحفظها والتخلص منها.

٣- مسؤلية الادارة:-

أ- تتولى المؤسسة وضع وتنفيذ نظام ادارة الطاقة والتحقق المستمر من كفائته.

ب-تحديد المسؤليات والصلاحيات والاتصالات للعاملين في المؤسسة.

ج- توعية العاملين باهمية الايفاء بمتطلبات الزبون والمتطلبات النظامية والقانونية.

د- التاكيد من وضع سياسة واهداف نظام ادارة الطاقة.

هـ- اجراء المراجعات الادارية.

و- ضمان توفير الموارد.

ز- التركيز على الزبون.

ح- على الادارة تحديد متطلبات الزبون والايفاء بها بهدف تعزيز رضا الزبون.

٤- التخطيط:-

أ- على الادارة العمل على ضمان اهداف النظام وان تكون متوافقة مع وظائف ومستويات المؤسسة والايفاء بمتطلبات انتاج الطاقة وان هذه الاهداف قابلة للقياس.

ب- المحافظة على تكامل النظام عندما يتم تخطيط وتنفيذ تغيرات عليه.

٥- المسؤولية والصلاحية والاتصالات:-

تضمن المؤسسة ان تكون المسؤليات والصلاحيات معرفة ومبلغة الى العاملين وفق الاختصاص والكفاءة.

٦- مراجعة الادارة:-

تقوم ادارة المؤسسة بمراجعة نظام ادارة الطاقة في فترات مخطط لها لضمان استمرارية ملائمة وكفاءة وفاعلية النظام لغرض:-

- تحديد فرص التحسين والحاجة الى المتطلبات اللازمة لادامة التحسين.
- صيانة سجلات مراجعة الادارة.

أ- مدخــلات المراجعــة:-

تشمل مدخلات مراجعة الادراة معلومات عن:

- نتائج التدقيق.
- المقتر حات الواردة من الزبون.
- الاجراءات الوقائية والتصحيحية.
- المراجعات الادارية السابقة.
- التغيرات على نظام الادارة.
- التوصيات بشأن التحسينات.

ب- مخرجات المراجعة.

- تحسين فاعلية نظام الادراة وعملياته.
- تحسين الانتاج وفق متطلبات الزبون.
- توفير الموارد اللازمة لتحسين النظام.

٧- إدارة الموارد:-

أ- توفير الموارد

١- تقوم المؤسسة بتحديد وتوفير الموارد اللازمة الى مايلي:-

٢- تنفيذ وصيانة نظام الادراة مع التحسين المستمر لكفائته.

٣- تعزيز رضى الزبون عن طريق الايفاء بمتطلباته.

ب-الموارد البشرية:-

يكون الافراد القائمون بنظام الادراة مؤهلين من ناحية التعليم والتدريب والخبرات وتتولى المؤسسة الاتي:-

١- تحديد الاهلية اللازمة للافراد العاملين في نظام الادارة.

٢- توفير التدريب وإتخاذ اجراءات اخرى للايفاء بهذه الحاجات.

٣- تقييم فاعلية هذة الاجراءات.

٤- التأكد من أدراك العاملين لأهمية الفعاليات التي يقومون بها ومساهمتهم قي تحقيق اهداف النظام.

٨- حـــماية البيئة:-

تقوم المؤسسة بتحديد و إدراة بيئة العمل اللازمة لتحقيق متطلبات انتاج الطاقة.

- حماية البيئة من الملوثات.

٩- تحقيق انتـاج الطاقة:-

تقوم المؤسسة بتخطيط العمليات اللازمة لتحيقيق انتاج الطاقة متضمنه:-

١- المراقبة و التفتيش والفحص للمنتج وكفائته ومعاير قبولهِ.

٢- السجلات و الوثائق المطلوبه لتوفير الادلة على أنِ المنتج وعملياته تفي بالمتطلبات.

١٠- العمليات ذات العلاقة بالزبون:- تقوم المؤسسة بتحديد:-

أ- المتطلبات المطلوبة من الزبون.

ب– المتطلبات الغير محددة من قبل الزبون ولكنها ضرورية للاستخدام.

١١– الاتصال بالزبون:–

تقوم المؤسسة بتحديد وتنفيذ ترتيبات فعالة للأتصال بالزبون في مايتعلق بالاتي:–

أ– معلومات عن منتج الطاقة.

ب–تداول الاستفسارات او المعلومات.

ج– المعلومات المسترجعة من الزبون متضمنه الشكاوي و المقترحات.

١٢– التحقق من المواد المشتراة:–

تقوم المؤسسة بأعداد وتنفيذ التفتيش اللازم والفعاليات الاخرى الضرورية لضمان المواد المشتراة بأنها تفي بمتطلبات التي تم شرائها من اجله.

١٣– القياس والتحليل والتحسين:–

تتولى المؤسسة تخطيط وتنفيذ عمليات المراقبة والقياس والتحسين المطلوب من اجل:–

أ– بيان مطابقة انتاج الطاقة.

ب–ضمان مطابقة نظام ادارة الطاقة.

ج– التحسين المستمر بفاعلية نظام ادارة الطاقة.

١٤– المراقبة و القياس:–

- رضا الزبون:–
- مراقبة المعلومات الخاصة برضا الزبون كأحد معاير الاداء لنظام ادراة الطاقة.
- تحديد اساليب الحصول على هذه المعلومات واستخدامها.

١٥– التدقيق الداخلي:–

اجراء التدقيقات الداخلية على فترات مخطط لها لتحديد في ما اذا كان نظام ادارة الطاقة يفي بالمتطلبات الاتية:–

أ–ان نظام الطاقة منفذ بصورة فعالة و تتم صيانته و تحديد حالة واهمية المواقع المدقق عليها.

ب–الاخذ بنظر الاعتبار نتائج التدقيقات السابقة.

ج– تحديد معاير التدقيق.

د– أختيار المدققين المؤهلين وعدم تدقيقهم للأعمال المنفذة من قبلهم.

هـ- وضع اجراءات موثقة لتعريف المسؤليات والمتطلبات اللازمة لتخطيط وتنفيذ التدقيقات.

و- اعداد التقارير و النتائج و صيانة سجلات التدقيق.

ز- تنفيذ نتائج التدقيق دون التأخير اذ ان الاجراءات اللازمة بدون تأخير غير مبررة لأزالة حالات عدم المطابقة و اسبابها.

١٦- مراقبة و قياس العمليات:-

أ- تطبيق اساليب مناسبة لمراقبة عمليات نظام ادارة الطاقة.

ب-قياس العمليات كلما كان ذلك ممكن. أن هذه الاساليب تبين قابلية العمليات لتحقيق النتائج المخطط لها وفي حالة عدم تحقيق هذه النتائج يتم اجراء التصحيح واتخاذ الاجراءات التصحيحية.

١٧- مراقبة و قياس المنتج:-

تتولى المؤسسة مراقبة و قياس المنتج لتحقق الايفاء بمتطلبات الجهات المستفيدة وخلال المراحل المناسبة.

١٨- التحســين:-

أ- التحسين المستمر:- تتولى المؤسسة القيام بتحسين مستمر لفاعلية نظام ادارة الطاقة من خلال:-

ب- استخدام سياسة ادارة الطاقة.

ج- اهداف ادارة الطاقة.

د- نتائج التدقيق و الاجراءات التصحيحية و الوقائية.

١٩- الاجراءات التصحيحية:- تتولى المؤسسة وضع اجراءات لأزالة اسباب عدم المطابقة لمنع تكرارها من خلال:-

أ- مراجعة حالات عدم المطابقة وبضمنها شكاوي الزبون.

ب-تشخيص الاسباب.

ج- تحديد الحاجة الى اجراءات لمنع عدم تكرارها.

د- تسجيل نتائج الاجراءات المتخذة و مراجعة الاجراءات التصحيحية السابقة.

٢٠- الاجراءات الوقائية:- تتولى المؤسسة اجراءات موثقه لأزالة اسباب عدم المطابقة المحتملة لغرض منع تكرارها متضمنه اللاتي:-

أ- تشخيص حال عدم المطابقة المحتملة و اسبابها.
ب-وضع اجراءات لمنع حدوث عدم المطابقة.
ج- تنفيذ الاجراءات المطلوبة.
د- تسجيل نتائج الاجراءات المتخذة.
هـ- مراجعة الاجراءات الوقائية المتخذة.

٢١- تحليل البيانات تتولى المؤسسة تحديد وجمع وتحليل البيانات اللازمة لأظهار ملائمة وفعاليات نظام ادارة الطاقة متضمنه البيانات الناتجة من:-

أ- المراقبة والقياس.
ب-رضا الزبون.
ج- اجراءات الوقاية.
د- المعلومات الواردة عن الموردين.

٤-٤: اهمية تطبيق نظام ادارة الطاقة (Implementation Procedure)

تنتاب العالم ازمات متزايدة على طلب الطاقة مما يؤدي الى زيادة اسعار الوحدة الاستهلاكية وزيادة الانبعاثات الملوثة للبيئة وكذلك يؤدي الى استنزاف الوقود الاحفوري وهو محدود. ان ازدياد الوعي للحاجة الى ترشيد الطاقة ورفع كفاءة انتاجها وتوزيعها واستخدامها مما جعل نظام الادارة المعيار الاساسي الذي يحكم النشاطات الاتية:-

أ- تحسين انتاج الطاقة.

- **يهيىء نظام ادارة الطاقة الاساليب والتقنيات الضرورية لتحسين وزيادة كفاءة الانتاج والنقل والتوزيع والخزن:-**
- **تحسين جودة الانتاج والتوزيع والنقل والخزن وتقديم الطاقة الكهربائية بالكمية والنوعية الجيدة.**

- تقليل انبعاث الملوثات للبيئة وخاصة ثاني اوكسيد الكاربون وتخفيض الاضرار الصحية عن المجتمع.
- زيادة الضرائب المفروضة على انبعاث ثاني اوكسيد الكربون.

ب–الاستغلال الامثل للطاقة وترشيد الاستهلاك:–

ج– توثيق العلاقة بين مؤسسات الطاقة الكهربائية والمستهلكين.

د– خلق فرص عمل جديدة.

هـ– زيادة ربحية المؤسسات الكهربائية وتقليل المصروفات الكهربائية على المستهلكين.

٤–٥: مـفـاهيــم اخــرى لنــظــام ادارة الــطــاقــة (Other Concepts of Energy Management System)

تعتبر الطاقة بمختلف اشكالها من العوامل الاساسية لتحقيق برامج التنمية المستدامة في جميع الفعاليات الاقتصادية والاجتماعية والبيئية والاستغلال الامثل لمصادر المواد المسببة للتلوث البيئي. ان الاهتمام والتركيز على هذه المعاير الثلاثة التي تعتبر المحرك الفعال للطاقة وادارتها وتنميتها بكفاءة عالية. نتيجة للدراسات والبحوث والجهود المبذولة لتطوير نظام ادارة الطاقة ظهرت مفاهيم اخرى لنظام الطاقة لازالت تحت البحث والتطوير والاستخدام التجريبي اهمها.

٤–٥–١: النظام ثلاثي الابعاد المستديمة (Three Dimensions Sustainable)

ان العناصر الاقتصادية والاجتماعية والبيئية هي العوامل الفعالة لادامة الحياة وتطورها وكما يلي:–

الاقتصاد (Economy)

يعتبر الاقتصاد المحرك الاساسي للابداع والابتكار ويحفز المشاركة في الاستثمارات المادية الرابحة ويدفع الموارد البشرية لتنفيذ مسؤلياتها وتحفيز الرغبة لدى العاملين بالاندفاع نحو الامام ويساهم في التطور الاقتصادي المحلي وكذلك يغذي الفعاليات والنشاطات التي تطور الحياة الانسانية وبناء البنية التحتية ويقاوم الرشوة والفساد الاخلاقي لدى العاملين التي تقاوم النزعات التي تحاول تدمير المجتمع. وكذلك يطور ويحسن التراكيب الداخلية للبنية الصناعية والاجتماعية ونتيجة لهذا عند وجود اقتصاد قوي وكفوء مما يدل على تبني المجتمع الخطط والسياسات الكفوءة التي تدل على اعتمادها على نظام ادارة متطور.

٤-٥-٢: البيئة (Environment)

ان سلامة البيئة هي العنصر الاساسي في حماية ثروات الدول ومواردها البشرية وتنعكس السلامة البيئية سلباً وايجابا على هذه الثروات بمختلف صورها، وتضم كل العناصر الطبيعية و الحياتيه التي توجد حول الكرة الارضية وعلى سطحها وفي باطنها. ان نجاح الامم وتقدم الشعوب وحماية حضارتها تعتمد على الحفاظ على بيئة سليمة ونظيفة. ان حياة الانسان ترتبط بالبيئة التي توجد فيها كما ارتبط تطوره الفكري والحضاري بأرتقاء استغلاله لشتى امكاناتها وطاقاتها. ان الزراعة والصناعة التي استطاع الانسان ان يحدث ما فيها من صنعه بما فيها من وسائل تدفئة وتبريد واضاءة وأبتكار مصادر للقوة جعلها طوع ارادته. ان ضبط البيئة وحمايتها ووضع نظام الادارة البيئية يعني السيطرة على جميع النشاطات الزراعية و الصناعية و التقنية بالاسلوب الصحيح و يشمل كل الانظمة الادارية الموجهة لهذه العمليات. ان زيادة قدرة المجتمع في انجاز الفعاليات الاجتماعية والاقتصادية وترشيد استهلاك الطاقة و الموارد كلها تحكمها نظم كفوءة.

٤-٥-٣: المجتمع (Society)

ان التعليمات والقوانين والسياقات التي بموجبها يتم اجراء النشاطات المحفزة للتنمية الاقتصادية و الاجتماعية وحماية البيئة يضعها ويطبقها الانسان. و عندما تكون هذه التشريعات والقوانيين حازمة وشاملة وكفوءة مما تؤدي الى سير النشاطات بصورة صحيحة و تدفع الانسان الى تأدية مسؤلياته وبالطريقة الصحيحة وتخلق علاقات اجتماعية وانسانية بين المنظمات المشرفة على تطور وتقدم المجتمع. ان التدريب والتأهيل المجتمعي بموجب ستراتيجية دقيقة وواضحة وعندما تكون المجاميع البشرية منظمة ومنسقة ومساهمة بصورة بناءة. ان بناء المجتمع بالتوجه الصحيح مايدل على اعتماد برامج ادارة جيدة لنشاطاته وفعالياته.

٢-النظام ذو المستويات الخمس المستديمة (Five Sustainable Level) :-

ادارة الطاقة تعني الحفاظ على الطاقة او الاستعمال المنظم للادارة والتقنية لتحسين اداء الطاقة للمؤسسة او تقليل شدة الطاقة وانتشار الكاربون بواسطة تغير الاساليب المختلفة في العوامل الاتية:-

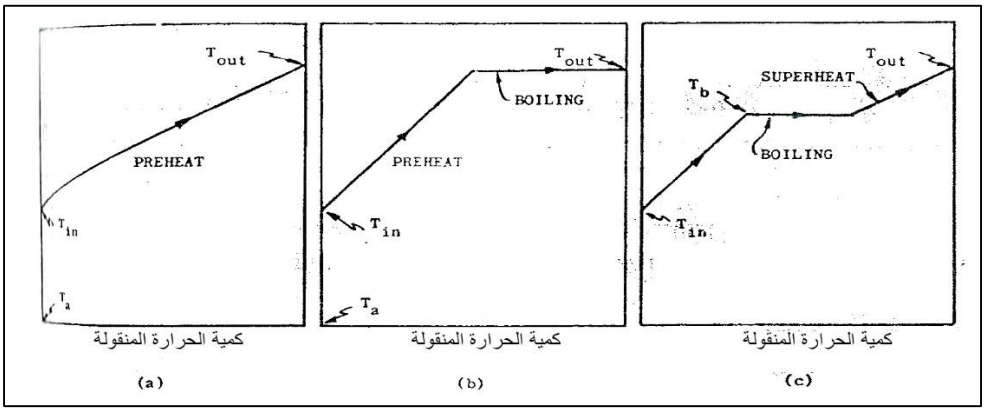
١- المالية (Financial):- وتشمل الموارد المالية والانتاجية والاقتصادية.
٢- الطبيعة (Natural):- وتشمل جميع المصادر المادية والبشرية والانظمة الاقتصادية والخدمية التي تسير العالم الطبيعي.
٣- الانسانية (Human):- وتشمل الطاقات الانتاجية المتواصلة وتنفيذها بصورة صحيحة من خلال الثقافة و التدريب.
٤- المجتمع (Social):- ويتضمن العنصر االاساسي للادارة الحياة وفهمها وادارتها بالمعلومات التي تؤدي الى ادارة وتسيير الطبيعه التي يعيش فيها.
٥- الانتاج (Produce):- ويتضمن الثروات الطبيعية التي انتجها الانسان ومشاركته الفعالة في كل المعلومات التي تحكم الحياة الطبيعية. ان وضع برنامج لهذه النشاطات وادارتها بالصورة الفعالة هو يعبر على اعتماد المجتمعات الانسانية على نظام ادارة كفوء وفعال.

٤-٦: إدارة الحـرارة مـع وبـدون تغـير المـرحـلـة (Heat management with and without phase change)

خلال حقن واستخراج الحرارة من المخزن الحراري تصاحبها بعض المشاكل ليست واضحة بشكل آني. تظهر هذه المشاكل (الصعوبات) من حقيقة ان الحرارة تنتقل فقط من جسم ساخن إلى آخر بارد. تتطلب تغير حالة المادة، أثناء عملها في درجة حرارة ثابتة لحقن وأطلاق الحرارة، السائل الناقل للحرارة يكون بدرجة حرارة عالية. والسائل الذي يستلم الحرارة يكون بدرجة حرارة أوطأ من درجة طورالتغيير. وكنتيجة طبيعية فالسائل الناقل للحراة في المجمع الشمسي الذي يوفر الحرارة لنظام خزن مرحلة التغيير يجب ان يعمل على كل النقاط في المجمع الشمسي الذي تكون درجة حرارته اعلى من درجة حرارة تغير المرحلة. لخزن الحرارة المحسوسة فأن هذه النقاط غير ضرورية. يستطيع السائل الناقل للحراة دخول المجمعات بأقل من درجة حرارة تشغيل النظام. هنالك عدة حالات لتوضيح المشاكل التي تنشأ باستخدام الخزن الحراري وكما يلي:-

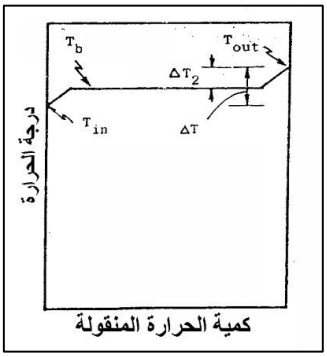
١- مجموعة من العوامل التي تحدد خصائص التبادل لمقطع جانبي للسائل الناقل للحرارة. الشكل (٤-١) يمثل ثلاث دورات (مقاطع) حرارية اساسية داخل الجامع الشمسي. يوضح الشكل (٤-١) النظام الأبسط الذي يكون فيه السائل بمرتفع بدون تغير المرحلة في مدى استخدام درجة الحرارة من مدخل درجة حرارة من و إلى المخرج النهائي لدرجة الحرارة خطياً مع الحرارة

الداخلة (Q). يتم تفضيل هذا النوع من سائل نقل الحرارة للمجمعات الشمسية بصورة رئيسية بسبب عدم وجود تغييرات في الحجم، الكثافة، معدل تدفق الغاز، وإلى آخره التي تعقد موقف تغير المرحلة. في الشكل (٤–١) (b) يتغير السائل الناقل للحراة إلى غاز ويخرج عند درجة غليان السائل. في الشكل (٤–١) (C) تضاف بعض الحرارة الإضافية إلى الغاز السائل الناقل للحرارة. في كل حالة أشرنا إلى نفس ارتفاع درجة الحرارة ودرجة الحرارة الخارجية.



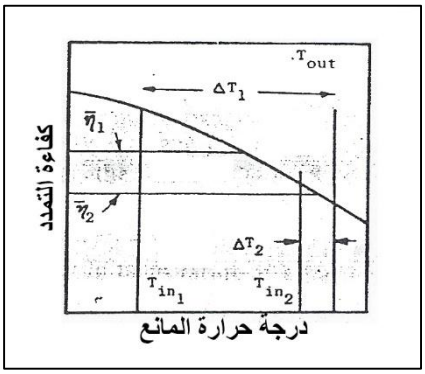
شكل (٤–١): يمثل ثلاث دورات حرارية اساسية داخل المجمع الشمسي حيث ان (a) يمثل السائل الذي يرتفع بدون تغير الطور (b) يمثل تغير السائل الناقل للحرارة الى غاز (c) يمثل اضافة حرارة الى الغاز السائل الناقل للحرارة.

يظهر في الشكل (٤–٢) حالة بديلة التي يمتلك فيها المائع الناقل للحرارة دون تغير المرحلة. يتم في هذا النوع تغيير مقبول بشكل أفضل لخزن الحرارة بمادة تغير المرحلة لكن الارتفاع القليل بدرجة الحرارة مما يسبب مشكلة في كفاءة الخزن.



شكل (٤–٢): يمثل العلاقة بين كمية الحرارة ودرجة الحرارة.

هذه المشكلة تظهر في الشكل (٤–٣) الذي يكون فيه المنحني الأمثل لكفاءة الاستخراج η قد تم تدبيره كدالة درجة حرارة السائل. تظهر حالتين لديها نفس درجة الحرارة الناتجة. احد هذه الحالات ازدياد درجة الحرارة في المجمع ضئيلة، ارتفاع في ΔT_2. معدل الكفاءة هو $\overline{\eta}_2$. من ناحية أخرى إذا سمح النظام بارتفاع أكبر لدرجة الحرارة الذي تكون فيه درجة الحرارة المدخلة أوطأ فان معدل الكفاءة $\overline{\eta}_1$ سيكون أعلى كثيراً، وبذلك سينفصل ان المجمع يعمل من جديد كأوسع قيمة لـ ΔT ممكنة للاستخدام الأفضل للمجمع.

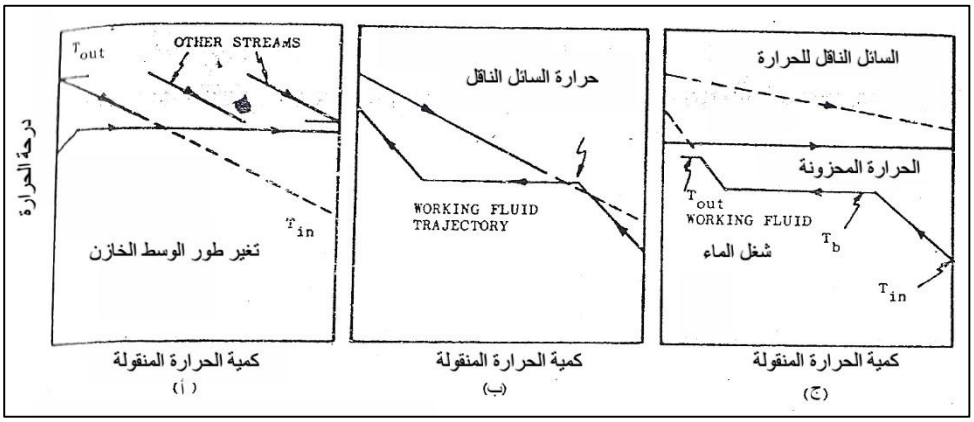


شكل (٤–٣): يمثل منحني العلاقة بين الكفاءة ودرجة الحرارة.

عندما اختبار تأثير مادة الخزن الحراري التي تمتلك مرحلة التغيير فسنواجه وضعاً الذي يجب ان يكون فيه المجمع ΔT صغيراً وبذلك أقل كفاءة. يبين الشكل (٤–٤) هذه الحالات الثلاثة. في الحالة (٤–٣) (أ) السائل الناقل للحرارة الذي لا يمتلك مرحلة تغيير ينتقل إلى مادة الخزن وعند مرحلة التغيير يبرد السائل الناقل بسرعة إلى نقطة قريبة من درجة حرارة مرحلة التغيير وΔT بطيئة جداً حيث توقف النقل جوهرياً، عندها من المطلوب سائل ذو مجرى جديد لأجل تسخين أكثر لمادة الخزن. بالنتيجة هناك هبوط صغير في درجة الحرارة فقط في سائل المجمع الناقل للحرارة ينتج عنه قيمة قليلة لـ η. تكون المشكلة مختلفة عندما لا يمتلك السائل الناقل للحرارة مرحلة تغيير ويعمل كوسيط للخزن الحراري. في الحالة (٤–٤) (ب) يظهر السائل أنه آتياً من الخزن ويسخن السائل العامل للتوربين (أو محرك). يجب ان يمتلك سائل التوربين مرحلة تغيير لأننا نرغب بأرسال بخار إلى التوربين. نستطيع تخيل مرادة الدفق المقابل لعملية الغليان عندما يدخل السائل حاراً من إحدى النهايات ويبخر السائل الآخر، السهام تؤشر المسلكين في حالة (ب). بما ان سائل التوربين يجب ان يمتلك مرحلة تغيير المنحني المركبة الأمثل ونسب أفقية كما يظهر في

الشكل. هنالك وضع حين يبرد السائل الناقل للحرارة بسرعة وتعبر المركبة منحني درجة الحرارة كما يظهر في الشكل. هذا الوضع يخنق عملية نقل الحرارة. على اي حال، منع مشكلة الخنق نستطيع تشغيل التوربين تقريباً عند درجة حرارة السائل الواصل من المجمع الشمسي، تكون قيمة ΔT هنا صغيرة وتضبط بالفرق المطلوب في مقايض الحرارة. لذا اختلاف درجة الحرارة الانفتاح الواسعة تكون ممكنة.

في الحالة (٤–٤) (ج) تظهر المشكلة من قبل بيئة خزن حرارية ذي مرحلة تغيير. يجب ان تكون درجة حرارة مرحلة التغيير أوطأ إلى حد بعيد من درجة الحرارة الخارجية من المجمع الشمسي حتى تنتقل الحرارة الكافية قبل ان تهبط درجة حرارة السائل إلى حيث يتوقف الانتقال متتبعاً المسار الظاهر في الخط المقطع. الآن، عندما نريد ان نستخدم مادة لها طور متغير لتسخين البخار العامل للتوربين يجب على سائل التوربين ان يكون دائما بدرجة حراري أوطأ من بيئة الخزن الحرارية، لذا مدى درجة الحرارة الكامل لسائل عمل التوربين مثبط (أو منخفض) بالنسبة لما يكون إذا تم استخدام بيئة خزن حرارية ذات الحرارة المحسوسة. يشير الجدال أعلاه ان الفوائد الظاهرية لامتلاك مادة تغيير المرحلة لبيئة الخزن الحرارية لم تدرك بعد. الذي يستخدم فيه الماء المضغوط لنقل الحرارة ولبيئة الخزن الحرارية وهذا بالنهاية سينقل للبخار العامل العضوي للتوربين.



شكل (٤–٤): يمثل العلاقة بين كمية الحرارة و درجة الحرارة حيث ان (أ) يمثل السائل الناقل للحرارة دون تغير الطور و(ب) يمثل السائل الراجع من الخزن و(ج) يمثل سائل خازن للحرارة ذو طور متغير.

الفصـــل الخـــامس

ادارة أستهـــلاك الطـــاقـــة

(Management Consumption of Energy)

٥-١: المقدمة (Introduction)

الترشيد يعني الاقتصاد بالطاقة الكهربائية الى اقصى حد ممكن من خلال:-

أ- العزل الحراري للابنية.

ب-استخدام زجاج عاكس للحرارة.

ج- استخدام اجهزة كهربائية موفرة للطاقة.

٥-٢: طـرق ادارة طـلـب الطـاقـة

(Methods of Energy Requirements Management)

ان ترشيد ورفع كفاءة استخدام الطاقة لايشير الى تقليل خدمات الطاقة وانما يدل على الحصول على الخدمات اللازمة والضرورية من خلال التطور والنمو والاستخدام الامثل لها. ويتم ذلك من خلال وضع خطط وبرامج للترشيد والتي هي عبارة عن سلسلة من الاجراءات المناسبة على مستهلكي الطاقة الكهربائية لاحكام الصرف غير المبرر ومتابعة التطبيق بصورة كفوءة وفعالة للوصول الى انخفاض عامل الحمل وعامل الاستطاعة، ارتفاع قيمة طلب الذروة، ارتفاع الاستهلاك النوعي للطاقة (الطاقة المصروفة على وحدة المنتج) تتضمن المحاور الاتية:-

١- ادارة الاحمـال:-

نظام ادارة الاحمال هو عبارة عن عمل ينفذ لغرض التحكم بتغير شكل منحني الحمل وتخفيض استطاعة الذروة من خلال الاتي: -

٥-٢-١: خفض ذروة الطلب (Peak Clipping)

هو عبارة عن تقليل اقصى حمل في فترات الذروة مما يؤدي الى تقليل الطلب على الاستطاعة (kw) والطاقة المستهلكة الكلية (kwh) ويتم من خلال:-

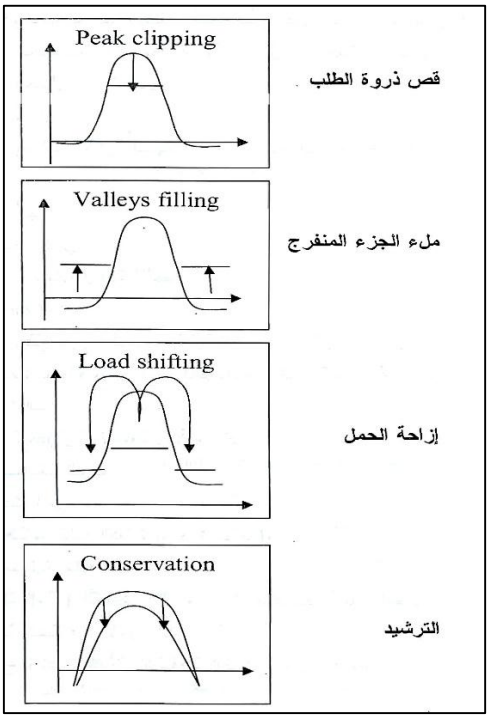
١- استخدام مكثفات الهواء عالية الكفاءة.

٢- التحكم المستمر في تكيف الهواء (التبريد والتسخين).

٣- تقليل الضياعات الى الحد الادنى الشكل (٥-١) يوضح منحني خفض (تقليل) ذروة الطلب.

٥-٢-٢: ملئ الجوانب المنفرجة (Valleys Filling)

وهو عبارة عن اضافة احمال خارج اوقات الذروة (off peak periods) اي زيادة الطاقة المستهلكة (kwh) من خلال تخزين الطاقة الحرارية والاحمال حسب فترات الاستهلاك.



شكـل(٥-١): يمثل تغير منحني الحمل بعد ملا الاجزاء المنفرجة (١) قبل التحكم في الحمل ٢ بعد التحكم في الحمل.

٥-٣: طرق ازاحة الاحمال الكهربائية (Load Release Ways)

ازاحة الاحمال عبارة عن الاساليب المتبعة لخفض القيمة القصوى لذروة الاحمال الكهربائية خلال اليوم من خلال ترحيل بعض الاحمال الكهربائية المساهمة في احداث الذروة الى اوقات خارج ساعات حدوث هذه الذروة خلال اليوم مما يساعد على البرمجة الصحيحة للاضافات والتوسعات في عناصر النظام الكهربائي ويعرف وقت الذروة بانه الوقت الذي ترتفع فيه الاحمال الى

قيمتها القصوى. وعادة تحدث في بعض الدول العربية مثل العراق والسعودية من الساعة الواحدة ظهرا وحتى الساعة الخامسة مساءا ومن هذه الاساليب مايلي: –

أ– التخزين التبريدي:–

تعتبر انظمة التخزين التبريدي للطاقة احد اهم التقنيات التي تساهم في رفع جزء من الحمل في وقت الذروة وتقوم بتخزين الطاقة خلال ساعات الليل للاستفادة من درجات الحرارة الخارجية وقلة الطلب على الطاقة ومن ثم استخدام تلك الطاقة المخزونة خلال ساعات النهار (ساعات الذروة) لتزويد محطات القوى او المباني بطاقة التبريد المطلوبة وتستخدم لهذا الغرض خزانات المياه المثلجة (القطع الثلجية) او الماء المبرد او انواع خاصة من الاملاح كوسط للتخزين. ثم اعادة الاستفادة منها في فترات الاحمال القصوى لتمرير مياه التكيف عبر هذه الخزانات لتساعد وحدات التبريد في تقليل الطاقة الكهربائية للظاغطات والمضخات. وتستخدم اساليب لتشجيع المشتركين على استخدام الخزن التبريدي المتضمن الاتي:–

– تطبيق التعريفة المتغيرة للاسعار المستوفاة من المستهلكين وجعلها مخفضة خارج ساعات الذروة.
– الغاء الرسوم الكمركية على المعدات عالية الكفاءة.
– اعطاء الاولوية للتراخيص التجارية لموردي الاجهزة عالية الكفاءة.

ب– المولدات الاحتياطية:–

تساهم المولدات في تغذية كل او جزء من الاحمال المستهلكة في تغذية المباني الحكومية، المصانع الفنادق، في حالة انقطاع المصدر الرئيسي للكهرباء .

ج– العلاقة بين المستهلكين والمنتجين للطاقة الكهربائية:–

يتكون الطلب على الطاقة الكهربائية من مجموع محصلة الانواع المختلفة والمتعددة من احمال المشتركين (سكني، تجاري، صناعي، حكومي، زراعي ...الخ) بمختلف خصائصها وطبيعة تغيرها خلال ساعات الاستخدام اليومية والفصلية. تتاثر انشطة المشتركين واستهلاكهم للطاقة الكهربائية لتغيير الطقس والوقت. ان احمال الذروة التي تحصل في فصل الصيف يتطلب تامين محطات توليد تكفي لمواجهة هذه الاحمال بكفاءة واعتمادية وعدم انقطاع. ان ازاحة الاحمال (ادارة الاحمال) عبارة عن ترحيل الاحمال الكهربائية الى فترات محددة وعدم تحميل النظام الكهربائي باحمال عدة في اوقات متزامنة. ان فترة الحمل في العراق وبعض الدول العربية في الصيف

تكون بين الساعة الواحدة ظهرا والخامسة بعد الظهر حيث الاستخدام المكثف لاجهزة التكيف. في هذه الفترة يستحسن عدم تشغيل اجهزة مثل الغسالات والمكواة والمكانس الكهربائية وتاجيلها الى فترات تقل فيها احمال الذروة. لازال المفهوم السائد لدى الجهات المسؤولة عن تخطيط انظمة الطاقة الكهربائية يعتمد على انشاء المزيد من المحطات الكهربائية وتعزيز انظمة النقل والتوزيع لمجابهة الطلب المتنامي على الطاقة الكهربائية دون النظر الى:-

- دراسة امكانية التنسيق بين شركات الكهرباء والمشتركين للعمل على تبني وتطبيق بعض الاجراءات التي من شانها تؤدي الى تقليص قيم الاحمال الذروة.
- تشجيع الاستهلاك في غير اوقات الذروة او ترحيل (ازاحة) جزء من الاحمال الى اوقات اخرى وهو ما يطلق عليه ادارة الاحمال.

د- استخدام وحدات توليد اضافية لمواجهة زيادة الحمل اليومي يستخدم قسم منها لمواجهة الحمل:-

- الحمل الاساسي تخصص لمواجهة الجزء من الحمل الذي يستمر اطول وقت ممكن مثل المحطات البخارية والمائية.
- استخدام وحدات ذات قدرات متوسطة لمواجهة الحمل المتوسط مثل محطات الغاز او الديزل.
- وحدات توليد تستخدم لمواجهة احمال الذروة وتتكون من وحدات صغيرة تعمل لفترات زمنية قليلة (هي فترة الذروة).

هـ- التحكم في الاحمال من خلال:-

التوعية واجراء الحوار مع المستهلكين للتوصل الى قناعة لتخفيض الاحمال من خلال تنظيم اوقات تشغيل المعامل والمصانع .

٥-٤: فوائد ادارة الحمل (Loading Management Benefits)

ان تطبق نظام ادارة الاحمال يعود بالفوائد لمنتجي الطاقة والمستهلكين بالفوائد الاتية :-

٥-٤-١: خفض الذروة (Peak Reduction)

لدى المستهلك اجهزة يمكن الاستغناء عن استخدامها خلال فترات الذروة وتشغيلها لاحقا. حيث ان تغير الحمل يعتمد على احمال المستهلكين ومن فوائد خفض الذروة عدم بناء محطات توليد جديدة وتخفيض كلف ادامة شبكات النقل والتوزيع.

٥-٤-٢: تقليل تكاليف توليدالقدرة (Generation Mining High Cost Power)

يؤدي تطبيق نظام ادارة الاحمال الى ترشيد الاستهلاك غير المبرر للطاقة الكهربائية وبالتالي الى تقليل كلف انتاجها.

٥-٤-٣: طرح الحمل (Load Shedding)

يتم التحكم بظبط الاحمال عند الانخفاض السريع للقدرة الكهربائية المستهلكة في حالة حدوث اضطرابات في الشبكة الكهربائية لضمان استمرار التغذية من خلال عزل المكونات الرئسية او الفرعية للشبكة ذات الاستخدام غير المبرر.

٥-٤-٤: تشغيل الاحمال المفصولة (Cold Load Peak – Up)

يمكن التحكم بشبكات المكيفات والسخانات والاجهزة الاخرى عن طريق استخدام فاصل حراري (ثرموستات)، الشبكات الذكية او الاقفال في حالة الانقطاع.

٥-٥: الاجراءات المساعدة لتطبيق نظام ادارة الاحمال

(Assistance Requirement for Load Management System Application)

يمكن اتباع الاساليب الاتية لتنفيذ البرنامج:-

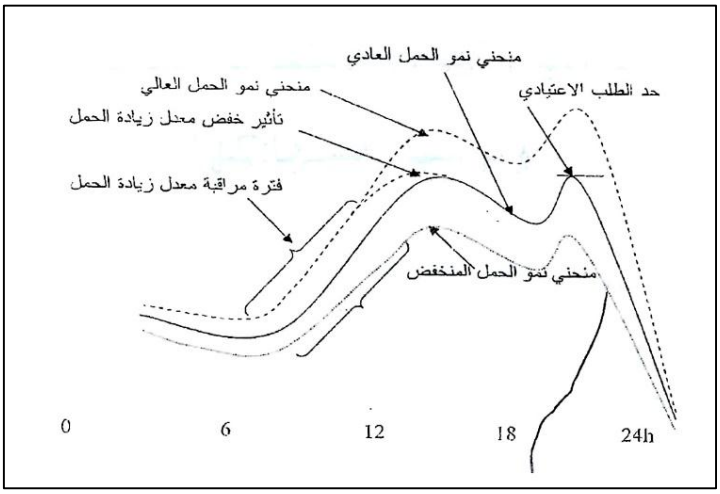
أ- اجهزة القفل المتبادل (inter locking devices):- ويتم من خلال ربط اجهزة منزلية مختلفة بقفل واحد يتحكم لتشغيل احد هذه الاجهزة وحسب الحالة.

ب-اعطاء الاولوية لتشغيل جهاز على بقية الاجهزة المنزلية وفق الفترة الزمنية والكلفة التسعيرية.

ج- اشارات الانذار:- استعمال الاضواء المحذرة او الاجراس المسموعة لتنبيه المستهلك بان حمله وصل الحدود المسموحة لغرض ضبط الاستهلاك.

د- الضبط (set-level):- فصـل التيـار عـن بعـض الاجهـزة وفق تعريفة الوقـت (Time- of -use rate) واعلام المستهلك بتسعيرة الذروة .

هـ- اجهزة توقع الحمل:- لتنجب حدوث الذروة المرتفعة يتم مراقبة النسبة او معدل االحمل طيلة االيوم من خلال استخدام اجهزة اجهزة الكترونية تقارن او عزل ارتفاع منحني الحمل بمنحني معياري محدد مسبقا. حيث يتم فصـل او عزل الاجهزة او الترحيل بأزاحة وقت التشغيل الى ساعة اقـل خطـورة في اليـوم من خـلال تطبـيق تعـرفية الوقت (Time_Of_use_rate).



الشكل (٥-٢): يوضح مراحل نمو الحمل.

و- قياس استهلاك الطاقة وفق اساليب حديثة متطورة واستخدام الشبكات الذكية للسيطرة على الطاقة الكهربائية وتخفيض تاثيرها على البيئة.

ز- جمع بيانات دقيقة ومفصلة حول الاستهلاك بواسطة تركيب المقايس الرقمية التي تقرا وتسجل قيم استهلاك الطاقة بشكل متزامن وبفواصل زمنية قليلة.

ح- تشجيع استثمار مصادر الطاقة المتجددة ونشر تطبيقها من قبل اصحاب المنازل والمنشات الصناعية (**thermal energy storage loads**) مثل تسخين الماء والحفاظ على المسافات الدافئة، توليد البخار.

ب- تخزين الكهرباء على شكل طاقة ميكانيكية مثل الهواء المضغوط وتخزين الماء الشكل (٤-١ ب يوضح منحني ملئ الجوانب.

ج- ترحيل الاحمال (**Load Shifting**):-

ترحيل الاحمال عبارة عن ازاحة الاحمال من فترات الذروة الى اوقات خارج الذروة ويتم من خلال:-

١- وضع تسعيرة للوحدات المصروفة.

٢- استخدام المعدات ذات الاستهلاك الكبير الى خارج اوقات الذروة مثل مضخات الري. الشكل ٥ -٢ يمثل منحني ترحيل الاستهلاك.

٣- وضع تشريعات تشجيعية وعقابية للذين لم يلتزموا بالاستهلاك المبرر وفق تقدير الصرف الضروري لكل موقع وفق المقياس الاتي:-

أ- حساب كمية الطاقة المستهلكة في عطلة نهاية الاسبوع.

ب-تقدير الجزء الضائع من هذه الطاقة من خلال التجهيزات التي يمكن اطفائها.

ج- انشاء المنحنيات البيانية للطاقة المجهزة والمصروفة من اجل حساب كمية الطاقة الكلية الضائعة.

او يمكن حساب الطاقة المستهلكة الضائعة من خلال:-

د- اجراء التفتيش الدوري الليلي للتاكد من اطفاء المعدات غير الضرورية.

هـ- رسم البيانات لتلك الليلة لمعرفة الكمية المستهلكة من خلال المعدات المستخدمة.

و- طرح كمية الطاقة المستهلكة خلال ليلة القياس لحساب كمية الطاقة التي تم توفيرها.

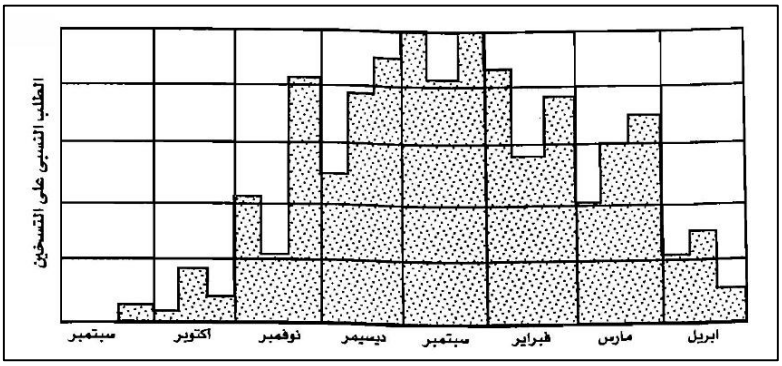
ز- ضرب هذه الكمية في عدد الساعات على طول فترة العطلة نهاية الاسبوع.

ان فوائد نظام ادارة الطاقة الكهربائية يتضمن الاتي :-

تطوير الخبرات الفنية والادارية للعاملين في قطاع الكهرباء.

٥-٦: حساب الآداء التفصيلي(Calculation Of Detailed Performance)

حساب الأداء التفصيلي للجامع الشمسي وحالة الطاقة في الخزن ليست معقدة عندما يتم ضبط اداء الجامع الشمسي. ان الحاجة لهذا النوع من الحساب واضح عندما يوفر ضوء الشمس طلب الطاقة خلال موسم التسخين أو التبريد.ان الشكل ٥-٧ يمثل بيانات افتراضية للتسخين خلال الشتاء بمعدل عشرة أيام. إذا تم قياس حجم المجمع الشمسي حتى يلبي فقط نسبة من الحد الأقصى لطلب الشتاء فالنظام سيعمل وفق قابلية التصميم فقط لفترة محدودة. واخيرا في الموسم سيجمع النظام طاقة أكثر من الحاجة وليس مناسباً اخذ الطاقة الغير مستخدمة عند تقييم إحصاءات المجمع.



مخطط (٥–٣): يمثل التسخين في الشتاء لمدة عشرة ايام.

٥–٧: الجمود الحراري (Thermal Inertia)

ان الخزن الحراري بواسطة الحرارة المحسوسة تكون الجمود الحراري لبناية هو مساهم مهم مع إحتمالية تحقيق الحد الأقصى. في حين ان كتلة معظم المباني تكون الى الخارج وعزلها من الداخل، ومن الممكن زيادة فائدة الكتلة بشكل كبير إذا حصل العكس: العزل من الخارج والكتلة من الداخل. وهكذا فان سعة الخزن الناتجة ستكون أوسع باضافة كلفة مثلاً، صندوق خزن صخري. إذا كانت الهياكل الضخمة متضمنة في زيادة الخزن الحراري فان سرعة إضافة أو سحب الحرارة سيكون مهماً.تحسب سرعة انتشار ذبذبة الحرارة بواسطة المعادلة التالية:

$$v = 2/\pi\alpha/P)^{1/2} = 2(\pi k/PCP)^{1/2} \quad \ldots (5\text{–}1)$$

حيث ان α هو الانتشار الحراري. K/PC وp تمثل فترة الاندفاع. بتطبيق تأثيرات الخزن الحراري الشمسي فان الفترة هي ٢٤ ساعة. ان سرعة موجة لمدة ٢٤ ساعة. لعدة مواد موضحة في الجدول (٥–١).

جدول (٥–١): سرعة موجة 24h.

المادة	السرعة (سم/ساعة)
التاكونايت	١٠
الكرانيت	٦,٥
الكونكريت	٣,٧–٣,٣
الطابوق	٢,٨–٢,٦
الخشب	١,٧
النحاس	٤٦,٢

الخواص الأخرى للجدار فيما يخص مصدر الحرارة الوقتي سعة الموجة (P) داخل الجدار، تباطؤ درجة الحرارة عند عمق معين، طول موجة النبضة الحرارية في الجدار، وكمية الحرارة المنتقلة في الموجة. هذه الكميات هي:

$$\left[{}^{1/2}_{0}(OP/\pi)x-\right]T_r=2\Delta T_o \quad \text{السعة:} \quad \ldots (2-5)$$

حيث ان x يمثل العمق تحت السطح وان ΔT_o تمثل موجة درجة الحرارة على السطح، المدى الكامل لاضطراب درجة الحرارة هو $2T_o$

$$t=(x/2)\,(P/\pi\alpha)^{1/2} \quad \text{التباطؤ في درجة الحرارة} \quad (3-5)$$

$$\lambda = 2(\pi\alpha P)^{1/2} \quad \text{طول الموجة} \quad (4-5)$$

$$Q/A = K\Delta T_o(2P/\pi\alpha)^{1/2} \quad \text{كمية الحرارة} \quad (5-5)$$

عندما تتدفق الحرارة إلى الجدار خلال أحد انصاف الدورة وخارج عن الجدار للنصف الآخر من الدورة.

٥-٨: نموذج ضمان الاستخدام الامثل للطاقة الكهربائية لمؤسسة ما

(Example for Insurance of Electrical Energy Use in Any Company)

لمتابعة تنفيذ استخدام ادارة الطلب على الطاقة الكهربائية والتحقق من عدم الاستخدام غير المبرر وفق الاسس المعتمدة يتم اتباع ما يلي:-

- وضع الضوابط والتعليمات للمستهلكين والموردين حول التعامل المستمر مع الطاقة الكهربائية والاستغلال الامثل.
- التطوير والتحديث لتقنيات انتاج ونقل وتوزيع وخزن الطاقة الكهربائية.
- تشريع تعليمات تشجيعية وعقابية للمستهلكين للطاقة الكهربائية ومتابعة تنفيذها.
- جمع وتحليل البيانات الدقيقة حول استخدام الطاقة والتغذية العكسية بالتوصيات الناتجة من هذا التحليل.
- اجراء القياسات الدورية للتحقق من ان الضوابط والتعليمات تفي بالاتي:-

أ- تحسين وانخفاض عامل الحمل وعامل الاستطاعة.

ب-ارتفاع الاستهلاك النوعي للطاقة (الطاقة المصروفة على وحدة المنتج)

ج- ارتفاع قيمة طلب الذروة.

ويعتمد النموذج التالي لاعداد تقرير دراسة والتحقق من الاستخدام الامثل للطاقة الكهربائية. ويتضمن المحاور الاتية:-

١- وصف المؤسسة من حيث:- الموقع، التابعية، نوع العمل، نظام العمل – وجبات، عدد ساعات العمل اليومية، عدد ايام العمل لكل قسم، عدد ايام العمل في السنة للمؤسسة.

٢- تصنيف المعدات والعمليات داخل المؤسسة قيد الدراسة وفق:-

أ- مقدار الطاقة التشغيلية لكل مادة.

ب-مقارنة طاقتها التشغيلية مع نفس المعدات حديثة الصنع.

٣- تصنيف البيانات المراد جمعها متضمنة الاتي:-

أ- استهلاك الطاقة الكهربائية لمدة سنة.

ب-مقدار استهلاك الطاقة غير المبرر.

ج- الاجراءت المتخذة لتقليل الاستهلاك غير المبرر.

المـصـــادر

١- الطاقة الشمسية واستخداماتها، م. محمد احمد السيد خليل، دار الكتب العلمية للنشر. والتوزيع القاهرة ٢٠٠٩.

٢- مستقبل استخدام الطاقة، عائشة حمدي، مجموعة النيل العربية ٢٠١١.

٣- مصادر الطاقة الجديدة والمتجددة، مهندس وحيد مصطفى، دار الكتب العلمية للنشر والتوزيع القاهرة ٢٠٠٩.

٤- مقدمة في الطاقة الشمسية، د. شاكر جابر شاكر، دار الكتب للطباعة والنشر الموصل ١٩٨٩.

٥- مبادىء تحويل الطاقة، عاهد الخطيب، دار الشرق للنشر والتوزيع الاردن ١٩٨٩.

٦- ادارة الطاقة وكفائتها، د. محمد قرضات، د. محمد هاشم، د. محمد صالح، مطبعة جامعة دمشق ٢٠١١.

7- Energy resources and the environment john lenihon, William W.fletchel 2010.

8- Renewable energy Bent Sorensen Amsterdam Newyork 2004.

9- Thermodynamics an engineering approach wunus A. cenjle Michael A.

10-boles boston mc graw Hill 2007.

١١-نظم الادارة البيئية والمواصفات القياسية العالمية، ا- د- م – محمد\ صلاح الدين عباس، دار الكتب العالمية للنشر والتوزيع، ١٩٨٨.

12-Iso 9001 Energy management system 2001.

13-IEA (2008) Energy BALANAS OF NON – G ECD countries. Internal energy a geney paris.