تخزين الطاقة الشمسية

د. سيد محمود حسنين
د. محمد الصالح سميعي

يستخدم الوقود الأحفوري (النفط ، الفحم ، الغاز الطبيعي ..) حالياً وبشكل واسع كمصدر للطاقة ، ونظراً للطلب العالمي المتزايد على هذا المصدر من الطاقة فإن مخزونه الإحتياطي أصبح يتناقص باستمرار. لذلك يحاول العلماء البحث عن مصادر بديلة ومناسبة للطاقة تمثل الطاقة الشمسية أهمها . غير أن تقنية الطاقة الشمسية لا تخلو من مشاكل يتمثل أهمها في طبيعتها المتغيرة ، إذ من الممكن أن لا يتزامن توفرها مع وقت الحاجة الملحة لها . ومن هنا تنبع أهمية تخزين الطاقة الشمسية كتقنية هامة لتوفير الطاقة في كل الأوقات حتى عند إحتجاب الشمس بالليل أو بسبب الغيوم والسحب ، كما أن التطوير في هذه التقنية يكتسب أهمية خاصة بسبب ما تتمتع به الطاقة الشمسية من مزايا أهمها أنها طاقة نظيفة ومتوفرة بقدر هائل وغير قابلة للنضوب بقدرة الله .

هناك عدة طرق لتخزين الطاقة الشمسية أهمها التخزين الحراري ، والكهربائي ، و الميكانيكي ، والكيميائي ، والمغناطيسي . ولكن يظل السؤال ماهي أفضل طريقة لتخزين الطاقة الشمسية التي تحقق الجدوى الإقتصادية المطلوبة ؟

يتناول هذا المقال استعراضاً لأهم نماذج تخزين الطاقة الشمسية بين بحوثها ، وتطورها ، وتجاربها الميدانية ، كما سيتم إعطاء مقارنة سريعة بين مختلف التقنيات المتوفرة في الوقت الحاضر .

يمكن تخزين الطاقة الشمسية لفترات قصيرة أو طويلة حسب متطلبات الطاقة ، ويرافق ذلك آليتان رئيستان معروفتان هما الشحن والتفريغ ، وعلى هذا الأساس يعتمد تصميم نظام التخزين على عدة متغيرات وعوامل أهمها : الإشعاع الشمسي ، ونوع وسط التخزين المستخدم ، ومقدار الفاقد في الطاقة المتبادلة أثناء التخزين ، وتكلفة معدات التخزين ، وأخيراً الحمل الحراري أو الكهربائي المطلوب .

يبين الشكل (١) مخططاً مبسطاً لأهم الطرق والنماذج الممكنة لتخزين الطاقة الشمسية .

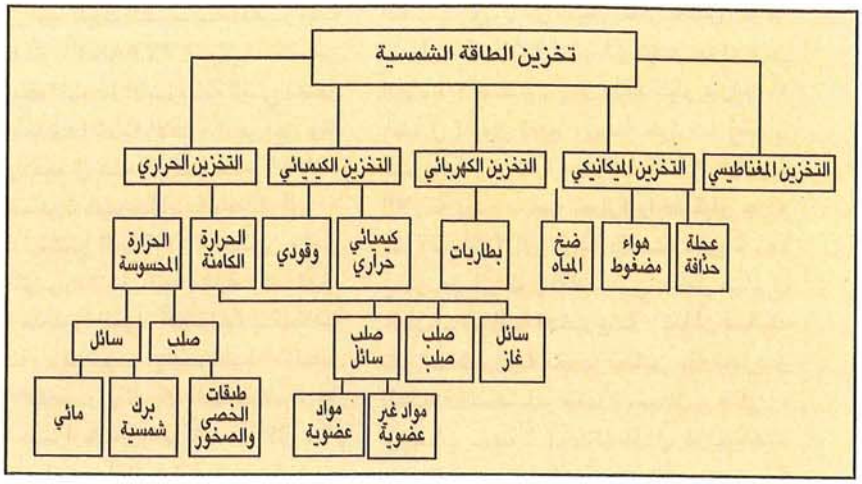
التخزين الحراري

يتم عادة تخزين الحرارة بطريقتين معروفتين الأولى ترتبط بتخزين الحرارة المحسوسة المتراكمة ، والثانية تتعلق بتخزين الحرارة المتبادلة أثناء التغير الطوري في وسط التخزين .

● تخزين الحرارة المحسوسة

يعتمد مبدأ تخزين الحرارة المحسوسة المتراكمة عن طريق تغير درجة حرارة الوسط دون تغير في بنيته الفيزيائية أو الكيميائية كالماء والصخور والحصى والطوب الأحمر وبعض الزيوت والأملاح والمواد غير العضوية وغيرها ، وفي حالة المواد الصلبة المسامية فإن الحرارة تخزن عن طريق تدفق الغاز أو السائل عبر مساماتها وتجاويفها ، ويرتبط اختيار المادة عند تخزين الحرارة المحسوسة بنوع التطبيق ودرجة الحرارة المطلوبة فالماء مثلاً يستخدم لدرجات حرارة دون ١٠٠م ، في حين تستخدم مواد الطوب الأحمر (الحراري) لمستويات حرارية أعلى قد تصل إلى ١٠٠٠م . هذا وتعد تقنية استخدام المياه الجوفية في خزن الحرارة إحدى الطرق الهامة في تخزين الطاقة الشمسية طبيعياً ولفترات طويلة (في حدود سنة) .

* **التخزين بالسوائل :** يعد التخزين بالماء أشهر الطرق لتخزين الحرارة حيث أن الماء



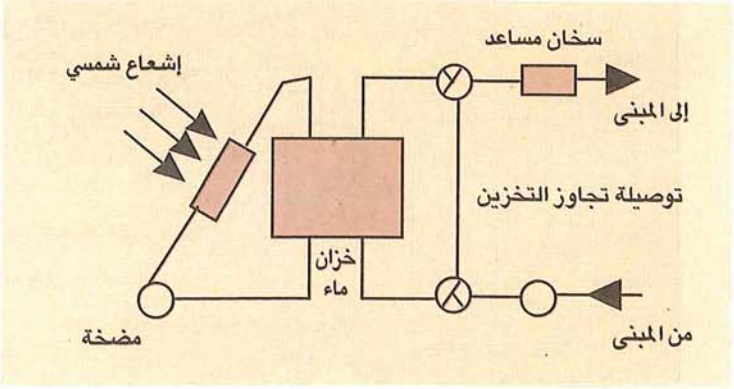
● شكل (١) الطرق المختلفة لتخزين الطاقة الشمسية .

من أرخص المواد المعروفة في مجال تخزين الطاقة الشمسية عند مستويات حرارية منخفضة ، ومن أهم التطبيقات العملية في هذا المجال السخانات الشمسية المستخدمة في توفير مياه المنازل ، ويتمتع الماء بسعة حرارية مرتفعة حيث تصل حرارته النوعية إلى ٤,١٨ كيلو جول/كيلو جرام .°م ، وهو بطبيعته يتوفر بكثرة وغير سام ويمكن تخزينه بسهولة ، وعلى سبيل المثال عندما تتغير درجة حرارة الماء بـ ٦٠°م فإن الطاقة المخزونة بوساطته تساوي ٢,٥×١٠° كيلو جول/م٣ . لذا فإن الخزانات المائية تستخدم بكثرة في معظم تطبيقات السخانات الشمسية ونظم التدفئة المركزية ، حيث توضع عادة داخل المبني أو خارجه أو تحت الأرض بعد عزلها حرارياً ، ويوضح الشكل (٢) مثالاً نموذجياً لنظام التسخين والتدفئة بالطاقة الشمسية ، حيث تقوم المجمعات الشمسية بإمتصاص الطاقة الشمسية وتحويلها إلى حرارة ثم نقلها إلى الخزان المائي الذي يحتوى على مبادل حراري مملوء بسائل يساعد على زيادة فعالية التبادل الحراري . ويتم تصنيع الخزانات المائية من مواد مختلفة كالفولاذ المعالج أو الألمنيوم أو الخرسانة المسلحة (الأسمنت المدعم بالحديد) أو الألياف الزجاجية ، أما مواد العزل الحراري فيستخدم الصوف الزجاجي ومشتقات متعدد اليوريثان . ويتراوح حجم الخزان بين مائة لتر إلى ١×١٠٦ لتر، (١م٣ = ١٠٠٠ لتر) ، ومن المعلوم ـ كقاعدة عامة ـ في تصميم نظم السخانات الشمسية أن كل ٥٠ ــ ٨٠ لتر ماء يلزمه متراً مربعاً واحداً من المجمعات الشمسيةالحرارية . كما يمكن زيادة تخزين الطاقة بالماء باستخدام بعض المركبات أو المحاليل اللاعضوية ، ومن هذه المواد ، تعد مادة هيدروكسيد الصوديوم (Na OH) من المركبات المناسبة لرفع درجة حرارة التخزين حتى درجة ٣٠٠°م .

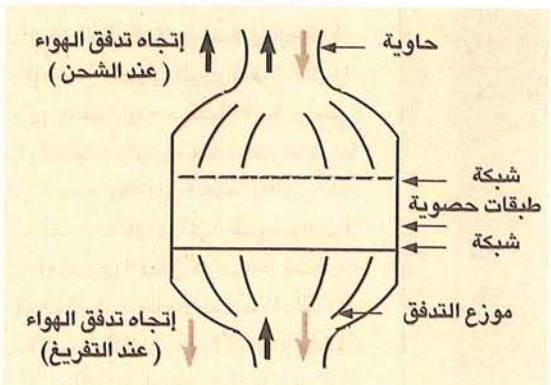
* **التخزين بالمواد الصلبة :** يعد استخدام الصخور والحصى من أهم مبادىء التخزين بالمواد الصلبة ، وفي هذه الطريقة يتم وضعها متراصة في حيز مغلق ومعزول ، وهي مناسبة جداً للإستخدام في المباني أو المرافق العامة حيث تستعمل بشكل عام مع نظم سخانات الهواء الشمسية التي تصل درجة حرارتها إلى ١٠٠°م ، وتتمتع هذه السخانات بتصاميم بسيطة غير معقدة وغير مكلفة . هذا وتبلغ أقطار قطع الحصى المستخدمة مابين ١ إلى ٥ سنتمتر ، وكقاعدة عامة يبلغ وزنها بين ٣٠٠ إلى ٥٠٠ كجم/م٣ لكل متر مربع واحد من المجمعات الشمسية المستخدمة لأغراض التدفئة ، وتبلغ السعة الحرارية النوعية لتغير حراري قيمته ٥٠°م بوساطة الحصى أو الخرسانة ١×١٠° كيلو/م٣ (٣٦ كيلو جول /كيلو جرام).

ومما يجدر ذكره أن المواد الصلبة يمكن استخدامها في تخزين الطاقة الحرارية حتى درجات الحرارة ١٠٠٠°م . ويبين الشكل (٣) مقطعاً مبسطاً لوحدة تخزين بطريقة الطبقات الحصوية المتراصة وفيها يتم دفع الهواء لإضافة أو نزع الحرارة المتراكمة حيث يساعد هيكلها المسامي وتوفر التجاويف الكثيرة على حركة الهواء الساخن في وحدة التخزين ، ويلاحظ من الشكل أيضاً إتجاه وحركة الهواء أثناء إضافة الحرارة (الشحن) وسحبها (التفريغ) .

يمكن استخدام مواد صلبة أخرى مثل أكاسيد المغنيزيوم أو الألمنيوم أوالسيليكون



● شكل (٢) نظام تسخين مياه وتدفئة بالطاقة الشمسية .



● شكل (٣) مقطع لوحدة تخزين بطريقة الطبقات الحصوية .

في تطبيقات درجات الحرارة المرتفعة نسبياً بسبب قدرتها على تخزين الطاقة بطريقة الحرارة المحسوسة . ومن أهم المواد المعروفة في هذا المجال الطوب الأحمر الحراري المصنوع من مادة أكسيد المغنيزيوم .

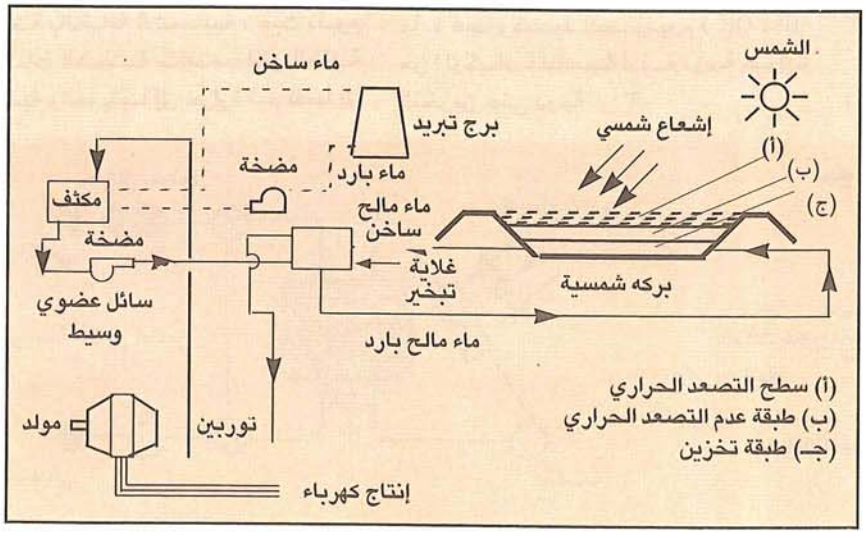
* **التخزين بالبرك الشمسية :** توفر هذه الطريقة وسيلة سهلة وإقتصادية لإلتقاط وتجميع كميات كبيرة من الطاقة الشمسية عند درجات حرارة تتراوح بين ٥٠ إلى ٩٥°م ، ولها تطبيقات واسعة في التدفئة والتبريد بجانب تطبيقات صناعية مختلفة خاصة في إنتاج الطاقة الكهربائية . ومن أهم البرك الشمسية المعروفة حالياً الأحواض المائية ذات التدرج الملحي المركز .

وفي هذا النوع من البرك تستخدم مياه البحر (أو ماء مالح) التي يزداد تركيز الأملاح فيها تدريجياً مع عمق البركة ، ومن الأملاح المعروفة في هذا المجال كلوريد الصوديوم (NaCl) أو كلوريد المغنيزيوم ($MgCl_2$) ، وباستخدام هذه الأملاح يميل قاع البركة إلى لون غامق أو أسود يتم عنده امتصاص الإشعاع الشمسي فتصل درجة حرارة الماء فيه إلى ٩٥°م ، بعدها يمكن سحب الطاقة الحرارية من الطبقات السفلى للبركة دون التأثير على الطبقات العليا وذلك عن طريق ضخها إلى خارج البركة للإستفادة منها فيما بعد وخاصة في مجال تحويل الطاقة الحرارية المتراكمة إلى طاقة كهربائية ، يوضح الشكل (٤) مثالاً لمحطة كهربائية تعتمد على مبدأ البرك الشمسية حيث يتم تشغيل محرك كهربائي حراري أو مولد توربيني عن طريق تبخير محلول عضوي له نقطة غليان منخفضة ، وفي هذه الحالة يتم ضخ المياه الحارة من أسفل البركة إلى جهاز التبخر الذي يحتوي على المحلول العضوي ، وعند بدء عملية التبخر فإن المحلول العضوي يتمدد تحت ضغط منخفض يسمح بتشغيل العنفة (التوربينة) المرتبطة بمولد كهربائي ، ثم يواصل المحلول العضوي التدفق في دورته الخاصة ليصل إلى المكثف ليتم تبريده بالماء البارد الموجود في برج التبريد ، وبذلك يتم تكثيف البخار إلى سائل حيث يضخ إلى المبخر مرة أخرى لتبدأ دورة جديدة وهكذا .

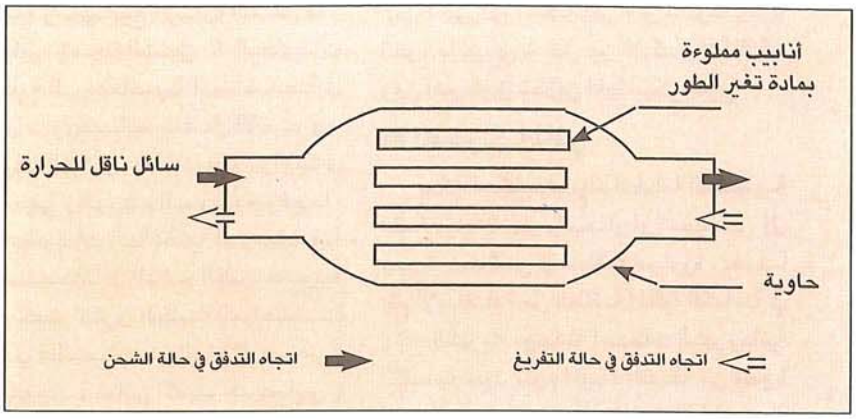
ومن أكبر البرك الشمسية المعروفة بركة إلباسو (ELPASO) بولاية تكساس في الولايات المتحدة الأمريكية التي تشغل مساحة مقدارها ثلاثة آلاف متر مربع ، وقد بدىء بتشغيل هذه البركة عام ١٩٨٦م لإنتاج قدرة كهربائية تصل إلى ٧٠ كيلووات ، وتنتج البركة ٥٠٠ جالون ماء في اليوم في كل وحدة معالجة مائية ، كما تزود مصنعاً مجاوراً للمواد الغذائية بالطاقة الحرارية . وقد وجد أيضاً أثناء مراحل التشغيل القصوى للبركة أنها تحافظ على درجة حرارة تخزين تصل إلى ٩٠°م وتستطيع إنتاج طاقة تقارب ١٠٠ كيلو وات خلال فترة الذروة مما يؤدي إلى إنتاج أكثر من ٨٠ ألف جالون ماء صالحة للشرب في اليوم الواحد . بالإضافة إلى ماسبق ذكره فقد تبين خلال سنوات التشغيل الأولى أن البركة أنتجت حوالي ٥٠ ألف كيلو وات/ ساعة في فترة خمس سنوات .

● التخزين الحراري الكامن

عند حدوث تبادل حراري في وسط ما فإن ذلك يرافقه تغير في الطور من حالة إلى أخرى مثل تغير حالة المادة من صلب إلى سائل إلى غاز . تدعى هذه الآلية بالتخزين الحراري الكامن (Latent Heat Storage) ، وتعد هذه الطريقة أكثر جاذبية من غيرها بسبب ازدياد كثافتها التخزينية في الوسط المدروس . وترتبط قيمة الحرارة الكامنة لتغير الطور مباشرة بدرجة حرارة الوسط الطوري . وعلى سبيل المثال تعادل الطاقة الحرارية اللازمة لذوبان كيلو جرام من الجليد (صلب) إلى واحد كيلو جرام ماء (سائل) دون تغيير درجة حرارته (صفر مئوي) ٨٠ مرة من الطاقة الحرارية اللازمة لرفع درجة حرارة واحد كيلو جرام ماء (سائل) إلى درجة واحدة مئوية مما يدل على أن طور المادة هي عامل هام في تكثيف الطاقة المخزونة . كما أن هنالك تغيرات طورية أخرى يمكن بها تخزين الطاقة الشمسية منها (سائل ـ غاز) ، و(صلب ـ صلب) ، وتدخل في دراسة هذه التغيرات مسألة الحجم أو الوزن ودرجة الحرارة التخزينية المطلوبة . يوضح الشكل (٥) مقطعاً مبسطاً لأحد أجهزة وحدة تخزين الحرارة الكامنه بالإضافة إلى اتجاهات التدفق الحراري في حالتي الشحن والتفريغ ، وتستخدم هذه الأجهزة بكثرة في حالة تغير طور المادة بالإنصهار أو بالتجمد. وتصنف المواد متغيرة الطور المعروفة في تخزين الطاقة الحرارية إلى مركبات عضوية ومركبات غير عضوية ومزائجها المميّهة (مائية) . تتضمن المركبات اللاعضوية الأملاح المركبة المائية والمعادن والسبائك (الخلائط) ، بينما تشمل المركبات العضوية مواد البارافينات والإسترات والكحوليات وغيرها ، ومن بين الأملاح المائية الهامة ملح جلوبر ($Na_2SO_4 . H_2O$) أو كبريتات الصوديوم المائية و أملاح كلوريد الكالسيوم المائية



● شكل (٤) مخطط لمحطة إنتاج الكهرباء بالبرك الشمسية .



● شكل (٥) مقطع لجهاز وحدة تخزين الحرارة الكامنة (الحرارة المستترة) .

($CaCl_2 . 6H_2O$) ، وكذلك أملاح أسيتات الصوديوم المائية ($Na\ CH_3\ COO . 3H_2O$) وغيرها ، ونظراً للانخفاض النسبي لتكاليف هذه الأملاح فهناك العديد من البحوث الجارية للوصول إلى كفاءة تخزينية جيدة . كذلك اتضح أن هيدروكسيد الأمونيوم المعروف بالنشادر (NH_4OH) من أنسب المواد الطورية الملائمة لسخانات المياه والمكيفات المنزلية . ولكن ماتزال هناك بعض المشاكل المتعلقة باستخدامه من أهمها ظاهرتا التبريد الفائق والإنتقال الطوري الإنفصالي حيث لا يساعد التبريد الفائق في المادة على عودتها إلى نقطة تجمدها الأساس عند حدوث تبادل الطور ، أما الإنتقال الطوري الإنفصالي فيؤثر سلباً على الخصائص الكيميائية الفيزيائية لطور المادة . وقد عولجت مشكلة التبريد الفائق عن طريق إضافة بعض المواد المساعدة النووية أو الهلامية بمساعدة طرق تقنية خاصة ، في حين تم التغلب على مشكلة الإنتقال الطوري الإنفصالي بإضافة مواد خاصة تعمل على زيادة التصلب (التخثر) وزيادة فعالية الإنتقال الطوري . إضافة لذلك تستخدم المزائج (خليط ملحين أو أكثر) بكثرة في تطبيقات تخزين الطاقة الشمسية الحرارية ، ومن أمثلة ذلك استخدام مخلوط نترات المغنيزيوم المائي مع كلوريد المغنيزيوم المائي بنسب ٥٠,٧٪ و ٤٩,٣٪ على التوالي :

$[Mg\ (NO_3)_2 . 6H_2O\ (50.7\%) + MgCl_2 . 6H_2O\ (49.3\%)]$.

وبشكل عام يمكن القول أن المواد الطورية لها تطبيقات كثيرة في مجال تسخين المياه والتدفئة والمضخات الحرارية والبيوت الزراعية والتبريد وغيرها . ومن بين الإستخدامات المتزايدة في المرافق العامة والمباني الكبيرة ذات النوافذ المختلفة تخزين الحرارة الكامنة عن طريق سحب الحرارة الناتجة عن الأشخاص والأجسام المتحركة والأجهزة الآلية ومصابيح الإنارة وأجهزة الحاسب ، وإستخدامها لإنتاج الثلج ليلاً بمساعدة الكهرباء الرخيصة واسترجاعها نهاراً لتبريد المباني . ويمكن بهذه الطريقة تخزين الطاقة خلال عام كامل .

التخزين الكيميائي

يمكن تخزين الطاقة الشمسية كيميائيا إما بواسطة تخزين الوقود الناتج عن التفاعلات الكيموضوئية أو التخزين الناتج عن التفاعلات الكيميائية العكسية وذلك كما يلي : -

● التخزين الوقودي

يقصد بالتخزين الوقودي تخزين الطاقة الشمسية على شكل وقود يمكن إنتاجه بوساطة التفاعلات الكيموضوئية ، وفي هذه الحالة يمكن استخدام بطاريات تخزين خاصة يحدث منها تفاعلات كيميائية عن طريق تأثير الضوء (الإشعاع الشمسي) عند الشحن ، ثم تفريغها بالطريقة الكهربائية التقليدية ، ومن أهم التفاعلات المعروفة في تخزين الطاقة الشمسية كيميائيا مايلي : -

$$2\ NOCl + \text{فوتونات} \longrightarrow 2NO + Cl_2$$

حيث يمثل الفوتون جسيم الطاقة الموجودة في الإشعاع الضوئي (الشمسي) ومن الممكن أيضاً إستخدام التحليل الكهربائي للماء (الكهروليتي) لإنتاج غاز الأكسجين والهيدورجين وإعادة إتحادهما في معدات خلوية خاصة تدعى خلايا الوقود لإنتاج الطاقة الكهربائية ، وفي هذه الطريقة يمكن تخزين الأكسجين والهيدورجين بفاعلية عالية على شكل غاز أو سائل ، وعلى هذا الأساس يمكن استخدام الهيدورجين فيما بعد كوقود فعّال غير ملوث للبيئة لتشغيل محركات السيارات والآلات والمعدات الكهربائية المختلفة . يخزن الهيدروجين في أشكال مختلفة كغاز مضغوط أو كسائل أو كمواد معدنية مهدرجة ، ويمتاز الشكل الأخير (مواد معدنية مهدرجة) بأن له كثافة تخزين مرتفعة ومستقرة . وقد قامت **مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية** بتطوير نماذج عملية وناجحة من خلايا الوقود ذات الحامض الفوسفوري لأجل إنتاج قدرات كهربائية ١٠٠ وات ، ٢٥٠ وات ، واحد كيلووات وذلك في مختبرات خلايا الوقود في القرية الشمسية .

من جهة أخرى يمكن استخدام الطاقة الشمسية في عمليات التخمر لبعض الطحالب والنباتات والفضلات لإنتاج غاز الميثان (CH_4) الذي هو وقود جيد ومستقر عند درجة حرارة الجو المحيطة ، ويمكن للميثان أن يتفاعل مع الأكسجين لإطلاق الطاقة الحرارية المخزونة حسب التفاعل التالي :

$$CH_4 + 2O_2 \longrightarrow 2H_2O + CO_2$$

وتشير كافة الدراسات والبحوث أنه تم تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كيميائية من الميثان بكفاءة ٢٪ ، وقد وجد أن كل ١ كيلو متر مربع من الطحالب يمكن أن ينتج كمية من الميثان تختزن ٤ ميجاوات من الطاقة الشمسية . وتتطلب محاصيل الطحالب الحصاد والمعالجة لتعطي ٥٪ مواد صلبة ، أما الباقي فهي مياه متبقية يمكن الإستفادة منها لأغراض زراعية أخرى . تخضع المواد الصلبة الناتجة إلى تخمر بدون وجود الهواء ولفترة ثلاثة أسابيع مما يؤدي إلى تحول نصفها إلى ميثان .

إضافة لذلك يستفاد من آلية التمثيل الضوئي من تخزين الطاقة الشمسية حسب التفاعل التالي :

$$CO_2 + H_2O \xrightarrow[\text{اليخضور}]{\text{الضوء}} H_2CO + O_2$$

وتكون المواد الهيدروكربونية الناتجة مستقرة عند درجة حرارة الوسط المحيط ولكن عند درجات الحرارة المرتفعة يصبح التفاعل السابق معكوساً لإطلاق الطاقة الشمسية المخزونة بشكل حراري .

● التخزين الكيميائي ـ الحراري

توفر هذه الطريقة نظاماً تخزينياً عالي الكثافة عند درجات حرارة عادية ، حيث يمكن تخزين الطاقة لمدة طويلة على شكل طاقة كامنة يمكن ضخها ونقلها فيما بعد لمسافات بعيدة . ويمكن توضيح ذلك من خلال التفاعل العكسي التالي :

$$SO_3 \underset{٥٩٠^\circ}{\overset{١٠٢٥^\circ}{\rightleftharpoons}} SO_2 + O$$

حيث يتفكك غاز ثالث أكسيد الكبريت إلى غاز ثاني أكسيد الكبريت وغاز الأكسجين عند درجة حرارة ١٠٢٥°مئوية ، ولكن بوجود المحفزات يتم التفاعل العكسي لإنتاج ثالث أكسيد الكبريت .

التخزين الكهربائي

تحتاج معظم تطبيقات الخلايا الكهروضوئية إلى وسائل ومعدات تخزين مناسبة لتغذية الأحمال المطلوبة عندما لا تتوفر الطاقة الشمسية (وجود غيوم ، فترة الليل ...) . ويتوفر حالياً عدد من الطرق الممكنة لتخزين الطاقة الكهربائية إلا أن البطاريات ، وهي إحدى طرق التخزين الكيميائي ، هي الأفضل من الناحية العملية حيث تتمتع بمواصفات فنية خاصة أهمها الكفاءة العالية للشحن ، وقلة الفاقد الكهربائي ، وقلة متطلبات الصيانة وطول العمر الإستهلاكي ، وأخيراً التكيف مع الظروف المناخية المحيطة .

تتكون البطاريات عادة من مجموعة من الخلايا الكهروكيميائية تقوم بتخزين الطاقة الكهربائية من أجل استرجاعها في وقت لاحق . وتصنف البطاريات إلى نوعين رئيسين هما نوع عادي غير قابل للشحن كالبطاريات الصغيرة المستخدمة في الأجهزة الإلكترونية ومصابيح الإنارة الصغيرة ... ونوع قابل لإعادة الشحن كالبطاريات الحامضية الرصاصية المستخدمة في السيارات ووسائط النقل الأخرى . وبطاريات النيكل ـ الكادميوم ، والنيكل الهيدروجيني وكلوريد الصوديوم وغيرها . وتعد البطاريات الحامضية الرصاصية الأكثر استخداما في النظم الكهروضوئية حالياً ، حيث تتكون الخلية الواحدة منها في قطب سالب (الرصاص) وقطب موجب (ثاني أكسيد الرصاص) يغمران في محلول مائي لحامض الكبريت . ولإعطاء فكرة عن جهد هذه البطاريات ، لنفرض أن خلية واحدة ذات جهد ٢ فولت فإن ربط ست خلايا منها على التوالي يعطي جهداً يساوي ١٢ فولت وهكذا . ومن أهم تطبيقات النظم الكهروضوئية مع البطاريات استخدامها في المناطق البعيدة النائية حيث يستفاد من الطاقة المتراكمة في البطاريات في وقت لاحق لتغذية الأحمال الكهربائية كالإنارة وضخ المياه حتى بعد غروب الشمس . ومما يجدر ذكره أن التكاليف التأسيسية للنظم الكهروضوئية مع بطاريات التخزين تكون مرتفعة نسبياً إلا أنها تأخذ في الإنخفاض عندما تزيد الطاقة عن واحد كيلووات .

ومن بين الحلول العملية المقترحة إقتصادياً على المدى البعيد استخدام الطاقة الشمسية الكهروضوئية لإنتاج الهيدروجين ثم تخزينه واستخدامه في خلايا الوقود لإنتاج الكهرباء كما ذكرنا سابقاً . وقد قامت بعض الدول بتجارب ناجحة في هذا الميدان أهمها الولايات المتحدة الأمريكية وألمانيا الإتحادية واليابان والمملكة العربية السعودية . حيث قامت **مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية** من خلال برنامج التعاون السعودي ـ الألماني (الهايسولار) بمشروع إقليمي رائد تم بموجبه نقل تقنية إنتاج الهيدروجين بالطاقة الشمسية والإستخدامات العملية المرافقة .

التخزين الميكانيكي

التخزين الميكانيكي للطاقة الشمسية هو تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة ميكانيكية يمكن الإستفادة منها لاحقا سواء على صورتها الميكانيكية أو بوساطة تحويلها إلى أى شكل من أشكال الطاقة . ومن أهم طرق تخزين الميكانيكي مايلي :

● التخزين المائي

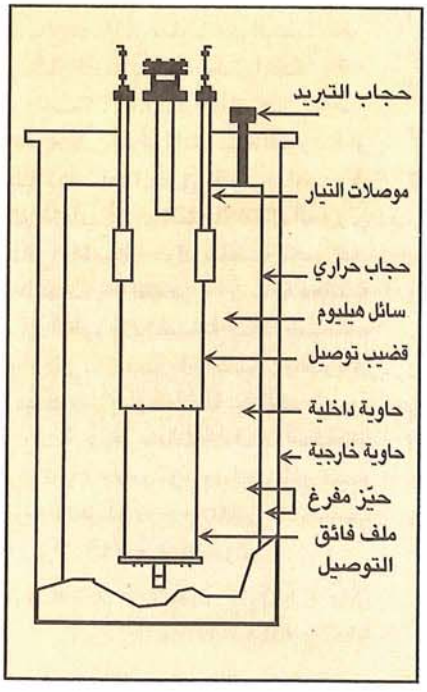
يمكن استخدام نظم الطاقة الشمسية لضخ مياه الأنهار والبحار أو المحيطات ، إلى بحيرة سد تبنى في منطقة مجاورة ، بعدها يتم الإستفادة من الطاقة المائية الكامنة في إنتاج الكهرباء بوساطة المحطات الكهرومائية التقليدية حيث تقوم المياه المتدفقة من بحيرة السد العلوية بتشغيل العنفات المائية المرتبطة بمولدات كهربائية خاصة .

● التخزين الهوائي المضغوط

يمكن استخدام الطاقة الشمسية الكهروضوئية في تشغيل ضاغط هواء يدار بمحرك كهربائي حيث يتم تخزين الهواء المضغوط في تشغيل العنفة المرتبطة بمولد كهربائي . كما يمكن استخدام العنفات العاملة بطاقة الرياح في تخزين الهواء المضغوط ، وقد أثبتت هذه الطريقة جدواها العملية في تخزين الطاقة الشمسية آلياً .

● التخزين بالعجلة الحدّافة

يمكن تخزين الطاقة الشمسية الكهروضوئية بصورة ميكانيكية عن طريق استخدام عجلة حدّافة تتكون من قرص



● شكل (٦) مخطط لوحدة تخزين بملف فائق التوصيل .

دوراني ذو أقطاب مغناطيسية مثبتة على محور الدوران لإنتاج الكهرباء عن طريق مولد تقليدي . وتوضع جميع مكونات عجلة الحدّافة في وسط مفرغ من الهواء لتقليل الإحتكاك ، ويرتبط زمن شحن العجلة الحدّافة بمقدار الجهد الكهربائي المطبق عليها . وتدل دراسات البحوث والتطوير أن مستقبل هذه الطريقة سيكون منافساً بالمقارنة مع البطاريات خاصة أنه لا توجد آثار ضارة بالبيئة ، كما أن عمرها الإستهلاكي يتراوح بين ١٥ ــ ٢٥ سنة ولها تطبيقات صناعية وسكنية وفي بعض وسائط النقل .

التخزين المغناطيسي

تم مؤخراً تخزين الطاقة الشمسية الكهروضوئية مباشرة عن طريق تحويلها إلى طاقة مغناطيسية باستخدام ملفات مغناطيسية فائقة التوصيل مصنوعة من مواد ذات مقاومة صغيرة جداً عند درجات حرارة منخفضة جداً . وتعد هذه الطريقة ذات كفاءة عالية ، حيث أنه لا يلزم فيها تحويل الطاقة إلى أشكال أخرى مثل التحويل الميكانيكي وغيره ، ثم تحويلها مرة أخرى إلى طاقة كهربائية ، وبالتالي فقدان جزء منها أثناء التحويل . وفي هذه الطريقة يمرر تيار كهربائي مرتفع على ملف فائق التوصيل يعمل على حفظ الطاقة بشكل مغناطيسي ثم يحولها عند اللزوم إلى طاقة كهربائية . وقد لجأت بعض المصانع الإلكترونية إلى إستخدام هذه التقنية لتأمين الكهرباء عند حدوث انقطاع مفاجيء للتيار الكهربائي نظراً لصغر حجمها وطول عمر استهلاكها . يوضح الشكل (٦) مخططاً مبسطاً لوحدة تخزين نموذجية تستخدم ملفاً مغناطيسياً فائق التوصيل .

مقارنة تقنيات التخزين

بعد استعراض التقنيات المتوفرة حالياً في تخزين الطاقة الشمسية فإن إجراء مقارنة عامة قد تساعد على اختيار الطريقة التخزينية الملائمة لتطبيقات الطاقة الشمسية ، علماً بأن بعض هذه التقنيات مايزال في مرحلة البحث والتطوير ، لذا لابد من متابعة دراستها وتطويرها لتحقيق أفضل جدوى اقتصادية ، ولإيجاد أفضل الحلول الممكنة لمشكلة تخزين الطاقة الشمسية ، يبين الجدول (١) مقارنة لأهم خصائص التخزين الحراري المحسوس والكامن . بالإضافة إلى ماسبق يبين الجدول (٢) أيضاً ملخصاً لكثافة الطاقة المخزونة باستخدام بعض تقنيات التخزين السابقة .

وفي الواقع تتغير التكاليف الإجمالية من تقنية إلى أخرى وتتأثر بالتطبيق المطلوب ، ومع ذلك يمكن القول أن معظم تقنيات التخزين ماتزال غير قياسية (عيارية) .

وخلاصة القول فإن موضوع تخزين الطاقة الشمسية يعد في أطواره الأولى ولا يزال في حاجة إلى تكثيف الجهود في البحث والتطوير . وقد تلاحظ عند دراسة معظم التقنيات التخزينية المتوفرة حالياً كالحرارية والكهربائية والكيميائية والميكانيكية والمغناطيسية ، أن بعض هذه التقنيات قد دخل طور الاستخدام التجاري إلا أن معظمها لم تحقق بعد الجدوى الإقتصادية لنظم الطاقة الشمسية .

المقدار	التخزين الحراري المحسوس		التخزين الحراري الكامن	
	الصخور	الماء	المواد العضوية	المواد غير العضوية
حرارة الإنصهار (كيلو جول/كيلو جرام)	—	—	١٩٠	٢٣٠
الحرارة النوعية (كيلو جول/كيلو جرام)	١,٠	٤,٢	٢,٠	٢,٠
الكثافة (كيلو جرام/متر مكعب)	٢٢٤٠	١٠٠٠	٨٠٠	١٦٠٠
الكتلة (لكل 10^6 كيلو جول) *	٦٧٠٠٠	١٦٠٠٠	٥٣٠٠	٤٣٥٠
الحجم (لكل 10^6 كيلو جول) *	٣٠	١٦	٦,٦	٢,٧
* كل 10^6 كيلو جول = ٣٠٠ كيلو وات ـ ساعة (تغير حراري ١٥°م)				

● جدول (١) مقارنة خصائص التخزين الحراري المحسوس والكامن .

التقنية المستخدمة	الكفاءة (٪)	كثافة الطاقة المخزونة		عمر الإستهلاك (سنة)
		الوزنية (وات ـ ساعة / كيلو جرام)	الحجمية (وات ـ ساعة / ليتر)	
بطاريات حامضية	٦٠ ــ ٨٠	٣٥ ــ ٤٥	٣٥ ــ ٨٠	٥ ــ ١٥
هواء مضغوط	٥٠ ــ ٧٠	١١٠	٨ ــ ٧٠	٣٠
عجلة حدّافة	٧٨ ــ ٩٥	٥٠	١٨ ــ ١١٠	٣٠
ضخ المياه	٦٥ ــ ٧٠	—	٠,٠٣٦	٥٠
هيدروجين	١٥ ــ ٣٠	٤٠٠ ــ ٧٠٠٠	٨٠٠ ــ ٩٥٠	—
مغناطيسي	٩١ ــ ٩٥	—	—	٥٠

● جدول (٢) كثافة الطاقة المخزونة باستخدام تقنيات تخزين الطاقة الشمسية .