الطاقات المتجددة

المحاضرة (٣)

طاقة الشمس - ١

نظري

الدكتور داود ملوك

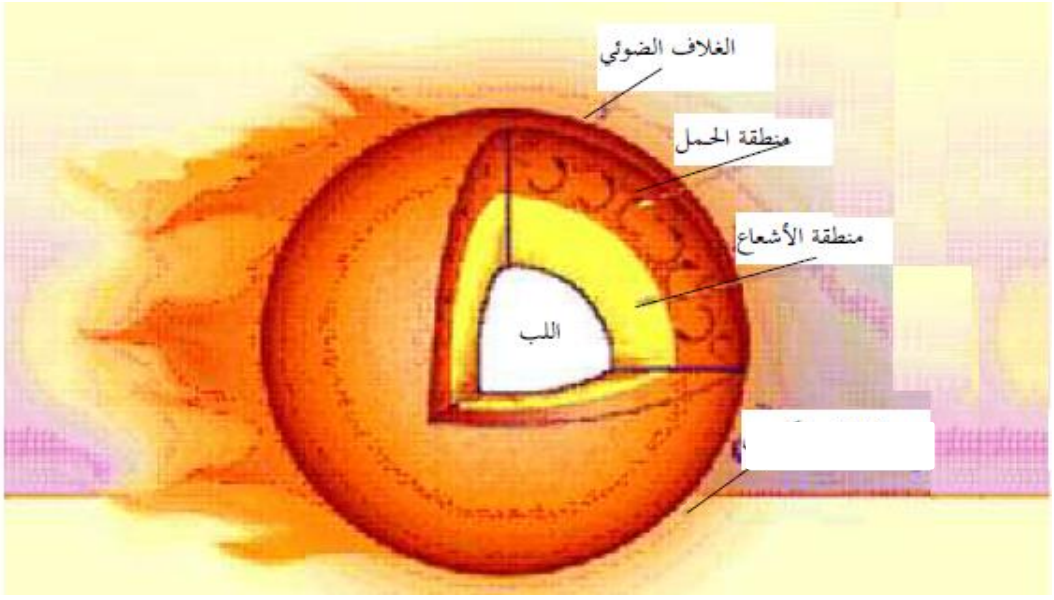
الطاقة الشمسية

مقدمة:

الشمس هي مصدر طاقة حياة الأرض إذ لولاها لما وجدت الحياة بشكلها الحالي على سطح كوكبنا، وقد أدرك الإنسان منذ القدم أهمية الشمس في حياته فلم يدخر وسعا طوال تاريخه في أن يدرس حركتها وأن يعمل باستمرار على كشف المزيد والمزيد من الحقائق المحيطة بها.

تُعرف الشمس علي أنها كرة ملتهبة وتتكون بشكل أساسي من غاز الهيدروجين وغاز الهليوم. وتتولد الطاقة الشمسية نتيجة التحول المستمر لكل أربع ذرات من الهيدروجين إلى ذرة واحدة من الهليوم في تفاعل اندماجي نووي. تصل درجة حرارة الشمس إلي 5000 درجة مئوية علي السطح، ومتوسط المسافة بينها وبين الأرض 150 مليون كيلومتر يقطعها ضوء الشمس في ثماني دقائق ونصف، أما قطرها فيبلغ 1.4 مليون كيلومتر أي يكبر قطر الأرض 110 مرة، وهو ما يعني أن الشمس تتسع لحوالي مليون كوكب في حجم الأرض. وتبلغ كتلة الشمس حوالي $2*10^{30}$ كيلوغرام فهي أثقل من الأرض ب $3*10^{5}$ مرة.

يوضح شكل (١) مقطعاً بسيطاً في الشمس، حيث يظهر لب الشمس أو مركز الشمس (Sun Core) وهو المنطقة التي يتحول فيها الهيدروجين إلى هليوم في تفاعل اندماج نووي، وقد بينت الدراسات النظرية أن مركز الشمس عبارة عن مفاعل نووي اندماجي يعطي طاقة هائلة تصل إلى حوالي $3.9*10^{26}$ *j/s*، ويعمل فرق درجات الحرارة بين اللب والسطح إلي طرد الطاقة الناتجة نحو السطح لتخرج في شكل إشعاع (ضوء) وذلك من منطقة الإشعاع " Radiation Zone"، وفي الجزء الخارجي من الشمس توجد منطقة الحمل "Convection Zone" والتي يعلوها الغلاف الضوئي وهو الجزء الذي نراه من علي كوكب الأرض (يمثل هذا الجزء قرص الشمس الذي نراه في السماء)، ويبلغ سمكه مئات الكيلومترات ويصدر عنه طاقة تخرج في شكل أشعة مرئية.



الشكل (١) رسم تخطيطي بسيط لقطاع في الشمس

يبدو للوهلة الأولى أن طاقة الشمس لو أحسن استغلالها سوف تضع حلاً جذرياً لمشكلة الطاقة. فهي تهب الكرة الأرضية مقداراً هائلاً من الطاقة يقدر بحوالي $1.73*10^{11}$ *MW* وهو يزيد – على سبيل المثال – خمسين ألف مرة عن ما تنتجه الولايات المتحدة الأمريكية من الطاقة.
بالإضافة إلى كمية الطاقة الشمسية الكبيرة التي يمكن استغلالها، فإنه يوجد عاملان مهمان يميزان الطاقة الشمسية:
١- الطاقة الشمسية نظيفة لا تسبب تلوثاً للبيئة على العكس من الطاقة الناتجة عن احتراق المصادر التقليدية كالفحم والبترول المستخدمة حالياً.
٢- لا تحتاج الطاقة الشمسية أي مجهود للبحث عنها فهي متوفرة في كل مكان يعيش فيه الإنسان.
ولكن توجد بعض المشاكل أو العوائق عند استخدام الطاقة الشمسية:
المشكلة الأولى: وهي أنها تعتبر مصدراً مخففاً للطاقة *Dilute Source* حتى في أكثر المناطق الحارة من الأرض، حيث أن تدفق الإشعاع الشمسي نادراً ما يزيد عن $1\ KW/m^2$ وهي قيمة صغيرة للاستخدام التكنولوجي، ولذا يتم استخدام مجمعات كبيرة المساحة.
المشكلة الثانية: وهي تغير الطاقة الشمسية يومياً بسبب دوران الأرض حول نفسها والذي ينتج عنه تعاقب الليل والنهار وموسمياً بسبب دوران الأرض حول الشمس في مدار ثابت. ويمكن التغلب على هذه المشكلة باستخدام ما يسمى بالبطاريات الشمسية التي تُستخدم لتخزين الطاقة في فترات سطوع الشمس لاستخدامها في فترات غيابها ليلاً أو في حال وجود سحب.
وقد تم تحقيق نجاح كبير لاستغلال الطاقة الشمسية ولكن لم يتم التمكن بعد من جعل كلفتها أقل من كلفة استغلال البترول والفحم والغاز الطبيعي.

لمحة تاريخية:

لربما كانت قصة أرخميدس المشهورة والمتعلقة باستعماله للمرايا لتركيز أشعة الشمس على الأسطول الروماني وإحراقه في عام ٢١٢ قبل الميلاد، من أولى الإشارات التي تدل على استعمال الإنسان للطاقة الشمسية بطريقة علمية وبناءً على دراسة ومعرفة بخصائص الإشعاع الشمسي والمرايا العاكسة في ذات الوقت. وتقول بعض المصادر أن البابليون قد استخدموا أواني ذهبية مصقولة كالمرايا لتركيز الإشعاع الشمسي للحصول على النار. برز الاهتمام بالطاقة الشمسية في أوائل القرن السابع عشر في أوروبا، إذا كان هناك محاولات لصنع محرك يعمل على الطاقة الشمسية وذلك بتركيز الأشعة الشمسية على إناء محكم مملوء جزئياً بالماء، وبفعل تأثير أشعة الشمس يتمدد الهواء ويدفع الهواء إلى الخارج على شكل نافورة .غير أن السمة العامة لمعظم التجارب والمحاولات التي جرت في القرن السابع عشر كانت تتركز حول استخدام المرايا لتركيز أشعة الشمس واستعمال الحرارة الناتجة، وهنا نذكر أنه مازالت فكرة استعمال المرايا العاكسة والمركزة لأشعة الشمس قيد الاستعمال في وقتنا الحاضر. وجرت محاولات في القرن الثامن عشر من قبل علماء لصنع أفران شمسية واستعمالها في الطبخ. أما القرن التاسع عشر فقد شهد حصول تطورات جديدة في تكنولوجيا استخدام الطاقة الشمسية، والتي تمثلت في التجارب الأولى لصنع محرك بخاري يعمل بالطاقة الشمسية لتسيير الآلات، غير أن التكلفة الاقتصادية العالية لهذه المحركات وكفاءتها القليلة وضعت حدا أمام انتشارها، وفي نهايات القرن التاسع عشر بدأت فكرة توليد الكهرباء مباشرة من الأشعة الشمسة بالظهور. مع بداية القرن العشرين أخذ الاهتمام

بإنتاج الطاقة الكهربائية من الطاقة الشمسية يزداد انتشاراً. والحدث الهام في العام ١٩٥٤، والذي كان له أثر هام وواسع في استخدام الطاقة الشمسية، هو الإعلان عن إنتاج الخلايا الشمسية التي تُصنع من السليكون وتقوم بتحويل الإشعاع الشمسي إلى طاقة كهربائية بشكل مباشر.

كيف يتم استغلال الطاقة الشمسية ؟

أشعة الشمس أو الأشعة الشمسية أو ضوء الشمس هو عبارة عن مجموع من الموجات الكهرومغناطيسية. ومن اجل استغلال الطاقة الشمسية يجب تحويل هذه الموجات الكهرومغناطيسية إلى أشكال أخرى للطاقة يمكن استخدامها لتلبية حاجات البشر.
إذا من اجل تحويل الطاقة الشمسية إلى شكل اخر، نحن بحاجة في البداية – وببساطة – إلى تجميع والتقاط الإشعاع الشمسي، الأمر الذي يمكن تحقيقه باستخدام معدات أو وسائل أو أجهزة تسمى: **المجمعات الشمسية (Solar Collector)**

المجمعات الشمسية:

يتطلب الاستخدام الفعال للطاقة الشمسية ضرورة تحويلها من موجات كهرومغناطيسية إلى أحد أشكال الطاقة الشائعة الاستعمال (حرارية – كهربائية – فوتوكيميائية) من أجل استخدامها في تلبية واحدة أو اكثر من حاجات البشر، ومن أجل تحقيق هذا الغرض يتطلب الأمر استعمال بعض الوسائل التي تقوم بتحويل الطاقة الشمسية إلى أحد أشكال الطاقة سهلة الاستعمال. وحيث إن الطاقة الحرارية والكهربائية والفوتوكيميائية هي الأشكال الثلاثة الشائعة، فان تحويل الطاقة الشمسية إلى أي من أشكال الطاقة هذه يتطلب وسيلة ملائمة تقوم بالتعامل مع الإشعاع الشمسي وتحويله إلى شكل ملائم من الطاقة، وسنطلق على هذه الوسائل اسم المجمعات الشمسية، ذلك أن مهمتها هي التقاط الطاقة الشمسية الساقطة على سطحها وتحويلها إلى أحد أشكال الطاقة الشائعة الاستعمال، أما الأنواع الرئيسية لهذه المجمعات فهي:

١- المجمعات الشمسية الحرارية:

المجمعات الشمسية الحرارية هي المجمعات التي تقوم بتحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة حرارة، من خلال خصائص الأجسام المادية المتعلقة بالقدرة على امتصاص الأشعة الشمسية. وتجدر الإشارة إلى أن الاسم ***الشائع*** لهذا النوع من المجمعات هو المجمعات الشمسية أو اللاقطات الشمسية، أي أنه – وفي بعض المراجع – يتم استخدم مصطلح المجمعات الشمسية أو اللاقطات الشمسية للإشارة – مجازاً – إلى المجمعات الشمسية الحرارية التي تحول الطاقة الشمسية إلى حرارة. وفي شرحنا لاحقا عن خصائص هذه المجمعات (المجمعات الشمسية الحرارية) فإننا سنستعمل الاسم الشائع لها وهو (المجمعات الشمسية)، علماً بأن أية وسيلة تقوم بالتقاط أشعة الشمس وتحويلها هي مجمع شمسي بفارق أن الشكل النهائي للطاقة يختلف من حالة إلى أخرى.

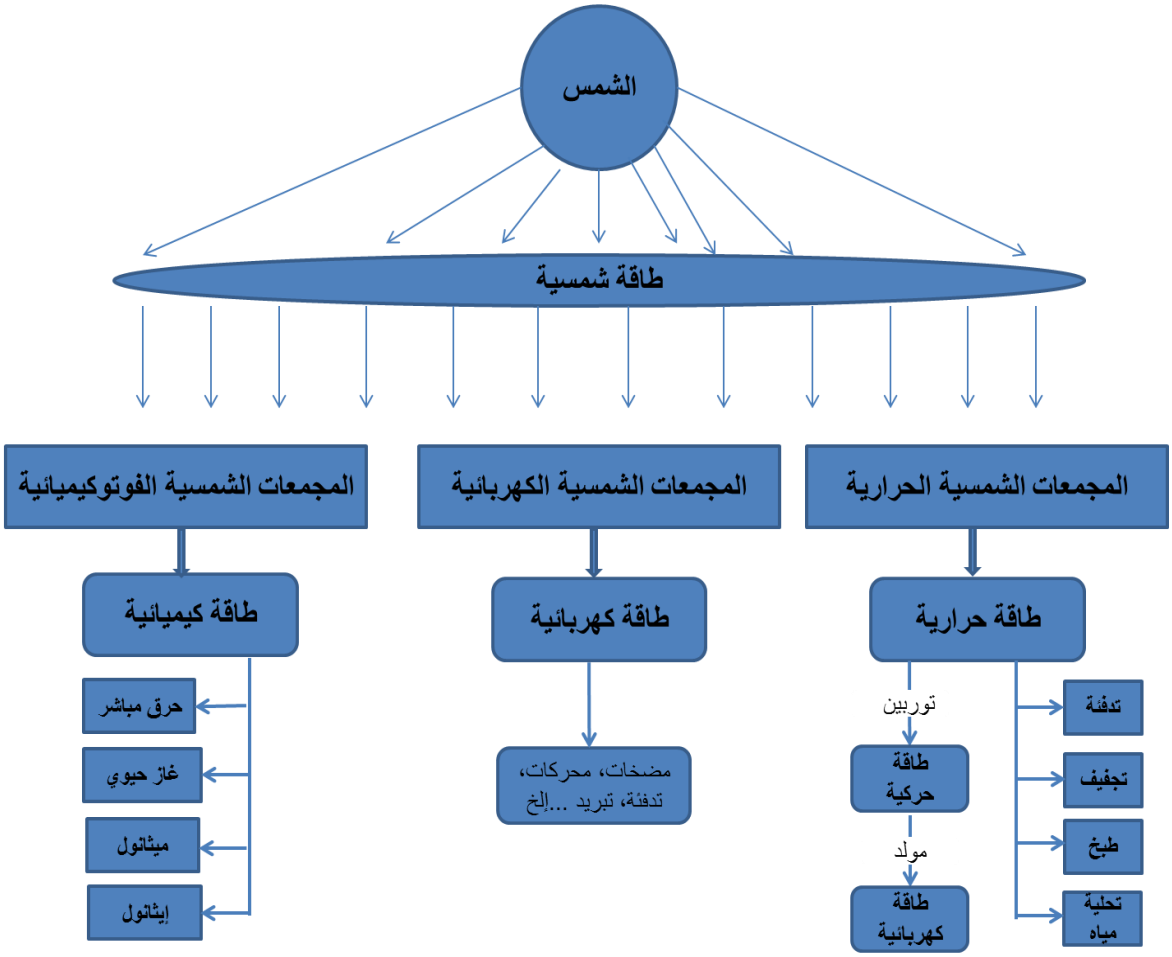
٢- المجمعات الشمسية الكهربائية (الخلايا الكهروضوئية) أو (الخلايا الشمسية):

وهي الأجسام التي تقوم بتحويل طاقة الإشعاع الشمسي إلى طاقة كهربائية **بشكل مباشر** دون الدخول في عمليات التحويل. وتجدر الإشارة هنا، أنه بالإمكان إنتاج الطاقة الكهربائية بواسطة الحرارة الناتجة عن استعمال المجمعات الشمسية الحرارية، وهو الأمر الذي يحتاج إلى وسائل وسيطة أخرى مثل التوربينات و المبخرات والمكثفات، وهنا يتم تحويل طاقة الشمس إلى طاقة كهربائية بشكل **غير مباشر**، أي ضرورة الدخول في عملية تحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة كهربائية. أما في حالة المجمعات الشمسية الكهربائية فان إنتاج الكهرباء يتم بصورة مباشرة.

٣- المجمعات الفوتوكيميائية :

المجمعات الفوتوكيميائية هي المجمعات التي تستعمل الطاقة الشمسية للقيام بتفاعلات كيماوية وإنتاج المواد الكربوهيدراتية كما في حالة أوراق النبات أو إنتاج الهيدروجين كما في حالة بعض الطحالب. فعلى سبيل المثال تقوم أوراق النباتات بتحويل طاقة الشمس إلى طاقة مخزنة (مواد عضوية) في النبات عن طريق عملية التمثيل الضوئي.

يوضح المخطط المرسوم في الشكل (٢) تحويل الطاقة الشمسية عن طريق المجمعات إلى أشكال أخرى للطاقة وبعض استخداماتها.



الشكل (٢) تحويل الطاقة الشمسية عن طريق المجمعات إلى أشكال أخرى للطاقة وبعض استخداماتها

المجمعات الشمسية الحرارية:

قلنا أن الاسم الشائع لهذه المجمعات هو المجمعات الشمسية، ومهمة هذه المجمعات على اختلاف أشكالها وانواعها هي تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة حرارية. ويمكن تصنيف المجمعات الشمسية إلى نوعين رئيسيين، النوع الأول هو المجمعات الشمسية المستوية (Flat solar collectors)، والنوع الثاني هو المجمعات الشمسية المركزة (Concentrating collector).

سنركز على النوع الأبسط والاكثر انتشاراً وهو **المجمعات الشمسية المستوية أو المسطحة** (Flat solar collectors)، وبشكل عام تقوم هذه المجمعات بنقل الطاقة الحرارية الناتجة إلى أحد الموائع كالهواء أو الماء أو أي من السوائل الأخرى من أجل استخدام هذه الطاقة الحرارية في تلبية أحد المتطلبات.

لنفكر ببساطة بمبدأ عمل هذه المجمعات الشمسية ؟

المجمع الشمسي المسطح غاية في البساطة والسهولة التكنولوجية. والفكرة هي تحويل طاقة الشمس (الإشعاع الشمسي) إلى طاقة حرارية (حرارة)، أي يجب في البداية امتصاص الأشعة الشمسية، الأمر الذي يتطلب صفيحة معدنية معرضة للشمس، ومن الطبيعي أن يكون لونها أسود لامتصاص أكبر قدر ممكن من الإشعاع الشمسي. ومن أجل نقل الحرارة من هذه الصفيحة يجب تمرير ماء أو هواء عبر أنابيب ملامسة لها. ونضع هذه الصفيحه والأنابيب ضمن صندوق ونغطيه بالزجاج للسماح لأشعة الشمس بالمرور إلى الصفيحة وحبس الحرارة بداخل الصندوق. إذاً، يتكون المجمع الشمسي المستوي من الأجزاء التالية:

١- اللوح الماص أو الصفيحة الماصة:

اللوح الماص هو الجزء الفعال من المجمع الشمسي، ذلك أنه يقوم بامتصاص أشعة الشمس حيث ينتج عن ذلك المفعول الحراري ارتفاع درجة حرارة الصفيحة، ومن ثم تنتقل الحرارة عبر الصفيحة إلى أحد الموائع الذي يَسخن بدوره وترتفع درجة حرارته.

اللوح الماص يتكون من لوح معدني ملحوم إلى شبكة من الانابيب التي يمر بها المائع والذي يكون عادة من الماء أو الهواء. ويصنع اللوح الماص من النحاس أو الألمنيوم أو الحديد، ويعتبر النحاس أفضل المواد السابقة من وجهة نظر انتقال الحرارة ذلك أن معامل انتقال الحرارة في النحاس اكبر منه في المواد الأخرى، إلاّ أن انتقال الحرارة ليس هو العامل الوحيد الذي يحكم طبيعة المواد المستعملة في صناعة الألواح أو الصفائح الماصة رغم الأهمية الكبيرة لهذا العامل، فهناك مثلا الكلفة الاقتصادية لصناعة الصفائح من المواد المختلفة، وهو الأمر الذي يؤثر على الجدوى الاقتصادية لصناعة المجمعات الشمسية.

يتم طلاء اللوح الماص عادة بطلاء أسود معتم لامتصاص أكبر كمية من الإشعاع الشمسي وذلك من اجل زيادة كفاءة اللوح الماص، حيث يمتص أغلب الاشعة الساقطة ويبعث نسبة قليلة من الإشعاعات الحرارية.

٢- الهيكل الخارجي للمجمع والمواد العازلة:

يوضع اللوح الماص وشبكة الأنابيب المرافقة ضمن هيكل خارجي (صندوق خشبي أو معدني) له غطاء شفاف (زجاج)، يقوم الصندوق بوظيفة حماية الصفيحة الماصة من التقلبات الجوية وتقليل آثار انتقال الحرارة (فقدان الحرارة). ويغلف الصندوق بطبقة من المواد العازلة من جميع جوانبه عدا الجهة المعرضة للشمس.

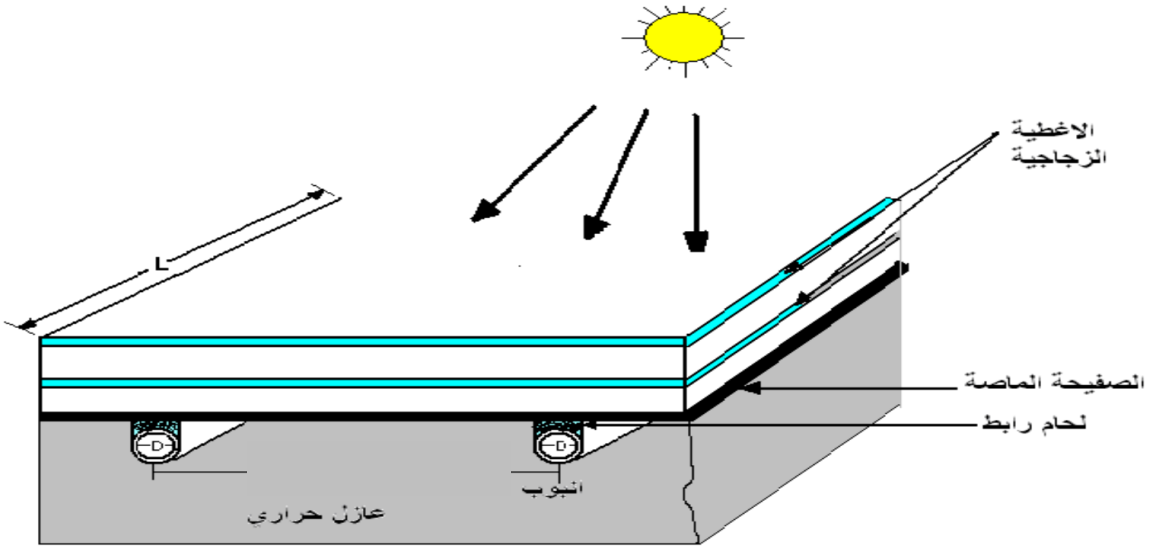
إن الهدف من استعمال المواد العازلة هو العزل بين الصفيحة الماصة والصندوق (الخشبي أو المعدني) وتقليل انتقال الحرارة من الأولى إلى الثاني، فبسبب امتصاص الصفيحة لأشعة الشمس ترتفع درجة حرارتها إلى أعلى من درجة حرارة الصندوق الذي يحويها، وتتشكل بالتالي الظروف المواتية لانتقال الحرارة من الصفيحة إلى الصندوق ومن ثم إلى الخارج، وإذا لم يتم التغلب على هذه الظاهرة وتقليل آثارها فإن قسما كبيرا من الحرارة التي تكتسبها الصفيحة الماصة تنتقل إلى الخارج الأمر الذي يؤدي إلى تقليل كفاءة المجمع الشمسي، وفي التصاميم الشائعة للمجمعات الشمسية المسطحة يتم عزل كل أسطح الصندوق الداخلية وذلك لتقليل انتقال الحرارة إليها من الصفيحة الماصة إلى الحدود الدنيا، ويتم هذا بالطبع ضمن المعطيات الاقتصادية المقبولة بحيث لا يزداد سمك المواد العازلة إلى الدرجة التي تجعل كلفتها عالية، وفي معظم المجمعات الشمسية التجارية يتراوح سمك المواد العازلة ما بين 15 - 25 ملم. ولعل أهم أنواع المواد العازلة المستعملة في المجمعات الشمسية هي الألياف الزجاجية.

٣- الغطاء الشفاف أو الغطاء الزجاجي (Glass cover):

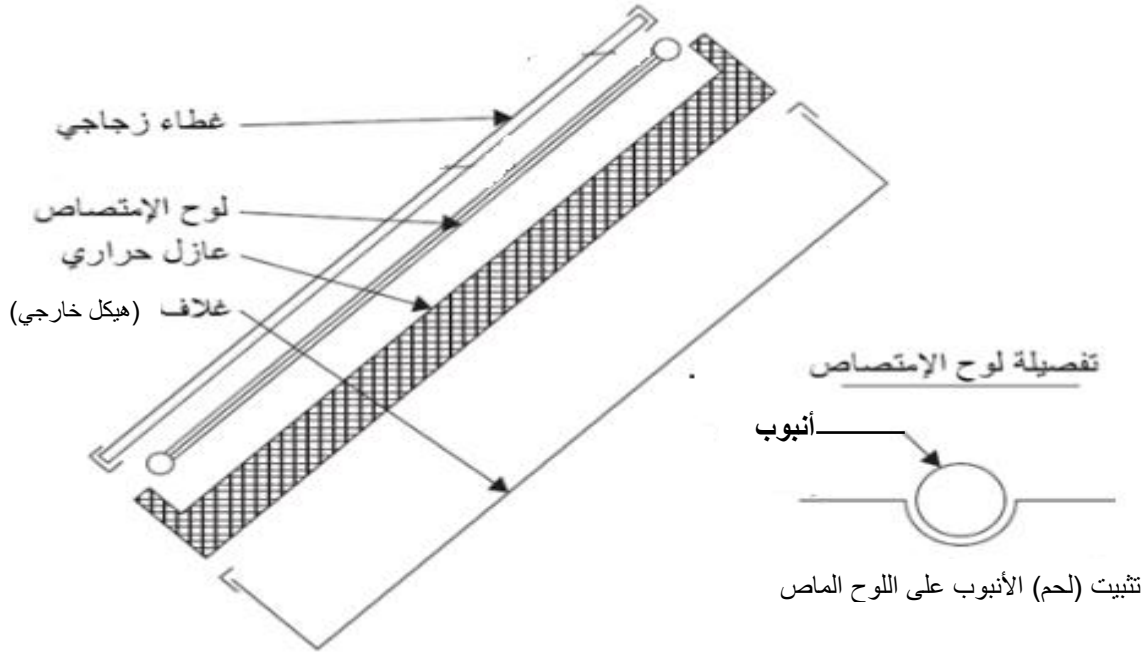
يغطى اللوح الماص بغطاء شفاف أو أكثر، وهو الوجه العلوي من الهيكل الخارجي أو الصندوق. وهناك العديد من الأغطية الشفافة المستعملة في المجمعات الشمسية، غير أن الزجاج هو أكثرها شيوعاً، ويسمح الزجاج – نظراً لشفافيته – للجزء الأكبر من أشعة الشمس بالنفاذ إلى داخل الصندوق والوصول إلى اللوح أو الصفيحة الماصة. وحين نقول إنه يسمح للجزء الأكبر من الأشعة الشمسية بالنفاذ فإننا نأخذ بعين الاعتبار حقيقة أن الزجاج يقوم بامتصاص جزء من أشعة الشمس الساقطة ويعكس جزءاً آخر بينما يسمح للجزء الباقي بالنفاذ والوصول إلى الصفيحة الماصة، وبالنسبة لأغطية الزجاج المستعملة في المجمعات الشمسية المسطحة فإنها تسمح لحوالي (80 – 90) % من أشعة الشمس بالنفاذ إلى داخل المجمع، بينما تقوم بامتصاص الجزء الآخر وعكسه.

قد يتبادر إلى ذهن الطالب سؤال عن الحاجة إلى غطاء الزجاج إذا كان يشكل عائقا أمام وصول كل الأشعة الشمسية إلى السطح الماص، والواقع أن الغطاء الزجاجي يلعب دورا مهما في المجمع الشمسي فهو يحفظ السطح الماص من آثار الظواهر الطبيعية كالأمطار والثلج والغبار والأتربة، وكذلك فان الغطاء الزجاجي يشكل عائقا أمام انتقال الحرارة من الصفيحة الماصة إلى الأجواء المحيطة، الأمر الذي يؤدي إلى زيادة فعالية المجمع، وبالإضافة إلى ما تقدم فإن من خصائص الزجاج أنه يسمح للأشعة ذات الموجات القصيرة بالنفاذ من خلاله بينما يعترض طريق الأشعة ذات الموجات الطويلة ولا يسمح لها بالنفاذ، وتعرف هذه الخاصية باسم خاصية البيت الزجاجي أو البيت الأخضر (Green House Effect) وهي الفكرة التي تقوم الزراعة المحمية في الأجواء الباردة على أساسها حيث إن الجدران الزجاجية تسمح لأشعة الشمس بالنفاذ إلى الداخل ولكنها تعترض طريق الإشعاعات الحرارية ذات الموجات الطويلة التي تحاول الخروج، مما

يؤدي إلى الاحتفاظ بالحرارة داخل البيت الزجاجي. وينطبق الأمر ذاته على المجمعات الشمسية حيث يقوم الزجاج باعتراض طريق الموجات الحرارية الطويلة الصادرة من الصفيحة الماصة، ويحتفظ بها داخل المجمع لإعادة امتصاصها من قبل الصفيحة نفسها.
يبين الشكل (٣) مخططين تفصيليين للمجمع الشمسي المستوي.



مخطط (١)



تثبيت (لحم) الأنبوب على اللوح الماص

مخطط (٢)

الشكل (٣) مخططين تفصيليين للمجمع الشمسي المستوي

وقبل الدخول في التفاصيل عن استخدامات المجمعات الشمسية سنتطرق إلى بعض الجوانب النظرية والعلاقات الرياضية التي تحكم عمل هذه المجمعات:

إن من الحقائق الأساسية في العالم المادي أن الطاقة لا تخلق ولا تفنى، وإنما يمكن تحويلها من شكل إلى آخر. وهكذا فلو نظرنا إلى المجمع الشمسي باعتباره جسماً يستقبل الطاقة الشمسية فإنه يقوم بتحويل هذه الطاقة إلى أشكال أخرى، حيث يتم الحصول على جزء من هذه الطاقة، بينما يتم فقد الجزء الآخر. والجزء الذي نحصل عليه فيتمثل في رفع درجة حرارة أحد أنواع الموائع (الماء على سبيل المثال)، بينما الجزءالمفقود فهو الذي ينتقل من المجمع إلى الأجواء المحيطة به (خارج الهيكل أو الصندوق). ولو حاولنا صياغة ما تقدم بشكل علاقة حسابية، فيمكننا كتابة العلاقة التالية:

الطاقة الساقطة على المجمع = الطاقة المكتسبة + الطاقة المفقودة

وبهذا نرى أن المجمع الشمسي لا يخلق الطاقة من العدم كما أنه لا يفنيها بل يقوم بتحويلها. وإذا حاولنا البحث عن الطاقة الحرارية المكتسبة نجد أنها كمية الحرارة التي حصل عيها المائع الذي انتقلت له الحرارة. وإذا حاولنا حسابها نجد أنها تساوي كتلة المائع مضروبة بحرارته النوعية وبارتفاع درجة حرارته. وحين نضع ما تقدم بشكل علاقة رياضية يظهر أن:

الحرارة المكتسبة = كتلة المائع x حرارته النوعية x ارتفاع درجة حرارته

أما كفاءة المجمع فهي النسبة بين الطاقة المكتسبة إلى الطاقة الساقطة على سطح المجمع، وبتعبير أخر يمكن تعريف كفاءة (مردود) المجمعات الشمسية بما يلي:

$$\text{الكفاءة} = \frac{\text{كمية الحرارة المفيدة}}{\text{كمية الإشعاع الشمسي الساقط}} \times 100$$

والمتغيرات التي تؤثر عل كفاءة المجمع الشمسي هي:

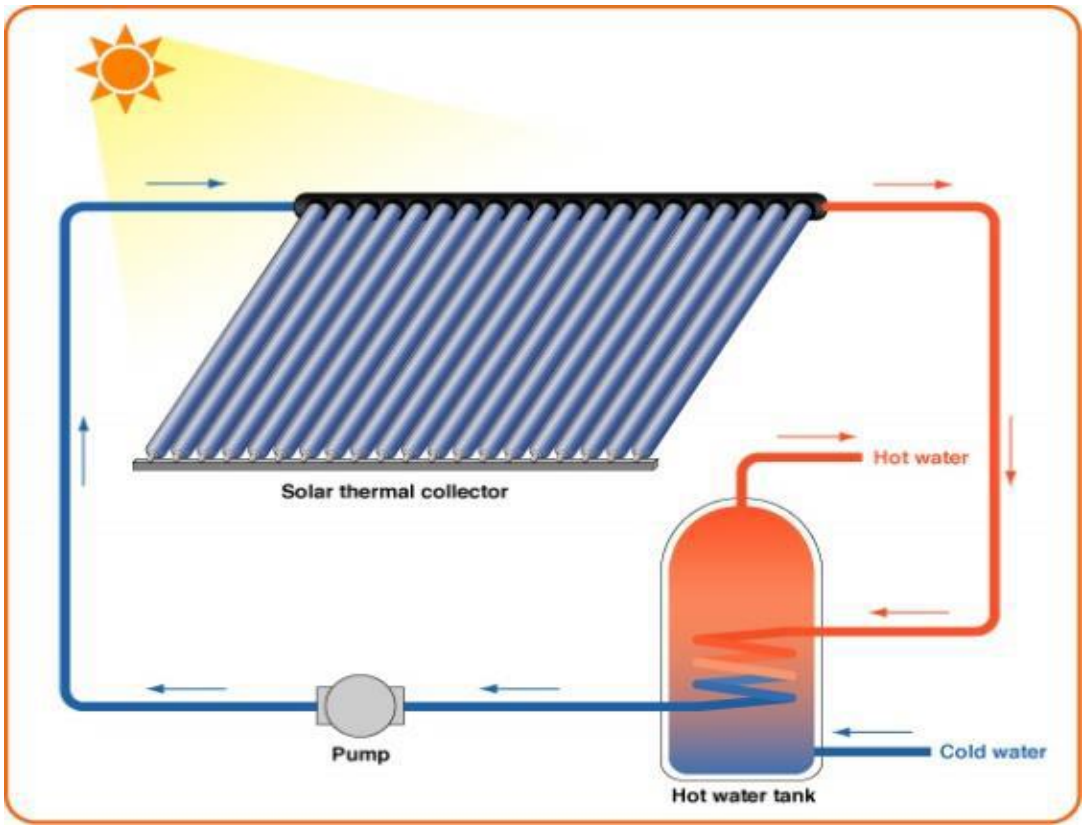
١- درجة حرارة المائع.
٢- درجة الحرارة الخارجية للمحيط.
٣- كمية الإشعاع الشمسي.
٤- عدد ونوع الغطاء الزجاجي.
٥- مواصفات اللوح الماص.

التطبيقات الحرارية للطاقة الشمسية:

سنتطرق في الفقرات اللاحقة إلى بعض التطبيقات الحرارية المختلفة للطاقة الشمسية، تلك الطاقة التي يتم الحصول عليها بواسطة استعمال المجمعات الشمسية.

١- منظومة تسخين المياه المنزلية:

كما هو موضح في الشكل (٤)، يتم تسخين الماء عن طريق امتصاص الأشعة الشمسية الساقطة على المجمع الشمسي (Solar thermal collector) فيسخن الماء الموجود في الانابيب ويتم تمريره عبر انابيب الى الخزان ثم يضخ الماء البارد مرة اخرى الى الانابيب لتسخينه وهكذا الى ان نحصل على خزان ماء ساخن.



الشكل (٤) رسم تخطيطي يوضح طريقة عمل منظومة تسخين المياه المنزلية بسيطة

ويوضح الشكل (٥) صورة فوتوغرافية لمنظومة تسخين المياه المنزلية

الشكل (٥) صورة فوتوغرافية لمنظومة تسخين المساه المنزلية

مسألة:

ماهي مساحة المجمعات الشمسية اللازمة لتزويد منزل بالماء الحار لمدة يوم كامل اذا كانت الطاقة المطلوبة لتسخين المياه 6000 واط ساعة، على افتراض أن كمية الاشعاع الشمسي الساقط كان 4960 واط في اليوم الواحد لكل متر مربع، وان كفاءة المجمعات الشمسية هي 50% ؟

الحل:

كمية الطاقة = كمية الإشعاع × كفاءة المجمعات × المساحة

6000 × 24 = 4960 × 0.5 × المساحة

المساحة = (6000 × 24)/(4960 × 0.5) = 58 م^{2}.

نهاية المحاضرة