



فيزياء الطاقة الشمسية

سي جوليان تشن

فيزياء الطاقة الشمسية

تأليف
سي جوليان تشن

ترجمة
مصطفى محمد فؤاد

مراجعة
محمد فتحي خضر



الناشر مؤسسة هنداوي

المشهرة برقم ١٠٥٨٥٩٧٠ بتاريخ ٢٦ / ١ / ٢٠١٧

يورك هاوس، شبيث ستريت، وندسور، SL4 1DD، المملكة المتحدة

تليفون: ٨٣٢٥٢٢ ١٧٥٣ (٠) ٤٤ +

البريد الإلكتروني: hindawi@hindawi.org

الموقع الإلكتروني: https://www.hindawi.org

إنَّ مؤسسة هنداوي غير مسئولة عن آراء المؤلف وأفكاره، وإنما يعبرُ الكتاب عن آراء مؤلفه.

تصميم الغلاف: مصطفى هشام

الترقيم الدولي: ٨ ١٩٧٣ ٥٢٧٣ ٩٧٨

صدر الكتاب الأصلي باللغة الإنجليزية عام ٢٠١١.

صدرت هذه الترجمة عن مؤسسة هنداوي عام ٢٠٢٠.

جميع حقوق النشر الخاصة بتصميم هذا الكتاب وتصميم الغلاف محفوظة لمؤسسة هنداوي.

جميع حقوق النشر الخاصة بالترجمة العربية لنص هذا الكتاب محفوظة لمؤسسة هنداوي.

جميع حقوق النشر الخاصة بنص العمل الأصلي محفوظة لجون وايلي أند صنز، إنك.

Copyright © 2011 by John Wiley & Sons, Inc. All Rights Reserved.

Authorised translation from the English language edition published

by John Wiley & Sons, Inc. Responsibility for the accuracy of the

translation rests solely with Hindawi Foundation and is not the

responsibility of Wiley. No part of this book may be reproduced in

any form without the written permission of the original copyright

holder, John Wiley & Sons Inc.

المحتويات

٩	مقدمة
١٥	١- تمهيد
٧٧	٢- طبيعة الإشعاع الشمسي
١١٧	٣- أصل الطاقة الشمسية
١٣١	٤- تتبع ضوء الشمس
١٧١	٥- تفاعل ضوء الشمس مع الأرض
١٩١	٦- الديناميكا الحرارية للطاقة الشمسية
٢٢٥	٧- الانتقالات الكمية
٢٥١	٨- وصلات pn
٢٧٣	٩- الخلايا الشمسية المصنوعة من أشباه موصلات
٣٢٥	١٠- الكيمياء الضوئية الشمسية
٣٤٧	١١- الطاقة الحرارية الشمسية
٣٨٧	١٢- تخزين الطاقة
٤١٧	١٣- البناء والطاقة الشمسية
٤٣٩	ملاحق
٤٨١	قائمة الرموز
٤٨٥	مراجع
٤٩٣	معرض الصور والأشكال

إهداء إلى لي تشنچ وونستون وكريستن وماركس ونورا.

مقدمة

تعدُّ الطاقة أحد أكبر التحديات التي تواجه البشرية في القرن الحادي والعشرين. وبدايةً من الثورة الصناعية في القرن الثامن عشر، كانت صور الوقود الحفري، مثل الفحم والنفط والغاز الطبيعي، هي مصادر الطاقة الأساسية لكل شيء حيوي بالنسبة للمجتمع البشري: بدءاً من المحركات البخارية حتى محركات الديزل والاحتراق الداخلي، ومن الكهرباء حتى تدفئة وتبريد المباني، ومن الطهي وتسخين الماء والإضاءة حتى الأجهزة الكهربائية والإلكترونية المختلفة، هذا إلى جانب معظم وسائل النقل، ولكن مصادر الوقود الحفري التي تُعد صورة مخزّنة عبر مئات الملايين من السنين من الطاقة الشمسية باتت تنفذ بسرعةٍ بسبب الاستخدام الزائد. علاوة على ذلك، أدى حرق تلك المصادر إلى الإضرار بالبيئة في كوكب الأرض، وما زال هذا يحدث حتى الآن.

من المعروف أن مصادر الطاقة البديلة أو المتجددة — غير مصادر الوقود الحفري — قد دُرست واستُغلت. فالطاقة المائية، وهي من مشتقات الطاقة الشمسية، تمثّل حالياً 2 بالمائة من الطاقة المستهلكة في العالم. وقد تطورت التقنيات في هذا المجال، وتُستكشف وتُستغل المصادر المتاحة حالياً بكثافة. وهناك أيضاً طاقة الرياح، التي تُعد بدورها من مشتقات الطاقة الشمسية، والتي بدأ استهلاكها يزيد على نحو سريع، لكن مصدر تلك الطاقة المتقطعة على نحو كبير متناهِ أيضاً. وهناك الطاقة النووية، لكنها طاقة غير متجددة. كما أن المصدر المعدني المستخدم فيها، وهو اليورانيوم، متناهِ. هذا بالإضافة إلى أن مشكلات منع الحوادث في المحطات النووية والتعامل مع المخلفات النووية لا تزال قائمة.

تعد الطاقة الشمسية أكثر مصدر طاقة متاح للمجتمع البشري. ونظراً لأن إجمالي الطاقة الشمسية التي تمتصها الأرض يصل إلى $4 \times 10^6 \text{ EJ/year}$ ، فإنها تمثّل عشرة

أضعاف الطاقة المستهلكة في العالم في عام 2007. على سبيل المثال، إذا تحول 50 بالمائة من ضوء الشمس الساطع على ولاية نيو مكسيكو إلى طاقة ناعمة، فيمكن أن يفي هذا بكل احتياجات الطاقة في الولايات المتحدة الأمريكية.

يُعد استخدام الطاقة الشمسية قديمًا قدم التاريخ البشري، لكن حتى وقتنا الحالي تُعد هذه الطاقة، من بين الأنواع المتعددة لمصادر الطاقة المتجددة، الأقل استخدامًا؛ فهي حاليًا توفر فقط نحو 0.1 بالمائة من إجمالي الطاقة المستهلكة في العالم، أو 0.00001 بالمائة من الإشعاع الشمسي متاح. مع ذلك، ونتيجة للبحث المستفيض والتطوير المستمر، يحدث حاليًا تقدم سريع على نحو مذهل في استخدام هذه الطاقة، وخاصة الخلايا الكهروضوئية الشمسية؛ لذلك من المنطقي توقُّع أن تلك الطاقة ستصبح في النصف الأخير من القرن الحادي والعشرين مصدرَ الطاقة الرئيسي، متجاوزةً كل مصادر الطاقة المستمدة من الوقود الحفري.

وكما هو الحال في المجالات التكنولوجية الأخرى، تُعد أول خطوة في النجاح في استغلال الطاقة الشمسية هي الفهم الجيد لجوانبها العلمية الأساسية؛ ولذا، منذ ثلاث سنوات، أطلقت جامعة كولومبيا برنامجًا للماجستير في علوم وهندسة الطاقة الشمسية، وطُلب مني تدريس مقرر فيه عن فيزياء الطاقة الشمسية. في الفصل الدراسي الخاص بالربيع في عام 2009، عندما بدأ التسجيل لهذا المقرر، سجل فيه 46 طالبًا. وقررت شبكة الفيديو التابعة للجامعة تسجيل المحاضرات وتوزيعها على الطلاب غير المسجلين. ونظرًا للطلب الكبير، تكررت سلسلة المحاضرات للطلاب المنتظمين لمدة فصلين دراسيين آخرين، وتكرر مقرر الشبكة عن فيزياء الطاقة الشمسية على مدى سبعة فصول دراسية متتالية. ويُعد هذا الكتاب تجميعًا لمحتوى هذه المحاضرات.

فيما يلي التصميم الأساسي للكتاب؛ يلخص الفصل الأول مشكلة الطاقة ويقارن بين الطاقة الشمسية والأنواع المختلفة لمصادر الطاقة المتجددة، بما في ذلك الطاقة المائية وطاقة الرياح. ويعرض الفصل الثاني نظرية الموجة الكهرومغناطيسية لماكسويل إلى جانب نظرية الفوتون لأينشتاين. إن فهم إشعاع الجسم الأسود مهم لفهم الإشعاع الشمسي، وهو ما سنعرضه بالتفصيل. ويلخص الفصل الثالث الفيزياء الفلكية للطاقة الشمسية، بما في ذلك المعاملات الأساسية والتركيب الرئيسي للشمس، كما سنعرض فيه نظرية التقلُّص الجذبوي للورد كلفن ونظرية الاندماج النووي لهانس بيته عن أصل الطاقة النجمية. ويضم الفصل الرابع تناوُلًا مستقلًا، لكنه أساسي، لعلم الفلك الموضعي الخاص بالشمس،

وهو موجّه بالأساس لغير طلاب التخصصات الفلكية، ويتضمّن عرضاً سريعاً لكيفية اشتقاق صيغ التحويل الإحداثي، ويضم تناولاً مبسطاً لمعادلة الوقت، الفرق بين التوقيت الشمسي والتوقيت المدني، وذلك كأساس لتتبّع ضوء الشمس اعتماداً على الوقت كما نعرفه. واستكمالاً لهذا الفصل عرضنا ملخصاً موجزاً للجوانب المتعلقة بحساب المثلثات الكروية في هذا الشأن في الملحق ب. كما يُحلّل فيه الإشعاع الشمسي اليومي المباشر المتراكم على الأنواع المختلفة من الأسطح عبر العام من خلال الأشكال البيانية. ويشرح الفصل الخامس كلّاً من تأثير الغلاف الجوي وتخزين الطاقة الشمسية في الأرض، وهو أساس ما يُطلق عليه الطاقة الحرارية الأرضية الضحلة، كما سنقدم فيه نموذجاً مبسطاً لضوء الشمس المتبعثر أو المشتّت. يبدأ الفصل السادس بملخص لأساسيات الديناميكا الحرارية ثم يعرض مسائل عديدة متعلقة باستخدام الطاقة الشمسية، بما في ذلك أساسيات المضخة الحرارية والتبريد. وتتناول الفصول من السابع حتى العاشر الجوانب الفيزيائية الأساسية الخاصة بالخلايا الكهروضوئية الشمسية والكيمياء الضوئية الشمسية؛ يقدم الفصل السابع المفاهيم الرئيسية الخاصة بميكانيكا الكم وفق صيغة ديراك، مع عرض أمثلة لأشباه الموصلات والجزيئات العضوية، وتوضيح كامل لكيفية استنتاج القاعدة الذهبية ومبدأ التوازن التفصيلي. يعرض الفصل الثامن أحد أهم المفاهيم الأساسية فيما يتعلّق بالخلايا الشمسية ألا وهو وصلة pn . ويتناول الفصل التاسع الخلايا الشمسية المصنعة من أشباه موصلات، بما في ذلك عرض كامل لحد شوكلي وكويسيه، مع وصف مفصل لتراكيب الخلايا الشمسية البلورية والترادفية وذات الأغشية الرقيقة. ويعرض الفصل العاشر تحليلاً لعملية التمثيل الضوئي في النبات وكذلك للبحث في مجال التمثيل الضوئي الصناعي، ويضم وصفاً لخلايا شمسية عضوية متعددة، بما في ذلك الخلايا الشمسية الصبغية والخلايا الشمسية العضوية الثنائية الطبقة. ويتناول الفصل الحادي عشر التطبيقات الحرارية الشمسية، بما في ذلك سخانات الماء الشمسية ومولدات الكهرباء الحرارية الشمسية، وسيركز على المجمعات الشمسية ذات الأنابيب المفرغة والمجمعات الحرارية الشمسية المعتمدة على طريقة الشعب الحراري، ويُقدّم أيضاً للطاقة الشمسية المركزة، مع ذكر أنواع المركّزات الضوئية الأربعة: المركّزات ذات حوض القطع المكافئ، والمركّزات ذات طبق القطع المكافئ، والمركّزات ذات جهاز الاستقبال المركزي المزود بالهيليوستات، ومركّزات فريزل الخطية المُحكّمة (على وجه الخصوص). ويتناول الفصل الثاني عشر تخزين الطاقة، بما في ذلك نظم تخزين الطاقة الحرارية المحسوسة والمتغيرة الطور والبطاريات القابلة لإعادة الشحن، وبخاصة

بطاريات الليثيوم أيون، ويقدم أيضًا للمبادئ المعمارية لاستخدام الطاقة الشمسية إلى جانب عناصر الهندسة المدنية.

أوضحت لي تجربتي في تدريس هذا المقرر أن خلفيات الطلاب تكون متشعبة جدًا، بما في ذلك الفيزياء والكيمياء والهندسة الكهربائية والهندسة الميكانيكية والهندسة الكيميائية والهندسة المعمارية والهندسة المدنية والعلوم البيئية وعلوم المواد وهندسة الفضاء والاقتصاد والشؤون المالية. وعلى الرغم من أن هذا المقرر كان موجّهًا للطلاب الجامعيين في الصفوف النهائية وطلاب الدراسات العليا الراغبين في نيل درجة الماجستير، فمن الضروري أن يتناسب مع نطاق واسع من الخلفيات الخاصة بالطلاب؛ لذا فإن تقديم الخلفية العلمية الضرورية جزء منه، وقد وُضع هذا في الاعتبار عند تصميم هذا الكتاب. على سبيل المثال، ضُمّنت المبادئ الأساسية لعلوم الفلك الموضوعي والديناميكا الحرارية وميكانيكا الكم. وبالنسبة للطلاب الذين درسوا بالفعل هذه المقررات، فإن الخلفية التي سأوفّرها ستكون بمنزلة مراجعة سريعة ومرجع للمصطلحات والرموز المستخدمة في هذا الكتاب. إن الهدف من تقديم هذه الخلفية العلمية هو خدمة تناولنا للطاقة الشمسية، وتسريع فهم الجوانب المتعلقة بها. على سبيل المثال، قُدّمت ميكانيكا الكم باستخدام أسلوب «تجريبي»، بدايةً من الإدراك المباشر للحالات الكمية من خلال مجهر نفقي ماسح، ومن ثم، فإن الحالات الكمية ليست مجرد أداة رياضية وإنما واقع مُدرَك. وهذا المجهر يُعد أيضًا أداة مهمة في البحث عن أجهزة جديدة للاستفادة من الطاقة الشمسية.

ملحق بالكتاب مجموعة من الرسوم والصور الفوتوغرافية الملونة التي تهدف إلى أن تكون بمنزلة تمثيل مرئي للعرض الرياضي الغالب للمادة المقدمة، وهو أمر مفيد للفهم البديهي للمفاهيم.

في أثناء إعطاء المحاضرات وتدوين محتواها، شهدت العديد من الصعوبات غير المتوقعة؛ فالطاقة الشمسية موضوع متشعب جدًا، وتتضمّن مجالاته الفلك والديناميكا الحرارية وميكانيكا الكم وفيزياء الحالة الصلبة والكيمياء العضوية والإلكترونيات الحالة الصلبة والعلوم البيئية والهندسة الميكانيكية والهندسة المعمارية والهندسة المدنية. وحتى يكون الكتاب كتابًا دراسيًا ومرجعًا موحدًا، يجب تصميم مجموعة كاملة ومتراصة من المصطلحات والرموز، التي ينبغي أن تكون متناسقة قدر الإمكان مع المصطلحات والرموز المستقرة في المجالات الفردية ذات الصلة، ومع ذلك تكون دقيقة وذاتية التناسق. وقد أدرجت قائمة بالرموز قرب نهاية الكتاب.

أشكر بشدة الأساتذة إرفنج هيرمان وريتشارد أزجود وفيجاي مودي لمساعدتهم لي في إعداد مقرر الطاقة الشمسية. وأنا ممتن بوجه خاص لعدد كبير من رؤساء الشركات والباحثين في مجال الطاقة الشمسية الذين قدموا لي معلومات مهمة. وأخص بالذكر هنا ستيف أورورك، المدير العام والمحلل البحثي السابق لمصرف دويتشه بنك والرئيس التنفيذي الحالي للاستراتيجيات بشركة إم إي إم سي إلكترونيكس للتحليل المفصل الذي قدّمه لي لصناعة الخلايا الكهروضوئية الشمسية. كما أشكر أيضًا جون بريكنريدج، المدير العام للشركة الاستثمارية جود إنرجيز للمعلومات التي قدمها لي فيما يتعلق باستثمارات الطاقة المتجددة في العالم، وروبرت ديفيد دي أزيغيدو، المدير التنفيذي لغرفة التجارة البرازيلية الأمريكية، لما قدمه لي من معلومات وبيانات عن الجهات العاملة في مجال الطاقة المتجددة في البرازيل؛ ولوري إيه إلدادا، الرئيس التنفيذي للتقنية لشركة هليوفولت، للمعلومات التي قدّمها لي عن تقنيات تصنيع الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة المُصنّعة من سيلينيد جاليوم إنديوم النحاس. وأشكر أيضًا إيونيس كيميسيس، وهو أستاذ زميل بجامعة كولومبيا، دعوته إلى تقديم محاضرتين في مقرري عن الخلايا الشمسية العضوية، كما أن الفصل العاشر - قسم (٥) بصفة أساسية قائم على المراجع التي اقترحها لي. وأنا ممتن كذلك لفاسيلي إفتيناكيس، وهو أيضًا أستاذ زميل في جامعة كولومبيا، للمعلومات القيمة التي أعطاها لي فيما يتعلق بالجوانب الاقتصادية والبيئية الخاصة بالخلايا الشمسية؛ وجون برلين، وهو مؤرخ شهير في مجال الطاقة الشمسية، لإرساله الكريم نسخة إلكترونية من كتابه إليّ؛ وجورج كيتسميلر، صاحب شركة ميامي للسباكة وتسخين الماء بالطاقة الشمسية؛ لأنه أراني عددًا من سخانات الماء الشمسية التي يصل عمرها لثمانين عامًا والتي لا تزال تعمل في ميامي؛ ومارجريت أودونوهيو، رئيسة المعهد الأمريكي للمعماريين، لشرحها لي نظام التبريد والتدفئة المعتمد على الطاقة الحرارية الأرضية في معهدا بمدينة نيويورك؛ وميتشيل توماشو، رئيس كلية يونيون بولاية مين؛ لأنه جعلني شاهدًا على تاريخ الطاقة الشمسية في الولايات المتحدة الأمريكية من خلال التوسّط لمنح لوح شمسي خاص بالبيت الأبيض يعود لفترة حكم الرئيس كارتر لمتحف الطاقة الشمسية في مدينة ديزو بالصين. كما أشكر الأكاديمي هي زيوكسيو، المدافع البارز عن الطاقة المتجددة، لمساعدتي في التواصل مع أبرز العاملين في البحث والصناعة في مجال الطاقة المتجددة في الصين؛ ولي شينشنج، الأستاذ الفخري لمعهد بكين، لإعطائه الكريم لي نسخة موقعة من كتابه الذي لم يعد يُطبع «فيزياء الطاقة الشمسية» والذي نُشر في عام 1996 والذي ربما يُعد

أول كتاب يُكتب عن هذا الموضوع بأي لغة؛ والسيد هوانج مينج، مؤسس مجموعة هيمين للطاقة الشمسية ورئيسها التنفيذي ونائب رئيس الاتحاد الدولي للطاقة الشمسية، للعديد من المناقشات المهمة التي جرت بيني وبينه ولدعوتي إلى زيارة شركة هيمين، بما في ذلك زيارة لخط إنتاج رائع هناك للمجمعات الشمسية ذات الأنابيب المفرغة؛ والأستاذ هوانج زيوجي، الباحث لفترة طويلة في مجال بطاريات الليثيوم القابلة لإعادة الشحن ومؤسس شركة فيليون للبطاريات، للمناقشات العديدة التي دارت بيننا عن السيارات الكهربائية وللجولة التي دعاني إليها في خطوط الإنتاج بشركته؛ ومير ما، نائب رئيس مجموعة ينجلي جرين إنرجي، للمعلومات القيمة التي قدّمها لي وللجولة التي دعاني إليها لمشاهدة المراحل الكاملة لعملية تصنيع الوحدات الشمسية والخلايا الشمسية والسيليكون النقي الشمسي. وأخيرًا وليس آخرًا، ما كان هذا الكتاب ليظهر للنور لولا صبر زوجتي لي تشنج ودعمها.

سي جوليان تشن

جامعة كولومبيا، نيويورك

أبريل 2011

الفصل الأول

تمهيد

(١) الطاقة الشمسية

وفقًا للقياسات المثبتة، يبلغ متوسط كثافة قدرة الإشعاع الشمسي خارج الغلاف الجوي للأرض مباشرةً 1366 W/m^2 ، والمعروف على نطاق واسع باسم «الثابت الشمسي». وتعريف المتر هو واحد على 10 مليون من خط زوال الأرض الممتد من القطب الشمالي إلى خط الاستواء؛ انظر الشكل ١-١. وهذا التعريف ما زال دقيقًا تبعًا للقياسات الحديثة؛ لذا فإن نصف قطر الأرض يساوي $10^7 \text{ m} \times (2/\pi)$. إذن فالقدرة الإجمالية للإشعاع الشمسي التي تصل إلى الأرض هي:

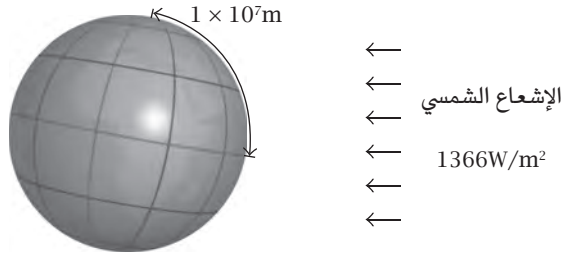
$$1366 \times \frac{4}{\pi} \times 10^{14} \cong 1.73 \times 10^{17} \text{ W.} \quad (1-1)$$

عدد الثواني في اليوم هو 86400، وفي المتوسط، عدد الأيام في العام هو 365.2422. وهكذا يكون إجمالي طاقة الإشعاع الشمسي التي تصل إلى الأرض كل عام:

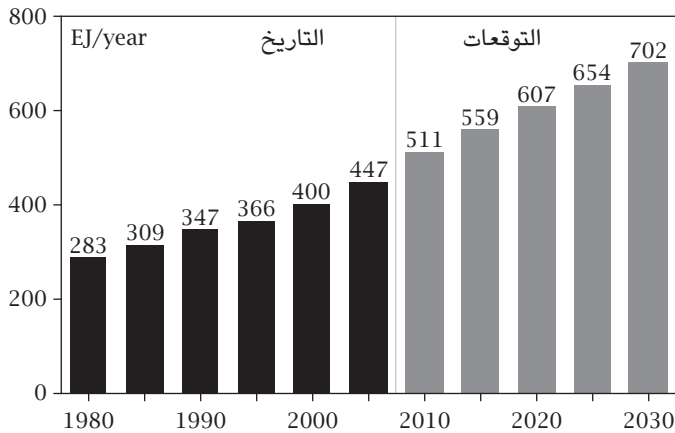
$$1.73 \times 10^{17} \times 86400 \times 365.2422 \cong 5.46 \times 10^{24} \text{ J.} \quad (1-2)$$

أو 5.460000 EJ/year . ولأخذ فكرة عن هذا المقدار من الطاقة، دعنا نقارنه بالاستهلاك العالمي السنوي للطاقة؛ انظر الشكل ١-٢. فيما بين عامي 2005 و2010، وصل الاستهلاك السنوي للطاقة للعالم بأسره إلى نحو 500 EJ. وهكذا، فإن نسبة 0.01 بالمائة فقط من الطاقة الشمسية السنوية التي تصل إلى الأرض يمكنها أن تفي باحتياجات العالم كله من الطاقة.

فيزياء الطاقة الشمسية



شكل ١-١: الطاقة الشمسية السنوية التي تصل إلى سطح الأرض. يبلغ متوسط القدرة الشمسية على الأرض 1366W/m^2 . ويصل طول خط زوال الأرض، تبعاً لتعريف المتر، 10000000m . ويبلغ إجمالي الطاقة الشمسية التي تصل إلى سطح الأرض كل عام 5460000EJ .



شكل ٢-١: الاستهلاك العالمي للطاقة، فيما بين عامي 1980 و 2030. المصدر: إدارة معلومات الطاقة، وهي الجهة التابعة للحكومة الأمريكية التي تقدم إحصائيات الطاقة الرسمية. التاريخ: «التقرير السنوي عن الطاقة الدولية لعام 2004» (مايو-يوليو 2006)، موقع الويب www.eia.doe.gov/iea. التوقعات: إدارة معلومات الطاقة، تقرير «توقعات الطاقة الدولية»، الصادر في عام 2007.

لا يصل كل الإشعاع الشمسي الساقط على الغلاف الجوي الأرضي إلى سطح الأرض. فنحو 30 بالمائة من الإشعاع الشمسي ينعكس في الفضاء. ونحو 20 بالمائة منه يُمتَص.

من جانب السُّحب والجزيئات في الهواء؛ انظر الفصل الخامس. فنحو ثلاثة أرباع سطح الأرض مسطحات مائية، ولكن حتى إذا كان بالإمكان استغلال 10 بالمائة فقط من إجمالي الإشعاع الشمسي، فإن 0.1 بالمائة منها فقط يمكنها أن تمد العالم بأسره بالطاقة. من المثير للاهتمام أن نقارن الطاقة الشمسية السنوية التي تصل إلى الأرض بالاحتياطي الإجمالي المُثبت لأنواع الوقود الحفري المتعددة؛ انظر الجدول ١-١. توضح الأرقام أن الاحتياطيات الإجمالية المُثبتة للوقود الحفري تمثل نحو 1.4 بالمائة من الطاقة الشمسية التي تصل إلى سطح الأرض سنوياً. في واقع الأمر، أمكن استغلال نسبة صغيرة فقط من الطاقة الشمسية. ويصل الاستهلاك السنوي الحالي للطاقة المولدة من الوقود الحفري إلى نحو 300EJ. وإذا استمر المستوى الحالي لاستهلاك الوقود الحفري، فإن الاحتياطي الإجمالي للطاقة المولدة منه سينفذ في نحو مائة عام.

حالياً، لا يزال استخدام الطاقة المتجددة يمثل نسبة صغيرة من إجمالي الطاقة المستهلكة؛ انظر الجدول ١-٢. يوضح الشكل ١-٣ نسبة الأنواع المختلفة من الطاقة في الولايات المتحدة الأمريكية في عام 2006. ويمثل استخدام الطاقة الشمسية من خلال تقنية الخلايا الكهروضوئية 0.07 بالمائة فقط من إجمالي الطاقة المستهلكة. ولكن عالمياً، تعد الطاقة الشمسية المولدة من الخلايا الكهروضوئية مصدر الطاقة الأسرع نمواً. وكما سنحلل في الفصل الأول - قسم (٥-٤)، ستصبح تلك الطاقة يوماً ما المصدر السائد للطاقة. ويعرض الشكل ١-٤ تنبؤاً بهذا قام به الاتحاد الألماني لصناعة الطاقة الشمسية.

جدول ١-١: الاحتياطيات المُثبتة لأنواع الوقود الحفري المختلفة.*

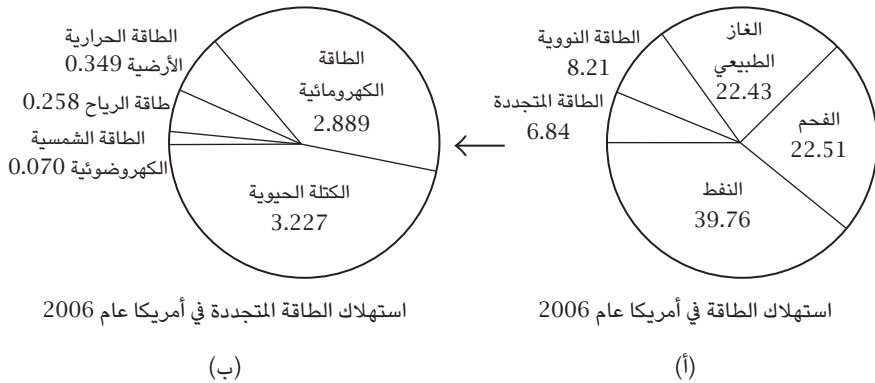
النوع	الكمية	الطاقة عن كل وحدة	الطاقة EJ
النفط الخام	1.65×10^{11} tons	4.2×10^{10} J/ton	6930EJ
الغاز الطبيعي	1.81×10^{14} m ³	3.6×10^7 J/m ³	6500EJ
الفحم عالي الجودة	4.9×10^{11} tons	3.1×10^{10} J/ton	15000EJ
الفحم منخفض الجودة	4.3×10^{11} tons	1.9×10^{10} J/ton	8200EJ
الإجمالي			36600EJ

* المصدر: «مراجعة بي بي الإحصائية للطاقة العالمية»، يونيو 2007، بريتش بتروليم.

فيزياء الطاقة الشمسية

جدول ١-٢: مصادر الطاقة المتجددة.

النوع	المتاح (EJ/year)	المستهلك (EJ/year)	نسبة الاستهلاك (بالمائة)
الطاقة الشمسية	2730000	0.31	0.0012
طاقة الرياح	2500	4.0	0.16
الطاقة الحرارية الأرضية	1000	1.2	0.10
الطاقة المائية	52	9.3	18



شكل ١-٣: استهلاك الطاقة في الولايات المتحدة الأمريكية في عام 2006. المصدر: «مراجعة الطاقة السنوية لعام 2006» الصادرة عن إدارة معلومات الطاقة. وحدة الطاقة في التقرير الأصلي هي الكواد، أي: نحو 10^{18} J أو EJ. انظر الملحق أ. في عام 2006، كان إجمالي الطاقة المستهلكة في الولايات المتحدة الأمريكية 99.87 quad؛ أي، نحو 100EJ؛ لذا فإن قيمة الطاقة ب EJ هي تقريبًا بالضبط نسبتها المئوية؛ وعليه فإن الطاقة الشمسية المتولدة من الخلايا الكهروضوئية تمثل فقط 0.07 بالمائة من إجمالي الطاقة المستهلكة في عام 2006.

تعد حتمية استبدال الطاقة الشمسية بالوقود الحفري في نهاية الأمر ببساطة حقيقة جيولوجية: فالاحتياطي الإجمالي القابل للاستخراج من النفط الخام متناهٍ على سبيل المثال، كانت الولايات المتحدة الأمريكية أكبر منتج للنفط في العالم فيما سبق. بحلول عام 1971، نفذ نحو نصف احتياطي النفط الخام القابل للاستخراج في الولايات الأمريكية المتجاورة

(أي: الثماني والأربعين ولاية ذات الحدود المشتركة). ومنذ ذلك الحين، بدأ ينخفض إنتاج النفط الخام في هذه المنطقة؛ ومن ثم تعين إنتاج النفط الخام من مناطق ذات ظروف جيولوجية وبيئية أكثر صعوبة، ولم يؤدِّ هذا إلى زيادة تكلفة التنقيب عن النفط وحسب، بل إلى زيادة كمية الطاقة المستخدمة لإنتاج النفط الخام أيضاً. ولتقييم مدى فائدة أي عملية إنتاج للطاقة، عادةً ما يُستخدم «عائد الطاقة على الطاقة المستثمرة»، الذي يُعرف أيضاً بـ «ميزان الطاقة»، وهذا تعريفه:

عائد الطاقة على الطاقة المستثمرة = عائد الاستثمار / الطاقة المستثمرة = الطاقة في وحدة من الوقود / الطاقة المطلوبة لإنتاجها

$$EROI = \frac{\text{energy return}}{\text{energy invested}} = \frac{\text{energy in a volume of fuel}}{\text{energy required to produce it}} \quad (1-3)$$

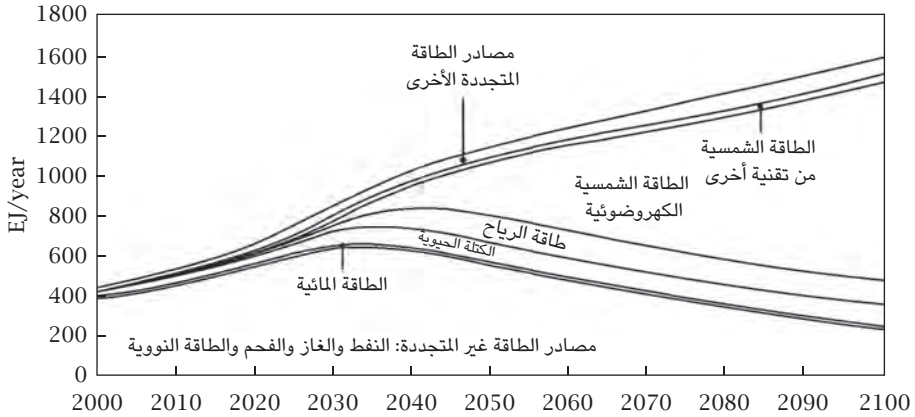
في ثلاثينيات القرن العشرين، وصلت قيمة عائد الطاقة على الطاقة المستثمرة لإنتاج النفط الخام إلى نحو 100. وفي عام 1970، كانت 25. وبالنسبة للتنقيب عن النفط في أعماق البحار، تكون القيمة نحو 10. أما عن النفط الصخري والغاز الصخري والنفط الرملي، فلها قيم أقل. فإذا قلَّتْ هذه القيمة بالنسبة لأي عملية إنتاج لطاقة لتصل إلى نحو 1، فلا فائدة من الاستمرار فيها.

على الجانب الآخر، على الرغم من أن تكلفة الكهرباء المولدة من الشمس حالياً أكبر من تكلفة الكهرباء المولدة من أنواع الوقود الحفري، فإن التقنية الأولى في تطور مستمر وتكلفتها في انخفاض مستمر. وكما هو موضح في الفصل الأول – قسم (٥-٤)، في نحو عام 2015، ستكون تكلفة الكهرباء الشمسية أقل من تلك الخاصة بالكهرباء العادية، حتى نصل إلى «تكافؤ الشبكة». بعد ذلك، سيحدث نمو سريع في إنتاج الكهرباء الشمسية؛ أرجع للشكل ٤-١.

(٢) التحول عن النفط

مصادر الطاقة الحفريّة، وبخاصة النفط، متناهية، ونفاذها سيحدث عاجلاً أو آجلاً؛ لذا فإن التحول إلى الطاقة المتجددة حتمي. كان أول من أدرك تلك الحقيقة وقدرها كمياً ماريون كينج هوبرت (1903-1989)، الخبير البارز في مجال صناعة النفط، ولكن رؤيته لم تقتصر فقط على صناعة النفط. في عام 2000، وإدراكاً من شركة بريتيش بتروليوم

فيزياء الطاقة الشمسية



شكل ١-٤: اتجاه صناعة الطاقة في القرن الحادي والعشرين. مصدر المعلومات: الاتحاد الألماني لصناعة الطاقة الشمسية، عام 2007؛ انظر الموقع التالي: www.solarwirtschaft.de. إن القوة المحركة لثورة الطاقة في القرن الحادي والعشرين هي الاقتصاد؛ ونظرًا لأن المصادر الطبيعية الخاصة بالوقود الحفري والمواد النووية متناهية، فإن تكلفة إنتاجها ستزداد مع الوقت. أما عن طاقة الإشعاع الشمسي والمادة الخام المستخدمة في صنع الخلايا الشمسية والسيليكون، فهي غير قابلة للنفاذ، كما أن إنتاج الخلايا الشمسية على نطاق واسع سيُخفّض تكلفتها. وفي وقت ما، ستكون تكلفة الكهرباء المولدة من الشمس أقل من تلك الخاصة بالكهرباء التقليدية بحيث نصل إلى ما يُطلق عليه «تكافؤ الشبكة». في عام 2007، كان من المقدر أن يتحقق هذا التكافؤ فيما بين عامي 2020 و2030. وبعد ذلك، سيحدث توسّع كبير في الطاقة المُولدة من الشمس. وتشير التطورات الأخيرة إلى أن هذا التكافؤ سيحدث في عام 2015. كما سيحدث الانتشار السريع لهذا النوع من الكهرباء في وقت سابق على ذلك المحدد في هذا التنبؤ الصادر في عام 2007. انظر الفصل الأول – قسم (٥-٤).

بأن النفط سينفذ في نهاية الأمر، غيرت اسمها إلى «بي بي» وهو اختصار لعبارة beyond petroleum وتعني «ما وراء النفط».

في عام 1956، قدم إم كينج هوبرت، كبير المستشارين بشركة شل، تقريرًا اقتبس على نطاق واسع [40] اعتمد على البيانات المتاحة في ذلك الوقت، وتنبأ فيه بأن إنتاج النفط الخام في الولايات المتحدة الأمريكية سيصل إلى ذروته في نحو عام 1970، ثم سيبدأ في التراجع. وقد تعرضت تنبؤاته الجريئة والصحيحة لهجوم وسخرية كبيرين، لكن بعد

ذلك ثبتت دقتها الشديدة وجدارتها بالتقدير. (جدير بالذكر أن معادلات نظرية هوبرت مشابهة لمعادلات بيير فرانسوا فيرهلست التي وضعها في عام 1838 للتقدير الكمي لنظرية مالتوس عن النمو السكاني [85].)

بدأت نظريته باكتشاف أنه عند رسم الإنتاج التراكمي للنفط الخام Q على المحور السيني x ، ونسبة معدل الإنتاج P على Q على المحور الصادي y في الولايات المتحدة الأمريكية، فإن الشكل البياني الناتج سيكون على شكل خط مستقيم؛ انظر الشكل ١-٥. إن تقاطعي الخط المستقيم مع محوري الإحداثيات هما كما يلي. التقاطع مع المحور السيني، Q_0 ، هو الاحتياطي الإجمالي للنفط الخام القابل للاستخراج؛ لذا فالقيمة في الشكل ١-٥ هي 228 مليار برميل. أما عن التقاطع مع المحور الصادي، a ، فله بُعد خاص بالوقت المعكوس. فمعكوس a هو قياس للفترة التي سينفذ فيها النفط الخام؛ لذا فالقيمة في الشكل ١-٥ هي 0.0536/سنة. ويمكن تمثيل الخط المستقيم بالمعادلة التالية:

$$\frac{P}{Q} = a \left(1 - \frac{Q}{Q_0} \right). \quad (1-4)$$

من ثم، فإن العلاقة بين P و Q هي:

$$P = \frac{dQ}{dt}, \quad (1-5)$$

بحيث إن t هي الوقت، الذي يُعبّر عنه عادة بالسنوات. وباستخدام معادلة 1-5، تصبح معادلة 1-4 معادلة تفاضلية عادية:

$$\frac{Q_0 dQ}{Q (Q_0 - Q)} = a dt. \quad (1-6)$$

يمكن أن تتكامل معادلة 1-6 بسهولة كما يلي:

$$\int \frac{Q_0 dQ}{Q (Q_0 - Q)} = -\ln \left(\frac{Q_0}{Q} - 1 \right) = a (t - t_m), \quad (1-7)$$

بحيث إن t_m هو ثابت التكامل المطلوب تحديده. ومن معادلة 1-7، نصل إلى المعادلة التالية:

$$Q = \frac{Q_0}{1 + e^{-a(t-t_m)}}. \quad (1-8)$$

تحقق كل من الشرط الأول $Q = 0$ عندما يكون $t = -\infty$ والشرط الأخير $Q = Q_0$ عندما يكون $t = +\infty$ ؛ لذا يمكن من واقع البيانات التاريخية تحديد الوقت الذي سينفذ فيه نصف النفط الخام، $Q = Q_0/2$ عندما تكون $t = t_m$. ويمكن الوصول إلى معدل الإنتاج P باستخدام المعادلتين 1-5 و 1-8، كما يلي:

$$P = \frac{dQ}{dt} = \frac{1}{4} a Q_0 \operatorname{sech}^2 \frac{a(t-t_m)}{2}. \quad (1-9)$$

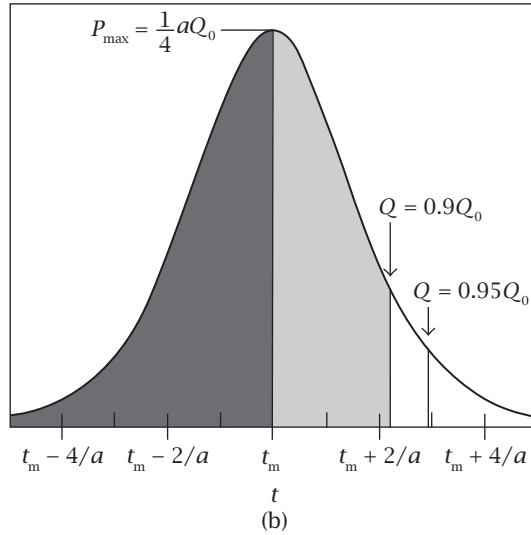
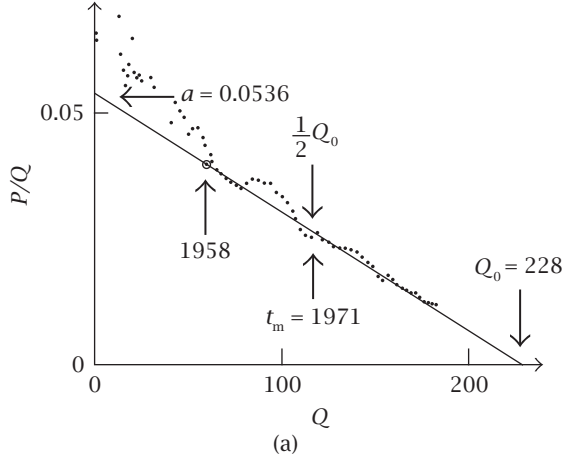
تمثل معادلة 1-9 منحنى جرسى الشكل يتناسب مع t عندما يكون $t = t_m$ ، انظر الشكل ١-٥(b). (جدير بالذكر هنا أن $\operatorname{sech} x = 1/\cosh x = 2/(e^x + e^{-x})$) وهكذا، فإن $t = t_m$ هو أيضاً الوقت (العالم) الخاص بمعدل الإنتاج الأقصى، $P_0 = aQ_0/4$. وكمية a هي قياس لمعدل نفاد حقول النفط. في واقع الأمر، يمكن تحديد الوقت الذي عنده ينفذ 90 بالمائة من النفط الخام من خلال معادلة 1-8، وذلك كما يلي:

$$\frac{Q_0}{1 + e^{-a(t_{0.9}-t_m)}} = 0.9Q_0, \quad (1-10)$$

وسيكون الناتج $t_{0.9} = t_m + 2.197/a$. أما الوقت الذي سينفذ فيه 95 بالمائة منه، فهو $t_{0.95} = t_m + 2.944/a$.

يوضح الشكل ١-٦ معدل إنتاج النفط الخام في الولايات المتحدة الأمريكية بدءاً من عام 1920 وحتى عام 2010. إن المنحنى الفراغي هو إسقاط مُعتمد على طريقة المربعات الصغرى على منحنى هوبرت؛ ارجع إلى المعادلة 1-9. تمثل ذروة الإنتاج التي حدثت في عام 1971 إنتاج النفط الخام للولايات الأمريكية الثمانية والأربعين ذات الحدود المشتركة (باستثناء ألاسكا وهاواي). وهناك ذروة أخرى في حدود عام 1989. وفي عام 1977، مرر الكونجرس الأمريكي قانوناً يقضي ببدء التنقيب عن النفط الخام في ألاسكا. ونظراً

تمهيد



شكل ١-٥: منحني هوبرت. (a) في عام 1956، درس ماريون كينج هوبرت من شركة شل بيانات الإنتاج التراكمي للنفط الخام (المقيس بمليارات البراميل)، Q ، ومعدل إنتاجه، P ، في الولايات المتحدة الأمريكية. واكتشف وجود ارتباط خطي بين P/Q و Q . نقلاً عن مرجع [21]. (b) يمكننا اشتقاق منحني Q في مقابل الوقت من العلاقة الخطية، منحني هوبرت (معادلة 1-9). وتحدث ذروة الإنتاج في الوقت t_m عندما ينغد نصف النفط الخام. وفي الوقت $t_m + 2.197/a$ ، سينغد 90 بالمائة من النفط الخام القابل للاستخراج. وفي الوقت $t_m + 2.944/a$ ، سينغد 95 بالمائة منه.

لأن ألاسكا لم تنتج أي نفط خام قبل سبعينيات القرن العشرين، طبقاً لنظرية هوبرت، فيجب أن تُعامل كحالة منفصلة تختلف عن حالة الولايات الثمانية والأربعين ذات الحدود المشتركة. وعند رسم بيانات إنتاج النفط الخام في ألاسكا التي نشرتها إدارة معلومات الطاقة، فيما عدا ما يتعلّق بالأعوام الأقدم، يظهر أن هناك ارتباطاً خطياً دقيقاً جداً بين نسبة P/Q والإنتاج التراكمي Q ؛ انظر الشكل ٧-١. وفي هذا الرسم، Q_0 يساوي 17.3 مليار برميل، و a يساوي 0.1646 و t_m يساوي 1989.38، وذلك تقريباً في مايو من عام 1989. وباستخدام هذه المعاملات، أنشأنا منحنى هوبرت؛ انظر الشكل ٧-١(b). وكما هو موضح، فيما عدا ما يتعلّق بالأعوام الأقدم، تتبع بيانات الإنتاج منحنى هوبرت على نحو دقيق جداً.

يمكن تقدير عام نفاذ النفط الخام من خلال المعاملات؛ فبالنسبة للولايات المتحدة الأمريكية بأكملها، a يساوي 0.0536. وهكذا يكون عام نفاذ 95 بالمائة من نفطها الخام كما يلي:

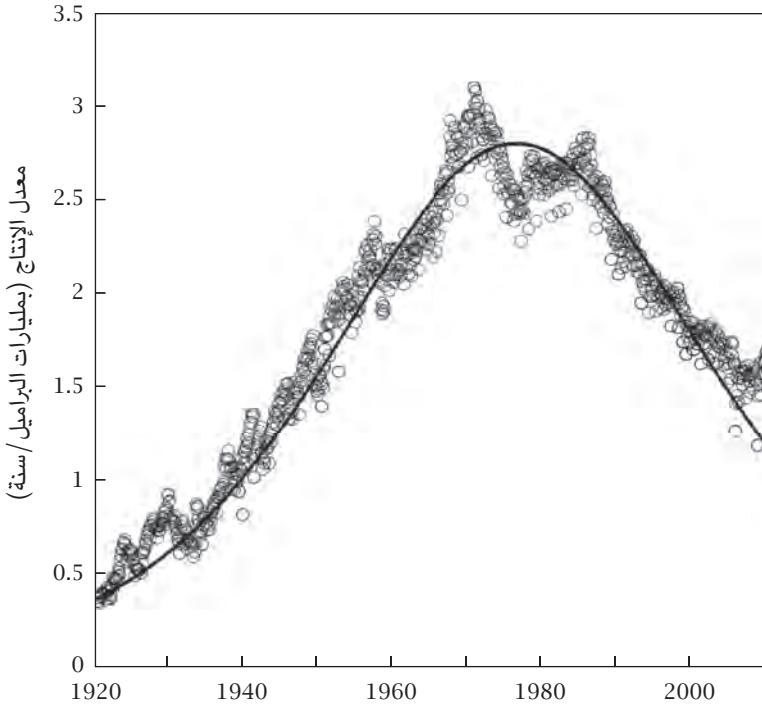
$$t_{0.95} = 1971 + \frac{2.944}{0.0536} \approx 2026. \quad (1-11)$$

وبالنسبة لألاسكا، يكون عام نفاذ 95 بالمائة من نفطها الخام كما يلي:

$$t_{0.95} = 1989 + \frac{2.944}{0.1646} \approx 2007. \quad (1-12)$$

إن تاريخ نفاذ النفط الخام بألاسكا سابق على ذلك الخاص بالولايات المتحدة الأمريكية بأكملها، وعلى الرغم من أن النفط الخام في ألاسكا قد بدأ إنتاجه متأخراً جداً عن الولايات الأمريكية الثمانية والأربعين ذات الحدود المشتركة، فإنه يُستخرج من هناك على نحو أكبر بكثير مقارنةً بالولايات الأخرى.

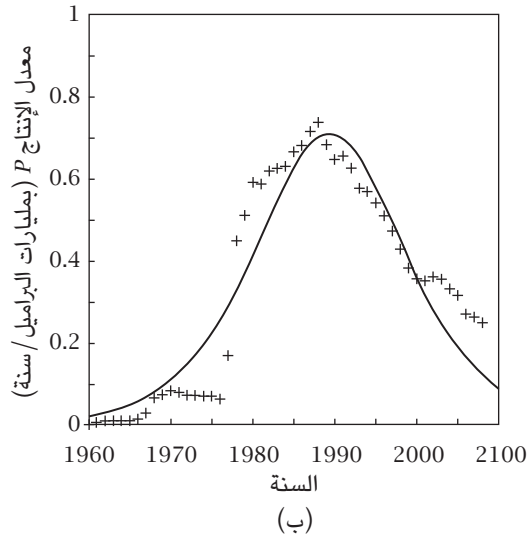
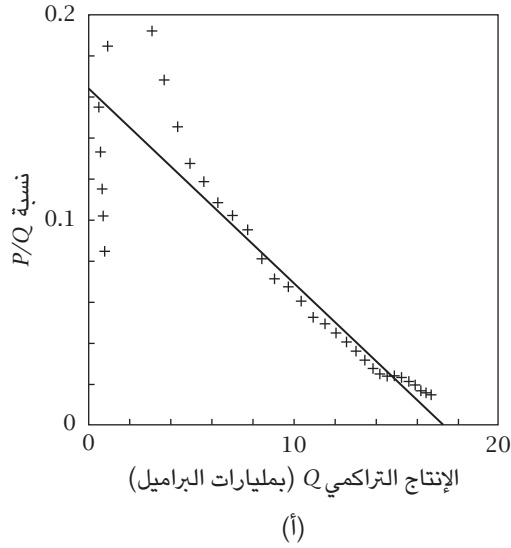
ونظراً لأن الدول المختلفة بدأت إنتاج النفط الخام في أوقات مختلفة، فهناك طريقة أفضل لتطبيق نظرية هوبرت التي تتمثّل في تناول كل دولة على نحو منفرد؛ لقد أنتج هوبرت تقديرًا اعتماداً على البيانات المتاحة في خمسينيات القرن العشرين بالنسبة للعالم ككل، وتتنبأ بأن يبلغ إنتاج النفط الخام ذروته في العقد الأول من القرن الحادي والعشرين. وقد أتت التقديرات التي اعتمدت على بيانات أحدث بنتائج مشابهة، بل توضح البيانات



شكل ١-٦: معدل الإنتاج الأمريكي للنفط الخام. الدوائر: معدل الإنتاج الأمريكي الفعلي للنفط الخام. المصدر: إدارة معلومات الطاقة الأمريكية. المنحنى الفراغي: دالة هوبرت، باستخدام إسقاط مربعات صغرى على البيانات الفعلية. وترجع الزيادة المفاجئة في الإنتاج في عام 1977 والذروة الثانية في عام 1989 لإنتاج النفط في ألاسكا؛ انظر الشكل ١-٧.

الحديثة أن تلك الذروة قد حدثت بالفعل في واقع الأمر. وتتبع عملية اكتشاف مصادر الطاقة غير المتجددة الأخرى — مثل الغاز الطبيعي والفحم — ونضوبها نمطاً مماثلاً. ومع تضائل المصادر، تزيد على نحو سريع التكاليف الهندسية والبيئية لاستكشاف أنواع الوقود الحفري. وكان التسرب النفطي في خليج المكسيك في عام 2010 بمنزلة جرس إنذار بأننا في القرن الحادي والعشرين يجب أن نجد ونستخدم مصادر الطاقة المتجددة بحيث تحل محل مصادر الطاقة الحفرية.

فيزياء الطاقة الشمسية



شكل ١-٧: إنتاج النفط الخام في ألاسكا. (أ) نسبة P/Q في مقابل Q (المقيس بمليارات البراميل) بالنسبة لألاسكا. المصدر: إدارة معلومات الطاقة. (ب) منحنى هوبرت المنشأ بناءً على ذلك. (لاحظ أن معدل الإنتاج P مقيس بمليارات البراميل/سنة). كما هو واضح، وفيما عدا ما يتعلّق بالأعوام الأقدم، تتبع بيانات الإنتاج منحنى هوبرت على نحو دقيق جدًا.

(٣) مصادر الطاقة المتجددة الأخرى

نظرًا لمحدودية احتياطي أنواع الوقود الحفري وتكلفة استخراجها واستخدامها، منذ بداية العصر الصناعي، جرى استكشاف مصادر الطاقة المتجددة. وعلى الرغم من أن الطاقة الشمسية تعد إلى حدٍ بعيد أكبر مصدر للطاقة المتجددة، فإن مصادر الطاقة المتجددة الأخرى — بما في ذلك الطاقة المائية وطاقة الرياح والطاقة الحرارية الأرضية العميقة والضحلة — تُستغل على نحو واسع. وكل مصادر الطاقة هذه، فيما عدا الطاقة الحرارية الأرضية العميقة، مشتقة من الطاقة الشمسية.

(١-٣) الطاقة الكهرومائية

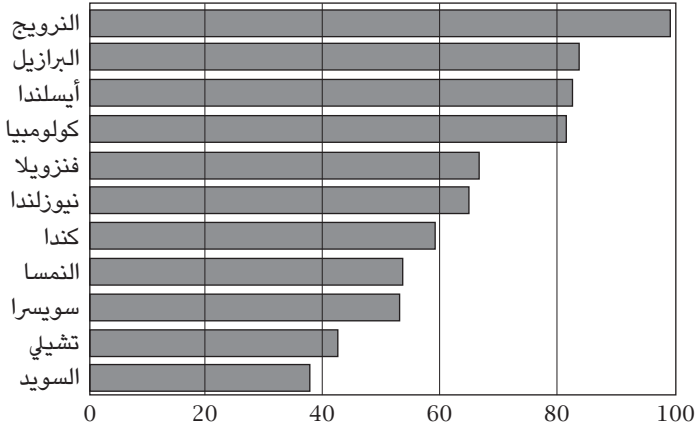
الطاقة الكهرومائية مصدر معروف للطاقة. ومنذ أواخر القرن التاسع عشر، كانت تنتج كميات هائلة من الطاقة بأسعار منافسة، وحاليًا تنتج نحو سدس إنتاج العالم من الكهرباء، أي أكثر من 90 بالمائة من الكهرباء التي تنتجها كل مصادر الطاقة المتجددة. وكما هو موضح في الشكل ١-٨، في الكثير من الدول، ينتج هذا النوع من الطاقة نسبة كبيرة من الكهرباء التي تولدها. على سبيل المثال، تنتج النرويج أكثر من 98 بالمائة من إنتاجها من الكهرباء بالطاقة المائية، وتنتج كل من البرازيل وأيسلندا وكولومبيا أكثر من 80 بالمائة من كهربتها من الطاقة المائية. ويعرض الجدول ١-٣ استخدام الطاقة المائية في مناطق متعددة من العالم.

جدول ١-٣: الطاقة المائية الإقليمية: المتاح والناتج.*

المنطقة	الإنتاج (EJ/year)	المتاح (EJ/year)	النسبة المئوية للاستغلال
أوروبا	2.62	9.74	27
أمريكا الشمالية	2.39	6.02	40
آسيا	2.06	18.35	11
أفريقيا	0.29	6.80	4.2
أمريكا الجنوبية	1.83	10.05	18
أوقيانوسيا	0.14	0.84	17
العالم	9.33	51.76	18

* المصدر: مرجع [14]، الفصل الخامس.

فيزياء الطاقة الشمسية



شكل ٨-١: النسبة المئوية لإنتاج الكهرباء من الطاقة المائية في دول متعددة. تنتج النرويج تقريباً كل كهربتها من الطاقة المائية، وفي البرازيل وآيسلندا وكولومبيا، أكثر من 80 بالمائة من الكهرباء تُنتج من خلال الطاقة المائية.

إن فيزياء الطاقة المائية بسيطة جداً. في أي نظام للطاقة المائية، من المهم معرفة «رأس الماء الفعلي» ارتفاع H المسقط المائي بالتر و«معدل التدفق»، أي معدل الماء المتدفق عبر التوربين، Q ، بالتر المكعب في الثانية. والقدرة التي تحملها الكتلة المائية تكون كما يلي:

$$P \text{ (kW)} = g \times Q \times H, \quad (1-13)$$

بحيث يكون g الذي يساوي 9.81 m/s^2 هو تسارع الجاذبية. ولأن خطأ بنسبة 2 بالمائة يُعد شيئاً لا يُذكر في عالم الهندسة، فدائماً ما تكون g قيمتها بالتقريب 10 m/s^2 ؛ لذا بـ kW ، تكون المعادلة السابقة:

$$P \text{ (kW)} = 10 \times Q \times H. \quad (1-14)$$

إن الآلة القياسية المستخدمة هنا هي توربين فرانسيس الذي اخترعه المهندس الأمريكي جيمس بي فرانسيس في عام 1848. وباستخدام هذه الآلة، تكون كفاءة η

تحويل الطاقة المائية إلى طاقة ميكانيكية عالية جدًا. وفي ظل أفضل الظروف، تصل الكفاءة الإجمالية لتحويل الطاقة المائية إلى كهرباء لأكثر من 90 بالمائة، مما يجعل هذا التوربين من أكثر التوربينات كفاءة. وتكون الطاقة الكهربائية المولدة من خلال النظام الكهرومائي هي:

$$P \text{ (kW)} = 10\eta QH. \quad (1-15)$$

هناك ميزة كبيرة للطاقة المائية تميزها عن مصادر الطاقة المتجددة الأخرى، ألا وهي أنها توفر آلية لتخزين الطاقة ذات كفاءة عالية جدًا وثنائية الجانب. كما أن فقد الطاقة في عملية التخزين لا يُذكر؛ لذا فمحطة الطاقة المائية إلى جانب الخزان يكونان معًا نظام تخزين طاقة فعالًا واقتصاديًا جدًا. ويعرض الشكل ١-٩ صورة فوتوغرافية لواحدة من كبرى محطات الطاقة المائية في العالم، محطة إيتايبو، التي تمتد البرازيل بنحو 20 بالمائة من كهربتها.



شكل ١-٩: محطة إيتايبو للطاقة المائية على الحدود الواقعة بين البرازيل وباراجواي. بسعة تبلغ 14.0GW، تعد هذه المحطة واحدة من كبرى محطات الطاقة المائية وتنتج نحو 20 بالمائة من كهرباء البرازيل.

(٢-٣) طاقة الرياح

إن الطاقة الحركية في حيز من الهواء بكتلة m وسرعة متجهة v هي:

$$\frac{1}{2}mv^2. \quad (1-16)$$

إذا كانت كثافة الهواء هي ρ ، فإن كتلة الهواء المارة عبر سطح مساحة A على نحو عمودي على السرعة المتجهة للرياح لكل وحدة زمنية هي:

$$m = \rho v A. \quad (1-17)$$

إذن، فقدرة الرياح P_0 ، أو الطاقة الحركية للهواء المتحرك عبر مساحة A لكل وحدة زمنية هي:

$$P_0 = \rho v A \times \frac{1}{2}v^2 = \frac{1}{2}\rho v^3 A. \quad (1-18)$$

في ظل الظروف القياسية (ضغط 1atm ودرجة حرارة 18 درجة مئوية)، تكون كثافة الهواء 1.225kg/m^3 . وإذا كانت سرعة الرياح 10m/s ، فإن كثافة قدرة الرياح تكون:

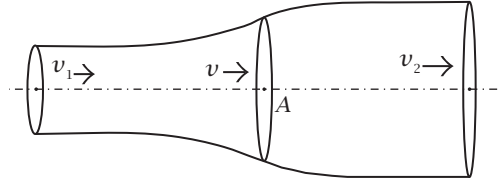
$$P_0 \approx 610\text{W/m}^2. \quad (1-19)$$

إن لهذه الكثافة نفس القيمة الأسية التي لكثافة الطاقة الشمسية.

لكن كفاءة أي توربين رياح ليست عالية مثل كفاءة أي توربين مائي. ولأن سرعة الهواء المتجهة قبل الدوار، v_1 ، وسرعة الهواء المتجهة بعده، v_2 ؛ مختلفتان، انظر الشكل ١-١٠، فإن كتلة الهواء المارة عبر مساحة A لكل وحدة زمنية تتحدد من خلال «متوسط سرعة الرياح» عند الدوار، وذلك كما يلي:

$$m = \rho A \frac{v_1 + v_2}{2}. \quad (1-20)$$

تمهيد



شكل ١-١٠: اشتقاق نظرية بيتس لتوربين الرياح. إن السرعة المتجهة للرياح قبل دوار التوربين هي v_1 ، وبعده v_2 ، كما أن السرعة المتجهة عند الدوار هي متوسط السرعة المتجهة وترتبط القدرة المنتجة من قبل الدوار بالفرق في الطاقة الحركية.

لذا فإن الطاقة الحركية التي يلتقطها الدوار أو فرق الطاقة الحركية هي:

$$\frac{1}{2}mv_1^2 - \frac{1}{2}mv_2^2. \quad (1-21)$$

بالجمع بين المعادلتين 1-20 و 1-21، نحصل على تعبير عن قدرة الرياح P التي يلتقطها الدوار:

$$P = \frac{1}{4}\rho A (v_1 + v_2) [v_1^2 - v_2^2]. \quad (1-22)$$

وبإعادة ترتيب معادلة 1-22، يمكننا تعريف جزء C قدرة الرياح التي يلتقطها الدوار، أو ما يطلق عليه «كفاءة الدوار»، كما يلي:

$$P = \frac{1}{2}\rho v_1^3 A \left[\frac{1}{2} \left(1 + \frac{v_2}{v_1} \right) \left(1 - \frac{v_2^2}{v_1^2} \right) \right] = P_0 C. \quad (1-23)$$

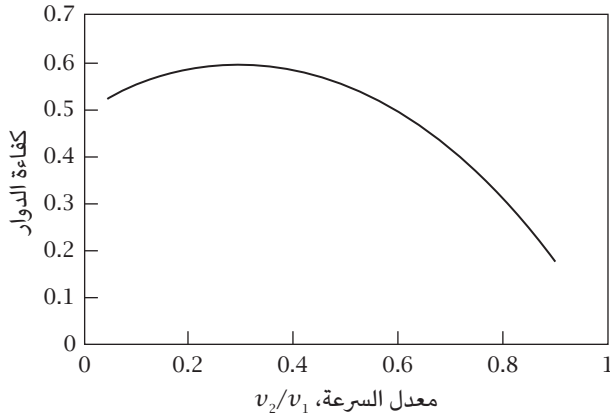
ومن ثَمَّ، نصل إلى المعادلة التالية:

$$C = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{v_2}{v_1} \right) \left(1 - \frac{v_2^2}{v_1^2} \right). \quad (1-24)$$

مع افتراض أن $x = v_2/v_1$ هي معدل سرعة الرياح بعد الدوار وقبله، فسنحصل على المعادلة التالية:

$$C = \frac{1}{2} (1 + x) (1 - x^2). \quad (1-25)$$

يتضح ارتباط كفاءة الدوار C بمعدل السرعة x في الشكل ١-١١. من الواضح أن القدرة القصوى تكون عندما يكون x قيمته $1/3$ بحيث تكون c قيمتها $16/27$ ، أي، 59.3 بالمائة. كان أول من توصل إلى هذه النتيجة هو ألبرت بيتس في عام 1919، وتُعرف على نطاق واسع باسم نظرية بيتس أو حد بيتس.



شكل ١-١١: كفاءة توربين الرياح. انظر المعادلة 1-26. كما هو واضح، الكفاءة القصوى هي $16/27$ ، والتي تتحقق بمعدل سرعة $v_2/v_1 = 1/3$.

هناك اختلاف في تقديرات قدرة الرياح المتاحة على مستوى العالم. يوضح تقدير متحفظ أن إجمالي قدرة الرياح المتاحة، 75TW، يُعد أكبر خمس مرات من إجمالي الطاقة المستهلكة في العالم. وعلى النقيض من الطاقة المائية، يُستخدم حالياً جزء صغير فقط من قدرة الرياح، ولكن معدل الاستخدام في تزايد سريع جداً. ففيما بين عامي 2000 و2009، زادت السعة الإجمالية تسعة أضعاف لتصل إلى 158.5GW. ويتوقع مجلس طاقة الرياح العالمي أنه بحلول عام 2014، ستصل سعة قدرة الرياح الإجمالية إلى 409GW.

نظرًا لحدوث نقص في مصادر الطاقة التقليدية في أواخر القرن التاسع عشر؛ فقد بدأت الدنمارك في تطوير طاقة الرياح وزادت وتيرة الإنتاج بعد أزمة الطاقة التي حدثت في سبعينيات القرن العشرين. لا تزال الدنمارك هي أكبر مُصنِّع لتوربينات الرياح بقيادة شركة فيستاس، وهي تولد 20 بالمائة من كهربتها من طاقة الرياح. ويوضح الشكل ١-١٢، صورة فوتوغرافية التقطها المؤلف في كوبنهاجن، أن حورية البحر الصغيرة تُحْدق في مجموعة كبيرة من توربينات الرياح، لا في أمير الدنمارك.



شكل ١-١٢: توربينات الرياح في كوبنهاجن. صورة فوتوغرافية ملتقطة من قبل المؤلف في كوبنهاجن، الدنمارك، في عام 2006. وتمثال حورية البحر الصغيرة، وهو رمز قومي في الدنمارك، يُحْدق في مجموعة كبيرة من توربينات الرياح، لا في أمير الدنمارك.

إلا أن نجاح الدنمارك في مجال طاقة الرياح ما كان ليتحقق لولا جيرانها: النرويج والسويد وألمانيا [45]. ونظرًا لأن طاقة الرياح متقطعة وغير منتظمة، فيجب توفير إمداد منتظم من الكهرباء من خلال نظام توليد طاقة سريع الاستجابة مزوّد بإمكانية لتخزين الطاقة. لحسن الحظ، تقريبًا 100 بالمائة من الكهرباء التي تمتلكها النرويج مولدة من

طاقة الرياح، وهناك خط ربط كهربائي بين شبكتي البلدين بطاقة توليد 1000MW. وفي فترات الرياح الشديدة، تُنقل الطاقة الإضافية المولدة في الدنمارك للشبكة الكهربائية في النرويج. وباستخدام التوربين الانعكاسي، تُخزن الطاقة الكهربائية الفائضة كطاقة وضع للماء في الخزانات. وفي عام 2005، زار المؤلف محطة تونستاد للطاقة المائية في النرويج في مساء يوم الأحد. وقد سألت مهندساً نرويجياً عن السبب في توقف أكبر توربين، فشرح لي أن إحدى مهام هذه المحطة هي إمداد الدنمارك بالطاقة. وفي صباح يوم الاثنين، عندما بدأ الدنماركيون يحتسون قهوتهم ويتأهبون للعمل، بدأ هذا التوربين في العمل بأقصى سرعة له.

(٣-٣) الكتلة الحيوية والطاقة الحيوية

عبر آلاف السنين من التاريخ البشري، وحتى الثورة الصناعية عندما بدأ استخدام مصادر الوقود الحفري، كان الاستخدام المباشر للكتلة الحيوية المصدر الرئيسي للطاقة. فقد استُخدم الخشب والقش وروث الحيوانات في الطهي وتدفئة الأماكن، كما استُخدم الشمع (المصنوع من دهن الحوت) والزيت النباتي في الإضاءة، وقد كانت الطاقة الميكانيكية للخيول تُستحث بإطعامها أنواعاً من الكتلة الحيوية. وفي الدول الأقل تقدماً من العالم، لا يزال هذا الوضع هو السائد. وحتى في الدول المتقدمة، ما زال الاستخدام المباشر للكتلة الحيوية شائعاً جداً؛ على سبيل المثال، الحطب في المدافئ ومواقد حرق الخشب.

تُنتج الكتلة الحيوية من خلال التمثيل الضوئي من ضوء الشمس. لمزيد من التفاصيل، انظر الفصل العاشر - قسم (١). وعلى الرغم من أن كفاءة التمثيل الضوئي تبلغ فقط نحو 5 بالمائة وأن أوراق الأشجار لا تغطي إلا نسبة مئوية ضئيلة، فمن المقدر أن يصل إجمالي الطاقة المخزنة حالياً في الكتلة الحيوية الأرضية إلى 25000EJ، التي تساوي تقريباً محتوى الطاقة لاحتياطي الوقود الحفري المعروف في العالم؛ ارجع إلى الجدول ١-١. يبلغ محتوى الطاقة للإنتاج السنوي للكتلة الحيوية الأرضية نحو ستة أضعاف إجمالي الطاقة المستهلكة في العالم؛ انظر الجدول ١-٤.

حالياً، هناك صناعة راسخة تنتج وقوداً سائلاً مولداً من الكتلة الحيوية للاستخدام في النقل. وهناك طريقتان تُستخدمان على نطاق واسع في هذا الإطار: إنتاج الإيثانول من السكر وإنتاج الديزل الحيوي من الزيت النباتي أو الحيواني.

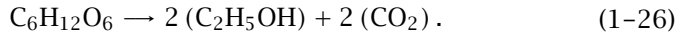
جدول ١-٤: البيانات الأساسية للطاقة الحيوية.*

العنصر	EJ/year	TW
معدل تخزين الطاقة المولدة من الكتلة الحيوية الأرضية	3000	95
إجمالي الطاقة المستهلكة على مستوى العالم	500	15
استهلاك طاقة الكتلة الحيوية على مستوى العالم	56	1.6
استهلاك طاقة الكتلة الحيوية الغذائية على مستوى العالم	16	0.5

* المصدر: مرجع [14]، ص 107.

(أ) إنتاج الإيثانول من تخمُّر السكر

إن فن إنتاج النبيذ والمشروبات الكحولية من السكر من خلال عملية التخمُّر معروفٌ منذ آلاف السنين؛ فبفعل الإنزيمات الموجودة في بعض الخمائر، يتحوَّل السكر إلى إيثانول وثاني أكسيد الكربون:



وفي نهاية التفاعل، يمكن أن يبلغ تركيز الإيثانول ما بين 10 إلى 15 بالمائة في الخليط، وباستخدام نوع خاصٍّ من الخميرة، يمكن أن يصل التركيز إلى 21 بالمائة، ثم يمكن حينها استخلاص الإيثانول عن طريق التقطير.

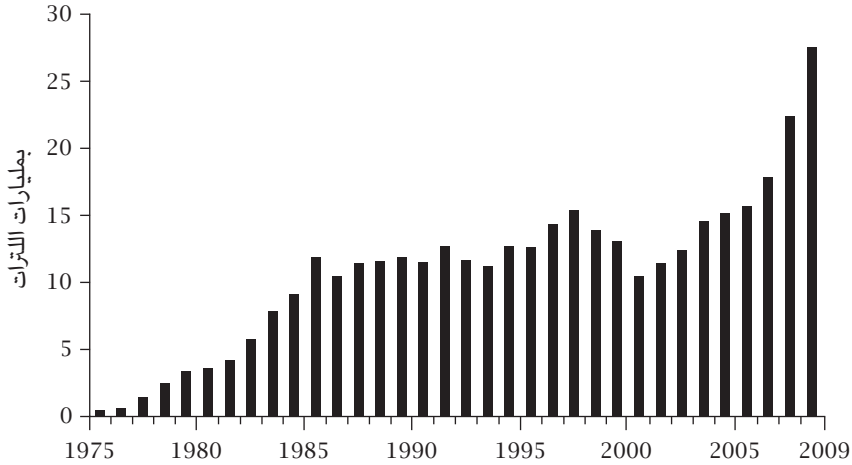
من أنجح الأمثلة على ذلك إنتاج الإيثانول من قصب السكر في البرازيل. هناك رقم مهم في صناعة الطاقة، ألا وهو «ميزان الطاقة»، أو عائد الطاقة على الطاقة المستثمرة، ارجع للمعادلة 3-1. وطبقاً لدراسات متعددة، يزيد ميزان الطاقة في البرازيل بالنسبة لإيثانول السكر عن 8، وهذا يعني أن إنتاج طاقة من الإيثانول تساوي 1J يتطلب استهلاك نحو 0.125J من الطاقة. كذلك، فإن تكلفة إنتاج جالون واحد من الإيثانول في البرازيل تصل إلى نحو 0.83 دولار، وهي أقل بكثير من تكلفة إنتاج جالون واحد من الجازولين. ويرجع هذا على الأقل جزئياً إلى مناخ وطوبوغرافيا ساو باولو، وهي ولاية تقع في جنوب شرق البرازيل، وهي منطقة مسطحة شبه استوائية تسقط عليها أمطار غزيرة. ومنذ ظهور السيارات المرنة الوقود في عام 2003 التي يمكنها بكفاءة استخدام مزيج من الجازولين والإيثانول بأي

نسبة، زاد استهلاك الإيثانول على نحو كبير بسبب رخص ثمنه. وفي عام 2008، في حدِّ يُعد الأول من نوعه، حل الإيثانول محل الجازولين باعتباره أكثر أنواع وقود المحركات استخدامًا في البرازيل [49]. يعرض الشكل ١-١٣ صورة بانورامية لمحطة كوستا بينتو لإنتاج الإيثانول الموجودة في مدينة بيراسيكابا، بولاية ساو باولو. يوضِّح الجزء الأمامي من الصورة عملية استلام محصول قصب السكر، ويوجد على الجانب الأيمن من الجزء الخلفي منها وحدة التقطير التي يُنتَج فيها الإيثانول. وتُنتَج هذه الوحدة كل الكهرباء التي تحتاجها من مخلفات قصب السكر بعد استخلاص السكر منه، وتبيع الكهرباء الفائضة للمرافق العامة.



شكل ١-١٣: محطة كوستا بينتو لإنتاج إيثانول السكر. يوضِّح الجزء الأمامي للصورة عملية استلام محصول قصب السكر، في حين تظهر في الجانب الأيمن من الجزء الخلفي للصورة وحدة التقطير حيث يُنتَج الإيثانول. الصورة معروضة بإذن من ماريوردو.

على الرغم من أن الحكومة البرازيلية لا تدعم على نحو مباشر استخدام الإيثانول، فإنها تموِّل على نحو مستمر أبحاثًا لتحسين كفاءة عملية إنتاجه وميَّكنتها. وهذا عامل مهم لنجاح مشروع إنتاج إيثانول السكر في البرازيل. فمن عام 1975 وحتى عام 2003، زاد الإنتاج من $2\text{ m}^3/\text{ha}$ إلى $6\text{ m}^3/\text{ha}$. ومؤخرًا، وصل الإنتاج، في ولاية ساو باولو، إلى $9\text{ m}^3/\text{ha}$. ويوضِّح الشكل ١-١٤ الإنتاج السنوي للإيثانول الصالح كوقود في البرازيل من عام 1975 حتى عام 2010. وعلى الرغم من أن البرازيل تنتج حاليًا أكثر من 50 بالمائة من الوقود المطلوب للسيارات الموجودة بها ونحو 30 بالمائة من الإيثانول المتداول حول العالم، فهي تستخدم فقط 1.5 بالمائة من أرضها المزروعة.

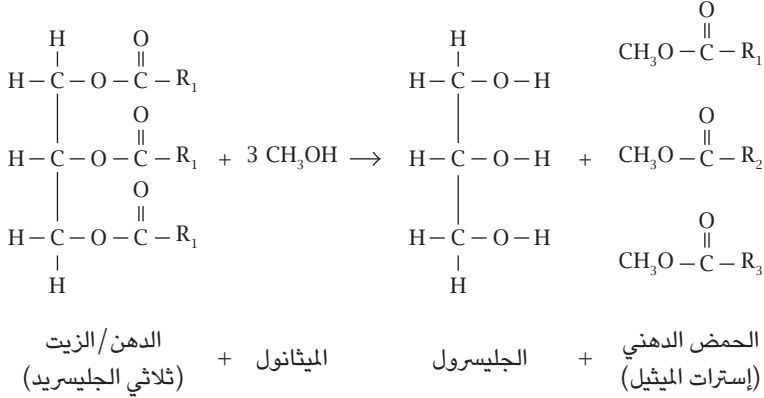


شكل ١-١٤: الإنتاج السنوي للإيثانول في البرازيل. المصدر: «الكتاب السنوي الإحصائي للطاقة الزراعية لعام 2009»، وزارة الزراعة والماشية والإمدادات، البرازيل.

(ب) إنتاج الديزل الحيوي من الزيت النباتي أو الدهن الحيواني

مثال آخر على استخدام الكتلة الحيوية لإنتاج وقود سائل هو إنتاج الديزل الحيوي من الزيت النباتي أو الدهن الحيواني. إن التركيب الكيميائي لجزيئات كل من الزيت النباتي والدهن الحيواني متطابق؛ فثلاثي الجليسريد يتكون من جزيء واحد من الجليسرول وثلاثة جزيئات من الحمض الدهني؛ انظر الشكل ١-١٥. إن الحمض الدهني هو حمض كربوكسيلي (يتميز بوجود المجموعة COOH) ويحتوي على سلسلة هيدريد كربون طويلة وغير متفرعة، ومع استخدام أنواع مختلفة من الأحماض الدهنية، تُنتج أنواع مختلفة من ثلاثيات الجليسريد. وعلى الرغم من أن الزيت النباتي يمكن استخدامه في محركات الديزل مباشرة، فإنه يمكن أن يدمرها بسبب حجم جزيئاته الكبير ونسبة اللزوجة العالية الناتجة عن ذلك، إلى جانب ميله لعدم الاحتراق الكامل. فالديزل الحيوي التجاري هو نتاج تفاعل ثلاثي الجليسريد والكحول، على وجه التحديد الميثانول أو الإيثانول، وباستخدام هيدروكسيد الصوديوم أو هيدروكسيد البوتاسيوم كمحفز، تحدث عملية أسترة تبادلية لثلاثي الجليسريد ليكون ثلاثة إسترات صغيرة وجليسريناً حراً؛ انظر الشكل ١-١٥. لا يمتزج الإستر مع الجلسرين، ووزنه النوعي (الذي يتراوح بالأساس بين 0.86g/cm^3

و 0.9g/cm^3) أقل بكثير عن ذلك الخاص بالجلسرين (الذي يصل إلى 1.15g/cm^3)؛ لذا فإن الديزل الحيوي يمكن بسهولة فصله من مزيج الجليسرين والترسبات.



شكل ١-١٥: عملية إنتاج الديزل الحيوي. يمزج ثلاثي الجليسريد والكحول وباستخدام محفز، تحدث أستر تبادلية لثلاثي الجليسريد ليكون ثلاثة إسترات صغيرة وجليسريناً حرّاً. والإستر، أو الديزل الحيوي، حجم جزيئاته أصغر كثيراً، مما يوفر تزييئاً أفضل لأجزاء المحركات.

وهكذا، فإن حجم جزيئات الديزل الحيوي المنتج أصغر بكثير من ثلاثيات الجليسريد، مما يوفر تزييئاً أفضل لأجزاء المحركات، كما أن طبيعته أفضل حتى من تلك الخاصة بزيت الديزل المشتق من النفط، فيما يتعلّق بخواصه التزييئية وتقديره السيتاني، على الرغم من أن قيمته الحرارية أقل منه بنحو 9 بالمائة، كما أن له ميزة إضافية عليه وهي أنه لا يوجد به كبريت، وهو عنصرٌ يمثل خطراً كبيراً على البيئة موجود في زيت الديزل المشتق من النفط. تعتمد تكلفة وإنتاجية الديزل الحيوي على نحو كبير على كمية وتكلفة المواد الخام التي يُصنع منها، فالشحم المعاد تدويره، مثل الزيت المستخدم في إنتاج البطاطس المحمرة والشحم المستخلص من مخلفات المطاعم، يُعد مصدراً أساسياً للمواد الخام هذه. والمنتجات الفرعية لصناعة الغذاء، مثل دهن الخنزير ودهن الدجاج، التي عادةً ما تُعدّ غير صالحة بالنسبة للبشر، كثيراً ما تُستخدم أيضاً، لكن هذه المصادر سهلة المنال غير متوفرة بكثرة؛ ومن ثم فإن الزيت البكر يُعد هو القوام الأساسي للديزل الحيوي، وتختلف كمية وتكلفة الزيت البكر على نحو كبير من محصول لآخر؛ انظر الجدول ١-٥.

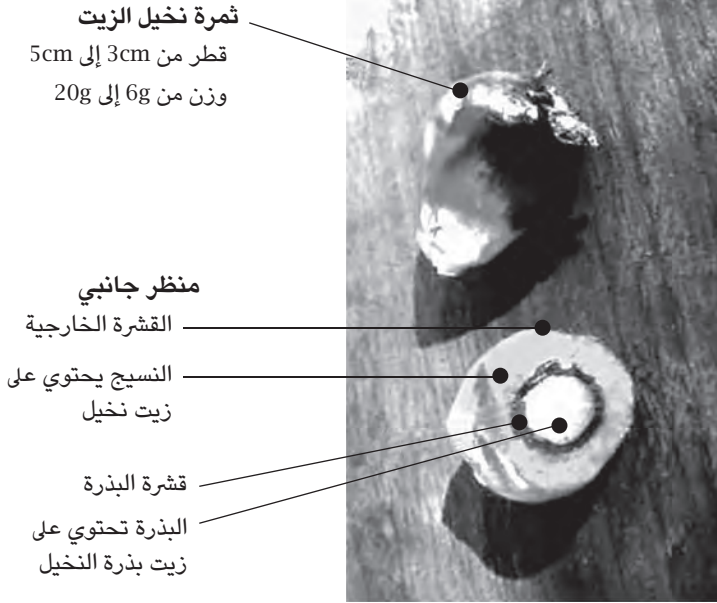
جدول ١-٥: ناتج الديزل الحيوي من المحاصيل المختلفة.*

بالنسبة للإيثانول	m ³ /ha	بالنسبة للديزل الحيوي	m ³ /ha
بنجر السكر (فرنسا)	6.67	نخيل الزيت	4.75
قصب السكر (البرازيل)	6.19	جوز الهند	2.15
الذرة السكرية (الهند)	3.50	بذور اللفت	0.95
الذرة (الولايات المتحدة الأمريكية)	3.31	الفاول السوداني	0.84

* المصدر: مرجع [14]، الفصل الرابع.

يعرض الجدول ١-٥ عددًا من المحاصيل المستخدمة في إنتاج أنواع الوقود الحيوي، بما في ذلك تلك المستخدمة في إنتاج الإيثانول. إن اثنين منها عبارة عن جذور غنية بالسكر (بنجر السكر والذرة السكرية)، وحصاد تلك الجذور يحتاج لقدر أكبر بكثير من الطاقة ويحتاج لعمالة أكبر من حصاد قصب السكر؛ لذا فإن ميزان الطاقة (نسبة الطاقة المنتجة في مقابل الطاقة المطلوبة لإنتاجها) عادة ما تكون نحو 2، وهو ما يُعد أقل بكثير مما هو عليه الحال فيما يتعلق بقصب السكر، الذي يزيد عن 8. يكون ميزان الطاقة الخاص بالذرة أقل أيضًا (نحو 2)، لأن الخطوة الأولى تتمثل في تحويل نشا الذرة إلى سكر، الذي يتطلب طاقة وعمالة. لنخيل الزيت، وموطنه بالأساس أفريقيا، أعلى ناتج لكل وحدة مساحة من الأرض. تظهر صورة فوتوغرافية لثمرة نخيل الزيت في الشكل ١-١٦. يتراوح قطر الثمرة بوجه عام بين 3cm و 5cm. إن نسبة 50 بالمائة من النسيج الرقيق للثمرة تتكون من زيت النخيل. تحتوي البذرة على نوع آخر من الزيت، وهو زيت بذرة النخيل، الذي يُعد مكونًا أساسيًا في صناعة الصابون. وفي ظل الظروف المواتية، يمكن أن يصل بسهولة زيت النخيل الناتج إلى 5 ton/ha سنويًا، مما يجعله يتفوق كثيرًا على أي مصدر آخر للزيت الصالح للأكل. ولأنه لا يحتوي على كوليسترول، فهو زيت طعام صحي. وحاليًا يُعد هو الزيت النباتي الذي يحتل الصدارة في السوق العالمية (48000000 ton، أو 30 بالمائة من حصة السوق العالمية)، مع كون ماليزيا وإندونيسيا أكبر المنتجين له. وبخلاف الأنواع الأخرى من النباتات المنتجة للزيت (مثل فول الصويا وبذور اللفت) التي تُزرع سنويًا، فإن نخيل الزيت أشجار كبيرة؛ انظر الشكل ١-١٧، بمجرد أن تُزرع، يمكنها أن تنتج الزيت لعقود عديدة.

فيزياء الطاقة الشمسية



شكل ١-١٦: ثمرة نخيل الزيت. من حيث الحجم والتركيب، تشبه هذه الثمرة ثمرة الخوخ أو البرقوق، لكن نسبة 50 بالمائة من نسيجها الرقيق تتكون من زيت نخيل. وزيت النخيل الناتج لكل وحدة مساحة من الأرض أكبر بكثير من أي مصدر آخر للزيت الصالح للأكل، كما أن البذرة غنية أيضًا بزيت ولكن من نوع مختلف؛ فزيت بذرة نخيل الزيت مكون مهم في صناعة الصابون.

(٣-٤) الطاقة الحرارية الأرضية الضحلة

يمكن تعريف الطاقة الحرارية الأرضية بأنها الحرارة المخزنة في الأرض، لكنَّ هناك نوعين متميزين من هذه الطاقة وذلك اعتمادًا على مصدرها؛ وهما: الطاقة الحرارية الأرضية الضحلة والعميقة. إن الطاقة الحرارية الأرضية الضحلة هي الطاقة الشمسية المخزنة في الأرض، التي سنصِفُ أصلها في الفصل الخامس - قسم (٤). تكون درجة الحرارة بوجه عام هنا أقل أو أعلى بنحو 10 درجات مئوية عن تلك الخاصة بسطح الأرض. والاستخدام الرئيسي لهذه الطاقة يتمثل في تحسين كفاءة المدفأة الكهربائية ونظام التبريد الكهربائي



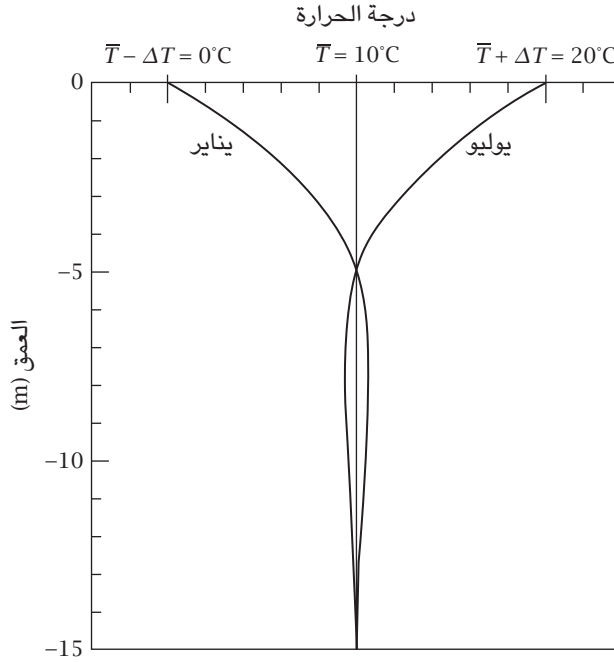
شكل ١-١٧: نخيل الزيت البري في أفريقيا. يعد نخيل الزيت أشجارًا أصلية في أفريقيا والتي وفرت زيت النخيل لقرون عديدة. هذه صورة فوتوغرافية لنخيل الزيت البري التقطها ماركو شميت على منحدرات جبل كامبيون، الكاميرون، أفريقيا.

(مكيف الهواء) باستخدام مضخة حرارية أو مبرد يعمل بانضغاط البخار. أما عن الطاقة الحرارية الأرضية العميقة، فهي الحرارة المخزنة في لب وذيئار كوكب الأرض. ويمكن أن تصل درجة الحرارة هنا إلى مئات الدرجات المئوية، ويمكن استخدام تلك الحرارة في توليد الكهرباء وتدفئة مساحة كبيرة. وفي هذا القسم، سنركز على الطاقة الحرارية الأرضية الضحلة، في حين سنعرض للطاقة الحرارية الأرضية العميقة في القسم التالي.

يظهر النمط العام لتوزيع درجة الحرارة تحت الأرض في الشكل ١-١٨. ففي عمق كبير، على سبيل المثال، من 20m إلى 30m تحت الأرض، تكون درجة الحرارة هي متوسط درجة الحرارة السنوي للسطح؛ على سبيل المثال، $\bar{T} = 10^{\circ}\text{C}$. وعلى السطح، تختلف درجة الحرارة باختلاف الفصول؛ ففي يناير تكون درجة الحرارة هي الأقل؛ على سبيل المثال، $\bar{T} - \Delta T = 0^{\circ}\text{C}$. في يوليو، تكون درجة الحرارة هي الأعلى؛ على سبيل المثال، $\bar{T} + \Delta T = 20^{\circ}\text{C}$. وهناك تفاوتات في درجة الحرارة حسب الوقت من اليوم، لكن عمق الاختراق صغير جدًا. ونظرًا للسرعة المتناهية للتوصيل الحراري، فعند عمق معين، بوجه عام من 5m إلى 10m- تحت السطح، تكون صورة درجة الحرارة «معكوسة». بعبارة

فيزياء الطاقة الشمسية

أخرى، في الصيف تكون درجة الحرارة بعمق سبعة أمتار تحت الأرض أقل من المتوسط السنوي، والعكس صحيح بالنسبة للشتاء.



شكل ١-١٨: الطاقة الحرارية الأرضية الضحلة. هناك تفاوت موسمي في درجة الحرارة تحت الأرض. على السطح، تكون درجة الحرارة في الصيف أعلى بكثير من درجة الحرارة في الشتاء. وتحت الأرض على عمق عشرين متراً، على سبيل المثال، تكون درجة الحرارة هي متوسط درجة الحرارة السنوي للسطح. وفي الصيف تكون درجة الحرارة تحت الأرض بعدة أمتار «أقل» من المتوسط السنوي، والعكس صحيح بالنسبة للشتاء. ويمكن استخدام الطاقة المخزنة في الأرض لتدفئة وتكييف المساحات مما يوفر كميات كبيرة من الطاقة.

إن الطاقة الشمسية المخزنة في الأرض عامة وموجودة بكميات كبيرة جداً. وفي أجزاء كثيرة من المنطقة المعتدلة، يمكن استخدام هذه الطاقة مباشرة لتكييف المساحات. وبوضع نظم تبادل حراري تحت الأرض وتوجيه الهواء البارد عبر أنابيب إلى أماكن السكن، يمكن إنشاء نظام تكييف هواء بدون تكلفة تقريباً في الطاقة. وفي المناطق التي يقترب فيها

متوسط درجة الحرارة من الصفر أو يقل قليلاً عنها، يمكن استخدام الكهوف الموجودة تحت الأرض كمبردات، أيضاً بدون تكلفة تقريباً في الطاقة. يتمثل الاستخدام الرئيسي للطاقة الحرارية الأرضية الضحلة في نظم تدفئة وتكييف المساحات باستخدام مضخة حرارية أو مبرد يعمل بانضغاط البخار، مع اعتبار المساحات الموجودة تحت الأرض كمخازن للحرارة. وسنعرض للتفاصيل في الفصل السادس.

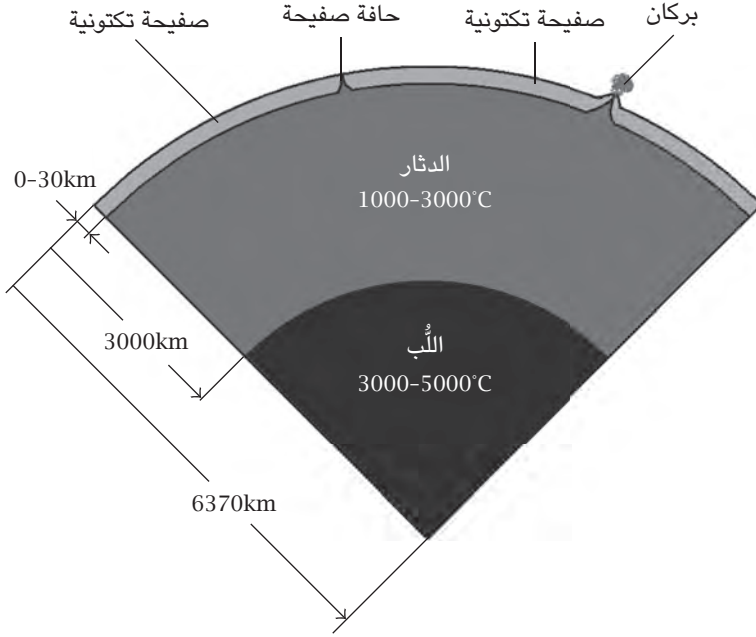
(٣-٥) الطاقة الحرارية الأرضية العميقة

الأنواع المختلفة من مصادر الطاقة المتجددة المعروضة في الأقسام السابقة هي من مشتقات الطاقة الشمسية، لكن الطاقة الحرارية الأرضية العميقة هي مصدر الطاقة الرئيسي الوحيد الذي ليس مشتقاً من الطاقة الشمسية. ففي الوقت الذي تكوّنت فيه الأرض من غاز ساخن، جعلت طاقة الجاذبية والحرارة لب الأرض متوهجاً بالحرارة. وبعد تكوّن الأرض، وفّرت العناصر المشعة على نحو مستمرّ الطاقة لإبقاء لب الأرض ساخناً. ويعرض الشكل ١-١٩ مقطعاً عرضياً تخطيطياً للأرض. تنقسم قشرة الأرض، وهي طبقة باردة نسبياً من الصخور ذات كثافة منخفضة نسبياً (من 2g/cm^3 إلى 3g/cm^3)، إلى عدة «صفائح تكتونية». يختلف السّمك من مكان لآخر، بدءاً من 0km وحتى نحو 30km. وتحت القشرة يوجد «الدثار»، وهي طبقة ساخنة نسبياً من الصخور المنصهرة جزئياً ذات كثافة عالية نسبياً (من 3g/cm^3 إلى 5.5g/cm^3). وهو يعد مخزناً للحم البركانية للأنشطة البركانية. وبدءاً من نحو 3000km لأسفل، يوجد لب الأرض، الذي يُعتقد أنه عبارة عن حديد ونيكل منصهرين، وهو الجزء صاحب الكثافة الأعلى (من 10g/cm^3 إلى 13g/cm^3).

إن المحتوى الحراري للدثار واللب هائل. نظرياً، عند حفر بئر عميقة في الجزء الساخن من الأرض مع حقن الماء، يمكن إنتاج بخار فائق الحرارة يستطيع تشغيل التوربينات لإنتاج الكهرباء، لكن بوجه عام، هذه العملية باهظة التكاليف وشديدة الصعوبة على نحو غير معقول.

توجد أغلب محطات الطاقة الحرارية الأرضية الحالية بالقرب من حواف الصفائح التكتونية أو في مناطق بها براكين نشطة؛ حيث يكون سمك قشرة الأرض أقل من بضعة كيلومترات، ويكون الحفر للوصول إلى الصخور الساخنة أمراً عملياً. ويوضح الشكل ١-٢٠ المناطق الأرضية التي يمكن استخراج طاقة حرارية أرضية عميقة منها.

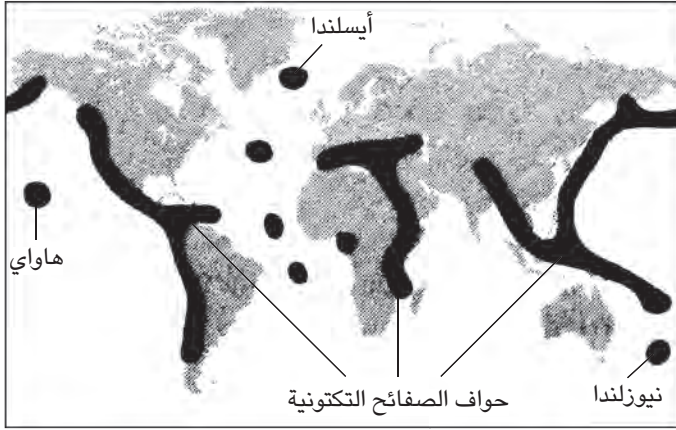
فيزياء الطاقة الشمسية



شكل ١-١٩: الطاقة الحرارية الأرضية العميقة. إن أصل الطاقة الحرارية الأرضية العميقة هو لب الأرض. أولاً، أثناء تكوُّن الأرض، أنتج التقلص الجذبوي حرارة. بعد ذلك، وفرت التفاعلات النووية في الأرض الطاقة باستمرار. ونظرًا لسمك الصفائح التكتونية، فإن الطاقة الحرارية الأرضية العميقة تكون اقتصادية فقط عند حواف تلك الصفائح أو بالقرب من البراكين.

حيث إن آيسلندا غنية بالبراكين النشطة، فلديها ميزة غير عادية فيما يتعلق باستخدام الطاقة الحرارية الأرضية العميقة. ففي عام 2008، أتى نحو 24 بالمائة من كهربتها من الطاقة الحرارية الأرضية وتمت تدفئة 87 بالمائة من مبانيها باستخدام نفس الطاقة. يعرض الشكل ١-٢١ صورة فوتوغرافية لمحطة نسجافلير للطاقة الحرارية الأرضية، التي تُعد ثاني أكبر محطة من هذا النوع في آيسلندا، بسعة قدرها 120MW.

تمهيد



شكل ١-٢٠: مناطق استخراج الطاقة الحرارية الأرضية العميقة. عند حواف الصفائح التكتونية والمناطق التي توجد بها براكين نشطة، يمكن استخدام الطاقة الحرارية الأرضية العميقة على نحو اقتصادي.



شكل ١-٢١: محطة نسجافير للطاقة الحرارية الأرضية، أيسلندا. نظرًا لأن أيسلندا غنية بالبراكين النشطة، فلديها ميزة غير عادية فيما يتعلق باستخدام الطاقة الحرارية الأرضية العميقة. موضح بالصورة محطة نسجافير للطاقة الحرارية الأرضية التي سعتها 120MW.

(٤) لمحة عن الخلايا الكهروضوئية الشمسية

من الواضح أن في النصف الأول من القرن الحادي والعشرين سينضب الوقود الحفري لدرجة أنه لن يمكنه سد حاجة المجتمع البشري من الطاقة. هناك أنواع متعددة من مصادر الطاقة المتجددة، العديد منها له عيوب، بما في ذلك الطاقة المائية وطاقة الرياح والطاقة الحرارية الأرضية. ويمكن للتطبيقات الحرارية الشمسية مثل سخانات الماء الشمسية أن تسدّ جزءاً صغيراً فقط من إجمالي الطلب على الطاقة، وتعد الخلايا الشمسية البديل الوحيد الواعد للوقود الحفري. وفي هذا القسم، سنلقي نظرة سريعة على المفاهيم الأساسية للخلايا الكهروضوئية الشمسية، وسنعرض التفاصيل في الفصول من الثاني حتى الرابع ومن السابع حتى العاشر.

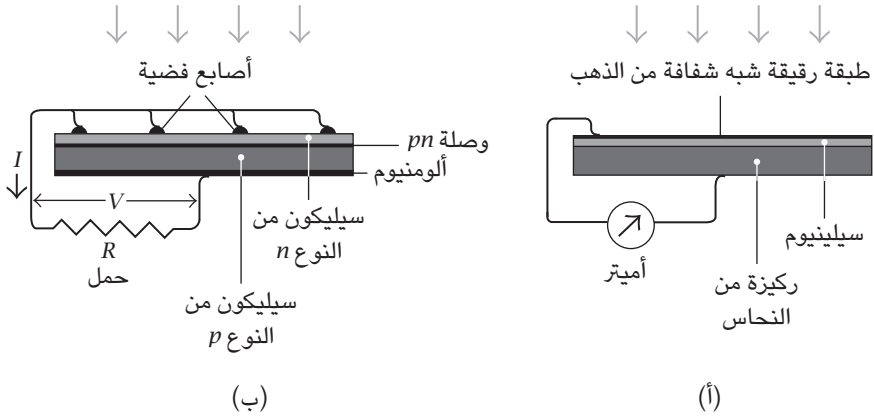
(٤-١) ميلاد الخلايا الشمسية الحديثة

في عام 1953، دشنت مختبرات بيل مشروعاً بحثياً لإنتاج أجهزة لتوفير مصدر طاقة للأجزاء البعيدة من العالم، حيث لا تتوفر شبكة كهرباء. اقترح العالم الرائد داريل تشابن استخدام خلايا شمسية ووافق رؤسائه على اقتراحه.

في ذلك الوقت، كان مفهوم التأثير الكهروضوئي في السيليونيوم، المكتشف في سبعينيات القرن التاسع عشر، قد أُضفيت الصبغة التجارية عليه بالفعل في صورة جهاز لقياس شدة الإضاءة في التصوير الفوتوغرافي، ويعرض الشكل ١-٢٢ (أ) مخططاً له. توضع طبقة من السيليونيوم على ركيزة من النحاس، ثم تُغطى بطبقة رقيقة شبه شفافة من الذهب. وعندما يُضاء الجهاز بالضوء المرئي، يُولّد فرق جهد كهربائي يُنتج بدوره تياراً كهربائياً، وتعتمد شدة التيار الكهربائي على شدة الضوء، وقد كان هذا جهازاً قياسياً في النصف الأول من القرن العشرين بالنسبة للمصورين الفوتوغرافيين لقياس ظروف الإضاءة، كما أنه أكثر متانة وسهولة في الاستخدام بكثير من المقاومات الضوئية لعدم وجود أجزاء متحركة به وعدم احتياجه لبطارية.

بدأ تشابن تجربته باستخدام الخلايا الضوئية المصنوعة من السيليونيوم، ووجد أن كفاءتها، 0.5 بالمائة، قليلة جداً بحيث لا تستطيع توليد طاقة كافية للتطبيقات الهاتفية، ثم في ضربة حظ لا يمكن تصديقها، انضم إليه عالمان من مختبرات بيل، وهما كلفن فولر وجيرالد بيرسون، كانا يعملان في المشروع الرائد لتطوير ترانزستورات من السيليكون

تمهيد



شكل ١-٢٢: خلية شمسية مصنوعة من السيليونيوم وأخرى مصنوعة من السيليكون. (أ) اكتشفت الخلية الكهروضوئية المصنوعة من السيليونيوم في منتصف القرن التاسع عشر واستُخدمت لقياس شدة الإضاءة في التصوير الفوتوغرافي. (ب) اخترعت الخلية الكهروضوئية المصنوعة من السيليكون في مختبرات بيل في عام 1954 باستخدام التقنية الخاصة بترانزستورات السيليكون.

وعملوا معاً على تقنية السيليكون الناشئة لتصنيع الخلايا الشمسية؛ انظر الشكل ١-٢٣. وفي عام 1954، أنشئت خلية شمسية بكفاءة تصل إلى 5.7 بالمائة [67]، وقُدِّمت للناس. ويعرض الشكل ١-٢٢ (ب) مخططاً لها.

صُنعت الخلية الشمسية السيليكونية من بلورة واحدة من السيليكون. وباستخدام دقيق لعملية الإشابة، صُنعت وصلة pn . يكون الجانب n من الوصلة رقيقاً جداً ومشوباً بدرجة عالية للسماح للضوء بالانتقال للوصلة بدرجة قليلة جداً من التوهين، لكن التوصيل الكهربائي الجانبي يكون كافياً جداً لتجميع التيار للتماس الأمامي عبر مصفوفة من الأصابع الفضية. أما عن الجانب الخلفي من السيليكون، فهو مغطى بطبقة معدنية رقيقة، عادة من الألومنيوم. وقد بقي التركيب الأساسي للخلايا الشمسية السيليكونية كما هو دون تغيير حتى الآن.

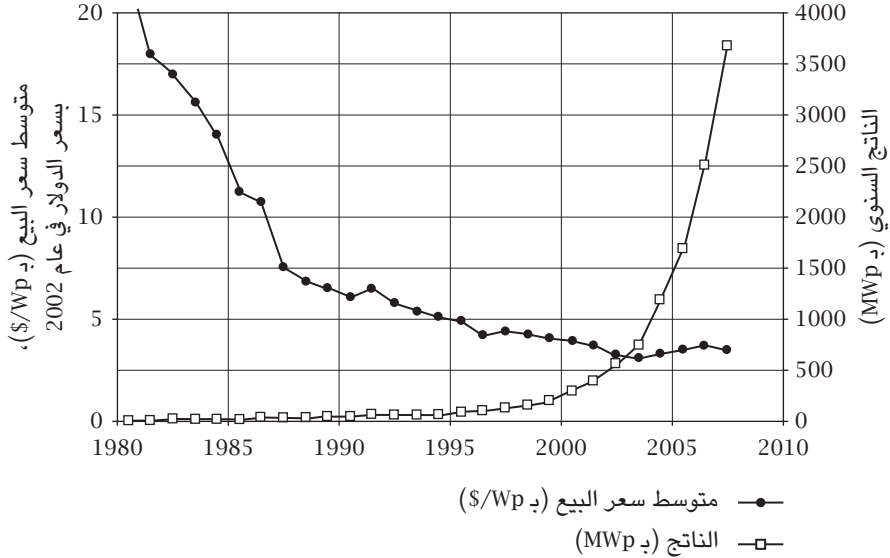
أحدث الظهور الأول للخلية الشمسية في مدينة نيويورك ضجةً كبيرة، كانت تكلفة إنشاء مثل هذه الخلايا الشمسية عالية جداً. ومن منتصف خمسينيات القرن الماضي وحتى أوائل سبعينياته، كان البحث والتطوير في مجال الخلايا الكهروضوئية موجهاً



شكل ١-٢٣: مخترعو الخلايا الشمسية السيليكونية. من اليسار إلى اليمين: جيرالد بيرسون (1905-1987) وداريل تشابن (1906-1995) وكلفن فولر (1902-1994). في عام 1953، دشنت مختبرات بيل مشروعًا بحثيًا لتوفير مصادر طاقة للأجزاء البعيدة من العالم، حيث لا تتوفر شبكة كهرباء. وفي عام 1954، وباستخدام التقنية الوليدة لصنع ترانزستورات من السيليكون، طوروا وقدموا أول خلية شمسية مصنوعة من السيليكون. والكفاءة المتحققة، 5.7 بالمائة، جعلت الخلية الشمسية مصدر طاقة مفيدًا. الصورة معروضة بإذن من مختبرات بيل التابعة لشركة إيه تي أند تي.

بالأساس لتطبيقات الفضاء وطاقة الأقمار الصناعية. وفي عام 1976، أُنشئت وزارة الطاقة الأمريكية، وكذلك برنامج الخلايا الكهروضوئية. وبدأت وزارة الطاقة، إلى جانب العديد من المنظمات الدولية الأخرى، تمويل البحث في مجال الخلايا الكهروضوئية بمستويات ملحوظة، وسرعان ما أُنشئت صناعة الخلايا الشمسية الأرضية، وقد قلَّ التوفير الناجم عن الإنتاج واسع النطاق وكذلك التقدم التقني الحادث في المجال؛ من سعر الخلايا الشمسية على نحو كبير. ويعرض الشكل ١-٢٤ التطور السنوي لسعر ومعدل تركيب الخلايا الشمسية من عام 1980 حتى عام 2007.

تمهيد



شكل ١-٢: متوسط سعر ومعدل تركيب الخلايا الشمسية فيما بين عامي 1980 و 2007. انخفض متوسط سعر الخلايا الشمسية بمقدار الثلثين من أكثر من 20\$/Wp في عام 1980 إلى 6.5\$/Wp في عام 1990. وقد زاد بانتظام معدل تركيب الخلايا الشمسية خلال تلك الفترة. المصدر: «صناعة الخلايا الكهروضوئية الشمسية»، تقرير «التوقعات العالمية» لعام 2008، مصرف دويتشه بنك.

(٢-٤) بعض المفاهيم عن الخلايا الشمسية

فيما يلي قائمة ببعض المصطلحات والمفاهيم الأساسية المتعلقة بالخلايا الشمسية:

(أ) ظروف الإضاءة القياسية

تُختبر كفاءة وقدرة حَرَج أي وحدة (أو خلية) شمسية في ظل الظروف القياسية التالية: شدة إضاءة مقدارها 1000W/m^2 ، ودرجة حرارة محيطية 25 درجة مئوية، وطيف يرتبط بضوء الشمس الذي مر عبر الغلاف الجوي عندما كانت الشمس على ارتفاع 42 درجة من الأفق (حينها تكون كتلة الهواء 1.5، انظر ملحق الصور الشكل ١).

(ب) عامل الامتلاء

إن «فرق جهد الدائرة المفتوحة» V_{op} هو فرق الجهد بين طرفي الخلية الشمسية في ظل ظروف الإضاءة القياسية عندما يكون للحمل مقاومة لامتناهية مفتوحة. في هذه الحالة، يكون التيار صفراً. أما «تيار الدائرة الصغيرة» I_{sc} ، فهو تيار الخلية الشمسية في ظل ظروف الإضاءة القياسية عندما تكون مقاومة الحمل صفراً. في هذه الحالة، يكون فرق الجهد صفراً. وباستخدام حمل مُقاوم R ، سيكون فرق الجهد V أصغر من V_{op} ، والتيار I أصغر من I_{sc} . وتكون القدرة P مساوية لـ IV . وتتحدد قدرة الخرج القصوى من خلال ما يلي:

$$dP = d(IV) = IdV + VdI = 0. \quad (1-27)$$

يوضح الشكل ١-٢٥ العلاقة بين هذه الكميات. وبالإشارة إلى نقطة القدرة القصوى بالرمزين I_{mp} و V_{mp} ، تكون لدينا $P_{max} = I_{mp}V_{mp}$. ويُعرف عامل الامتلاء FF لأي خلية شمسية كما يلي:

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{sc}V_{oc}} = \frac{I_{mp}V_{mp}}{I_{sc}V_{oc}}. \quad (1-28)$$

والقيمة النموذجية لعامل الامتلاء تتراوح بين 0.8 و 0.9.

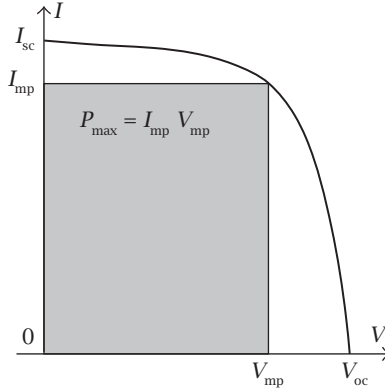
(ج) الكفاءة

تتحدد كفاءة أي خلية شمسية من خلال نسبة القدرة الكهربائية الناتجة إلى قدرة الإشعاع الشمسي الداخلة في ظل ظروف الإضاءة القياسية عند نقطة القدرة القصوى. يعرض ملحق الصور الشكل ٥ لكفاءة أنواع الخلايا الشمسية المختلفة.

(د) واط الذروة

إن نسبة «واط الذروة» (W_p) لأي وحدة شمسية هي القدرة (W) المنتجة من قبل الوحدة في ظل ظروف الإضاءة القياسية عند نقطة القدرة القصوى. ومن الواضح أن قدرة الخرج الفعلية لأي خلية شمسية تعتمد على ظروف الإضاءة الفعلية. ولمناقشة حول الإضاءة الشمسية، انظر الفصل الرابع.

تمهيد



شكل ١-٢٥: القدرة القصوى وعامل الامتلاء. بتوصيل مقاوم حمل لطرفي خلية شمسية، تمد الخلية الشمسية الحمل بالطاقة. ونقطة القدرة القصوى تكون عندما تصل $P = IV$ للحد الأقصى. عند هذه النقطة، يكون $P_{\max} = I_{\text{mp}} V_{\text{mp}}$. من الواضح أن I_{mp} يكون دائماً أصغر من I_{sc} و V_{mp} أصغر من V_{oc} . ويُعرف عامل الامتلاء لأي خلية شمسية كما يلي:

$$\text{FF} = P_{\max} / I_{\text{sc}} V_{\text{oc}} = I_{\text{mp}} V_{\text{mp}} / I_{\text{sc}} V_{\text{oc}}$$

(٣-٤) أنواع الخلايا الشمسية

كانت الخلية الشمسية المصنوعة من السيليكون البلوري هي أول خلية شمسية عملية اخترعت في عام 1954. وبلغت كفاءة هذه الخلايا، مع التوسع في إنتاجها، بين 14 و20 بالمائة، وهي لا تزال الأعلى في الخلايا الشمسية الأحادية الوصلة. كما أن لها عمراً طويلاً وجاهزية للإنتاج الواسع. وحالياً، هي ما تزال تمثل أكثر من 80 بالمائة من سوق الخلايا الشمسية. وهناك نوعان من هذه الخلايا: أحادية البلورة ومتعددة البلورات. إن الخلايا الشمسية المصنوعة من السيليكون غير البلوري ذات الأغشية الرقيقة؛ أرخص بكثير من نظيراتها المصنوعة من السيليكون البلوري، لكن الكفاءة تتراوح فقط بين 6 و10 بالمائة. وفيما بينهما الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة المصنعة من سيلينيد جاليوم إنديوم النحاس أو المصنعة من تيلوريد الكادميوم وكبريتيد الكادميوم، بكفاءة تصل إلى نحو 10 بالمائة، تمثل نحو 15 بالمائة من السوق، ونظراً لمعامل الامتصاص العالي جداً، فإن كمية المواد المطلوبة تكون هنا قليلة، كما أن عملية الإنتاج أبسط؛ لذا فإن سعر الوحدة

فيزياء الطاقة الشمسية

لكل واط ذروة يكون أقل من الخلايا الشمسية المصنوعة من السيليكون البلوري. وحاليًا، ما تزال الخلايا الشمسية العضوية ذات كفاءة أقل وعمر أقصر، كما أن حصتها من السوق لا تُذكر؛ انظر ملحق الصور الشكل ٥. ويلخص الجدول ١-٦ الأنواع الرئيسية المتعددة للخلايا الشمسية.

جدول ١-٦: أنواع الخلايا الشمسية.

النوع	الكفاءة (بالنسبة المئوية)	التكلفة (\$/Wp)	حصة السوق (بالنسبة المئوية)
خلايا السيليكون الأحادي البلورة	17-20	3	30
خلايا السيليكون المتعدد البلورات	15-18	2	40
خلايا السيليكون غير البلوري	5-10	1	5
الخلايا المُصنعة من سيلينيد جاليوم إنديوم النحاس	11-13	1.5	5
الخلايا المُصنعة من تيلوريد الكادميوم وكبريتيد الكادميوم	9-11	1.5	10

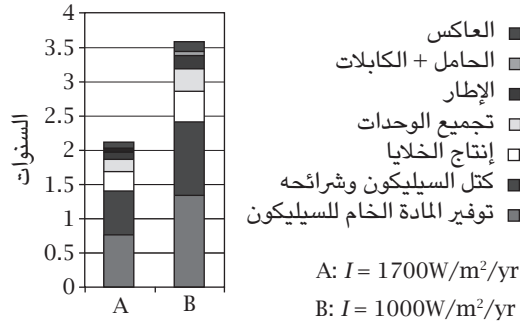
(٤-٤) ميزان الطاقة

من أجل إنتاج الخلايا الشمسية نحتاج إلى طاقة؛ لذا فإن دراسة عائد الطاقة على الطاقة المستثمرة مهمة. سنناقش هنا ميزان الطاقة لأغلى نوع، ألا وهو: الخلايا الشمسية المصنعة من السيليكون البلوري. ويتضمن استثمار الطاقة ذلك الخاص بإنتاج السيليكون وقوالبه وشرائحه وإنتاج الخلايا وتجميع الوحدات والتركيب. هناك معيار يمكن استخدامه لتقييم ميزان طاقة الخلايا الكهروضوئية ألا وهو «وقت الاسترداد». بوضع الخلايا الشمسية في ظروف إضاءة شمسية معينة، ستنتج طاقة في شكل كهرباء. ووقت الاسترداد هو عدد السنوات التي يستغرقها إنتاج كهرباء من قبل الخلايا الشمسية لتعويض الطاقة المستثمرة في عملية الإنتاج والتركيب.

يمثل الشكل ١-٢٦ تقديرًا متحفظًا لوقت الاسترداد للخلايا الشمسية المصنعة من السيليكون البلوري في ظل ظروف التشميس الأوروبية [4]. بالنسبة لوسط أوروبا، التي

تمهيد

معدل التشميس السنوي فيها 1000W/m^2 ، فإن وقت الاسترداد يساوي 3.6 سنوات. وحيث إن عمر هذه الخلايا بوجه عام 25 عامًا، فإن عائد الطاقة على الطاقة المستثمرة الخاص بها يساوي 7. وفي جنوب أوروبا وأغلب المناطق في الولايات المتحدة الأمريكية، يكون عائد الطاقة على الطاقة المستثمرة أكثر من 10، كما أن عائد الطاقة على الطاقة المستثمرة بالنسبة للخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة أفضل، لكن نظرًا لأن كفاءتها أقل، فهي تتطلب مساحة أكبر لإنتاج نفس مقدار الطاقة.



شكل ١-٢٦: وقت الاسترداد للخلايا الشمسية المصنعة من السيليكون البلوري. تتضمن الطاقة المستثمرة لإنتاج خلية شمسية الطاقة المطلوبة لإنتاج السيليكون وقوابله وشرائحه وإنتاج الخلايا والتركيب، وحتى في ظل ظروف التشميس غير المواتية، كما في وسط أوروبا، فإن وقت استردادها يكون أقل من 15 بالمائة من عمرها، مما يجعل عائد الطاقة على طاقتها المستثمرة يساوي 7 (انظر المرجع [4]).

(٥) فيما وراء الفيزياء

إن ضبط العوامل الفيزيائية لا يؤدي دائماً إلى تنفيذ صناعي ناجح وإلى جلب فائدة عظيمة على البشرية. والطاقة الشمسية ليست استثناءً في هذا الشأن. فالالاقتصاد والسياسة يلعبان دوراً مهماً. في هذا القسم، سنستعرض بعض الدروس التاريخية المهمة ونحلل السياق الاقتصادي والسياسي الذي يمكن في إطاره أن ينجح استخدام الطاقة الشمسية؛ ومن ثم يفيد البشرية.

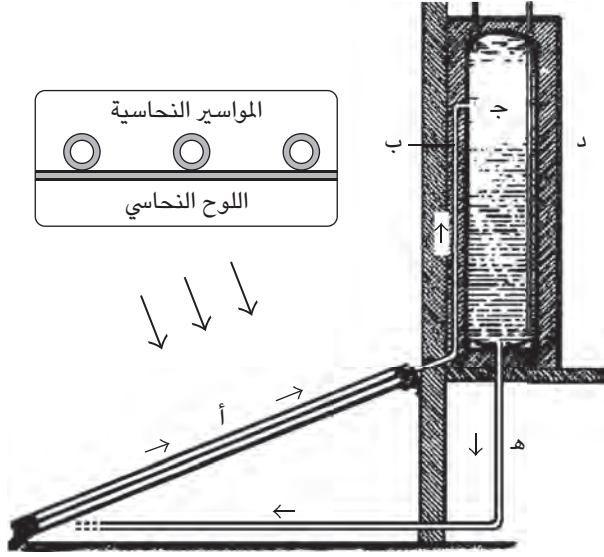
(٥-١) اقتصاد الطاقة الشمسية

يُظهر التاريخ السابق لسخانات الماء الشمسية في الولايات المتحدة الأمريكية بوضوح التأثير المتبادل للفيزياء والهندسة والاقتصاد [17]. في القرن التاسع عشر، قبل اختراع نظم تسخين الماء الحديثة، كان تسخين الماء من أجل الاستحمام مكلفًا وصعبًا؛ فكان ينبغي تسخين الماء في إناء كبير على النار ثم سكه في حوض الاستحمام. كان ذلك مكلفًا بوجه خاص في كاليفورنيا؛ حيث كان ينبغي استيراد وقود مثل الفحم، وكان الخشب ثمينًا. كانت الكهرباء والغاز الصناعي مكلفين جدًا، لكن ضوء الشمس موجود بوفرة هناك، كما أن الطقس معتدل.

في عام 1891، حصل كلارنس كيمب على براءة اختراع لابتكاره سخان ماء شمسي اتسم بالكفاءة والعملية وكان اسمه «كلايمكس» (براءة اختراع أمريكية رقم: 451384). عندما سُوِّقه كيمب في البداية في ميريلاند، لم يكن ناجحًا جدًا؛ لذا باع حقه الحصري لرجلي أعمال من مدينة باسادينا بكاليفورنيا، وبحلول عام 1900، بيعت 600 وحدة منه في جنوب كاليفورنيا وحدها. وكانت النتيجة أن السخان حقق نجاحًا تجاريًا كبيرًا في كاليفورنيا، لكن هذا السخان كان به عيب يتمثل في أنه يحتاج لبضع ساعات من ضوء الشمس لتسخين الماء، وكانت درجة حرارة الماء بعد الغروب تنخفض بشدة؛ لذا كان يمكن استخدامه فقط في عصر الأيام المشمسة.

في عام 1910، اخترع وليم جيه بيلي سخان ماء شمسي باسم «داي آند نايت» وحصل على براءة اختراعه (براءة اختراع أمريكية رقم: 966070)، والذي حل المشكلات الكبرى في السخان السابق وأصبح الأساس لسخانات الماء الشمسية اللاحقة؛ انظر الشكل ١-٢٧؛ أولاً: المجمع الحراري أ مصنوع من شبكة متوازية من المواسير النحاسية الملحومة مع قطعة مسطحة من لوح نحاسي. ثانيًا: يُستخدم خزان ماء ج موجود أعلاه، ومغزول بشدة بمادة الفلين، د. إن هذا التنظيم يسمح بدوران الماء من خلال «الحمل الحراري الطبيعي» و«تخزين الطاقة» الفعال. عندما يُسخَّن الماء من خلال ضوء الشمس، يقل وزنه النوعي، ويتدفق تلقائيًا لأعلى عبر الماسورة ب ليصل إلى خزان الماء ج، ثم يتدفق الماء الأكثر برودة تلقائيًا لأسفل عبر الماسورة هـ، ليعود مرة أخرى للمجمع الحراري. وإذا كان العزل كافيًا، فيمكن أن يبقى الماء ساخنًا طوال الليل. وهكذا، فإن هذا النظام يعمل نهارًا وليلاً. وعلى الرغم من أن هذا النظام كان ثمنه حينها نحو 180 دولارًا، وهو مبلغ أعلى بكثير من ذلك الخاص بنظام «كلايمكس»، فسرعان ما جذب إليه المستهلكون وبلغت جملة مبيعاته

بنهاية الحرب العالمية الأولى أكثر من أربعة آلاف قطعة. واضطر نظام «كلايمكس» للخروج من السوق.



شكل ١-٢٧: سخان الماء الشمسي «داي أند نايت». يبين الشكل المواسير النحاسية واللوحة النحاسية الخاصة بالمجمع الحراري الشمسي. يعمل النظام من خلال الحمل الحراري الطبيعي: يرتفع الماء المُسخّن من خلال ضوء الشمس في المجمع أ للخزان المعزول ج. ثم يتدفق الماء البارد لأسفل من الخزان ج عبر الماسورة هـ. لتعود إلى المجمع أ. المصدر: براءة الاختراع الأمريكية رقم: 966070، لعام 1911.

في أوائل عشرينيات القرن العشرين، اكتُشف الغاز الطبيعي بكميات وفيرة في حوض لوس أنجلوس. وكان سعر الغاز الطبيعي في عام 1927 يبلغ فقط ربع ذلك الخاص بالمدن في عام 1900. وقد حل سخان الماء الذي يعمل بالغاز، والذي يُعد أرخص كثيرًا فيما يتعلّق بالاستثمار الأولي من السخان الشمسي وأكثر كفاءة في الاستخدام، بالتدريج محل سخانات الماء الشمسية التي كانت مشهورة قبل ذلك. سرعان ما تأقلمت شركة بيلي، التي كان لديها خبرة كبيرة في مجال نظم السخانات الشمسية، مع مجال سخانات الغاز. ومع احتفاظها

باسمها «داي آند نايت»، سرعان ما أصبحت واحدة من أكبر الشركات المنتجة لسخانات الماء التي تعمل بالغاز في أمريكا.

إن انهيار مجال سخانات الماء الشمسية في كاليفورنيا لم يكن معناه انتهاءه تمامًا؛ فقد أصبحت فلوريدا، مع ازدهار مجال العقارات بها في عشرينيات القرن العشرين وحتى أربعينياته وعدم امتلاكها لغاز طبيعي، مركز سخانات الماء الشمسية؛ انظر الشكل ١-٢٨. وتشير التقديرات إلى أنه رُكب من 25 إلى 60 ألف سخان ماء شمسي في ميامي فيما بين عامي 1920 و1941. في أثناء الحرب العالمية الثانية، حدث ارتفاع كبير في أسعار النحاس. وبعد الحرب، حدث انخفاض في سعر الكهرباء. وكانت النتيجة أن حلت سخانات الماء الكهربائية محل سخانات الماء الشمسية، وهكذا فقدت مجدها في الولايات المتحدة الأمريكية.



شكل ١-٢٨: سخان ماء شمسي «داي آند نايت» في فلوريدا. من عام 1920 وحتى عام 1941، صُنِعَ وَرُكِبَ أَكْثَرُ مِنْ 25 أَلْفَ سَخَانِ مَاءِ شَمْسِيٍّ فِي فِلُورِيدَا. وَبَعْدَ 80 عَامًا، مَا زَالَ الْأَلْفُ مِنْهَا يَعْمَلُ. تُظْهِرُ الصُّورَةُ الْفُوتُوغَرَفِيَّةُ، الَّتِي أَخَذَهَا الْمُؤَلِّفُ فِي مِيَامِي فِي أَغْسُطُسِ عَامِ 2010، سَخَانِ مَاءِ شَمْسِيًّا مُرَكَّبًا فِي عَامِ 1937. وَخَزَانِ الْمَاءِ الْمَعْزُولِ مَخْفِيٍّ عَلَى هَيْئَةِ مَدْخَنَةٍ. وَحَتَّى مَعَ وَجُودِ كَسْرِ بِإِحْدَى وَحَدَاتِ السَّخَانِ، فَهُوَ لَا يَزَالُ يَعْمَلُ عَلَى نَحْوِ جَيِّدٍ.

لكن بعد الحرب العالمية الثانية، وفي أنحاء أخرى من العالم، بدأت سخانات الماء الشمسية تنتشر، وبخاصة في إسرائيل. ففي منطقة صحراوية لا توجد بها مصادر طاقة وتشبه كاليفورنيا في أواخر القرن التاسع عشر، يمكن لتلك السخانات أن تكون ذات نفع اقتصادي كبير. وقد تحقق تطور كبير في التقنية الحرارية الشمسية، يتمثل في طلاء الامتصاص الانتقائي، في إسرائيل في خمسينيات القرن العشرين، وقد زاد بشدة من كفاءة تلك السخانات. ولاحقًا، أصبحت إسرائيل أول دولة تتطلب أن تشتمل كل المباني الجديدة المقامة بها على سخانات من هذا النوع.

(٢-٥) المعادل الأخلاقي للحرب

للسياسات الحكومية الخاصة بالطاقة تأثير كبير على تطوير الطاقة المتجددة؛ ففي الولايات المتحدة الأمريكية، أدت سياسات الطاقة الجديدة في عهد إدارة كارتر في سبعينيات القرن الماضي إلى عصر ذهبي من البحث والتطوير في مجال الطاقة المتجددة.

بعد الحرب العالمية الثانية، كان لدى أمريكا نفط خام رخيص، ظل سعره أقل من 20 دولارًا للبرميل (بسعر الدولار في يناير عام 2008) لثلاثة عقود. وفي عام 1973، تسبب حظر لتصدير النفط في نشوب أزمة الطاقة الأولى. وقفز سعر النفط الخام إلى مستويات عالية؛ انظر الشكل ١-٢٩.

بالمصادفة، تطابق توقيت أزمة الطاقة مع تنبؤ إم كينج هوبرت الذي أطلقه في عام 1956 بأنه بعد عام 1970 بفترة قصيرة سيكون إنتاج النفط الخام في أمريكا قد وصل إلى ذروته ثم يبدأ في الانخفاض؛ ارجع إلى الفصل الأول - قسم (٢)، لكن هذه المصادفة ليست عرضية. فمع بدء إنتاج النفط الخام في أمريكا في الانخفاض، كان لا يزال استهلاكه في ازدياد. ففي عام 1971، دفعت أمريكا 3.7 مليار دولار لاستيراد نفط خام، وفي عام 1977، زاد هذا المبلغ عشرة أضعاف ليصل إلى 37 مليار دولار (بسعر الدولار في عام 1977). ومن المعروف أن الاعتماد الزائد على النفط الأجنبي يفرض تهديدات اقتصادية وأمنية خطيرة.

في 18 أبريل من عام 1977، ألقى الرئيس الأمريكي حينها جيمي كارتر خطابًا متلفرًا عن سياسته الجديدة الخاصة بالطاقة، وقد أطلق على الصراع من أجل الحصول

على استقلالية أكبر في مجال الطاقة «المعادل الأخلاقي للحرب»، وهو أمر بحسب ما قال «سيختر شخصية الشعب الأمريكي». ثم قال:

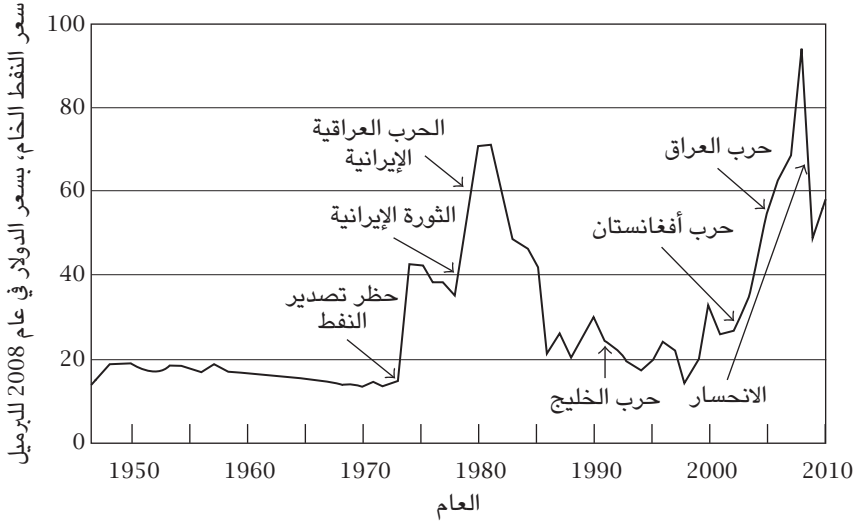
أريد الليلة أن أتحدث إليكم حديثاً غير سارٍّ عن مشكلة غير مسبوقة في تاريخنا. وباستثناء منع الحرب، هذه هي أكبر تحدٍّ ستواجهه بلادنا في خلال فترة حياتنا. إن مشكلة الطاقة لم تصرعنا بعد، ولكنها ستفعل إذا لم نتحرك بسرعة. إنها مشكلة لن نحلها في الأعوام القليلة القادمة، ومن المحتمل أن تزداد سوءاً تدريجياً عبر ما تبقى من هذا القرن. يجب ألا نكون أنانيين أو جبناً إذا أردنا أن نوَفِّر عالماً كريماً لأبنائنا وأحفادنا.

يجب ببساطة أن نُوجِد توازناً بين طلبنا للطاقة ومصادرنا التي تتقلَّص على نحوٍ سريع. وبالتحرُّك الآن، يمكننا التحكُّم في مستقبلنا بدلاً من أن نجعله يتحكَّم هو فينا.

تتضمَّن النقاط الرئيسية لسياسة كارتر الخاصة بالطاقة؛ ترشيح استهلاك الطاقة وزيادة استكشاف الطاقة التقليدية المحلية وتطوير مصادر طاقة متجددة. بحسب ما قال الرئيس كارتر: «يجب أن نبدأ الآن في تطوير مصادر الطاقة الجديدة غير التقليدية التي سنعتمد عليها في القرن القادم.» بعد الخطاب ببضعة أيام، وقَّع على قانون تنظيم وزارة الطاقة، وفي الرابع من أغسطس من عام 1979، أنشأ وزارة الطاقة الأمريكية. ثم مُرر قانون الطاقة الوطنية في عام 1978 الذي توجد به حوافز ضريبية لمشروعات الطاقة المتجددة، وبخاصة الطاقة الشمسية. وقد أعطى هذا التشريع دفعة قوية للبحث والتطوير في مجال سخانات الماء الشمسية والخلايا الشمسية والمباني التي تعتمد على الشمس كمصدر للطاقة، وقد زاد معدل تركيب هذه الأجهزة على نحو كبير. لكي يحفز كارتر شعبه بتقديم قدوة لهم، ركب في العشرين من يونيو من عام 1979 سخان ماء شمسياً مكوناً من 32 لوحاً على سقف البيت الأبيض؛ انظر الشكل ١-٣٠. وفي الاحتفال، عبر عن رؤيته المثالية قائلاً:

بعد جيل من الآن، سخان الماء الشمسي هذا يمكن أن يكون مصدراً للفضول أو قطعة أثرية أو مثلاً على طريق لم نتخذه أو جزءاً صغيراً من واحدة من أعظم المغامرات التي خاضها الشعب الأمريكي وأكثرها إثارة ... للاستفادة من طاقة

تمهيد



شكل ١-٢٩: تاريخ سعر النفط الخام، بسعر الدولار في عام 2008 للبرميل. المصدر: إدارة معلومات الطاقة الأمريكية.

الشمس في إثراء حياتنا ونحن نسعى للابتعاد عن اعتمادنا المدمر على النفط الأجنبي.

في عام 1978، سنّت إدارة كارتر قانون الطاقة الوطنية الأول لزيادة كفاءة استهلاك الوقود وإنتاج الطاقة المتجددة، وزاد تمويل البحث والتطوير المتعلقان بالطاقة المتجددة على نحو كبير. وقد أعطى قانون ضريبة الطاقة، الذي يُعد جزءاً من القانون السابق، خصماً فيما يتعلّق بضريبة الدخل على أصحاب المساكن الخاصة الذين يستخدمون مصادر طاقة الرياح أو الطاقة الشمسية أو الحرارية الأرضية، لكن انتهت مدة هذا القانون في عام 1986. لكن العديد من الدول الأخرى حذت حذو الولايات المتحدة الأمريكية وقدمت دعماً مالياً حكومياً لاستخدام الطاقة المتجددة.

كما توقع جيمي كارتر، تجمّعت عوامل عديدة في السنوات المتبقية من القرن العشرين لجعل مشكلة الطاقة «أكثر سوءاً تدريجياً»: فنظرًا لوجود انخفاض منتظم في إنتاج النفط



شكل ١-٣٠: جيمي كارتر يركب سخان ماء شمسيًا أعلى البيت الأبيض في 20 يونيو من عام 1979. لقد كان يأمل أن يكون هذا «جزءًا صغيرًا من واحدة من أعظم المغامرات التي خاضها الشعب الأمريكي وأكثرها إثارة ... للاستفادة من طاقة الشمس في إثراء حياتنا ونحن نسعى للابتعاد عن اعتمادنا المدمر على النفط الأجنبي». الصورة معروضة بإذن من مكتبة جيمي كارتر، أتلانتا، جورجيا.

الخام واستهلاك متزايد له، فقد زاد استيراد أمريكا له من 1.8 مليار برميل في عام 1980 إلى 5 مليارات برميل في العقد الأول من القرن الحادي والعشرين. وزاد سعر النفط الخام (بسعر الدولار في عام 2008) من نحو 20 دولارًا إلى أكثر من 100 دولار للبرميل في أواخر العقد الأول من القرن الحادي والعشرين؛ ارجع إلى الشكل ١-٢٩. وقد عاودت أزمة سبعينيات القرن العشرين النفطية الظهور، ولكن في سياق مخيف أكثر: فطبقًا لهوبرت، في أوائل العقد الأول من القرن الحادي والعشرين، سيصل إنتاج العالم للنفط الخام إلى مستويات عالية جدًا، ثم سيبدأ في الانخفاض؛ ارجع إلى الفصل الأول - قسم (٢). وتشهد حاليًا أكبر دولتين في العالم من حيث تعداد السكان، الهند والصين، نموًا اقتصاديًا سريعًا، وتستهلكان نسبة متزايدة من الإنتاج المتراجع للنفط الخام العالمي، ولدى كلٍّ من هاتين الدولتين قدرٌ محدود جدًا من النفط الخام؛ ومن ثمّ تعانيان من أزمة طاقة أشد قسوة.

(٣-٥) سخانات الماء الشمسية حول العالم

كما أوضحنا، اخترع سخان الماء الشمسي في الولايات المتحدة الأمريكية، وكان منتشرًا جدًا هناك في النصف الأول من القرن العشرين. مع ذلك، ورغم أزمة الطاقة وتحفيز الحكومة القوي في سبعينيات القرن العشرين، لا يزال حجم تركيب هذه السخانات هناك قليلًا جدًا، لكن في العقود الأخيرة حدث نمو كبير في تلك السخانات على مستوى العالم، وبخاصة في الصين. وكما هو موضح في الشكل ١-٣١، في عام 2007، ركب الصين 80 بالمائة من سخانات الماء الشمسية الجديدة بسعة 16GW؛ إن سعة التركيب الإجمالية لهذا النوع من السخانات هناك 84GW، مما يمثل ثلثي إجمالي السعة العالمية.

(أ) سوق بكر هائلة

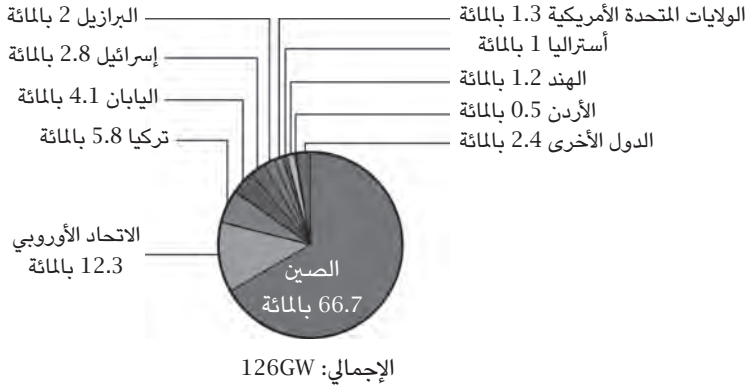
تشبه سوق سخانات الماء الشمسية في الصين إلى حد بعيد تلك الخاصة بكاليفورنيا في أواخر القرن التاسع عشر. حتى ثمانينيات القرن العشرين، لم يكن لدى نحو مليار شخص في الصين ماء ساخن جارٍ، وقد جعل تحسن مستوى المعيشة هناك الماء الساخن ضرورة حياتية، لكن الغاز الطبيعي وزيت التسخين أو المازوت غاليا الثمن وغير متاحين بوجه عام، كما أن الكهرباء غالية الثمن، هذا بالإضافة إلى أن تكلفة الوحدة التي تُسخّن الماء باستخدام الوقود الحفري مقارنةً لتلك التي تستخدم ضوء الشمس؛ لذا تُعدّ الصين تربةً مثاليةً يمكن أن تنمو فيها صناعة سخانات الماء الشمسية.

(ب) التطور التقني ووفورات الحجم

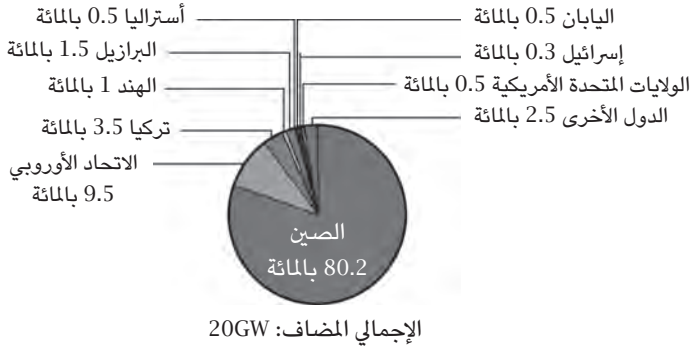
حتى وقت قريب، كانت غالبية سخانات الماء الشمسية في العالم الغربي تستخدم المُجمّعات الحرارية ذات الألواح المسطحة على نحو مشابه لنظام «داي أند نايت» (ارجع إلى الشكل ١-٢٨) وألواح البيت الأبيض الشمسية (ارجع إلى الشكل ١-٣٠)، لكن هذا التركيب غير مناسب إلى حد بعيد لعملية الإنتاج على نطاق واسع. فهو يستخدم قدرًا كبيرًا من النحاس، وهذا عامل رئيسي لتراجعته أثناء الحرب العالمية الثانية وبعدها، كما أن فقدان الحرارة نتيجة للتوصيل الحراري عبر النافذة الزجاجية واللوح الخلفي هائل، ووجود العديد من الأجزاء المعدنية المكشوفة يقلل من عمره. أما المجمع الحراري ذو الأنبوب الفارغ، الذي اخترعه المهندس الأمريكي وليم إل آر إيميت في عام 1911 (براءة اختراع أمريكية

فيزياء الطاقة الشمسية

الحصة الحالية لسعة الماء الساخن الشمسي/التسخين الشمسي،
الدول العشرة الأوائل، عام 2007

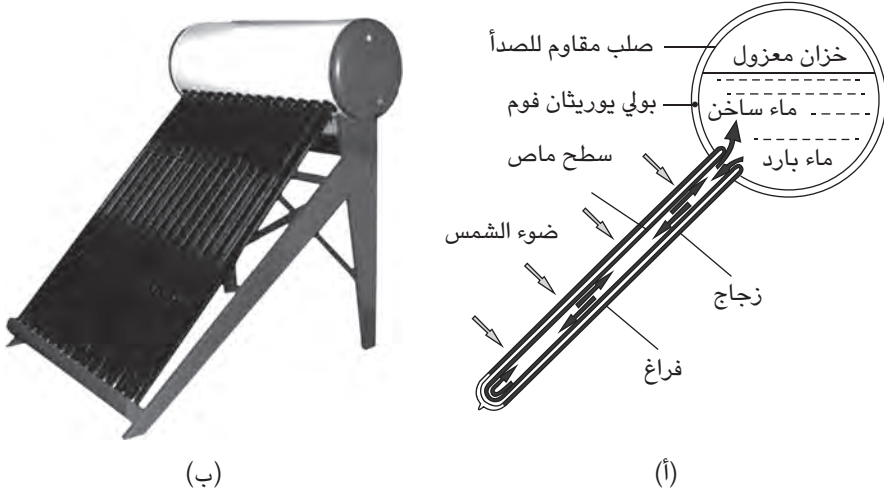


الحصة المضافة لسعة الماء الساخن الشمسي/التسخين الشمسي،
الدول العشرة الأوائل، عام 2007



شكل ١-٣١: معدلات التركيب العالمي لسخانات الماء الشمسية. على مستوى العالم، يزيد معدل تركيب سخانات الماء الشمسية على نحو سريع، وأغلب النمو يحدث في الصين. المصدر: «تقرير الوضع العالمي لمصادر الطاقة المتجددة»، تحديث 2009 (<http://www.ren21.net>).

رقم: 980505)، فله خواص رائعة، لكنه، لعقود عديدة، كان غالي الثمن ومعقدًا في إنتاجه. وفي أوائل ثمانينيات القرن العشرين، حدث تحسين كبير فيه. وابتكر في النهاية سخان ماء شمسي بسيط وكفء للغاية ووصل لأقصى مراحل التطور؛ انظر الشكل ١-٣٢.



شكل ١-٣٢: سخان ماء شمسي ذو أنبوب مفرغ. (أ) مخطط لسخان ماء شمسي ذي أنبوب مفرغ. كل مجمع حراري به أنبوب زجاجي مزدوج الجدار. ويعمل النظام تلقائيًا بمقتضى مبدأ الحمل الحراري الطبيعي. (ب) صورة فوتوغرافية للنظام.

يعرض الشكل ١-٣٢ (a) تصميم سخان الماء الشمسي ذي الأنبوب المفرغ. يشتمل كل مجمع حراري على أنبوب زجاجي مزدوج الجدار. والمساحة فيما بين الأنبوب الخارجي والأنبوب الداخلي مفرغة إلى درجة عالية، على نحو مماثل لما يحدث في أي ثرمس. وعلى السطح الخارجي للأنبوب الداخلي، يُوضع غشاء لديه القدرة على الامتصاص الانتقائي. وبالنسبة لضوء الشمس الذي يكون في الغالب قريبًا من نطاق الضوء المرئي والأشعة تحت الحمراء، فإن معامل الامتصاص يصل إلى نحو 95 بالمائة. وبالنسبة لإشعاع الضوء تحت الأحمر البعيد الناتج عن الماء الساخن (من 80 إلى 100 درجة مئوية)، يصل معامل الانبعاث إلى نحو 5 بالمائة. وتمنع الجلبة الفراغية على نحو تام التوصيل الحراري. ويعمل

النظام بالكامل تلقائيًا بمقتضى مبدأ الحمل الحراري الطبيعي، فيتدفق الماء المُسخن من خلال ضوء الشمس الذي يقل وزنه النوعي لأعلى للخران المعزول. وبالمثل، يتدفق الماء البارد لأسفل من الخزان إلى أنابيب المجمعات الحرارية. تظهر صورة فوتوغرافية لهذا النظام في الشكل ١-٣٢ (b). بوجه عام، يُستخدم من 10 إلى 40 أنبوبًا مفرغًا في النظام الواحد. يُعزل خزان الماء بالبولي يوريثان فوم، وتقل فقط درجة حرارة الماء بضع درجات أثناء الليل؛ لذا فإن هذا النظام يمكنه توفير ماء ساخن ليلاً ونهارًا.

يسهل التصميم أيضًا من عمليتي الشحن والتخزين، فتُشحن الأنابيب والخزان وأجزاء الهيكل في ثلاثة صناديق كرتونية منفصلة مستطيلة الشكل. ثم يُجمع النظام في مكان التركيب.

ونظرًا لأن الأنابيب المفرغة مصنوعة من زجاج البوروسيليكات (البيركس)، فإن الغشاء الذي لديه القدرة على الامتصاص الانتقائي يخضع لدرجة تفرغ عالية، وعادة ما يُصنع الخزان من صلب مقاوم للصدأ ذي جودة عالية. وما لم يتعرض النظام للكسر بسبب التعامل العنيف معه، فيمكن أن يعيش لعدة عقود. بالإضافة إلى ذلك، هذه الأجزاء مناسبة للإنتاج الآلي على نطاق واسع. وحاليًا، يُصنع نحو 200 مليون أنبوب مُفرغ ونحو 10 ملايين خزان ماء معزول كل عام.

تمنح السوق الضخمة مزايا فيما يتعلق بالتكلفة من خلال وفورات الحجم. فمتوسط التكلفة التي يتكبدها المنتج عن كل وحدة ينخفض مع زيادة حجم الإنتاج. ونظرًا لجهود الأتمتة الحديثة، فإن تكلفة تصنيع الأنابيب المفرغة تقل لتصل إلى بضعة دولارات عن الأنبوب الواحد، وهو أمر لم يكن من الممكن تخيله منذ بضعة عقود مضت. ويزيد انخفاض سعر سخانات الماء الشمسية من حجم السوق، كما أن اتساع السوق يساعد أكثر في تحسين عملية التصنيع؛ ونتيجة لذلك فإن مجال سخانات الماء الشمسية في الصين مجال مستدام «من دون حوافز مالية من جانب الحكومة».

(ج) نموذج عمل شركة هيمين

من المفيد أن نعرف كيف استطاعت صناعة سخانات الماء الشمسية العملاقة أن تنمو عبر تلك الفترة الزمنية القصيرة؛ لهذا زرت مقر أكبر مُصنّع في العالم لسخانات الماء الشمسية، مجموعة هيمين للطاقة الشمسية، وقابلت مؤسسها ورئيس مجلس إدارتها،

السيد هوانج مينج في بكين، عندما حضر الجلسة العامة للمجلس الوطني لنواب الشعب الصيني. وحينها حصلت منه على عدد من المستندات الداخلية لشركته.

في عام 1978، عندما كان هوانج مينج طالباً في معهد شرق الصين للنفط، أدرك أن احتياطي النفط الخام في العالم سينفذ خلال خمسين عاماً، وأن احتياطي الصين منه سينفذ قبل ذلك. وبعد تخرُّجه بعدة أعوام، أصبح مهندساً بحثياً معروفاً في مجال حفر آبار النفط، لكن تجربته الشخصية عزَّزت من تشاؤمه فيما يتعلق بمستقبل النفط.

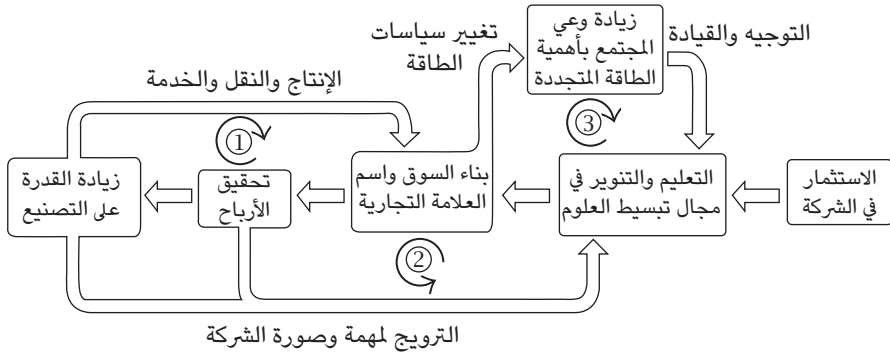
في عام 1987، وبالصدفة، عثر على كتاب دوفي وبيكمان «العمليات الحرارية للطاقة الشمسية». وبقراءته من البداية للنهاية والقيام بتجارب عملية باستخدام أموال جنانها من بيع إحدى براءات الاختراع، أصبح مقتنعا بأن ضوء الشمس هو الحل الأمثل لمشكلة الطاقة، وأصبحت الطاقة الشمسية هي شغفه في الحياة. ومنذ ذلك الحين، أصبح يقضي ثلث اليوم في معهد النفط والثلث الآخر في العمل في المنزل على مشروعات خاصة بالطاقة الشمسية والثلث الأخير في النوم والأكل. وقد أهدى سخان الماء الشمسي الذي صنعه بيده لأصدقائه وأقاربه، وركب نظاماً في مركز ترفيه للأطفال.

في عام 1995، ترك عمله في مجال النفط وأسس شركته الخاصة. واختار الاسم الصيني للشركة، هيمين، كنوع من التجانس الصوتي مع اسمه، للدلالة على إخلاصه لهذا العمل. وفي غضون عشرة أعوام، نمت شركته لتصبح واحدة من كبرى شركات تصنيع سخانات الماء الشمسية في العالم دون أي دعم حكومي. وفي عام 2009، أنتجت الشركة أكثر من مليوني متر مربع من المجمعات الحرارية الشمسية، والذي يعادل 2GW من الاستخدام الأقصى للطاقة الشمسية. وفي مايو 2006، دُعي هوانج مينج من قبل الأمم المتحدة لتقديم نموذج العمل الخاص بشركته في المؤتمر الرابع عشر للجنة الأمم للتنمية المستدامة، الذي عُرف لاحقاً باسم «نموذج عمل شركة هيمين».

يعرض الشكل ١-٣٣ مخططاً لنموذج العمل الخاص بشركة هيمين. تتمثل النقطة الأساسية هنا في إنشاء سوق جديدة عبر التعليم والتنوير في مجال تبسيط العلوم. ففي عام 1996، بعد تأسيس شركة هيمين على الفور، أنشئت الرسالة الإخبارية الأسبوعية «بوببولر سولار إنرجي»، التي أصبحت الأداة التسويقية الأساسية للشركة، مع وصول إجمالي النسخ الموزعة منها على نحو تراكمي إلى 300 مليون نسخة في عام 2010. نظمت الشركة العديد من الرحلات المعنية بتبسيط العلوم، التي سافرت مسافات قدرها 80 مليون كم عبر أنحاء الصين. ونظراً لأن سخان الماء الشمسي لا يزال يمثل للأسرة المتوسطة في الصين استثماراً

رأسماليًا كبيرًا، فيجب أن يعتمد قرار شرائه على التفكير المتروي؛ لذا كان هؤلاء الأشخاص المثقفون الذين تعلّموا على يد الشركة هم أول المشترين لمنتجاتها، ثم أصبحوا مسوّقين متطوّعين له. ويعتمد نموذج عمل هيمن على ثلاثة محاور (انظر الشكل ٣٣-١):

المحور الأول: هو دورة الإنتاج الأساسية. وتتمثّل استراتيجية الشركة في اتباع أعلى معايير التميز. يُعد سعر التجزئة الخاص بمنتجاتها هو الأعلى في السوق، لكن نظرًا للأبحاث المستفيضة التي تُجرى عليه وخضوعه لمراقبة جودة دقيقة، فإن مشاكله قليلة وعمره طويل؛ ومن ثم فالجودة العالية تضمن سمعته في السوق.



شكل ٣٣-١: نموذج عمل شركة هيمن الخاص بالطاقة الشمسية. يتكوّن هذا النموذج من ثلاثة محاور: المحور الأول مماثل لدورة العمل العادية؛ فمراقبة الجودة الدقيقة وخدمة ما بعد البيع الجيدة تبنيان اسم العلامة التجارية، كما أن الإنتاج على نطاق واسع يقلّل تكلفة الوحدات. ويتمثّل المحور الثاني في الاستثمار بقوة في التعليم في مجال تبسيط العلوم باعتباره وسيلة التسويق الرئيسية. أما عن المحور الثالث، فيكمن في الضغط من أجل تغيير سياسات الطاقة بحيث تدعم الطاقة المتجددة وزيادة وعي الناس بأهمية هذه الطاقة. المصدر: محضر المؤتمر الرابع عشر للجنة الأمم المتحدة للتنمية المستدامة، نيويورك، 2006.

المحور الثاني: يركز على أهمية التعليم والتنوير في مجال تبسيط العلوم. فبالإضافة إلى الاستثمار في الشركة، فإن قدرًا كبيرًا من الأرباح يُستثمر في مجال التعليم العلمي لضمان فهم العملاء لطريقة عمل النظام الذي تقدمه الشركة ولكيفية اختيار المنتج الجيد أو القطعة الجيدة.

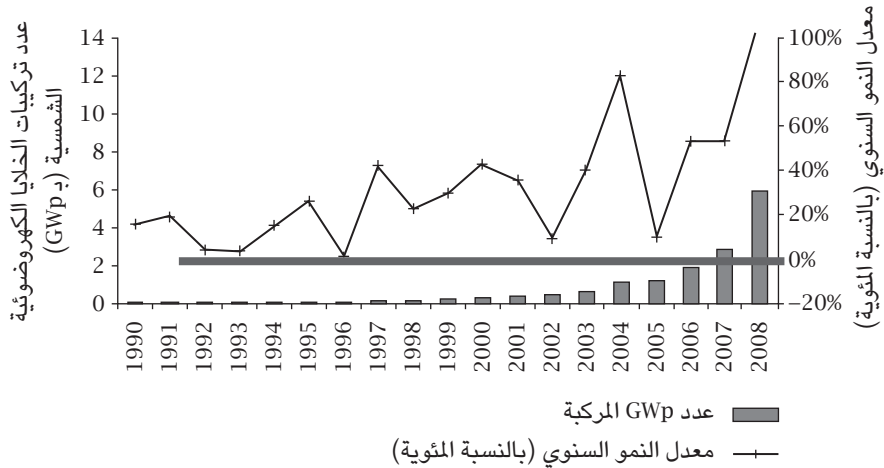
المحور الثالث: يركز على أهمية الضغط من أجل تغيير سياسات الطاقة لدعم الطاقة المتجددة وزيادة وعي الناس بأهمية هذه الطاقة. وهذا أيضاً عامل مهم في نجاحها. ففي عام 2003، انتخب سكان مدينة ديزو المحليون، وعلى وجه الخصوص موظفو شركة هيمين، هوانج مينج ليصبح عضواً في المجلس الوطني لنواب الشعب الصيني. واستطاع بعدها هوانج الحصول على دعم 60 نائباً لطرح قانون الطاقة المتجددة، الذي مرر في ربيع عام 2005. وقد شجع القانون الحكومات المركزية والمحلية على إقامة مشروعات خاصة بالطاقة المتجددة وتقديم الدعم الحكومي لتقنية الطاقة الشمسية ومنتجاتها. وفي عام 2008، اختار الاتحاد الدولي للطاقة الشمسية مدينة ديزو، وهي مقر شركة هيمين، لاستضافة مؤتمر المدينة الشمسية الدولية لعام 2010. وفي نحو ذلك الوقت، انتُخب مينج نائباً لرئيس الاتحاد الدولي للطاقة الشمسية. وقد اكتمل في عام 2009 مقر هذا المؤتمر، معبد أبوللو بديزو، وهو متحف وقاعة وفندق على مساحة تبلغ 800 ألف قدم مربعة، يحصل على 65 بالمائة من طاقته من الشمس؛ انظر ملحق الصور الشكل ١٥.

(٥-٤) الخلايا الكهروضوئية: نحو تكافؤ الشبكة

لأن سخانات الماء تستهلك أقل من 10 بالمائة من الطاقة الإجمالية، فإن معظم الطاقة المطلوبة، وبخاصة الكهرباء، يمكن توفيرها فقط من خلال الخلايا الكهروضوئية أو وسائل أخرى لتوليد الكهرباء من الشمس. وبالمقارنة بسخانات الماء الشمسية، فإن القدرة الإجمالية للخلايا الكهروضوئية الشمسية المركبة في العالم أقل بكثير. ففي عام 2008، رُكب 6.08GWp من الخلايا الكهروضوئية في العالم. ووصل التركيب التراكمي في عام 2008 إلى 15GWp. ويوضح الشكل ١-٣ التركيب ومعدل النمو السنوي للعالم ككل من عام 1990 إلى عام 2008.

كما هو واضح، يمثل التركيب فيما يتعلّق بواط الذروة من الخلايا الكهروضوئية فقط نحو عُشر ذلك الخاص بسخانات الماء الشمسية. والعامل المحدد هنا ببساطة هو العامل الاقتصادي. كما هو موضح في الفصل الأول - قسم (٤-١)، على الرغم من أن الخلايا الشمسية العملية اخترعت في عام 1954، فقد كانت تكلفة التصنيع عالية جداً، وكانت التطبيقات الرئيسية هي الفضاء والمجالات العسكرية. وفي أواخر سبعينيات القرن العشرين وأوائل ثمانينياته، ونتيجة للتحفيز الذي قدمه قانون الطاقة الوطنية، تحقق

فيزياء الطاقة الشمسية



شكل ١-٣٤: تركيب الخلايا الكهروضوئية الشمسية فيما بين عامي 1990 و2008. التخطيط العمودي: التركيب السنوي العالمي للألواح الكهروضوئية الشمسية. المنحنى الفراغي: معدل النمو السنوي. المصدر: «صناعة الخلايا الكهروضوئية الشمسية»، تقرير «التوقعات العالمية» لعام 2008، مصرف دويتشه بنك.

تطور هائل في الكفاءة والتكلفة؛ ارجع إلى الشكل ١-٢٤. واستمر الانخفاض التدريجي في تكلفة تصنيع الخلايا الشمسية في تسعينيات القرن العشرين وأوائل العقد الأول من القرن الحادي والعشرين. ففي عام 2003، انخفض سعر الخلية الشمسية لكل واط ذروة ليصل إلى 6.50 دولارات، لكن الكهرباء المولدة من الشمس ما زالت أعلى بكثير من تلك المولدة من مصادر الطاقة التقليدية، وبخاصة الفحم والطاقة المائية، التي يتراوح سعرها بين 0.05 و0.10\$/kWh. وبتضمن الحوامل والعواكس والمعدات المطلوبة، وصلت تكلفة الألواح الشمسية المركبة لكل Wp في عام 2003 إلى نحو 10 دولارات. ويوضح الجدول ١-٧ تكلفة توليد 1kWh من الطاقة الكهربائية من خلال خلايا شمسية في مناطق ذات معدلات تشميس مختلفة.

من أجل تشجيع استخدام الطاقة الشمسية، في تسعينيات القرن العشرين، سنّت الكثير من الدول الأوروبية «قانون تعريف الإمداد بالطاقة المتجددة» الذي يضمن وصول

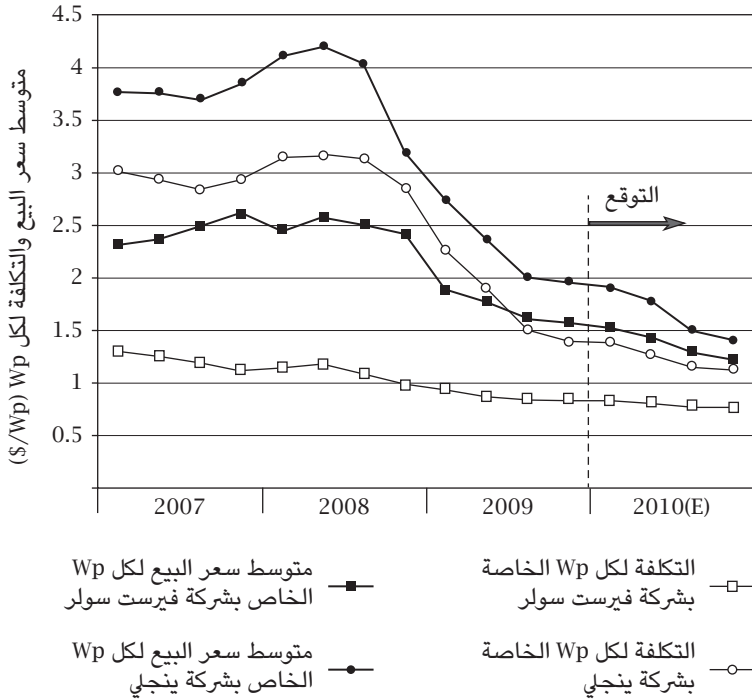
الطاقة الكهربائية المولدة من أي نظام كهروضوئي شمسي لشبكة التغذية الرئيسية بعد شرائه بسعر يعتمد على تكلفته. يمكن أن تصل مدة ضمانات الشراء هذه إلى 20 أو 25 عامًا، لكن السعر يمكن أن ينخفض طبقاً للانخفاضات المتوقعة في التكلفة. وسع القانون على نحو كبير سوق الخلايا الكهروضوئية الشمسية، لكنه تسبَّب أيضًا في تذبذبات غير متوقعة. على سبيل المثال، في عام 2007، رفعت إسبانيا سعر شراء الطاقة من النظم الكهروضوئية الكبيرة إلى 0.42€/kWp بعد أن كان 0.18€/kWp في عام 2006. على الفور، زاد التركيب من 61mWp في عام 2006 إلى 591mWp في عام 2007، ثم إلى 2700mWp في عام 2008. وفجأة وجدت الحكومة الإسبانية أن السعر لم يعد مناسبًا، فقللته إلى 0.32€/kWp بدايةً من عام 2009. وفي عام 2009، انخفض التركيب إلى أقل من 200MWp.

جدول ١-٧: التكلفة لكل kWh من الكهرباء المولدة من الشمس لمختلف الحالات.

التشميس kWh/m ² /day	دولاران	4 دولارات	6 دولارات	8 دولارات	10 دولارات
3	0.073 دولار	0.146 دولار	0.219 دولار	0.292 دولار	0.365 دولار
4	0.054 دولار	0.109 دولار	0.164 دولار	0.219 دولار	0.273 دولار
5	0.043 دولار	0.087 دولار	0.131 دولار	0.175 دولار	0.219 دولار
6	0.036 دولار	0.073 دولار	0.109 دولار	0.146 دولار	0.182 دولار

مع ذلك، فإن الزيادة الهائلة في الطلب فيما بين عامي 2007 و2008 ساعدت على حدوث انتعاش غير مسبوق في صناعة الخلايا الشمسية، خاصة في الولايات المتحدة الأمريكية وآسيا. وهنا برز ثانيةً دور وفورات الحجم، في شكل التكامل الرأسي. هناك تكامل رأسي في شركة فيرست سولر الأمريكية بمعنى أنها تُصمِّم وتُصنِّع بنفسها الوحدات المطلوبة لإنتاج الخلايا الشمسية؛ ومن ثَمَّ فإن قدرتها الإنتاجية تزيد بسرعة. هناك أيضًا تكامل رأسي كبير في شركة ينجلي سولر الصينية التي مقرها مدينة باودينج، وشركة رينيوابل إنرجي النرويجية، اللتين تُعدان من أهم مُصنِّعي الخلايا الشمسية المصنوعة من السيليكون المتعدد البلورات، لدرجة أنهما بدأتا بإنتاج السيليكون الخام من مناجم السيليكا وانتهتا بتركيب الألواح الشمسية. في عام 2009، أُنتج 49 بالمائة من الخلايا الشمسية في العالم

فيزياء الطاقة الشمسية



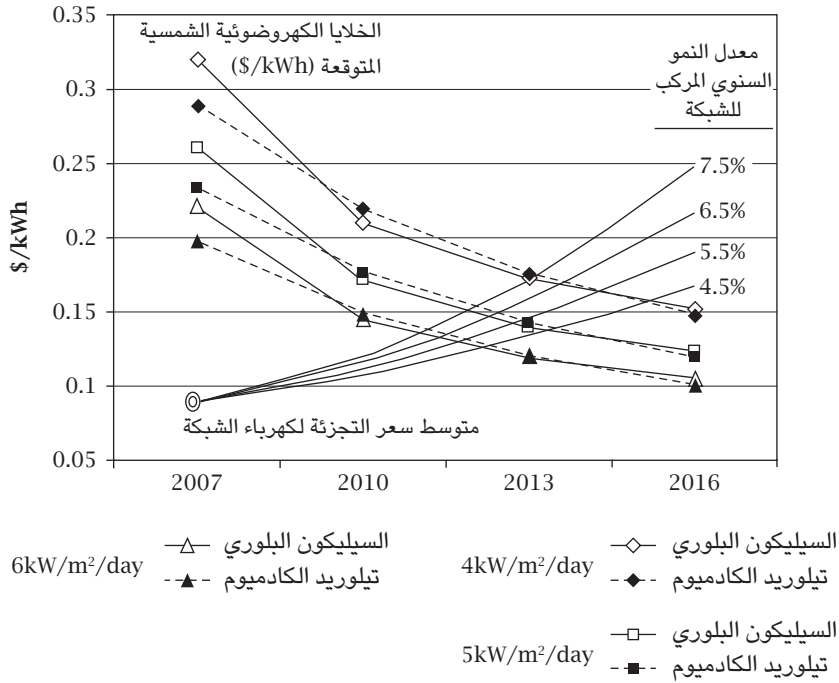
شكل ١-٣٥: سعر الخلايا الشمسية من موردين كبيرين لها فيما بين عامي 2007 و 2010. يعرض الشكل البيانات الحالية والمتوقعة الخاصة باثنين من كبار مُصنّعي الخلايا الشمسية. تُعد شركة فيرست سولر أكبر مُصنّع في العالم للخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة المصنوعة من تيلوريد الكادميوم وكبريتيد الكادميوم. وتُعد شركة ينجلي أكبر مُصنّع في العالم للخلايا الشمسية متعددة البلورات، وهي تُعد أيضًا واحدة من كبرى الشركات المنتجة للخلايا الشمسية في العالم فيما يتعلّق بالتكامل الرأسي. المصدر: «صناعة الخلايا الكهروضوئية الشمسية»، تقرير «التوقعات العالمية» لعام 2008، مصرف دويتشه بنك.

في الصين وتايوان، وكان أغلبها خلايا شمسية مُصنّعة من السيليكون المتعدد البلورات ذات كفاءة عالية. يوضح الشكل ١-٣٥ إحصائيات شركتي فيرست سولر وينجلي. كما

هو موضح، في عام 2009، انخفضت تكلفة تصنيع الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة المصنوعة من تيلوريد الكاديوم الخاصة بشركة فيرست سولر إلى $0.80\$/Wp$ ، ووصل سعر التجزئة الخاص بها إلى $1.50\$/Wp$. وبلغت تكلفة تصنيع الخلايا الشمسية المصنعة من السيليكون المتعدد البلورات الخاصة بشركة ينجلي ذات نسبة الكفاءة القريبة من 20 بالمائة $1.50\$/Wp$ ، ووصل سعر التجزئة الخاص بها إلى $2\$/Wp$. ومن المتوقع أن تقل التكلفة والسعر على نحو مستمر في الأعوام القادمة. (مؤخرًا، أعلنت شركة ينجلي أن سعر بيع الألواح الشمسية التي من السيليكون المتعدد البلورات سيقبل عن $1\$/Wp$) وفقًا لإحصائيات مصرف دويتشه بنك وتحليله، ونظرًا للتأثير المجمع للزيادة الكبيرة في القدرة على إنتاج الخلايا الشمسية والركود، في عام 2009، انخفض سعر الخلايا الشمسية في السوق الدولية على نحو كبير. وحدثت هزة عنيفة في الصناعة، فيما يتعلّق بموردي السيليكون النقي والخلايا الشمسية. وبعد فترة وجيزة من وفرة العرض، سيقُلّ سعر الخلايا الشمسية لمستوى تكون عنده تكلفة الكهرباء المولدة من الشمس قريبةً من تلك المولدة، على سبيل المثال، من محطات الكهرباء العاملة بالفحم؛ أي ستصل إلى ما يُطلق عليه «تكافؤ الشبكة»؛ انظر الشكل ١-٣٦. يعتمد إيقاع الوصول إلى تكافؤ الشبكة على الوضع المحلي؛ ومن ثمّ هو يختلف من مكان لآخر. فبالنسبة للأماكن التي تكلفة الكهرباء بها عالية مثل هاواي وكونيتيكت وكاليفورنيا ونيويورك، وبخاصة الأماكن التي بها معدل تشميس عالٍ، ستصل الخلايا الشمسية إلى تكافؤ الشبكة على نحو أسرع، أما بالنسبة للمناطق التي أسعار الكهرباء بها منخفضة، مثل ويست فيرجينيا ووسط غرب الصين، وبخاصة الأماكن ذات معدل التشميس المنخفض، فستصل على نحو أبطأ، لكن الاتجاه الذي تزيد فيه تكلفة الكهرباء المولدة من الوقود الحفري وتقل فيه تكلفة الكهرباء المولدة من الشمس حتمي. وستحل الكهرباء المولدة من الشمس تدريجيًا محل تلك المولدة من الوقود الحفري.

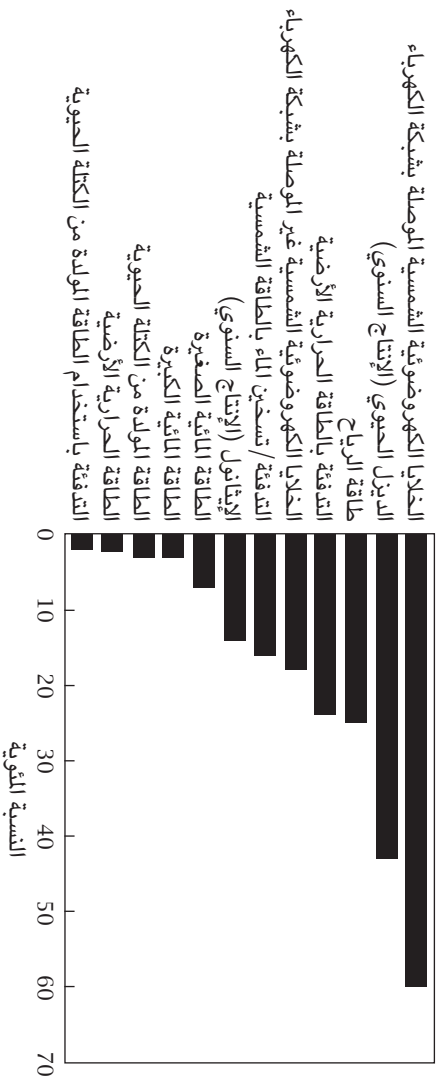
يوضح الشكل ١-٣٧ معدلات النمو السنوي المتوسط لمصادر الطاقة المتجددة فيما بين عامي 2002 و2006، كما أفادت شبكة سياسات الطاقة المتجددة للقرن الحادي والعشرين [1]. كما هو موضح، يتجاوز بنحو واضح معدل النمو المتوسط للخلايا الكهروضوئية الشمسية الموصلة بشبكة الكهرباء، الذي يصل إلى أكثر من 60 بالمائة، ذلك الخاص بمصادر الطاقة الأخرى. في عام 2006، كانت نسبة الخلايا الكهروضوئية الشمسية 0.07 بالمائة

فيزياء الطاقة الشمسية



شكل ١-٣٦: توقع الوصول إلى تكافؤ الشبكة. طبقاً لتوقع قام به مصرف دويتشه بنك، سيصل نوعا الخلايا الشمسية الأكثر وعداً، الخلايا الشمسية المصنوعة من السيليكون البلوري والخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة المصنوعة من تيلوريد الكاديوم، إلى تكافؤ الشبكة في نحو عام 2013. وبعد عام 2013، يمكن أن تقل تكلفة الكهرباء المولدة من الشمس عن تلك الخاصة بمصادر الكهرباء التقليدية وذلك في أماكن عديدة في العالم. المصدر: «صناعة الخلايا الكهروضوئية الشمسية»، تقرير «التوقعات العالمية» لعام 2008، مصرف دويتشه بنك.

وهي نسبة ضئيلة جداً، لكن إذا استطاع معدل النمو الخاص بالخلايا الكهروضوئية في المستقبل الحفاظ على نسبة الأربعين بالمائة، ففي غضون 20 عاماً، أو بحلول عام 2030، ستوفر تلك الخلايا أكثر من 50 بالمائة من الطاقة المطلوبة.



شكل ١-٣٧: معدلات النمو السنوي المتوسط لمصادر الطاقة المتجددة فيما بين عامي 2002 و2006. يتجاوز بكثير معدل النمو السنوي للخلايا الكهروضوئية الشمسية الموصلة بشبكة الكهرباء ذلك الخاص بمصادر الطاقة المتجددة الأخرى، وحتى ذلك الخاص بمصادر الطاقة التقليدية. لكن في المستقبل إذا استطاع معدل نمو تلك الخلايا الحفاظ على نسبة الأربعين بالمائة، ففي غضون 20 عامًا، أو بحلول عام 2030، ستوفر 50 بالمائة من الطاقة المطلوبة، وتصبح مصدر الطاقة الرئيسي. المصدر: «تقرير الوضع العالمي لمصادر الطاقة المتجددة لعام 2007»، شبكة سياسات الطاقة المتجددة للقرن الحادي والعشرين [1].

مسائل

(1-1) في الولايات المتحدة، الوحدة الحرارية البريطانية (Btu) تعريفها: الطاقة المطلوبة لرفع درجة حرارة رطل واحد من الماء درجة واحدة فهرنهايت. أثبت لأقرب تقدير أن الوحدة الحرارية البريطانية الواحدة تساوي 1kJ.

(1-2) بالتقريب (لأقل أو أكثر من 5 بالمائة)، ما مقدار الطاقة الموجودة في مليار برميل من النفط GJ وMWh؟

(1-3) تبلغ مساحة ولاية نيو مكسيكو 121666mi^2 ، ويبلغ متوسط معدل التشميس السنوي (أي عدد الساعات التي يوجد بها ضوء شمس كامل على سطح أفقي) 2200h. إذا كان نصف مساحة الولاية مغطى بألواح شمسية بكفاءة 10 بالمائة، فما مقدار الكهرباء التي يمكن توليدها سنوياً؟ وما النسبة التي يمكن سدها من احتياجات الطاقة الأمريكية؟ (علمًا بأن استهلاك الطاقة الإجمالي الأمريكي وصل في عام 2007 إلى 100EJ).

(1-4) تبلغ مساحة منطقة التبت 1230000km^2 ، ويبلغ متوسط معدل التشميس السنوي (أي عدد الساعات التي يوجد بها ضوء شمس كامل على سطح أفقي) 3000h. إذا كان نصف مساحة المنطقة مغطى بألواح شمسية بكفاءة 10 بالمائة، فما مقدار الكهرباء التي يمكن توليدها سنوياً؟ وما النسبة التي يمكن سدها من احتياجات الطاقة العالمية؟ (علمًا بأن استهلاك الطاقة الإجمالي العالمي وصل في عام 2007 إلى 500EJ).

(1-5) فرن شمسي له مرآة تركيز مساحتها 1m^2 وبها آلية للتتبع الشمسي. إذا كانت الكفاءة 75 بالمائة، ففي يوم مشمس، كم من الوقت سيستغرق الفرن لإذابة 1kg من ثلج درجة حرارته صفر درجة مئوية في نفس درجة الحرارة؟ وكم من الوقت سيستغرق لتسخينه لنقطة الغليان؟ وكم من الوقت سيستغرق لتبخيره عند درجة حرارة 100 درجة مئوية؟

(1-6) بالنسبة لسرعات الرياح 20 و30 و40 ... وحتى 100mph، احسب كثافة قدرة الرياح (W/m^2).

(1-7) تبلغ المسافة من خط الاستواء إلى القطب الشمالي بطول سطح الأرض $1.00 \times 10^7 \text{m}$. فإذا كان متوسط كثافة قدرة الإشعاع الشمسي على الأرض 1 sun، فما مقدار

تمهيد

الطاقة الساقطة على الأرض سنوياً؟ وإذا كان استهلاك الطاقة السنوي العالمي في عام 2040 هو 800EJ، فما نسبة الطاقة الشمسية المطلوبة لتزويد العالم باحتياجاته من الطاقة في ذلك العام؟ (تلميح: اليوم الواحد يساوي $86400s = 24 \times 60 \times 60$).

(1-8) باستخدام مجال كهروضوئي شمسي مساحته $(2.59km^2)$ $1mi^2$ بكفاءة 15 بالمائة، كم عدد kWh سيولدها هذا المجال سنوياً في أماكن متوسط معدل التشميس اليومي فيها (على أرض مسطحة) 3h (الأسكا) و 4h (نيويورك) و 5h (جورجيا) و 6h (أريزونا)؟ يستهلك المنزل العادي 1000kWh. فكم عدد المنازل التي يمكن أن يدعمها هذا المجال في الولايات الأربعة، على الترتيب؟

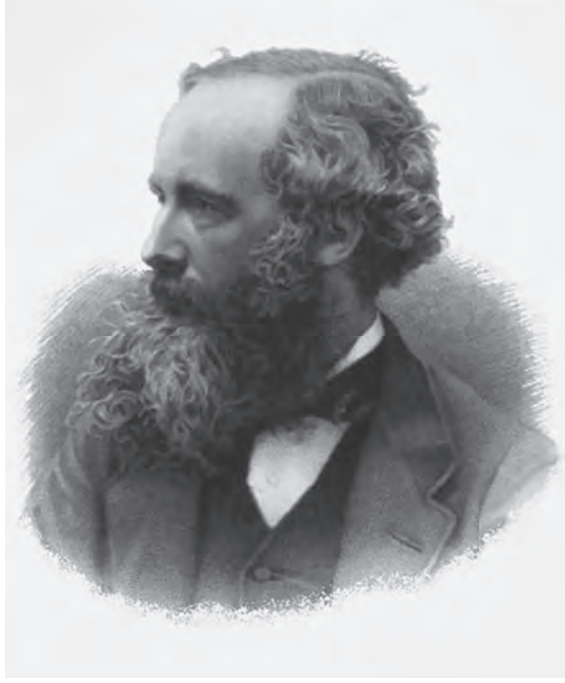
الفصل الثاني

طبيعة الإشعاع الشمسي

تأتي الطاقة الشمسية إلى الأرض في شكل إشعاع، أو ضوء شمسي يتألف طيفه من الضوء المرئي والأشعة تحت الحمراء القريبة والأشعة فوق البنفسجية القريبة. ولدراسة خواص ضوء الشمس، نحتاج إلى تأمله وفهمه من منظورين: باعتباره موجة كهرومغناطيسية وباعتباره تدفقًا من الفوتونات. المنظور الأول مهم بالنسبة لكل التطبيقات الحرارية الشمسية والطلاءات المضادة للانعكاس الخاصة بالخلايا الشمسية. والمنظور الثاني مهم فيما يتعلق بالخلايا الشمسية والكيمياء الضوئية الشمسية. يُجمع بين المنظورين في الديناميكا الكهربائية الكمية، وهو واحد من أكثر المجالات خصوبة ونضجًا في الفيزياء الحديثة. وهنا، وبغرض التبسيط، سنقدم معالجة مبدئية لكلٍّ من هذين المنظورين على حدة.

(١) الضوء باعتباره موجات كهرومغناطيسية

حتى منتصف القرن التاسع عشر، كان الضوء والظواهر الكهرومغناطيسية يُعدان كيانين مستقلّين تمامًا. وفي عام 1865، وفي ورقة بحثية بارزة بعنوان «نظرية ديناميكية للمجال الكهرومغناطيسي»، افترض جيمس كلارك ماكسويل (انظر الشكل ٢-١) أن الضوء موجة كهرومغناطيسية [58]. وفي تلك الورقة البحثية، طور مجموعة كاملة من المعادلات التي تفسّر الظواهر الكهرومغناطيسية، والمعروفة الآن بـ «معادلات ماكسويل». واعتمادًا على تلك المعادلات، تنبأ بوجود الموجات الكهروضوئية التي تنتشر في الفضاء الحر بسرعة مساوية تمامًا لسرعة الضوء، التي كان قد تثبت منها تجريبيًا حينها هاينريش هيرتز. وقد أصبح افتراض ماكسويل الجريء بأن الضوء موجة كهرومغناطيسية منذ ذلك الحين واحدًا من أسس الفيزياء.



شكل ١-٢: جيمس كلارك ماكسويل. هو فيزيائي اسكتلندي (1831-1879) ويُعد واحدًا من أكثر الفيزيائيين تأثيرًا إلى جانب إسحاق نيوتن وألبرت أينشتاين. وقد طوّر مجموعة من المعادلات تصف الظواهر الكهرومغناطيسية، التي يُطلق عليها «معادلات ماكسويل». وفي عام 1865، اعتمدًا على تلك المعادلات، تنبأ بوجود موجات كهرومغناطيسية وافترض أن الضوء إحداها [58]. ووضع أيضًا النظرية الحركية للغازات وابتكر شخصية في مجال الخيال العلمي تسمى «شيطان ماكسويل». البورتريه معروض بإذن من متحف سميثسونيان.

(١-١) معادلات ماكسويل

في الفراغ، أو الفضاء الحر، تكون معادلات ماكسويل كما يلي:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}, \quad (2-1)$$

طبيعة الإشعاع الشمسي

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (2-2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (2-3)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mu_0 \mathbf{J}. \quad (2-4)$$

لا يمكن أن يوجد التيار الكهربائي في الفضاء الحر. وبالنسبة للمواد الخطية والمنتظمة والموحدة الخواص، تتحدد كثافة التيار $\mathbf{J}$ من خلال شدة المجال الكهربائي $\mathbf{E}$ عن طريق قانون أوم:

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}. \quad (2-5)$$

الأسماء والمعاني والوحدات الخاصة بالكميات الفيزيائية الموجودة في تلك المعادلات معروضة في الجدول ١-٢. على سبيل المثال، الثابت الكهربائي له معنى بديهي كما يلي. إن المكثف المكوّن من لوحين موصلين متوازيين بمساحة A ومسافة d له تكثيف $C = \epsilon_0 A/d$ بوحدة الفاراد. بالمثل، الثابت الكهربائي له معنى بديهي كما يلي. إن الحثّ المصنوع من ملف لولبي طویل بعدد معين من اللفات N بمساحة مقطع عرضي A وطول l له محاثّة $L = \mu_0 N^2 A/l$ بوحدة هنري.

جدول ١-٢: الكميات في معادلات ماكسويل.

الرمز	الاسم	الوحدة	المعنى أو القيمة
E	شدة المجال الكهربائي	V/m	
B	شدة المجال المغناطيسي	T (تسلا)	N/A · m
ρ	كثافة الشحنة الكهربائية	C/m ³	
J	كثافة التيار الكهربائي	A/m ²	
ϵ_0	الثابت الكهربائي (سماحية الفضاء الحر)	F/m	8.85×10^{-12}
μ_0	الثابت المغناطيسي (نفاذية الفضاء الحر)	H/m	$4\pi \times 10^{-7}$
σ	التوصيل	(Ω · m) ⁻¹	

(٢-١) الجهد المتجهي

للتعرف على المجال الكهرومغناطيسي في الفراغ، هناك طريقة مناسبة تتمثل في استخدام «الجهد المتجهي». من المعادلة 2-2، من الممكن إنشاء مجال متجهي A يحقق ما يلي:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}. \quad (2-6)$$

ومن ثم، نتحقق تلقائياً معادلة 2-2. وبتعويض المعادلة 2-6 في المعادلة 2-3، نحصل على ما يلي:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \nabla \times \mathbf{B}. \quad (2-7)$$

لأي دالة $\phi(r)$ و $\nabla \times [\nabla \phi(r)] = 0$ ، من الممكن إنشاء الجهد المتجهي A كما يلي:

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla \phi, \quad (2-8)$$

بحيث يكون ϕ هو الجهد الكهروستاتيكي الناتج عن الشُّحُنات. واختيار الجهد المتجهي ليس فريداً. وبإضافة تدرُّج دالة اختيارية له، لا تتغيَّر قيمتا المجال الكهربائي والمجال المغناطيسي. ويُطلق على هذا «ثبات قياس» الجهد المتجهي. ومن الممكن تعريف جهد متجهي يحقق الشرط التالي:

$$\nabla \cdot \mathbf{A} = 0. \quad (2-9)$$

تُسمى معادلة 2-9 «مقياس كولوم»، وهو أكثر مقياس مناسب للتعامل مع المسائل غير النسبية لأي نظام ذري أو موجة كهرومغناطيسية مستقلة. في واقع الأمر، باستخدام المعادلة 2-9 والمعادلة ماكسويل الأولى، معادلة 2-1، نحصل على ما يلي:

$$\nabla^2 \phi = -\frac{\rho}{\epsilon_0}, \quad (2-10)$$

يعني هذا أن الجهد العددي يُؤلّد من الشُّحُنات الاستاتيكية فقط؛ ومن ثَم من الملائم استخدامه عند التعامل مع مسائل التفاعلات بين المجال الإشعاعي والنظم الذرية. لمزيد من التفاصيل عن مشكلة القياس، انظر، على سبيل المثال، كتاب «النظرية الكمية للإشعاع» لغالتر هايترلر [37].

(٣-١) الموجات الكهرومغناطيسية

في هذا القسم، سندرس الموجات الكهرومغناطيسية في الفضاء الحر؛ أي عندما تكون قيمة الشحنة الكهربائية ρ والتيار $\mathbf{J}$ صفراً. وبتعويض المعادلتين 2-6 و 2-8 في المعادلة 2-4، نحصل على ما يلي:

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{A} + \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2} = 0. \quad (2-11)$$

باستخدام المطابقة

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{A} \equiv \nabla (\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla^2 \mathbf{A} \quad (2-12)$$

والمعادلة 2-9، تصبح المعادلة 2-11 كما يلي:

$$\nabla^2 \mathbf{A} - \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2} = 0. \quad (2-13)$$

وبإدخال:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}, \quad (2-14)$$

تصبح المعادلة 2-13:

$$\nabla^2 \mathbf{A} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2} = 0, \quad (2-15)$$

وهي معادلة موجية بسرعة متجهة c . وبسبب المعادلتين 2-6 و 2-8، تحقق أيضًا شدة المجال الكهربائي وشدة المجال المغناطيسي نفس المعادلة الموجية:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (2-16)$$

و

$$\nabla^2 \mathbf{B} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} = 0, \quad (2-17)$$

وطبقًا لقيمتي ϵ_0 و μ_0 الناتجتين من قياسات كهرومغناطيسية تمت في ستينيات القرن التاسع عشر، فإن السرعة المتجهة للموجات الكهرومغناطيسية يجب أن تكون 3.1×10^8 m/s. على الجانب الآخر، فإن القيمة التجريبية لسرعة الضوء في ذلك الوقت كانت $2.98 \times 10^8 - 3.15 \times 10^8$ m/s. وكان هذا الفارق مقبولًا في إطار الخطأ التجريبي. وهكذا افترض ماكسويل ما يلي [58]:

يبدو أن اتفاق النتائج يثبت أن الضوء والمغناطيسية شكلان لنفس المادة وأن الضوء اضطراب كهرومغناطيسي منتشر عبر المجال وفقًا لقوانين كهرومغناطيسية.

تَثَبَّتْ هاينريش هيرتز في عام 1865 تجريبيًا من نظرية ماكسويل الخاصة بالموجات الكهرومغناطيسية. ومن خلال القياسات الكهربائية الحديثة، نجد أن $1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$ تساوي 2.998×10^8 m/s، التي هي بالضبط سرعة الضوء في فراغ c .

(١-٤) الموجات المستوية

تُعرَّف أي موجة كهرومغناطيسية ذات تردد دائري ω في الفراغ كما يلي:

$$\mathbf{A}(x, y, z, t) = \mathbf{A}(x, y, z) e^{-i\omega t}. \quad (2-18)$$

طبيعة الإشعاع الشمسي

لدراسة خواص الموجات الكهرومغناطيسية، دعنا نتأمل الحالة التي تنتشر فيها الموجة في اتجاه واحد، لنقل z . في تلك الحالة، تعتمد شدة المجال فقط على z . وتصبح المعادلة 2-15 كما يلي:

$$\frac{d^2 \mathbf{A}}{dz^2} + \frac{\omega^2}{c^2} \mathbf{A} = 0. \quad (2-19)$$

والحل العام يكون:

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}_0 e^{i(k_z z - \omega t)}. \quad (2-20)$$

بحيث يكون A_0 ثابتاً وتُعرف مركبة z الخاصة بالمتجه الموجي k_z كما يلي:

$$k_z = \frac{\omega}{c}. \quad (2-21)$$

(٥-١) استقطاب الضوء

على الرغم من أنه بوجه عام يمكن أن يكون للجهد المتجهي مركبات x و y و z بسبب المعادلة 2-9، فإن مركبة z الخاصة بالجهد المتجهي يجب أن تكون صفراً:

$$\nabla \cdot \mathbf{A} = \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial z} = ik_z A_z = 0. \quad (2-22)$$

هذا يعني أن A_z يجب أن يكون ثابتاً عبر الفضاء بالكامل. ولأننا نركز هنا على الموجات الكهرومغناطيسية أو تغير المجالات المغناطيسية، فيمكننا ببساطة جعل A_z تساوي صفراً. فالموجات «عرضية». بعبارة أخرى، تكون متجهات الشدة عمودية على اتجاه الانتشار. ويمكن أن يكون اتجاه الجهد المتجهي x أو y أو أي مزيج خطي من مركبتي x و y . وبالنسبة لمركبة x الخاصة بـ $\mathbf{A}$ ، لدينا:

$$A_x = A_{x0} e^{i(k_z z - \omega t)}, \quad A_y = 0, \quad A_z = 0. \quad (2-23)$$

وتكون شدة المجال الكهربائي، تبعاً للمعادلة 2-8:

$$E_x = i\omega A_{x0}e^{i(k_z z - \omega t)}, \quad E_y = 0, \quad E_z = 0. \quad (2-24)$$

وشدة المجال المغناطيسي، تبعاً للمعادلة 2-6:

$$B_x = 0, \quad B_y = ik_z A_{x0}e^{i(k_z z - \omega t)}, \quad B_z = 0. \quad (2-25)$$

لذا فإن مركبتي شدة المجال الكهربائي وشدة المجال المغناطيسي الوحيدتين اللتين لا تكونان صفرًا هما E_x و B_y . وطبقاً للمعادلة 2-21، هما متفقتان في الطور ومتناسبتان:

$$E_x = cB_y. \quad (2-26)$$

باختصار، وطبقاً للنظرية الكهرومغناطيسية للضوء، متجه شدة المجال الكهربائي عمودي على اتجاه انتشار الضوء. إن شدة المجال المغناطيسي عمودية على كل من اتجاه متجه شدة المجال الكهربائي واتجاه انتشار الضوء، كما أن مقدارها متناسب مع شدة المجال الكهربائي. انظر الشكل ٢-٢.

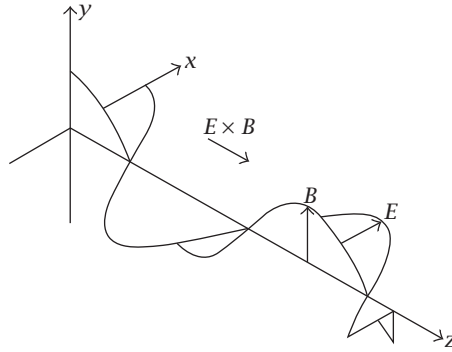
(٦-١) حركة إلكترون في المجالين الكهربائي والمغناطيسي

في هذا القسم، يُدرّس تفاعل المجال الإشعاعي — مع تغيّر المجالين الكهربائي والمغناطيسي مع تغير الوقت — مع الإلكترونات ضمن الميكانيكا الكلاسيكية كتحضير لتناول ميكانيكي كمي.

والطريقة القياسية لعرض الميكانيكا الكمية لأي نظام ديناميكي هي أولاً بعرض المعادلة الكلاسيكية للحركة بصيغة هاملتونية. إن المؤثر الهاملتوني $H(\mathbf{p}, \mathbf{r})$ لأي نظام ديناميكي هو دالة لإحداثيات $\mathbf{r}$ والزخم المقابل $\mathbf{p}$ ، مما يمثل الطاقة الإجمالية. على سبيل المثال، لإلكترون بشحنة q في مجال كهربائي بجهد $\phi(\mathbf{r})$ ، يكون المؤثر الهاملتوني:

$$H = \frac{1}{2m_e} \mathbf{p}^2 + q\phi(\mathbf{r}). \quad (2-27)$$

طبيعة الإشعاع الشمسي



شكل ٢-٢: الموجة الكهرومغناطيسية. الموجة الكهرومغناطيسية «عرضية»، بحيث يكون متجهها الشدة E و B عموديين على اتجاه الانتشار. كما أن شدة المجال الكهربائي E عمودية على شدة المجال المغناطيسي B . ويتكوّن متجه فيض الطاقة S الذي يساوي $\mu_0^{-1} E \times B$ من E و B عن طريق قاعدة اليد اليمنى.

معادلات الحركة بالصيغة الهاملتونية هما زوج من المعادلات التفاضلية العادية من الدرجة الأولى:

$$\dot{p}_x = -\frac{\partial H}{\partial x}, \quad (2-28)$$

$$\dot{x} = -\frac{\partial H}{\partial p_x}. \quad (2-29)$$

هناك معادلات مماثلة لـ y و z . وباستخدام المعادلتين 2-29 و 2-27، يكون التعبير عن الزخم مطابقاً للتعريف المعتاد:

$$\mathbf{p} = m_e \mathbf{v} = m_e \dot{\mathbf{r}}, \quad (2-30)$$

بحيث تعني النقطة أخذ مشتق متعلق بالوقت t . وبتطبيق المعادلتين 2-28 و 2-29، نجد:

$$m_e \ddot{\mathbf{r}} = -q \nabla \phi(\mathbf{r}) = q\mathbf{E}, \quad (2-31)$$

التي هي معادلة نيوتن للحركة، بحيث E هي شدة المجال الكهربائي. وبالنسبة لحركة أي إلكترون في المجالين الكهربائي والمغناطيسي، فإن الطريقة القياسية هي إدراج الجهد المتجهي A في التعبير عن الزخم ببساطة باستبدال $\mathbf{p}$ بـ $\mathbf{p} - q\mathbf{A}$ في المؤثر الهاملتوني:

$$H = \frac{1}{2m_e} (\mathbf{p} - q\mathbf{A})^2 + q\phi(\mathbf{r}), \quad (2-32)$$

أو

$$H = \frac{1}{2m_e} \left[(p_x - qA_x)^2 + (p_y - qA_y)^2 + (p_z - qA_z)^2 \right] + q\phi(x, y, z). \quad (2-33)$$

وبتطبيق معادلة 2-29 على المعادلة 2-32، نحصل على ما يلي:

$$p_x = m_e \dot{x} + qA_x \quad (2-34)$$

وهكذا. وبالشكل المتجهي، تكون:

$$\mathbf{p} = m_e \dot{\mathbf{r}} + q\mathbf{A}, \quad (2-35)$$

التي هي تعريف الزخم في أي مجال مغناطيسي. وبتطبيق المعادلة 2-28 على المعادلة 2-32 وباستخدام المعادلة 2-35، للمركبة x ، نحصل على ما يلي:

$$\frac{dp_x}{dt} = q \left[\frac{\partial A_x}{\partial x} \dot{x} + \frac{\partial A_y}{\partial x} \dot{y} + \frac{\partial A_z}{\partial x} \dot{z} \right] - q \frac{\partial \phi}{\partial x}. \quad (2-36)$$

يمكن الحصول على معادلة نيوتن المعروفة الخاصة بالحركة، المماثلة للمعادلة 2-31، من المعادلتين 2-33 و 2-36. وتكون المركبة x مُعطاة كما يلي:

$$m_e \ddot{x} = \frac{dp_x}{dt} - q \frac{dA_x}{dt}. \quad (2-37)$$

لاحظ أن:

$$\frac{dA_x}{dt} = \frac{\partial A_x}{\partial t} + \frac{\partial A_x}{\partial x}\dot{x} + \frac{\partial A_x}{\partial y}\dot{y} + \frac{\partial A_x}{\partial z}\dot{z}, \quad (2-38)$$

على سبيل المثال، أنه بالنسبة للمركبة x ، نحصل على ما يلي:

$$m_e\ddot{x} = q \left[\dot{y} \left(\frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \right) + \dot{z} \left(\frac{\partial A_z}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial z} \right) - \frac{\partial A_x}{\partial t} - \frac{\partial \phi}{\partial x} \right]. \quad (2-39)$$

وباستخدام المعادلتين 2-6 و 2-8 في شكل متجهي، تكون معادلة الحركة:

$$m_e\ddot{\mathbf{r}} = q\mathbf{E} + q\dot{\mathbf{r}} \times (\nabla \times \mathbf{A}) = q\mathbf{E} + q\dot{\mathbf{r}} \times \mathbf{B}. \quad (2-40)$$

التي هي معادلة نيوتن مع تضمين القوة المغناطيسية. وهكذا، حدث تحقق من صحة المؤثر الهاملتوني، معادلة 2-32. وسنستخدم هذا المؤثر في التناول الميكانيكي الكمي لتفاعل الإشعاع مع النظم الذرية.

(٢) بصريات الأغشية الرفيعة

تلعب نظرية الضوء الخاصة بماكسويل دوراً محورياً في فهم أغشية الامتصاص الانتقائي المستخدمة في التطبيقات الحرارية الشمسية والأغشية المضادة للانعكاس في الخلايا الكهروضوئية. والنظرية العامة ذات زاوية السقوط الاعتباطية معقدة إلى حد بعيد، لكن بالنسبة للتطبيقات المرتبطة بالطاقة الشمسية، فيكفي دراسة حالة السقوط العمودي، التي توضح معظم الأمور الفيزيائية ذات الصلة. أولاً، دعنا نوسع معادلات ماكسويل للعوازل الكهربائية.

(١-٢) ثابت العازل الكهربائي النسبي ومعامل الانكسار

تُستخدَم معادلات ماكسويل، المعادلات من 2-1 إلى 2-4، في حالة الفراغ. ولوصف الظواهر الكهرومغناطيسية في وسط غير مغناطيسي، يحل محل الثابت الكهربائي ϵ_0 الثابت الكهربائي للوسط ϵ . وهكذا تكون معادلات ماكسويل كما يلي:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon}, \quad (2-41)$$

فيزياء الطاقة الشمسية

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (2-42)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (2-43)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \varepsilon\mu_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mu_0 \mathbf{J}. \quad (2-44)$$

باتباع ما ورد في الفصل الثاني - قسم (١-١)، وجدنا أن المعادلات الموجية لشدة المجال الكهربائي وشدة المجال المغناطيسي هي:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0, \quad (2-45)$$

$$\nabla^2 \mathbf{B} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} = 0, \quad (2-46)$$

بحيث تكون السرعة المتجهة v مُعطى كما يلي:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu_0}}. \quad (2-47)$$

وبالمقارنة مع المعادلة 2-14، نجد أن علاقة v مع c هي:

$$\frac{c}{v} = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}}. \quad (2-48)$$

وبتعريف ثابت العازل الكهربائي النسبي للوسط كما يلي:

$$\varepsilon_r \equiv \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}, \quad (2-49)$$

تكون نسبة سرعة الضوء في فراغ لسرعة الضوء في الوسط، التي يُطلق عليها «معامل الانكسار» n كما يلي:

$$n \equiv \frac{c}{v} = \sqrt{\varepsilon_r}. \quad (2-50)$$

طبيعة الإشعاع الشمسي

بوجه عام، يعتمد ثابت العازل الكهربائي النسبي ومعامل الانكسار على التردد أو الطول الموجي للموجة الكهرومغناطيسية. وبالنسبة للتطبيق في نظم الطاقة الشمسية، فإن أكثر الحالات ذات الصلة هي الإشعاع الشمسي في الطيف المرئي أو تحت الأحمر. يعرض الجدول ٢-٢ لثابت العازل الكهربائي النسبي ومعامل الانكسار لمواد متعددة عادة ما تُستخدم في نظم الطاقة الشمسية.

جدول ٢-٢: ثابت العازل الكهربائي ومعامل الانعكاس لمواد ذات صلة بنظم الطاقة الشمسية.*

المادة	الطول الموجي	ϵ_r	n
السيليكون	$1.39\mu\text{m}$	12.2	3.49
الجرمانيوم	$2.1\mu\text{m}$	16.8	4.10
ثاني أكسيد التيتانيوم	$2.0\mu\text{m}$	5.76	2.4
ثاني أكسيد السيليكون	مرئي	2.40	1.55
زجاج النوافذ	مرئي	2.40	1.55
كبريتيد الزنك	مرئي	5.43	2.33
أكسيد السيريوم الرباعي	مرئي	3.81	1.953
فلوريد الكالسيوم	مرئي	2.06	1.435
فلوريد الماغنسيوم	مرئي	1.91	1.383

* المصدر: «دليل المعهد الأمريكي للفيزياء»، الطبعة الثالثة، دار نشر ماكجروهيل، نيويورك، 1982.

بالنسبة للموجات الكهرومغناطيسية المنتشرة في الاتجاه z بمتجه موجي k وشدة مجال كهربائي في x ، على نحو مشابه للمعادلات من 2-24 إلى 2-26، تكون المركبات غير الصفريّة هي:

$$E_x = E_0 e^{i(kz - \omega t)}. \quad (2-51)$$

$$B_y = \frac{k}{\omega} E_0 e^{i(kz - \omega t)}. \quad (2-52)$$

ويكون المتجه الموجي k مُعطى كما يلي:

$$k = \frac{\omega}{v} = \frac{\omega n}{c}. \quad (2-53)$$

بالإضافة إلى ذلك، وطبقاً للمعادلة 2-50، يكون المجالان الكهربائي والمغناطيسي متفقين في الطُّور ومتناسبين:

$$B_y = \frac{1}{v} E_x = \frac{n}{c} E_x. \quad (2-54)$$

(٢-٢) ميزان الطاقة ومتجه بوينتنج

دعنا ندرس ميزان الطاقة في أي مجال كهرومغناطيسي بتأمل وحدة حجم في مجالات منتظمة نسبياً. إذا كانت كثافة التيار هي J وشدة المجال الكهربائي هي E ، فإن الفقد الأومي للطاقة لكل وَحْدَةٍ زمنية لكل وحدة حجم هو حاصل ضرب J و E . وباستخدام معادلة 2-44، يصبح التعبير عن فقد الطاقة:

$$\mathbf{J} \cdot \mathbf{E} = -\frac{1}{\mu_0} \mathbf{E} \cdot (\nabla \times \mathbf{B}) + \epsilon \mathbf{E} \cdot \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}. \quad (2-55)$$

وباستخدام المطابقة الحسابية:

$$\mathbf{E} \cdot (\nabla \times \mathbf{B}) = -\nabla \cdot (\mathbf{E} \times \mathbf{B}) + \mathbf{B} \cdot (\nabla \times \mathbf{E}), \quad (2-56)$$

تصبح المعادلة 2-55 كما يلي:

$$\mathbf{J} \cdot \mathbf{E} = \nabla \cdot \left(\frac{1}{\mu_0} \mathbf{E} \times \mathbf{B} \right) + \frac{1}{\mu_0} \mathbf{B} \cdot (\nabla \times \mathbf{E}) - \epsilon \mathbf{E} \cdot \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}. \quad (2-57)$$

وباستخدام المعادلة 2-43، تصبح المعادلة 2-57:

$$\mathbf{J} \cdot \mathbf{E} = -\nabla \cdot \left(\frac{1}{\mu_0} \mathbf{E} \times \mathbf{B} \right) - \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\epsilon}{2} E^2 + \frac{1}{2\mu_0} B^2 \right). \quad (2-58)$$

طبيعة الإشعاع الشمسي

للجانب الأيمن للمعادلة 2-58 تفسير بسيط. تكون كثافة طاقة المجالات الكهرومغناطيسية هي:

$$W = \frac{\epsilon}{2} E^2 + \frac{1}{2\mu_0} B^2, \quad (2-59)$$

في حين تكون كثافة القدرة للمجال الكهرومغناطيسي لكل وحدة مساحة:

$$S = \frac{1}{\mu_0} \mathbf{E} \times \mathbf{B}. \quad (2-60)$$

يُسمى المتجه S «متجه بوينتنج» على اسم مكتشفه. وبالنسبة لموجة كهرومغناطيسية، ووفقاً للمعادلة 2-54، يكون cB_y مساوياً لـ nE_x . ويكون مقدار متجه بوينتنج بطول اتجاه الانتشار:

$$S_z = \frac{n}{\mu_0 c} E_x^2. \quad (2-61)$$

(٣-٢) معادلات فريزل

تخيل وجود وسطين بمعاملي انكسار n_1 و n_2 بسطح يكون فيه z يساوي صفراً، وذلك كما موضح في الشكل ٣-٢. يتحرك الضوء الساقط في الاتجاه z بمتجه موجي k_I :

$$k_I = \frac{\omega n_1}{c}. \quad (2-62)$$

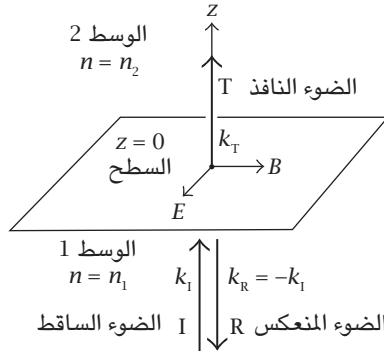
إن شدَّتي المجال للضوء الساقط هما:

$$E_I = I e^{i(k_I z - \omega t)}, \quad (2-63)$$

$$B_I = \frac{n_1}{c} I e^{i(k_I z - \omega t)}, \quad (2-64)$$

بحيث يكون I ثابتاً يميز شدة الضوء الساقط.

فيزياء الطاقة الشمسية



شكل ٢-٣: اشتقاق معادلات فريزل. يشترك وسطان بمعاملي انكسار n_1 و n_2 في سطح يكون فيه z يساوي صفرًا. وللضوء الساقط متجه موجي k_I . وللضوء النافذ متجه موجي k_T . والمتجه الموجي الخاص بالضوء المنعكس مماثل لذلك الخاص بالضوء الساقط ولكن بعلامة عكسية. وبتطبيق معادلات ماكسويل على السطح، يمكن اشتقاق العلاقات بين مركبات الضوء الثلاثة.

بالنسبة للضوء النافذ، فيتحدد المتجه الموجي من خلال معامل الانعكاس للوسط 2:

$$k_T = \frac{\omega n_2}{c}. \quad (2-65)$$

تكون شدتنا المجال للضوء النافذ:

$$E_T = T e^{i(k_T z - \omega t)}, \quad (2-66)$$

$$B_T = \frac{n_2}{c} T e^{i(k_T z - \omega t)}, \quad (2-67)$$

ويتحدد الثابت T المميز لشدة الضوء النافذ بالشروط الحدية المطلوبة من قبل معادلات ماكسويل.

بالنسبة للضوء المنعكس، ولأنه في نفس الوسط الموجود فيه الضوء الساقط، فإن القيمة المطلقة للمتجه الموجي الخاص به مطابقة لتلك الخاصة بالضوء الساقط، لكن

طبيعة الإشعاع الشمسي

اتجاه z معكوس. وباستخدام الرمز نفسه k_I ، تكون شدَّتا المجال الخاص بالضوء المنعكس هما:

$$E_R = Re^{i(-k_I z - \omega t)}, \quad (2-68)$$

$$B_R = -\frac{n_1}{c} Re^{i(-k_I z - \omega t)}. \quad (2-69)$$

لاحظ العلامة السالبة لشدة المجال المغناطيسي B_R . مرة أخرى، الثابت R يميز شدة الضوء المنعكس.

على السطح الذي يكون فيه z يساوي صفراً، وباتباع المعادلتين 2-1 و 2-2، يجب أن تكون شدَّتا المجالين المغناطيسي والكهربي متصلتين. بعبارة أخرى:

$$E_I + E_R = E_T, \quad (2-70)$$

$$B_I + B_R = B_T. \quad (2-71)$$

باستخدام المعادلات من 2-63 وحتى 2-71، نجد:

$$I - R = T, \quad (2-72)$$

$$n_1 (I + R) = n_2 T. \quad (2-73)$$

وحلَّ المعادلتين 2-72 و 2-73 هما:

$$R = \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} I, \quad (2-74)$$

$$T = \frac{2n_1}{n_2 + n_1} I. \quad (2-75)$$

فيزياء الطاقة الشمسية

المعادلتان 2-74 و 2-75 هما معادلتا فريزل لحالة السقوط العمودي. من الواضح أنه لو كان n_1 يساوي n_2 ، فلن يوجد ضوء منعكس، وسينفذ 100 بالمائة من الضوء الساقط عبر السطح.

يمكن تقييم كثافة القدرة الخاصة بكل من الضوء الساقط والضوء النافذ والضوء المنعكس باستخدام المعادلتين 2-74 و 2-75 وتعبير متجه بوينتنج، المعادلة 2-60. بالنسبة للضوء الساقط، يكون المقدار هو:

$$S_I = \frac{1}{\mu_0} E_I B_I = \frac{n_1}{\mu_0 c} I^2. \quad (2-76)$$

وبالنسبة للضوء النافذ:

$$S_T = \frac{1}{\mu_0} E_T B_T = \frac{n_2}{\mu_0 c} T^2. \quad (2-77)$$

وباستخدام المعادلة 2-74،

$$S_T = \frac{4n_1 n_2}{(n_1 + n_2)^2} \frac{n_1}{\mu_0 c} I^2 = \frac{4n_1 n_2}{(n_1 + n_2)^2} S_I. \quad (2-78)$$

ويُعرف معامل نفاذ لأبعدي كما يلي:

$$\mathcal{T} \equiv \frac{S_T}{S_I} = \frac{4n_1 n_2}{(n_1 + n_2)^2}. \quad (2-79)$$

وباتباع المعادلتين 2-77 و 2-78، يمكن تحديد شدة الضوء المنعكس ويُعرف معامل انعكاس لأبعدي كما يلي:

$$\mathcal{R} \equiv \frac{S_R}{S_I} = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2. \quad (2-80)$$

بالنسبة لأشباه الموصلات، يمكن أن يكون فقد الانعكاس كبيراً. على سبيل المثال، بالنسبة للسيليكون، n تساوي 3.49. ويكون معامل الانعكاس:

$$\mathcal{R} = \frac{(1 - 3.49)^2}{(1 + 3.49)^2} \approx 0.3076. \quad (2-81)$$

يُفقد أكثر من 30 بالمائة من الضوء بالانعكاس. ولبناء خلايا شمسية عالية الكفاءة، فمن الضروري استخدام «طلاء مضاد للانعكاس». وسنناقش ذلك في الفصل التاسع – قسم (٤).

(٣) إشعاع الجسم الأسود

من المعروف منذ قرون أن أي جسم ساخن يُصدر إشعاعاً. فعند درجة حرارة نحو 700 درجة مئوية، يصبح أي جسم متوهجاً بالحرارة. وفي درجات الحرارة الأعلى، يصدر من أي جسم إشعاع أكبر بكثير، ويتغير اللون إلى البرتقالي والأصفر والأبيض وحتى الأزرق. وفي أواخر القرن التاسع عشر، ومن أجل فهم الظواهر المرتبطة بالتقنية الصناعية مثل صناعة الصلب والمصابيح المتوهجة، أصبح الإشعاع الحراري محل دراسة كبيرة من جانب الفيزيائيين.

على الرغم من أن كل الأجسام الساخنة تصدر إشعاعاً، فالأجسام السوداء تصدر القدر الأقصى من الإشعاع في أي درجة حرارة محددة. في حالة التوازن، يجب أن يساوي الإشعاع الصادر الإشعاع الممتص؛ لذا فإن الجسم الذي يصدر القدر الأقصى من الإشعاع يمتص أيضاً القدر الأقصى من الإشعاع، وهذا هو السبب في أنه يبدو أسود اللون. عملياً، أي جسم أسود يُبنى بفتح ثقب صغير في تجويف كبير، كما هو موضح في الشكل ٢-٤. ويتعرض أي شعاع ضوئي مار عبر الثقب بمساحة A لانعكاسات متعددة على السطح الداخلي للتجويف. وإذا لم تكن المادة براقّة على الإطلاق، فبعد عدة اصطدامات سيُمتص الضوء في النهاية بالكامل من جانب التجويف؛ ومن ثم فإن الثقب الصغير في التجويف الكبير سيبدو دائماً أسود اللون أو مظلماً، وهو مثال جيد على الجسم الأسود.

(١-٣) قانون رايلي-جينس

دُرست كثافة الطاقة الخاصة بالإشعاع بوصفها دالة لتردده في أواخر القرن التاسع عشر من جانب اللورد رايلي ثم السير جيمس جينس باستخدام الفيزياء الإحصائية الكلاسيكية. وقد تعاملنا مع الموجات الكهرومغناطيسية المستقرة في تجويف كأشكال فردية، وتتبع تلك الأنماط قانون التقسيم المتساوي لإحصاء ماكسويل-بولتزمان. تخيل تجويفاً تكعيبياً مغلقاً بأسطح داخلية عاكسة وضلعه L . وتحقق موجة كهرومغناطيسية جيبية بتردد ν المعادلة التالية:

$$\nabla^2 \mathbf{A} + \frac{4\pi^2 \nu^2}{c^2} \mathbf{A} = 0. \quad (2-82)$$

بفرض أن التجويف مصنوع من معدن، ستجد أن شدة المجال الكهربائي تتلاشي على جدران التجويف، وهكذا الحال بالنسبة للجهد المتجهي. والحل العام للمعادلة السابقة الذي يحقق هذا الشرط هو:

$$\mathbf{A} = A_0 \sin(k_x x) \sin(k_y y) \sin(k_z z). \quad (2-83)$$

وتُعرف متجهات الأمواج كما يلي:

$$k_x = \frac{\pi n_x}{L}, \quad k_y = \frac{\pi n_y}{L}, \quad k_z = \frac{\pi n_z}{L}, \quad (2-84)$$

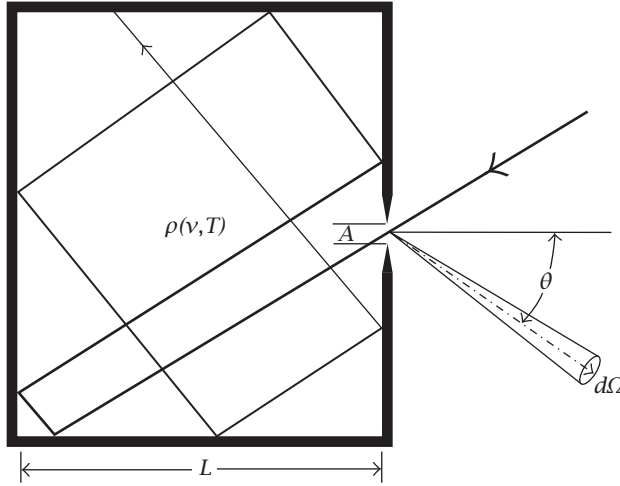
بحيث تكون n_x و n_y و n_z أعداداً صحيحة موجبة. وبالتعويض المباشر، يمكن أن نجد أن الحل، معادلة 2-83، يحقق المعادلة التفاضلية 2-82 والشروط الحدية عند الجدران. وكل مجموعة من الأعداد الصحيحة، n_x و n_y و n_z ، تمثل نمطاً من الموجة الكهرومغناطيسية في التجويف. وبإدراج معادلة 2-84 في معادلة 2-82 نحصل على ما يلي:

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = \frac{4\pi^2 \nu^2}{c^2}, \quad (2-85)$$

طبيعة الإشعاع الشمسي

وفيما يتعلّق بالأعداد n_x و n_y و n_z ، تصبح المعادلة 2-85:

$$n_x^2 + n_y^2 + n_z^2 = \frac{4\nu^2 L^2}{c^2}. \quad (2-86)$$



شكل ٢-٤: إشعاع الجسم الأسود. التجويف الكبير ذو الثقب الصغير مثال جيد على الأجسام السوداء. فالضوء الداخل عبر الثقب سيتعرض لانعكاسات متعددة وسيُمتصّ كله؛ ومن ثمّ سيبدو أسود اللون. ويُصدر أي جسم أسود القدر الأقصى من الإشعاع عند تسخينه.

والآن، نعدّد عدد الموجات المستقرّة ذات الترددات ν بتخيّل جسم كروي نصف قطره $\sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2} = 2\nu L/c$. وعدد N الخاص بالأنماط ذات قيم n_x و n_y و n_z الموجبة حتى ν هو:

$$N = \frac{1}{8} \frac{4}{3} \pi \left(\frac{2\nu L}{c} \right)^3 = \frac{4\pi \nu^3 L^3}{3c^3}, \quad (2-87)$$

لكل نوع من الموجات المستقرة، هناك استقطابان؛ ومن ثم فإن عدد أنماط الموجات الكهرومغناطيسية المستقرة هي:

$$N = \frac{8\pi\nu^3 L^3}{3c^3}, \quad (2-88)$$

بحيث يكون L^3 هو الحجم، وتكون «كثافة الحالات» بالتردد ν :

$$\frac{d}{d\nu} \left(\frac{N}{L^3} \right) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3}. \quad (2-89)$$

تبعاً لإحصاء ماكسويل-بولتزمان، عند درجة الحرارة المطلقة T ، كل درجة حرارة تعطي طاقة $k_B T$ ، بحيث يكون k_B هو ثابت بولتزمان وتكون كثافة الطاقة:

$$\rho(\nu, T) = \frac{d}{d\nu} \left(\frac{N}{L^3} \right) k_B T = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} k_B T. \quad (2-90)$$

المعادلة 2-90 هي كثافة طاقة الإشعاع لكل مدى وحدة تردد في تجويف بدرجة حرارة T . وهي غير قابلة للرصد على نحو مباشر. والكمية القابلة للرصد على نحو مباشر هي الإشعاع المنعكس الطيفي، $u(\nu, T)$ ؛ أي، الطاقة المشعة من وحدة مساحة خاصة بالثقب لكل مدى وحدة تردد. ولحساب $u(\nu, T)$ من $\rho(\nu, T)$ ، سنتأمل أولاً حالة مبسطة: إذا كان المجال مُحدد اتجاه إشعاعه بدقة وله سرعة متجهة c ، فلدينا:

$$u(\nu, T) = c\rho(\nu, T). \quad (2-91)$$

نظراً لصغر حجم الثقب، فإن المجال الإشعاعي في التجويف يكون موحد الخواص. وحيث إن الإشعاع يأتي فقط عبر ثقب له اتجاه محدد بدقة، فإن $u(\nu, T)$ يجب أن يكون كسراً من $c\rho(\nu, T)$. ويمكن تحديد قيمة الكسر باستخدام البرهان التالي؛ تخيل وجود جسم كروي بنصف قطر R . إن مساحة سطح هذا الجسم هي $4\pi R^2$. وإذا سُمح للإشعاع

طبيعة الإشعاع الشمسي

الموجود بداخل الجسم الكروي بأن يصدر في كل الاتجاهات، فإن المساحة تكون $4\pi R^2$. أما إذا سُمح بأن يصدر في اتجاه واحد فقط، فإن مساحة تكُون قرص بنصف قطر R ؛ أي، πR^2 ؛ ومن ثم فإن العامل يكون $1/4$. وتصبح المعادلة 2-91:

$$u(\nu, T) = \frac{1}{4} c \rho(\nu, T). \quad (2-92)$$

فيما يلي إثبات أكثر تفصيلاً للعامل $1/4$. تأمل الإشعاع الصادر من ثقب صغير بمساحة A على التجويف؛ ارجع إلى الشكل ٢-٤. ولأن الموجة الكهرومغناطيسية موحدة الخواص وسرعة الضوء هي c ، فإن الطاقة الصادرة عبر زاوية مجسمة $d\Omega$ بزاوية θ هي:

$$\frac{dE}{dt d\Omega} = \frac{c}{4\pi} \rho(\nu, T) A \cos \theta. \quad (2-93)$$

لأن مساحة الثقب الملحوظة من زاوية θ هي $A \cos \theta$. وعن طريق التكامل عبر نصف الكرة، يكون الإشعاع الإجمالي لكل وحدة مساحة:

$$u(\nu, T) = \frac{c}{4\pi} \int_0^{\pi/2} 2\pi \cos \theta \sin \theta d\theta \rho(\nu, T) = \frac{c}{4} \rho(\nu, T), \quad (2-94)$$

مما يؤكد معادلة 2-92. وباستخدام معادلة 2-90، نحصل في النهاية على توزيع رايلي-جينس لإشعاع الجسم الأسود:

$$u(\nu, T) = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} k_B T. \quad (2-95)$$

يتناسب توزيع رايلي-جينس جيداً مع السلوك ذي التردد المنخفض لكثافة الطاقة العملية، لكن مع زيادة التردد، يزيد الإشعاع الساقط الطيفي وتكون طاقة الإشعاع الإجمالية لامتناهية. ويتناقض هذا مع الحقيقة العملية القائلة بأن إشعاع الجسم الأسود الإجمالي متناهٍ وأن الكثافة الطيفية لها حد أقصى؛ انظر الشكل ٢-٥.

(٢-٣) صيغة بلانك وقانون ستيفان-بولتزمان

في عام 1900، توصّل ماكس بلانك لصيغة تجريبية تتناسب بدقة مع البيانات العملية:

$$u(\nu, T) = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \frac{h\nu}{e^{h\nu/k_B T} - 1}. \quad (2-96)$$

إن الثابت h في الصيغة، أو ما يسمّى بثابت بلانك، جرى التوصل إليه في البداية بالتوافق مع بيانات إشعاع الجسم الأسود العملية. ولاحقاً توصل بلانك لتفسير رياضي لصيغته بافتراض أن طاقة الإشعاع يمكن أن تأخذ فقط قيماً منفصلة. وتحديداً، افترض أن طاقة الإشعاع بتردد ν يمكن أن تأخذ فقط مضاعفات صحيحة لقيمة أساسية $h\nu$ ، وهي «كم الطاقة»:

$$\epsilon = 0, h\nu, 2h\nu, 3h\nu, \dots \quad (2-97)$$

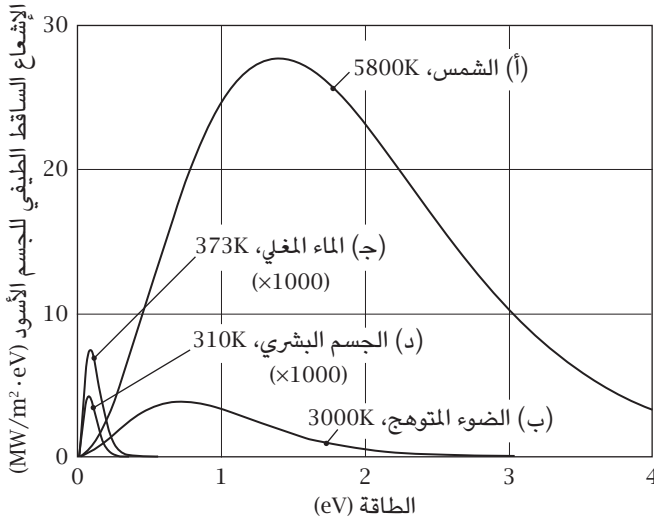
وطبقاً لإحصاء ماكسويل-بولتزمان، فإن احتمالية إيجاد حالة بطاقة $nh\nu$ هي $\exp(-nh\nu/k_B T)$ ، ومتوسط قيمة الطاقة لمكون معين لإشعاع بتردد ν هو:

$$\bar{\epsilon} = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} nh\nu e^{-nh\nu/k_B T}}{\sum_{n=0}^{\infty} e^{-nh\nu/k_B T}} = \frac{h\nu}{e^{h\nu/k_B T} - 1}. \quad (2-98)$$

وليس $k_B T$. وباستبدال المعادلة 2-90 بالتعبير $k_B T$ في المعادلة 2-98، نعود للمعادلة 2-96.

في البداية، اعتقد ماكس بلانك أن تكميم الطاقة هو فقط حيلة رياضية للجمع بين صيغته التي توصل إليها تجريبياً والمبادئ الفيزيائية المعروفة في ذلك الوقت. وقد اكتشف ألبرت أينشتاين الأهمية العميقة لمفهوم تكميم الإشعاع ومعنى ثابت بلانك في تفسيره للتأثير الكهروضوئي، الذي يُعد الأساس المفاهيمي للخلايا الشمسية.

طبيعة الإشعاع الشمسي



شكل ٢-٥: الإشعاع الساقط الطيفي للجسم للأسود. يُعرض هنا الإشعاع الساقط الطيفي للجسم الأسود، أو قدرة الإشعاع الصادرة لكل m^2 لكل مدى وحدة طاقة (هنا بـ eV) بقيمة طاقة (أيضاً بـ eV) بأربع درجات حرارة مختلفة. إن أقصى إشعاع ساقط شمسي يكون عند $1.4eV$ ، بقيمة تبلغ $27.77MW/m^2 \cdot eV$. تبلغ درجة حرارة فتيلة ضوء متوهج نحو $3000K$ ، وتبلغ كثافة قدرة الإشعاع عند سطح الفتيلة نحو 7 بالمائة فقط من تلك التي على الشمس. ويظهر هنا أيضاً الإشعاع الساقط الطيفي من جسم أسود عند نقطة غليان الماء والجسم البشري، بوحدة $kW/m^2 \cdot eV$.

بالجمع بين الإشعاع المنعكس الطيفي والتردد، وُجد أن إجمالي الإشعاع هو:

$$\begin{aligned}
 U(T) &= \int_0^\infty \frac{2\pi h \nu^3}{c^2} \frac{d\nu}{e^{h\nu/k_B T} - 1} \\
 &= \frac{2\pi h}{c^2} \left(\frac{k_B T}{h} \right)^4 \int_0^\infty \frac{x^3 dx}{e^x - 1} \\
 &= \frac{2}{15} \frac{\pi^5 k_B^4}{c^2 h^3} T^4.
 \end{aligned} \tag{2-99}$$

وهنا استُخدمت مطابقة رياضية:

$$\int_0^{\infty} \frac{x^3 dx}{e^x - 1} = \frac{\pi^4}{15}. \quad (2-100)$$

إن المعادلة 2-99 هي «قانون ستيفان-بولتزمان»، المكتشف تجريبيًا قبل صيغة بلانك والمدمج بحُجّة تستخدم قواعد الديناميكا الحرارية. والثابت الموجود في المعادلة 2-99:

$$\sigma \equiv \frac{2}{15} \frac{\pi^5 k_B^4}{c^2 h^3} = \frac{\pi^2 k_B^4}{60 c^2 h^3} = 5.67 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}, \quad (2-101)$$

يُطلق عليه «ثابت ستيفان-بولتزمان». ويمكن تذكره باستخدام العدد التالي: 45678. وإجمالي الإشعاع المنعكس يتناسب مع الأس الرابع لدرجة الحرارة المطلقة، كما أن المعامل يساوي حاصل ضرب 5.67 في معكوس الأس الثامن للعدد 10.

بالنسبة للتطبيقات في الخلايا الشمسية، يعد الإلكترون فولت هو الوحدة الأكثر ملاءمة لقياس طاقة الفوتون؛ انظر الشكل ٢-٥. وصيغة بلانك للإشعاع الساقط الطيفي للجسم الأسود فيما يتعلق بطاقة الفوتون ϵ بوحدة الإلكترون فولت هي:

$$u(\epsilon, T) = \frac{2\pi q^4}{c^2 h^3} \frac{\epsilon^3}{e^{\epsilon/\epsilon T} - 1} = 1.587 \times 10^8 \frac{\epsilon^3}{e^{\epsilon/\epsilon T} - 1} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{eV}}, \quad (2-102)$$

بحيث يكون $\epsilon_T = k_B T / q$ هي قيمة $k_B T$ بالإلكترون فولت. رقميًا، هي تساوي $\epsilon_T = T / 11600$. بالنسبة للشمس، $T_{\odot}$ تساوي 5800K؛ ومن ثم، فإن $\epsilon_{\odot}$ تساوي 0.5eV. في مكان كوكب الأرض، يُخفّف الإشعاع بسبب المسافة التي بين الشمس والأرض، أي، الثابت الفلكي $A_{\odot}$ الذي يساوي $1.5 \times 10^{11} \text{m}$. عامل هندسي f يمثل الزاوية المجسمة للشمس بنصف قطر $r_{\odot}$ يساوي $6.96 \times 10^8 \text{m}$ كما هو مرصود من الأرض:

$$f = \left(\frac{r_{\odot}}{A_{\odot}} \right)^2 = \frac{[6.96 \times 10^8]^2}{[1.5 \times 10^{11}]^2} = 2.15 \times 10^{-5}, \quad (2-103)$$

طبيعة الإشعاع الشمسي

يكون طيف الإشعاع الشمسي AM0 (خارج الغلاف الجوي في مكان كوكب الأرض):

$$u_{\otimes}(\epsilon, T) = fu_{\odot}(\epsilon, T) = 3.41 \times 10^3 \frac{\epsilon^3}{e^{\epsilon/\epsilon_{\odot}} - 1} \frac{W}{m^2 \cdot eV}. \quad (2-104)$$

يمكن أن يكون مكان ذروة الإشعاع الساقط الطيفي للجسم الأسود ذا معادلة متسامية:

$$\frac{d}{dx} [3\log x - \log(e^x - 1)] = 0, \quad (2-105)$$

ويمكن الحصول عليه من خلال حساب عددي:

$$x = 2.82. \quad (2-106)$$

بعبارة أخرى، تكون تلك الذروة عند:

$$\epsilon_{MAX} = 2.82\epsilon_T = 2.43 \times 10^{-4} T \text{ (eV)}. \quad (2-107)$$

قيمة الذروة للدالة $x^3/(e^x - 1)$ هي 1.42؛ ومن ثم فإن قيمة ذروة الإشعاع الساقط الطيفي هي:

$$u_{MAX} = 1.42 \frac{2\pi q k_B^3}{c^2 h^3} T^3 \cong 1.44 \times 10^{-4} T^3 \frac{W}{m^2 \cdot eV}. \quad (2-108)$$

يعرض الجدول ٢-٣ بيانات بعض الحالات الشائعة.

جدول ٢-٣: إشعاع الجسم الأسود عند درجات حرارة مختلفة.

الجسم المشع	درجة الحرارة (K)	القدرة (W/m ²)	ذروة ϵ (eV)	ذروة λ (μm)	ذروة u (W/m ² · eV)
الشمس	5800	6.31×10^7	1.410	0.88	2.81×10^7
المصباح	3000	4.59×10^6	0.728	1.70	3.88×10^6

ذروة u (W/m ² · eV)	ذروة (μm)λ	ذروة ϵ (eV)	القدرة (W/m ²)	درجة الحرارة (K)	الجسم المشع
7.46×10^3	13.6	0.091	1.10×10^3	373	الماء المغلي
4.28×10^3	16.5	0.075	5.24×10^2	310	الجسم البشري

(٤) التأثير الكهروضوئي ومفهوم الفوتونات

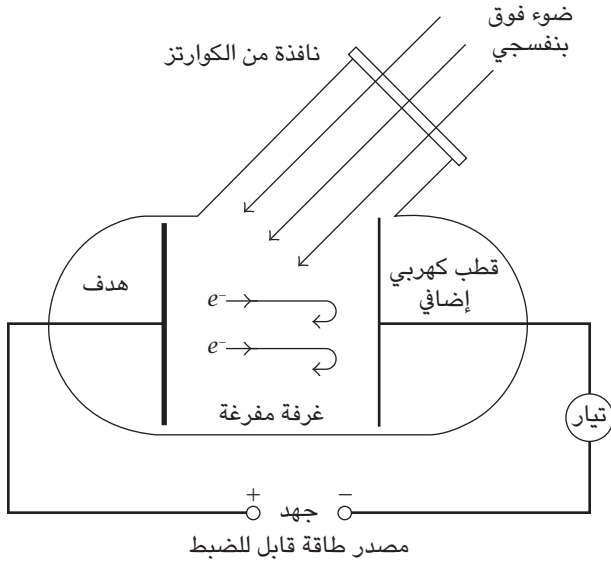
اكتُشف التأثير الكهروضوئي (أو الظاهرة الكهروضوئية) بالصدفة على يد هاينريش هيرتز في عام 1887 أثناء التجارب الساعية إلى توليد موجات كهرومغناطيسية. ومنذ ذلك الحين، أُجري عدد من الدراسات في محاولة لفهم الظواهر ذات الصلة. وفي نحو عام 1900، أجرى فيليب لينارد سلسلة من الدراسات المهمة عن علاقة الطاقة الحركية للإلكترونات المنبعثة بشدة الضوء المصطدم وطوله الموجي [50]. وكانت نتائجه متعارضة على نحو مباشر مع النظرية الموجية للضوء، لكنها ألهمت ألبرت أينشتاين وجعلته يطور نظريته الخاصة بالفوتونات.

يعرض الشكل ٢-٦ مخططاً للجهاز العملي لفيليب لينارد. إن النظام بأكمله موضوع في غرفة مفرغة. يولّد مصباح قوسي كهربى — يستخدم قضباناً كربونية أو قضباناً مصنوعة من الزنك كأقطاب كهربية — ضوءاً فوق بنفسجي قوياً، وتسمح نافذة مصنوعة من الكوارتز لهذا الضوء فوق البنفسجي بالسقوط على هدف مصنوع من معادن مختلفة. يكون الهدف وقطباً كهربى إضافي متصلين بمصدر طاقة قابل للضبط. ويُستخدَم أَمِتر لقياس التيار الكهربى المُولّد من جانب الضوء فوق البنفسجي، أو ما يسمّى بـ «التيار الضوئى»، وبخاصةً عندما يكون فرق الجهد بين القطبين الكهربيين صغيراً جداً. وبالزيادة التدريجية لفرق الجهد، الذي يميل لعكس الإلكترونات ثانيةً للهدف، يقل التيار الضوئى. ويُسجَل فرق الجهد الذي عنده يكون التيار الضوئى صفراً باعتباره «فرق جهد الإيقاف».

يرتبط فرق جهد الإيقاف ظاهرياً بالطاقة الحركية للإلكترونات المنبعثة من الهدف:

$$qV = \frac{1}{2}mv^2. \quad (2-109)$$

طبيعة الإشعاع الشمسي



شكل ٢-٦: جهاز لينارد لدراسة التأثير الكهروضوئي. تسمح نافذة مصنوعة من الكوارتز للضوء فوق البنفسجي من مصباح قوسي كهربائي بالسقوط على هدف. يجري التحكم في فرق الجهد فيما بين الهدف والقطب الكهربائي الإضافي عن طريق مصدر طاقة قابل للضبط. يُستخدم أميتر لقياس التيار الكهربائي المُولّد من جانب الضوء فوق البنفسجي، أو ما يُطلق عليه «التيار الضوئي». وبالإضافة التدريجية لفرق الجهد (مع القطبية الموضحة)، يقل التيار الضوئي. ويُسجل فرق الجهد الذي عنده يكون التيار الضوئي صفراً باعتباره «فرق جهد الإيقاف» [50].

على نحو مفهوم، يختلف التيار الضوئي حسب شدة الضوء؛ فبتغيير مقدار التيار الذي يدفع القوس أو تغيير المسافة بين المصباح القوسي والهدف، يمكن للتيار الضوئي أن يتغير بقيمتين أسيتين، على سبيل المثال، من 4.1pA إلى 276pA. لاحظ لينارد ظاهرة غير متوقعة ومثيرة وهي أنه بغض النظر عن مدى قوة أو ضعف الضوء، أو مدى كبر أو صغر التيار الضوئي، فإن فرق جهد الإيقاف لا يتغير؛ انظر الجدول ٢-٤. ويتغير فرق جهد الإيقاف فقط عندما تتغير مادة المصباح القوسي الكهربائي، لكن بالنسبة لأي نوع معين من الأوقاس، يبقى فرق جهد الإيقاف دون تغيير.

التأثير الذي لاحظته لينارد ليس له تفسير في إطار النظرية الموجية للضوء، التي بمقتضاها كلما زادت شدة الضوء، زادت الطاقة الحركية التي تكتسبها الإلكترونات.

فيزياء الطاقة الشمسية

جدول ٢-٤: فرق جهد الإيقاف الخاص بالتيار الضوئي.*

مادة القضيب	التيار الدافع (A)	المسافة إلى الهدف (cm)	التيار الضوئي (pA)	فرق جهد الإيقاف (V)
الكربون	28	33.6	276	-1.07
الكربون	20	33.6	174	-1.12
الكربون	28	68	31.7	-1.10
الكربون	8	33.6	4.1	-1.06
الزنك	27	33.6	2180	-0.85
الزنك	27	87.9	319	-0.86

* المصدر: بي لينارد، دورية «آنالين دير فيزيك»، 8، 167 (1902) [50].

(١-٤) نظرية أينشتاين الخاصة بالفوتونات

في عام 1905، بينما كان يعمل ألبرت أينشتاين فاحص براءات في مكتب براءات الاختراع السويسري، كتب خمس أوراق بحثية نُشرت في دورية «آنالين دير فيزيك»، أشعلت شرارة الثورة العلمية التي حدثت في القرن العشرين. بالنسبة لعامة الناس، أينشتاين معروف أكثر بسبب النظرية النسبية التي وضعها؛ لذا اندهش الناس عندما أعلنت الأكاديمية السويدية في عام 1922 منحه جائزة نوبل «للخدمات التي قدمها للفيزياء النظرية وبخاصة لاكتشاف قانون التأثير الكهروضوئي»، إشارة لورقته البحثية «وجهة نظر تجريبية عن إنتاج الضوء وتحويله» [27]. كنوع من الإدراك المتأخر، كانت لجنة نوبل على حق: فورقته البحثية عن التأثير الكهروضوئي تُعد الأجرأ والأكثر ثورية والأكثر أصالة. وعلى الرغم من أن تنبؤاته تم التحقق منها بالكامل من خلال التجارب، فلسنوات عديدة لم يقبل عدة علماء فيزياء بارزين مفهومه الخاص بالفوتونات. وفيما يلي اقتباس له [27]:

طبقاً للافتراض المذكور هنا، عندما ينتشر شعاع ضوء بدءاً من نقطة ما، لا تُوزع الطاقة على نحو مستمر على مساحة متزايدة، لكنها تتكوّن من عدد متناهٍ من كموم الطاقة، الموضوعة في الفراغ، الذي يتحرّك دون أن ينقسم ويمكن أن يُمتَصَّ أو ينبعث فقط كوحدة واحدة.

طبقاً لأينشتاين، عندما يتفاعل الضوء مع المادة، يظهر على هيئة تدفق من الجسيمات الفردية غير القابلة للانقسام، وعندما يتفاعل فوتون مع إلكترون، فإما يُمتصّ وإما لا يكون هناك تفاعل. وقيمة طاقة أي فوتون ϵ تعتمد على تردده:

$$\epsilon = h\nu, \quad (2-110)$$

بحيث h الذي يساوي $6.63 \times 10^{-34} \text{ J}$ هو ثابت بلانك و ν هو تردد الضوء. على سبيل المثال، بالنسبة للضوء الأخضر، λ يساوي $0.53 \mu\text{m}$ والتردد يساوي $5.6 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$ وتساوي طاقة الفوتون $3.7 \times 10^{-19} \text{ J}$ أو 2.3 eV .

عندما يتفاعل فوتون مع إلكترون في المعدن، فإنه ينقل الطاقة بأكملها للإلكترون، ويمكن أن يهرب الإلكترون من المعدن بتجاوز «دالة الشغل» ϕ ، التي تبلغ عادةً بضعة إلكترون فولت. إذا كانت طاقة الفوتون أصغر من دالة الشغل الخاصة بالمعدن، فسيبقى الإلكترون في المعدن. وإذا كانت طاقة الفوتون أكبر من دالة الشغل الخاصة بالمعدن، فحينها يمكن للإلكترون أن يهرب من سطح المعدن بـ «طاقة حركية زائدة».

$$\frac{1}{2}mv^2 = h\nu - \phi. \quad (2-111)$$

يمكن قياس الطاقة الحركية للإلكترون هارب من خلال مجال كهربائي أو فرق جهد خارجي لإرجاعها إلى الهدف. ويُسمى فرق الجهد الكافي لإلغاء الطاقة الحركية «فرق جهد الإيقاف»:

$$qV_{\text{stop}} = \frac{1}{2}mv^2 = h\nu - \phi, \quad (2-112)$$

بحيث تكون q شحنة الإلكترون، $1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$. وطبقاً للنظرية الكمية للضوء لأينشتاين، يعتمد فرق جهد الإيقاف خطياً على تردد الفوتون و«لا يعتمد على شدة الضوء». ويجب أن يكون الميل ثابتاً عامّاً، يوفر طريقة مباشرة لتحديد قيمة ثابت بلانك:

$$\frac{\Delta V_{\text{stop}}}{\Delta \nu} = \frac{h}{q}. \quad (2-113)$$

(٢-٤) التحقق التجريبي من قبل ميليكان

رُفِضَتْ نظرية أينشتاين الخاصة بالفوتونات من عدد من الفيزيائيين البارزين لعدة سنوات، بمن فيهم ماكس بلانك ونيلس بور، وعلى نحو خاص روبرت ميليكان. وبدءًا من عام 1905 ولادة عشرة أعوام، عمل ميليكان على تفنيد نظرية أينشتاين. وأخيرًا في عام 1916، نشر ميليكان ورقة بحثية طويلة في دورية «فيزيكال ريفيو» بعنوان «تقدير كهروضوئي مباشر لثابت بلانك h » [61]. وفيما يلي ما خلصت إليه:

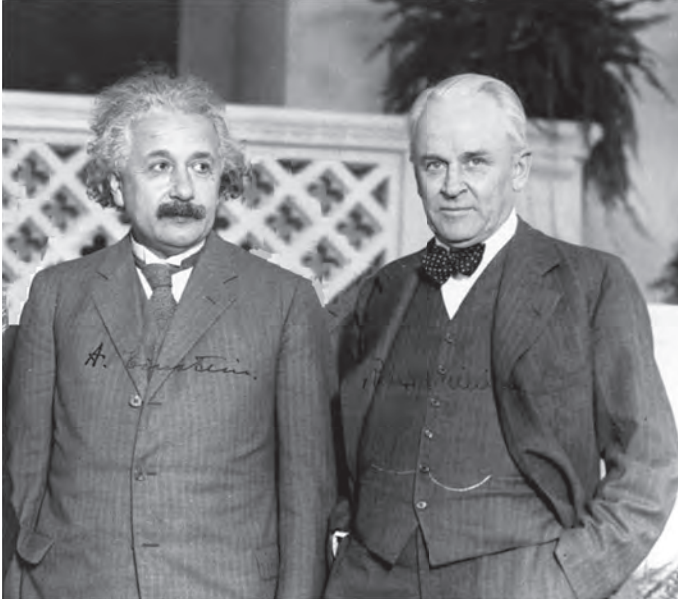
(١) خضعت المعادلة الكهروضوئية لأينشتاين لاختبارات دقيقة جدًا، واتضح أنها في كل الحالات تتنبأ على نحو دقيق بالنتائج المرصودة.

(٢) قُدِّرَ على نحو كهروضوئي ثابت بلانك h وبلغت نسبة الدقة نحو 0.5 بالمائة.

في عام 1923، حصل ميليكان على جائزة نوبل «لعمله الخاص بالشحنة الكهربائية الأولية والخاص بالتأثير الكهروضوئي».

هناك حقيقة مثيرة في تاريخ العلم تتمثل في أن ميليكان في نفس الورقة البحثية رفض بشدة نظرية الفوتونات الخاصة بأينشتاين. وقال إن فرضية الفوتونات الخاصة بأينشتاين «يمكن أن نصفها بأنها متهورة؛ أولًا: لأن أي اضطراب كهرومغناطيسي يبقى موضوعًا في الفراغ يبدو انتهاكًا لمفهوم الاضطراب الكهرومغناطيسي، وثانيًا: لأنها تتعارض على نحو واضح مع الحقائق الثابتة المتعلقة بالتداخل بقوة». وكتب ميليكان يقول إن المعادلة الكهروضوئية لأينشتاين، على الرغم من أنها تمثل على نحو دقيق البيانات التجريبية، «فلا يمكن في اعتقادي أن يُنظر إليها حاليًا على أنها تقوم على أساس نظري مُرضٍ بأي نحو [61]». وفي عام 1950، وهو في سن الثانية والثمانين، وفي سيرته الذاتية [62]، غيّر موقفه واعترف بأن تجارب أينشتاين:

أثبتت ببساطة وعلى نحو غير قابل للنقاش، بحسب اعتقادي، أن الإلكترون المنبعث الهارب بالطاقة $h\nu$ يحصل على تلك الطاقة بالنقل المباشر لوحدة طاقة $h\nu$ من الضوء إلى الإلكترون؛ ومن ثم لا تسمح بأي تفسير آخر غير الذي اقترحه أينشتاين في البداية، ألا وهو نظرية الفوتونات أو الجسيمات الضوئية نفسها.



شكل ٢-٧: ألبرت أينشتاين وروبرت ميليكان. فاز كل من أينشتاين وميليكان بجائزة نوبل نتيجة مساهماتهما في التأثير الكهروضوئي. الصورة مُلتقطة عام 1930 حين دعا روبرت ميليكان ألبرت أينشتاين إلى أحد المؤتمرات في كاليفورنيا. الصورة الأصلية مهداة من متحف سميثسونيان، ونقحها المؤلف قليلاً.

(٣-٤) ثنائية الموجة والجسيم

ارتبطت الاعتراضات المبكرة على نظرية الفوتونات لأينشتاين بمشكلة أكثر عمقاً، ألا وهي: ثنائية الموجة والجسيم لكل الجسيمات. في بداية القرن العشرين، وُصفت الميكانيكا الكلاسيكية الإلكترونات بأنها أشبه بكرات البلياردو. وبدا أن نظرية أينشتاين تشير ضمناً إلى أن الفوتونات تُشبه أيضاً كرات البلياردو وأن التأثير الكهروضوئي هو تصادم كرات بلياردو بالإلكترونات. ومثل هذه الصورة ليست فقط صعبة في تصورها وإنما أيضاً تتعارض على نحو مباشر مع ظاهرة التداخل الضوئي المثبتة.

حُلَّ هذا التعارض بعد أن بسط لوي دي بروي فرضية أينشتاين القائلة بأن الضوء يمكن أن يكون موجة وجسماً بحيث صارت تنطبق على «كل الجسيمات»، بما في ذلك

الإلكترون. فطبقاً لدي بروي، أي جسيم بزخم p يجب أيضاً أن يكون موجة مستوية بمتجه موجي k كما يلي:

$$p = \hbar k, \quad (2-114)$$

بحيث يكون $\hbar$ مساوياً لـ $h/2\pi$ ، ويُسمَّى ثابت بلانك المقسوم على 2π عادة ثابت ديراك. وطبقاً لنظرية دي بروي، هناك صورة أفضل للتأثير الكهروضوئي تتمثل في أن الإشعاع الضوئي كموجة مستوية يتفاعل مع الإلكترون في القطب الكهربائي، الذي هو أيضاً موجة مستوية، لكن الطاقة المنتقلة للإلكترون يجب أن تكُم لتحقق معادلة أينشتاين:

$$\epsilon = h\nu \equiv \hbar\omega, \quad (2-115)$$

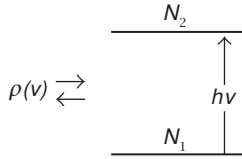
بحيث يكون $\omega = 2\pi\nu$ هو التردد الدائري للموجة الضوئية. وهذا مفهوم أساسي في فهم الخلايا الشمسية والكيمياء الضوئية الشمسية، الذي سنناقشه في الفصول المقابلة.

(٥) اشتقاق أينشتاين لصيغة الجسم الأسود

اعتماداً على مفهوم الفوتونات وتفاعل الفوتونات مع المادة، اشتق أينشتاين اشتقاقاً بسيطاً جداً لصيغة إشعاع الجسم الأسود. ويتمثل العنصر الأساسي في اشتقاقه في إدخال «انبعاث مُحفَّز»، وهو ما أدى إلى ظهور الليزر، الذي يعمل على تضخيم الضوء بانبعاث الإشعاع المحفز، ويوفر فهماً أفضل للتفاعل بين الإشعاع الشمسي والنظم الذرية. درس أينشتاين نظاماً ذرياً بسيطاً بحالتين؛ انظر الشكل ٢-٨. يتمثل المجال الإشعاعي من خلال كثافة طاقة $\rho(\nu)$ ، بحيث يكون ν هو التردد. والنظام الذري له حالتان بفرق طاقة $h\nu$. وطبقاً لإحصاء ماكسويل-بولتزمان، تكون نسبة تعدادي الحالتين هي:

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-h\nu/k_B T}. \quad (2-116)$$

طبيعة الإشعاع الشمسي



شكل ٢-٨: اشتقاق أينشتاين لصيغة إشعاع الجسم الأسود. يتفاعل المجال الإشعاعي (V) مع نظام ذري ذي مستويين. وقد افترضت ثلاثة أوضاع للتفاعل: الامتصاص، لرفع النظام الذري من الحالة الأولى للحالة الثانية؛ والانبعث التلقائي والانبعث المحفّز: ينحل النظام الذري من الحالة الثانية للحالة الأولى، معطياً طاقة للمجال الإشعاعي.

افترض أينشتاين ثلاثة معاملات انتقال: معامل الامتصاص B_{12} ، ومعامل الانبعث التلقائي A ، ومعامل الانبعث المحفّز B_{21} . وفيما يلي معادلتا معدل التفاعل:

$$\frac{dN_2}{dt} = B_{12}N_1\rho(\nu) - B_{21}N_2\rho(\nu) - AN_2, \quad (2-117)$$

$$\frac{dN_1}{dt} = -B_{12}N_1\rho(\nu) - B_{21}N_2\rho(\nu) + AN_2. \quad (2-118)$$

عند التوازن، يجب أن يختفي كل من dN_1/dt و dN_2/dt ؛ من ثَمَّ:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{B_{12}\rho(\nu)}{A + B_{21}\rho(\nu)} = e^{-h\nu/k_B T}. \quad (2-119)$$

يجب ألا تعتمد المعاملات على درجة الحرارة، وفي ظل درجة الحرارة المرتفعة، يجب أن تكون كثافة القدرة مرتفعة، ويجب أن يقترب الجانب الأيمن من معادلة 2-119 من الواحد الصحيح.

من ثَمَّ، يجب أن يكون لدينا ما يلي:

$$B_{12} = B_{21} = B. \quad (2-120)$$

فيزياء الطاقة الشمسية

يساوي معامل الامتصاص B_{12} معامل الانبعاث المحفز B_{21} ، والذي يمكن تمثيله بمعامل B واحد. وفي ظل أي درجة حرارة، يكون توزيع كثافة القدرة الخاص بالإشعاع:

$$\rho(\nu) = \frac{A}{B} \frac{1}{e^{h\nu/k_B T} - 1}. \quad (2-121)$$

للإشعاعات ذات طاقة الفوتون المنخفضة، تُختزل المعادلة 2-121 إلى ما يلي:

$$\rho(\nu) \rightarrow \frac{A}{B} \frac{k_B T}{h\nu}. \quad (2-122)$$

يجب أن تكون مطابقة لقانون رايلي-جينس. وبالمقارنة مع المعادلة 2-90، نجد أن نسبة المعاملين A و B هي:

$$\frac{A}{B} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3}. \quad (2-123)$$

أخيرًا، تُستعاد صيغة بلانك:

$$\rho(\nu) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/k_B T} - 1}. \quad (2-124)$$

مسائل

(2-1) أثبت أن التكتيف C الخاص بمكثف مكون من لوح موصل متوازٍ مع كون الفراغ بمنزلة العازل الكهربائي هو:

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d} [F], \quad (2-125)$$

بحيث A هي المساحة و d هي المسافة فيما بين القطبين الكهربيين.

(2-2) أثبت أن التكتيف C الخاص بمكثف مكون من لوح موصل متوازٍ بوسط ذي ثابت عازل كهربائي نسبي ϵ_r هو:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} [F]. \quad (2-126)$$

احسب تكتيف مكثف بحيث A يساوي 1m^2 و s يساوي 1mm للزجاج والسيليكون.
(2-3) أثبت أن المحاطة L الخاصة بمحث مصنوع من ملف لولبي طويل بعدد معين من اللفات N بمساحة مقطع عرضي A وطول l هي:

$$L = \frac{\mu_0 N^2 A}{l} [H]. \quad (2-127)$$

(2-4) أثبت أن سرعة الضوء v في وسط ذي ثابت عازل كهربائي نسبي ϵ_r هو:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}. \quad (2-128)$$

احسب سرعة الضوء v في الزجاج والسيليكون (مع العلم أن ثابت العازل الكهربائي النسبي ϵ_r للزجاج والسيليكون هو على التوالي 2.25 و 11.7).
(2-5) معامل الانكسار لزجاج النوافذ، n ، هو 1.50. ما مقدار قدرة الضوء المفقود عند المرور بلوح زجاجي في حالة السقوط العمودي؟ (تلميح: هناك سطحان للزجاج/الهواء.)

(2-6) إن نصف قطر الشمس، R هو $6.96 \times 10^8\text{m}$ ، والمسافة بين الشمس والأرض، D هي $1.5 \times 10^{11}\text{m}$ ، والثابت الشمسي هو 1366W/m^2 . احسب درجة حرارة سطح الشمس. (تلميح: استخدم قانون ستيفان-بولتزمان.)

(2-7) ما مقدار شدة المجال الكهربائي لضوء الشمس خارج الغلاف الجوي للأرض مباشرة؟

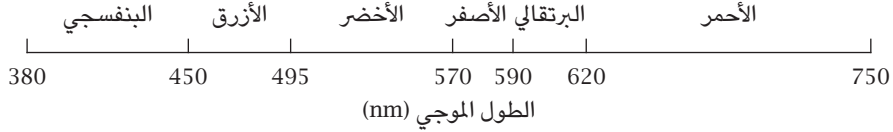
(2-8) ما شدة المجال الكهربائي للإلكترون في ذرة هيدروجين على مسافة نصف قطر بور واحد من البروتون؟

(2-9) حدد الكثافة الطيفية لإشعاع الجسم الأسود لكل وحدة طول موجي بوحدة μm .

فيزياء الطاقة الشمسية

(2-10) باستخدام صيغة إشعاع الجسم الأسود لكل وحدة طول موجي، اشتق قانون فين للإزاحة بوحدة μm .

(2-11) تظهر الأطوال الموجية للضوء المرئي بالألوان المختلفة بـ nm في شكل ٩-٢. احسب الترددات وقيم الطاقة الخاصة بالفوتونات، بـ J و eV.



شكل ٩-٢: الأطوال الموجية للضوء المرئي.

(2-12) ما الثابت الشمسي لكوكب الزهرة؟ افترض أن الشمس مشع أسود بدرجة حرارة 5800K وأن متوسط المسافة بين الزهرة والشمس هو $1.08 \times 10^{11}\text{m}$.

(2-13) لحساب إشعاع الجسم الأسود لطاقة الفوتون من E_0 سهلة الاستخدام بإدخال $x_0 = \epsilon_0/k_B T$ ، وتوسيع مقام المعادلة 2-99 إلى

$$U(T, \epsilon_0) = \frac{2\pi(k_B T)^4}{c^2 h^3} \int_{x_0}^{\infty} \frac{e^{-x} x^3 dx}{1 - e^{-x}} \quad (2-129)$$

$$= \frac{2\pi(k_B T)^4}{c^2 h^3} \sum_{n=1}^{\infty} \int_{x_0}^{\infty} e^{-nx} x^3 dx.$$

أثبت ما يلي:

$$U(T, \epsilon_0) = \frac{2\pi(k_B T)^4}{c^2 h^3} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-nx_0} \left[\frac{x_0^3}{n} + \frac{3x_0^2}{n^2} + \frac{6x_0}{n^3} + \frac{6}{n^4} \right], \quad (2-130)$$

باستخدام

$$x_0 = \frac{\epsilon_0}{k_B T}. \quad (2-131)$$

طبيعة الإشعاع الشمسي

- (2-14) بافتراض أن الشمس مشع أسود بدرجة حرارة 5800K، ما حجم الجزء الأخضر من الإشعاع الشمسي؟ (مع العلم بأن الطول الموجي يتراوح بين 495nm و 570nm).
- (2-15) بافتراض أن الشمس مشع أسود بدرجة حرارة 5800K، ما حجم جزء الإشعاع الشمسي الذي له طاقة فوتون أكبر من 1.1eV؟

الفصل الثالث

أصل الطاقة الشمسية

منذ أواخر القرن التاسع عشر، جرت محاولات حثيثة لقياس كثافة قدرة الإشعاع الشمسي. وبعد ظهور الأقمار الصناعية، أصبحت بيانات الإشعاع الشمسي الموجود خارج الغلاف الجوي متاحة. ومن البيانات المتراكمة حتى اليوم، لم يتجاوز التغير في هذه الكثافة في الموقع المتوسط للأرض خارج الغلاف الجوي 0.1 بالمائة عبر قرن. وعلى الرغم من أن هذه الكمية التي رمزها S ليست ثابتاً فيزيائياً، فهي عادة ما تُسمى الثابت الشمسي:

$$S = 1366 \pm 3 \text{ W/m}^2. \quad (3-1)$$

يمكن تقدير إجمالي قدرة الإشعاع الشمسي، $L_{\odot}$ ، أو ما يعرف بـ «السطوع الشمسي»، باستخدام الثابت الشمسي ومتوسط المسافة بين الشمس والأرض، $A_{\odot}$ ، أو ما يُطلق عليه «الوحدة الفلكية للطول»:

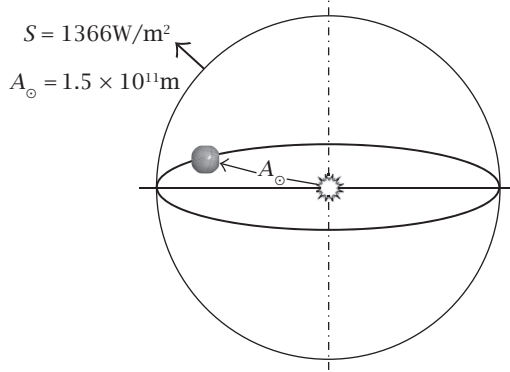
$$A_{\odot} = 1.5 \times 10^{11} \text{ m}, \quad (3-2)$$

الذي يعطي (انظر الشكل ١-٣):

$$L_{\odot} = 4\pi A_{\odot}^2 S = 3.84 \times 10^{26} \text{ W}. \quad (3-3)$$

فيزياء الطاقة الشمسية

إن إجمالي قدرة الإشعاع الشمسي يصل إلى نحو عشرين تريليون مرة استهلاك الطاقة الخاص بالعالم بأكمله، $1.6 \times 10^{13} \text{ W}$. فلماذا لا نعتد على الإشعاع الشمسي كمصدر أساسي للطاقة؟



شكل ٣-١: سطوع الشمس. إن متوسط كثافة قدرة الإشعاع الخاص بضوء الشمس خارج الغلاف الجوي للأرض، S ، أو ما يُطلق عليه «الثابت الشمسي» هو 1366 W/m^2 . كما أن متوسط المسافة بين الشمس والأرض، $A_{\odot}$ ، أو ما يُطلق عليه «الثابت الفلكي»، هو $1.5 \times 10^{11} \text{ m}$ ؛ ومن ثم فإن سطوع الشمس، أو إجمالي قدرة الإشعاع الشمسي، $L_{\odot}$ ، $3.84 \times 10^{26} \text{ W}$.

(١) المعاملات الأساسية للشمس

لقرون خضعت الشمس لدراسة مكثفة من جانب الفلكيين. ولقد فُهمَت جيّدًا المعاملات الأساسية والتركيب الأساسي للشمس [7, 63, 68, 79]. وفيما يلي موجز مختصر لها.

(١-١) المسافة

قيست المسافة بين الشمس والأرض باستخدام طريقة التثليث و«الأصداء الرادارية». ولأن مدار الأرض حول الشمس على شكل قطع ناقص، فالمسافة ليست ثابتة. ففي نحو الثالث من يناير من كل عام، عند «الحضيض»، تكون المسافة في أدنى قيمة لها، $1.471 \times 10^{11} \text{ m}$ ، وفي نحو الثالث من يوليو كل عام، عند «الأوج»، تكون المسافة في أقصى قيمة لها،

أصل الطاقة الشمسية

$1.521 \times 10^{11} \text{m}$. ويُعامل متوسط المسافة، $A_{\odot} = 1.5 \times 10^{11} \text{m}$ ، (ارجع إلى المعادلة 3-2) باعتباره معاملًا أساسيًا في الفلك.

وإلى جانب المسافة بالمتر، حُدِّدَ بدقة عالية متوسط زمن وصول الضوء من الشمس إلى الأرض، $\tau_{\odot}$ ، أو ما يُطلق عليه «الزمن الضوئي للوحدة الفلكية للمسافة». وبالنسبة لكل التطبيقات العملية الخاصة بالطاقة الشمسية، فإن القيمة التقريبية لهذا الزمن، المضبوطة لـ 0.2 بالمائة، هي كالتالي وهي تستحق الحفظ:

$$\tau_{\odot} = 500 \text{s}. \quad (3-4)$$

(٢-١) الكتلة

تُقاس كتلة الشمس باستخدام قانون كبلر والمعاملات المدارية للكواكب. مرة أخرى، بالنسبة لكل التطبيقات العملية، فإن القيمة التقريبية لتلك الكتلة، المضبوطة لـ 1 بالمائة، هي كالتالي وهي تستحق الحفظ:

$$m_{\odot} = 2 \times 10^{30} \text{kg}. \quad (3-5)$$

إنها تساوي 333 ألف مرة كتلة الأرض. ونتيجة للإشعاع وطاقة الرياح، تفقد الشمس 10^{17}kg من كتلتها كل عام، وهو أمر لا يُذكر. عملياً، كتلة الشمس ثابتة عبر عمرها.

(٣-١) نصف القطر

يُقاس نصف قطر الشمس من خلال القطر الزاوي للقرص المرئي. ولأن المسافة بين الشمس والأرض ليست ثابتة، فإن القطر الزاوي للشمس ليس ثابتاً. وهو يتراوح بين $31.6'$ و $32.7'$. ومتوسط القيمة هي $32'$ دقيقة قوسية أو 0.533 درجة. وباستخدام متوسط المسافة $A_{\odot}$ ، يكون نصف قطر الشمس كما يلي:

$$r_{\odot} = \frac{1.5 \times 10^{11} \times 0.533}{2 \times 57.3} \text{m} \cong 6.96 \times 10^8 \text{m}. \quad (3-6)$$

وباستخدام القيمة السابقة، يكون حجم الشمس $1.412 \times 10^{27} \text{m}^3$ ومتوسط كثافتها 1.408g/cm^3 .

(٤-١) قدرة الانبعاث

يمكن حساب قدرة انبعاث سطح الشمس، ب W/m^2 ، من خلال المعادلتين 3-3 و 3-6:

$$U_{\odot} = \frac{L_{\odot}}{4\pi r_{\odot}^2} = \frac{3.84 \times 10^{26}}{4\pi (6.96 \times 10^8)^2} \cong 63.1 \text{MW/m}^2. \quad (3-7)$$

(٥-١) درجة حرارة السطح

باعتبار الشمس جسمًا أسود، يمكن حساب درجة الحرارة من خلال قانون ستيفان-بولتزمان. فباستخدام المعادلات 3-7 و 2-99 و 2-101:

$$T_{\odot} = \left[\frac{U_{\odot}}{\sigma} \right]^{1/4} = \left[\frac{63.1 \times 10^6}{5.67 \times 10^{-8}} \right]^{1/4} \cong 5800 \text{K}. \quad (3-8)$$

في الأدبيات، تختلف درجة حرارة سطح الشمس من مصدر لآخر، وتتراوح بين 5600K و 6000K. والفرق غير ذي بال. وعبر هذا الكتاب، سنستخدم القيمة 5800K باعتبارها درجة الحرارة الاسمية لسطح الشمس. هذه القيمة ليست فقط سهلة في التذكر، ولكن أيضًا مساوية تمامًا لـ 0.5eV، وهو أمر مفيد عند تناول الخلايا الشمسية.

(٦-١) التركيب

لا يتماثل طيف الإشعاع الشمسي على نحو دقيق مع طيف إشعاع الجسم الأسود. ويقدم التركيب الدقيق للطيف الشمسي صورة عن تركيبه الكيميائي (انظر الجدول ٣-١). في واقع الأمر، يأتي ثاني أكثر عنصر توفراً في الشمس، وهو الهيليوم، الذي اكتُشف من طيف الإشعاع الشمسي، من الكلمة الإغريقية helios، أي، الشمس.

أصل الطاقة الشمسية

جدول ٣-١: التركيب الكيميائي للشمس.*

العنصر	العدد الذري	الوزن الجزيئي	الوفرة (بالنسبة المئوية من عدد الذرات)	الوفرة (بالنسبة المئوية من الكتلة)
الهيدروجين	1	1.008	91.2	71.0
الهيليوم	2	4.003	8.7	27.1
الأكسجين	8	16.000	0.078	0.97
الكربون	6	12.011	0.043	0.40
النيتروجين	7	14.007	0.0088	0.096
السيليكون	14	28.086	0.0045	0.099
المغنسيوم	12	24.312	0.0038	0.076
النيون	10	20.183	0.0035	0.058
الحديد	26	55.847	0.0030	0.14

* المصدر: مرجع [79].

(٢) التقدير الزمني الخاص بكلفن وهلمهولتز

لقرون، كان أصل ضوء الشمس مثار بحث أساسي لكل الثقافات. في وسط القرن التاسع عشر، نضج مجال الديناميكا الحرارية. وينص القانون الأول للديناميكا الحرارية على أن الطاقة يمكن فقط أن تغير شكلها لكنها لا تفنى ولا تُستحدث من عدم. فالإشعاع الشمسي الهائل يستنزف ظاهرياً كميات ضخمة من الطاقة من الشمس. في خمسينيات القرن التاسع عشر، قام السير وليم طومسون (انظر الشكل ٣-٢)، الذي يُعد أحد مؤسسي علم الديناميكا الحرارية، بدراسة متعمقة عن أصل طاقة الشمس اعتماداً على المعرفة الفيزيائية المتوفرة في ذلك الوقت [81]. وقد رأى أن الطاقة الكيميائية لا يمكن أن تكون الإجابة؛ لأنه حتى لو كانت الشمس مصنوعة من الفحم وتحترق بالكامل، فيمكن للطاقة الكيميائية أن توفر بضعة آلاف الأعوام من ضوء الشمس. والتفسير الوحيد المبني على المعرفة المتوفرة في ذلك الوقت هو التقلص الجذبوي للشمس، الذي اقترحه على نحو

منفصل الفيزيائي الألماني هيرمان فون هلمهولتز؛ انظر الشكل ٣-٣ (a). فعندما يقترب نيزكان بكتلتَي m_1 و m_2 من اللانهائية لمسافة r ، تقل طاقة الوضع عن طريق:

$$U = -\frac{Gm_1m_2}{r}, \quad (3-9)$$

بحيث G الذي يساوي $6.67 \times 10^{-11} \text{N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$ هو ثابت الجاذبية. وبسبب قوة الجاذبية، يكتسب النظام طاقة حركية:

$$E_K = \frac{Gm_1m_2}{r}. \quad (3-10)$$

بافتراض أن الشمس تكونت باندماج عدد كبير من النيازك في كرة بنصف قطر $r_\odot$ ، كما هو موضح في الشكل ٣-٣ (b)، يمكن اكتساب طاقة حركية من خلال قوة الجاذبية. وتعتمد قيمة اكتساب الطاقة على توزيع الكتلة. وبالتناظر مع معادلة 3-10، يمكن أن ننتج تقديرًا تقريبيًا جيدًا لاكتساب الطاقة:

$$E_K \cong \frac{GM_\odot^2}{r_\odot}. \quad (3-11)$$

من الواضح أن هذا تقدير مفرط. على سبيل المثال، بحساب اكتساب الطاقة في ظل توزيع كتلة منتظم، يظهر عامل عددي قيمته 0.6، لكن معادلة 3-11 تعطي حدًا أعلى. وبناءً على افتراض كلفن-هلمهولتز، يمكن حساب عمر الشمس بقسمة قيمة اكتساب الطاقة هذه على معدل فقد الطاقة، أو السطوع الشمسي $L_\odot$:

$$\tau_{KH} \cong \frac{GM_\odot^2}{r_\odot L_\odot} = \frac{6.67 \times 10^{-11} \times (2 \times 10^{30})^2}{6.96 \times 10^8 \times 3.84 \times 10^{26}} \approx 10^{15} \text{s}. \quad (3-12)$$

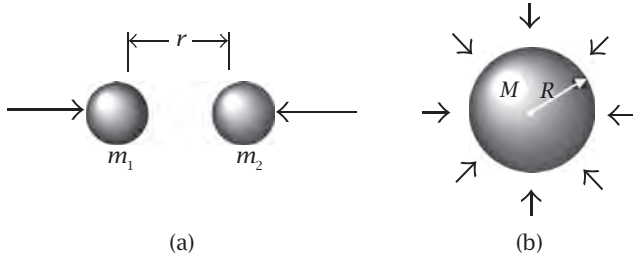
تُسمى الكمية τ_{KH} ، التي تبلغ نحو 30 مليون سنة، «التقدير الزمني الخاص بكلفن وهلمهولتز». وبناءً على هذا الحساب، ادعى اللورد كلفن أن عمر الشمس يجب ألا يتجاوز 30 مليون سنة [81].

أصل الطاقة الشمسية



شكل ٣-٢: السير وليم طومسون. هو فيزيائي اسكتلندي وُلد في أيرلندا (1824–1907)، ومعروف أيضًا باسم اللورد كلفن، ويُعد أحد مؤسسي علم الديناميكا الحرارية. وقد أرجع أصل طاقة الشمس للتقلص الجذبوي وادعى أن الشمس لا يمكن أن تسطع لأكثر من 30 مليون سنة. واستخدم نظريته لرفض جيولوجيا السير تشارلز لايل وكذلك البيولوجيا التطورية لتشارلز داروين خاصة؛ حيث إن كليهما يفترضان أن عمر الشمس يجب أن يكون على الأقل مليار عام. وقد أنهى هذا الخلاف ألبرت أينشتاين وهانس بيته في القرن العشرين. الصورة هنا من أعمال هوبرت هيركوفر، ومعرضة بإذن من متحف سميثسونيان.

في ذلك الوقت، كان علم الجيولوجيا قد ثبتت دعائمه بالفعل اعتمادًا على تراكم قرنين من الاكتشافات والدراسات الخاصة بأنواع الوقود الحفري وكذلك الطبقات الجيولوجية، التي لخصها السير تشارلز لايل في ثلاثينيات القرن التاسع عشر في عمل مكون من ثلاثة مجلدات بعنوان «عناصر الجيولوجيا» [55]. وأظهرت الأدلة الجيولوجية أن الأرض وُجدت منذ أكثر من مليار عام تحت ظروف إضاءة شمسية منتظمة على نحو أساسي. وفسر تشارلز داروين تسلسل الاكتشافات في علم الحفريات من خلال التطور عبر الانتقاء



شكل ٣-٣: نموذج كلفن-هلمهولتز. هو نموذج لأصل الطاقة الشمسية اعتماداً على التقلص الجذبوي. (a) عندما يقترب نيزكان كل منهما من الآخر من اللانهاية، تقل طاقة الوضع الخاصة الجاذبية وتزيد الطاقة الحركية. (b) إذا تكونت الشمس من اندماج عدد كبير من النيازك، فيمكن تحويل طاقة الجاذبية إلى طاقة حركية؛ ومن ثَمَّ تشع على هيئة حرارة.

الطبيعي في عمله الشهير المنشور في عام 1859 الذي كان بعنوان «أصل الأنواع» [20]. وطبقاً للایل وداروين [20, 55]، أثبتت أدلة عديدة في علم الحفريات أن الشمس سطعت على نحو منتظم للمليار عام على الأقل. ويتعارض على نحو مباشر ادعاء اللورد كلفن بأن عمر الشمس لا يزيد عن 20 مليون عام مع النتائج التي جرى التوصل إليها في علمي الجيولوجيا والأحياء.

يرجع الخلاف إلى القصور الموجود في نظرية الفيزياء في العصر الفيكتوري. ففي 27 أبريل من عام 1900، أعطى اللورد كلفن محاضرة في المعهد الملكي لبريطانيا العظمى بعنوان «سحابتان من القرن التاسع عشر تُغيّمان على النظرية الديناميكية للحرارة والضوء» [82]. ذكر كلفن أن «جمال النظرية ووضوحها» غيمت عليهما «سحابتان»: فشل تجربة مايكلسون-مورلي والصعوبات في تفسير قانون ستيفان-بولتزمان لإشعاع الجسم الأسود بناءً على الميكانيكا الإحصائية الكلاسيكية. اعتقد كلفن أن هاتين المشكلتين صغيرتان ويمكن حلّهما في إطار الفيزياء الكلاسيكية، لكن بعد عامين من وفاته، في عام 1905، تطورت «السحابتان» وتحولتا إلى عاصفة قوية في الفيزياء النظرية مع ظهور النظرية النسبية والنظرية الكمية، اللتين قضتا بالكامل على نظرية كلفن-هلمهولتز عن أصل الطاقة الشمسية.

حُلَّ لغز أصل الطاقة الشمسية بعد تحديد ألبرت أينشتاين للعلاقة بين الطاقة والكتلة [26] وبعد الدراسة المفصلة التي قام بها هانس بيته 1938 التي أكد فيها أن الاندماج النووي هو أصل الطاقة النجمية [8, 9]. ويتوافق التقدير الزمني لبيته على نحو تام مع تقدير عمر الشمس اعتمادًا على اكتشافات لايل وداروين.

(٣) مصدر طاقة الشمس

يمكن معرفة مصدر الطاقة النجمية من خلال آخر الأبحاث الخمسة التي كتبها أينشتاين في عام 1905، الذي كان بعنوان «هل القصور الذاتي للجسم يعتمد على محتواه طاقته؟» باستخدام الترميز المعاصر، يكون رأي أينشتاين كما يلي [26]:

إذا أصدر جسم طاقة ΔE في شكل إشعاع، فإن كتلته تقل بـ $\Delta E/c^2$. ولأن ما إذا كانت الطاقة المفقودة من الجسم تصبح إشعاعًا أو غير ذلك أمر لا يهم، فيمكن أن نتوصل إلى نتيجة أكثر عمومية وهي أن كتلة أي جسم هي مقياس لمحتواه من الطاقة؛ فإذا تغيرت الطاقة بـ ΔE ، تغيرت الكتلة من ثم بـ $\Delta E/c^2$.

من ثم، إذا كانت الكتلة الأولية للجسم هي m_0 وكتلته النهائية هي m_1 و Δm هي حاصل طرح m_0 و m_1 ، فيمكن للإشعاع أن يُصدر بطاقة:

$$\Delta E = \Delta mc^2. \quad (3-13)$$

باستخدام البيانات التجريبية الهائلة المتاحة بالفعل في ذلك الوقت عن التفاعل النووي، في عام 1938، قام هانس بيته (انظر الشكل ٣-٤) بدراسة دقيقة لكل التفاعلات النووية الممكنة التي يمكن أن تولد طاقة نجمية [8, 9]. وخلص إلى أنه بالنسبة للنجوم ذات الكتلة المماثلة لكتلة الشمس أو الأقل منها تسود سلسلة البروتون-بروتون. وبالنسبة للنجوم ذات الكتلة الأكبر بكثير من كتلة الشمس، تسود العملية المُحفَّزة من خلال الكربون والنيوترونين والأكسجين (سلسلة الكربون).

(١-٣) سلسلة البروتون-بروتون

إن كتلة البروتون هي $1.672623 \times 10^{-27} \text{kg}$ ، في حين أن كتلة أي نواة هيليوم (جسيم ألفا) هي $6.644656 \times 10^{-27} \text{kg}$. وفي كل مرة تندمج فيها أربعة بروتونات في جسيم ألفا واحد، تكون هناك كتلة زائدة:

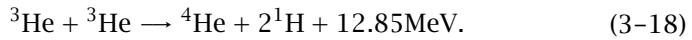
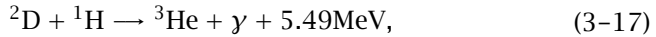
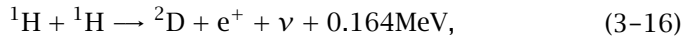
$$\begin{aligned} \Delta m &= (4 \times 1.672623 - 6.644656) \times 10^{-27} \text{kg} \\ &= 4.5836 \times 10^{-29} \text{kg}. \end{aligned} \quad (3-14)$$

وباستخدام معادلة أينشتاين، تكون الطاقة الزائدة هي:

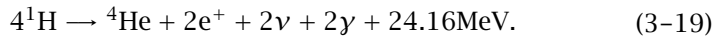
$$\begin{aligned} \Delta E &= 4.5836 \times 10^{-29} \times (2.99792 \times 10^8)^2 \\ &= 4.11952 \times 10^{-12} \text{J}, \end{aligned} \quad (3-15)$$

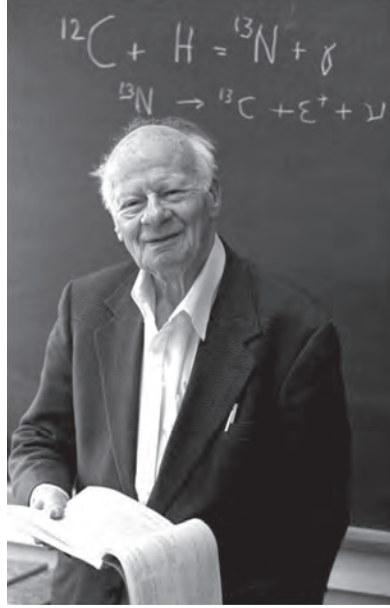
أو 25.7148MeV . بعبارة أخرى، كل ذرة هيدروجين مشتركة في التفاعل تولد 6.4287MeV من الطاقة.

لكن، كما هو موضح أدناه، جزء من الطاقة يصدر في شكل نيوتريونات، تمر عبر الشمس والأرض؛ لذا فإن طاقة الإشعاع المولدة في التفاعل النووي تقل:



والتفاعل الإجمالي هو:





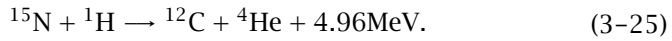
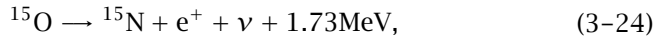
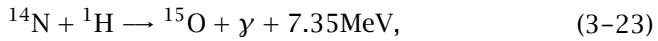
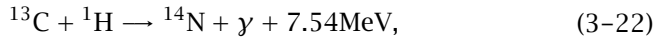
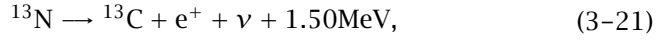
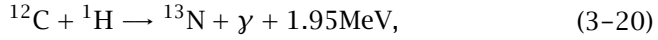
شكل ٣-٤: هانس ألبرخت بيته. فيزيائي أمريكي وُلد في ألمانيا (1906-2005) حاصل على جائزة نوبل عن نظريته التي قدمها في عام 1938 عن الاندماج النووي كأصل للطاقة النجمية. وكفيزيائي نظري متعدد المواهب، قدم أيضًا إسهامات مهمة في الديناميكا الكهربائية الكمية والفيزياء النووية وفيزياء الحالة الصلبة والفيزياء الفلكية. وقد ترك ألمانيا في عام 1933 عندما وصل النازيون إلى السلطة وفقد وظيفته في جامعة توبنجن. انتقل في البداية لإنجلترا ثم للولايات المتحدة الأمريكية في عام 1935 وانضم لهيئة التدريس في جامعة كورنيل، وهو المنصب الذي شغله لباقي حياته المهنية. وفي أثناء الحرب العالمية الثانية، عينه جون أوبنهايمر مديرًا للقسم النظري لمشروع مانهاتن في مختبر لوس ألاموس. وفيما بين عامي 1948 و1949، كان أستاذًا زائرًا في جامعة كولومبيا. الصورة الفوتوغرافية معروضة بإذن من ميكائيل أوكونيوسكي، ومأخوذة في جامعة كورنيل في 19 ديسمبر من عام 1996.

(٢-٣) سلسلة الكربون

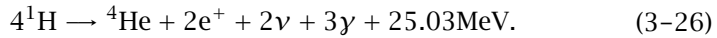
بالنسبة للنجوم ذات الكتلة الأكبر من الشمس، فإن سلسلة الكربون أو سلسلة الكربون والنيوتروجين والأكسجين، تسود عملية توليد الطاقة. لاحظ أن الكربون ونوى النيتروجين

فيزياء الطاقة الشمسية

تعمل فقط كعوامل محفزة. والنتيجة الإجمالية تكون مرة أخرى اتحاد أربعة بروتونات لتكوين نواة هيليوم أو جسيم ألفا.



والتفاعل الإجمالي هو:

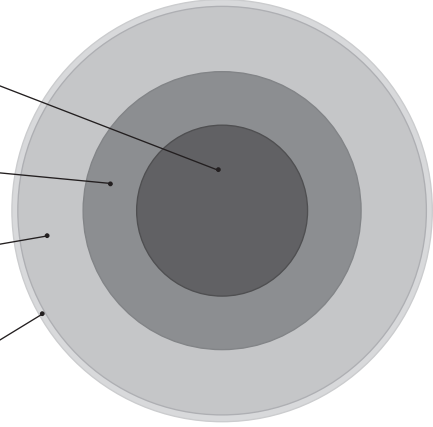


(٣-٣) التركيب الداخلي للشمس

عند رصد الشمس من الأرض، نجد أن الشمس كرة ذات درجة حرارة متساوية تقريباً، 5800K. والتركيب الداخلي للشمس لا يمكن رصده، لكن يمكن استنتاجه باستخدام قوانين الفيزياء، ويعتمد نموذج بسيط لتركيب الشمس على تقدير تقريبي يرى أن الشمس مكوّنة من طبقات كروية مصنوعة من مواد متجانسة. والمعامل المكاني الوحيد هو المسافة النصف قطرية من المركز. ويحدد التوازن بين قوة الجاذبية وضغط الإشعاع كثافتها وتوزيع درجة الحرارة بها. ومصدر الطاقة تفاعل نووي كما هو موضح في

أصل الطاقة الشمسية

- النواة:** الحجم 7 بالمائة، والكتلة 50 بالمائة، ودرجة الحرارة 15000000K، وهي تُعد محرك توليد الطاقة.
- منطقة الإشعاع:** تنتقل الفوتونات ببطء إلى السطح.
- منطقة الحمل الحراري:** يبرد الغاز الشمسي ويتعرض لحركة عنيفة.
- الغلاف الضوئي:** سمك 400km ودرجة حرارة 5800K، ويُعد السطح المرئي من الشمس.



شكل ٣-٥: التركيب الداخلي للشمس. إن نواة الشمس، ذات الكثافة التي تصل إلى نحو 100g/cm^3 ودرجة الحرارة التي تتراوح بين 10000000K و 15000000K ، هي محرك توليد الطاقة. وتنتقل طاقة الإشعاع المولدة في النواة للسطح عبر منطقة الإشعاع. وعبر منطقة الحمل الحراري، تنبعث طاقة الإشعاع من خلال الغلاف الضوئي. والحدود بين الطبقات الكروية المتجاورة تدريجية وليست محددة بدقة.

الفصل الثالث - قسم (٣). ومعاملات النموذج تُحدّد من خلال مقارنة ناتج النموذج مع عمليات الرصد.

يظهر النموذج القياسي الحالي في الشكل ٣-٥ [7, 68]. إن نواة الشمس، ذات الكثافة التي تصل إلى نحو 100g/cm^3 ودرجة الحرارة التي تتراوح بين 10^6K و $15 \times 10^6\text{K}$ ، هي محرك توليد الطاقة. هنا النوى والإلكترونات تتحدان لتكون بلازما كثيفة وفائقة الحرارة. وتنتقل طاقة الإشعاع المولدة في النواة، التي تكون في الغالب أشعة جاما، للسطح عبر منطقة الإشعاع. وكثافة منطقة الإشعاع تقل من نحو 5g/cm^3 إلى نحو 1g/cm^3 . ويحتاج أي فوتون إلى نحو 170 ألف عام لاجتياز تلك المنطقة. ومنطقة الحمل الحراري، التي كثافتها أقل من كثافة الماء، هي منطقة حركة عنيفة. والغلاف الضوئي — وهي بلازما من الهيدروجين والهيليوم بكثافة أقل بكثير من تلك الخاصة بالغلاف الجوي للأرض لكنها معتمدة تمامًا — هو المُشع المعتم الذي يُشع ضوء الشمس.

مسائل

(3-1) طبقاً لاحتياطي الهيدروجين الحالي الموجود في الشمس وخرج الطاقة، إذا كانت كفاءة توليد الإشعاع من خلال سلسلة البروتون-بروتون 90 بالمائة، فكم عدد السنوات التي يمكن أن تظل فيها الشمس تحترق؟

(3-2) بافتراض أن نصف القطر النووي R يتبع الصيغة البسيطة التالية: $R = r_0 A^{1/3}$ ، بحيث يكون A هو عدد الكتلة الذرية (أي حاصل جمع عدد البروتونات Z وعدد النيوترونات N) و r_0 يساوي $1.25 \times 10^{-15} \text{m}$ ، ما مقدار الطاقة الحركية التي يحتاجها أي بروتون (نواة الهيدروجين) ليلمس نواة كربون؟

(3-3) إذا كانت الطاقة الحركية لنواة الهيدروجين $E_k = 1/2 k_B T$ ليصل 0.1 بالمائة من نوى الهيدروجين لعتبة الطاقة لحدوث تفاعل الكربون والنيتروجين والأكسجين، فما أقل درجة حرارة يمكنها بدء عملية الاندماج النووي؟

الفصل الرابع

تتبع ضوء الشمس

بسبب دوران الأرض حول نفسها وحركتها المدارية حول الشمس، يتغير الموقع الظاهري للشمس في السماء عبر الوقت. وللاستغلال الكفء للطاقة الشمسية، يجب أن نفهم الحركة الظاهرية للشمس. ويمكن أن تكون النظرية المفصلة للمجموعة الشمسية في الفلك والبيانات الموجودة في «التقويم الفلكي» معقدة بشدة. في هذا الفصل، سنقدم نموذجًا بسيطًا ينتج صيغًا يسهل برمجتها على كمبيوتر مصغر ودقيقة على نحو كافٍ فيما يتعلق باستخدام الطاقة الشمسية. وقد اشتقت صيغ تحليلية وعُرضت هنا.

(١) دوران الأرض: دائرة العرض وخط الطول

يعرض الشكل ٤-١ الحركة الظاهرية للنجوم في السماء بالليل. وترجع هذه الحركة لدوران الأرض حول محورها. وبالنسبة للتطبيقات الخاصة بالطاقة الشمسية، يمكن أن نعتبر الأرض كرة تامة تدور بسرعة متجهة زاوية ثابتة حول محور ثابت. ومحور دوران الأرض يتقاطع مع سطحها عند نقطتين: «القطب الشمالي» و«القطب الجنوبي». والدائرة العظمى العمودية على المحور هي «خط الاستواء». ويمكن تحديد أي موقع على الأرض باستخدام إحداثيين، هما دائرة العرض ϕ وخط الطول λ ، كما يظهر في الخريطة أو نظام تحديد المواقع العالمي (جي بي إس). يحدد خط الطول «خط زوال» (وهو نصف دائرة عظمى تمر عبر القطبين والموقع). وفي حين أن دائرة العرض تُحدد على نحو فريد من خلال القطبين وخط الاستواء، فإن خط الطول يتطلب نقطة أصل كنقطة الصفر، ألا وهو «خط الزوال الرئيسي». اختير خط الزوال الرئيسي من قبل مؤتمر خط الزوال الرئيسي الدولي الذي عُقد في أكتوبر من عام 1884 في واشنطن ليكون خط الزوال المار

عبر نقطة مميزة في مرصد جرينتش الملكي بالقرب من لندن؛ ولذا عادةً ما يُطلق عليه «خط زوال جرينتش». يعرض الشكل ٢-٤ لتعريف خط الطول ودائرة العرض.



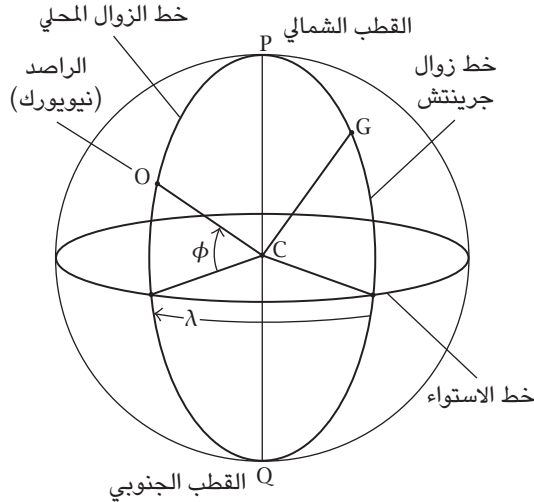
شكل ١-٤: سماء الليل. بتوجيه كاميرا تجاه السماء في الليل والتعريض لبعض الوقت، يبدو أن النجوم تدور حول القطب الشمالي السماوي. هذه الصورة التقطها روبرت كنان، بورتلاند، أوريغون، ومعرضة بإذن منه. انظر موقع www.modernartphotograph.com.

(٢) الكرة السماوية

من وجهة نظر أي راصد على الأرض توجد الشمس، وكذلك أي نجم، على كرة ذات نصف قطر كبير لكن غير محدد. والكرة المتخيلة هي «الكرة أو القبة السماوية». ويشيع استخدام نظامي إحداثيات لوصف موقع أي جرم فلكي على الكرة السماوية، وهما «النظام الأفقي» و«النظام الاستوائي».

يشير امتداد مركز الأرض وراصد O في السماء إلى «نقطة السمات» Z (انظر الشكل ٢-٤)، ويُسمى المستوى المتعامد على هذا الخط أو الدائرة العظمى المقابلة «الأفق». ويقسم

تتبع ضوء الشمس

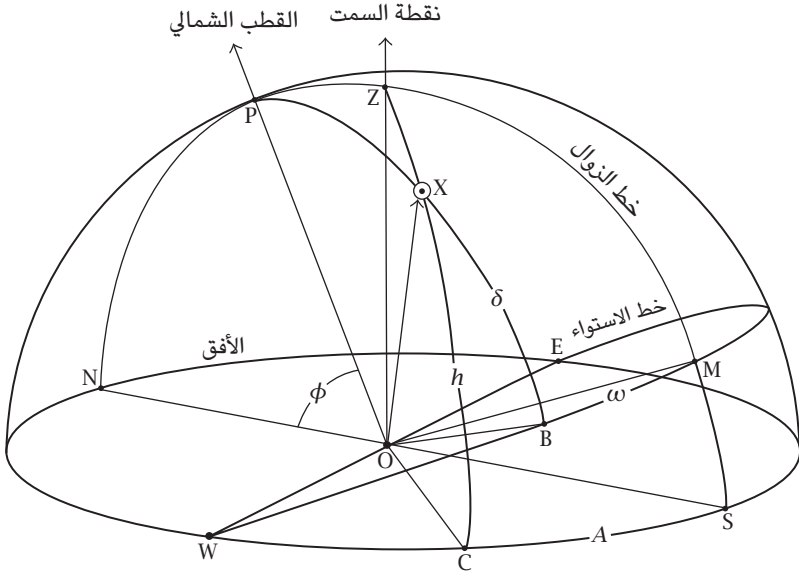


شكل ٤-٢: دائرة العرض وخط الطول: تعني نقطة صفر خط الطول، خط الزوال الرئيسي، خط الزوال المار عبر مرصد جرينتش الملكي. ويوجد شرق خط الزوال هذا، نصف الكرة الأرضية الشرقي، وفي غربه نصف الكرة الأرضية الغربي. وبالمثل، شمال خط الاستواء هو نصف الكرة الأرضية الشمالي، وجنوبه نصف الكرة الأرضية الجنوبي. ويُحدّد موقع الراصد بدائرة عرضه ϕ وخط طوله λ ، كما يظهر في الخريطة، ويمكن تحديده باستخدام نظام تحديد المواقع العالمي. يكون خط الطول إذا كان في الشرق موجباً وإذا كان في الغرب سالباً، وتكون دائرة العرض موجبة إذا كانت في الشمال وسالبة إذا كانت في الجنوب. على سبيل المثال، دائرة عرض مدينة نيويورك هي $40^\circ 47'$ شمالاً، أو $+0.712 \text{ rad}$ ، وخط طولها $73^\circ 58'$ غرباً أو -1.29 rad .

الأفق الكرة إلى نصفين كرويين. يكون نصف الكرة العلوي مرئياً للراصد، أما نصف الكرة السفلي، فمختفٍ تحت الأفق. والمسافة الزاوية لأي جرم سماوي فوق الأفق هي «ارتفاعه» h . وفي أدبيات الفلك، يُستخدم أيضاً مصطلح «العلو». من الواضح أن ارتفاع القطب الشمالي P يساوي دائرة العرض الجغرافية للراصد، ϕ .

من أجل التحديد الكامل لموقع جرم سماوي X ، نحتاج لنقطة مرجعية أخرى. تُسمى الدائرة الكبيرة التي تربط نقطة السمّت والقطب الشمالي «خط الزوال». وهو يتقاطع مع

فيزياء الطاقة الشمسية



شكل ٤-٣: الكرة السماوية والتحويل الإحداثي. يحدّد النظام الأفقي موقع أي جرم سماوي X كما يُرصد على نحو مباشر من جانب الراصد. والمسافة الزاوية لأي جرم سماوي X للأفق هي «ارتفاعه» h ، الذي يُطلق عليه أيضًا «العلو». والإحداثي الآخر هو «السمت». ونقطة الصفر للسمت هي النقطة الجنوبية للأفق. في النظام الإحداثي الاستوائي، القطب الشمالي هو النقطة المرجعية. فخط الاستواء السماوي هو المستوى الأساسي. والمسافة بين أي جرم سماوي وخط الاستواء هي «ميله»، δ . والإحداثي الآخر هو الزاوية الساعية ω . وتُعرف نقطة صفر تلك الزاوية باسم خط الزوال؛ يمر نصف الدائرة العظمى عبر القطب السماوي الشمالي ونقطة السمت. ولتحويل الإحداثيات من النظام الأفقي للنظام الاستوائي والعكس، تُطبّق متطابقات حساب المثلثات الكروية على مثلث كروي مكون من الرؤوس Z (نقطة السمت) و P (القطب السماوي الشمالي) والجرم السماوي X .

الأفق في النقطة S ، التي تُسمى «النقطة الجنوبية للأفق». ولتحديد موقع جرم سماوي فيما يتعلّق بالنقطة الجنوبية، نرسم دائرة كبيرة عبر نقطة السمت والنجم تتقاطع مع الأفق في النقطة C . وتُعرف الزاوية $\widehat{SC}$ باسم «السمت» A أو الاتجاه الأفقي للجرم السماوي. وفيما يتعلّق باستخدام الطاقة الشمسية، نعتبر أن تعريف السمت يكون في اتجاه الغرب؛ من ثَم فإن سمت الشمس دائماً ما يزيد عبر الوقت.

ويحدّد النظام الأفقي موقع أي جرم سماوي كما يُرصد على نحو مباشر من جانب الراصد، لكن لأن الأرض مستديرة وتدور حول محورها، فإن تلك الإحداثيات تعتمد على موقع الراصد وتختلف عبر الوقت. وفي «النظام الإحداثي الاستوائي» على الجانب الآخر، فإن موقع الشمس لا يعتمد نسبياً على موقع الراصد. ويمكن الحصول على إحداثيات الشمس في النظام الاستوائي من خلال تحويل إحداثي لإحداثياتها في النظام الأفقي. في النظام الاستوائي، المقابل الإحداثي لدائرة عرض الأرض هو «الميل»، δ ، والمقابل الإحداثي لخط طول الأرض بالنسبة لراصد ثابت هو «الزاوية الساعية»، ω ؛ انظر الشكل ٤-٣.

كما هو موضح، الميل هو المسافة الزاوية بين الجرم السماوي وخط الاستواء السماوي. وهو موجب النسبة للنجوم الموجودة شمال خط الاستواء السماوي وسالب لتلك الموجودة جنوبه.

كما ذكرنا من قبل، إن الدائرة العظمى التي تربط نقطة السمّ والقُطب السماوي هي «خط الزوال»، الذي يُعد النقطة المرجعية المكافئة لخط زوال جرينتش في الجغرافيا، والذي يتقاطع مع خط الاستواء في النقطة M . وتُسمى الدائرة العظمى الرابطة بين القطب السماوي والنجم «الدائرة الساعية» التي تتقاطع مع خط الاستواء عند النقطة B . والزاوية $\widehat{MB}$ هي «الزاوية الساعية» ω ، المكافئة لخط الطول على الأرض. والقاعدة تقول إن الزاوية الساعية تكون موجبة إذا كان الجرم السماوي يقع غرب خط الزوال. وهذا طبيعي وملائم لموقع الشمس؛ حيث إن زاويته الساعية تحدد «التوقيت الشمسي». هناك إحداثي آخر شائع الاستخدام في الفلك بدلاً من الزاوية الساعية وهو «المطلع المستقيم» α ، الذي يعتبر «الاعتدال الربيعي» النقطة المرجعية. وسنعرض لهذا الإحداثي في القسم اللاحق.

جدول ٤-١: الكميات والرموز المستخدمة في علم الفلك الموضوعي.

الكمية	الرمز	التعريف
دائرة العرض	ϕ	إحداثي جغرافي
خط الطول	λ	إحداثي جغرافي
الارتفاع	h	يُعرف أيضًا بالعلو

الكمية	الرمز	التعريف
السمت	A	الاتجاه الأفقي
الميل	δ	المسافة الزاوية لخط الاستواء
الزاوية الساعية	ω	بالراديان، باتجاه الغرب
الزاوية الساعية عند غروب الشمس	ω_s	بالراديان، موجبة دائماً
الزاوية الساعية الشرقية-الغربية	ω_{ew}	بالراديان، موجبة دائماً
المطلع المستقيم	α	الإحداثي السماوي المطلق
خط الطول البروجي المتوسط	l	على المستوى البروجي
خط الطول البروجي الحقيقي	θ	على المستوى البروجي
الانحراف المداري	e	حالياً يساوي تقريباً 0.0167
الميلان البروجي	ε	حالياً يساوي تقريباً 23.44 درجة

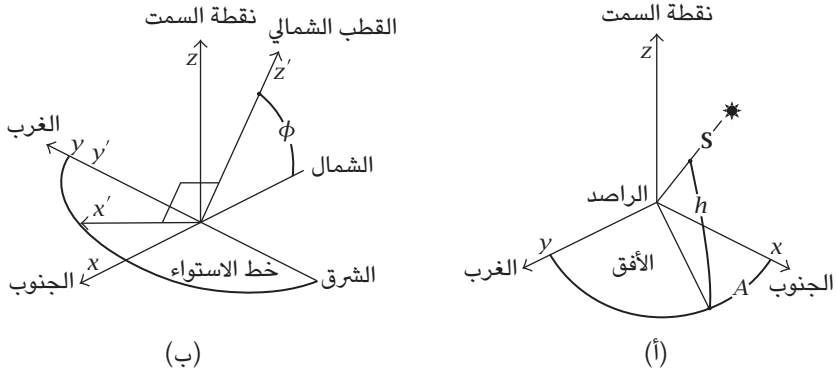
(٢-١) التحويل الإحداثي: الإحداثيات الكارتيزية

الطريقة القياسية للتحويل الإحداثي في علم الفلك الموضوعي هي استخدام «حساب المثلثات الكروية»، الذي يوجد ملخص موجز له في الإحداثيات الكارتيزية ثنائية الأبعاد والإحداثيات القطبية الكروية. ويُعد التعامل مع مسألة ثنائية الأبعاد باستخدام طرق ثلاثية الأبعاد؛ أمراً زائداً عن الحاجة هنا، لكن لأن معظم الفيزيائيين والمهندسين معتادون على استخدام مثل هذا الأسلوب، فربما يكون أسهل في فهمه.

تظهر الإحداثيات الكارتيزية للنظام الأفقي في الشكل ٤-٤(أ). ولأن كل الأجرام السماوية تتحرك من الشرق للغرب؛ فإن x يمثل الجنوب و y الغرب و z نقطة السمت. ويتحدد أي متجه وحدة يشير لجرم سماوي بزاويتين. الزاوية القطبية هي الارتفاع h ، وزاوية السمت A تعتبر الجنوب نقطة الصفر الخاص بها. وكما هو موضح في الشكل ٤-٤(أ)، وباستخدام متجهات الوحدة الثلاث i و j و k للإشارة إلى x و y و z على التوالي، فإن أي متجه وحدة S يشير للشمس يكون كما يلي:

$$S = i \cos h \cos A + j \cos h \sin A + k \sin h. \quad (4-1)$$

تتبع ضوء الشمس



شكل ٤-٤: التحويل الإحداثي بالإحداثيات الكارتيزية. (أ) تستخدم الإحداثيات الكارتيزية للنظام الأفقي x للجنوب و y للغرب و z لنقطة السمّ. ويتحدّد موقع أي جرم سماوي من خلال زاويتين: الارتفاع h وزاوية السمّ A . (ب) الإحداثيات الكارتيزية للنظام الاستوائي تستخدم المحور z' للإشارة للقُطب الشمالي، ويتماثل المحور y' الخاص بالمحور الشرقي الغربي مع ذلك الخاص بالنظام الأفقي. ويكون المحور x' عمودياً على الاثنين. ويتحدّد موقع أي جرم سماوي من خلال الميل δ والزاوية الساعية ω .

تظهر الإحداثيات الكارتيزية للنظام الاستوائي وعلاقته بالنظام الأفقي في الشكل ٤-٤(ب). المحور y' مطابق لمقابله في النظام الأفقي. ويشير المحور z' للقُطب الشمالي، في حين أن المحور x' عمودي على الاثنين. إن متجهات الوحدة في النظام الاستوائي التي تشير للمحاور x' و y' و z' هي على التوالي i' و j' و k' . وباستخدام الميل δ والزاوية الساعية ω المعروفان في الشكل ٤-٣، يكون أي متجه وحدة S يشير للشمس باستخدام i' و j' و k' هو:

$$S = i' \cos \delta \cos \omega + j' \cos \delta \sin \omega + k' \sin \delta. \quad (4-2)$$

من الشكل ٤-٤(ب)، تكون التحويلات بين مجموعتيّ متجهات الوحدة i و j و k ، و i' و j' و k' هي:

$$\begin{aligned} i' &= i \sin \phi + k \cos \phi, \\ j' &= j, \end{aligned} \quad (4-3)$$

$$k' = -i \cos \phi + k \sin \phi,$$

و

$$\mathbf{i} = \mathbf{i}' \sin \phi - \mathbf{k}' \cos \phi,$$

$$\mathbf{j} = \mathbf{j}', \quad (4-4)$$

$$\mathbf{k} = \mathbf{i}' \cos \phi + \mathbf{k}' \sin \phi,$$

بحيث يكون ϕ هو دائرة العرض (الجغرافية) للراصد؛ ارجع إلى الشكلين ٢-٤ و ٤-٤. وباستخدام المعادلتين 4-1 و 4-2، نحصل على:

$$\begin{aligned} \mathbf{S} = & \mathbf{i} (\cos \delta \cos \omega \sin \phi - \sin \delta \cos \phi) . \\ & + \mathbf{j} \cos \delta \sin \omega \end{aligned} \quad (4-5)$$

$$+ \mathbf{k} (\cos \delta \cos \omega \cos \phi + \sin \delta \sin \phi) ,$$

و

$$\begin{aligned} \mathbf{S} = & \mathbf{i}' (\cos h \cos A \sin \phi + \sin h \cos \phi) . \\ & + \mathbf{j}' \cos h \sin A \end{aligned} \quad (4-6)$$

$$+ \mathbf{k}' (-\cos h \cos A \cos \phi + \sin h \sin \phi) .$$

وبمقارنة المعادلتين 4-5 و 4-6 بالمعادلتين 4-1 و 4-2، نحصل على صيغ التحويل لمجموعتي الزوايا:

$$\cos h \cos A = \cos \delta \cos \omega \sin \phi - \sin \delta \cos \phi, \quad (4-7)$$

$$\cos h \sin A = \sin \omega \cos \delta, \quad (4-8)$$

$$\sin h = \cos \delta \cos \omega \cos \phi + \sin \delta \sin \phi; \quad (4-9)$$

$$\cos \delta \cos \omega = \cos h \cos A \sin \phi + \sin h \cos \phi, \quad (4-10)$$

$$\cos \delta \sin \omega = \cos h \sin A, \quad (4-11)$$

$$\sin \delta = -\cos h \cos A \cos \phi + \sin h \sin \phi. \quad (4-12)$$

(٢-٢) التحويل الإحداثي: حساب المثلثات الكروية

يمكن الحصول بسهولة على صيغ التحويل الإحداثي باستخدام معادلات في حساب المثلثات الكروية؛ انظر الشكل ٣-٤. ويجب أن نركز انتباهنا على المثلث الكروي PZX بالأقواس الثلاثة p تساوي $\widehat{ZX}$ و z تساوي $\widehat{XP}$ و x تساوي $\widehat{PZ}$. كما هو واضح من الشكل ٣-٤، العلاقات بين عناصر المثلث الكروي والكميات محل الاهتمام هي:

$$\begin{aligned} P &= \omega, \\ Z &= 180^\circ - A, \\ p &= 90^\circ - h, \\ z &= 90^\circ - \delta, \\ x &= 90^\circ - \phi. \end{aligned} \quad (4-13)$$

أولاً، دعنا نتأمل حالة وجود ميل δ وزاوية ساعية ω محددتين في النظام الاستوائي لتحديد الارتفاع h والسمت A في النظام الأفقي. من الواضح أن دائرة عرض موقع الراصد ϕ معامل ضروري. وباستخدام معادلة جيب التمام:

$$\cos p = \cos x \cos z + \sin x \sin z \cos P, \quad (4-14)$$

مع المعادلة 4-13، نحصل على:

$$\sin h = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega. \quad (4-15)$$

ثم باستخدام صيغة الجيب:

$$\frac{\sin Z}{\sin z} = \frac{\sin P}{\sin p}, \quad (4-16)$$

نجد أن:

$$\cos h \sin A = \sin \omega \cos \delta. \quad (4-17)$$

وأخيراً، بتطبيق المعادلة ج من الملحق ب:

$$\sin x \cos Z = \cos z \sin p - \sin z \cos p \cos X, \quad (4-18)$$

وباستخدام المعادلة 4-13، نجد:

$$\cos h \cos A = \sin \phi \cos \delta \cos \omega - \cos \phi \sin \delta. \quad (4-19)$$

إن المعادلات 4-15 و 4-18 و 4-19 مطابقة للمعادلات 4-7 و 4-8 و 4-9. والآن، دعنا نتأمل حالة وجود ارتفاع h وسمت A محددين في النظام الأفقي لتحديد الميل δ والزاوية الساعية ω في النظام الاستوائي. مرة أخرى، من الواضح أن دائرة عرض موقع الراصد ϕ معامل ضروري. وباستخدام صيغة جيب التمام:

$$\cos z = \cos p \cos x + \sin p \sin x \cos Z, \quad (4-20)$$

نحصل على:

$$\sin \delta = -\cos h \cos A \cos \phi + \sin h \sin \phi. \quad (4-21)$$

تتبع ضوء الشمس

وبإعادة ترتيب المعادلة 4-18، نجد:

$$\cos \delta \sin \omega = \cos h \sin A. \quad (4-22)$$

وبنحو مشابه لاشتقاق المعادلة 4-19، باستخدام المعادلة ج:

$$\sin z \cos P = \cos p \sin x - \sin p \cos x \cos Z, \quad (4-23)$$

نحصل على:

$$\cos \delta \cos \omega = \cos h \cos A \sin \phi + \sin h \cos \phi. \quad (4-24)$$

هذه المعادلات مطابقة للمعادلات من 4-10 إلى 4-12.

(٣) التوقيت الشمسي

منذ حقبة ما قبل التاريخ، تمحورت الأنشطة البشرية حول الحركة الظاهرية للشمس عبر السماء. والتوقيت الشمسي $t_{\odot}$ ، الذي يعتمد على الزاوية الساعية للشمس، مقياس بديهي للوقت واستُخدم لآلاف السنين في كل ثقافات العالم. وكما سناقش في الفصل الرابع – قسم (٤)، ولأن الحركة الظاهرية للشمس غير منتظمة وتعتمد على الموقع، فإن هذا التوقيت ليس مقياسًا دقيقًا للزمن، ويمكن أن يبلغ الفرق بين التوقيت الشمسي والتوقيت القياسي المستخدم في حياتنا اليومية، حتى في ظل التقريب الجيد، أكثر من 15 دقيقة، سواء بالزيادة أو النقصان.

لعمل تقدير للإشعاع الشمسي، أحيانًا الدقة العالية لا تكون مطلوبة؛ لذا يُستخدم التوقيت الشمسي البسيط والبدهي على نحو واسع في أدبيات الطاقة الشمسية. على سبيل المثال، لحساب القيم المتكاملة لمعدل التشميس الإجمالي عبر يوم أو سنة، يكون تغيير الوقت غير ذي صلة. وتصبح المفاهيم بسيطة. على سبيل المثال، ففي وقت الظهر الشمسي، عندما تتجاوز الشمس خط الزوال، يكون التوقيت الشمسي صفرًا. ووقت شروق الشمس، الذي يكون سالبًا دائمًا، يساوي وقت غروب الشمس في المقدار. في تلك الحالة، تكون

الزاوية الساعية للشمس مقياساً للوقت. بعبارة أخرى، إذا كان $t_{\odot}$ هو التوقيت الشمسي على مقياس زمني قدره 24 ساعة، فإن الزاوية الساعية للشمس ω_s بالراديان هي:

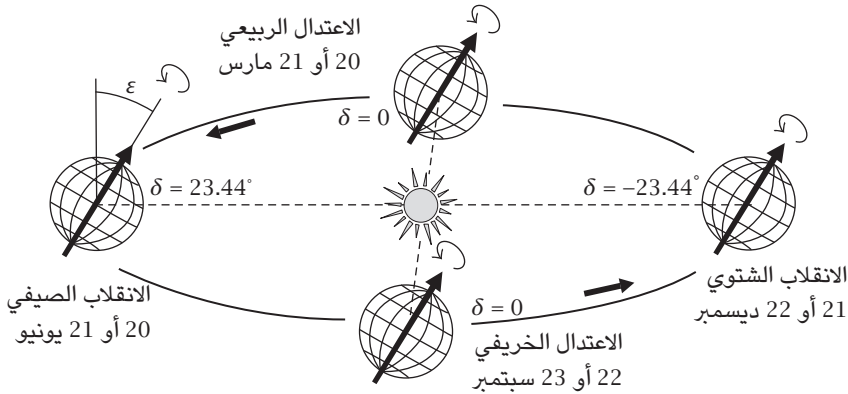
$$\omega_s = \pi \frac{t_{\odot} - 12}{12}, \quad (4-25)$$

و

$$t_{\odot} = 12 + 12 \frac{\omega_s}{\pi}. \quad (4-26)$$

(١-٣) الميلان البروجي والميل الخاص بالشمس

المستوى المداري للأرض حول الشمس، «البروج»، يكون بزاوية تسمى «الميلان البروجي أو المحوري» ϵ من خط الاستواء. ومن منظور راصد على الأرض، تتحرك الشمس في «المستوى البروجي»؛ انظر الشكل ٤-٥. على مقياس زمني قدره قرون، تختلف زاوية الميلان البروجي عبر الوقت. حالياً، ϵ تساوي 23.44 درجة. وهذا هو الذي يسبب تغير الفصول.



شكل ٤-٥: الميلان البروجي والفصول. المحور الدوراني والمستوى المداري للأرض لهما زاوية ميلان ϵ ، الميلان البروجي، تُعد السبب في تكون الفصول. وهي تتسبب في وجود فرق منتظم بين التوقيت الشمسي والتوقيت المدني.

وفيما يتعلّق بحركة الشمس عبر سنة شمسية، هناك أربع نقاط رئيسية: ففي «الاعتدال الربيعي»، يتقاطع مسار الشمس مع خط الاستواء السماوي، مع الاتجاه شمالاً. وفي «الانقلاب الصيفي»، يصل مسار الشمس إلى أقصى نقطة شمالية له، وهي نحو 23.44 درجة فوق خط الاستواء السماوي، مع الاتجاه جنوباً. وفي «الانقلاب الشتوي»، يصل مسار الشمس إلى أدنى نقطة له، وهي نحو 23.44 درجة تحت خط الاستواء السماوي. وتختلف تواريخ وأوقات تلك النقاط الرئيسية الأربعة عامًا بعد عام.

وإلى جانب مفهوم التوقيت الشمسي، يمكن وصف حركة الشمس حول مدارها من خلال «خط الطول المتوسط» l . وفي الاعتدال الربيعي، إن l يساوي صفرًا. وفي الانقلاب الصيفي، يساوي $\pi/2$ ، أو 90 درجة، وفي الاعتدال الخريفي، يساوي π ، أو 180 درجة، وفي الانقلاب الشتوي، يساوي $3\pi/2$ ، أو 270 درجة.

سنعرض لصيغة دقيقة لميل الشمس في الفصل الرابع – قسم (٤-٧). هنا، نقدم تقريبًا بسيطًا بافتراض أن الميل يختلف بنحو جيبي مع خط الطول المتوسط l ؛ ومن ثم يكون خطيًا طبقًا لرقم اليوم في العام، ويمكن أن يكون الخطأ كبيرًا مثل 1.60 درجة، لكنه يكون مقبولًا في العديد من التطبيقات:

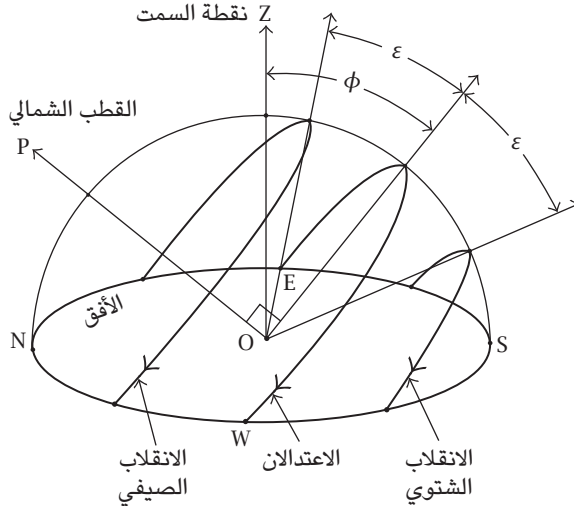
$$\delta \approx \varepsilon \sin l = \varepsilon \sin \left(\frac{2\pi (N - 80)}{365.2422} \right), \quad (4-27)$$

بحيث تكون ε هو الميلان البروجي؛ وتساوي ε حاليًا 23.44 درجة؛ و N رقم اليوم مع بدء العد من الأول من يناير، الذي يمكن حسابه باستخدام الصيغة:

$$N = \text{INT} \left(\frac{275 \times M}{9} \right) - K \times \text{INT} \left(\frac{M + 9}{12} \right) + D - 30, \quad (4-28)$$

بحيث يكون M هو رقم الشهر، و D هو اليوم، و K يساوي 1 بالنسبة لسنة كبيسة، و 2 بالنسبة للسنة العادية. وتُعرف أي سنة كبيسة من خلال كونها قابلة للقسمة على 4 وليس 100 فيما عدا إذا كانت قابلة للقسمة على 400. و INT يعني أخذ الجزء الصحيح من العدد. ويمكن التحقق من تلك الصيغة على نحو مباشر. فالعدد 80 في معادلة 4-27 هو رقم اليوم الخاص بالاعتدال الربيعي، 20 أو 21 مارس. التاريخ الدقيق يختلف من

عام لآخر، وهو يختلف أيضًا بين السنة الكبيسة والسنة العادية. وباستخدام معادلة 4-28، يمكن إثبات أن هذا التاريخ يتراوح بين 79 و81، لكن الرقم الأكثر شيوعًا هو 80. تظهر الحركة الظاهرية للشمس لراصد على الأرض في الشكل ٤-٦. والأرض تدور حول محورها OP باتجاه الشرق بسبب لفها الذاتي؛ لذا ظاهريًا تتحرك الشمس باتجاه الغرب. وبسبب الميلان البروجي، في أيام مختلفة من العام، يختلف ميل الشمس. ففي الانقلاب الشتوي، يصل ميل الشمس لأدنى قيمة له، $-\epsilon$. وفي الانقلاب الصيفي، يصل ميل الشمس إلى أقصى قيمة له، $+\epsilon$. وفي الاعتدال الربيعي أو الخريفي، يكون ميل الشمس صفرًا، وتتحرك الشمس على خط الاستواء السماوي.



شكل ٤-٦: الحركة الظاهرية للشمس. تدور الأرض حول محورها OP باتجاه الشرق. والحركة الظاهرية للشمس تقول إنها تتحرك باتجاه الغرب. وبسبب الميلان البروجي، في أيام مختلفة من العام، يختلف ميل الشمس. ففي الانقلاب الشتوي، يصل ميل الشمس إلى أدنى قيمة له، $-\epsilon$. وفي الانقلاب الصيفي، يصل ميل الشمس إلى أقصى قيمة له، $+\epsilon$. وفي الاعتدال الربيعي أو الخريفي، يكون ميل الشمس صفرًا، وتتحرك الشمس على خط الاستواء السماوي.

(٢-٣) وقتا الشروق والغروب

باستخدام ما عرضناه في القسم السابق، سنعطي مثالاً يستخدم وقت شروق الشمس (أو غروبها) في التوقيت الشمسي. شرط الشروق هو الوقت الذي يكون فيه ارتفاع الشمس h صفرًا. وطبقًا للمعادلة 4-15، يكون الشرط:

$$\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega = 0, \quad (4-29)$$

أو

$$\cos \omega_s = -\tan \delta \tan \phi. \quad (4-30)$$

لكل قيمة لجيب التمام، هناك قيم متعددة للزاوية ω . على سبيل المثال، عند خط الاستواء حيث ϕ تساوي صفرًا، يكون وقت الشروق ووقت الغروب دائمًا 6 صباحًا و6 مساءً بالتوقيت الشمسي. وعدد ساعات النهار دائمًا 12 ساعة. وعند القطب الشمالي أو القطب الجنوبي، حيث يكون $\tan \phi$ مساويًا لـ ∞ ، لا يوجد أبدًا شروق ولا غروب للشمس. وفي المناطق المعتدلة والمنطقة الاستوائية الحارة، يتحدد وقتا الشروق والغروب في ظل التوقيت الشمسي الذي يمتد لأربع وعشرين ساعة ليوم معين من العام من خلال ما يلي:

$$t_s = 12 \mp \frac{12}{\pi} \arccos [-\tan \delta \tan \phi]. \quad (4-31)$$

في المناطق القطبية المتجمدة، حيث:

$$\phi > 90^\circ - \varepsilon, \quad (4-32)$$

هناك فترة زمنية في العام لا تشرق فيها الشمس ولا تغرب أبدًا. هناك وقت آخر من اليوم يكون مفيدًا لحساب الإشعاع الشمسي وهو التوقيت الشمسي عندما تتقاطع الشمس مع الدائرة العظمى الممتدة من الشرق للغرب. والشرط هو عندما يكون سمت A مساويًا لـ $\pi/2$ أو $\cos A$ يساوي صفرًا. ومن معادلة 4-7، نجد أن:

$$\cos \omega_{ew} = \tan \delta \cot \phi, \quad (4-33)$$

أو فيما يتعلّق بالتوقيت الشمسي بالساعات:

$$t_{ew} = 12 \pm \frac{12}{\pi} \arccos [\tan \delta \cot \phi] . \quad (4-34)$$

(٣-٣) الإشعاع الشمسي المباشر على سطح افتراضي

بالنسبة لسطح ذي اتجاه افتراضي، بزاوية قطبية β وزاوية سمت γ ، يكون متجه الوحدة لمقداره N :

$$N = i \sin \beta \cos \gamma + j \sin \beta \sin \gamma + k \cos \beta. \quad (4-35)$$

إن المعيار الخاص بعلامة الزاوية لا يختلف عن ذلك الخاص بالزاوية الساعية: نقطة الصفر لزاوية السمت هي الجنوب وتكون موجبة باتجاه الغرب. وبالجمع بين المعادلة 4-35 والمعادلات 4-7 و 4-8 و 4-9، يكون جيب التمام بين مقدار السطح والإشعاع الشمسي:

$$\begin{aligned} \cos \theta = N \cdot S = \sin \beta \cos \gamma (\cos \delta \cos \omega \sin \phi - \sin \delta \cos \phi) \\ + \sin \beta \sin \gamma \cos \delta \sin \omega \end{aligned} \quad (4-36)$$

$$+ \cos \beta (\cos \delta \cos \omega \cos \phi + \sin \delta \sin \phi) ,$$

أو بإعادة الترتيب:

$$\begin{aligned} \cos \theta = \sin \delta (\sin \phi \cos \beta - \cos \phi \sin \beta \cos \gamma) \\ + \cos \delta (\cos \phi \cos \beta \cos \omega + \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega \\ + \sin \beta \sin \gamma \sin \omega). \end{aligned} \quad (4-37)$$

بالنسبة لسطح يواجه الجنوب بـ γ تساوي صفرًا، يمكن تبسيط المعادلة 4-37 كما يلي:

$$\cos \theta = \sin (\phi - \beta) \sin \delta + \cos (\phi - \beta) \cos \delta \cos \omega. \quad (4-38)$$

تتبع ضوء الشمس

تأمل معي الحالات الخاصة الآتية: بالنسبة لسطح أفقي بحيث تكون β تساوي صفراً:

$$\cos \theta = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega. \quad (4-39)$$

عند القطب الشمالي، بحيث $\phi = \pi/2$ ،

$$\cos \theta = \sin \delta. \quad (4-40)$$

وعند خط الاستواء، بحيث $\phi = 0$ ،

$$\cos \theta = \cos \delta \cos \omega. \quad (4-41)$$

بالنسبة لسطح رأسي يواجه الجنوب، بحيث β تساوي $\pi/2$ ، و γ تساوي صفراً:

$$\cos \theta = -\cos \phi \sin \delta + \sin \phi \cos \delta \cos \omega. \quad (4-42)$$

عند القطب الشمالي، بحيث $\phi = \pi/2$ ،

$$\cos \theta = \cos \delta \cos \omega. \quad (4-43)$$

وعند خط الاستواء، بحيث $\phi = 0$ ،

$$\cos \theta = \sin \delta. \quad (4-44)$$

إن السطح «المائل غير المعتمد على دائرة العرض» أو الذي تتساوى عنده β مع ϕ له أهمية خاصة. فمعادلة 4-38 حينها ستُبسط على نحو كبير:

$$\cos \theta = \cos \delta \cos \omega. \quad (4-45)$$

يمكن أن يحصل السطح على طاقة إشعاع عالية طوال العام بأكمله لأن جيب تمام δ دائماً ما يكون أكبر من 0.93.

(٣-٤) طاقة الإشعاع الشمسي المباشر اليومي

هناك تطبيق مهم فيما يتعلّق بالتوقيت الشمسي وهو حساب طاقة الإشعاع الشمسي المباشر H_D على سطح في يوم صافٍ. سنتناول تأثير السحب وضوء الشمس المشتّت في الفصل الخامس. لكن في يوم صافٍ، على سطح عمودي على ضوء الشمس، تكون القدرة 1kW/m^2 ، وطاقة الإشعاع الإجمالية في ساعة واحدة 1kWh/m^2 . وعندما يميل ضوء الشمس بزاوية θ ، تقل طاقة الإشعاع إلى حاصل ضرب جيب تمام θ و 1kWh/m^2 ؛ لذا فإن طاقة الإشعاع الشمسي المباشر اليومي بوحدة الكيلو واط في الساعة لكل متر مربع هي تكامل جيب تمام θ عبر أربع وعشرين ساعة.

تأمّل أولاً سطحاً رأسياً يواجه الجنوب في المنطقة المعتدلة الشمالية؛ أي β تساوي $\pi/2$ ، و γ تساوي صفراً. من معادلة 4-36، نحصل على ما يلي:

$$\cos \theta = \cos \delta \cos \omega \sin \delta - \sin \delta \cos \phi. \quad (4-46)$$

في الأيام التي بين الاعتدال الربيعي والاعتدال الخريفي، يمكن أن يسطع ضوء الشمس على السطح الجنوبي فقط عندما توجد الشمس في النصف الجنوبي من السماء. وتكون طاقة الإشعاع الشمسي اليومي المباشر H_D بـ kWh/m^2 هي:

$$\begin{aligned} H_D &= \frac{12}{\pi} \cos \delta \sin \phi \int_{-\omega_{ew}}^{\omega_{ew}} \cos \omega d\omega - \frac{24}{\pi} \omega_{ew} \sin \delta \cos \phi \\ &= \frac{24}{\pi} (\cos \delta \sin \phi \sin \omega_{ew} - \omega_{ew} \sin \delta \cos \phi). \end{aligned} \quad (4-47)$$

في الأيام التي بين الاعتدال الخريفي والاعتدال الربيعي في العام التالي، يكون ضوء الشمس المتاح محدوداً في الفترة فيما بين شروق الشمس وغروبها. وتكون طاقة الإشعاع الشمسي اليومي المباشر بـ kWh/m^2 هي:

$$\begin{aligned} H_D &= \frac{12}{\pi} \cos \delta \sin \phi \int_{-\omega_s}^{\omega_s} \cos \omega d\omega - \frac{24}{\pi} \omega_s \sin \delta \cos \phi \\ &= \frac{24}{\pi} (\cos \delta \sin \phi \sin \omega_s - \omega_s \sin \delta \cos \phi). \end{aligned} \quad (4-48)$$

يعرض الشكل ٤-٧ طاقة الإشعاع الشمسي اليومي المباشر على سطح مواجه للجنوب في دوائر العرض الأربعة في المنطقة المعتدلة الشمالية في العام بأكمله. كما هو موضح، في وقت الشتاء، يتمتع السطح تقريباً بضوء شمس كامل، فيما عدا الأماكن التي عند دوائر عرض عليا، حيث تقل طاقة الإشعاع بسبب شروق الشمس في وقت متأخر وغروبها في وقت مبكر. وفي الصيف، يكون الإشعاع الشمسي أضعف كثيراً بسبب الميلان. وفيما يتعلق بالمباني ذات التصميم الشمسي السلبي، تكون النوافذ المواجهة للجنوب هي المفضلة بشدة. وبالنسبة لتطبيقات الخلايا الكهروضوئية الشمسية، تكون الألواح المواجهة للجنوب أكثر كفاءة في الشتاء، لكن الكفاءة الإجمالية لا تكون عالية. بعد ذلك، تأمل سطحاً مواجهاً للغرب بـ β تساوي $\pi/2$ ، و γ تساوي $\pi/2$ على ما يلي:

$$\cos \theta = \cos \delta \sin \omega. \quad (4-49)$$

يبدأ ضوء الشمس عند وقت الظهر عندما تكون ω صفراً ويختفي عند الغروب؛ لذا فإن طاقة الإشعاع الشمسي اليومي بـ kWh/m^2 هي:

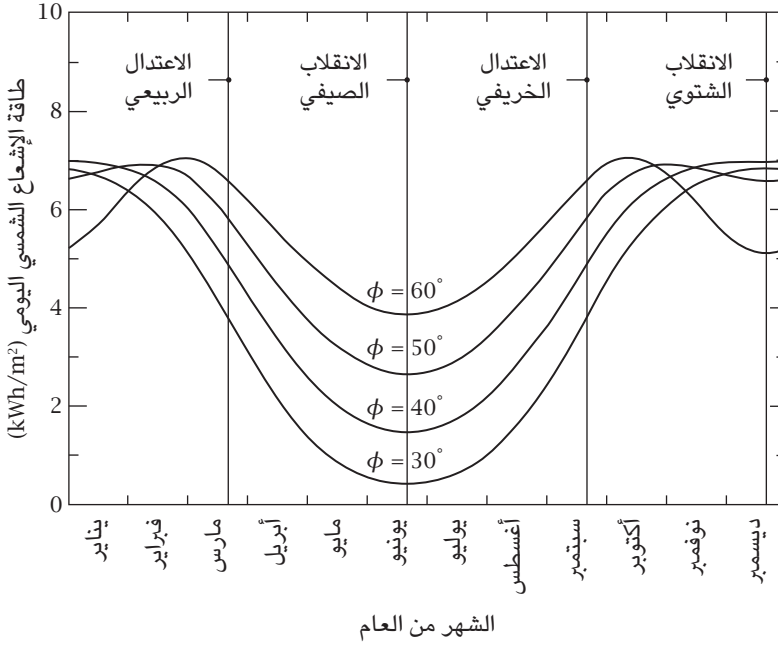
$$\begin{aligned} H_D &= \frac{12}{\pi} \cos \delta \int_0^{\omega_s} \sin \omega d\omega \\ &= \frac{12}{\pi} (\cos \delta + \sin \delta \tan \phi). \end{aligned} \quad (4-50)$$

مع استخدام المعادلة 30-4. وكما هو موضح في الشكل ٤-٨، في الصيف، يكون الإشعاع الشمسي أقوى بكثير مما يكون في الشتاء. وفيما يتعلق بالمباني ذات التصميم الشمسي السلبي، يجب تجنب النوافذ المواجهة للغرب قدر المستطاع. وبالنسبة لتطبيقات الخلايا الكهروضوئية الشمسية، تعمل الألواح المواجهة للغرب فقط في الصيف، لكن الكفاءة الإجمالية تبلغ النصف مقارنةً مما لو استُخدم الاتجاه المثالي؛ انظر ما سيأتي ذكره.

بالنسبة للتطبيقات التي تكون على الأسطح في المدن الكبيرة، لتجنب التلف الهيكلي بسبب الرياح، عادةً ما تُوضع أسطح الألواح الشمسية على نحو أفقي. وحيث إن β تساوي صفراً، وباستخدام معادلة 36-4:

$$\cos \theta = \cos \delta \cos \omega \cos \phi + \sin \delta \sin \phi. \quad (4-51)$$

فيزياء الطاقة الشمسية



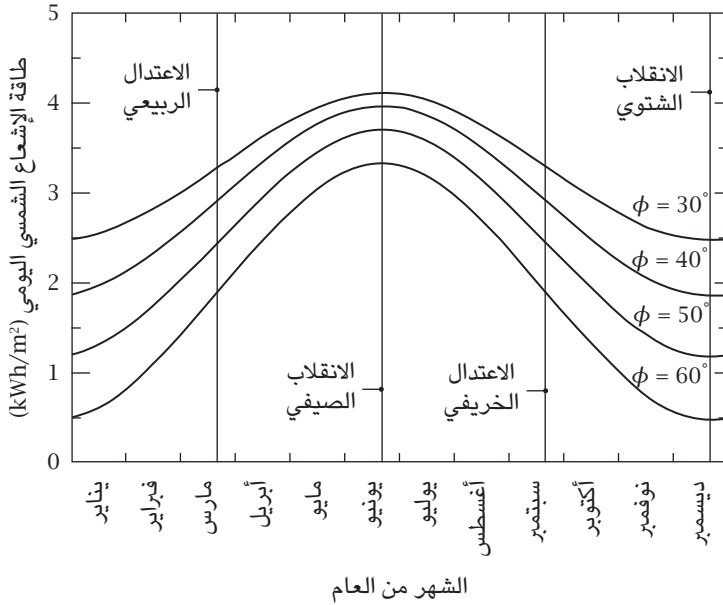
شكل ٤-٧: طاقة الإشعاع الشمسي اليومي على سطح رأسي مواجه للجنوب. في الشتاء، يتمتع السطح تقريباً بضوء شمس كامل، فيما عدا الأماكن التي عند دوائر العرض العليا. وفي الصيف، يكون الإشعاع الشمسي أضعف بكثير. وفيما يتعلّق بالمباني ذات التصميم الشمسي السلبي، تكون النوافذ المواجهة للجنوب هي المفضلة بشدة. وبالنسبة لتطبيقات الخلايا الكهروضوئية الشمسية، تكون الألواح المواجهة للجنوب أكثر كفاءة في الشتاء.

وبدمج جيب التمام عبر الوقت من شروق الشمس إلى غروبها، تكون طاقة الإشعاع اليومي هي:

$$H_D = \frac{12}{\pi} \cos \delta \sin \phi \int_{-\omega_s}^{\omega_s} \cos \omega d\omega - \frac{24}{\pi} \omega_s \sin \delta \sin \phi$$

$$= \frac{24}{\pi} (\cos \delta \cos \phi \sin \omega_s + \omega_s \sin \delta \sin \phi) . \quad (4-52)$$

تتبع ضوء الشمس



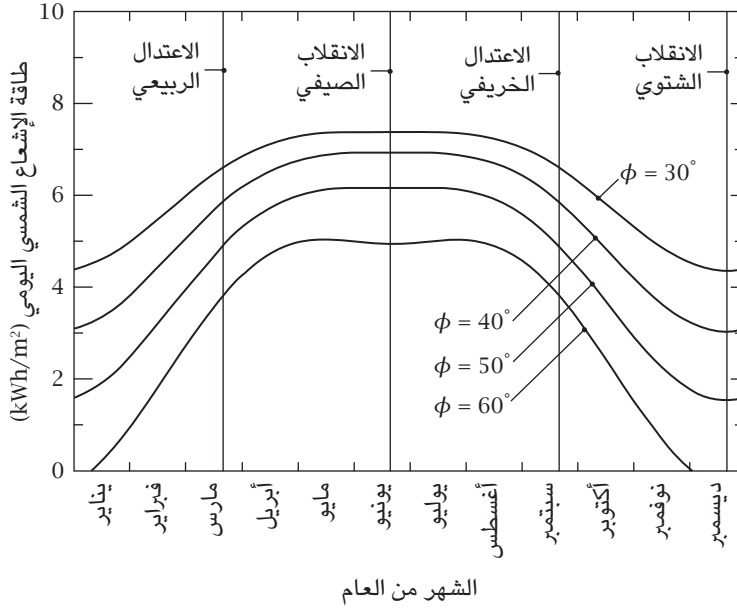
شكل ٤-٨: طاقة الإشعاع اليومي على سطح رأسي مواجه للغرب. في الصيف، يكون الإشعاع الشمسي أقوى بكثير من الشتاء. وفيما يتعلق بالمباني ذات التصميم الشمسي السلبي، يجب تجنب النوافذ المواجهة للغرب قدر المستطاع.

يظهر التباين في طاقة الإشعاع على مدى عام في الشكل ٤-٩. وكما هو واضح، في الصيف، وبخاصة عند دوائر العرض الدنيا، تكون طاقة الإشعاع قوية، لكن في الشتاء، وبخاصة في الأماكن عند دوائر العرض الأعلى، تكون طاقة الإشعاع ضعيفة. هناك خيار أفضل بكثير لوضع الألواح الشمسية وهو الوضع «المائل غير المعتمد على دائرة العرض». فمن المعادلة 4-45، فيما بين الاعتدال الربيعي والاعتدال الخريفي، تكون طاقة الإشعاع اليومي معتمدة فقط على زاوية السقوط:

$$H_D = \frac{12}{\pi} \cos \delta \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos \omega d\omega$$

$$= \frac{24}{\pi} \cos \delta. \quad (4-53)$$

فيزياء الطاقة الشمسية



شكل ٤-٩: طاقة الإشعاع اليومي على سطح أفقي. في الصيف، وبخاصة عند دوائر العرض الدنيا، تكون طاقة الإشعاع قوية. لكن في الشتاء، وبخاصة عند دوائر العرض الأعلى، تكون طاقة الإشعاع ضعيفة.

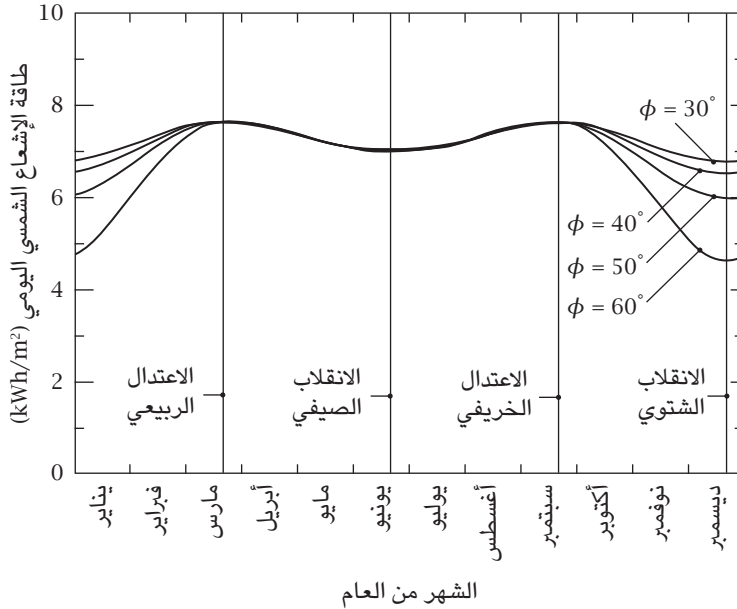
كما هو موضح في الشكل ٤-١٠، في تلك الفترة من العام، لا تعتمد طاقة الإشعاع المباشر على دائرة العرض، لكن فيما بين الاعتدال الخريفي والاعتدال الربيعي في العام التالي، يتأخر شروق الشمس عن الساعة السادسة صباحاً، وغروب الشمس عن الساعة السادسة مساءً. وتكون طاقة الإشعاع اليومي:

$$H_D = \frac{12}{\pi} \cos \delta \int_{-\omega_s}^{\omega_s} \cos \omega d\omega$$

$$= \frac{24}{\pi} \cos \delta \sin \omega_s. \quad (4-54)$$

تتبع ضوء الشمس

كما هو موضح في الشكل ٤-١٠، تقل طاقة الإشعاع وتعتمد على دائرة عرض المكان، ولكن ليس بنسبة كبيرة. وعبر العام بأكمله، يتم الحصول على أقصى قدر من طاقة الإشعاع الشمسي.



شكل ٤-١٠: طاقة الإشعاع اليومي على سطح مائل لا يعتمد على دائرة العرض الألواح الشمسية الموضوعة على سطح مائل لا يعتمد على دائرة العرض، تتمتع تقريباً بأقصى قدر من طاقة الإشعاع الشمسي عبر العام بأكمله.

إذا سُمح للسطح أن يتتبع الحركة الظاهرية للشمس، فيمكن تعزيز طاقة الإشعاع اليومي أكثر. تخيل معي لوحةً شمسيةً مُركبةً على محور مواز لمحور الأرض، يلف على نحو منتظم مرة واحدة كل يوم. تكون طاقة الإشعاع الشمسي اليومي هي:

$$H_D = \frac{24}{\pi} \cos \delta \omega_s. \quad (4-55)$$

كما هو واضح من الشكل ٤-١١، يكون الإشعاع الشمسي اليومي على سطح به نظام تتبع أحادي المحور أعلى بكثير من الأسطح الثابتة. وتكون الميزة أكثر وضوحاً في متوسط الإشعاع الشمسي اليومي المباشر $\bar{H}_D$ عبر عام، كما هو موضح في الجدول ٤-٢. فالإشعاع الشمسي الساقط على سطح به نظام تتبع يكون أعلى بنسبة 50 بالمائة من ذلك الخاص بكل الأسطح الثابتة. ومع ذلك، وبسبب تأثير الظلال، فإن هذا السطح لا يوفر مساحة أفقية.

جدول ٤-٢: متوسط إشعاع الشمس اليومي على أسطح متعددة.

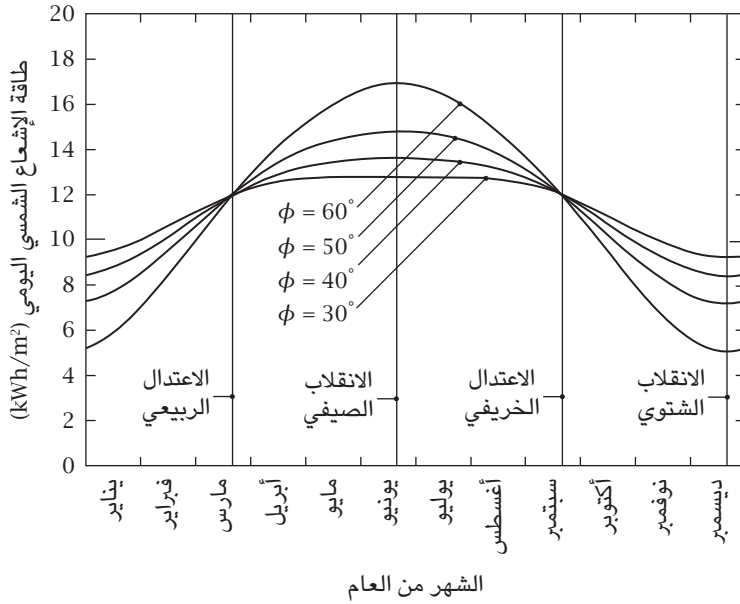
60°	50°	40°	30°	$\bar{H}_D$ بـ kWh/day عند دائرة عرض
5.60	5.25	4.57	3.72	سطح رأسي، مواجه للجنوب
1.91	2.46	2.93	3.31	سطح رأسي، مواجه للغرب أو الشرق
3.11	4.39	5.43	6.25	سطح أفقي
6.77	7.08	7.21	7.27	سطح مائل غير معتمد على دائرة العرض، مواجه للجنوب
11.50	11.50	11.50	11.50	التتبع الأحادي المحور الأمثل

(٣-٥) الفصول الشمسية الأربعة والعشرون

كما هو موضح في الأقسام السابقة، تتحدد حركة الشمس في أي سنة شمسية من خلال «خط الطول البروجي» للشمس، l . والاعتدال الربيعي عند l يساوي صفر درجة أو 360 درجة، والانقلاب الصيفي عند l يساوي 90 درجة، والاعتدال الخريفي عند l يساوي 180 درجة والانقلاب الشتوي عند l يساوي 270 درجة هي «النقاط الرئيسية» الأربعة. ولدراسة موقع الشمس عبر عام، نحتاج إلى مزيد من النقاط. في التقاويم الغربية التقليدية، بما في ذلك التقويم اليولياني والتقويم الجريجوري، لا يعتمد تحديد الأشهر الاثني عشر على ظواهر طبيعية، كما أنها غير متزامنة بدقة مع حركة الشمس؛ لذا فإن استخدام تواريخ التقاويم لتحديد حركة الشمس غير دقيق وغير ملائم.

لكن في شرق آسيا ومنذ أكثر من ألفي عام، كان يُستخدم نظام تقويم شمسي خالص، ألا وهو: «الفصول أو الأيام الشمسية» الأربعة والعشرين. وهو يتحدد فقط

تتبع ضوء الشمس



شكل ٤-١١: طاقة الإشعاع الشمسي اليومي على سطح به نظام تتبع. الإشعاع الشمسي للوح شمسي مُركب على محور مواز لمحور الأرض، يلف على نحو منتظم مرة واحدة كل يوم ومماثل للوح الظاهر في ملحقات الصور الشكل ٧. يكون متوسط الإشعاع الشمسي اليومي عبر العام بأكمله غير معتمد على دائرة العرض؛ انظر الجدول ٤-٢.

بناءً على الحركة المدارية للأرض حول الشمس. ونحن مماثل لقسمه متوسط اليوم الشمسي على 24 ساعة، يُقسّم نظام الفصول الشمسية السنة الشمسية (الوقت فيما بين اعتدالين ربيعين متتابعين) إلى 24 جزءًا متساويًا؛ انظر الجدول ٤-٣. كل عام، يُنشر التاريخ و«وقت اليوم» المحددان لكل من الفصول الشمسية الأربعة والعشرين في «التقويم الفلكي». يظهر تاريخ ووقت النقاط الرئيسية الأربعة فيما بين عامي 2011 و2020 في الجدول ٤-٤. وبسبب عدم التناسق الدقيق للتواريخ في التقويم الجريجوري مع الاعتدال الربيعي، تختلف التواريخ بمعدل يوم أو يومين فقط من عام لآخر. وحيث إن «خط الطول البروجي» l للشمس في كل فصل شمسي محدد بدقة باستخدام صيغة ميل الشمس

(انظر معادلة 4-27)، فيمكن حساب ميل الشمس في الفصول الشمسية الأربعة والعشرين كما يلي:

$$\delta \approx \varepsilon \sin l = \varepsilon \sin \left(\frac{(S - 6) \pi}{12} \right), \quad (4-56)$$

بحيث S تكون ترتيب الفصل الشمسي، كما هو موضح في الجدول ٤-٣. استخدم الرقم 6 لأن الاعتدال الربيعي في الجدول ٤-٣. ترتيبه السادس.

جدول ٤-٣: الفصول الشمسية الأربعة والعشرون.

الرقم	الاسم	الاسم بنظام الكتابة الصيني «بينيين»	l (بالدرجات)	التاريخ التقريبي
0	الانقلاب الشتوي	دونجزي	270°	22 ديسمبر
1	البرد الصغير	شياوهان	285°	6 يناير
2	البرد الكبير	داهان	300°	20 يناير
3	بداية الربيع	ليتشون	315°	4 فبراير
4	بداية المطر	يوشوي	330°	19 فبراير
5	يقظة الحشرات	جينجزه	345°	6 مارس
6	الاعتدال الربيعي	تشونفين	0°	21 مارس
7	يوم الصفاء	تشينج مينج	15°	5 أبريل
8	غيث الحبوب	جويو	30°	20 أبريل
9	بداية الصيف	ليشيا	45°	6 مايو
10	امتلاء السنابل	شياومان	60°	21 مايو
11	البحار الصيفي	مانجزونج	75°	6 يونيو
12	الانقلاب الصيفي	شيازي	90°	21 يونيو
13	الحر الصغير	شياوشو	105°	7 يوليو
14	الحر الكبير	داشو	120°	23 يوليو
15	بداية الخريف	ليتشوي	135°	8 أغسطس
16	اختفاء الحر	تشوشو	150°	23 أغسطس
17	الندى الأبيض	بايلو	165°	8 سبتمبر
18	الاعتدال الخريفي	تشيوفين	180°	23 سبتمبر
19	الندى البارد	هانلو	195°	8 أكتوبر

الرقم	الاسم	الاسم بنظام الكتابة الصيني «بينيين» l (بالدرجات)	التاريخ التقريبي
20	نزول الصقيع	شوانجيانج	23 أكتوبر
21	بداية الشتاء	ليدونج	7 نوفمبر
22	الثلجة الصغيرة	شياوشوه	22 نوفمبر
23	الثلجة الكبيرة	داشوه	7 ديسمبر

تقليدياً، في التقويم الآسيوي، يُعرّف الفصل الشمسي الأول باسم «بداية الربيع». وهو مكافئ لاعتبار الساعة الثالثة صباحاً وقت بداية اليوم. وربما يرجع السبب في هذا إلى أن هذا الفصل يتزامن مع بداية الأنشطة الزراعية كل عام، لكن الفصل الشمسي الذي من المنطقي البداية به هو «الانقلاب الشتوي»، والذي هو مكافئ لاعتبار منتصف الليل وقت بداية اليوم.

(٤) التوقيت القياسي

لقرون عديدة، وعبر أنحاء العالم، استخدم البشر حركة الشمس لمعرفة الوقت، أو ما يعرف بـ «التوقيت الشمسي»، لكن نظراً لأن حركة الشمس ليست منتظمة، فإن التوقيت الشمسي يختلف على نحو كبير عن التوقيت المحدد عبر حركة منتظمة، على سبيل المثال: دوران الأرض أو البندول أو الساعة الذرية، التي تمثل حركة الشمس المتوسطة الافتراضية. ويمكن أن يصل الفارق إلى 16 دقيقة أو أكثر. ولتركيب نظام تتبع لضوء الشمس يعتمد على توقيت قياسي، يجب أن يُوضع الفارق في الاعتبار في حدود أقرب مستوى مقبول للدقة. في هذا القسم، سنعرض لمعالجة يسهل فهمها وتخطيطها، لكنها دقيقة على نحو كافٍ لاستخدام الطاقة الشمسية.

(١-٤) التوقيت النجمي والتوقيت الشمسي

على مستوى عالٍ جداً من دقة التقريب، تكون السرعة المتجهة الزاوية لدوران الأرض رقماً ثابتاً؛ ومن ثم فإن الفترة الزمنية بين مرورين متتاليين لنجم ثابت معين فوق خط زوال الراصد هي أيضاً رقم ثابت، وهو قياس دقيق للوقت، يُسمى «اليوم النجمي»، لكن

لأن للأرض أيضًا حركة مدارية حول الشمس، فإن مدة اليوم الشمسي تختلف عن تلك الخاصة باليوم النجمي؛ انظر الشكل ٤-١٢. على سبيل المثال، في منتصف الليل، يرى أي راصد نجمًا ثابتًا بعيدًا في خط زواله. وفي الوقت الذي يمر نفس هذا النجم بخط الزوال ثانية، تكون الأرض قد دارت حول الشمس بزاوية

$$\Delta\phi = \frac{360^\circ}{365.2422} = 59'08''. \quad (4-57)$$

لذا فإن اليوم الشمسي أطول بـ 0.273 بالمائة عن اليوم النجمي. ولأن التوقيت الشمسي هو التوقيت المألوف لدينا، وحيث إن الدوران بزاوية 360 درجة هو المقابل لـ 24 ساعة، فإن متوسط التوقيت الشمسي للأربع والعشرين ساعة يساوي:

$$\frac{24^h \times 366.2422}{365.2422} = 24^h 3^m 56^s. \quad (4-58)$$

من التوقيت النجمي، وطول أي يوم نجمي هو:

$$\frac{24^h \times 365.2422}{366.2422} = 23^h 56^m 04^s. \quad (4-59)$$

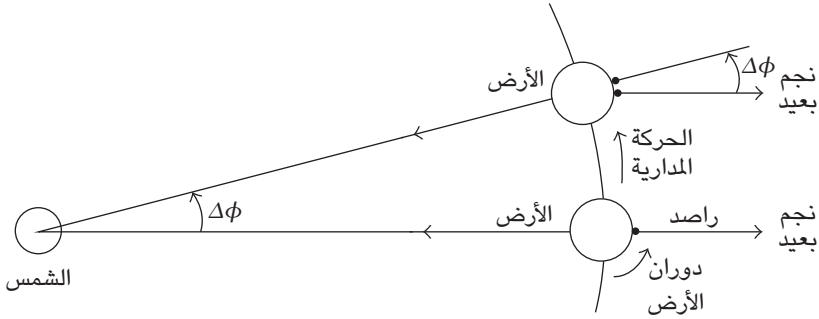
من التوقيت الشمسي.

في المعادلات السابقة، قدّمنا مصطلح «متوسط التوقيت الشمسي». إننا نستخدم هنا نموذجًا مبسطًا للحركة المدارية للأرض حول الشمس؛ وهي دائرة كاملة عبر خط الاستواء النجمي بسرعة زاوية منتظمة. بالنسبة لراصد على الأرض، مثل هذه الشمس الافتراضية ذات الحركة المنتظمة عبر خط الاستواء السماوي تُسمى «الشمس المتوسطة».

من واقع الشكل ٤-١٢، تعتمد القيمة الفعلية للوقت على مكان الراصد. على وجه التحديد، تعتمد على خط طول الراصد. ولإيجاد توقيت عالمي، يجب تحديد خط طول قياسي. وبنحو مماثل لحالة تحديد نقطة صفر خط الطول، فإن خط الطول القياسي للتوقيت العالمي هو «خط الطول الأساسي» الموجود عند جرينتش. ويسمى التوقيت الذي يبدأ عند منتصف الليل في جرينتش «توقيت جرينتش» أو غالبًا «التوقيت العالمي».

العالم مقسم إلى «مناطق زمنية». كل منطقة لها تعريف للوقت يختلف في الغالب بعدد صحيح من الساعات عن توقيت جرينتش أو التوقيت العالمي. على سبيل المثال،

تتبع ضوء الشمس



شكل ٤-١٢: التوقيت النجمي والتوقيت الشمسي. بما أن الأرض تدور حول محورها كما تدور حول الشمس، فإن مدة اليوم الشمسي تختلف عن تلك الخاصة باليوم النجمي؛ فالיום الشمسي أطول بـ 0.273 بالمائة عن اليوم النجمي.

التوقيت القياسي الشرقي يتخلف خمس ساعات وراء التوقيت العالمي، وفي فصل الصيف، التوقيت الصيفي الشرقي يتخلف أربع ساعات وراء التوقيت العالمي.

(٢-٤) المطلع المستقيم للشمس

كما أوضحنا في الفصل الرابع - قسم (٢)، في النظام الإحداثي الاستوائي، يمكن تحديد موضع نجم من خلال الميل والزاوية الساعية. وميل أي نجم لا يختلف عبر الوقت، لكن بسبب دوران الأرض، فإن الزاوية الساعية للنجم تختلف عبر الوقت. وباستخدام «المطلع المستقيم» α بدلاً من الزاوية الساعية، تكون إحداثيات كل نجم ثابت، بقدر كبير من الدقة، ثابتة.

على نحو مشابه لحالة خط الطول على الأرض، يجب اختيار نقطة ثابتة على الكرة السماوية باعتبارها النقطة المرجعية. والنقطة المختارة عالمياً هي «الاعتدال الربيعي» γ ، وهي النقطة التي تتقاطع عندها الشمس مع خط الاستواء السماوي بينما تتجه شمالاً؛ انظر الشكل ٤-١٣. وتُسمى الزاوية بين تقاطع خط الزوال المار عبر النجم S مع خط الاستواء B والاعتدال الربيعي γ المطلع المستقيم للنجم. والمعيار المتبع فيما يتعلق بعلامة

المطلع المستقيم هو عكس ذلك الخاص بالزاوية الساعية؛ فهي تكون موجبة باتجاه الشرق. وبالنسبة لحركة الشمس، هذا التقليد طبيعي لأنه يزيد مع رقم اليوم في العام.

(٣-٤) اختلاف التوقيت الناتج عن الميلان البروجي

كما ذكرنا من قبل، هناك مصدران للاختلاف بين حركة الشمس الحقيقية والشمس المتوسطة. الأول هو الميلان البروجي ε . يُقاس الوقت بزاوية الشمس المتوسطة على خط الاستواء، لكن الشمس الحقيقية تتحرك على المستوى البروجي. وبافتراض أن الشمس تتحرك على نحو منتظم على المستوى البروجي، يكون «خط طولها المتوسط» l دالة خطية للوقت. ويزيد خط الطول المتوسط للشمس بمقدار 2π في أثناء أي سنة شمسية؛ انظر الشكل ٤-١٣. وبأخذ رقم اليوم N باعتباره وحدة الوقت والاعتدال الربيعي Y باعتباره نقطة الصفر، الذي يكون 20 أو 21 مارس، أي، تقريباً اليوم الثمانين من العام، يكون خط الطول المتوسط بالراديان هو:

$$l = \frac{2\pi (N - 80)}{365.2422}. \quad (4-60)$$

يمكن حساب رقم اليوم N باستخدام معادلة 4-28. يظهر التاريخ والوقت الدقيقان للاعتدال الربيعي في الجدول ٤-٤.

بسبب الميلان البروجي، فإن تقدير خط الطول l على خط الاستواء السماوي، المطلع المستقيم α ، ليس خطياً مع الوقت. وباستخدام الصيغة الخاصة بمثلث كروي مستطيلي، نجد العلاقة التالية:

$$\tan \alpha = \cos \varepsilon \tan l. \quad (4-61)$$

حالياً، ε يساوي تقريباً 23.44 درجة وجيب تمامه يساوي تقريباً 0.917، أي، قريباً جداً من الواحد الصحيح. وباستخدام مطابقة خاصة بحساب المثلثات:

$$\cos \varepsilon = \frac{1 - \tan^2 \frac{\varepsilon}{2}}{1 + \tan^2 \frac{\varepsilon}{2}}, \quad (4-62)$$

ولأن $l - \alpha$ كمية صغيرة وحيث إن $\sin(l - \alpha)$ يساوي تقريباً $l - \alpha$ و $\sin(l - \alpha)$ يساوي تقريباً $\sin(2l)$ ، فيمكن أن نحصل على معادلة عبر تقريب من الدرجة الأولى لـ ε^2 ،

$$l - \alpha \approx \tan^2 \frac{\varepsilon}{2} \sin(2l) \approx 0.043 \sin(2l). \quad (4-66)$$

(٤-٤) الأوج والحضيض

المصدر الثاني للاختلاف بين الشمس المتوسطة الافتراضية والشمس الحقيقية هو أن مدار الأرض على شكل قطع ناقص وليس دائرة. والمسافة بين الأرض والشمس تكون هي الأبعد عند «الأوج» والأقرب عند «الحضيض». والمقابل الإنجليزي للأوج aphelion، مشتق من الكلمتين اليونانيتين apo وتعني «بعيداً عن» و helios وتعني «الشمس»، في حين أن المقابل الإنجليزي للحضيض perihelion، يتضمن الكلمة اليونانية peri وتعني «قريباً من». نعرض تاريخ ووقت اليوم لكل أوج وحضيض فيما بين عامي 2011 و 2020 في الجدول ٤-٤. (دقة الوقت الخاص بالأوج والحضيض مُقربة للساعة، في حين أن دقة الاعتدالين والانقلابين مقربة للدقيقة.) وتكون المسافة بين الأرض والشمس أبعد بنحو 3 بالمائة في الأوج مقارنة بتلك التي تكون في الحضيض. ولأن شدة الإشعاع تتناسب عكسياً مع مربع المسافة، فإن قدرة الإشعاع الشمسي في بداية يناير تكون أقوى بنسبة 6 بالمائة من تلك التي تكون في بداية يوليو.

جدول ٤-٤: النقاط الرئيسية فيما بين عامي 2011 و 2020.

العام	الحضيض	الأوج	الاعتدالان	الانقلابان
2011	3 يناير، الساعة 19	4 يوليو، الساعة 15	20 مارس، 23:21	21 يونيو، 17:16
			23 سبتمبر، 09:05	22 ديسمبر، 05:30
2012	5 يناير، الساعة 1	5 يوليو، الساعة 4	20 مارس، 05:14	20 يونيو، 23:09
			22 سبتمبر، 14:49	21 ديسمبر، 11:12
2013	2 يناير، الساعة 5	5 يوليو، الساعة 15	20 مارس، 11:02	21 يونيو، 17:16
			22 سبتمبر، 20:44	22 ديسمبر، 05:30
2014	4 يناير، الساعة 12	4 يوليو، الساعة 0	20 مارس، 16:57	21 يونيو، 16:38

تتبع ضوء الشمس

العام	الحضيض	الأوج	الاعتدالان	الانقلابان
2015	4 يناير، الساعة 7	4 يوليو، الساعة 15	23 سبتمبر، 02:29	22 ديسمبر، 04:48
			20 مارس، 22:45	21 يونيو، 17:16
2016	2 يناير، الساعة 23	4 يوليو، الساعة 16	23 سبتمبر، 08:21	22 ديسمبر، 05:30
			20 مارس، 04:30	20 يونيو، 22:34
2017	4 يناير، الساعة 14	3 يوليو، الساعة 20	22 سبتمبر، 14:21	21 ديسمبر، 10:44
			20 مارس، 10:29	21 يونيو، 04:24
2018	3 يناير، الساعة 6	6 يوليو، الساعة 17	22 سبتمبر، 20:02	21 ديسمبر، 16:28
			20 مارس، 16:15	21 يونيو، 10:07
2019	3 يناير، الساعة 5	4 يوليو، الساعة 22	23 سبتمبر، 01:54	21 ديسمبر، 22:23
			20 مارس، 21:58	21 يونيو، 15:54
2020	5 يناير، الساعة 8	4 يوليو، الساعة 12	23 سبتمبر، 07:50	22 ديسمبر، 04:19
			20 مارس، 03:50	20 يونيو، 21:44
			22 سبتمبر، 13:31	21 ديسمبر، 10:02

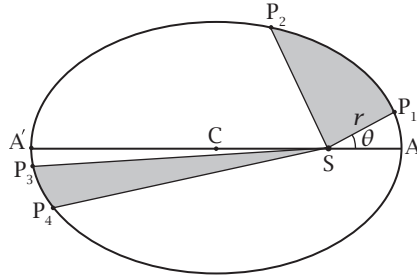
(٤-٥) اختلاف التوقيت الناتج عن الانحراف المداري

إن انحراف مدار الأرض حول الشمس جعله طرفاً آخر في معادلة الوقت. وطبقاً للقانون الأول لكبلر، فإن مدار الأرض حول الشمس قطع ناقص، كما أن موقع الشمس موجود في إحدى بؤرتي القطع الناقص. بالنسبة لراصدٍ على الأرض، تدور الشمس حول الأرض عبر قطع ناقص:

$$r = \frac{p}{1 + e \cos (\theta - \theta_0)}, \quad (4-67)$$

بحيث إن r هي المسافة اللحظية فيما بين الشمس والأرض، و e هو انحراف القطع الناقص، وحالياً e يساوي 0.0167، و θ هو خط الطول الحقيقي للشمس عبر البروج، و θ_0 هو خط الطول الحقيقي للحضيض، و p عبارة عن ثابت.

فيزياء الطاقة الشمسية



شكل ٤-١٤: انحراف مدار الأرض: قوانين كبلر. طبقاً لقوانين كبلر، تدور الأرض حول الشمس في مدار على هيئة قطع ناقص. وهذا يؤدي إلى وجود اختلاف بين توقيت الشمس المتوسطة وتوقيت الشمس الحقيقية بدورية عام.

وطبقاً للقانون الثاني لكبلر، فإن المتجه النصف قطري الخاص بالقطع الناقص يقطع مساحات متساوية خلال أزمنة متساوية:

$$\frac{1}{2} \int_0^t r^2 d\theta = \frac{1}{2} \int_0^t \frac{p^2}{[1 + e \cos (\theta - \theta_0)]} d\theta \propto t. \quad (4-68)$$

ولأن الانحراف المداري e صغير، فيمكن توسيع الدالة المتكاملة للمعادلة 4-68 إلى متسلسلة أُسية:

$$t \propto \int_0^t [1 - 2e \cos (\theta - \theta_0)] d\theta = \theta - 2e \sin (\theta - \theta_0). \quad (4-69)$$

لعام بأكمله، يزيد خط الطول بمقدار 2π وتعود دالة الجيب لقيمتها الأصلية. والآن، نربط بين خط الطول الحقيقي للشمس، θ ، وخط الطول المتوسط l الذي ناقشناه في القسم السابق، والذي يتناسب مع الوقت. وبالنسبة لسنة شمسية، تزيد الكميتان بمقدار 2π . وهكذا نحصل على ما يلي:

$$l = \theta - 2e \sin (\theta - \theta_0). \quad (4-70)$$

تتبع ضوء الشمس

إذا كان الانحراف المداري e لا يُذكر، فنحصل على:

$$\theta = l. \quad (4-71)$$

للحصول على تقريب من الدرجة الأولى، نستبدل θ بـ l في الطرف الثاني من معادلة 4-70، مما ينتج عنه:

$$\theta = l + 2e \sin (l - l_0), \quad (4-72)$$

بحيث إن l_0 هو خط طول الحضيض. ويعتمد الطرف الثاني من المعادلة 4-72 على انحراف المدار.

(٦-٤) معادلة الوقت

بالجمع بين المعادلتين 4-72 و 4-66، نحصل على تعبير كامل لمعادلة الوقت بتقريب من الدرجة الأولى للميلان البروجي وبتقريب من الدرجة الأولى للانحراف المداري بحيث e يساوي 0.0167:

$$\begin{aligned} ET = l - \alpha &= \tan^2 \frac{\epsilon}{2} \sin (2l) - 2e \sin (l - l_0) \\ &\approx 0.043 \sin (2l) - 0.0334 \sin (l - l_0). \end{aligned} \quad (4-73)$$

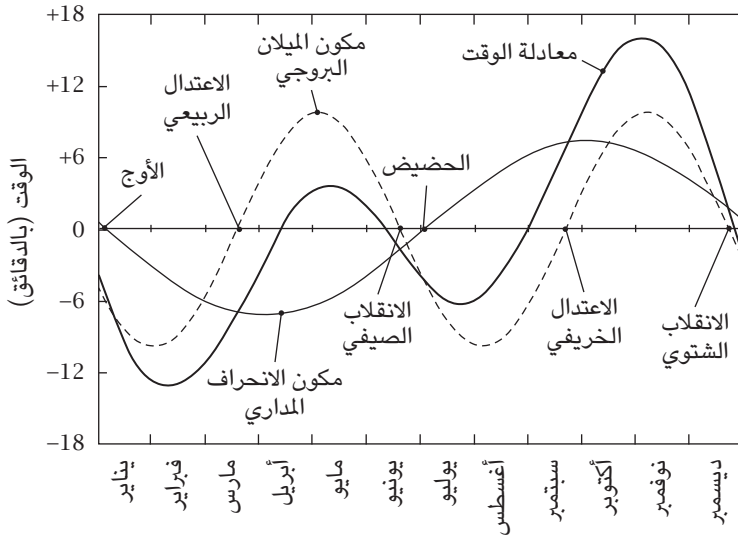
إن وحدة قياس زاويتي l و α هي الراديان. والدائرة الكاملة تساوي 2π . ولتحويل الوحدة إلى الوقت الذي نعرفه، نلاحظ أن الشمس المتوسطة تدور حول الأرض كل 24 ساعة. والوقت الذي تستغرقه الشمس المتوسطة لتدرك الشمس الحقيقية، أو العكس، باتباع المعادلة 4-73، هو:

$$\begin{aligned} ET (\text{min}) &= \frac{24 \times 60}{2\pi} [0.043 \sin (2l) - 0.0334 \sin (l - l_0)] \\ &= 9.85 \sin (2l) - 7.65 \sin (l - l_0). \end{aligned} \quad (4-74)$$

في المعادلة 4-74، وكما هو معتاد، فإن الفارق في الوقت يُعبّر عنه بالدقائق. وباستخدام الصيغة التقريبية لخط الطول المتوسط l ، المعادلة 4-27، يمكن الحصول على تعبير صريح عن معادلة الوقت كما يلي:

$$ET = \left[9.85 \sin \left(\frac{4\pi (N - 80)}{365.2422} \right) - 7.65 \sin \left(\frac{2\pi (N - 3)}{365.2422} \right) \right] (\text{min}). \quad (4-75)$$

هنا من المفترض أن يكون تاريخ الحضيض 3 يناير. ويمكن حساب رقم اليوم في السنة N باستخدام المعادلة 4-28. والمعادلة 4-75 دقيقة بالنحو الكافي للتعامل مع المسائل الخاصة بتتبع ضوء الشمس. يعرض الشكل ٤-١٥ مخططاً لذلك. تذكر أن الزاوية الساعية w تُقاس في اتجاه مضاد لقياس المطلع المستقيم α وأن معادلة الوقت يجب أن تُضاف للزاوية الساعية للشمس، مما يعني أن تلك المعادلة إذا كانت موجبة، فإن الشمس الحقيقية تكون أسرع من الشمس المتوسطة.



شكل ٤-١٥: معادلة الوقت. المنحنى السميك، الفارق بين التوقيت الشمسي المتوسط والتوقيت الشمسي الحقيقي، المعادلة المعروفة بمعادلة الوقت، له طرفان. الطرف الأول، المنحنى المتصل الرفيع، له دورية عام، وينشأ عن انحراف المدار، ويبدأ عند الأوج. والطرف الآخر، المنحنى المتقطع، له دورية نصف عام، وينشأ عن الميلان البروجي، ويبدأ عند الاعتدال الربيعي.

يمكن استخدام المعادلة 4-75 لتحويل التوقيت القياسي إلى توقيت شمسي. ويُحدد التوقيت القياسي من خلال مقابلة Δ من التوقيت العالمي، التي تكون تقريبًا دائمًا عددًا صحيحًا من الساعات. على سبيل المثال، التوقيت القياسي الشرقي يتخلف خمس ساعات وراء التوقيت العالمي؛ أي أن Δ تساوي -5، والتوقيت الصيفي الشرقي يتخلف أربع ساعات وراء التوقيت العالمي؛ أي أن Δ تساوي -4؛ لذا فإن التوقيت الشمسي $t_{\odot}$ هو:

$$t_{\odot} = UT + \frac{1}{15}\lambda - \Delta + ET, \quad (4-76)$$

بحيث يكون λ هو خط طول الراصد وتقابل كل ساعة 15 درجة، و ET هي معادلة الوقت المحددة من خلال المعادلة 4-73. وبضبط $t_{\odot}$ على صفر، يمكن تحديد التوقيت القياسي لوقت الظهر الشمسي، T_0 ، من معادلة 4-76:

$$T_0 = \Delta - \frac{1}{15}\lambda - ET. \quad (4-77)$$

كمثال، إن Δ بالنسبة لمدينة نيويورك، عندما λ يساوي -73 درجة و58 دقيقة قوسية، تساوي -4 ساعات و56 دقيقة. وبالنسبة للتوقيت القياسي الشرقي، فإن Δ تساوي -5. وفي وقت الظهر بالتوقيت القياسي الشرقي، التوقيت الشمسي المتوسط يكون 12:04 فيما بعد الظهر. وفي منتصف نوفمبر، تعطي معادلة 4-75 معادلة وقت تساوي 16 دقيقة؛ مما يعني أن الشمس الحقيقية تكون أسرع بمعدل 16 دقيقة من الشمس المتوسطة؛ لذا ففي الساعة 12:00 بالتوقيت القياسي الشرقي، يكون التوقيت الشمسي 12:20 ظهرًا. وتكون الشمس غرب خط الزوال بخمس درجات.

(٧-٤) ميل الشمس

في الفصل الرابع - قسم (١-٣)، عرضنا معادلة تقريبية لميل الشمس (معادلة 4-27). هنا، سنشتق معادلة أكثر دقة لميل δ الشمس. إن النقطة المرجعية لميل الشمس هي

الاعتدال الربيعي، حيث بحسب التعريف يكون الميل صفراً، ويكون خط الطول البروجي أيضاً صفراً. إذا كان خط طول الشمس خطياً مع الوقت، فتعطي صيغة الجيب ما يلي:

$$\sin \delta = \sin \varepsilon \sin l. \quad (4-78)$$

لكن تؤدي الحركة البروجية لطرف إضافي:

$$\sin \delta = \sin \varepsilon \sin \{l + 2e [\sin (l - l_0) - \sin l_0]\}. \quad (4-79)$$

من ثم، تكون:

$$\delta = \arcsin (\sin \varepsilon \sin \{l + 2e [\sin (l - l_0) - \sin l_0]\}). \quad (4-80)$$

(٨-٤) مخطط الميل

كنتيجة مجمعة لمعادلة الوقت واختلاف الميل، فإن الموقع الظاهري للشمس في وقت معين من اليوم يختلف عبر التاريخ في العام، مما يكون مساراً محدد المعالم على السماء يُطلق عليه «مخطط الميل» أو «الأناملة». يمكن تسجيل المسار بتثبيت كاميرا باتجاه السماء الجنوبية (في نصف الكرة الشمالي)، وأخذ صورة واحدة في نفس الوقت من اليوم كل يوم، ثم تجميع صور الأيام الشمسية معاً. سيظهر نمط على شكل رقم ثمانية باللغة الإنجليزية. ملحق الصور الشكل ٢ جمعه الفلكي اليوناني أنتوني أيوماميتيس من 47 صورة فوتوغرافية لليوم الصافي مأخوذة في عام 2003 قرب معبد أبوللو، بمدينة كورنث، اليونان.

مسائل

(4-1) بالنسبة لمكان في المنطقة المتجمدة بدائرة عرض ϕ يحقق ما يلي: $\phi > \pi/2 - \varepsilon$ ، حدّد أول يوم وآخر يوم من العام لا تغرب فيه الشمس.

(4-2) بالنسبة لمكان في المنطقة المتجمدة بدائرة عرض ϕ يحقق ما يلي: $\phi > \pi/2 - \varepsilon$ ، حدّد أول يوم وآخر يوم من العام التالي لا تشرق فيه الشمس.

(4-3) بالنسبة لنافذة مواجهة للجنوب بمساحة A ، احسب إجمالي الإشعاع الشمسي لأي يوم في العام.

تلميح: بالنسبة للأيام التالية للاعتدال الربيعي والسابقة على الاعتدال الخريفي، يكون وقت الإشعاع بين النقطتين حيث تتقاطع الشمس مع الدائرة العظمى الممتدة من الشرق للغرب. وفي غير ذلك، تكون الشمس في الجانب الغربي من المبنى.

(4-4) في «التقويم الفلكي» لعام 2009، الأطراف الأساسية لمعادلة الوقت بالدقائق هي (باستخدام ترميزنا):

$$ET = -108.5 \sin l + 596.0 \sin 2l - 428.2 \cos l, \quad (4-81)$$

بحيث:

$$l = 279^\circ.791 + 0.985647N, \quad (4-82)$$

بحيث N هو عدد الأيام بدءاً من الأول من يناير، و l هو خط الطول المتوسط للشمس.

الأسئلة

(1) ما معنى العدد 0.985647؟

(2) ما معنى زاوية الطور 279.791° ؟

(4-5) اكتب طرفي الجيب وجيب التمام للمعادلة 4-81 في الشكل $\sin(l - l_0)$ ، بحيث l_0 زاوية طور ثابتة. وضح معنى الثابت l_0 .

(4-6) حدد وقت غروب الشمس (بالتوقيت الشمسي) وطول وقت النهار لمدينة نيويورك في يوم رأس السنة ويوم الذكرى وعيد العمال وعيد الشكر.

(4-7) ما نسبة القدرة الشمسية على سطح رأسي مواجه للجنوب، وسطح أفقي، وسطح مائل غير معتمد على دائرة العرض في وقت الظهر الشمسي في أحد الاعتدالين (الربيعي أو الخريفي) لمدينة نيويورك؟

(4-8) في مدينة نيويورك، حيث دائرة العرض $40^\circ 47'$ ، في يوم الذكرى (25 مايو) وعيد الشكر (27 نوفمبر) لعام 2009، في وقت الظهر الشمسي، حدد ميل الشمس وارتفاعها وكثافة القدرة الخاصة بضوء الشمس المباشر بالواط لكل متر مربع على سطح أفقي.

(4-9) في مدينة نيويورك، حيث دائرة العرض دائرة العرض $40^{\circ}47'$ وخط الطول $73^{\circ}58'$ ، في يوم الذكرى (25 مايو) وعيد الشكر (27 نوفمبر) لعام 2009، حدد التوقيت المدني (التوقيت القياسي الشرقي أو التوقيت الصيفي الشرقي إذا لزم الأمر) لوقت الظهر الشمسي (الوقت الذي تتقاطع فيه الشمس مع خط الزوال المحلي).
(4-10) حدد وقت البداية ووقت النهاية للإشعاع الشمسي على سطح باتجاه افتراضي β و γ .

(4-11) حدد وقت البداية ووقت النهاية للإشعاع الشمسي على سطح مواجه للجنوب بحيث تساوي γ صفرًا ولا تساوي β صفرًا.
(4-12) حدد الإشعاع اليومي المباشر لسطح مواجه للجنوب بحيث تساوي γ صفرًا ولا تساوي β صفرًا.

الفصل الخامس

تفاعل ضوء الشمس مع الأرض

في هذا الفصل، ندرس تفاعل ضوء الشمس مع الأرض؛ بسبب تأثير الغلاف الجوي، نحو نصف ضوء الشمس ينعكس أو يُشْتَّت أو يُمتَصَّ قبل وصوله إلى سطح الأرض. ويختلف ضوء الشمس المتاح حسب المكان والوقت. بالإضافة إلى ذلك، يتسرَّب ضوء الشمس الذي يمتصه سطح الأرض إلى الأرض ويُخزَّن على هيئة حرارة ويصبح «طاقة حرارية أرضية ضحلة»، تُعدُّ أحد المصادر الرئيسية للطاقة المتجددة.

(١) تفاعل الإشعاع والمادة

في هذا القسم، نعرض الظواهر الفيزيائية العامة لتفاعل الإشعاع مع المادة.

(١-١) الامتصاصية والانعكاسية والنفاذية

عند سقوط الشعاع على قطعة من المادة، فإن جزءًا من الإشعاع «ينعكس»، وجزءًا آخر «يُمتَصَّ»، وجزءًا ثالثًا «ينفذ». ولوصف تفاعل الإشعاع مع المادة وفهمه، نقدم المعاملات اللابعدية الثلاثة التالية:

- «الامتصاصية» أو «الامتصاص» $A(\lambda)$: الجزء الممتص من الإشعاع الساقط بطول موجي λ المُمتَص.
- «الانعكاسية» أو «الانعكاس» $R(\lambda)$: الجزء المنعكس من الإشعاع الساقط بطول موجي λ .
- «النفاذية» أو «النفاذ» $T(\lambda)$: الجزء النافذ من الإشعاع الساقط بطول موجي λ .

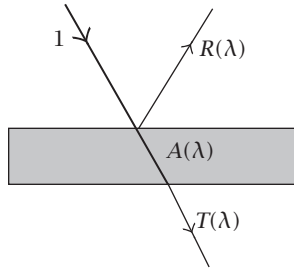
فيزياء الطاقة الشمسية

إذا كانت طبيعة الإشعاع لا تتغير أو بقي الطول الموجي الخاص به دون تغيير، فإن مبدأ حفظ الطاقة يحتم أن يُمتصَّ الإشعاع الساقط أو ينعكس أو ينفذ؛ انظر الشكل ١-٥؛ لذا فإن:

$$A(\lambda) + R(\lambda) + T(\lambda) = 1. \quad (5-1)$$

بالنسبة للأسطح المعتمدة، تكون النفاذية صفرًا. ويحتم مبدأ حفظ الطاقة أن يُمتصَّ الإشعاع الساقط أو ينعكس:

$$A(\lambda) + R(\lambda) = 1. \quad (5-2)$$



شكل ١-٥: الامتصاصية والانعكاسية والنفاذية. جزء من الإشعاع الساقط على قطعة من المادة «يُمتص»، وجزء آخر «ينعكس»، والباقي «ينفذ». يظهر هنا ثلاثة معاملات لابعدية: «الامتصاصية» $A(\lambda)$ ، و«الانعكاسية» $R(\lambda)$ ، و«النفاذية» $T(\lambda)$. ويحتم مبدأ حفظ الطاقة أن يساوي حاصل جمع الثلاثة 1.

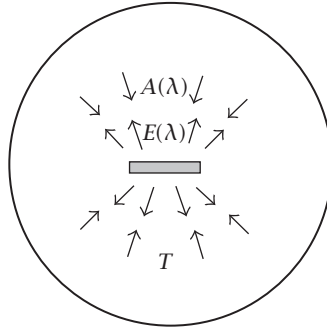
(٢-١) الانبعاثية وقانون كيرشوف

عند تسخين أي مادة، فإنها ستشع طبقاً لقانون بلانك (انظر الشكل ٢-٥). وتعتمد كثافة القدرة الفعلية للإشعاع أيضاً على طبيعة السطح، لكنها لا تتجاوز أبداً تلك الخاصة بأي جسم أسود. ويُطلق على الإشعاع الفعلي من أي سطح، بوصفه جزءاً من إشعاع الجسم الأسود عند طول موجي معين، اسم «انبعاثيته» $E(\lambda)$. وهي أقل من 1، فيما عدا أنها تساوي 1 تماماً بالنسبة للجسم الأسود. وطبقاً للديناميكا الحرارية الكلاسيكية، أثبت

تفاعل ضوء الشمس مع الأرض

كيرشوف أن «انبعاثية أي سطح عند طول موجي معين يجب أن تساوي امتصاصيته». عند التوازن الحراري، يجب أن تساوي طاقة الإشعاع الصادرة طاقة الإشعاع الممتصة. وإلا، يمكن أن تنتقل الحرارة من خزان بارد إلى خزان ساخن، الأمر الذي يتعارض مع القانون الثاني للديناميكا الحرارية (انظر الفصل السادس)؛ من ثم، فإن الامتصاصية عند طول موجي معين يجب أن تساوي الانبعاثية عند نفس الطول الموجي:

$$E(\lambda) = A(\lambda). \quad (5-3)$$



شكل ٥-٢: الانبعاثية والامتصاصية: عند تسخين أي مادة، فإنها تشع موجات كهرومغناطيسية. يتبع طيف قدرة الإشعاع الأقصى قانون بلانك. وفي الحالة العامة، يُطلق على الإشعاع الفعلي من أي سطح، بوصفه جزءاً من إشعاع الجسم الأسود عند طول موجي معين، اسم «انبعاثيته»، $E(\lambda)$. وعند التوازن الحراري، يجب أن تساوي طاقة الإشعاع الصادرة طاقة الإشعاع الممتصة؛ ومن ثم فإن $E(\lambda) = A(\lambda)$.

(٣-١) قانون بير-لامبرت-بوجير

اكتشف بيير بوجير العلاقة التجريبية بين امتصاص الضوء وخواص الوسط الماص قبل عام 1729، ثم صيغت على يد يوهان هاينريش لامبرت في عام 1760 في أطروحة بعنوان «قياس الضوء»، وتنص على أن شدة الضوء تعتمد على نحو أسّي على سُمك المسار الضوئي z :

$$I_{\lambda}(z) = I_{\lambda}(0) e^{-A(\lambda)z}, \quad (5-4)$$

بحيث إن $A(\lambda)$ هو معامل الامتصاصية للوسط عند الطول الموجي λ ، الذي له بعد بـمعكوس الطول z هو المسار الضوئي.

طُورت العلاقة التجريبية أكثر على يد أوجست بير في عام 1852 للربط بين معامل الامتصاص و«تركيز الجسيمات الماصة»، لتُعرف باسم قانون بير أو قانون بير-لامبرت-بوجير، وذلك كما يلي:

$$I_{\lambda}(z) = I_{\lambda}(0) e^{-N\sigma(\lambda)z}, \quad (5-5)$$

بحيث N هو عدد الجسيمات الماصة لكل وحدة حجم و $\sigma(\lambda)$ هو «المقطع العرضي للامتصاص» الخاص بالمادة الماصة عند الطول الموجي λ . يظهر إثبات بديهي في الشكل 5-3. وبالنسبة لقطعة رفيعة في مسار الامتصاص ذات سُمك dz ومساحة مقطع عرضي S ، فإن المساحة الجزئية dS التي تشغلها الجسيمات الماصة هي:

$$dS = N\sigma(\lambda) S dz. \quad (5-6)$$

من الواضح أن نسبة dS/S من طاقة الإشعاع حُجبت من جانب الجسيمات الماصة:

$$\frac{dI_{\lambda}(z)}{I_{\lambda}(z)} = -\frac{dS}{S} = -N\sigma(\lambda) dz. \quad (5-7)$$

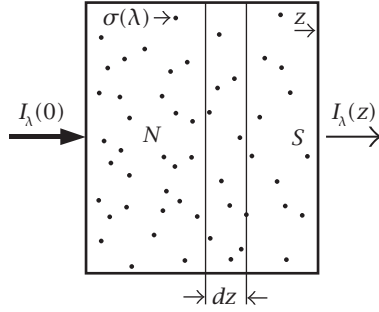
بدمج z واستخدام الشرط الأول حيث z تساوي صفرًا، نحصل على:

$$I_{\lambda}(z) = I_{\lambda}(0) e^{-N\sigma(\lambda)z}. \quad (5-8)$$

بالمقارنة مع المعادلة 5-4، نجد أن $A(\lambda) = N\sigma(\lambda)$. وإذا لم يكن تركيز الجسيمات منتظمًا عبر المسار الضوئي، يمكن وصفه من خلال توزيع التركيز $N(z)$ ، فيمكن توسيع العلاقة السابقة إلى:

$$I_{\lambda}(z) = I_{\lambda}(0) \exp\left(-\int_0^z \sigma(\lambda) N(z) dz\right). \quad (5-9)$$

تفاعل ضوء الشمس مع الأرض



شكل ٥-٣: قانون بير-لامبرت-بوجير. يلعب اعتماد شدة الضوء على تركيز الجسيمات الماصة وطول المسار الضوئي؛ دوراً مهماً في دراسة تأثير الغلاف الجوي على ضوء الشمس.

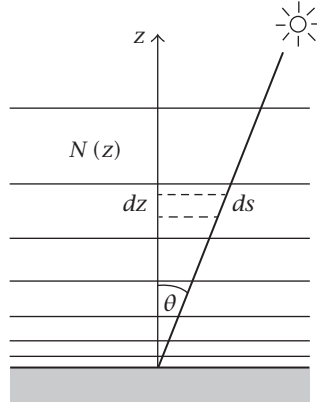
والآن، نحن بصدد التعرض لحالة ذات صلة بتوهين ضوء الشمس من قبل الغلاف الجوي؛ انظر الشكل ٥-٤ في الغلاف الجوي، ولدرجة تقريب جيدة، يكون توزيع الجزيئات والجسيمات دالة بارتفاع z . وإذا كانت الشمس عند نقطة السميت، فطبقاً للمعادلة 5-9، يكون الامتصاص عبر الغلاف الجوي بأكمله هو:

$$\alpha(\lambda, 0) = \frac{I_\lambda(0)}{I_\lambda(\infty)} = \exp\left(-\int_0^\infty \sigma(\lambda) N(z) dz\right). \quad (5-10)$$

إذا كان سمت الشمس هو θ — لاحظ أن $dz = ds \cos \theta$ (انظر الشكل ٥-٤) — فيصبح الامتصاص:

$$\begin{aligned} \alpha(\lambda, 0) &= \exp\left(-\int_0^\infty \sigma(\lambda) N(z) ds\right) \\ &= \frac{1}{\cos \theta} \exp\left(-\int_0^\infty \sigma(\lambda) N(z) dz\right) \\ &= \frac{\alpha(\lambda, 0)}{\cos \theta}. \end{aligned} \quad (5-11)$$

فيزياء الطاقة الشمسية



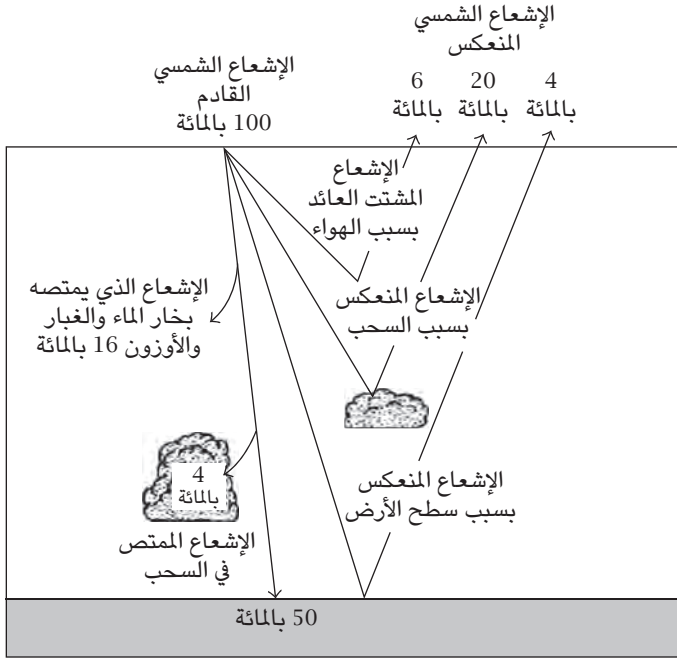
شكل ٥-٤: توهين ضوء الشمس عند السمـت θ . يلعب اعتماد شدة الضوء على تركيز الجسيمات الماصة وطول المسار الضوئي دوراً مهماً في دراسة تأثير الغلاف الجوي على ضوء الشمس.

(٢) تفاعل ضوء الشمس مع الغلاف الجوي

درس علماء المناخ تفاعل ضوء الشمس والغلاف الجوي بكثافة. وفيما يلي ملخص لأهم الحقائق في هذا الإطار: تقريباً، 30 بالمائة من الإشعاع الشمسي ينعكس أو يُشْتَتَّ عائدًا إلى الفضاء؛ انظر الشكل ٥-٦. 6 بالمائة يُشْتَتَّ الهواء و20 بالمائة تعكسه السحب و4 بالمائة يعكسه سطح الأرض و20 بالمائة يمتصه الغلاف الجوي: 16 بالمائة يمتصه بخار الماء والغبار والأوزون، و4 بالمائة أخرى تمتصه السحب. والإشعاع الشمسي الممتص على هذا النحو يُسخِّن الغلاف الجوي. يمتص السطح الصلب للأرض 50 بالمائة من الإشعاع الشمسي. وإجمالي طاقة الإشعاع المستقبلية من قبل الغلاف الجوي وسطح الأرض الصلب يبلغ نحو 70 بالمائة.

يجب أن تكون الأرض في توازن حراري مع ما يحيط بها. في واقع الأمر، فإن نسبة 70 بالمائة من الطاقة الشمسية الداخلة إلى الغلاف الجوي والأرض تعود إلى الفضاء على هيئة إشعاع حراري.

تفاعل ضوء الشمس مع الأرض



شكل ٥-٥: تفاعل ضوء الشمس والغلاف الجوي. تقريباً، 30 بالمائة من الإشعاع الشمسي ينعكس أو يُشْتَتَّ عائدًا إلى الفضاء على الفور، ويمتص الغلاف الجوي والسحب 20 بالمائة منه، وتمتص الأرض 50 بالمائة منه. (انظر المرجع [66]، ص94).

(١-٢) الإشعاع الساقط الطيفي المرجعي لكثافة هواء 1.5

وفق عقود عديدة من القياسات الدقيقة، وُجد أن كثافة قدرة الإشعاع الشمسي خارج الغلاف الجوي هي 1366 W/m^2 . وعلى سطح الأرض، وبسبب عمليتي التشتت والامتصاص، وحتى في ظل سماء صافية على نحو تام، عندما تكون الشمس تقريباً عند نقطة السميت، ينخفض الإشعاع الشمسي بنحو 22 بالمائة. ولأن الشمس يجب أن تكون لها، في المتوسط، زاوية سمت مع الأفق، فإن الانخفاض ينبغي أن يبلغ في المتوسط أكثر من 22 بالمائة.

ولتوحيد قياس تطبيقات الطاقة الشمسية، في عام 1982، بدأت الجمعية الأمريكية للاختبار والمواد (ASTM) في نشر «الجدول القياسية للإشعاع الساقط الطيفي المرجعي لكتلة هواء 1.5». وقد روجع المعيار في عام 2003 ليصبح ASTM G173-03. ونُشر معيار منفصل لكتلة الهواء التي تساوي صفرًا في عام 2006 ليصبح ASTM E490-06. ونُشر ملحق خاص بزوايا الميلان المختلفة في عام 2008 ليصبح المعيار ASTM G197-08. وفي معياري ASTM G173-03 و ASTM G197-08، الأحوال الجوية والمناخية لم تتغير. هذه المعايير تمثل الإشعاع الشمسي في ظل أحوال جوية معقولة خالية من السحب تكون ملائمة للمحاكاة الحاسوبية أو التقدير المقارن أو الاختبار التجريبي لنظم تنسيق النوافذ. وقد عدلت المعيار الأمريكي المنظمة الدولية للمعايير (ISO) ليصبح ISO 9845-1، لعام 1992.

فيما يلي معنى «كتلة الهواء»: عندما تكون الشمس عند نقطة السميت في ظل أحوال جوية معقولة خالية من السحب، يُعرّف معدل الامتصاص الخاص بالغلاف الجوي بأنه كتلة هواء تساوي 1. في أغلب الحالات، لا تكون زاوية نقطة السميت للشمس صفرًا. واختارت الجمعية السابقة الإشارة إليها، كمعيارٍ لها، الحالة التي يكون فيها معدل الامتصاص 1.5 ضعف كتلة الهواء العادية، التي تُختصر إلى كتلة الهواء 1.5. وطبقًا للمعادلة 5-11، تكون زاوية نقطة السميت القياسية هي:

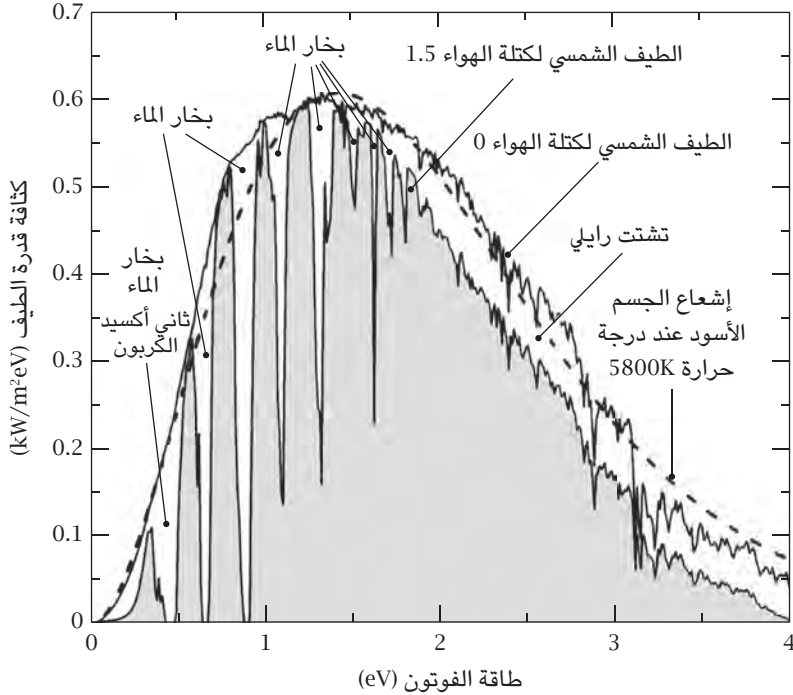
$$\theta = \arccos \frac{1}{1.5} = 48.19^\circ. \quad (5-12)$$

انظر أيضًا الشكل 5-4. كثافة القدرة المتكاملة للإشعاع الشمسي ذي كتلة الهواء 1.5 تكون 1kW/m^2 . والكمية 1kW/m^2 تُعرف كوحدة لقياس الإشعاع تُدعى «1 sun». وسنستخدم تلك الوحدة عبر الكتاب.

يظهر الإشعاع الساقط الطيفي، أو طيف قدرة الإشعاع للإشعاع الشمسي، الخاص بكتلة الهواء 0 وكتلة الهواء 1.5 في الشكل 5-6. طيف كتلة الهواء صفر، فهو الإشعاع الشمسي الموجود خارج الغلاف الجوي. وهو تقريبًا إشعاع جسم أسود عند درجة حرارة 5800K. وكثافة القدرة المتكاملة هي 1.366kW/m^2 . وطيف كتلة الهواء 1.5 يتعرض لعدد من الظواهر الجوية. على جانب الضوء الأزرق، هناك انخفاض هائل في كثافة القدرة بسبب تشتت رايلي من الجزيئات وجسيمات الغبار. واحتمالية حدوث تشتت رايلي

تفاعل ضوء الشمس مع الأرض

تتناسب مع معكوس الأس الرابع للطول الموجي للإشعاع؛ ومن ثم يقل الطول الموجي القصير بشدة. وعلى جانب الضوء تحت الأحمر، يقوم بخار الماء بمعظم عملية الامتصاص ويليه ثاني أكسيد الكربون. وملحق الصور الشكل ١ هو نسخة ملونة من الشكل ٥-٦. ويظهر جدول البيانات في الملحق هـ.



شكل ٥-٦: طيف الإشعاع الشمسي لكتلة الهواء 0 وكتلة الهواء 1.5. إن طيف كتلة الهواء صفر هو الإشعاع الشمسي خارج الغلاف الجوي. وهو تقريبًا إشعاع جسم أسود عند درجة حرارة 5800K. وكثافة القدرة المتكاملة هي 1.366 kW/m^2 . وطيف كتلة الهواء 1.5 يتعرض لعدد من الظواهر الجوية. على جانب الضوء الأزرق، هناك انخفاض هائل في كثافة القدرة بسبب تشتت رايلي من الجزيئات وجسيمات الغبار. وعلى جانب الضوء تحت الأحمر، يقوم بخار الماء بمعظم عملية الامتصاص ويليه ثاني أكسيد الكربون.

(٢-٢) خريطة التشميس السنوي

في الفصل الرابع، ناقشنا اعتماد الإشعاع الشمسي المباشر على الوقت (اليوم في العام والوقت في اليوم) والمكان (دائرة العرض وخط الطول). وبسبب تفاعل الإشعاع الشمسي والغلاف الجوي، يكون الإشعاع الشمسي الفعلي المُستقبل عند السطح دائماً أقل، وتعتمد نسبة الانخفاض على المكان. وعادة ما يُستخدم هنا «خريطة التشميس السنوي»؛ انظر الرسوم 3 و4 و5. وهناك أسلوبان مستخدمان:

(١) طاقة الإشعاع السنوي بـ kWh/m^2 . إن الإشعاع الشمسي القياسي مقداره 1 sun، أو 1kW/m^2 ؛ لذا فإن التشميس عادةً ما يُعبّر عنه h/year . ويتراوح الرقم بين أكثر من 2000h/year (الصحراء الكبرى، وجزء من المناطق النائية في أستراليا وجزء من جنوب أفريقيا) وأقل من 600h/year (جرينلاند، والأجزاء الشمالية من سيبيريا وفنلندا وكندا).

(٢) متوسط طاقة الإشعاع اليومي بـ kWh/m^2 عبر العام. على نحو مماثل، عادةً ما يُعبّر عنه بـ h/day . ويتراوح الرقم من أكثر من 6h/day إلى أقل من 2h/day .

توجد علاقة واضحة بين هذين الأسلوبين:

$$\text{التشميس السنوي} = 365.2422 \times \text{متوسط التشميس اليومي}.$$

$$\text{Annual insolation} = 365.2422 \times \text{average diurnal insolation.} \quad (5-13)$$

يعرض ملحق الصور الشكل ٣ خريطة متوسط التشميس اليومي للعالم، وملحق الصور الشكل ٤ خريطة متوسط التشميس اليومي للولايات المتحدة الأمريكية، وملحق الصور الشكل ٥ خريطة التشميس السنوي لأوروبا.

(٣-٢) عامل الصفاء الجوي

في معظم الأحوال، يكون معدل التشميس الموضح على الخرائط أقل من معدل الإشعاع الشمسي الموضح في الفصل الرابع. والنسبة بينهما تُسمى «عامل الصفاء الجوي»:

$$\bar{K}_T = \frac{\bar{H}}{H_0}, \quad (5-14)$$

تفاعل ضوء الشمس مع الأرض

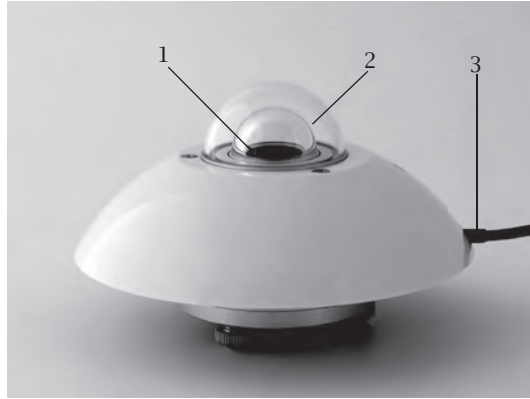
بحيث $\overline{H}_0$ هو متوسط التشميس اليومي في ظل عدم وجود سحب والموضح في الفصل الرابع، و $\overline{H}$ هو متوسط التشميس اليومي المرصود، بوجه عام على مدار عام أو شهر. من الناحية العملية، يُعد متوسط التشميس اليومي الشهري هو المعلومة الأكثر أهمية بالنسبة لتطبيقات الطاقة الشمسية، وهو يُقاس أيضًا على نطاق واسع في العديد من محطات الرصد الشمسي في العالم. ويُجمع أيضًا عامل الصفاء الجوي، $\overline{K}_T$ ، بالنسبة المثوية، في العديد من المدن في العالم. ويعرض الجدول ١-٥ عامل الصفاء الجوي في عدد من المدن الأمريكية، بدءًا من أكثر المدن المشمسة على الأرض، مدينة يوما بأريزونا، إلى واحدة من أكثر المدن المطيرة، هيلو بهاواي. ويوضح العمود الأخير عامل الصفاء الجوي المتوسط السنوي.

جدول ١-٥: عامل الصفاء الجوي الشهري، $\overline{K}_T$ ، بالنسبة المثوية، لعدد من المدن الأمريكية.

المدينة	يوما، أريزونا	لاس فيجاس، نيفادا	لوس أنجلوس، كاليفورنيا	دنفر، كولورادو	نيويورك، نيويورك	سياتل، واشنطن	هيلو، هاواي
يناير	83	74	70	67	49	27	48
فبراير	87	77	69	67	56	34	42
مارس	91	78	70	65	57	42	41
أبريل	94	81	67	63	59	48	34
مايو	97	85	68	61	62	53	31
يونيو	98	91	69	69	65	48	41
يوليو	92	84	80	68	66	62	44
أغسطس	91	86	81	68	64	56	38
سبتمبر	93	92	80	71	64	53	42
أكتوبر	93	84	76	71	61	36	41
نوفمبر	90	83	79	67	53	28	34
ديسمبر	83	75	72	65	50	24	36
المتوسط	91	82	73	67	59	45	39

(٤-٢) الإشعاع الشمسي المباشر والمشتت

تُجمَع أغلب بيانات الإشعاع الشمسي باستخدام جهاز يُسمى «البيرانومتر» الذي يُستخدم لقياس الإشعاع الشمسي الساقط العالمي من أيّ من نصفي الكرة الأرضية. ويظهر بيرانومتر قياسي في الشكل ٥-٧. الجزء الأساسي في هذا الجهاز هو ماص أسود طبقي الشكل (1)، مغطى بقبة زجاجية واقية (2). وينتج الإشعاع الذي يستقبله الماص فرق جهد يتناسب مع الحرارة، والجهاز ككل موصل بفولتامتري من خلال كابل (3). لا توجد حاجة للبطاريات أو الإلكترونيات، والجهاز مصمم بحيث يستقبل ضوء الشمس المباشر والمشتت من السماء بأكملها.



شكل ٥-٧: البيرانومتر: الجزء الأساسي في هذا الجهاز هو ماص أسود طبقي الشكل (1)، مغطى بقبة زجاجية واقية (2). وينتج الجهاز فرق جهد يتناسب مع الإشعاع الذي يستقبله الماص عبر نصف الكرة الأرضية بأكملها، ثم يخرج عبر الكابل (3).

يكون الإشعاع الشمسي الساقط على سطح ما دائماً مزيجاً من ضوء الشمس المباشر وضوء الشمس المشتت. وفي أي تطبيق عملي، يتصرّف ضوء الشمس المباشر وضوء الشمس المشتت على نحو مختلف. على سبيل المثال، بالنسبة للتطبيقات الشمسية المركزة، يُستخدم ضوء الشمس المباشر فقط. على الجانب الآخر، بالنسبة للمستقبلات الكهروضوئية أو

الحرارية الشمسية المسطحة، يلعب ضوء الشمس المشتت دورًا كبيرًا؛ لذا من المهم معرفة نسبة نوعي ضوء الشمس.

بوجه عام، كلما زادت السحب أو الغيوم، زادت نسبة الإشعاع المشتت. ويجب أن تكون هناك علاقة كمية بين عامل الصفاء الجوي ونسبة ضوء الشمس المباشر لضوء الشمس المشتت. وقد درست هذه المسألة بالتفصيل في بحث قام به ليو وجوردان [52]، وتناولها عدد كبير من الدراسات. والنقطة الأساسية هنا تتمثل في تقدير نسبة متوسط الإشعاع المشتت عبر فترة زمنية $\bar{H}_d$ لمتوسط الإشعاع الإجمالي $\bar{H}$. سنعرض هنا لنموذج بسيط من الناحية المفاهيمية لتقدير عام لتلك النسبة الذي يتكوّن من ثلاثة مكونات: أولاً: حتى في يوم صافٍ على نحو كامل، يكون الإشعاع المشتت من السماء ملحوظًا. وتُظهر التجارب أن متوسط نسبة هذا الإشعاع يبلغ نحو 15 بالمائة من إجمالي الإشعاع؛ لذا إذا كان معدل الصفاء أكبر من 85 بالمائة، فإن النسبة تكون 15 بالمائة:

$$\text{if } \bar{K}_T > 0.85, \text{ then } \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 0.15, \quad (5-15)$$

بحيث $\bar{K}_T$ تكون كما عُرفت في المعادلة 5-14. ثانياً: عندما تكون السماء غائمة بشدة، يُشتت كل الإشعاع.

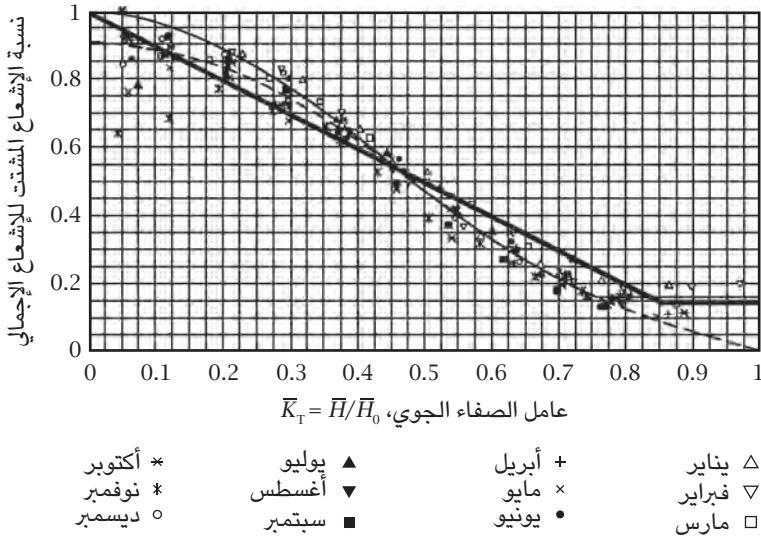
$$\text{if } \bar{K}_T \approx 0, \text{ then } \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1. \quad (5-16)$$

ثالثاً: بالنسبة للحالات التي بين الحالتين السابقتين، يكون أبسط تمثيل رياضي هو استكمال داخلي خطي.

$$\text{If } 0.85 > \bar{K}_T > 0, \text{ then } \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1 - \bar{K}_T. \quad (5-17)$$

إن هذا النموذج البسيط جداً مفاهيمياً ورياضياً يتناسب مع البيانات التي نشرها ليو وجوردان [52]، ويتوافق مع العديد من الدراسات اللاحقة. انظر الشكل 5-8. تمثل الخطوط المستقيمة السميكة النموذج المبسط؛ أي، المعادلات من 5-15 حتى 5-17. وتمثل المنحنيات صيغاً أكثر تعقيداً قدمها ليو وجوردان.

فيزياء الطاقة الشمسية



شكل ٥-٨: العلاقة بين الإشعاع المشتت وعامل الصفاء الجوي: نقاط البيانات مصدرها بحث ليو وجوردان [52]. تمثل الخطوط المستقيمة السميكة النموذج المبسط، المعادلات من 5-15 وحتى 5-17. وتمثل المنحنيات متعددة حدود من الدرجة الثالثة قدمها ليو وجوردان [52]. وتدعم البيانات والتحليلات اللاحقة أيضًا وجود علاقة خطية بسيطة؛ انظر المرجع [54].

(٣) اختراق الطاقة الشمسية للأرض

من الحقائق التجريبية الثابتة أن التدفق الحراري q_z في معظم المواد الصلبة بطول اتجاه z يتناسب مع التدرج الحراري في المادة الصلبة بطول هذا الاتجاه:

$$q_z = -k \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (5-18)$$

بحيث k هو الموصلية الحرارية، وهي ثابت يعتمد على طبيعة المادة الصلبة؛ والعلامة السالبة نتيجة للحقيقة التي ترى أن الحرارة تتدفق في الاتجاه الذي تنقص فيه درجة الحرارة. في نظام الوحدات الدولي، وحدة التدفق الحراري هي الواط لكل متر مربع،

تفاعل ضوء الشمس مع الأرض

كما أن وحدة الموصلية الحرارية هي الواط لكل متر كلفن. ويعرض الجدول ٥-٢ لقيمة الموصلية الحرارية للمواد الأكثر استخدامًا في البناء.

جدول ٥-٢: الخاصية الحرارية للأرض.*

المادة	الكثافة ρ (مضروبًا في 10^3 kg/m^3)	الكثافة الحرارية c_p (مضروبًا في $10^3 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$)	الموصلية الحرارية k (W/m · K)	المعامل α (مضروبًا في $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)
الحجر الجيري	2.18	0.91	1.5	0.626
الجرانيت	3	0.79	3.5	1.47
الأرض الرطبة	1.7	2.1	2.5	0.70
الأرض الجافة	1.26	0.795	0.25	0.25

* المصدر: «دليل المعهد الأمريكي للفيزياء»، المعهد الأمريكي للفيزياء، نيويورك، الطبعة الثالثة، 1972، ومرجع [31].

تخيل نظامًا أحادي الأبعاد درجة الحرارة والتدفق الحراري فيه دالة للموقع z والوقت t . عمليًا، يمكن أن يكون النظام قضيبًا بمقطع عرضي منتظم A . وتكون درجة الحرارة والتدفق الحراري منتظمين داخل كل مقطع عرضي، وإذا كانت كثافة المادة هي ρ والكثافة الحرارية هي c_p ، فإن التغير في المحتوى الحراري للوح بسُمك Δz وبدرجة حرارة T هو:

$$\Delta Q = \rho c_p A \Delta T \Delta z. \quad (5-19)$$

بالجمع بين المعادلتين 5-18 و 5-19، نجد أن المعادلة التفاضلية لتوزيع درجة الحرارة هي:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho c_p} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}. \quad (5-20)$$

افترض أن:

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p}. \quad (5-21)$$

وستصبح المعادلة 5-20 كما يلي:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}. \quad (5-22)$$

نحن نسعى لحل المعادلة 5-22 لفضاء شبه لامتناهٍ z أصغر من أو يساوي صفراً بشروط حدية:

$$T = T_0 + \Delta T \cos \omega t, \quad z = 0, \quad (5-23)$$

$$T = T_0, \quad z = \infty, \quad (5-24)$$

بحيث ΔT هي سعة تغْيُر درجة الحرارة عندما يساوي z صفراً و ω هو تَرْدُده الدائري. في الحالة التي نتأملها، أي، التغير السنوي لدرجة الحرارة، يكون التردد الدائري هو:

$$\omega = \frac{2\pi}{(365.25 \times 86400)} \approx 2 \times 10^{-7} \text{s}^{-1}. \quad (5-25)$$

بإدخال درجة حرارة لأبعدية:

$$\Theta = \frac{T - T_0}{\Delta T}, \quad (5-26)$$

تصبح المعادلة 5-22 كما يلي:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 \Theta}{\partial z^2} \quad (5-27)$$

تفاعل ضوء الشمس مع الأرض

بشروط حدية:

$$\Theta = \cos \omega t, \quad z = 0, \quad (5-28)$$

$$\Theta = 0, \quad z = \infty. \quad (5-29)$$

يمكن حل المعادلة 5-27 على نحو أسهل كثيرًا عند استخدام الأعداد المركبة عن طريق علاقة أولير $e^{ix} = \cos x + i \sin x$ أو $\cos x = \operatorname{Re} [e^{ix}]$. وتصبح الشروط الحدية الآن:

$$\Theta = \operatorname{Re} [e^{-i\omega t}], \quad z = 0, \quad (5-30)$$

$$\Theta = 0, \quad z = \infty, \quad (5-31)$$

ويمكن حل المعادلة 5-27 باستخدام الحل المبدئي التالي:

$$\Theta = \operatorname{Re} [e^{\lambda z - i\omega t}]. \quad (5-32)$$

من الواضح أن الحل المقترح (المعادلة 5-32) يحقق الشرط الحدي الذي يكون فيه z صفرًا (المعادلة 5-30). ويمكن تحديد الثابت λ من خلال المعادلة التفاضلية 5-27. في الواقع، إنها تعطي ما يلي:

$$\alpha \lambda^2 = -i\omega. \quad (5-33)$$

هناك حلان للمعادلة 5-33:

$$\lambda = \pm \left[\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} - i\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} \right]. \quad (5-34)$$

وبسبب أن الشرط الحدي z يساوي ∞ ، يُسمَح فقط بالعلامة السالبة. وأخيرًا:

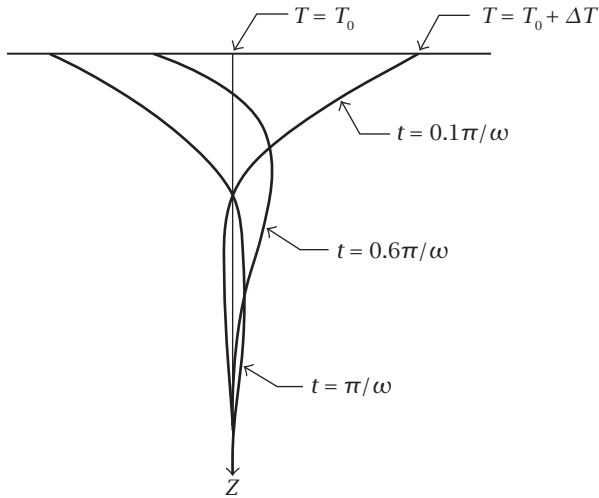
$$\Theta = \exp \left\{ -\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} z \right\} \cos \left(\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} z - \omega t \right). \quad (5-35)$$

أو، باستخدام المعادلة 5-26، يكون الحل:

$$T = T_0 + \Delta T \exp \left\{ -\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} z \right\} \cos \left(\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} z - \omega t \right). \quad (5-36)$$

بالنسبة لمثال رقمي، نستخدم الحجر الجيري، و T_0 يساوي 15 درجة مئوية، و ΔT تساوي 12 درجة مئوية. ومن معادلة 5-25 والجدول 5-٧، نجد أن الجذر التربيعي ل $\omega/2\alpha$ يساوي الجذر التربيعي لما يلي: $2 \times 10^{-7} / 2 \times 0.626 \times 10^{-6}$ ؛ أي تقريباً 0.33m^{-1} . وبأخذ رقم الشهر كمعامل:

$$T = 15^\circ + 12^\circ e^{-0.33z} \cos \left(0.33z - \frac{2\pi \times (\text{month} - 7)}{12} \right). \quad (5-37)$$



شكل ٥-٩: اختراق الطاقة الشمسية للأرض. على سطح الأرض، يكون متوسط درجة الحرارة T_0 وتكون سعة تغير درجة الحرارة السنوي ΔT . تخترق الحرارة سطح الأرض بتأخير زمني. وعند عمق معين، تكون صورة تغير درجة الحرارة السنوي «معكوسة».

تفاعل ضوء الشمس مع الأرض

بمسافة z حيث الجذر التربيعي لـ $\omega/2\alpha$ يساوي π ، تصبح قيمة دالة جيب التمام سالبة. على سبيل المثال، وفقاً للمعادلة 5-37، عندما $0.33z = \pi$ ، أو $z = 9.5\text{m}$ ، تكون درجة الحرارة في الصيف هي الأقل وفي الشتاء هي الأعلى. وتكون صورة تغير درجة الحرارة السنوي «معكوسة»؛ انظر الشكل 5-9؛ لذا يمكن استخدام الطاقة الشمسية المخزنة بكفاءة. وسنناقش تفاصيل ذلك في الفصل السادس.

مسائل

(5-1) باعتبار الشمس مشعاً أسود بحيث $T_{\odot}$ تساوي 5800K، احسب درجة حرارة سطح الأرض $T_{\oplus}$ ، مع افتراض أن درجة الحرارة منتظمة عبر سطحها بالكامل، وهو أيضاً مشع أسود.

(5-2) كما في المسألة السابقة، افترض أن الشمس مشع أسود بـ $T_{\odot}$ تساوي 5800K. إذا كانت امتصاصية الأرض 0.65 عبر النطاق الطيفي بالكامل وسطحها بالكامل، فما درجة حرارة سطح الأرض $T_{\oplus}$ ؟

(5-3) بالتعويض المباشر، أثبت أن:

$$u(z, t) = \frac{A}{\sqrt{t}} \exp \left\{ \frac{-z^2}{4\alpha t} \right\} \quad (5-38)$$

حل لمعادلة التوصيل الحراري أحادية البعد التالية:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}. \quad (5-39)$$

(5-4) لأن معادلة التوصيل الحراري خطية، إذا كان $u(z, t)$ حلاً لها، فإن التكامل اللامتناهي لـ $u(z, t)$ حل أيضاً. أثبت أن

$$u(z, t) = A \operatorname{erf} \frac{z}{2\sqrt{\alpha t}} \quad (5-40)$$

حل لمعادلة 5-39، حيث تُعرّف دالة الخطأ $\text{erf}(x)$ كما يلي:

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\xi^2} d\xi. \quad (5-41)$$

(5-5) إذا تغيرت فجأة درجة حرارة سطح الأرض من صفر درجة مئوية إلى T_0 ، فكم من الوقت يستغرقه باطن الأرض ليكون في توازن مع سطحها، مما يعني وصوله إلى 99 بالمائة من درجة حرارة السطح؟ ضع تقديرات للأعماق 10 أمتار و 100 متر و 1000 متر، حيث يكون السطح من الجرانيت.

(5-6) باستخدام نظرية اختراق الطاقة الشمسية للأرض، حدّد تأثير متوسط التغيّر اليومي لدرجة حرارة الأرض. بافتراض أن سعة درجة الحرارة اليومية ΔT تساوي 5 درجات مئوية وأن سطح الأرض من الحجر الجيري:

- (١) عند أي عمق ينعكس طور صورة درجة الحرارة (أي، أكثر برودة في نحو الساعة الثالثة عصرًا وأكثر دفئًا في نحو الساعة الثالثة صباحًا)؟
- (٢) ما نسبة سعة تغير درجة الحرارة عند عمق معكوس صورة درجة الحرارة إلى سعة درجة الحرارة على السطح؟

(5-7) إن متوسط درجة الحرارة في مدينة أوكلاهوما سيتي هو 28 درجة مئوية في يوليو و 4 درجات مئوية في يناير. وصورة درجة الحرارة هي تقريبًا منحنى جيبي على مدار العام بالكامل. إذا كان سطح الأرض من الجرانيت، فما تغيّر درجة الحرارة السنوي (حدد قيم كل شهر) عشرة أمتار تحت سطح الأرض؟

الفصل السادس

الديناميكا الحرارية للطاقة الشمسية

الديناميكا الحرارية فرع من الفيزياء يسعى إلى دراسة الطاقة وتحويلها، وقد ظهر في القرنين الثامن عشر والتاسع عشر في محاولة للوصول إلى فهم أفضل للمبادئ الأساسية للمحرك الحراري، الذي يحول الطاقة الحرارية إلى طاقة ميكانيكية، مثل المحرك البخاري ومحرك الاحتراق الداخلي. وفي منتصف القرن التاسع عشر، تطورت الديناميكا الحرارية لتصبح نظامًا متناسقًا على نحو منطقي يقوم على عدد من البديهيات، أو القوانين، التي يمكن استنتاج النظرية بأكملها منها. وفي القرن العشرين، امتدت النظرية إلى التبريد والمضخات الحرارية وأشكال الطاقة الأخرى، مثل الطاقة الكهربائية والمغناطيسية والمرنة والكيميائية والكهروكيميائية والنووية. وفي صميم تلك النظرية القانون الأول للديناميكا الحرارية الخاص بحفظ الطاقة والقانون الثاني للديناميكا الحرارية الخاص بتحويل الطاقة الحرارية لأنواع أخرى من الطاقة. في العديد من المراجع الخاصة بالديناميكا الحرارية، هناك أيضًا قانون صفري وقانون ثالث. القانون الصفري هو تعريف بدیهي لدرجة الحرارة، أما القانون الثالث، فله استخدامات محدودة، أغلبها ليس له علاقة بدراسة الطاقة الشمسية. إن نظرية الديناميكا الحرارية ميكروسكوبية أو عيانية بطبيعتها؛ أي تتعامل على نحو مباشر مع كميات فيزيائية قابلة للقياس. أما النظرية الميكروسكوبية المقابلة فهي الفيزياء الإحصائية، حيث تُشتق قوانين الديناميكا الحرارية من منظور ذري. في هذا الفصل، سنعرض المفاهيم الأساسية للديناميكا الحرارية الضرورية لفهم الطاقة الشمسية. يمكن إيجاد المفاهيم الكاملة للديناميكا الحرارية، بما في ذلك تفاصيل القانون الثالث الخاصة بها، في المراجع القياسية.

(١) التعريفات

في هذا القسم، سنقدّم عدة تعريفات أساسية. يُطَلَق على موضوع الدراسة في الديناميكا الحرارية النظام. والنظام القياسي هو جسم منتظم من المادة بحدود معرفة بدقة، مثل قطعة من مادة صلبة أو كمية من مادة سائلة أو وحدة من الغاز أو طبقة سطح. تُسمى الأجسام المادية التي توجد خارج حدود النظام الوسط المحيط. وتمثل حالة أي نظام مجموع خواصه العيانية. وهناك نوعان من الكميات الفيزيائية في الديناميكا الحرارية، وهما: الكمية الشاملة والكمية المركزة. تتناسب الكمية الشاملة مع حجم أو كتلة النظام، وهي كمية تراكمية مثل الكتلة أو الحجم أو الطاقة أو القصور الحراري. أما الكميات المركزة، فهي مستقلة عن حجم أو كتلة النظام وليست كميات تراكمية مثل درجة الحرارة أو الكثافة أو الضغط أو القيم المحددة للكميات الشاملة مثل كثافة الطاقة. ويمكن ربط أي نظام ديناميكي حراري بالوسط المحيط أو عزله عنه. ولا يوجد تبادل للحرارة أو الشغل فيما بين النظام المعزول ووسطه المحيط. ويمكن أن تمرّ حالة أي نظام عبر عملية تتغيّر فيها على الأقل واحدة من الكميات الفيزيائية عبر الوقت. هناك عمليتان أساسيتان؛ هما: العملية الأيزوثرمية، حيث لا تتغيّر درجة حرارة النظام؛ والعملية الأديباتية، حيث لا يوجد تغيّر في الحرارة بين النظام ووسطه المحيط.

إن أي كمية متناهية الصغر من «الشغل»، dW ، هي حاصل ضرب القوة F المؤثرة في حدود النظام في المسافة dL التي يتحرّكها النظام في اتجاه القوة، ولأن القوة F ناتجة حاصل ضرب الضغط P في المساحة A ، فمن المناسب أن نعبر عن الشغل كما يلي:

$$dW = FdL = PAdL = PdV, \quad (6-1)$$

بحيث dV هو التغير المتناهي الصغر في حجم النظام. إن ظهور علامة السالب يحدث لأن الضغط عندما يكون موجّباً، فإن القوة تكون في اتجاه ما داخل النظام، وعندما يمتد النظام بفعل ضغط موجب، فإنه يبذل شغلاً على الوسط المحيط، وهكذا يكون إجمالي الشغل أثناء عملية من الحالة 1 للحالة 2:

$$W = \int_1^2 FdL = \int_1^2 PdV. \quad (6-2)$$

إن «الحرارة» هي الطاقة المنتقلة للنظام عبر الحدود بدون تحريك السطح. وإذا كانت درجة حرارة الوسط المحيط أعلى من تلك الخاصة بالنظام، فتنقل الحرارة إلى النظام، والتي تكون موجبة. على نحو مماثل، يكون إجمالي الحرارة المنتقلة للنظام أثناء عملية من الحالة 1 للحالة 2 هي:

$$Q = \int_1^2 dQ. \quad (6-3)$$

تُحدّد «درجة الحرارة» من خلال القانون الصفري للديناميكا الحرارية، الذي ينص على ما يلي:

عندما يكون هناك نظامان في توازن ديناميكي حراري مع نظام ثالث، فإن النظامين يكونان في توازن ديناميكي حراري كل منهما مع الآخر، ويكون للنظم الثلاثة درجة الحرارة نفسها.

يخبرنا هذا القانون بكيفية مقارنة درجة الحرارة، لكنه لا يُعرّف مقياسها. في الديناميكا الحرارية، هناك تعريفان منفصلان لدرجة الحرارة: الأول قدمه اللورد كلفن اعتماداً على دورة كارنو، الذي يحمل اسمه (انظر الفصل الثاني - قسم (٣-٢)). ويعتمد الثاني على خواص الغاز المثالي (انظر الفصل الثاني - قسم (٥-١)). التعريفان متكافئان عبر مضاعف ثابت.

(٢) القانون الأول للديناميكا الحرارية

ينص القانون الأول للديناميكا الحرارية على أن الطاقة يمكن أن تتحول من شكل إلى آخر لكنها لا يمكن أبداً أن تفنى أو تُستحدث من عدم. فيما يلي صياغة موجزة له:

من المستحيل بناء حركة دائمة تولّد طاقةً من عدم.

هذا القانون ليس بأي حال من الأحوال بسيطاً إذا ما نظرنا للحقيقة التي تقول إن سنوياً، وفي عصر التقنيات المتقدمة، ما زالت مكاتب براءة الاختراع في كل دول العالم تستقبل طلبات براءات اختراع عديدة خاصة بتطبيقات متعلقة بالحركة الدائمة. وبالمبحث عبر جوجل عن الحركة الدائمة، ستندعش بالتصميمات الجديدة العجيبة المتعلقة بها والمقدمة من مخترعين شديدي الطموح.

فيزياء الطاقة الشمسية

في سيرة ماكس بلانك الذاتية، وصف كيف أن مدرسه في الفيزياء علمه مفهوم الطاقة. قال له تخيّل أن عامل بناء رفع قالب طوب ووضعهُ بأعلى البناء، إن شغله زاد من طاقة القالب، لكن الزيادة في الطاقة كانت في شكل طاقة وضع كامنة وليست واضحة، في أحد الأيام، سقط قالب الطوب من أعلى البناء، وقبل أن يصل إلى الأرض بقليل، تحرّك على نحو سريع، بطاقة حركية واضحة، وفي النهاية، اصطدم بالأرض وحول الطاقة إلى حرارة. في الخطوة الأولى، قام عامل البناء بالشغل كما يلي:

$$W = fh = mgh, \quad (6-4)$$

بحيث m هي كتلة قالب الطوب، و $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ هو تسارع الجاذبية. وتساوي قوة الجاذبية f حاصل ضرب m في g . و h هو الارتفاع أو المسافة بطول اتجاه القوة الذي يتحرك فيه قالب الطوب. وتساوي الزيادة في طاقة الوضع ΔE الشغل المبذول على النظام:

$$\Delta E = W = mgh. \quad (6-5)$$

وقبل اصطدام القالب بالأرض مباشرةً، تكون سرعته v كما يلي:

$$v = \sqrt{2gh}, \quad (6-6)$$

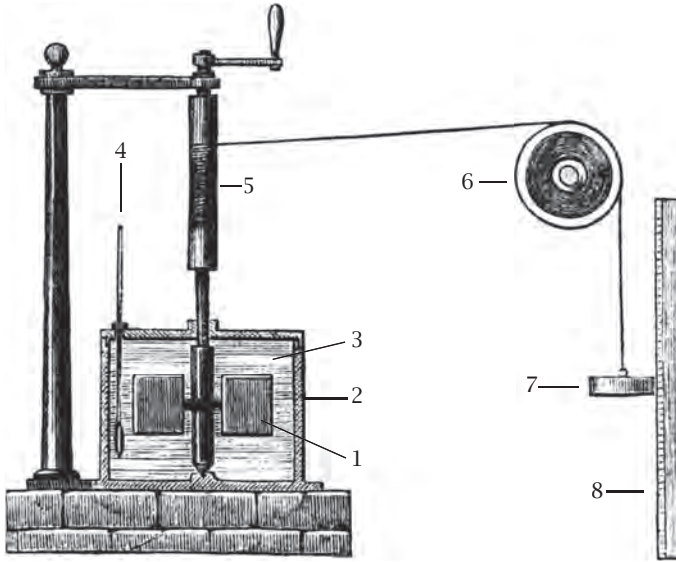
والذي يُحقق قانون حفظ الطاقة:

$$\Delta E = \frac{1}{2}mv^2 = mgh. \quad (6-7)$$

إن وحدة قياس الطاقة هي حاصل ضرب وحدة قياس القوة؛ النيوتن، ووحدة قياس الطول؛ المتر. وسُميت وحدة قياس الطاقة، نيوتن-متر، أو جول، على اسم الفيزيائي الإنجليزي جيمس بريسكوت جول، الذي قام بأول تجربة أثبتت وجود تكافؤ بين الطاقة الميكانيكية والحرارة في عام 1844. ويعرض الشكل ٦-١ مخططاً لتجربة جول.

في تجربة جول، في البداية، يُوضع الوزن على مسافة محددة مسبقاً من وضعه المتوازن. وتُقاس درجة الحرارة الأولية للماء، T_0 . ثم بعد ضبط الوزن بحيث يتحرك

الديناميكا الحرارية للطاقة الشمسية



شكل ٦-١: تجربة جول. تُوضع عجلة ببدال (1) داخل برميل معزول (2) ممتلئ بالماء (3). وتُقاس درجة الحرارة باستخدام ترمومتر (4). تُدار العجلة عبر عمود دوران (5) وبكرة (6) من قبل وزن هابط (7). ويُقاس ارتفاع الوزن باستخدام مسطرة (8). وبعد ضبط العجلة بحيث تتحرك، تتحول الطاقة الميكانيكية إلى حرارة تُقاس باستخدام الترمومتر.

والانتظار حتى نهاية الحركة، تُقاس درجة الحرارة النهائية للماء الموجود في البرميل، T_1 . تكون الحرارة المولدة من خلال الاضطراب الميكانيكي هي:

$$Q = (T_1 - T_0) M. \quad (6-8)$$

إذا كانت M هي كتلة الماء بالجرام، فإن الحرارة Q تكون بالكالوري. والمكافئ الميكانيكي لكالوري واحد من الحرارة الذي وجدته جول هو 4.159 J/cal ، وهو قريب جداً من النتيجة التي توصلت إليها القياسات الحديثة. ونتيجة لتكافؤ الشغل الميكانيكي والحرارة، تكون الزيادة في طاقة أي نظام حاصل جمع الشغل الميكانيكي والحرارة:

$$\Delta E = W + Q. \quad (6-9)$$

يمكن كذلك أن تنتقل الطاقة في شكل حرارة. فبدفع النظامين بسعة حرارية C_1 و C_2 بدرجتى حرارة T_1 و T_2 للاحتكاك، كما هو موضح في الشكل ٦-٥، تنتقل الحرارة من النظام الأسخن للنظام الأبرد. وبافتراض أن السعة الحرارية لكلا النظامين ثابتة؛ أي، منفصلة عن درجة الحرارة داخل نطاق درجة الحرارة محل الاهتمام، ففي النهاية تصبح درجة الحرارة قيمة واحدة وهي T_0 :

$$T_0 = \frac{1}{C_1 + C_2} (C_1 T_1 + C_2 T_2). \quad (6-10)$$

إن الطاقة المنتقلة من نظام لآخر هي:

$$Q = \pm \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} (T_1 + T_2). \quad (6-11)$$

في تجربة جول، يتحوّل الشغل الميكانيكي إلى حرارة، لكن لا توجد طريقة بسيطة لتحويل الحرارة مرة ثانية إلى شغل ميكانيكي. وفي حالة انتقال الحرارة، يمكن أن تنتقل الحرارة تلقائياً من نظام بدرجة حرارة أعلى إلى آخر بدرجة حرارة أقل، لكن لا يمكن أن تنتقل تلقائياً من نظام بدرجة حرارة أقل لآخر بدرجة حرارة أعلى من دون بذل شغل ميكانيكي. أدّت تلك الملاحظات لظهور القانون الثاني للديناميكا الحرارية.

(٣) القانون الثاني للديناميكا الحرارية

هناك طرق عديدة للتعبير عن القانون الثاني للديناميكا الحرارية. ويمكن إثبات أن كل تلك الطرق متكافئة. فيما يلي صياغة موجزة له، مماثلة لتلك الخاصة بكلفن وبلانك:

من المستحيل بناء آلة تحول الحرارة إلى شغل ميكانيكي من مصدر واحد للحرارة.

لأن الحرارة في المحيط لا محدودة، إذا أمكن إيجاد «حركة دائمة من النوع الثاني»، فلن تضطر البشرية أبداً للقلق بشأن الطاقة. وهناك صياغة أخرى للقانون، قدمها كلاوزيوس، وهي:

من المستحيل أن تنتقل الحرارة من خزان بدرجة حرارة أقل لآخر بدرجة حرارة أعلى دون بذل شغل ميكانيكي.

في واقع الأمر، إذا أمكن بناء آلة تنقل الحرارة من خزان بارد لآخر ساخن دون بذل طاقة ميكانيكية خارجية، فسيستطيع الجميع على الأرض الاستمتاع بتبريد وتدفئة مجانيين.

(١-٣) دورة كارنو

يمكن فهم روح القانون الثاني للديناميكا الحرارية على أفضل نحو من خلال دورة كارنو، التي اقترحها سادي كارنو في عام 1824 في إطار السعي للوصول إلى الكفاءة القصوى للمحركات الحرارية [1]. ويظهر مخطط لتلك الدورة في الشكل ٦-٢. ويتكون المحرك من خزانين حراريين وأسطوانة بمكبس ممتلئة بقدر من الغاز العامل باعتباره النظام الديناميكي الحراري.

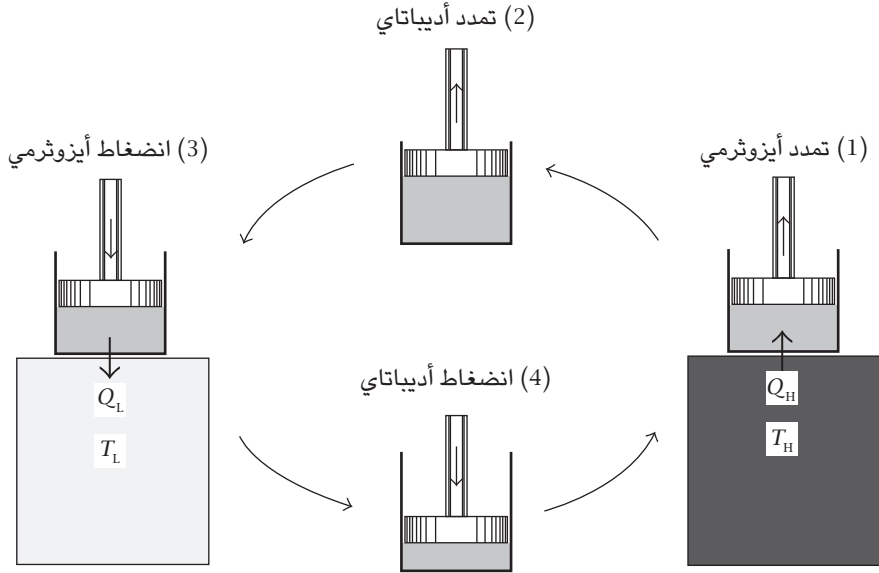
تعد دورة كارنو نموذجًا مثاليًا لمحرك حراري يولد شغلًا ميكانيكيًا بنقل الحرارة من خزان ساخن بدرجة حرارة T_H لخزان بارد بدرجة حرارة T_L . وتتكوّن أي دورة كاملة من أربع عمليات؛ أولاً: هناك احتكاك بين النظام والخزان الساخن، مما يؤدي إلى عملية تمدد أيزوثيرمي. ويكسب النظام، الذي دائماً بدرجة حرارة T_H ، حرارة Q_H من الخزان الساخن. ثانياً: يكون النظام معزولاً عن الخزان ويتعرض لعملية تمدد أديباتي. وبدون حدوث انتقال للحرارة، تقل درجة حرارة النظام إلى T_L . ثالثاً: هناك احتكاك بين النظام والخزان البارد، مما يؤدي إلى عملية انضغاط أيزوثيرمي. يصدر النظام، الذي دائماً بدرجة حرارة T_L ، حرارة Q_L للخزان البارد. رابعاً: يكون النظام معزولاً عن الخزان ويتعرض لعملية انضغاط أديباتي. وبدون حدوث انتقال للحرارة، ترتفع درجة حرارة النظام إلى T_H . يُبذل إجمالي شغل ميكانيكي W على الوسط المحيط. ويتطلب القانون الأول للديناميكا الحرارية ما يلي:

$$Q_H = Q_L + W. \quad (6-12)$$

تُعرف كفاءة η أي محرك حراري بأنها نسبة الشغل الميكانيكي W على الطاقة الحرارية من الخزان الساخن، Q_H :

$$\eta \equiv \frac{W}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}. \quad (6-13)$$

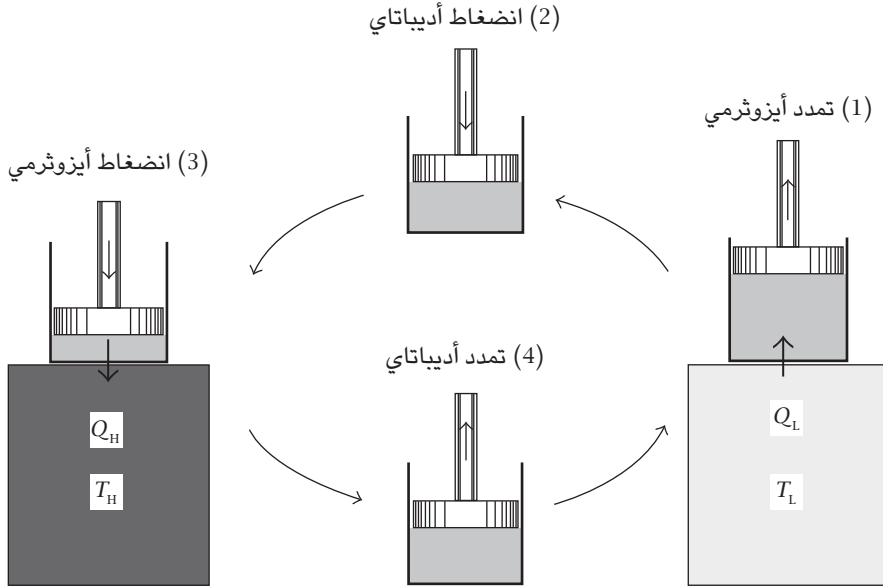
فيزياء الطاقة الشمسية



شكل ٦-٢: دورة كارنو: النظام الديناميكي الحراري هو كمية من الغاز محصورة في أسطوانة بمكبس، ويتكون من أربع عمليات قابلة للعكس: (1) عملية تمدد أيزوثيرمي عند درجة حرارة T_H ؛ مما يؤدي إلى كسب حرارة Q_H من الخزان الساخن. (2) عملية تمدد أديباتي لتقليل درجة الحرارة إلى T_L . (3) عملية انضغاط أيزوثيرمي عند درجة حرارة T_H ؛ مما يؤدي إلى إصدار حرارة Q_H للخزان البارد. (4) عملية انضغاط أديباتي لرفع درجة الحرارة إلى T_H . ويُبذل إجمالي شغل ميكانيكي W على الوسط المحيط.

هناك افتراض أساسي لدورة كارنو وهو أن العمليات تكون «قابلة للعكس»؛ فيمكن تشغيل دورة كارنو الموضحة في الشكل ٦-٢ كمبرد أو مضخة حرارية؛ انظر الشكل ٦-٣. وينقل النظام الديناميكي الحراري — وهو قدر من الغاز محصور في أسطوانة بمكبس — الحرارة من خزان بارد لخزان ساخن ببذل بعض الشغل الميكانيكي. والعمليات الأربعة هي كالتالي؛ أولاً: يحتك النظام بالخزان البارد، ويتعرض لعملية «تمدد أيزوثيرمي». ويكسب النظام، الذي دائماً بدرجة حرارة T_L ، الحرارة Q_L من الخزان البارد. ثانياً: يكون النظام معزولاً عن الخزان ويتعرض لعملية «انضغاط أديباتي». وبدون حدوث انتقال للحرارة، ترتفع درجة حرارة النظام إلى T_H . ثالثاً: هناك احتكاك بين النظام والخزان

الساخن، مما يؤدي إلى عملية «انضغاط أيزوثيرمي». يطلق النظام، الذي دائماً بدرجة حرارة T_H ، الحرارة Q_H للخزان الساخن. رابعاً: يكون النظام معزولاً عن الخزان ويتعرض لعملية «تمدد أديباتي». وبدون انتقال للحرارة، تنخفض درجة حرارة النظام إلى T_L .



شكل ٦-٣: دورة كارنو العكسية. هذا تمثيل مثالي لمبرد أو مضخة حرارية تتكون من أربع عمليات: (1) عملية تمدد أيزوثيرمي عند درجة حرارة T_L ، مما يؤدي إلى كسب حرارة Q_L من الخزان البارد. (2) عملية انضغاط أديباتي لرفع درجة الحرارة إلى T_H . (3) عملية انضغاط أيزوثيرمي عند درجة حرارة T_H ، مما يؤدي إلى إصدار حرارة Q_H للخزان الساخن. (4) عملية تمدد أديباتي لتقليل درجة الحرارة إلى T_L . وهناك حاجة لبذل إجمالي شغل ميكانيكي E لإتمام عملية الانتقال.

لأن دورة كارنو قابلة للعكس، فإن آلة كارنو نفسها يمكن أن تعمل بمنزلة محرك حراري أو مضخة حرارية (أو على نحو مقابل، مبرد). ولتلك الحقيقة نتيجة ذات تأثير كبير، وهي أن كفاءة كل دورات كارنو تعتمد فقط على درجة حرارة الخزانين الحراريين:

$$\eta = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = f(T_H, T_L). \quad (6-14)$$

يعتمد الإثبات العبقري، الذي قدمه سادي كارنو في عام 1824، على حجة منطقية نوجزها فيما يلي: إذا كان لآلتي كارنو كفاءة مختلفة، فيمكن استخدام الآلة ذات الكفاءة الأعلى كمحرك حراري والآلة ذات الكفاءة الأقل كمضخة حرارية. وهكذا، ستتعارض الآلة المجمعة مع القانون الثاني للديناميكا الحرارية. وهناك إثباتان بديلان فيما يتعلق بالصياغتين الخاصتين بهذا القانون.

ينص الإثبات الأول على ما يلي: مع وجود نفس كمية الحرارة من الخزان الساخن، يمكن للمحرك الحراري هذا أن يُولد شغلاً أكبر من المطلوب لضخ الحرارة من الخزان البارد لاستعادة الحرارة الداخلة ثانيةً للخزان الساخن؛ من ثم فإن الآلة المجمعة يمكنها تحويل الحرارة إلى شغل ميكانيكي من خزان حراري واحد، وهو «حركة دائمة من النوع الثاني». وهكذا، فهي تتعارض مع صياغة كلفن وبلانك للقانون الثاني للديناميكا الحرارية.

أما عن الإثبات الآخر، فهو كما يلي: باستخدام كل الشغل الميكانيكي المولد من خلال الحرارة Q_H من الخزان الساخن باستخدام الآلة الأكثر كفاءة، يمكن توليد حرارة أعلى من Q_H لتعود للخزان الساخن، وتستطيع الآلة المجمعة نقل الحرارة من الخزان البارد للخزان الساخن دون الحاجة لشغل ميكانيكي خارجي. وهكذا، فهي تتعارض مع صياغة كلاوزيوس للقانون الثاني للديناميكا الحرارية. ونتائج التحليل المعتمد على دورة كارنو بسيطة ولكنها بعيدة الأثر؛ تتحدد كفاءة أي دورة كارنو قابلة للعكس، بغض النظر عن طبيعة العملية وطبيعة المادة، على نحو فريد من خلال درجتي الحرارة؛ درجة حرارة الخزان الساخن ودرجة حرارة الخزان البارد. وقد شجعت عمومية دورة كارنو وليم طومسون (اللورد كلفن) على تعريف مقياس درجة الحرارة الديناميكية الحرارية.

(٢-٣) درجة الحرارة الديناميكية الحرارية

في الفصل الثاني - قسم (١)، عُرف شرط تعادل درجة الحرارة، لكن «مقياس» درجة الحرارة لم يُعرّف بعد. واعتماداً على نظرية دورة كارنو، عُرف وليم طومسون (اللورد كلفن) درجة الحرارة الديناميكية الحرارية، والمعروفة أيضاً بدرجة الحرارة المطلقة أو مقياس درجة حرارة كلفن [2] (K).

بالنسبة لدورات كارنو القابلة للعكس، تُعرّف الكفاءة كما يلي:

$$\eta \equiv \frac{W}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}. \quad (6-15)$$

والآن، انظر لنسبة Q_L و Q_H . فإذا كانت درجة حرارة الخزان الساخن تساوي تلك الخاصة بالخزان البارد، فلا يمكن توليد أي شغل ميكانيكي. من ثم، فإن Q_L تساوي Q_H . بعبارة أخرى:

$$\text{If } \frac{Q_L}{Q_H} = 1, \text{ then } \frac{T_L}{T_H} = 1. \quad (6-16)$$

من الواضح أن مقياس درجة الحرارة يجب أيضاً أن يُحقق ما يلي:

$$\text{If } \frac{Q_L}{Q_H} < 1, \text{ then } \frac{T_L}{T_H} < 1. \quad (6-17)$$

وأبسط مقياس لدرجة الحرارة يحقق هذين المعيارين، وهذا المقياس اقترحه اللورد كلفن في عام 1848، هو [2]:

$$\frac{T_L}{T_H} = \frac{Q_L}{Q_H}. \quad (6-18)$$

أثبت اللورد كلفن أن مقياس درجة الحرارة المطلق هذا مكافئ لمقياس درجة الحرارة المعتمد على خواص الغاز المثالي [2]. وتتطابق أيضاً درجة حرارة كلفن مع درجة الحرارة في الفيزياء الإحصائية التي اقترحها ماكسويل وبولتزمان؛ انظر ملحق د. فيما يتعلّق بمقياس درجة حرارة كلفن، تكون كفاءة أي دورة كارنو قابلة للعكس (انظر معادلة 6-15):

$$\eta_c = 1 - \frac{T_L}{T_H}, \quad (6-19)$$

وهي أقصى كفاءة يمكن أن يحققها أي محرك حراري، وعادةً يُطلق عليها كفاءة كارنو. كما هو واضح، كلما قلت درجة الحرارة T_L ، زادت الكفاءة. ويمكن أن تكون الكفاءة قريبة على نحو زائف من 1 إذا كانت T_L قليلة على نحو كافٍ، لكن لا يمكن أن تساوي كفاءة أي محرك حراري 1؛ وإلا، فسيكون هناك انتهاك للقانون الثاني للديناميكا الحرارية،

وعلى الرغم من أنه لا يمكن الوصول إلى كلفن قيمته صفر، فيمكننا شكلياً تعريف درجة الحرارة الصفرية المطلقة من خلال ما يلي:

$$\text{If } Q_L = 0, \text{ or } W = Q_H, \text{ then } T_L = 0. \quad (6-20)$$

يُعرّف مقياس درجة الحرارة المئوية أو السيليزية باعتباره مقياس كلفن معدلاً، مع تحديد النقطة الثلاثية للماء (الحالة التي يتواجد فيها الطور الصلب والسائل والغازي معاً في توازن) لتكون 0.01 درجة مئوية. وعلى المقياس المئوي، وُجد تجريبياً أن نقطة غليان الماء هي 100 درجة مئوية. وهذا التعريف يُثبت أيضاً المعامل الثابت في مقياس كلفن، والعلاقة بين مقياس كلفن والمقياس المئوي هي:

$$K = ^\circ C + 273.15. \quad (6-21)$$

(٣-٣) القصور الحراري

يمكن إعادة كتابة المعادلة 6-18 كما يلي:

$$\frac{Q_H}{T_H} = \frac{Q_L}{T_L}, \quad (6-22)$$

التي لها أهمية كبيرة. في واقع الأمر، يمكن تعميم معادلة 6-22 لأي عدد من الخطوات في الدورة، بحيث تنتقل في كل خطوة حرارة متناهية الصغر δQ . وبالنسبة لدورة قابلة للعكس، يكون التكامل الدوري صفراً:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = 0. \quad (6-23)$$

لذا، يمكن تعريف «دالة حالة» أحادية القيمة كما يلي:

$$S_2 - S_1 \equiv \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}. \quad (6-24)$$

تُسمى تلك الدالة، التي تلعب دوراً محورياً في الديناميكا الحرارية، بـ «القصور الحراري». لكن الحرارة Q ليست دالة حالة لأن التكامل الدوري لـ δQ ليس، بوجه عام،

صفرًا. ويمكن أن تكون لكل حالة للنظام قيم متعددة بنفس الكمية، لكن يمكن التعبير عن كمية متناهية الصغر من الحرارة من خلال دالة الحالة القصور الحراري كما يلي:

$$\delta Q = TdS. \quad (6-25)$$

(٤) الدوال الديناميكية الحرارية

كما ناقشنا في الفصل الثاني - قسم (١)، بالنسبة للحالة الثابتة لأي نظام، تكون دوال الحالة ثابتة. من بين أمثلة دوال الحالة الحجم V والكتلة m والضغط P ودرجة الحرارة T وغير ذلك. أما الحرارة والشغل الميكانيكي، على الجانب الآخر، فليسا من دوال الحالة، وسنرمز لتفاضل الحرارة والشغل الميكانيكي بـ δQ و δW ، على التوالي. وفقًا للقانون الأول للديناميكا الحرارية، تكون الطاقة الإجمالية لأي نظام أيضًا دالة حالة. في واقع الأمر، هناك تمثيل رياضي للقانون الأول للديناميكا الحرارية وهو أن التكامل الدوري لمجموع الشغل الميكانيكي والحرارة يساوي صفرًا:

$$\oint (\delta Q + \delta W) = 0. \quad (6-26)$$

يُعرَّف فرق الطاقة بين الحالة 1 والحالة 2 كما يلي:

$$U_2 - U_1 = \int_1^2 (\delta Q + \delta W). \quad (6-27)$$

ولأن الشغل الميكانيكي مرتبط بالضغط P والحجم V حيث إن δW يساوي $-PdV$ ، فبالجمع بين المعادلتين 6-27 و 6-25، يكون تفاضل الطاقة هو:

$$dU = TdS - PdV. \quad (6-28)$$

(١-٤) الطاقة الحرة

الطاقة الإجمالية لأي نظام U يمكن تعريفها بأنها القدرة على بذل شغل على الوسط المحيط، أو القدرة على نقل حرارة للوسط المحيط. في تحليل المسائل الفعلية، أحيانًا يكون

من الضروري التأكيد على جزء الطاقة المرتبط بالقدرة على بذل شغل ميكانيكي. ويحقق تعريف «الطاقة الحرة» هذا الغرض:

$$F = U - TS. \quad (6-29)$$

بديهياً، يبدو أن تعريف الطاقة الحرة يستبعد المكون الحراري للطاقة الإجمالية ويحتفظ بالجزء الميكانيكي؛ فعلى نحو مشابه للمعادلة 6-25، يكون تفاضل الطاقة الحرة:

$$dF = -SdT - PdV. \quad (6-30)$$

لذا، على نحو أكثر دقة، تُعد الطاقة الحرة مقياساً لقدرة أي حالة للنظام على بذل شغل ميكانيكي بدرجة حرارة ثابتة.

(٢-٤) المحتوى الحراري

أحياناً، من المفيد معرفة جزء طاقة النظام المرتبط بالقدرة على نقل الحرارة. وتعريف «المحتوى الحراري» يحقق هذا الغرض:

$$H = U + PV. \quad (6-31)$$

بديهياً، يبدو أن تعريف المحتوى الحراري يستبعد مكون الشغل الميكانيكي للطاقة الإجمالية ويحتفظ بالمحتوى الحراري. وعلى نحو مماثل للمعادلة 6-25، يكون تفاضل المحتوى الحراري:

$$dH = TdS + VdP. \quad (6-32)$$

على نحو أكثر دقة، يُعد المحتوى الحراري مقياساً لقدرة أي حالة للنظام على نقل الحرارة في ظل ضغط ثابت.

عندما يتبخر سائل في ظل ضغط ثابت، يزداد حجم الغاز، وتكون الحرارة المطلوبة للتبخير هي حاصل جمع فرق الطاقة الداخلية U والشغل المطلوب لزيادة الحجم، PV . وتكون الحرارة المنتقلة أثناء تغير الطور هي حاصل جمع U و PV ، أي المحتوى الحراري:

$$\Delta H = \Delta (U + PV) . \quad (6-33)$$

(٣-٤) طاقة جيبس الحرة

إن دالة الحالة الرابعة، التي قدمها ويلارد جيبس، هي:

$$G = U + PV - TS. \quad (6-34)$$

على نحو مماثل، إن تفاضل طاقة جيبس الحرة هو:

$$dG = -SdT + VdP. \quad (6-35)$$

من المعادلة 6-35، يتضح أن طاقة جيبس الحرة ستكون ثابتة إذا حُوفِظَ على ثبات درجة حرارة وضغط النظام وكانت كمية المادة ثابتة. وتلك الخاصية مهمة في تحليل التفاعلات الكيميائية؛ لأن معظم هذه التفاعلات تحدث في ظل درجة حرارة وضغط ثابتين.

تأمل نظامًا ذا مكون واحد كمية المادة فيه متغيرة يُعبر عنه بالأساس من خلال عدد مولات المادة، N . وعند الحفاظ على ثبات درجة حرارة وضغط النظام، يمكن التعبير عن طاقة جيبس الحرة كما يلي:

$$dG = -SdT + VdP + \mu dN. \quad (6-36)$$

إن الكمية μ هي طاقة جيبس الحرة لكل مول من المادة.

(٤-٤) الجهد الكيميائي

بالنسبة لنظام له أكثر من مكون، يمكن تعميم التعبير عن طاقة جيبس الحرة (معادلة 6-36) لما يلي:

$$dG = -SdT + VdP + \sum_i \mu_i dN_i, \quad (6-37)$$

بحيث i هو معامل المكون ذي الترتيب i . وإذا كان هناك تفاعل كيميائي في النظام، فإن تركيب النظام، الممثل من خلال مجموعة من القيم المولية N_i ، سيتغير. وفي ظل درجة حرارة وضغط ثابتين، ستكون حالة التوازن الخاصة بالنظام هي:

$$dG = \sum_i \mu_i dN_i = 0. \quad (6-38)$$

تُعرف الكمية μ_i بـ «الجهد الكيميائي» للمكون ذي الترتيب i الخاص بالنظام.

(٥) الغاز المثالي

تجريبياً، وُجد أن العديد من الغازات الشائعة في ظل نطاق كبير من درجة الحرارة والضغط يحقق علاقة عامة وهي:

$$PV = NRT, \quad (6-39)$$

بحيث إن P هو الضغط بالباسكال، و V هو الحجم بالمتر المكعب، و N هو عدد مولات الغاز، و T هي درجة الحرارة المطلقة بالكلفن، و R هو ثابت غاز عام، وذلك كما يلي:

$$R = 8.3144 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}. \quad (6-40)$$

في نظم تخزين الطاقة الشمسية، بالنسبة للغازات الشائعة الاستخدام، مثل النيتروجين والأكسجين والأرجون والميثان، وفي ظل درجات الحرارة محل الاهتمام، تكون العلاقة الخاصة بالغاز المثالي دقيقة لحد أقصى من الضغط قدره 10MPa، أو 100atm.

فيما يلي سنشتق كل الدوال الديناميكية الحرارية للغازات المثالية؛ أولاً: سنوضح أن طاقة U أي غاز مثالي تعتمد فقط على درجة الحرارة وليس على الحجم. في واقع الأمر، بافتراض أن U تساوي $U(T, V)$ ، فباستخدام المعادلة 6-25، نجد أن الطاقة الداخلية تتناسب مع الحجم كما يلي:

$$\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T = T\left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_T - P. \quad (6-41)$$

باستخدام معادلة الحالة 6-39، تصبح المعادلة 6-41:

$$\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T = T\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V - P = T\frac{P}{T} - P = 0. \quad (6-42)$$

بتعريف الحرارة النوعية عند ثبات الحجم لكل مول كما يلي:

$$C_v \equiv \frac{1}{N}\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T, \quad (6-43)$$

تكون الطاقة الداخلية كدالة لدرجة الحرارة كما يلي:

$$U_2 - U_1 = \int_1^2 NC_v dT. \quad (6-44)$$

إذا كانت C_v في نطاق درجة الحرارة محل الاهتمام عبارة عن ثابت:

$$U_2 - U_1 = NC_v (T_2 - T_1). \quad (6-45)$$

فللحصول على تعبير صريح عن القصور الحراري، نستخدم المعادلات 6-25 و 6-39 و 6-43:

$$dS = \frac{dU}{T} + \frac{PdV}{T} = NC_v \frac{dT}{T} + NR \frac{dV}{V}. \quad (6-46)$$

مرة أخرى، بافتراض أن الحرارة النوعية C_v ثابتة، فإن:

$$S_2 - S_1 = N \int_1^2 \left[\frac{C_v dT}{T} + R \frac{dV}{V} \right] = N \left[C_v \log \frac{T_2}{T_1} + R \log \frac{V_2}{V_1} \right]. \quad (6-47)$$

كمية أخرى مهمة هنا هي «الحرارة النوعية عند ثبات الضغط» C_p . بالنسبة للغازات المثالية، هناك علاقة بسيطة بين C_p و C_v . فلتسخين عدد N من مولات الغاز مع الحفاظ على ثبات الضغط، يُبذل الشغل $P\Delta V$ على الوسط المحيط. وطبقاً للقانون الأول للديناميكا الحرارية، يجب توفير طاقة إضافية $P\Delta V$. ونظراً لأنه بالنسبة لأي غاز مثالي $P\Delta V$ تساوي $NR\Delta T$ ، فإن الطاقة الإجمالية المطلوبة لرفع درجة الحرارة هي:

$$\Delta Q = NC_v \Delta T + NR\Delta T = N(C_v + R)\Delta T. \quad (6-48)$$

لذا، فإن:

$$C_p = C_v + R. \quad (6-49)$$

إن نسبة الحرارة النوعية عند ثبات الضغط للحرارة النوعية وثبات الحجم معامل مهم في دراسة العملية الأديباتية، والتي عادة ما يُرمز لها بـ γ :

$$\gamma \equiv \frac{C_p}{C_v} = 1 + \frac{R}{C_v}. \quad (6-50)$$

في أثناء العملية الأديباتية، يكون انتقال الحرارة صفراً؛ ومن ثم فإن:

$$NC_v dT = -PdV. \quad (6-51)$$

على الجانب الآخر، من معادلة الحالة الخاصة بالغاز المثالي:

$$NRdT = VdP + PdV. \quad (6-52)$$

الديناميكا الحرارية للطاقة الشمسية

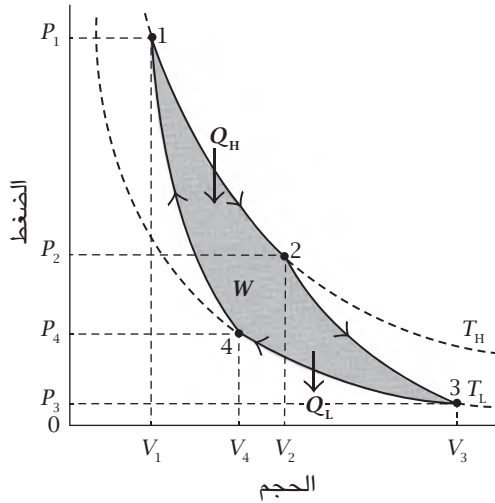
بالجمع بين المعادلتين 6-51 و 6-52، نحصل على:

$$\left(1 + \frac{R}{C_v}\right) PdV + VdP = 0. \quad (6-53)$$

إن حل المعادلة التفاضلية السابقة هو:

$$PV^\gamma = \text{const}, \quad (6-54)$$

وهو معادلة الحالة للعملية الأديباتية.



شكل ٦-٤: دورة كارنو بغاز مثالي كنظام. المنحنى 1-2 هو عملية تمدد أيزوثيرمي عند درجة حرارة T_H . والمنحنى 2-3 عملية تمدد أديباتي. والمنحنى 3-4 عملية انضغاط أيزوثيرمي عند درجة حرارة T_L . والمنحنى 4-1 عملية انضغاط أديباتي. والغاز يبذل شغلاً W على الوسط المحيط.

فيما يلي سنوضح أن كفاءة أي دورة كارنو قابلة للعكس خاصة بغاز مثالي هي $\eta = 1 - (T_L/T_H)$ ؛ ومن ثم يتطابق مقياس درجة الحرارة الديناميكية الحرارية مع مقياس درجة حرارة الغاز المثالي؛ انظر الشكل ٦-٤. في العملية الأولى، وهي عملية تمدد

أيزوثيرمي بدرجة حرارة T_H من الحالة 1 للحالة 2، يستقبل وسط الغاز الحرارة من الخزان الساخن:

$$Q_H = \int_1^2 P dV = NRT_H \int_1^2 \frac{dV}{V} = NRT_H \log \frac{V_2}{V_1}, \quad (6-55)$$

بحيث إن V_1 و V_2 هما حجما الحالتين 1 و 2، على التوالي. في العملية الثالثة، وهي عملية انضغاط أدبياتاي من الحالة 3 للحالة 4، يُصدر وسط الغاز حرارة للخزان البارد:

$$Q_L = \int_3^4 P dV = NRT_L \int_3^4 \frac{dV}{V} = NRT_L \log \frac{V_3}{V_4}, \quad (6-56)$$

بحيث إن V_3 و V_4 هما حجما الحالتين 3 و 4، على التوالي. ولأن العمليتين 1-2 و 3-4 من العمليات الأيزوثيرمية، فوفقاً لمعادلة الحالة:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2, \quad (6-57)$$

$$P_3 V_3 = P_4 V_4.$$

على الجانب الآخر، العمليتان 2-3 و 4-1 من العمليات الأدبياتية؛ لذا فوفقاً للمعادلة 6-54:

$$P_2 V_2^\gamma = P_3 V_3^\gamma, \quad (6-58)$$

$$P_4 V_4^\gamma = P_1 V_1^\gamma.$$

بالجمع بين المعادلتين 6-57 و 6-58:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{V_3}{V_4}. \quad (6-59)$$

وبتطبيق هذه العلاقة على المعادلتين 6-55 و 6-56 نخلص إلى أن مقياس درجة الحرارة الديناميكية الحرارية ومقياس درجة حرارة الغاز المثالي متطابقان:

$$\frac{T_L}{T_H} = \frac{Q_L}{Q_H}. \quad (6-60)$$

(٦) المضخّات الحرارية ونظم التبريد الأرضية

في الفصل الخامس - قسم (٣)، ناقشنا الطاقة الشمسية المخزنة في سطح الأرض؛ فعلى عمق يصل إلى نحو 10 أمتار، تكون درجة حرارة الأرض أبرد من المتوسط في فصل الصيف وأسخن من المتوسط في فصل الشتاء. ويمكن لاستخدام الطاقة الشمسية المخزنة أن يقلّل من استخدام الطاقة لتدفئة وتكييف المساحات، وكذلك تسخين الماء. وعلى الرغم من الاستخدام المباشر للطاقة المخزنة في تكييف المساحات في الصيف مُورس منذ قرون في بعض الأماكن في العالم، فهو يسمح بقدرٍ قليلٍ جدًّا من التحكم. والطريقة الحديثة للاستفادة من الطاقة الشمسية المخزنة هذه هي استخدام نظم التبريد والمضخّات الحرارية المعتمدة على انضغاط البخار [5, 53, 75]. ويتيح هذا تحكُّمًا كاملاً للوصول إلى درجة الحرارة المطلوبة. ويمكن أن يكون توفير الطاقة كبيرًا بحيث يصل إلى نسبة 50 بالمائة. يوضح الجدول ٦-١ القدرة الكهربائية التراكمية وعدد تركيبات المضخّات الحرارية الأرضية في عدة دول حتى عام 2004. وعلى الرغم من أن الولايات المتحدة الأمريكية لها أكبر معدل قدرة وأكبر عدد من النظم المركبة، فإن السويد لديها أكبر نسبة من تركيبات المضخّات الحرارية. ويرجع هذا ببساطة إلى الجانب الاقتصادي. ففي السويد، الطقس بارد ولا توجد مصادر للوقود الحفري. ومع ذلك، فإن معظم الكهرباء هناك مصدرها الطاقة المائية، التي تُعد رخيصة نسبيًا. ومزيج الكهرباء الرخيصة والكفاءة العالية للنظم الحرارية الأرضية يُعد أمرًا مثاليًا من الناحية الاقتصادية.

جدول ٦-١: المضخّات الحرارية الأرضية في بعض الدول.*

الدولة	السعة (MWt)	استخدام الطاقة (GWh/year)	عدد الوحدات المركبة
النمسا	275	370	23000
كندا	435	600	36000
ألمانيا	640	930	46400
السويد	2300	9200	230000
سويسرا	525	780	30000
الولايات المتحدة الأمريكية	6300	6300	600000

* المصدر: «المضخّات الحرارية الأرضية: نظرة على العالم»، نشرة مركز الحرارة الأرضية، سبتمبر 2004 [53].

(٦-١) النظرية

يعرض الشكل ٦-٥ مخططاً لمُضَخَّة حرارية أرضية. على عمق عدة أمتار من سطح الأرض، تكون درجة الحرارة ثابتة تقريباً على مدار العام بأكمله؛ على سبيل المثال، T_0 تساوي 15 درجة مئوية. في الشتاء، يمكن أن تكون درجة الحرارة المحيطة منخفضة بحيث تصل إلى صفر درجة مئوية. وللحفاظ على درجة حرارة ملائمة، يجب إدخال حرارة للمنزل. وفي الصيف، يمكن أن تكون درجة الحرارة المحيطة عالية بحيث تصل لـ 30 درجة مئوية. وهنا يجب سحب الحرارة من المنزل. في الفصل السادس - قسم (٣-١)، أوضحنا أنه يمكن للحرارة، ببذل شغل ميكانيكي، أن تنتقل من خزان بارد لخزان ساخن؛ لذا باستخدام نوع من الآلات يُسمى «المُضَخَّة الحرارية»، من الممكن سحب حرارة من داخل الأرض عند درجة حرارة 15 درجة مئوية ونقلها لنظام تدفئة أرضي في المنزل بـ T_H تساوي 50 درجة مئوية. في الوضع المثالي، إذا كانت الآلة قابلة للعكس، فوفقاً لمعادلة 19-6، تكون الكفاءة:

$$\eta_c = 1 - \frac{T_0}{T_H} = 1 - \frac{273 + 15}{273 + 50} \approx 0.108. \quad (6-61)$$

وطبقاً لتعريف الكفاءة (معادلة 15-6)، يكون الشغل الميكانيكي المطلوب لنقل حرارة من الأرض عند درجة حرارة T_0 للمشع بدرجة حرارة T_H كي يصبح Q_H هو:

$$W = \eta Q_H = 0.108 \times Q_H. \quad (6-62)$$

بعبارة أخرى، نحتاج لطاقة ميكانيكية مساوية لجزء من الحرارة لنقل الحرارة من الأرض للمشع.

في الصيف، افترض أن الحرارة Q سُحِبَت من وحدة تكييف هواء بـ T_L تساوي 10- درجات مئوية ونُقلت إلى الأرض بدرجة حرارة T_0 تساوي 15 درجة مئوية باستخدام محرك كارنو قابل للعكس. إن هذه الآلة في واقع الأمر مبردة. وكفاءة آلة كارنو هي:

$$\eta_c = 1 - \frac{T_L}{T_0} = 1 - \frac{273 - 10}{273 + 15} \approx 0.087. \quad (6-63)$$

ولأن الحرارة المسحوبة من وحدة تكييف الهواء هي Q_L في معادلة 6-15، فإن الشغل الميكانيكي المطلوب هو:

$$W = \frac{\eta}{1 - \eta} Q_L = 0.095 \times Q_L. \quad (6-64)$$

نظرياً، إذا كان المبرد يُعتبر محرك كارنو قابل للعكس، فيكون الشغل المطلوب لتبريد المساحة أقل من عُشر قدر الحرارة المسحوب. وعملياً، لا توجد آلة كاملة. فالشغل الفعلي المطلوب أكبر من ذلك الخاص بالحد النظري.

(٢-٦) معامل الأداء

في الصناعة، يُستخدم عدد لا بُعدي يسمى «معامل الأداء» (COP) لوصف أداء المضخة الحرارية أو المبرد. بالنسبة للمضخة الحرارية، هو يُعرّف كما يلي:

$$COP = \frac{Q_H}{W}, \quad (6-65)$$

وبالنسبة للمبرد، هو:

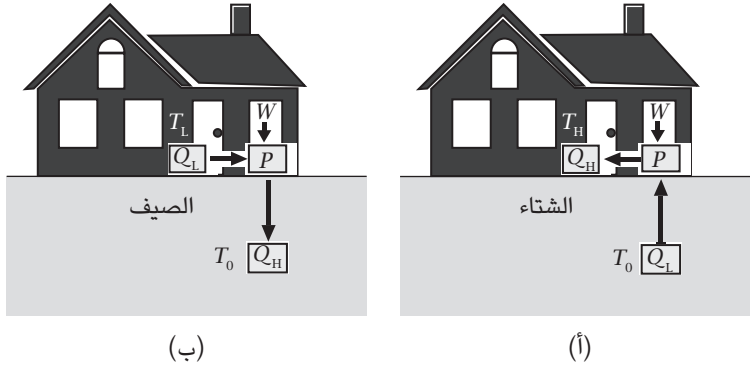
$$COP = \frac{Q_L}{W}. \quad (6-66)$$

يبدو الحد النظري جذاباً للغاية: يمكن أن يكون معدل تحويل الشغل الميكانيكي إلى حرارة عالياً بحيث يصل إلى 10، لكن عملياً، يمكن أن تحقق مضخة حرارية أو مبرد قياسي يعتمد على انضغاط البخار معامل أداء يتراوح بين 3 و4. ومع ذلك، هذا لا يزال أمراً جيداً جداً؛ فاستبدال مضخة حرارية أرضية بنظام تدفئة كهربائي يمكن أن يحقق توفيراً في الطاقة يصل إلى 70 بالمائة.

(٣-٦) المضخة الحرارية أو المبرد المعتمد على انضغاط البخار

تستخدم النظم الحرارية الأرضية التجارية دورة انضغاط البخار لكل من ضخ الحرارة والتبريد. وأغلبها قابلة للعكس؛ ومن ثم يمكن استخدامها لتدفئة الغرف وتبريدها

فيزياء الطاقة الشمسية



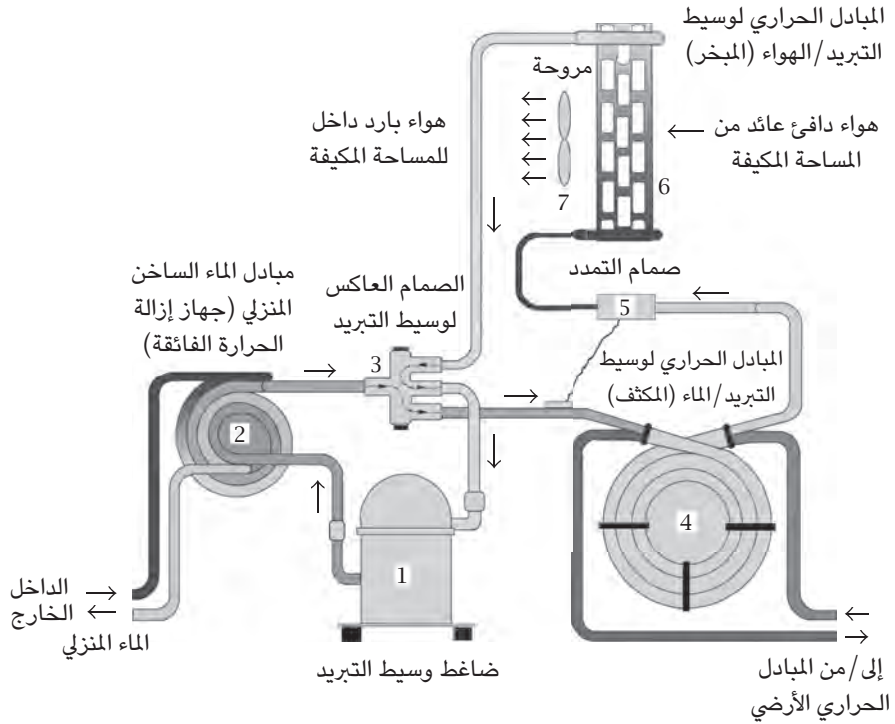
شكل ٥-٦: مضخة حرارية أرضية. تكون درجة الحرارة عند عمق 10 أمتار من سطح الأرض، T_0 ، ثابتة تقريباً على مدار العام. (أ) في الشتاء، ببذل شغل ميكانيكي، تنقل مضخة حرارية P الحرارة Q_L من الخزان الحراري الأرضي الذي بدرجة حرارة T_0 إلى مشع في المنزل بدرجة حرارة T_H . وتكون الحرارة الإجمالية المنتقلة للمشع حاصل جمع الحرارة المسحوبة من الأرض والشغل؛ أي إن Q_H تساوي $Q_L + W$. (ب) في الصيف، تعكس المضخة الحرارية P عملها: فهي تنقل الطاقة من الغرفة بدرجة حرارة T_L إلى الخزان الحراري الأرضي بدرجة حرارة T_0 .

باستخدام صمام عاكس. يعرض الشكل ٦-٦ دورة التبريد. وهي مماثلة جداً لأي نظام تكييف هواء مركزي عادي يعتمد على مبدأ دورة انضغاط البخار. يعمل سائل ذو نقطة غليان منخفضة بمنزلة وسط التشغيل ويطلق عليه «وسيط التبريد». منذ أوائل القرن العشرين، كان الأمونيا (NH_3) والذي يسمى أيضاً R12، وسيط التبريد المفضل، لكن بسبب سُميته، استُبدل به في نظم تكييف الهواء كلورو ثنائي فلورو الميثان (CH_2Cl_2) أو R22، والذي حل محله البروبين (C_3H_8) أو R290، على الرغم من قابليته للاشتعال، وهو يُستخدم حالياً لأنه لا يضر بطبقة الأوزون.

الجزء الرئيسي في أي نظام تبريد يعتمد على انضغاط البخار هو «الضاغط» (1) (في الشكل ٦-٦). هذا هو النقطة التي عندها تكون القدرة الميكانيكية مبذولة. وعملية الانضغاط تكون تقريباً أديباتية. وإذا كان الضغط المبدئي هو P_1 والضغط النهائي هو P_2 ، فوفقاً لمعادلة 6-54:

$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma, \quad (6-67)$$

الديناميكا الحرارية للطاقة الشمسية



شكل 6-6: مضخة حرارية أرضية: وضع التبريد. ينضغط وسيط التبريد من خلال ضاغط (1) ليصبح فائق الحرارة. وعبر المبادل الحراري (2)، يُسخَّن في البداية الماء المنزلي، ثم وهو لا يزال ساخنًا ينتقل للمبادل الحراري (4) لكي يبرد لدرجة الحرارة الأرضية ويتكثف متحولاً إلى سائل. وعبر «صمام تمدد» (5)، يتبخر، وتمتص عملية التبخر كمية كبيرة من الحرارة من المساحة المحيطة عبر المبادل الحراري (6)؛ ومن ثم يحدث تبريد لتلك المساحة. نقلًا عن مرجع [53].

بحيث γ هي النسبة بين الحرارتين النوعيتين (ارجع للمعادلة 50-6) وقيمة γ لوسيط تبريد قياسي، R22، هي 1.26:

$$\gamma \equiv \frac{C_p}{C_v} = 1 + \frac{R}{C_v}. \quad (6-68)$$

وبدمج معادلة الحالة لغاز مثالي، نجد أن درجة الحرارة تتغير وفقاً لما يلي:

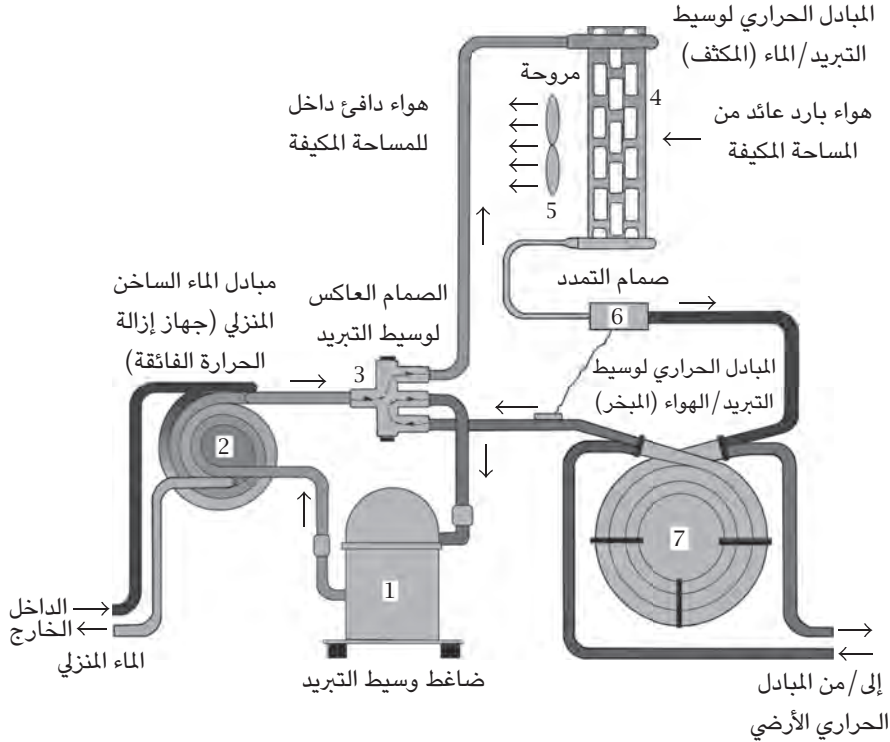
$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{0.2857} \quad (6-69)$$

إذا كان الغاز في البداية في درجة حرارة الغرفة (273K)، ومع انضغاطه بعامل 3، ترتفع درجة الحرارة إلى $273 \times 3^{0.2857}$ أي، 1.3687×273 ، أي 373K الذي يساوي نحو 100 درجة مئوية لذا، فإن وسيط التبريد يصبح غازاً فائق الحرارة. ثم تُستخدَم الحرارة المنتجة في البداية لتسخين الماء المنزلي عبر المبادل الحراري (2)، ثم من خلال صمام عاكس (3)، ينتقل وسيط التبريد الذي لا يزال ساخناً إلى المبادل الحراري للاحتكاك مع الماء القادم من الأرض ويبرد لدرجة الحرارة الأرضية؛ على سبيل المثال، T_0 تساوي 15 درجة مئوية أو 288K. وبسبب الضغط العالي، يتكثف وسيط التبريد ويتحول إلى سائل؛ لذا يُسمى المبادل الحراري هذا باسم «المكثف». يمر وسيط التبريد السائل بدرجة حرارة T_0 الذي لا يزال يخضع لضغط عالٍ عبر «صمام تمدد» (5) ليتبخر. وتمتص عملية التبخر كميات كبيرة من الحرارة وتصبح درجة حرارة البخار منخفضة جداً؛ على نحو أساسي، درجات عدة تحت الصفر، ثم ينتقل البخار البارد إلى المبادل الحراري (6)، الذي يصبح بمنزلة مشع بارد، وتدفع مروحة الهواء الدافئ من الغرفة إلى الأنابيب المتعرجة وتشغل المشع البارد (6)، ثم يتدفق الهواء المبرد إلى المساحة المراد تكييفها، ثم يُمنَص ثانية البخار الدافئ لوسيط التبريد إلى الضاغط (1) عبر الصمام العاكس (3)، وتبدأ العملية من جديد.

إذا لم تكن هناك حاجة لتسخين الماء المنزلي، فيمكن إزالة المبادل الحراري (2)، لكن الفائدة الإضافية من وراء وجود تلك الوحدة واضحة.

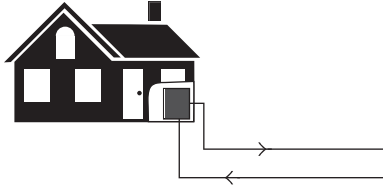
ينقل الصمام العاكس (3) لموضع آخر، يصبح النظام مضخة حرارية تُستخدَم في الشتاء؛ انظر الشكل ٦-٧. مرة أخرى، الضاغط (1) يضغط وسيط التبريد ويحوّله لغاز فائق الحرارة وينقل جزء من الحرارة للماء المنزلي عبر المبادل الحراري (2)، ثم عبر الصمام العاكس (3)، ينتقل إلى المبادل الحراري (4)، وهو مشع حراري ومكثف وسيط تبريد. وتدفع مروحة (5) الهواء الدافئ إلى المساحة المراد تكييفها. وفي ذلك الوقت، يتحول وسيط التبريد لسائل بفعل الهواء البارد. وينتقل وسيط التبريد السائل عبر صمام التمدد

(6) ويصبح بخارًا فائق البرودة، تكون درجة حرارته عادة أقل من نقطة تجمد الماء. ويمرور هذا البخار عبر المبادل الحراري (7) للاتصال الحراري مع الماء بدرجة الحرارة الأرضية، يحصل على حرارة من الأرض وتعود درجة الحرارة إلى T_0 .

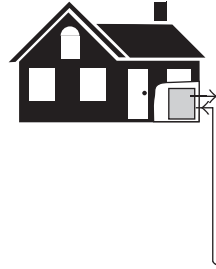


شكل ٦-٧: مضخة حرارية أرضية: وضع التدفئة. ينضغط وسيط التبريد من خلال ضاغط (1) ليصبح فائق الحرارة. وعبر المبادل الحراري (2)، يُسخَّن في البداية الماء المنزلي، ثم وهو لا يزال ساخنًا ومضغوطًا وغازي الطور ينتقل للمشع (4) لكي يدفئ المكان ويتحول إلى سائل، ثم يمر هذا السائل عبر صمام تمدد (5)، ليصبح بخارًا فائق البرودة، وتمتص عملية التبخر كميات كبيرة من الحرارة من الماء الجوفي عبر المبادل الحراري (6). نقلًا عن مرجع [53].

(٤-٦) المبادل الحراري الأرضي



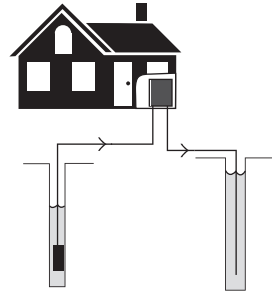
(ب) أفقي مغلق الحلقة.



(أ) رأسي مغلق الحلقة.



(د) مفتوح الحلقة ومباشر.

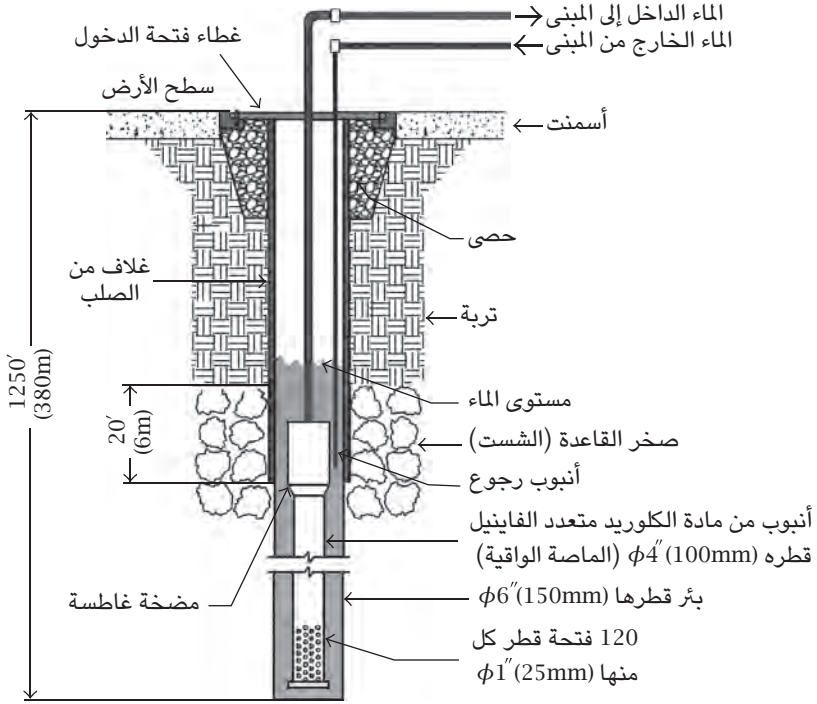


(ج) مفتوح الحلقة ومكون من بئرين.

شكل ٦-٨: توصيفات تبادل حراري للمضخات الحرارية الأرضية. يمكن أن يكون للمبادل الحراري الأرضي عدة توصيفات مختلفة. الشكلان (أ) و(ب) مبادل حراري مغلق الحلقة. والبئر الرأسية في الشكل (أ) لا تحتاج لمساحة كبيرة، مما يعني أنها يمكن استخدامها في منطقة مكتظة بالسكان. وبالنسبة للمباني في الضواحي والريف، يكون المبادل الحراري الأفقي المعروض في الشكل (ب) أقل تكلفة من حفر بئر عميقة. وفي الأماكن حيث يمكن بسهولة الوصول إلى الماء الجوفي، يكون النظام مفتوح الحلقة (الشكلان (ج) و(د)) أقل تكلفة.

يمكن أن يكون للمبادل الحراري الأرضي عدة توصيفات مختلفة. يعرض الشكل ٨-٦ عددًا منها. والمعياري الأساسي لأي مبادل حراري أرضي جيد هو الوصول إلى مساحة

الديناميكا الحرارية للطاقة الشمسية



شكل ٦-٩: بئر رأسية في نظام مضخة حرارية: تفاصيل بئر رأسية لنظام مضخة حرارية في المعهد الأمريكي للمعماريين. العمق يصل إلى 1250 قدمًا. ونحو 20 قدمًا تحت مستوى الماء الجوفي، تستخرج مضخة غاطسة الماء لوحدة تبادل حراري. ويمتد أنبوب قطره 6 بوصات مصنوع من مادة الكلوريد متعدد الفايثيل، أو ما يعرف بالمصاصة الواقية، تقريبًا لأسفل البئر. ويعود الماء من المبادل الحراري للبئر عبر أنبوب رجوع وتجري خارج المصاصة الواقية. الشكل معروض بإذن من المعهد الأمريكي للمعماريين.

كبيرة من الأرض أو الماء الجوفي أو صخر القاعدة. الشكلان (أ) و(ب) في الشكل ٦-٨ مبادل حراري مغلق الحلقة. لا تتطلب البئر الرأسية مساحة كبيرة؛ ومن ثم يمكن استخدامها في منطقة مكتظة بالسكان. ولا عجب أن معظم النظم الحرارية الأرضية في مدينة نيويورك نظم ذات آبار رأسية، لكن حفر بئر عمقها حتى 100 متر أمر مكلف.

فيزياء الطاقة الشمسية

وبالنسبة للمباني الموجودة في الضواحي والريف، يكفي دفن بضع مئات من الأمتار من ملفات النحاس في الأرض على عمق بضعة أمتار. وفي الأماكن التي يمكن فيها بسهولة الوصول إلى الماء الجوفي، يكون النظام مفتوح الحلقة ذا تكلفة أقل. وبحفر بئر ماء جوفي (الشكل ٨-٦ ج)) أو الوصول إلى بركة (الشكل ٨-٦ د))، يمكن إحداث تبادل حراري فعال. وفي الولايات المتحدة الأمريكية، 46 بالمائة من النظم رأسية مغلقة الحلقة، و38 بالمائة منها أفقية مغلقة الحلقة و15 بالمائة منها مفتوحة الحلقة.



شكل ٦-١٠: الوصلة الأرضية للبئر الحرارية الأرضية: يظهر هنا الأنبوبان الداخل والخارج. تلك الصورة الفوتوغرافية التقطها المؤلف، وهي معروضة بإذن المعهد الأمريكي للمعماريين.

يعرض الشكل ٦-٩ تفاصيل بئر رأسية في مقر المعهد الأمريكي للمعماريين، حي جرينتش فيليدج، بمدينة نيويورك. إنها بئر على عمق 1250 قدمًا، وبقطر 6 بوصات محفورة في الرصيف الذي يوجد أمام مبنى المعهد. ومستوى الماء الجوفي يتراوح بين 40 و50 قدمًا تحت سطح الأرض. ويوجد غلاف معدني لحماية البئر من الانهيار بفعل ضغط التربة. ويوجد الجزء السفلي من البئر في صخر القاعدة، الذي يكون قويًا بما يكفي للحفاظ على شكل البئر ربما مئات السنين. ويمتد أنبوب قطره 6 بوصات مصنوع من



شكل ١١-٦: مبنى نوكس هول بجامعة كولومبيا: يوجد هذا المبنى التاريخي المبنى منذ قرن في 606 شارع ويست 122، بمانهاتن. وبعد تجديد استمر لمدة 16 شهرًا وانتهى في فبراير عام 2010، رُكب أحد أكبر نظم الطاقة الحرارية الأرضية الضحلة في مدينة نيويورك. يتضمن النظام أربع آبار عمق كل منها 1800ft (547m) ومضخات حرارية تُستخدم في كل من التبريد والتدفئة. والعناصر المرئية فقط في هذا المشروع، التي توجد خارج هذا المبنى التاريخي، هي 4 أغطية فتحات دخول على الرصيف. الصورة الفوتوغرافية معروضة بإذن من جامعة كولومبيا.

مادة الكلوريد متعدد الفينيل، أو ما يعرف بالماصة الواقية، تقريبًا لأسفل البئر. وقرب أسفل البئر، يكون للماصة الواقية 120 فتحة قطر كل منها بوصة. ويُستخرج الماء من البئر العميقة باستخدام مضخة غاطسة وتُنقل لوحدة تبادل حراري؛ انظر الشكل ٦-٧. ويعود الماء من المبادل الحراري للبئر عبر أنبوب رجوع وتخرج عبر الماصة الواقية. وهكذا، يجري الماء بطول العمق الكامل للبئر الرأسية؛ ومن ثم يصل إلى التوازن الحراري مع صخر القاعدة الأرضي حيث تكون درجة الحرارة دائمًا 12 درجة مئوية. يعرض الشكل ٦-١٠ صورة فوتوغرافية للوصلة الأرضية للبئر الحرارية الأرضية الموجودة في الطابق السفلي للمعهد الأمريكي للمهندسين المعماريين.



شكل ١٢-٦: المضخّات الحرارية الموجودة في الطابق السفلي لمبنى نوكس هول: صورة فوتوغرافية التقطها المؤلف في الطابق السفلي لمبنى نوكس هول، بجامعة كولومبيا. تظهر مصفوفة من المضخّات الحرارية على الجانب الأيسر. في حين تظهر وصلات الآبار الجوفية على الجانب الأيمن. في عمق الأرض، تكون درجة الحرارة دائماً 57 درجة فهرنهايت (14 درجة مئوية). في الشتاء، تسحب المضخّات الحرارية الحرارة من الأرض لتدفئة مرافق المبنى، وفي الصيف، تسحبها من مرافق المبنى وتنقلها للأرض. ويمكن استعادة الأموال المستثمرة في هذا المشروع في خلال نحو 7 سنوات وذلك عن طريق توفير الكهرباء. الصورة الفوتوغرافية معروضة بإذن من جامعة كولومبيا.

كان النظام الحراري الأرضي للمعهد الأمريكي للمعماريين هو أول نظام حراري أرضي يُركب في مدينة نيويورك، لكن يوجد بها الآن العديد من النظم الأخرى. ومن أكبر تلك النظم نظام مبنى نوكس هول بجامعة كولومبيا؛ انظر الشكل ١١-٦. يمتد هذا المبنى على مساحة 50000ft² ويضم مكاتب وقاعات مؤتمرات وقاعات محاضرات خاصة بالعديد من أقسام الجامعة، وله 4 آبار عميقة عمق كل منها 1800ft (547m) تُستخدم لتدفئته وتبريده لحمل تبريد وتسخين 95 ton. ويقلل استخدام تلك الآبار من معدل استهلاك المبنى للطاقة بنسبة 23 بالمائة (مقارنةً بأي نظام تقليدي). وقد حُفرت تلك

الآبار الأربعة على الرصيف، الذي لا يتداخل مع المبنى بأكمله. وبعد التركيب، العناصر المرئية فقط هي 4 أغطية فتحات دخول على الرصيف. ويعرض الشكل ٦-١٢ المضخات الحرارية الموجودة في الطابق السفلي للمبنى.

مسائل

(6-1) يبلغ معامل الأداء الخاص بالمضخات الحرارية والمبردات والمتحقق في الصناعة نحو 50 بالمائة من حد كارنو. توصل إلى تقديرات الحالات التالية:

(1) مبرد يحقق درجة حرارة 10- درجات مئوية في منطقة التجميد بدرجة حرارة خارجية 25 درجة مئوية.

(2) نفس المبرد الذي يحقق درجة حرارة 10- درجات مئوية في منطقة التجميد ولكن باستخدام خزان حراري أرضي باعتباره المصدر الخارجي بدرجة حرارة 10 درجات مئوية.

(6-2) افترض أن مُجمِّعاً حرارياً شمسياً بمساحة 2m^2 يستخدم الماء الجاري عبر الأنابيب الموجودة تحت الأرض بدرجة حرارة 15 درجة مئوية لتوليد ماء ساخن بدرجة حرارة 55 درجة مئوية. فإذا كانت كفاءة المُجمع الشمسي 80 بالمائة، ففي المتوسط، ما مقدار الماء الساخن الذي يمكن لهذا النظام أن يولده كل يوم؟

(1) في منطقة تشرق عليها الشمس لمدة 5 ساعات يومياً.

(2) في منطقة تشرق عليها الشمس لمدة 3 ساعات يومياً.

تلميح: معدل التشميس اليومي يبلغ 1kW/m^2 .

الفصل السابع

الانتقالات الكمية

كما أوضحنا في الفصل الثاني، يجسد ضوء الشمس ثنائية الموجة والجسيم؛ فهو في نفس الوقت موجة كهرومغناطيسية وتدفق من جسيمات ذات حزم طاقة غير قابلة للانقسام، وهي الفوتونات. ويمكن تقسيم استخدام الطاقة الشمسية إلى فئتين؛ الفئة الأولى: مرتبطة بطبيعتها الموجية ويمكن تفسيرها من خلالها، مثل توليد الحرارة والطلاءات المضادة للانعكاس الخاصة بالخلايا الشمسية. أما الفئة الثانية: فترتبط بالطبيعة الكمية للضوء. فكموم الضوء، أو الفوتونات، تثير الذرات والجزيئات والعناصر الصلبة وتنقلها من حالة الاستقرار لحالة إثارة، ثم تحول جزءاً من الطاقة إلى قدرة كهربية أو طاقة كيميائية، مثل الأنواع المختلفة للخلايا الشمسية والتمثيل الضوئي.

في هذا الفصل، سنعرض للأساس المفاهيمي لتأثير ضوء الشمس باعتباره تدفقاً من الفوتونات؛ أي، ميكانيكا الكم. ونتناول الحالات الكمية للنظم الذرية ومستويات طاقتها ودوالها الموجية والانتقالات الكمية الناتجة عن التفاعل مع الإشعاع.

(١) المفاهيم الأساسية لميكانيكا الكم

ميكانيكا الكم فرع من الفيزياء يتعامل مع الظواهر على المستوى الذري. وهي وصف مفاهيمي رياضي لكيفية اجتماع الأنوية والإلكترونات معاً لتكوين مادة مكثفة ولكيفية تطور النظام عبر الوقت ولكيفية تفاعل النظام مع الإشعاع. وتكمن الصعوبة الأساسية في تعلم هذا الفرع من الفيزياء في أن مقياس الظواهر الذرية يكون أقل من نانومتر واحد ويختلف كثيراً عن الظواهر على المقياس العياني. على سبيل المثال، الميكانيكا النيوتنية وصف مفاهيمي رياضي للظواهر العيانية. وباستخدام تلسكوب، يمكن رصد حركة الأجرام السماوية وقياسها على نحو مباشر للتحقق من الميكانيكا النيوتنية. على

الجانب الآخر، باستخدام ميكروسكوبات ضوئية، يمكن رصد أجسام تُقاس بالميكرومتر، مثل الخلايا في علم الأحياء، والتحقق منها وفهمهما على نحو مباشر. ومؤخرًا فقط أصبح بالإمكان الرصد المباشر للظواهر على المستوى الذري، وهي كيانات ميكانيكا الكم، باستخدام «ميكروسكوبات المسح النفقي» و«ميكروسكوبات القوة الذرية».

(١-١) الحالات الكمية: مستويات الطاقة والدوال الموجية

في الميكانيكا النيوتنية، هناك مفاهيم محددة بدقة تصف الظواهر الفيزيائية: الموقع والسرعة المتجهة والتسارع والزخم والزخم الزاوي والكتلة والقوة. إن قوانين نيوتن هي القوانين الطبيعية التي تقف وراء هذه الظواهر. وكانت حركة الكواكب في المجموعة الشمسية وحركة أقمار الكواكب أول الأمثلة — ولا تزالان من أفضلها — التي تبين الميكانيكا النيوتنية.

إن تركيب الذرة مماثل لتركيب مجموعة شمسية مصغرة: بروتون ثقيل وموجب الشحنة محاط بعدد من الإلكترونات الضوئية سالبة الشحنة، لكن الميكانيكا الكلاسيكية غير ملائمة على الإطلاق لوصف النظم الذرية؛ فهي فشلت حتى في تفسير الحقيقة التي تقول إن النظام الذري يمكن أن يوجد ككيان مستقر. وكما أن الميكانيكا النيوتنية تستخدم لوصف الرصد التجريبي لحركات الأجرام السماوية والأجسام العيانية على الأرض، فإن ميكانيكا الكم تُستخدم لوصف حركات الأجسام على المستوى الذري. وبدلاً من مفاهيم الموقع والسرعة المتجهة والتسارع والزخم والزخم الزاوي والكتلة والقوة وهكذا، فإن المفهوم الأساسي لميكانيكا الكم هو «الحالة». وطبقاً لديراك، الحالة الكمية هي إحدى «الحركات الممكنة المتعددة للجسيمات أو الأجسام المتوافقة مع قوانين القوة»، وهي تُمثل من خلال «متجه برا»، $|\rangle$ ، أو «متجه كيت»، $\langle|$. وبالنسبة للنظم المقيدة، مثل الذرات والجزيئات، تكون الحالات منفصلة ويمكن تسميتها عن طريق أعداد كمية منفصلة مثل:

$$\langle n|, |n\rangle : n = 0, 1, 2, \dots; \quad (7-1)$$

وتُسمى الحالات الكمية في الفضاء اللامتناهي باستخدام متغيرات متصلة. على سبيل المثال، يمكن تسمية حالة الموجة المستوية باستخدام متجه موجي k :

$$\langle \mathbf{k}|, |\mathbf{k}\rangle : \mathbf{k} = (k_x, k_y, k_z). \quad (7-2)$$

يمكن تمثيل الحالات بمتجه بعناصر مركبة من الرتبة اللامتناهية أو بدالة مركبة من الإحداثيات المكانية $\psi(\mathbf{r})$ ، أو الدالة الموجية. وبالنسبة للمتجه، تكون عناصر أو قيم البرا المرافقات المركبة لعناصر أو قيم الكيت. وبالنسبة للدالة الموجية، يُمثل البرا بالمرافق المركب لذلك الخاص بدالة كيت الموجية، $\psi^*(\mathbf{r})$.
الكلمتان «برا» و«كيت» مأخوذتان من كلمة «براكيت» (وهي التمثيل الصوتي لكلمة bracket، أي القوس). ويمثل التعبير عن قوس كامل الجداء الداخلي للمتجه:

$$\langle a|b \rangle \equiv \sum_{n=0}^{\infty} a_n^* b_n, \quad (7-3)$$

بحيث يكون a_n^* هو المرافق المركب لـ a_n أو التكامل المكاني للدوال الموجية:

$$\langle \psi|\chi \rangle \equiv \int \psi^*(\mathbf{r}) \chi(\mathbf{r}) d^3(\mathbf{r}). \quad (7-4)$$

(٢-١) المتغيرات الديناميكية ومعادلة الحركة

يُعبّر عن المتغيرات الديناميكية كمؤثرات للحالات؛ فإذا مُثلت حالة بمتجه، إذن فالمؤثر يُمثل بمصفوفة. ومن أجل الوضوح، سنستخدم أسلوب الترميز الذي يميز المؤثر بوضع علامة مد () على الحرف. على سبيل المثال، إن

$$|b\rangle = \hat{V}|a\rangle \quad (7-5)$$

يعني:

$$b_m = \sum_n V_{mn} a_n. \quad (7-6)$$

وحتى تكون قيم المتغير الديناميكي حقيقية، يجب أن تكون المصفوفة «هرميتية»؛ أي أنها يجب أن تكون لها الخواص:

$$V_{mn} = V_{nm}^*. \quad (7-7)$$

من ثم، يجب أن تكون العناصر القطرية للمؤثر حقيقية. فإذا لم يكن أحد المؤثرات هرميتيًا، فيمكن أن نعرف «مؤثرًا مرافقًا» $\hat{A}^\dagger$ بحيث يكون:

$$A_{mn}^\dagger = A_{nm}^*. \quad (7-8)$$

من السهل إثبات أن كلاً من $\hat{A}^\dagger + \hat{A}$ و $i(\hat{A}^\dagger - \hat{A})$ هرميتيان. طبقاً لمؤسسي علم ميكانيكا الكم (هايزنبرج وشروندجر وديراك)، فإن هذا العلم صيغ من الشكل المعياري للميكانيكا الكلاسيكية بإحداثي q وزخمه المرافق p والدالة الهاملتونية لكل من q و p ، أي، $H(p, q)$. وتُبنى الميكانيكا الكمية للنظام باعتبار المتغيرات الديناميكية كمؤثرات تحقق علاقة التبادل التالية:

$$\hat{q}\hat{p} - \hat{p}\hat{q} = i\hbar, \quad (7-9)$$

بحيث $\hbar$ هو ثابت ديراك الذي يساوي ثابت بلانك h مقسومًا على 2π . على سبيل المثال، في تمثيل الدالة الموجية، الزخم $\hat{p}_x$ هو:

$$\hat{p}_x|\Psi\rangle = -i\hbar\frac{\partial}{\partial x}|\Psi\rangle. \quad (7-10)$$

ومن ثم يمكن بسهولة التحقق من علاقة التبادل (معادلة 7-9). وتكون أي حالة كمية بوجه عام معتمدة على الزمن، ويتبع تطورها «معادلة الحركة»:

$$i\hbar\frac{\partial}{\partial t}|\Psi\rangle = \hat{H}|\Psi\rangle, \quad (7-11)$$

بحيث $\hat{H}$ هو المؤثر الهاملتوني للنظام كدالة من الإحداثي q والزخم p . وبالنسبة لنظام مغلق، لا يمكن أن يشتمل المؤثر الهاملتوني على زمن على نحو صريح. وفي هذه الحالة، يكون للمعادلة 7-11 سلسلة من «حلول الحالات المستقرة»:

$$|\Psi\rangle = e^{-iE_n t/\hbar}|\psi\rangle. \quad (7-12)$$

إننا هنا سنستخدم الحرفَ الكبيرَ للإشارة إلى حالة ذات تباين زمني، والحرفَ الصغيرَ للإشارة إلى الجزء المعتمد على الزمن من الحالة. والحالة الكمية المستقرة لأي نظام $|\psi\rangle$ هي حل معادلة شرودنجر:

$$\hat{H}|\psi\rangle = E|\psi\rangle. \quad (7-13)$$

(٣-١) الإلكترون المحصور في صندوق أحادي البعد

من المسائل المهمة في ميكانيكا الكم الإلكترون المحصور في صندوق أحادي البعد؛ انظر الشكل ٧-١. إن المؤثر الهاملتوني هو:

$$\hat{H} = \frac{\hat{p}_x^2}{2m_e} + V(x), \quad (7-14)$$

بحيث:

$$V(x) = 0, \quad 0 < x < L, \quad (7-15)$$

$$V(x) = \infty, \quad x < 0 \quad \text{and} \quad x > L.$$

فيما يتعلّق بالإحداثي x ، تصبح معادلة شرودنجر (معادلة 7-13):

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m_e} \frac{d^2}{dx^2} + V(x) \right] \psi(x) = E\psi(x). \quad (7-16)$$

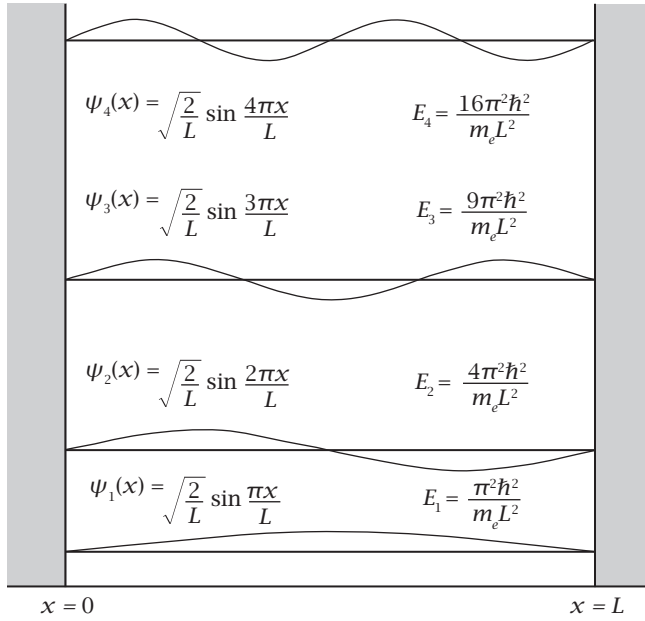
داخل الصندوق، يكون $0 < x < L$ و $V(x) = 0$. وتُختزل المعادلة 7-16 إلى ما يلي:

$$-\frac{\hbar^2}{2m_e} \frac{d^2\psi(x)}{dx^2} = E\psi(x). \quad (7-17)$$

عندما تكون x صفرًا أو L ، يجب أن تتلاشى الدالة الموجية؛ لأن الإلكترون لن يستطيع اختراق حاجز جهد عالٍ على نحو لامتناهٍ، مما يعني ضمناً وجود شرطين حديين:

$$\psi(0) = 0, \quad (7-18)$$

فيزياء الطاقة الشمسية



شكل ٧-١: إلكترون في صندوق أحادي البعد. مستويات الطاقة والدوال الموجية لإلكترون في صندوق أحادي البعد.

$$\psi(L) = 0. \quad (7-19)$$

إن الحل الذي يحقق الشرط الحدي الأول (المعادلة 7-18) هو:

$$\psi(x) = C \sin(kx), \quad (7-20)$$

بحيث C ثابت و:

$$k = \frac{\sqrt{2m_e E}}{\hbar}. \quad (7-21)$$

ويتطلب الشرط الحدي الثاني (المعادلة 7-19) ما يلي:

$$\psi(L) = C \sin(kL) = 0, \quad (7-22)$$

مما يعني ضمناً أن:

$$k = \frac{n\pi}{L}, \quad (7-23)$$

بحيث n عدد صحيح. من المعادلة 7-21، نحصل على مستويات الطاقة:

$$E = \frac{n^2 \pi^2 \hbar^2}{m_e L^2}. \quad (7-24)$$

يتحدد الثابت C من خلال «شرط المعايرة»:

$$\int_0^L |\psi(x)|^2 dx = \int_0^L C^2 \sin^2(kx) dx = 1, \quad (7-25)$$

لأن متوسط قيمة $\sin^2(x)$ يساوي $1/2$ ، مما يعني ضمناً أن:

$$C = \sqrt{\frac{2}{L}}. \quad (7-26)$$

بإعادة كتابة المعادلة 7-21، نجد أن مستوى الطاقة E دالة تربيعية للمتجه الموجي

k :

$$E = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e}. \quad (7-27)$$

إذا كانت الكتلة عاملاً غير معروف، فيمكن الحصول عليها من معامل تلك الدالة التربيعية:

$$\frac{1}{m_e} = \frac{1}{\hbar^2} \frac{\partial^2 E}{\partial k^2}, \quad (7-28)$$

التي تُعد علاقة أساسية في فيزياء أشباه الموصلات لتحديد «الكتلة الفعالة» لأي نطاق من الطاقة.

(٤-١) ذرة الهيدروجين

تُعد ذرة الهيدروجين، التي تُعد مجموعة شمسية مصغرة تتألف من بروتون موجب الشحنة وإلكترون سالب الشحنة، أول حالة اختبارية لميكانيكا الكم. وحاليًا، ما زالت هي أفضل نظام في الطبيعة يمكن استخدامه لتوضيح وفهم ميكانيكا الكم. وباعتبار البروتون ثابتًا، تكون الحالة الكمية لأي ذرة هيدروجين هي حل المعادلة التالية:

$$\left[\frac{\hat{p}^2}{2m_e} - \frac{\kappa}{r} \right] |\psi\rangle = E|\psi\rangle, \quad (7-29)$$

بحيث κ تساوي $q^2/4\pi\epsilon_0$ أي، $2.30 \times 10^{-28} \text{ J} \cdot \text{m}$ (ارجع للفصل الثاني)، و m_e هي كتلة الإلكترون، و r هي المسافة من البروتون إلى الإلكترون. والشكل الرياضي للمؤثر الهاملتوني في ميكانيكا الكم مطابق لشكله في الميكانيكا الكلاسيكية.

من المثير ملاحظة أن باولي حل معادلة الحركة للهيدروجين في شكل مصفوفة في عام 1926 وذلك قبل ابتكار شرودنجر للميكانيكا الموجية في عام 1927؛ انظر الملحق ج. ويُعد حل شرودنجر باستخدام المعادلات التفاضلية أكثر شهرة، ويمكن إيجاده في الكتب القديمة الخاصة بميكانيكا الكم. ومعالجة باولي أكثر إيجازًا ووضوحًا من الناحية المفاهيمية.

يمكن وصف الحالات الكمية لذرة الهيدروجين من خلال مجموعة من «الأعداد الكمية». وتتضمن مجموعة الأعداد الكمية الأكثر استخدامًا العدد الكمي الرئيسي n والعدد الكمي الزاوي l والعدد الكمي المغناطيسي m . وتعتمد قيمة طاقة ذرة الهيدروجين فقط على العدد الكمي الرئيسي:

$$\hat{H}|n, l, m\rangle = E_n|n, l, m\rangle, \quad (7-30)$$

بحيث:

$$E_n = -\frac{\kappa^2 m_e}{2n^2 \hbar^2}. \quad (7-31)$$

إن طاقة حالة الاستقرار هي E_1 تساوي 2.17×10^{-18} جول؛ أي، -13.53eV . في تمثيل إحداثي، تُمثَّل الحالات الكمية من خلال «دوال موجية». على سبيل المثال، إن الدالة الموجية للحالة الكمية ذات أقل مستوى من الطاقة لذرة الهيدروجين هي:

$$\langle r|1, 0, 0\rangle = \psi_{100}(r) = \frac{1}{\sqrt{\pi a_0^3}} e^{-r/a_0}, \quad (7-32)$$

بحيث a_0 هو نصف قطر بور:

$$a_0 = \frac{\hbar^2}{m_e K} \cong 0.0529\text{nm} = 52.9\text{pm}. \quad (7-33)$$

وعلى الرغم من أن الدالة الموجية عادةً ما تكون دالة مركبة وليست قابلة للرصد على نحو مباشر، فإن احتمالية كثافة الشحنة المتناسبة مع:

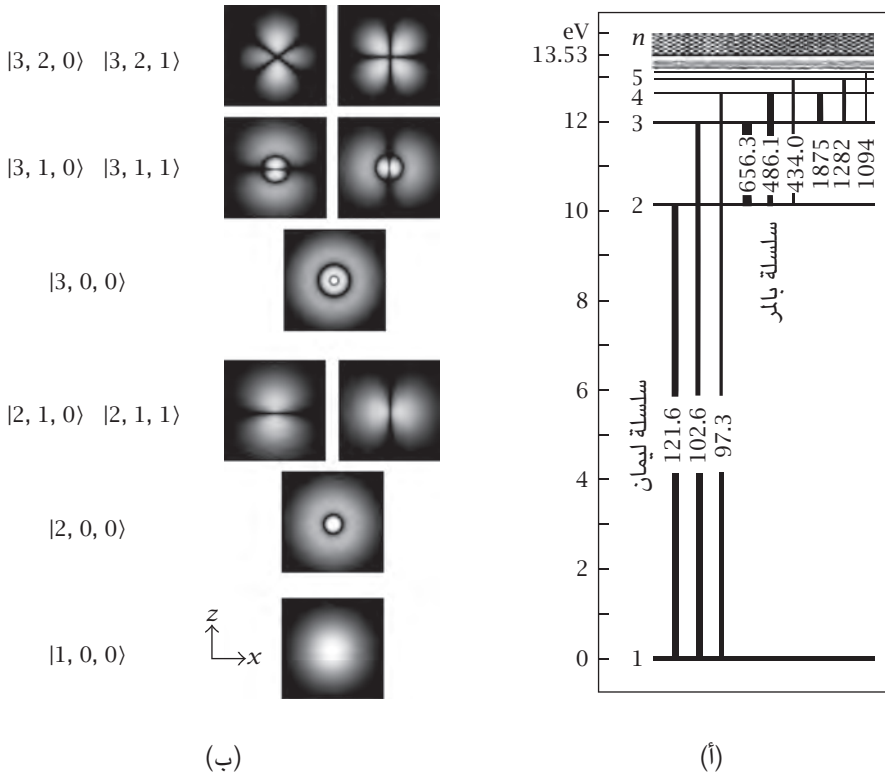
$$\rho(r) = |\psi_{100}(r)|^2 = \frac{1}{\pi a_0^3} e^{-2r/a_0} \quad (7-34)$$

تكون قابلة للرصد. في واقع الأمر، يمكن رصد كل من مستوى الطاقة وكثافة الشحنة على نحو مباشر باستخدام مجهر نفقي ماسح. وبالتعريف، تكون الاحتمالية معايرة:

$$\langle 1, 0, 0|1, 0, 0\rangle = \int \rho(r) d^3r = 4\pi \int_0^\infty |\psi_{100}(r)|^2 r^2 dr = 1. \quad (7-35)$$

يعرض الشكل ٧-٢ الحالات المستقرة لذرة الهيدروجين. ويوضح الشكل ٧-٢ (أ) مستويات الطاقة. ويكون أقل مستوى طاقة لذرة الهيدروجين، أو مستوى الاستقرار، هو 13.53 إلكترون فولت تحت مستوى الفراغ. وتقع سلسلة من مستويات الطاقة بين المستويين السابقين. ويمكن أن تحدث الانتقالات الإشعاعية — أي، الامتصاص أو الانبعاث — فيما بين تلك المستويات. ويوضح الشكل ٧-٢ (ب) توزيعات كثافة الشحنة الخاصة بالحالات المستقرة لذرة الهيدروجين.

ومن الممكن استثارة الحالة الكمية للهيدروجين إلى حالة ذات مستوى طاقة أعلى بامتصاص بروتون، أو تقليل استثارتها نحو قيمة طاقة أقل بإطلاق بروتون.



شكل ٧-٢: الحالات الكمية لذرة الهيدروجين: (أ) مستويات الطاقة الخاصة بالحالات المستقرة لذرة الهيدروجين. ويكون أقل مستوى طاقة لذرة الهيدروجين، أو مستوى الاستقرار، هو 13.53 إلكترون فولت تحت مستوى الفراغ. وتتبع سلسلة من مستويات الطاقة بين المستويين السابقين. (ب) توزيعات الاحتمالات للحالات المستقرة لذرة الهيدروجين، التي تحددها الدوال الموجية. والأعداد في كيتات ديراك هي، من اليسار لليمين، العدد الكمي الرئيسي n والعدد الكمي الزاوي l والعدد الكمي المغناطيسي m .

(٢) النظم المتعددة الإلكترونات

بالنسبة للنظم الذرية في الطبيعة، وفيما يتعلّق بميكانيكا الكم، حفنة فقط منها لها حلول تحليلية: ذرة الهيدروجين بالشكلين النسبي وغير النسبي، والأيون الجزيئي للهيدروجين

الذي له أيضًا إلكترون واحد فقط. بالنسبة للنظم المتعددة الإلكترونات، هناك حاجة للتقريب. ولأن الأنوية أثقل بكثير من الإلكترونات، ففي البحث عن حلول لمعادلة شرودنجر بالنسبة لنظام بعدد N من الإلكترونات، تؤخذ إحداثيات الأنوية r_I كقيم ثابتة محددة مسبقًا. وتشتمل أطراف الطاقة الحركية للمؤثر الهاملتوني T فقط على إحداثيات الإلكترونات:

$$T = -\frac{\hbar^2}{2m_e} \sum_{j=1}^{j=N} \nabla_j^2. \quad (7-36)$$

وتتضمن طاقة الوضع الأطراف الثلاثة التالية: طاقة الوضع الجاذبة بين الإلكترونات والأنوية:

$$V_1 = - \sum_{I=1}^{I=N} \sum_{i=1}^{i=N} \frac{Z_I \kappa}{|\mathbf{r}_I - \mathbf{r}_i|}; \quad (7-37)$$

وطاقة الوضع النافرة بين الإلكترونات:

$$V_2 = - \sum_{j=1}^{j=N} \sum_{i=1}^{i=N} \frac{\kappa}{|r_j - \mathbf{r}_i|}; \quad (7-38)$$

وطاقة الوضع النافرة بين الأنوية:

$$V_3 = - \sum_{I=1}^{I=N} \sum_{J=1}^{J=N} \frac{Z_I Z_J \kappa}{|\mathbf{r}_I - \mathbf{r}_J|}. \quad (7-39)$$

ومعادلة شرودنجر هي:

$$[T + V_1 + V_2 + V_3] |\psi\rangle = E |\psi\rangle, \quad (7-40)$$

بحيث تعتمد $|\psi\rangle$ على إحداثيات الإلكترونات.

(٢-١) تقريب الإلكترون الواحد

رغم تعقُّد المسألة، طُبِّق مفهوم بسيط وناجح جدًّا، وهو «تقريب الإلكترون الواحد»، بكثافة في فيزياء المادة المكثفة لعدة عقود. وهناك نسخة أقدم من هذا الأسلوب والمتمثلة في طريقة هارترى وفوك أو طريقة المجال الذاتي التناسق. وهناك نسخة لاحقة، وهي نظرية الكثافة الوظيفية، التي تجعل عملية الحساب العددي أكثر كفاءة وبوجه عام أكثر دقة. وبالنسبة لكلتا الطريقتين، فإن مسألة النظام المتعدد الإلكترونات يمكن اختزالها لمجموعة من المسائل الأحادية الإلكترونات، مع تحرك كل إلكترون في طاقة الوضع المتوسطة ϕ التي تكونها الأنوية وباقي الإلكترونات. ونظرًا للتطورات الحادثة في مجال أجهزة الكمبيوتر والخوارزميات الحسابية، فقد وصلت ميكانيكا الكم إلى وضع تكون فيه التنبؤات موثوقًا بها ونافعة.

وفي حالة الجزيء، يُؤلَّد حل مسألة المجال الذاتي التناسق سلسلة من الحالات المستقرة، التي لكل منها دالتها الموجية وقيمتها الذاتية الخاصة بها، والتي يمكن أن تُسمى باستخدام عدد صحيح موجب n :

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m_e} \nabla^2 + q\phi \right] |n\rangle = E_n |n\rangle. \quad (7-41)$$

افترض أن الجزيء مكون من أنوية بعدد ترتيبى Z_I . هكذا تكون الشحنة الموجبة الكلية هي:

$$N = \sum_{I=1}^{\text{nuclei}} Z_I. \quad (7-42)$$

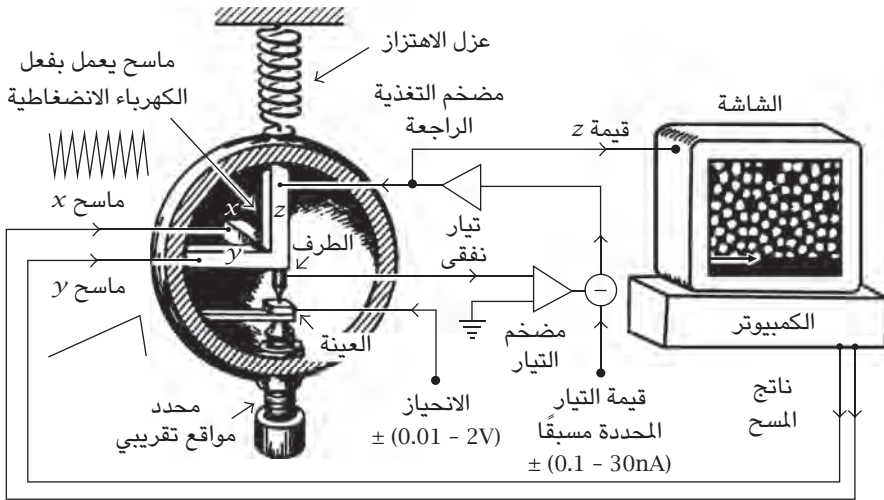
يتطلب تعادل الشحنة بالنسبة للحالة الطبيعية للجزيء أن يكون هناك عدد N من الإلكترونات. وباتباع «مبدأ الاستبعاد لباولي»، تملأ الإلكترونات الحالات، الواحدة تلو الأخرى، بدءًا من الحالة ذات قيمة الطاقة الأقل. وبمجرد ملء الحالة التي ترتيبها N ، يصبح الجزيء محايدًا.

وبالنسبة للحالات الصلبة، يكون عدد الأنوية في واقع الأمر لامتناهيًا، وتحتاج تسمية الحالات الأحادية الإلكترونات لمتغير مستمر أو مزيج من عدد صحيح ومتغير مستمر. ولأن الشبكية ذات تناظر انتقالي، فيعد متجه الموج k عددًا كميًا جيدًا.

وحلول المعادلات غير الخطية الناتجة تتعامل كما لو كان كل إلكترون معرضاً للمجال المتوسط المؤلّد من جانب كل الجسيمات الأخرى. ويمكن حل تلك المعادلات رقمياً فقط.

(٢-٢) الرصد المباشر للحالات الكمية

حتى ثمانينيات القرن العشرين، كانت الحالات الكمية للنظم الذرية تُعتبر فقط تبسيطات رياضية لتفسير الكميات الفيزيائية العيانية. وعندما اخترع بيننج وروهرر المجهر النفقي الماسح عام 1981، أصبحت تلك الحالات، بما في ذلك المدارات الجزيئية، قابلة للرصد على نحو مباشر [18].



شكل ٧-٣: مجهر نفقي ماسح. تجعل الأشكال الموجية الماسحة، على المحولين x و y ، طرف المجس يمسح سطح العينة مجالياً. ويُطبّق فرق جهد انحياز بين العينة والطرف لحث تيار نفقي. ويتحكم نظام تغذية راجعة في المحول z للحفاظ على ثبات التيار النفقي. ويمثل فرق الجهد المطبق على المحول z الارتفاع المحلي للطوبوغرافيا. ولضمان استقرار العملية، يكون العزل عن مصادر الاهتزاز ضرورياً [18].

يعرض الشكل ٧-٣ مخططاً لمجهر نفقي ماسح. فيوصل طرف مجس، عادة ما يكون مصنوعاً من سبيكة من البلاتين والإريديوم، بـ «ماسح يعمل بفعل الكهرباء الانضغاطية»،

يتكون من ثلاثة محولات طاقة متعامدة بالتبادل تعمل بالكهرباء الانضغاطية: محول x ومحول y ومحول z . وعند تطبيق فرق جهد كهربائي، يتمدد المحول أو ينضغط. وبتطبيق فرق جهد سن منشاري على محول x وفرق جهد متصاعد على محول y ، يسمح الطرف المستوي xy . وباستخدام محدد المواقع التقريبي ومحول z ، يقترب الطرف والعينة معاً بمسافة صغيرة جداً تبلغ جزءاً من النانومتر، وتتداخل الدوال الموجية للإلكترونات في الطرف مع الدوال الموجية للإلكترونات في سطح العينة. تولّد «موصلية نفقية» متناهية. وبتطبيق فرق جهد انحياز بين الطرف والعينة، يُولّد «تيار نفقي».

يتحول التيار النفقي إلى فرق جهد من خلال مضخم التيار، الذي يُقارن بعد ذلك بقيمة مرجعية، ويُضخم الفرق لدفع محول z ، ويُحدّد طور المضخم لتوفير تغذية راجعة سالبة؛ فإذا كانت القيمة المطلقة للتيار النفقي أكبر من القيمة المرجعية، فيميل فرق الجهد المطبق على المحول z لسحب الطرف من سطح العينة، والعكس صحيح؛ لذا فإن موقع توازن z يُنشأ. وعند مسح الطرف للمستوى xy ، تُنشأ مصفوفة ثنائية الأبعاد من مواقع التوازن z وتُعرض وتُخزّن في ذاكرة الكمبيوتر.

وهكذا، يمكن أن تعرض صورة المجر النفقي الماسح في نفس الوقت مستوى الطاقة (بتغيير فرق جهد الانحياز) والدالة الموجية (بعرض كثافة شحنة الإلكترونات).

(٣-٢) الحالات الكمية للجزيئات: أعلى مدار جزيئي مشغول

وأدنى مدار جزيئي غير مشغول

تأمل جزيئاً ذي شحنات موجبة عددها N ؛ انظر معادلة 42-7. يتطلب مبدأ الاستبعاد لباولي أنه يمكن أن تُشغل كل حالة (يختلف اللف المغزلي باختلاف الحالة) إلكترون واحد فقط. وبإضافة إلكترونات الواحد تلو الآخر بدءاً من الحالة الأدنى، مع وجود عدد N من الإلكترونات، يصبح الجزيء محايداً. وتُسمى الحالة، أو المدار الجزيئي، التي يكون فيها لجزيء محايد أعلى مستوى طاقة «أعلى مدار جزيئي مشغول»، وتكون الحالة التي يكون فيها مستوى الطاقة أعلى من ذلك الخاص بأعلى مدار جزيئي مشغول؛ غير مشغولة بالنسبة لجزيء محايد وتُسمى «أدنى مدار جزيئي غير مشغول». بالنسبة للجزيئات العضوية التي ترتبط بموصل، يكون أعلى مدار جزيئي مشغول أدنى من مستوى فيرمي. وإلا، يمكن للإلكترونات في تلك الحالة أن يهرب ليكوناً جزيئياً موجباً. على الجانب الآخر، يكون أدنى مدار جزيئي غير مشغول أعلى من مستوى فيرمي. وإلا، يمكن أن يشغله إلكترون من الموصل المرتبط ليكوناً جزيئياً سالباً.

باستخدام مجهر نفقي ماسح، يمكن على نحو مباشر رصد كثافة شحنة الإلكترونات ومستوى الطاقة لكل من أعلى مدار جزيئي مشغول وأدنى مدار جزيئي غير مشغول. ويوضح الشكل ٧-٤ منحني الموصلية النفقية والتيار النفقي، حيث تقابل الذروة عند 2.4eV - تحت مستوى فيرمي أعلى مدار جزيئي مشغول، وتقابل الذروة عند 1.5eV + فوق مستوى فيرمي أدنى مدار جزيئي غير مشغول. ويوضح الشكل ٧-٤ (ب) عمليات رصد تجريبية لخطوط كثافة الشحنة لجزيء بنتاسين عند 2.4eV - و 1.5eV +، المقابلين لأعلى مدار جزيئي مشغول وأدنى مدار جزيئي غير مشغول، على التوالي. وتظهر أيضاً النتائج النظرية من الحسابات العددية.

(٢-٤) الحالات الكمية لبلورة نانوية

لا يستطيع المجهر النفقي المسحي فقط رصد الحالات الإلكترونية وإنما أيضاً إنشاء تراكيب ذرية اصطناعية غير موجودة في الطبيعة. يعرض الشكل ٧-٥ للحالات الإلكترونية المرصودة في بلورة نانوية مصنوعة من سلسلة خطية من 15 ذرة نحاس بمسافة بينية 225pm جمعت من خلال مجهر نفقي ماسح. ورُصدت توزيعات كثافة إلكترونية بقيم فرق جهد انحياز مختلفة.

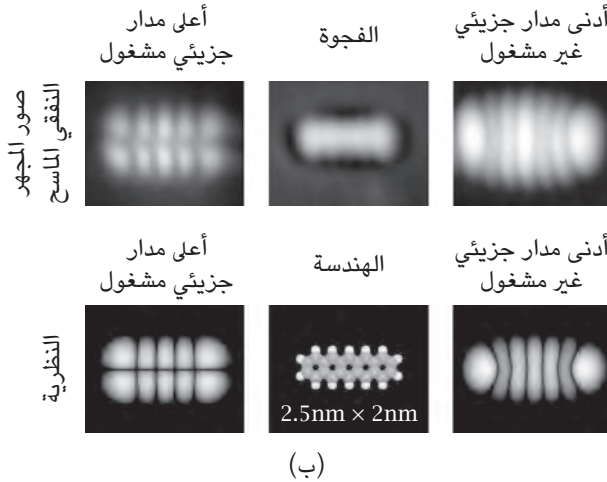
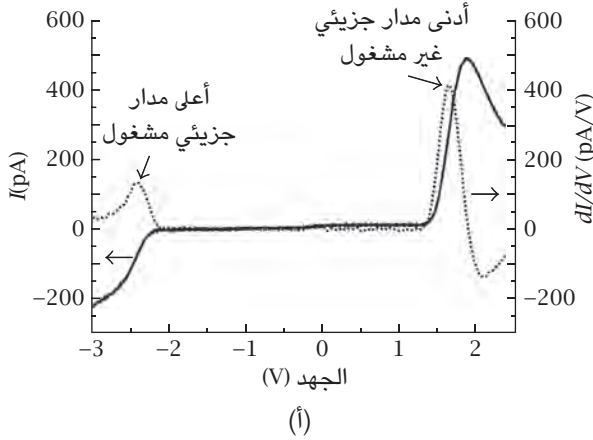
كما هو واضح، يمكن على نحو مباشر رصد الدالة الموجية، المعروضة كتوزيعات كثافة شحنة، كدالة لمستوى الطاقة، الذي يتحكم فيه فرق جهد الانحياز. وكما أوضحنا في الفصل السابع - قسم (١-٣)، يرتبط زخم الدالة الموجية الإلكترونية بعدد التفرعات في توزيع كثافة الشحنة. وتجريبياً، رُصد اعتماد تربيعي على المتجه الموجي k :

$$E = E_0 + \text{const.} \times k^2. \quad (7-43)$$

على نحو مماثل للجانب النظري للمعادلة 7-27، يمكن الحصول على «كتلة فعالة» من خلال معادلة 7-28:

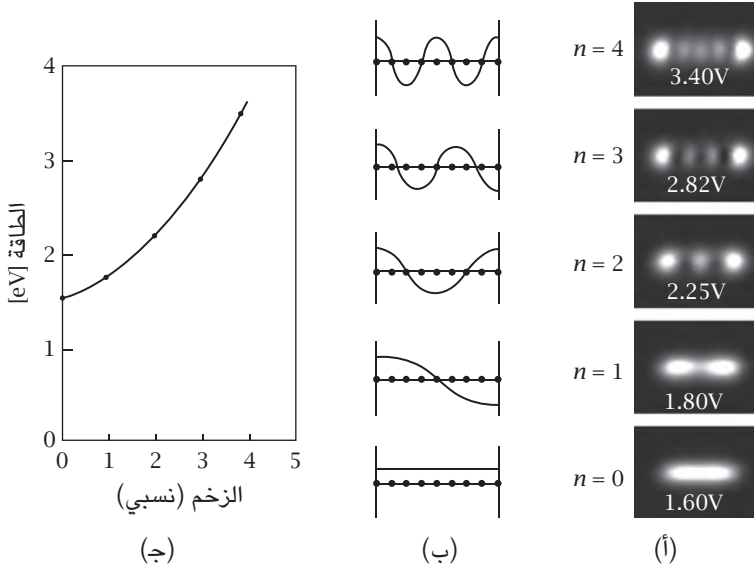
$$\frac{1}{m_e} = \frac{1}{\hbar^2} \frac{\partial^2 E}{\partial k^2}. \quad (7-44)$$

فيزياء الطاقة الشمسية



شكل ٧-٤: الرصد التجريبي لكل من أعلى مدار جزيئي مشغول وأدنى مدار جزيئي غير مشغول. باستخدام مجهر نفقي ماسح، يمكن تحديد مستويات الطاقة وتوزيعات الكثافة الاحتمالية لهاتين الحالتين من خلال قياسات تجريبية مباشرة. (أ) منحني التوصيلية النفقية والتيار النفقي، اللذان يُظهران ذروة عند -2.4eV تحت مستوى الفراغ والمقابلة لأعلى مدار جزيئي مشغول، وأخرى عند $+1.5\text{eV}$ فوق مستوى الفراغ، والمقابلة لأدنى مدار جزيئي غير مشغول. (ب) عملية رصد تجريبية لخطوط كثافة الشحنة لجزيء بنتاسين عند -2.4eV و $+1.5\text{eV}$ ، المقابلين لأعلى مدار جزيئي مشغول وأدنى مدار جزيئي غير مشغول، على التوالي. وتظهر أيضًا النتائج النظرية من الحسابات العددية. الشكل منقول بتصريف من مرجع [18].

الانتقالات الكمية



شكل ٧-٥: الحالات الكمية لبلورة نانوية: (أ) بلورة نانوية مصنوعة من 9 ذرات نحاس، وقد رُصدت توزيعات الكثافة الإلكترونية باستخدام مجهر نفقي ماسح بقيم فرق جهد انحياز مختلفة. يقابل كل فرق جهد انحياز مستوى طاقة حالة إلكترونية للبلورة النانوية. (ب) الدوال الموجية للحالات الإلكترونية، التي تؤدي لتوزيعات الكثافة الإلكترونية المرصودة. وكل منها له متجه موجي مختلف. (ج) العلاقة بين مستويات الطاقة ومتجهات الموجات للحالات الإلكترونية، التي تظهر وجود علاقة تربيعية. الشكل منقول بتصرف من المرجع [18].

(٣) القاعدة الذهبية

في الأقسام السابقة، عرضنا الحالات المستقرة للذرات والجزيئات والنظم الصلبة. ومن أجل استخدام الطاقة الشمسية، يُعد فهم تفاعل الإشعاع مع النظم الكمية، التي تسبب انتقالات عبر حالات كمية عديدة، غايةً في الأهمية. فيستطيع أي نظام كمي امتصاص فوتون شمسي ويمكن أن يُثار من حالة ذات قيمة طاقة أقل إلى أخرى ذات قيمة طاقة

أعلى، أو ينحل من حالة ذات قيمة طاقة أعلى إلى أخرى ذات قيمة طاقة أقل عن طريق إطلاق فوتون أو التخلي عن الطاقة للذرات المحيطة.

قدم أينشتاين في عام 1916 نظرية بسيطة وتمهيدية، كما أوضحنا في الفصل الثاني - قسم (5)، لكنه لم يقدم تعبيراً صريحاً عن تلك المعاملات بالنسبة لنظام مادي. حل تلك المسألة ديراك في عام 1927 في معالجة رائعة ومتكاملة لنظرية الاضطراب الميكانيكي الكمي المتعلق بالزمن [22]. وفي هذا البحث، قدمت نظرية اضطراب متعلقة بالزمن من الدرجة الأولى تعبيراً صريحاً عن معاملي الامتصاص والانبعاث الخاصين بالإشعاع؛ ومن ثم أيضاً معدل الانتقال بين الحالات الكمية. وكانت الصيغة الناتجة مهمة جداً لدرجة أن الفيزيائي المعروف إنريكو فيرمي في عام 1950 أطلق عليها «القاعدة الذهبية» في كتابه «الفيزياء النووية» [29].

يعالج بحث ديراك الذي ظهر في عام 1927 عدداً من المسائل المتعلقة بتفاعل الإشعاع مع النظم الذرية [22]. وهو عميق وصعب في قراءته. وسنعرض هنا لاشتقاق مبسط للقاعدة الذهبية. وكما سنرى، توفر عملية الاشتقاق فهماً جيداً لعملية تفاعل الإشعاع مع النظم الذرية.

كما توفر أيضاً الأساس الميكانيكي الكمي لمبدأ التوازن التفصيلي: التناظر بين الامتصاص والانبعاث.

(٣-١) الاضطراب الدوري المتعلق بالزمن

تأمل نظاماً كمياً بمؤثر هاميلتوني غير متعلق بالوقت $\hat{H}_0$. إنه يمكن أن يكون جزيئاً أو شبه موصل. في غياب الاضطراب الخارجي، تكون معادلة حركة الحالة $|\Psi\rangle$ هي:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\Psi\rangle = \hat{H}_0 |\Psi\rangle, \quad (7-45)$$

بحيث يُفهم أن تكون الحالة $|\Psi\rangle$ بوجه عام متعلقة بالوقت. ولأن المؤثر الهاملتوني $\hat{H}_0$ غير متعلق بالوقت، فللنظام سلسلة من الحالات المستقرة، المسماة من خلال عدد صحيح n :

$$\hat{H}_0 |n\rangle = E_n |n\rangle. \quad (7-46)$$

ويمكن كتابة حل عام للمعادلة 7-45 كما يلي:

$$|\Psi\rangle = \sum_{n=0}^{\infty} c_n e^{-iE_n t/\hbar} |n\rangle, \quad (7-47)$$

بحيث c_n هي المعاملات الثابتة. ويمكن التحقق من هذا الحل من خلال التعويض المباشر في معادلة 7-45.

افترض أن t عندما يكون أصغر من أو يساوي صفراً، يكون النظام في الحالة الأولية بمعامل i :

$$|\Psi\rangle = e^{-iE_i t/\hbar} |i\rangle, \quad t = 0, \quad (7-48)$$

بحيث يشير شرط المعايرة ضمناً إلى أن c_i تساوي 1. يُوصف تفاعل النظام مع الإشعاع من خلال اضطراب دوري:

$$\hat{V}_{\text{rad}}(t) = \hat{V} e^{i\omega t} + \hat{V}^\dagger e^{-i\omega t}, \quad (7-49)$$

يبدأ عندما يكون t أكبر من صفر. ومن السهل إثبات أن الاضطراب $\hat{V}_{\text{rad}}(t)$ هو المؤثر الهاملتوني. ويمثل الطرف الأول موجة منصرفة، والثاني موجة قادمة. دعنا نتأمل الطرف القادم أولاً. يصبح المؤثر الهاملتوني الكلي:

$$\hat{H} = \hat{H}_0 + \hat{V}^\dagger e^{-i\omega t}. \quad (7-50)$$

وتصبح معادلة الحركة:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\Psi\rangle = [\hat{H}_0 + \hat{V}^\dagger e^{-i\omega t}] |\Psi\rangle. \quad (7-51)$$

إننا نبحث عن حل تجريبي لمعادلة 7-51 بالشكل التالي:

$$|\Psi\rangle = e^{-iE_i t/\hbar} |i\rangle + \sum_{n \neq i} c_n(t) e^{-iE_n t/\hbar} |n\rangle, \quad (7-52)$$

بحيث تكون المعاملات $c_n(t)$ صغيرة لكن متعلقة بالزمن، وتُحدد من خلال معادلة الحركة 7-51. وعندما يكون t مساوياً لصفر، لا يكون الاضطراب حينها فعالاً؛ ومن ثم يكون $c_n(0)$ مساوياً لصفر. وبتعويض المعادلة 7-52 في المعادلة 7-51، يكون لدينا ثلاثة أنواع من الأطراف. ولأن الاضطراب $\hat{V}^+$ صغير، فإن أول طرفين غير متلاشين بـ $\hat{V}^+$ هما:

$$\sum_{n \neq i} \frac{dc_n(t)}{dt} e^{-iE_n t/\hbar} |n\rangle = \hat{V}^+ |i\rangle e^{-iE_i t/\hbar - i\omega t}. \quad (7-53)$$

والآن، سنعرض لاحتمال الانتقال لحالة نهائية $|f\rangle$. وبضرب الجانبين في برا تلك الحالة النهائية باستخدام شرط التعامد $\langle f|n\rangle = \delta_{fn}$ ، نحصل على ما يلي:

$$i\hbar \frac{dc_f(t)}{dt} = \langle f|\hat{V}^+|i\rangle e^{-i(E_f - E_i)t/\hbar - i\omega t}. \quad (7-54)$$

يمكن الحصول على المعامل $c_f(t)$ من خلال التكامل المباشر باستخدام الشرط الأولي الذي يساوي فيه $c_f(0)$ صفراً:

$$c_f(t) = \langle f|\hat{V}^+|i\rangle \frac{e^{(E_f - E_i - \hbar\omega)t/\hbar} - 1}{E_f - E_i - \hbar\omega}. \quad (7-55)$$

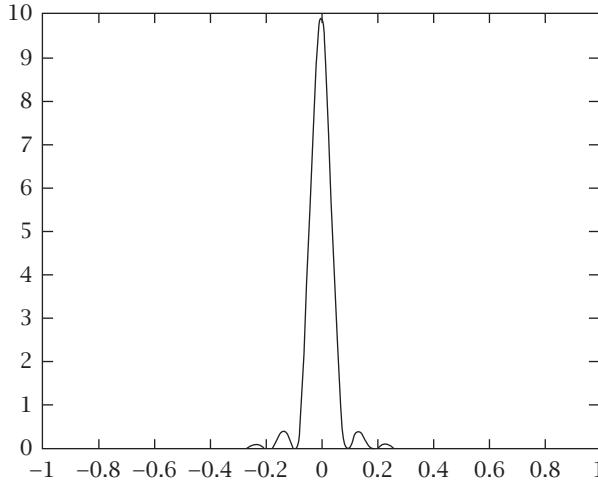
إن احتمال إيجاد حالة نهائية $|f\rangle$ في الزمن t هو:

$$p_{fi} \equiv |c_f(t)|^2 = \frac{2\pi}{\hbar} t |\langle f|\hat{V}^+|i\rangle|^2 \left[\frac{\sin^2 \left[(E_f - E_i - \hbar\omega) (t/2\hbar) \right]}{\pi [E_f - E_i - \hbar\omega]^2 (t/2\hbar)} \right]. \quad (7-56)$$

دعنا نفترض أن $E_f - E_i - \hbar\omega$ تساوي u وأن $t/2\hbar$ تساوي a . وستجد أن الدالة الموجودة بين القوسين المعقوفين لها ذروة حادة بالقرب من u تساوي صفراً، كما هو واضح من الشكل 7-6. إن المساحة التي توجد تحتها هي 1:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin^2 au}{\pi au^2} du = 1. \quad (7-57)$$

الانتقالات الكمية



شكل ٧-٦: شرط حفظ الطاقة. تقترب الدالة المتكاملة في المعادلة 7-58 من أن تكون دالة دلتا عندما يقترب a من اللانهاية. وإذا كان زمن التجربة قصيراً للغاية، فيكون «شرط حفظ الطاقة» صحيحاً.

عندما يقترب a من اللانهاية، فإن الدالة تقترب من أن تصبح دالة دلتا:

$$\lim_{a \rightarrow \infty} \frac{\sin^2 au}{\pi au^2} = \delta(u). \quad (7-58)$$

من ثَم، عندما يقترب t من اللانهاية، تقترب الدالة الموجودة بين قوسين معقوفين في معادلة 7-56 من أن تصبح دالة دلتا $\delta(E_f - E_i - \hbar\omega)$. كذلك، من المعادلة 7-56، يتناسب احتمال $|f\rangle$ مع t ؛ ومن ثَم يكون معدل الانتقال:

$$R_{fi} \equiv \frac{p_{fi}}{t} = \frac{2\pi}{\hbar} |\langle f | \hat{V}^\dagger | i \rangle|^2 \delta(E_f - E_i - \hbar\omega). \quad (7-59)$$

إن المعادلة 7-59 هي القاعدة الذهبية للنظم الذرية بمستويات طاقة منفصلة. ويأتي شرط تردد بور على نحو طبيعي:

$$\hbar\omega = E_f - E_i, \quad (7-60)$$

يمكن فقط للمجال الإشعاعي أن يحول كم طاقة ب $\hbar\omega$ للنظام الذري، الذي يُعد أساس نظرية أينشتاين الخاصة بالفوتونات ويوفر تفسيراً للخطوط الطيفية، وبخاصة مبدأ توفيق ريتز.

(٢-٣) القاعدة الذهبية للطيف المتصل

بالنسبة للنظم ذات طيف الطاقة المتصل، يصبح المعامل f متغيراً متصلًا. ويُحدد عدد الحالات ΔN في أي مدى طاقة ΔE_f من خلال «كثافة الحالات» الخاصة بالحالة النهائية؛ $\Delta N = \rho(E_f) \Delta E_f$. ويجب أن يتكامل معدل الانتقال R_{fi} عبر نطاق من الحالات:

$$\begin{aligned} R_{fi} &= \frac{2\pi}{\hbar} \lim_{t \rightarrow \infty} \int_{-\infty}^{\infty} |\langle f | \hat{V}^+ | i \rangle|^2 \\ &\quad \left[\frac{\sin^2 \left[(E_f - E_i - \hbar\omega) (t/2\hbar) \right]}{\pi [E_f - E_i - \hbar\omega]^2 (t/2\hbar)} \right] \rho(E_f) dE_f \\ &= \frac{2\pi}{\hbar} \int_{-\infty}^{\infty} |\langle f | \hat{V}^+ | i \rangle|^2 \delta(E_f - E_i - \hbar\omega) \rho(E_f) dE_f \\ &= \frac{2\pi}{\hbar} |\langle f | \hat{V}^+ | i \rangle|^2 \rho(E_i + \hbar\omega). \end{aligned} \quad (7-61)$$

على نحو مماثل، يأتي شرط تردد بور $E_f = E_i + \hbar\omega$ على نحو طبيعي. والمعادلة 7-61 هي القاعدة الذهبية لطيف الطاقة المتصل لحالة الإثارة الإلكترونية للنظم الذرية.

(٣-٣) مبدأ التوازن التفصيلي

المعالجة السابقة خاصة بامتصاص فوتون من المجال الإشعاعي. وبتغيير علامة الأس في المعادلة 7-50:

$$\hat{H} = \hat{H}_0 + \lambda \hat{V} e^{i\omega t}, \quad (7-62)$$

وتكرار المعالجة، تصبح المعادلة 59-7:

$$R_{fi} = \frac{2\pi}{\hbar} |\langle f | \hat{V} | i \rangle|^2 \delta(E_f - E_i + \hbar\omega), \quad (7-63)$$

بحيث يصبح شرط تردد بور:

$$\hbar\omega = E_i - E_f, \quad (7-64)$$

يعني هذا أن النظام الذري ينحل من حالة ذات طاقة أعلى إلى أخرى ذات طاقة أقل عن طريق إصدار فوتون للمجال الإشعاعي. وبالنسبة لطيف متصل، تكون القاعدة الذهبية المقابلة:

$$R_{fi} = \frac{2\pi}{\hbar} |\langle f | \hat{V} | i \rangle|^2 \rho(E_i - \hbar\omega). \quad (7-65)$$

وبمبادلة الحالة الأولية والحالة النهائية لمكانيهما، من الواضح أن عنصر المصفوفة متطابق في عمليتي الامتصاص والانبعاث:

$$|\langle i | \hat{V} | f \rangle|^2 = |\langle i | \hat{V}^\dagger | f \rangle|^2. \quad (7-66)$$

وتناظر الامتصاص والانبعاث أساس لـ «مبدأ التوازن التفصيلي»، الذي يلعب دورًا مهمًا في فهم حد كفاءة الخلايا الشمسية.

(٤) التفاعلات مع الفوتونات

يمكن التعامل مع تفاعل أي نظام ذري مع الفوتونات كحالة خاصة للقاعدة الذهبية باستخدام شكل صريح من حد التفاعل $\hat{V}$. في الفصل الثاني - قسم (١-٦)، كان المؤثر الهاملتوني الكلاسيكي للإلكترون في المجالين الكهربائي والمغناطيسي هو المعادلة 32-2:

$$H = \frac{1}{2m_e} (\mathbf{p} - q\mathbf{A})^2 + q\phi, \quad (7-67)$$

بحيث A هو الجهد المتجهي للمجال الكهرومغناطيسي و ϕ هو الجهد الكهربائي (العديدي).
وللمؤثر الهاملتوني في ميكانيكا الكم نفس الشكل بالضبط، لكن تصبح المتغيرات
الديناميكية مؤثرات:

$$\hat{H} = \frac{1}{2m_e} (\hat{\mathbf{p}} - q\mathbf{A})^2 + q\phi. \quad (7-68)$$

للتعامل مع مسائل تفاعل المجال الإشعاعي الشمسي مع النظم الذرية، يمكن عمل
تبسيطين؛ أولاً: عادة ما يكون التباين المكاني للمجال الإشعاعي، والممثل بالجهد المتجهي
 A ، أعلى من $1\mu m$ ، وهو أبسط كثيراً من تباين الدوال الموجية، والذي يقل عن $1nm$. وهكذا،
يمكن التعامل معه كثابت عبر الإحداثيات؛ ومن ثم يمكنه تبديل الأماكن مع $\mathbf{p}$. ثانياً:
إن مربع الجهد المتجهي، A^2 ، أصغر بكثير من الحدود الأخرى ومن ثم يمكن تجاهله،
فتصبح المعادلة 7-68:

$$\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m_e} \nabla^2 + q\phi - \frac{q}{m_e} (\mathbf{A} \cdot \hat{\mathbf{p}}). \quad (7-69)$$

هنا يمثل أول حدين المؤثر الهاملتوني للنظام الذري $\hat{H}_0$ ، والحد الأخير هو جهد الاضطراب
 $\hat{V}$.

ويمكن تمثيل أي مجال إشعاعي، أي، تدفق ضوء الشمس، جيداً من خلال موجة
مستوية. اعتبر z بمنزلة اتجاه السير. وحد الاضطراب في المؤثر الهاملتوني الكلي هو:

$$\hat{V} = -\frac{q}{m_e} \mathbf{A}_0 \cdot \hat{\mathbf{p}} e^{i(k_z z - \omega t)}. \quad (7-70)$$

يمكن كتابة معادلة 7-70 على نحو أكثر ملاءمة. فباستخدام المعادلتين 2-33 و 2-8
وتذكر أن الطرف eA اضطراب بسيط، يكون التباين المكاني (باستخدام رتبة $1\mu m$)
أبسط كثيراً من تباين الدالة الموجية الذرية؛ ومن ثم يمكن اعتباره ثابتاً، ويتبع التباين
الزمني لجهد الاضطراب العامل $e^{i\omega t}$:

$$\begin{aligned} \hat{V} &= -i\omega q \mathbf{A}_0 \cdot \hat{\mathbf{r}} e^{-i\omega t} \\ &= \mathbf{E}_0 \cdot q \hat{\mathbf{r}} e^{-i\omega t}, \end{aligned} \quad (7-71)$$

الذي له تفسير بديهي. ولأن التباينين المكاني والزمني للمجال الكهربائي للإشعاع أبطأ كثيراً من نظيريهما الخاصين بالحالات الذرية، فيمكن التعامل مع المجال الإشعاعي على أنه منتظم واستاتيكي؛ فتفاعل المجال الإشعاعي هو شدة المجال الكهربائي للضوء، E ، التي تؤثر على العزم ثنائي القطب للنظام الذري، $q\mathbf{r}$ ؛ ومن ثم عادة ما يُسمى التقريب ثنائي القطب.

مسائل

- (7-1) باستخدام تعريف المؤثرات الهرميتية (ارجع إلى المعادلة 7-8)، أثبت أن كلاً من $\hat{A}^\dagger + \hat{A}$ و $i(\hat{A}^\dagger - \hat{A})$ فيما يتعلق بمصفوفة عشوائية $\hat{A}$ ، مؤثر هرميتي.
- (7-2) يمكن تمثيل موجة متحركة في الاتجاه x بمتجه موجي k_x من خلال المعادلة:

$$\psi(x) = Ce^{ik_x x - \omega t}. \quad (7-72)$$

فباستخدام علاقة دي بروي:

$$p_x = \hbar k_x, \quad (7-73)$$

أثبت أن مؤثر الزخم هو:

$$\hat{p}_x \psi(x) = -i\hbar \frac{\partial}{\partial x} \psi(x). \quad (7-74)$$

- (7-3) باستخدام التمثيل الإحداثي للحالة في بعد واحد، والدالة الموجية $\psi(x) = |\psi\rangle$ ، وتعريف الزخم:

$$\hat{p}_x |\psi\rangle = -i\hbar \frac{\partial}{\partial x} |\psi\rangle, \quad (7-75)$$

أثبت أن علاقة التبادل، المعادلة 7-9، هي:

$$\hat{x}\hat{p}_x - \hat{p}_x\hat{x} = i\hbar. \quad (7-76)$$

(7-4) إن تعريف الزخم الزاوي في ميكانيكا الكم هو:

$$\hat{\mathbf{m}} = \hat{\mathbf{r}} \times \hat{\mathbf{p}}. \quad (7-77)$$

فأثبت أن مؤثر الزخم الزاوي مؤثر هرميتي.

(7-5) في حالة وجود سلسلة من الذرات، تكون المعادلة هي نفسها الخاصة بإلكترون في صندوق أحادي البعد (انظر معادلة 7-17). عند طرفي السلسلة الذرية، يجب أن تصل الدالة الموجية لحد أقصى. والشرطان الحديان هما:

$$\psi'(0) = 0, \quad (7-78)$$

$$\psi'(L) = 0. \quad (7-79)$$

اكتب الدوال الموجية التي تحقق هذين الشرطين الحديين.

(7-6) باستخدام الشرطين الموجودين في مسألة 7-5، حدد مستويات الطاقة الخاصة بذلك النظام.

(7-7) باستخدام الشرطين الموجودين في مسألة 7-5، حدد الدوال الموجية المعاييرة لذلك النظام.

(7-8) باستخدام الشرطين الموجودين في مسألة 7-5، حدد الدوال الموجية ذات التباين الزمني.

الفصل الثامن

وصلات pn

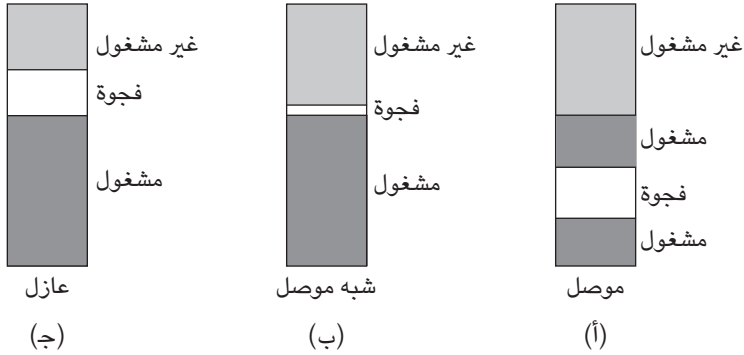
حاليًا، تُصنَّع معظم الخلايا الشمسية من أشباه الموصلات. ويتميز شبه الموصل بفجوة طاقة محدودة نسبيًا، تتراوح في المعتاد ما بين جزء من الإلكترون فولت إلى بضعة إلكترون فولت. ويمكن أن تُثار الإلكترونات بفوتون من «نطاق التكافؤ» إلى «نطاق التوصيل» وتُكون «زوج إلكترون وثغرة»، يخزن جزءًا كبيرًا من طاقة الفوتون. وبعد تكون أزواج الإلكترونات والثغرات، تفصل «وصلة pn » بين الإلكترونات والفجوات لتوليد تيار كهربائي خارجي. في هذا الفصل، سنتعرف على الفيزياء الأساسية لأشباه الموصلات ووصلات pn .

(١) أشباه الموصلات

(١-١) الموصل وشبه الموصل والعازل

عندما يتجمع عدد كبير من الذرات معًا لتكوين مادة صلبة، تتفاعل الدوال الموجية للذرات لتكوين حالات ممتدة مماثلة للبلورة الأحادية البعد المعروضة في الفصل السابع – قسم (٢-٤). ويتكون عدد من «نطاقات الطاقة». بوجه عام، عدد الحالات لامتناهٍ وطبقًا لمبدأ الاستبعاد لباولي، يمكن شغل كل حالة فقط بإلكترون واحد. تخيل الإلكترونات وهي تُضاف الواحد تلو الآخر لنظام، بدءًا من الحالة ذات الطاقة الأقل. عند نقطة معينة، يساوي عدد الإلكترونات عدد البروتونات في النظام ويصبح النظام محايدًا. طبقًا للوضع النسبي لنطاقات الطاقة وأعلى مستوى طاقة مشغول، هناك ثلاث حالات مختلفة، كما هو موضح في الشكل ٨-١.

فيزياء الطاقة الشمسية



شكل ٨-١: الموصل وشبه الموصل والعازل. (أ) بالنسبة للموصلات، يكون أعلى مستوى طاقة مشغول في الجزء الأوسط من نطاق الطاقة. (ب) بالنسبة لأشباه الموصلات، يكافئ أعلى مستوى طاقة مشغول الجزء العلوي من نطاق التكافؤ لكن تكون فجوة الطاقة لنطاق التوصيل صغيرة. (ج) إذا كانت فجوة الطاقة كبيرة، تكون المادة الصلبة عازلاً.

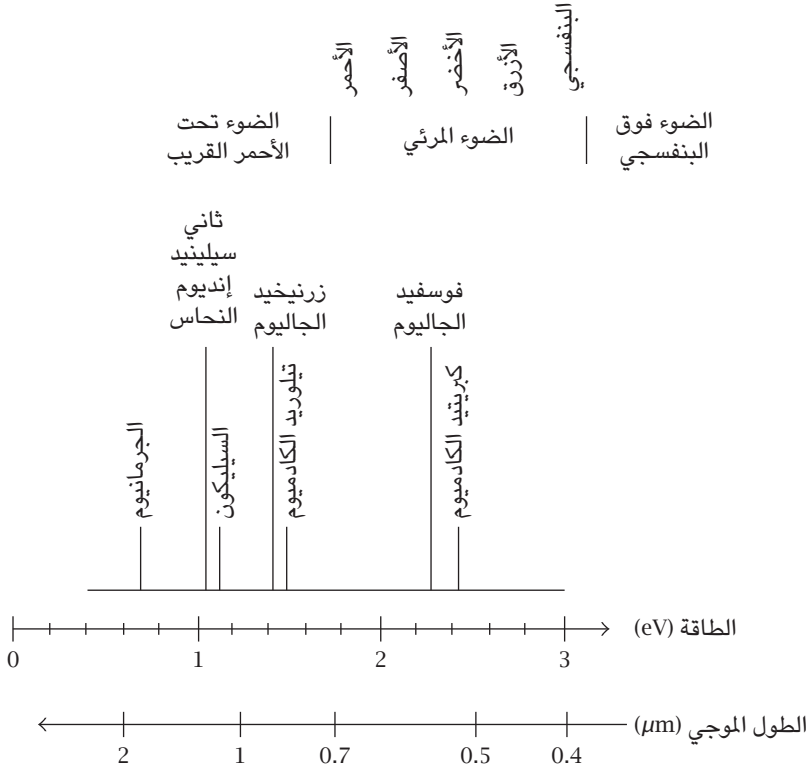
في الشكل ٨-١ (أ)، يكون أعلى مستوى طاقة مشغول في الجزء الأوسط من نطاق الطاقة. ويمكن أن تتحرك الإلكترونات للأجزاء غير المشغولة من نطاق الطاقة. ويسمى هذا النوع من المواد «موصلاً» أو «فلزاً».

إذا تكافأ أعلى مستوى طاقة مشغول مع الجزء العلوي من نطاق الطاقة، الذي يُسمى «نطاق التكافؤ»، والذي يُرمز له بـ E_v ، وكانت المسافة لنطاق الطاقة التالي كبيرة، لا تُثار الإلكترونات بسهولة للنطاق الأعلى. ويُسمى هذا النوع من المواد «عازلاً»؛ انظر الشكل ٨-١ (ج).

هناك حالة مهمة بين الاثنتين وهي «شبه الموصل»، حيث تكون الفجوة بين الجزء العلوي من نطاق التكافؤ E_v والجزء السفلي من نطاق الطاقة التالي E_c صغيرة بحيث عندما لا تكون درجة الحرارة منخفضة جداً، يمكن أن تُثار الإلكترونات لنطاق الطاقة التالي، أو «نطاق التوصيل». بوجه عام، تكون فجوة الطاقة أقل من بضعة إلكترون فولت. وبمجرد أن تُثار الإلكترونات لنطاق التوصيل، يمكن أن يحدث بعض التوصيل. انظر الشكل ٨-١ (ب).

يعرض الشكل ٨-٢ فجوات النطاق لعدد من أشباه الموصلات المهمة ذات الصلة بالخلايا الشمسية.

وصلات pn

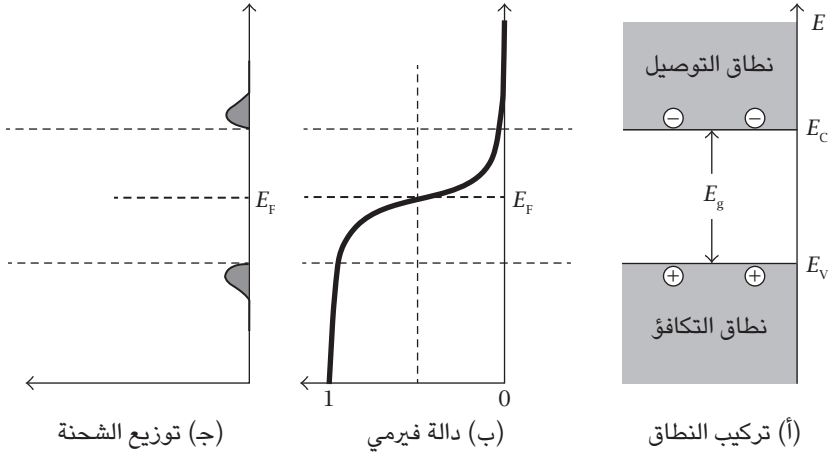


شكل ٨-٢: فجوات النطاقات الخاصة بعدد من أشباه الموصلات. يظهر أيضًا الطول الموجي للضوء المقابل لفجوة الطاقة. وأغلب أشباه الموصلات المستخدمة في الخلايا الشمسية لها فجوة طاقة مقابلة للفوتونات الخاصة بالضوء المرئي أو تحت الأحمر القريب.

(٢-١) الإلكترونات والثغرات

في حالة درجة الحرارة المنخفضة، لا تمتلك أشباه الموصلات النقية تقريبًا أي إلكترونات متحركة، وتكون الموصلية قليلة جدًا. ومع رفع درجة الحرارة، يمكن أن تتأثر الإلكترونات في نطاق التكافؤ لنطاق التوصيل؛ انظر الشكل ٨-٣؛ لذا فإن شبه الموصل له خاصية مهمة، ألا وهي أن الموصلية تعتمد بنحو أساسي على درجة الحرارة؛ فكلما ارتفعت درجة الحرارة، زادت الموصلية.

فيزياء الطاقة الشمسية



شكل ٨-٣: أشباه الموصلات النقية. الإلكترونات والثغرات الحرة. يمكن أن تؤدي الإثارة الحرارية إلى رفع الإلكترونات من نطاق التكافؤ إلى نطاق التوصيل لتكوين أزواج الإلكترونات والثغرات. وتتطلب حيادية الشحنة أن يساوي تركيز الإلكترونات تركيز الثغرات.

طبقاً لإحصاء فيرمي وديراك (انظر ملحق د) وعند درجة حرارة T ، يكون تركيز الإلكترونات n_0 في الجزء السفلي من نطاق التوصيل هو:

$$n_0 = N_c f(E_c), \quad (8-1)$$

بحيث N_c هي الكثافة الفعالة لحالات نطاق التوصيل، وهي كمية تحددها خاصية شبه الموصل، و $f(E_c)$ هي دالة فيرمي (انظر معادلة D-22 في ملحق د)، وهي دالة التوزيع الخاصة بالإلكترونات عند درجة الحرارة المطلقة T . وفي درجة حرارة الغرفة، أي، $k_B T$ تساوي تقريباً 0.026eV، تكون قيمة $E_c - E_F$ نحو 1eV، ويمكن تجاهل العامل 1 في دالة فيرمي. وللدقة العالية، لدينا:

$$f(E_c) = \frac{1}{e^{(E_c - E_F)/k_B T} + 1} \approx e^{-(E_c - E_F)/k_B T}. \quad (8-2)$$

لذا، فإن تركيز الإلكترونات في نطاق التوصيل هو:

$$n_0 = N_c e^{-(E_c - E_F)/k_B T}. \quad (8-3)$$

في نطاق التكافؤ، يكون هناك نقص في الإلكترونات من الوضع المشبع. ويؤدي نقص الإلكترونات في نطاق التكافؤ إلى تكوين حاملات الشحنة المتحركة أو «الثغرات». وعلى نحو مماثل، إن تركيز الثغرات، p_0 ، هو:

$$p_0 = N_v [1 - f(E_v)] \approx N_v e^{-(E_F - E_v)/k_B T}, \quad (8-4)$$

بحيث N_v هي الكثافة الفعالة لحالات نطاق التكافؤ و E_v هي مستوى طاقة الجزء العلوي من نطاق التكافؤ. من المثير والمهم أن ناتج $n_0 p_0$ «لا يعتمد على مستوى فيرمي». في واقع الأمر، بالجمع بين المعادلتين 8-3 و 8-4، نحصل على:

$$\begin{aligned} n_0 p_0 &= [N_c e^{-(E_c - E_F)/k_B T}] [N_v e^{-(E_F - E_v)/k_B T}] \\ &= N_c N_v e^{-(E_c - E_v)/k_B T} = N_c N_v e^{-E_g/k_B T}. \end{aligned} \quad (8-5)$$

بالنسبة لأشباه الموصلات النقية التي بدون شوائب، تتطلب حيادية الشحنة تساوي n_0 و p_0 ؛ لذا يمكن تعريف أي «تركيز حامل شحنة نقي» n_i كما يلي:

$$n_i = \sqrt{N_c N_v} e^{-E_g/2k_B T}, \quad (8-6)$$

بالخاصية العامة:

$$n_0 p_0 = n_i^2, \quad (8-7)$$

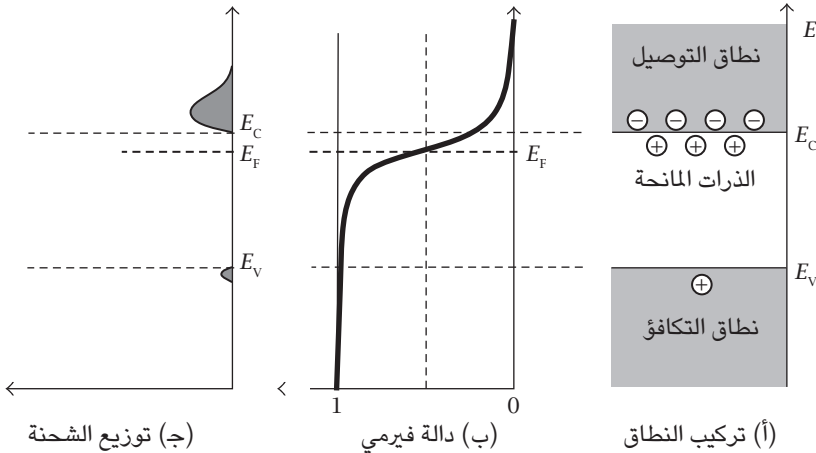
التي تكون صحيحة حتى بالنسبة لأشباه الموصلات التي توجد بها شوائب.

(٣-١) أشباه الموصلات من النوع p ومن النوع n

إن لأشباه الموصلات خاصية أكثر أهمية وهي أن موصليتها تعتمد على نحو أساسي على نوع «الشوائب» وتركيزها. وطبقاً لموضع مستوى الطاقة الخاص بالذرات في فجوة النطاق لأي شبه موصل، هناك نوعان رئيسيان من الشوائب.

يوجد مستوى الطاقة الخاص بالذرات «المانحة» مباشرةً تحت الجزء السفلي من نطاق التوصيل. ويمكن أن يحدث بسهولة تأيُّن الذرة الشائبة لإضافة إلكترون لنطاق التوصيل. وبالنسبة للسيليكون والجرمانيوم، الذرات من المجموعة الخامسة من الجدول الدوري (النيتروجين والفوسفور والزرنيخ والأنتيمون) ذرات مانحة فعالة. وتوزيع فيرمي لا يزال صالحاً، لكن مستوى فيرمي قد تحرك باتجاه نطاق التوصيل، كما هو واضح من الشكل ٨-٤. مع افتراض أن تركيز الذرات المانحة هو N_D ، إذا كانت درجة الحرارة عالية بنحو معقول، فيمكن أن يحدث تأيُّن لكل الذرات المانحة. ويساوي تركيز الإلكترونات الحرة في أي شبه موصل من النوع n ، n_n ، تقريباً تركيز الذرات المانحة:

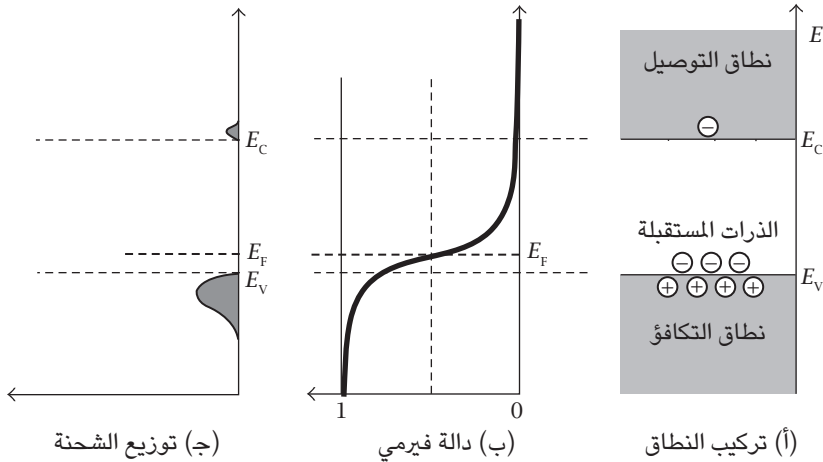
$$n_n = N_D. \quad (8-8)$$



شكل ٨-٤: شبه موصل من النوع n . تُطلق الذرات المانحة إلكترونات في نطاق التوصيل. ويتحرك مستوى فيرمي باتجاه نطاق التوصيل. ويساوي تركيز الإلكترونات الحرة تقريباً تركيز الذرات المانحة.

على الجانب الآخر، يوجد مستوى الطاقة الخاص بالذرات «المستقبلية» مباشرة تحت الجزء العلوي من نطاق التكافؤ. ويمكن بسهولة للذرات المستقبلية أن تحجز إلكترونًا في نطاق التكافؤ تاركَةً ثغرة في هذا النطاق. وبالنسبة للسيليكون والجرمانيوم، الذرات من المجموعة الثالثة عشرة من الجدول الدوري (البورون والألومنيوم والجاليوم والإنديوم) ذرات مستقبلية فعالة. لا يزال توزيع فيرمي صالحًا، لكن مستوى فيرمي قد تحرك باتجاه نطاق التكافؤ، كما هو واضح من الشكل ٨-٥. مع افتراض أن تركيز الذرات المستقبلية هو N_A ، إذا كانت درجة الحرارة عالية بنحو معقول، فيمكن أن تصبح كل الذرات المستقبلية أيونات سالبة. ويساوي تركيز الثغرات في أي شبه موصل من النوع p ، p_p ، تقريبًا تركيز الذرات المستقبلية:

$$p_p = N_A. \quad (8-9)$$



شكل ٨-٥: شبه موصل من النوع p . تحجز الذرات المستقبلية إلكترونات من نطاق التكافؤ لتكوين ثغرات. ويتحرك مستوى فيرمي باتجاه نطاق التكافؤ. ويساوي تركيز الثغرات تقريبًا تركيز الذرات المستقبلية.

في كلتا الحالتين، يساوي حاصل ضرب تركيزي الإلكترونات الحرة والثغرات مربع تركيز حامل الشحنة النقي:

$$n_n p_n = p_p n_p = n_i^2, \quad (8-10)$$

بحيث إن p_n هو تركيز الثغرات في شبه موصل من النوع n و n_p هو تركيز الإلكترونات الحرة في شبه موصل من النوع p . وكل منهما «تركيز حامل أقلية».

(٢) إنشاء وصلة pn

عند الجمع بين شبه موصل من النوع p وشبه موصل من النوع n ، ينشأ «جهد داخلي». ولأن مستوى فيرمي الخاص بشبه موصل من النوع p قريب من الجزء العلوي من نطاق التكافؤ، ولأن ذلك الخاص بشبه موصل من النوع n قريب من الجزء السفلي من نطاق التوصيل، فهناك اختلاف بين مستوى فيرمي على الجانبين. وعند الجمع بين القطعتين لإنشاء نظام واحد، تجب محاذاة مستويي فيرمي. ونتيجة لهذا، يجب أن يخضع مستويا الطاقة الخاصان بالجانبين لتحرك بجهد V_0 . وبجعل E_{cp} مستوى الطاقة الخاص بالجزء السفلي لنطاق التوصيل لشبه الموصل من النوع p و E_{cn} مستوى الطاقة الخاص بالجزء العلوي من نطاق التكافؤ، فإن الجهد الداخلي يكون:

$$qV_0 = E_{cp} - E_{cn}; \quad (8-11)$$

انظر الشكل ٨-٦. وإنشاء جهد داخلي قرب حد وصلة pn يمكن فهمه من منظور آخر، ألا وهو تدفق حاملات الشحنة. فنظرًا لأن تركيز الثغرات في المنطقة n قليل جدًا، تنتشر الثغرات من المنطقة p إلى المنطقة n . وبعد انتقال عدد من الثغرات إلى المنطقة n ، يتكون مجال كهربائي لإرجاع الثغرات ثانيةً للمنطقة p . وعند التوازن، يجب أن يصبح التيار الصافي $J_p(x)$ ، صفرًا:

$$J_p(x) = q \left[\mu_p p(x) E_x(x) - D_p \frac{dp(x)}{dx} \right] = 0, \quad (8-12)$$

بحيث μ_p هي حركة الثغرات، و $p(x)$ هي تركيز الثغرات كدالة لـ x ، و $E_x(x)$ هي المركبة x لشدة المجال الكهربائي كدالة لـ x ، و D_p هو معامل الانتشار الخاص بالثغرات. وباستخدام علاقة أينشتاين:

$$\frac{D_p}{\mu_p} = \frac{k_B T}{q}, \quad (8-13)$$

والعلاقة بين الجهد $V(x)$ وشدة المجال الكهربائي، $Ex(x) = -dV(x)/dx$ ، تصبح معادلة 8-12:

$$-\frac{q}{k_B T} \frac{dV(x)}{dx} = \frac{1}{p(x)} \frac{dp(x)}{dx}. \quad (8-14)$$

ويؤدي دمج معادلة 8-14 عبر منطقة الانتقال إلى:

$$-\frac{q}{k_B T} (V_n - V_p) = \ln \frac{p_n}{p_p}. \quad (8-15)$$

ولأن $V_n - V_p = V_0$ ، يمكن إعادة كتابة المعادلة 8-15 كما يلي:

$$p_n = p_p \exp \left(\frac{-qV_0}{k_B T} \right). \quad (8-16)$$

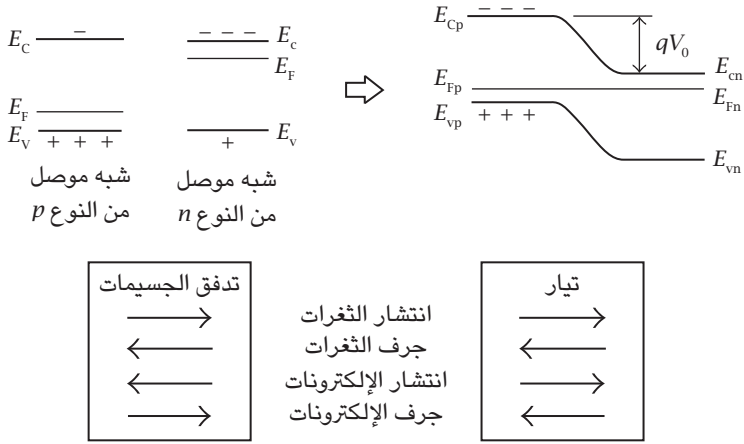
بالمثل، نظراً لأن تركيز الإلكترونات الحرة في المنطقة p قليل جداً، فإن الإلكترونات الحرة تنتشر من المنطقة n إلى المنطقة p . وبعد انتقال عدد من الإلكترونات الحرة إلى المنطقة p ، يتكون مجال كهربائي لإرجاع الإلكترونات الحرة ثانيةً للمنطقة n . وعند التوازن، يجب أن يصبح التيار الصافي للإلكترونات الحرة صفراً. ويمكن إنشاء معادلة مماثلة:

$$n_p = n_n \exp \left(\frac{-qV_0}{k_B T} \right). \quad (8-17)$$

فيما يلي معنى المعادلتين 8-16 و 8-17: p_n هو تركيز الثغرات في المنطقة n من الوصلة pn و p_p هو تركيز الثغرات في المنطقة p من الوصلة pn . ولأن الجهد المنشأ من خلال الشحنة الحيزية، V_0 ، يقل التركيز الأول بعامل $\exp(-qV_0/k_B T)$ من التركيز الثاني. ولا يختلف الوضع بالنسبة للتركيز الخاص بالإلكترونات الحرة.

لتكوين صورة ذهنية عن الأمر، سننشئ تقديراً تقريبياً للمعادلتين. والقيمة القياسية للجهد الداخلي V_0 هي تقريباً 0.75eV. وفي درجة حرارة الغرفة، تكون $k_B T$ تقريباً 0.026eV. ويساوي العامل $\exp(-0.75/0.026)$ تقريباً $10^{-12.5}$ ؛ من ثم تكون القيم المطلقة صغيرة جداً. لأسباب واضحة، يُسمى كل من p_n و n_p «حامل أقلية».

فيزياء الطاقة الشمسية



شكل ٨-٦: إنشاء وصلة pn . بالجمع بين شبه موصل من النوع p وآخر من النوع n لإنشاء وصلة، تجب محاذاة مستويي فيرمي. وسيحدث هذا على نحو طبيعي كما يلي: تتحرك الثغرات الموجودة في الجانب p إلى الجانب n وتتحرك الإلكترونات الحرة الموجودة في الجانب n للجانب p لإنشاء طبقة مشحونة مزدوجة، حيث يحدث توازن. ويحدث التوازن الديناميكي من خلال التوازن بين «تيار الجرف» الناتج عن المجال الكهربائي و«تيار الانتشار» الناتج عن تدرج كثافة حاملات الشحنة.

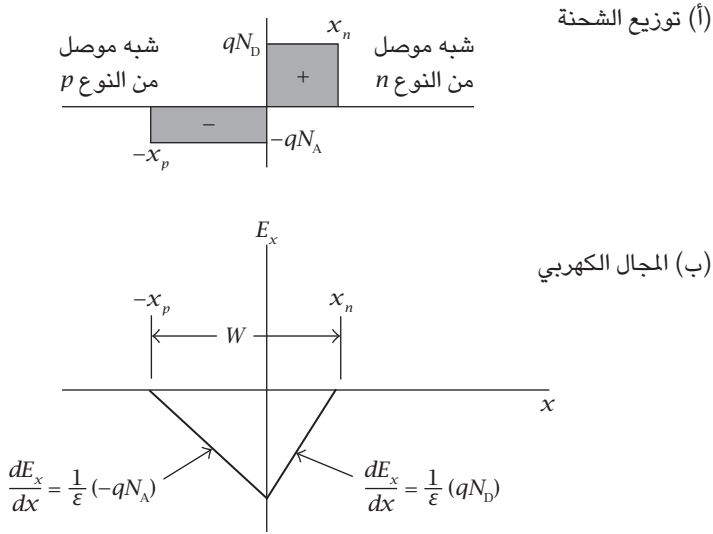
إن المعادلتين 8-16 و 8-17 مهمتان من أجل فهم سلوك فرق جهد التيار لوصلة pn واشتقاق معادلة الصمام الثنائي.

لكي نفهم على نحو أفضل وصلة pn ، نحتاج لإنشاء نموذج رياضي للشحنة الحيزية ومنحنى الجهد. ويعتمد أي نموذج فعال جداً ودقيق إلى حد ما على «تقريب الاستنزاف»؛ انظر الشكل ٨-٧. ووفقاً لمثل هذا التقريب، توجد في المنطقة p قرب حد الوصلة طبقة سمكها x_p حيث تُزال كل الثغرات وتُحدد كثافة الشحنة ρ_p من خلال كثافة الذرات المستقبلية N_A ، التي تكون سالبة الشحنة:

$$\rho_p = -qN_A. \quad (8-18)$$

يُحدد الجهد الكهروستاتيكي ϕ في تلك المنطقة من خلال معادلة بواسون:

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = \frac{1}{\epsilon} qN_A, \quad (8-19)$$



شكل ٨-٧: توزيع المجال والشحنة: يعتمد النموذج القياسي لوصلة pn على «تقريب الاستنزاف». في المنطقة p قرب حد الوصلة، تُستنزَف كل الثغرات، تاركة الأيونات المستقبلة السالبة الشحنة تُنشئ الشحنة الحيزية. وفي المنطقة n قرب حد الوصلة، تُستنزَف كل الإلكترونات الحرة، تاركة الأيونات المانحة موجبة الشحنة تُنشئ الشحنة الحيزية. ويمكن حل المسألة الكهروستاتيكية تحليلياً لتوفير نموذج رياضي سهل التعامل معه ودقيق على نحو كافٍ لمعظم المسائل المتعلقة بأجهزة أشباه الموصلات، وبخاصة الخلايا الشمسية.

بحيث يكون ϵ هو ثابت العازل الكهربائي أو سماحية شبه الموصل وهو حاصل ضرب سماحية فضاء، ϵ_0 ، في ثابت العازل الكهربائي النسبي، ϵ_r ، لشبه الموصل. وسماحية أي فضاء ϵ_0 هي $8.85 \times 10^{-14} \text{F/cm}$. على سبيل المثال، بالنسبة للسيليكون، ϵ_r يساوي 11.8؛ ومن ثم ϵ يساوي تقريباً $1.04 \times 10^{-12} \text{F/cm}$. على نحو بديل، يمكن التعبير عن معادلة 8-19 من خلال شدة المجال الكهربائي:

$$\frac{dE_x}{dx} = -\frac{1}{\epsilon} qN_A. \quad (8-20)$$

بالمثل، هناك لوح بسمك x_n حيث تُزال كل الإلكترونات الحرة وتتحدد كثافة الشحنة p_n من خلال كثافة الذرات المانحة، N_D ، التي تكون موجبة الشحنة:

$$\rho_n = qN_D. \quad (8-21)$$

تعطينا معادلة بواسون ما يلي:

$$\frac{d^2\phi}{dz^2} = -\frac{1}{\epsilon}qN_D. \quad (8-22)$$

والمعادلة المقابلة لشدة المجال الكهربائي هي:

$$\frac{dE_x}{dx} = \frac{1}{\epsilon}qN_D. \quad (8-23)$$

والشروط الحدية لمعادلات 8-19 و 8-20 و 8-22 هي كما يلي؛ أولاً: تتطلب حيادية الشحنة لمنطقة الانتقال بأكملها ما يلي:

$$N_A x_p = N_D x_n. \quad (8-24)$$

ثانياً: خارج منطقة الانتقال، يجب أن يكون المجال الكهربائي صفراً:

$$E_x = 0 \quad \text{for } x \leq -x_p \quad \text{and } x \geq x_n. \quad (8-25)$$

ثالثاً: يجب أن يتطابق الجهد الكهروستاتيكي مع القيم الموجودة في حدود منطقة الانتقال:

$$\begin{aligned} \phi &= 0, \quad \text{at } x = -x_p, \\ \phi &= V_0, \quad \text{at } x = x_n. \end{aligned} \quad (8-26)$$

إن حلي المعادلتين 8-20 و 8-23 بالشرط الحدي المحدد في المعادلة 8-25 هما:

$$\begin{aligned} E_x &= -\frac{qN_A}{\epsilon} (x + x_p), \quad \text{for } -x_p \leq x < 0; \\ E_x &= \frac{qN_A}{\epsilon} (x - x_n), \quad \text{for } 0 < x \leq x_n. \end{aligned} \quad (8-27)$$

وباستخدام الشرطين الحدين المشار إليهما في المعادلة 8-26 وتعريف عرض منطقة الانتقال W :

$$W = x_p + x_n, \quad (8-28)$$

نحصل على العلاقة التالية:

$$V_0 = \frac{q}{2\epsilon} \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} W^2. \quad (8-29)$$

وعرض منطقة الانتقال كدالة من V_0 هو:

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon V_0}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)}. \quad (8-30)$$

تُصنع أغلب الخلايا الشمسية من رقاقة سيليكون من النوع p مشوبة قليلاً باعتبارها «القاعدة»، التي تكون بوجه عام بسمك من $100\mu\text{m}$ إلى $300\mu\text{m}$ ، ومشوبة بالبورون بكثافة N_A تساوي تقريباً $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ ومقاومة نوعية ρ تساوي تقريباً $1\Omega \cdot \text{cm}$. ويُنشأ المشع من النوع n بالإشابة العالية لجانب واحد بالفوسفور، بكثافة N_D تساوي تقريباً $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ ، ومقاومة نوعية ρ تساوي تقريباً $10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$. وفي حالة $N_D \gg N_A$ ، تُبسّط المعادلتان 8-29 و 8-30 إلى:

$$V_0 = \frac{q}{2\epsilon} N_A W^2 \quad (8-31)$$

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon V_0}{q N_A}}. \quad (8-32)$$

ومن المعادلة 8-32، نحصل على تكثيف وصلة pn :

$$C \equiv \frac{\epsilon}{W} = \sqrt{\frac{q\epsilon N_A}{2V_0}} \left(\text{F/cm}^2 \right). \quad (8-33)$$

(٣) تحليل وصلات pn

كما أوضحنا في الفصل الثامن - قسم (٢)، وبخاصة في الشكل ٨-٦، في غياب فرق الجهد المطبق الخارجي، لا يسري أي تيار عبر وصلة pn لأن تيار الانتشار وتيار الجرف يلغي كل منهما الآخر بالنسبة للثغرات والإلكترونات الحرة. وبتطبيق فرق جهد خارجي على أي وصلة pn ، يتوقف التوازن ويُولد تيار صافٍ.

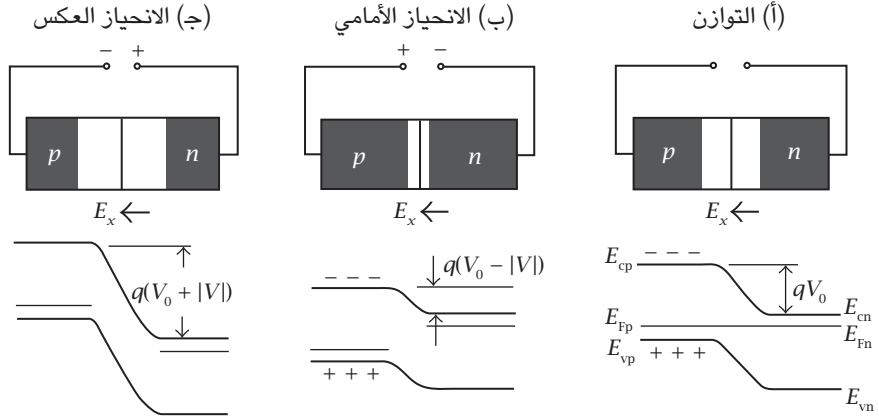
كيفياً، يمكن شرح الآلية الخاصة بذلك كما يلي؛ انظر الشكل ٨-٨. في حالة التوازن، كما هو موضح في الشكل ٨-٨(أ)، بالنسبة لكل من الثغرات والإلكترونات، يوجد تدرُّج تركيز يؤدي إلى الانتشار، ومجالٌ كهربائي يشير لاتجاه x يدفع حاملات الشحنة في اتجاه معاكس. والتيار الصافي يكون صفراً. وبتطبيق فرق جهد انحياز موجب؛ أي، توصيل الطرف الموجب لبطارية بالجانب p والسالب بالجانب n ، كما هو موضح في الشكل ٨-٨(ب)، يدفع الجهد الخارجي الثغرات إلى الجانب n والإلكترونات الحرة للجانب p ، ويقل حاجز الجهد، ويزيد تيار الانتشار لكل من الثغرات والإلكترونات الحرة، ولا يتغير تيار الجرف المعتمد على حاملات الشحنة المتاحة، ولا يكون التيار الصافي صفراً. على الجانب الآخر، بتطبيق انحياز عكسي، كما هو موضح في الشكل ٨-٨(ج)، تُدفع الثغرات راجعةً للمنطقة p والإلكترونات الحرة راجعةً للمنطقة n ، ويقل تيار الانتشار، ولا يتغير تيارا الجرف ويصبحان العامل الأساسي. وفي النهاية يصل التيار لقيمة إشباع يحددها تيارا الجرف.

(٣-١) تأثير فرق جهد الانحياز

لدراسة التيار كمياً، يجب أن نطور أكثر المفاهيم المعروضة في الفصل الثامن - قسم (٢). فعند تطبيق انحياز أمامي، كما هو موضح في الشكل ٨-٨(ب)، فإن فرق الجهد عبر وصلة pn يصبح $V_0 - V$ ، ويتغير تركيز الإلكترونات في المنطقة p ، n_p ، إلى:

$$n_p \rightarrow n_n \exp \left(\frac{-q(V_0 - V)}{k_B T} \right). \quad (8-34)$$

وصلات pn



التيار	تدفق الجسيمات
←	←
→	→
←	→
→	←

التيار	تدفق الجسيمات
←	←
→	→
←	→
→	←

التيار	تدفق الجسيمات
←	(1) ←
→	(2) →
←	(3) →
→	(4) ←

(3) انتشار الإلكترونات

(4) جرف الإلكترونات

(1) انتشار الثغرات

(2) جرف الثغرات

شكل ٨-٨: تأثير الانحياز في وصلة pn . (أ) في حالة التوازن، ودون وجود انحياز خارجي، يلغي كل من تيار الانتشار وتيار الجرف أحدهما الآخر. (ب) يدفع فرق جهد انحياز موجب الثغرات إلى الجانب n والإلكترونات الحرة إلى الجانب p . يقل حاجز الجهد، ويزيد تيار الانتشار الخاص بكل من الثغرات والإلكترونات الحرة. ولا يتغير تيار الجرف، المعتمد على حاملات الشحنة المتاحة. ولا يكون التيار الصافي صفرًا. (ج) بتطبيق انحياز عكسي، تُدفع الثغرات راجعةً للمنطقة p والإلكترونات الحرة راجعةً للمنطقة n ، ويقل تيار الانتشار، ويبقى فقط تيار الجرف دون تغيير.

وبالمقارنة مع المعادلة 8-16، نجد أن هناك «تركيز إلكترونات حرة زائدة عند حد المنطقة p المحايدة»:

$$\delta n_p (x = 0) = n_p \left[\exp \left(\frac{qV}{k_B T} \right) - 1 \right]. \quad (8-35)$$

بالمثل، يولد فرق جهد الانحياز الأمامي الخارجي «تركيز ثغرات زائدة عند حد المنطقة n المحايدة»:

$$\delta p_n (x = 0) = p_n \left[\exp \left(\frac{qV}{k_B T} \right) - 1 \right]. \quad (8-36)$$

يولد تركيزاً حاملات الشحنة الزائدة تيار انتشار إضافياً يُعد الجزء الأساسي لتيار الانحياز الأمامي لأي صمام ثنائي.

للحصول على تعريف صريح للتيار كدالة لفرق جهد الانحياز، نلاحظ أولاً أنه حتى في حالة وجود انحياز أمامي كبير، على سبيل المثال: 0.5V، لا يزال حاملاً الأقلية الزائدان δn_p و δp_n أصغر بكثير من تركيزي حاملَي الأغلبية p_p و n_n . على سبيل المثال، باستخدام V قدره 0.5V من معادلة 8-34، فإن δp_n يساوي تقريباً $p_p \times \exp(-250/26)$ ، أي، تقريباً حاصل ضرب $10^{-5.8}$ في p_p ؛ ومن ثم يمكن التعامل مع تركيز حاملَي الأغلبية باعتباره ثابتاً حتى في حالة وجود فرق جهد انحياز كبير.

(٢-٣) عمر حاملات الشحنة الأقلية الزائدة

يُعد انتشار حاملات الشحنة الأقلية الزائدة أصل تيار الوصلة، لكن هناك عملية منافسة تقيد هذا التيار. فحاملات الشحنة الأقلية الزائدة محاطة بكم كبير من حاملات الشحنة الأغلبية التي تسعى باستمرار لإعادة الاتحاد. ولأن تركيز حاملَي الشحنة الأغلبية، p_p أو n_n ، أكبر بعدة قيم أسية من تركيز حاملات الشحنة الأقلية الزائدة، حتى في حالة إعادة الاتحاد، يكون p_p أو n_n تقريباً ثابتاً؛ ومن ثم يكون معدل انحلال حاملات الشحنة الأقلية الزائدة متناسباً مع تركيزها، الذي يمكن أن نطلق عليه «عُمراً». ويمكن تلخيص

التأثير المجمع للانتشار وعمر حاملات الشحنة الأقلية الزائدة في المعادلتين التاليتين.
بالنسبة للإلكترونات الحرة:

$$\frac{\partial \delta n_p(x, t)}{\partial t} = -\frac{\delta n_p(x, t)}{\tau_n} + D_n \frac{\partial^2 \delta n_p(x, t)}{\partial x^2}, \quad (8-37)$$

بحيث D_n هو معامل الانتشار، و τ_n هو عمر الإلكترونات الحرة. وبالنسبة للثغرات:

$$\frac{\partial \delta p_n(x, t)}{\partial t} = -\frac{\delta p_n(x, t)}{\tau_p} + D_p \frac{\partial^2 \delta p_n(x, t)}{\partial x^2}, \quad (8-38)$$

بحيث D_p هو معامل الانتشار و τ_p هو عمر الثغرات.

(٣-٣) تيار الوصلة

في حالة التوازن، يكون تركيز حاملات الشحنة غير متعلق بالوقت. على سبيل المثال،
تصبح معادلة 8-37:

$$D_n \frac{d^2 \delta n_p(x)}{dx^2} = \frac{\delta n_p(x)}{\tau_n}. \quad (8-39)$$

إنها مكافئة لمعادلتين تفاضليتين من الدرجة الأولى بنفس منطق أن $x^2 = 4$ مكافئة
لـ $x = 2$ و $x = -2$:

$$\frac{d \delta n_p(x)}{dx} = \frac{1}{\sqrt{\tau_n D_n}} \delta n_p(x) \quad (8-40)$$

$$\frac{d \delta n_p(x)}{dx} = -\frac{1}{\sqrt{\tau_n D_n}} \delta n_p(x), \quad (8-41)$$

الذين يمثلان الانحلالين بالاتجاهين $+x$ و $-x$ ، على التوالي. ولفهم تيار الوصلة، لكل من جانبي الوصلة، واحد فقط منهما هو المطلوب. ويكون تيار الانتشار الخاص بالإلكترونات هو:

$$I_n = qD_n \frac{d\delta n_p(x)}{dx} = q\sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} \delta n_p(x). \quad (8-42)$$

وعندما تساوي x صفرًا، وباستخدام المعادلة 8-35، يكون تيار الوصلة الخاص بالإلكترونات هو:

$$I_n(x_p = 0) = -q\sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} n_p \left[\exp\left(\frac{qV}{k_B T}\right) - 1 \right]. \quad (8-43)$$

على نحو مماثل، بالنسبة للثغرات:

$$I_p(x_n = 0) = q\sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} p_n \left[\exp\left(\frac{qV}{k_B T}\right) - 1 \right]. \quad (8-44)$$

يكون تيار الوصلة الصافي هو:

$$I = q \left(\sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} n_p + \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} p_n \right) \left[\exp\left(\frac{qV}{k_B T}\right) - 1 \right]. \quad (8-45)$$

علاوة على ذلك، وباستخدام العلاقات التقريبية، نحصل على:

$$p_n = \frac{n_i^2}{N_D}, \quad n_p = \frac{n_i^2}{N_A}, \quad (8-46)$$

ويمكن اختزال المعادلة 8-45 إلى:

$$I = qn_i^2 \left(\frac{1}{N_A} \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} + \frac{1}{N_D} \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \right) \left[\exp\left(\frac{qV}{k_B T}\right) - 1 \right]. \quad (8-47)$$

(٣-٤) معادلة شوكلي

بافتراض الثابت التالي:

$$I_0 \equiv qn_i^2 \left(\frac{1}{N_A} \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} + \frac{1}{N_D} \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \right), \quad (8-48)$$

تُبسَّط المعادلة 8-47 للشكل المعروف من «معادلة الصمام الثنائي»، الذي يُعرف أيضًا باسم «معادلة شوكلي»:

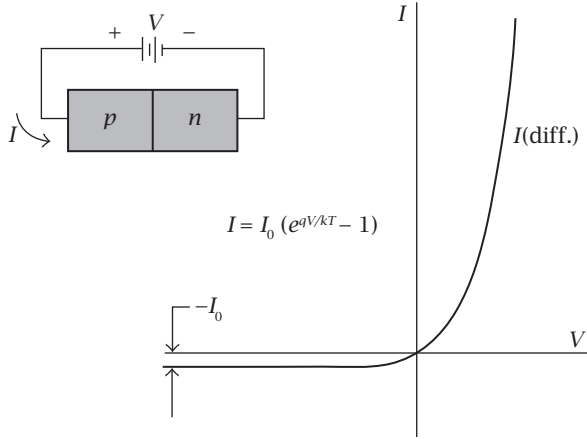
$$I = I_0 \left(e^{qV/k_B T} - 1 \right). \quad (8-49)$$

بتطبيق فرق جهد انحياز عكسي كبير على الصمام الثنائي، يختفي الحد الأسّي. والتيار I يساوي $-I_0$ ؛ ومن ثَمَّ يكون الثابت I_0 هو «كثافة تيار الإشباع العكسي». ويبقى سؤال يحتاج لإجابة وهو: هل في الاشتقاق السابق لمعادلة الصمام الثنائي يُحسَب فقط التيار عند حد منطقة الشحنة الحيزية (منطقة الانتقال) والمنطقة المحايدة؟ الإجابة البسيطة هي أن التيار الكهربائي يجب أن يكون مستمرًا. ومع إعادة اتحاد حاملات الشحنة الأقلية مع حاملات الشحنة الأغلبية، يوجد تيار مستمر من حاملات الشحنة الأغلبية لتعويض حاملات الشحنة المفقودة. ولأن تركيز حاملات الشحنة الأغلبية أكبر بعدة قيم أسية من ذلك الخاص بحاملات الشحنة الأقلية، فإن الاضطراب الذي يتسبب فيه هذا التيار يكون صغيرًا جدًا.

يعرض الشكل 8-9 سلوك فرق جهد التيار الخاص بوصلة pn . وطبقًا للمعادلة 8-49 الخاصة بالصمام الثنائي، في الربع الأول بانحياز أمامي في درجة حرارة الغرفة، يزيد التيار بنحو أسّي، بنحو قيمة أسية واحدة لكل 60mV. في الربع الثالث، مع تجاوز فرق الجهد المطبق 100mV، يصل التيار لقيمة إشباع يتحكم فيها تيار الجرف. والجانبان غير متماثلين على نحو كبير، مما يجعل وصلة pn أكثر المُقومات استخدامًا.

تعتمد جودة أي مُقوِّم على نحو أساسي على مقدار كثافة تيار الإشباع العكسي I_0 . وكما هو موضح في المعادلة 8-48، العامل الحاسم هو عمر حاملَي الشحنة الأقلية τ_n و τ_p . فكلما كان العمر أطول، قلَّت كثافة تيار الإشباع العكسي، وزادت جودة المُقوم. وهذه الحقيقة مهمة بوجه خاص بالنسبة للخلايا الشمسية. وكما سنوضح في الفصل التاسع،

فيزياء الطاقة الشمسية



شكل ٨-٩: سلوك فرق جهد التيار لوصلة pn . في ظل انحياز أمامي وفي درجة حرارة الغرفة، يزداد التيار على نحو أسي، نحو قيمة أسية واحدة لكل 60mV. وفي الربع الثالث، مع تجاوز فرق الجهد العكسي المطبق لـ 100mV، يصل التيار لقيمة إشباع، يتحكم فيها تيار الجرف.

فإن العامل الأبرز الذي يقلل من كفاءة الخلايا الشمسية هو عمر حاملات الشحنة الأقلية؛ ومن ثم، عند تصميم وتصنيع الخلايا الشمسية، يجب تخصيص بعض الجهد لتقليل معدل إعادة اتحاد حاملات الشحنة الأقلية؛ لأن هذا سيُطيل من عمر تلك الحاملات.

مسائل

(8-1) خلية شمسية قياسية من السيليكون لها المواصفات الآتية: مادة النوع p ذات تركيز ذرات مستقبلية N_A يساوي $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ ، ومعامل انتشار ثغرات D_p يساوي $40 \text{cm}^2/\text{s}$ ، وعمر τ_p يساوي $5 \mu\text{s}$. ومادة النوع n ذات تركيز ذرات مانحة N_D يساوي 10^{19}cm^{-3} ، ومعامل انتشار إلكترونات D_n يساوي $40 \text{cm}^2/\text{s}$ ، وعمر τ_n يساوي $1 \mu\text{s}$. إن سماحية أي فضاء ϵ_0 هي $8.85 \times 10^{-14} \text{F/cm}$ ، والسماحية

النسبية للسيليكون ϵ_r هي 11.8. وتركيز حامل الشحنة النقي في السيليكون n_i هو $1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$. وبافتراض أن الجهد الداخلي qV_0 هو 0.75V، احسب ما يلي:
(1) عرض طبقة الانتقال W .

تلميح: يكون تركيز الذرات المانحة عاليًا جدًا؛ ومن ثم تكون طبقة n رقيقة جدًا، ويكون عرض طبقة الانتقال مساويًا فعليًا لذلك الخاص بطبقة p ، ويكون ثابت العازل الكهربائي (السماحية) للسيليكون هو حاصل ضرب سماحية الفضاء في السماحية النسبية للسيليكون.

(2) طول الانتشار لكل من الثغرات والإلكترونات.

(3) كثافة تيار الإشباع I_0 .

(4) تكثيف وصلة pn لخلية شمسية حجمها $10\text{cm} \times 10\text{cm}$.

(8-2) أثبت أن حاملات الشحنة الأقلية الزائدة يحدث لها انحلال x بـ:

$$\delta p_n(x) = \delta p_n(0) e^{-x/L_p} \quad (8-50)$$

و

$$\delta n_p(x) = \delta n_p(0) e^{-x/L_n}, \quad (8-51)$$

بحيث يُعرّف «طول الانتشار» كما يلي:

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} \quad (8-52)$$

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n}. \quad (8-53)$$

(8-3) باستخدام طول الانتشار كمعامل، أثبت أن تيار الوصلة هو:

$$I = q \left(\frac{D_n p_n}{L_n} + \frac{D_p n_p}{L_p} \right) (e^{qV/k_B T} - 1). \quad (8-54)$$

(8-4) إن حركة الثغرات في السيليكون μ_p هي $480 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ في درجة حرارة الغرفة.

فما هو معامل انتشار D_p ؟

تلميح: استخدم علاقة أينشتاين.

الفصل التاسع

الخلايا الشمسية المصنوعة من أشباه موصلات

اكتُشف التأثير الكهروضوئي — أي، التوليد المباشر للطاقة الكهربائية من خلال الضوء في المادة في حالتها الصلبة — على يد العالم البريطاني وليم جريلس آدامز، ومواطنه وتلميذه ريتشارد إيفانز داي في سبعينيات القرن التاسع عشر باستخدام مادة السيلينيوم. وبعد بضعة أعوام، أنشأ تشارلز فريت من نيويورك أول وحدة كهروضوئية لتوليد الطاقة من ضوء الشمس، لكن كفاءة الخلايا الشمسية المصنوعة من السيلينيوم كانت أقل من 0.5 بالمائة، مما كان يعني أنها لا تولد طاقة كافية على نحو اقتصادي.

حدث تطور مهم في خمسينيات القرن العشرين على يد جيرالد بيرسون وداريل تشابن وكلفن فولر في مختبرات بيل. باستخدام السيليكون، قدموا خلية شمسية بكفاءة 5.7 بالمائة؛ أي عشر مرات أكبر من تلك الخاصة بالخلية الشمسية المصنوعة من السيلينيوم؛ ارجع إلى الفصل الأول — قسم (٤). في البداية، استُخدمت الخلايا الشمسية في الفضاء، وتحسّنت كفاءة خلايا السيليكون لتصل إلى نحو 24 بالمائة في بداية العقد الأول من القرن الحادي والعشرين، أي قريباً جداً من الحد النظري المتمثل في 28 بالمائة.

حالياً، تستحوذ الخلايا الشمسية المصنوعة من أشباه موصلات على نحو 90 بالمائة من سوق الخلايا الشمسية. وعلى نحو خاص، تستحوذ الخلايا الشمسية المصنوعة من السيليكون على أكثر من 80 بالمائة من السوق، وتحل الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة، وبخاصة تلك المُصنعة من سيلينيد جاليوم إنديوم النحاس أو تيلوريد الكاديوم وكبريتيد الكاديوم، في المرتبة الثانية في السوق. وتُعد الخلايا الشمسية العضوية، التي سنعرض لها في الفصل العاشر، تقنية ناشئة واعدة.

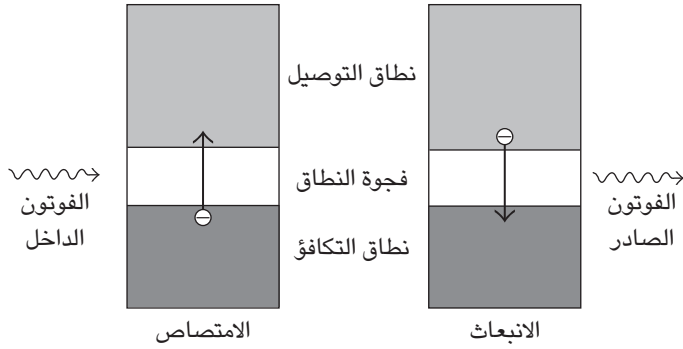
(١) المفاهيم الأساسية

الخلية الشمسية جهاز في الحالة الصلبة يحول ضوء الشمس، على هيئة تدفق من الفوتونات، إلى طاقة كهربائية. يعرض الشكل ١-٢٢ (ب) تركيب أي خلية شمسية قياسية من السيليكون. القاعدة قطعة من السيليكون من النوع p ، المشوبة قليلاً بالبورون، التي سمكها أقل من 1mm. وقد أنشئ قطعة من السيليكون من النوع n العالية الإشابة بسمك أقل من $1\mu m$ بالإشابة بالفوسفور بتركيز أعلى بكثير. وبسبب الجهد الداخلي لوصلة pn ، تنتقل الإلكترونات إلى المنطقة التي من النوع n وتولد طاقة كهربائية مماثلة لتلك التي تولدها أي بطارية كهروكيميائية.

وطبقاً لنظرية الانتقالات الكمية المعروضة في الفصل السابع، يتفاعل الإشعاع، على هيئة تدفق من البروتونات، مع شبه موصل بطريقتين؛ انظر الشكل ٩-١. ويمكن امتصاص فوتون بطاقة أكبر من طاقة الفجوة الخاصة بالمادة شبه الموصلة وإنشاء زوج إلكترون وثغرة. ويمكن لهذا الزوج أن يعيد الاتحاد ويُصدر فوتوناً من الطاقة مساوياً تقريباً لفجوة الطاقة الخاصة بشبه الموصل. وطبقاً لمبدأ التوازن التفصيلي (ارجع إلى الفصل السابع - قسم (٣-٣))، فإن احتمالات العمليتين متساوية. ولتلك الحقيقة نتيجة مهمة فيما يتعلق بكفاءة الخلايا الشمسية؛ انظر الفصل التاسع - قسم (٢-٣).

ولأن طاقة الوضع الخاصة بزوج الإلكترون والثغرة مساوية لقيمة نطاق الطاقة، فإن أفضل مادة يجب أن تكون فجوة النطاق الخاصة بها قريبة من وسط الطيف الشمسي. وهناك عامل آخر يؤثر على كفاءة الخلايا الشمسية وهو نوع فجوة الطاقة. واعتماداً على الموقع النسبي للجزء العلوي من نطاق التكافؤ والجزء السفلي من نطاق التوصيل في فضاء المتجه الموجي، يمكن أن تكون فجوة الطاقة لأي شبه موصل مباشرة أو غير مباشرة؛ انظر الشكل ٩-٢. وبالنسبة لأشباه الموصلات ذات الفجوة المباشرة مثل زرنيخيد الجاليوم وثاني سيلينيد إنديوم النحاس وتيلوريد الكاديوم، يمكن لفوتون على نحو مباشر إثارة إلكترون من نطاق التكافؤ لنطاق التوصيل؛ يكون معامل الامتصاص عالياً، بوجه عام أكبر من $1 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$. وبالنسبة لأشباه الموصلات ذات الفجوة غير المباشرة مثل الجرمانيوم والسيليكون، لا تكون هناك محاذاة بين الجزء العلوي من نطاق التكافؤ والجزء السفلي من نطاق التوصيل في فضاء المتجه الموجي، وتحدث الإثارة نتيجة لتوسط فوتون، أو بعبارة أخرى، اهتزاز شبكي؛ من ثم يكون معامل الامتصاص قليلاً، بوجه عام أقل من $1 \times 10^3 \text{ cm}^{-1}$ ، وتكون هناك حاجة لركيزة أكثر سمكاً. ويعرض

الخلايا الشمسية المصنوعة من أشباه موصلات



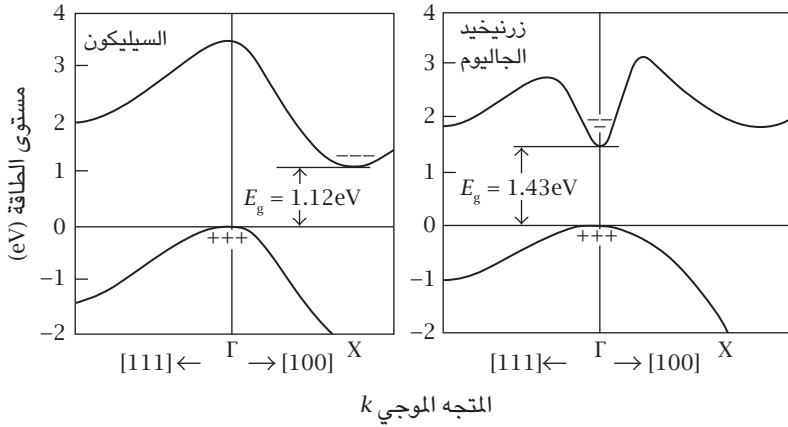
شكل ٩-١: تفاعل الإشعاع مع أشباه الموصلات: طبقاً لنظرية الانتقالات الكمية، يمكن أن يُمتص أي فوتون بطاقة أكبر من طاقة الفجوة الخاصة بالمادة شبه الموصلة وينشئ زوج إلكترون وثغرة. ويمكن لهذا الزوج أن يعيد الاتحاد ويُصدر فوتوناً من الطاقة مساوياً تقريباً لفجوة الطاقة الخاصة بشبه الموصل.

الشكل ٩-٣ أطياف الامتصاص لأكثر المواد شبه الموصلة استخداماً في الخلايا الشمسية. ويعرض الجدول ٩-١ خواص أكثر المواد استخداماً في الخلايا الشمسية.

جدول ٩-١: خواص أكثر المواد استخداماً في الخلايا الشمسية.

المادة	الجرمانيوم	ثاني سيلينيد إنديوم النحاس	السيليكون	زرنخيد الجاليوم	تيلوريد الكادميوم
النوع	غير مباشر	مباشر	غير مباشر	مباشر	مباشر
فجوة النطاق (eV)	0.67	1.04	1.11	1.43	1.49
حافة الامتصاص (μm)	1.85	1.19	1.12	0.87	0.83
معامل الامتصاص (cm ⁻¹)	5 × 10 ⁴	1 × 10 ⁵	1 × 10 ³	1.5 × 10 ⁴	3 × 10 ⁴

فيزياء الطاقة الشمسية

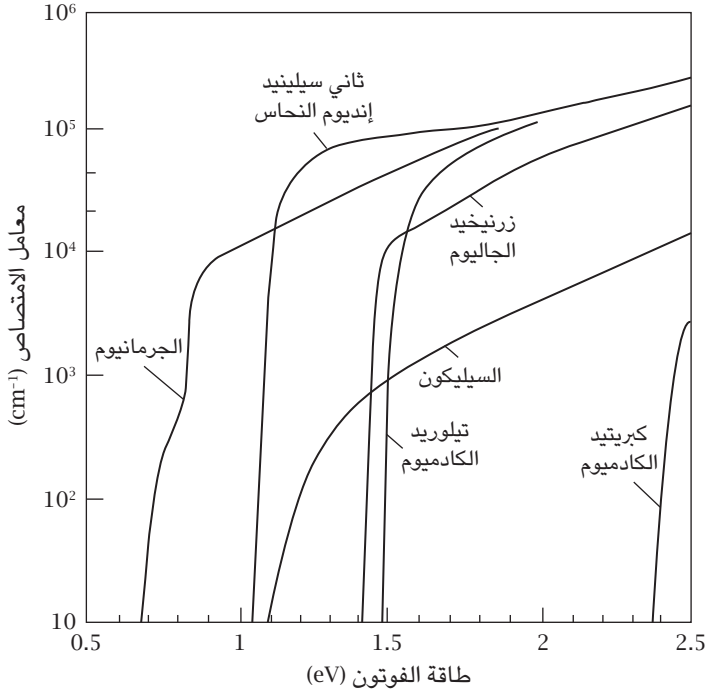


شكل ٩-٢: أشباه الموصلات المباشرة وغير المباشرة: اعتمادًا على الموقع النسبي للجزء العلوي من نطاق التكافؤ والجزء السفلي من نطاق التوصيل في فضاء المتجه الموجي، يمكن أن تكون فجوة الطاقة لأي شبه موصل مباشرة أو غير مباشرة. وأشباه الموصلات المباشرة لها معامل امتصاص أعلى بكثير من ذلك الخاص بأشباه الموصلات غير المباشرة. وكما هو واضح، السيليكون شبه موصل غير مباشر وزرنيخيد الجاليوم شبه موصل مباشر.

(١-١) توليد الطاقة الكهربائية

يعرض الشكل ٩-٤ شرحًا كمياً لكيفية توليد الطاقة الكهربائية من خلية شمسية. وكما هو موضح في الشكل ٩-٤ (أ)، يولد أي فوتون زوج إلكترون وثغرة في المنطقة من النوع p . وبسبب المجال الكهربائي الداخلي، الذي يشير باتجاه المنطقة من النوع p ، تنجرف الإلكترونات إلى المنطقة من النوع n ، في حين تبقى الثغرات في المنطقة من النوع p . وبتوصيل الطرفين معًا كما في الشكل ٩-٤، يمكن أن تنتقل تقريبًا كل الإلكترونات المولدة من قبل الفوتونات إلى المنطقة من النوع n ، وتكمل الدائرة. و«تيار الدائرة القصيرة» هو تيار الإلكترونات التي يولدها ضوء الشمس. كما هو موضح في الشكل ٩-٤ (ب)، إذا لم تتصل المنطقتان خارجيًا، تولد الشحنات المتراكمة في المنطقتين جهدًا عبر تكتيف الوصلة. ويصبح الجهد فرق جهد أمامي للصمام الثنائي. ويقل سمك منطقة الانتقال

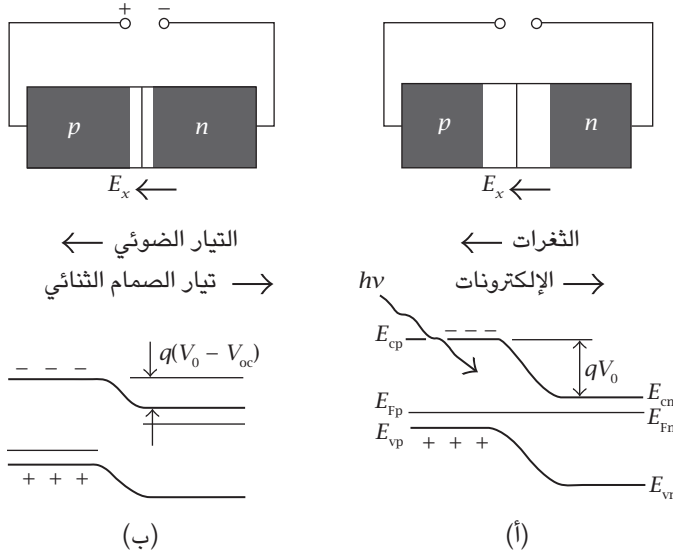
الخلايا الشمسية المصنوعة من أشباه موصلات



شكل ٩-٣: أطيايف الامتصاص لأكثر المواد شبه الموصلة استخدامًا في الخلايا الشمسية: إن أكثر مادة استخدامًا في الخلايا الشمسية، وهي السيليكون، شبه موصل غير مباشر، وهي لها معامل امتصاص قليل نسبيًا، بوجه عام 10^3 cm^{-1} . وهناك حاجة لسبك قدره 0.01 cm للحصول على امتصاص فعال. وأشباه الموصلات المباشرة، مثل زنكسيليكون الجاليوم وثاني سيلينيد إنديوم الفوسفات وتيلوريد الكادميوم، لها معامل امتصاص يتراوح بين 10^4 cm^{-1} و 10^5 cm^{-1} . ويكون السمك الذي قدره بضعة ميكرومترات كافيًا لامتصاص شبه كامل.

وينشأ تيار صمام ثنائي أمامي، وعندما يتساوى تيار الصمام الثنائي الأمامي مع تيار الجرف الخاص بالإلكترونات التي تولدها الفوتونات، يحدث توازن. ويكون فرق الجهد في الطرفين «فرق جهد الدائرة المفتوحة» للخلية الشمسية في ظل الضوء.

فيزياء الطاقة الشمسية



شكل ٩-٤: انفصال الثغرات والإلكترونات في الخلية الشمسية: (أ) تولد الفوتونات الساقطة أزواج إلكترونات وثغرات. ويشير المجال الكهربائي الداخلي في منطقة الانتقال باتجاه المنطقة من النوع p . ويسحب المجال الإلكترونات السالبة الشحنة إلى المنطقة من النوع n . وبتوصيل الطرفين، يُولد تيار كهربائي. ويتحدد «تيار الدائرة القصيرة» من خلال معدل توليد أزواج الإلكترونات والثغرات من الإشعاع. (ب) إذا لم يُوصل الطرفين، فستتراكم الإلكترونات المنتقلة إلى المنطقة من النوع n وتُنشأ فرق جهد عبر تكتيف الوصلة. ويكون اتجاه فرق الجهد مماثلاً لذلك الخاص بفرق جهد الانحياز الأمامي للصمام الثنائي، والذي يولد تياراً لتعويض تيار الإلكترونات. في حالة التوازن، يُنشأ «فرق جهد دائرة مفتوحة».

(٢-١) معادلة الخلية الشمسية

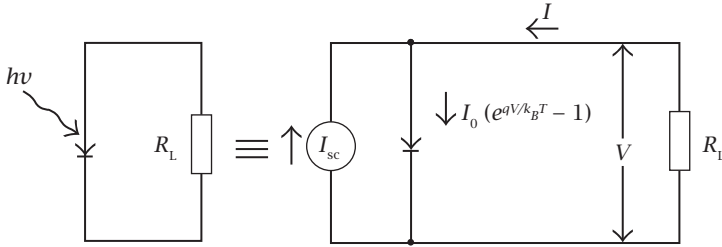
يمكن تمثيل أي خلية شمسية بمصدر تيار موصل على نحو متوازٍ بصمام ثنائي لوصلة pn : انظر الشكل ٩-٥. ومصدر التيار هو التيار الضوئي المولد من قبل ضوء الشمس الداخل، المعروف من خلال المعادلة 9-27. تتغير معادلة الصمام الثنائي إلى:

$$I = I_0 \left(e^{qV/k_B T} - 1 \right) - I_{sc}. \quad (9-1)$$

التي تُعد المعادلة الأساسية للخلايا الشمسية، في صيغة متناسقة مع معادلة الصمام الثنائي، لكن في المعادلة 9-1، في حين أن فرق الجهد يكون دائماً موجباً، فإن التيار يكون دائماً سالباً. وهذا أمر مفهوم لأن الصمام الثنائي جهاز سالب يستهلك طاقة. وباعتبار الخلية الشمسية بطارية، يجب عكس اتجاه التيار؛ لذا فإن ما يلي صيغة أفضل لمعادلة الخلية الشمسية:

$$I = I_{sc} - I_0 \left(e^{qV/k_B T} - 1 \right), \quad (9-2)$$

حيث فرق الجهد والتيار دائماً موجبان؛ انظر الشكل 9-5.



شكل 9-5: دائرة مكافئة للخلية الشمسية: يمكن تمثيل الخلية الشمسية بمصدر تيار موصل على نحو متوازٍ بصمام ثنائي لوصلة pn . ومصدر التيار هو التيار الضوئي المولّد من خلال ضوء الشمس الداخل.

إن فرق جهد الدائرة المفتوحة هو فرق الجهد الذي يكون عنده التيار صفراً، معرّفًا بالشرط:

$$I_0 \left(e^{qV_{oc}/k_B T} - 1 \right) = I_{sc}. \quad (9-3)$$

من ثَم، يكون:

$$V_{oc} = \frac{k_B T}{q} \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} - 1 \right). \quad (9-4)$$

ولأن I_{sc} دائماً أكبر بكثير من I_0 ، فيمكن تبسيط المعادلة 9-3 إلى:

$$V_{oc} = \frac{k_B T}{q} \ln \frac{I_{sc}}{I_0}. \quad (9-5)$$

(٣-١) القدرة القصوى وعامل الامتلاء

تحدد قدرة الخرج للخلية الشمسية بحاصل ضرب فرق الجهد والتيار؛ $P = IV$. وكما أوضحنا في الفصل الأول - قسم (٢-٤)، تكون دائماً أقل من حاصل ضرب تيار الدائرة الصغيرة I_{sc} في فرق جهد الدائرة المفتوحة V_{oc} ؛ انظر الشكل ١-٢٥. والقدرة المقدرة للخلية الشمسية هي أقصى قدرة خرج بتدفق للفوتونات قدره 1 sun، أو 1 kW/m^2 ، في ظل ظروف مواتية موائمة للمعاوقة. بوجه عام، إن شرط القدرة القصوى هو:

$$dP = IdV + VdI = 0, \quad (9-6)$$

بعبارة أخرى:

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V}. \quad (9-7)$$

طبقاً لمعادلة الخلية الشمسية 9-2، إن قدرة الخرج كدالة لفرق جهد الدخل V هي:

$$P = IV = \left[I_{sc} - I_0 \left(e^{qV/k_B T} - 1 \right) \right] V. \quad (9-8)$$

من الشكل ١-٢٥، نلاحظ أن فرق جهد القدرة القصوى أقل فقط بقليل من فرق جهد الدائرة المفتوحة. بإدخال فرق جهد معادل v ، نحصل على:

$$V = V_{oc} - v. \quad (9-9)$$

باستخدام المعادلة 9-5، يمكن تبسيط المعادلة 9-8 إلى:

$$P \approx I_{sc} (V_{oc} - v) \left[1 - e^{-qv/k_B T} \right]. \quad (9-10)$$

الخلايا الشمسية المصنوعة من أشباه موصلات

بأخذ مشتق P بالنظر إلى v ، يكون شرط القدرة القصوى هو:

$$e^{qV/k_B T} = 1 + \frac{qV_{oc}}{k_B T}. \quad (9-11)$$

مرة أخرى، باستخدام المعادلة 9-5، تصبح المعادلة 9-10:

$$e^{qv/k_B T} = 1 + \ln \frac{I_{sc}}{I_0}. \quad (9-12)$$

ولأن $I_{sc} \gg I_0$ ، سنجد ما يلي:

$$v = \frac{k_B T}{q} \ln \ln \frac{I_{sc}}{I_0}. \quad (9-13)$$

من ثم، يكون فرق الجهد في حالة القدرة القصوى:

$$V_{mp} = V_{oc} - v = V_{oc} \left(1 - \frac{\ln \ln (I_{sc}/I_0)}{\ln (I_{sc}/I_0)} \right), \quad (9-14)$$

في حين يكون التيار في حالة القدرة القصوى:

$$I_{mp} = I_{sc} \left(1 - e^{-qv/k_B T} \right) = I_{sc} \left(1 - \frac{1}{\ln (I_{sc}/I_0)} \right). \quad (9-15)$$

بعد بعض التبسيط، تكون القدرة القصوى:

$$P_{mp} = I_{mp} V_{mp} = V_{oc} I_{sc} \left(1 - \frac{1 + \ln \ln (I_{sc}/I_0)}{\ln (I_{sc}/I_0)} \right). \quad (9-16)$$

إن عامل الامتلاء ηf المعروف من خلال:

$$\eta f \equiv \frac{I_{mp} V_{mp}}{V_{oc} I_{sc}}, \quad (9-17)$$

هو:

$$\eta f = 1 - \frac{1 + \ln \ln (I_{sc}/I_0)}{\ln (I_{sc}/I_0)}. \quad (9-18)$$

بوجه عام، يتراوح ηf بين 0.8 و 0.85. (جدير بالذكر أن الرمز FF عادة ما يُستخدم في المراجع الفيزيائية للإشارة إلى عامل الامتلاء، وهو عامل للكفاءة في معالجة شوكلي وكويسيه للخلايا الشمسية. وللحفاظ على التوحيد في استخدام الرموز، استخدمنا ηf بدلاً منه.)

(٢) حد شوكلي وكويسيه

في عام 1961، أنجز وليم شوكلي وهانس كويسيه تحليلاً شاملاً للخلية الشمسية القائمة على وصلة pn ووضعاً حدّاً أقصى لكفاءة الخلايا الكهروضوئية أحادية الوصلة كنتيجة لمبدأ التوازن التفصيلي [77]. وتُعرف الكفاءة على أنها نسبة القدرة المقدمة لحمل موائم في مقابل قدرة الإشعاع الساقط للخلية الشمسية. وهناك ثلاثة معاملات في هذا الشأن: درجة حرارة الشمس، $T_\odot$ ، ودرجة حرارة الخلية، T_c ، وفجوة طاقة شبه الموصل، E_g . في واقع الأمر، تعتمد الكفاءة فقط على نسبتين لابعديتين:

$$x_s = \frac{E_g}{k_B T_\odot}, \quad (9-19)$$

$$x_c = \frac{E_g}{k_B T_c}. \quad (9-20)$$

بوجه عام، إن $k_B T_\odot$ يساوي 0.5eV، في حين أن $k_B T_c$ تساوي -0.025eV، و E_g تتراوح بين 1eV و 2eV؛ من ثَم فإن القيمة الأسية القياسية هي أن x_s تتراوح تقريباً بين 2 و -4، و x_c تتراوح بين 40 و -80.

واعتمد تحليل شوكلي وكويسيه على الافتراضات التالية:

(١) وصلة pn واحدة.

(٢) زوج إلكترون وثغرة واحد مثار لكل فوتون داخل.

- (٣) الاسترخاء الحراري لطاقة زوج الإلكترون والثغرة الزائدة عن فجوة النطاق.
(٤) الإضاءة بضوء شمس غير مركز.

الافتراضات السابقة متحققة على نحو جيد في الغالبية العظمى من الخلايا الشمسية التقليدية، ويحدث تحقق من الحد من خلال التجارب، ما لم يستبعد على نحو صريح واحد أو أكثر من تلك الافتراضات؛ على سبيل المثال، عند استخدام ضوء شمس مركز أو خلايا شمسية ترادفية. في هذه الحالات، لا تزال جوانب نظرية شوكلي وكويسيه صحيحة.

(١-٢) الكفاءة القصوى

درس شوكلي وكويسيه أولاً تأثير فجوة النطاق [77]. وبافتراض أن الإشعاع الشمسي متناسب مع إشعاع الجسم الأسود بدرجة حرارة $T_{\odot}$ ، فإن طيف القدرة هو (ارجع للمعادلة 2-96):

$$u(\epsilon, T_{\odot}) d\epsilon = \frac{2\pi q^4}{c^2 h^3} \frac{\epsilon^3}{\exp(\epsilon/k_B T_{\odot}) - 1} d\epsilon. \quad (9-21)$$

تمثل المعادلة 9-21 كثافة قدرة الإشعاع على سطح الشمس. وفي مكان كوكب الأرض، تُخفَّف كثافة قدرة الطيف بعامل f المُعرف من خلال معادلة 2-103:

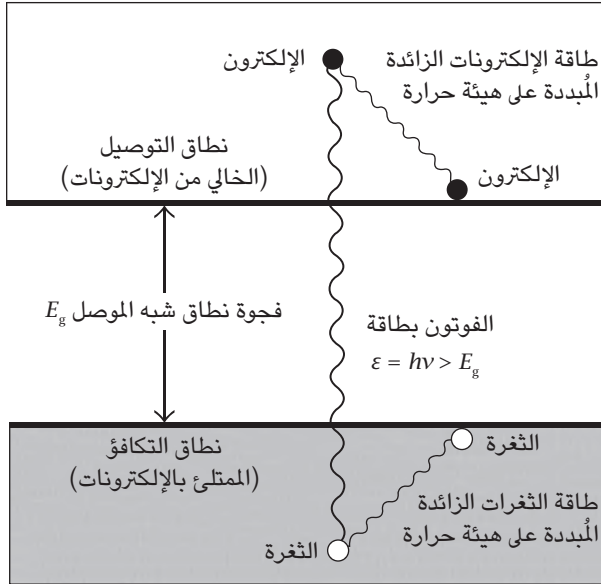
$$f = \left(\frac{r_{\odot}}{A_{\odot}} \right)^2 = \frac{[6.96 \times 10^8]^2}{[1.5 \times 10^{11}]^2} = 2.15 \times 10^{-5}. \quad (9-22)$$

قدَّر شوكلي وكويسيه نسبة قدرة أزواج الإلكترونات والثغرة وقدرة الإشعاع الساقط بافتراض أن امتصاصية شبه الموصل للفوتونات بطاقة أقل من E_g تكون صفراً ولتلك التي بطاقة أكبر من E_g تكون 1. يُستخدم هذا التبسيط أيضاً لتقدير نسبة الاتحاد الإشعاعي لزوج الإلكترون والثغرة المولد هكذا؛ انظر الفصل التاسع - قسم (٢-٣). بالنسبة للفوتونات التي بطاقة أكبر من E_g ، تتبدَّد طاقة زوج الإلكترون والثغرة سريعاً

على هيئة طاقة حرارية من الإلكترونات؛ انظر الشكل ٩-٦. وباستبدال E_g بأحد متغيرات معادلة 9-21، ϵ ، تكون قدرة أزواج الإلكترونات والثغرات المولدة هي:

$$P_{ep} = \frac{2\pi q^4 E_g f}{c^2 h^3} \int_{E_g}^{\infty} \frac{\epsilon^2 d\epsilon}{\exp(\epsilon/k_B T_{\odot}) - 1} \quad (9-23)$$

$$= \frac{2\pi q^4 f (k_B T_{\odot})^4}{c^2 h^3} x_s \int_{x_s}^{\infty} \frac{x^2 dx}{e^x - 1}.$$



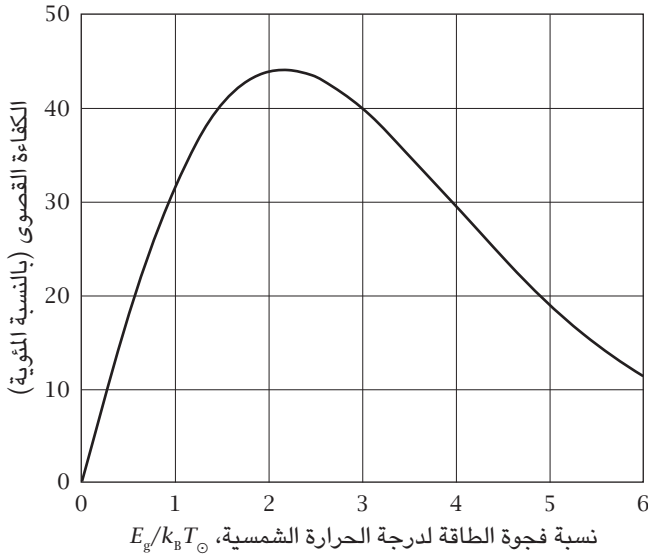
شكل ٩-٦: توليد زوج إلكترون وثغرة: يمكن لفوتون بطاقة أكبر من فجوة نطاق شبه الموصل أن يثير إلكترونًا من نطاق التكافؤ إلى نطاق التوصيل. وطاقة زوج الإلكترون والثغرة الزائدة عن فجوة النطاق تتبدد سريعًا على هيئة طاقة حرارية من الإلكترونات (بمقياس زمني قدره 10^{-11} s). ويساوي جزء طاقة الفوتونات المستخدم في التحويل للطاقة الكهربائية فجوة النطاق.

على الجانب الآخر، تكون قدرة الإشعاع الساقط هي:

$$P_s = \frac{2\pi q^4 f}{c^2 h^3} \int_0^\infty \frac{\epsilon^3}{\exp(\epsilon/k_B T_\odot) - 1} d\epsilon = \frac{2\pi q^4 (k_B T_\odot)^4}{c^2 h^3} \frac{\pi^4}{15}. \quad (9-24)$$

إن الكفاءة كدالة من المتغير اللابعدى x_s هي:

$$\eta_u(x_s) = \frac{P_{ep}}{P_s} = \frac{15}{\pi^4} x_s \int_{x_s}^\infty \frac{x^2 dx}{e^x - 1}. \quad (9-25)$$



شكل ٩-٧: الكفاءة القصوى للخلايا الشمسية: يمكن أن تُمتص فقط الفوتونات التي طاقتها أكبر من فجوة النطاق وتُبدد طاقة أزواج الإلكترونات والثغرات الزائدة عن فجوة النطاق على هيئة طاقة حرارية من الإلكترونات، مما يكون حدًا أقصى لكفاءة الخلايا الشمسية. والكفاءة القصوى هي 0.44، عندما تكون E_g مساوية لحاصل ضرب $k_B T_\odot$ في 2.2. وعندما $T_\odot = 5800K$ ، وتساوي $k_B T_\odot$ تقريبًا 0.5eV، تكون فجوة النطاق المثلى 1.1eV.

يمكن تقدير التكامل في المعادلة 9-25 باستخدام برنامج تكامل عددي بسيط أو المفكوك المتقارب السريع المعروض في المسألة 1-9. ويظهر الناتج في الشكل ٩-٧. وفيما يلي شرح

كفي للناتج: إذا كانت فجوة النطاق صغيرة، يكون مدى امتصاص الفوتونات كبيراً، لكن معظم طاقة الفوتونات تتبدد على هيئة حرارة؛ ارجع إلى الشكل ٩-٦. وعندما تكون فجوة النطاق كبيرة، يقلُّ مدى الامتصاص الطيفي؛ ومن ثمَّ يجب أن يكون له حد أقصى في مكان ما. ويمكن الحصول على مكان وقيمة الكفاءة القصوى باستخدام برنامج عددي، وتكون النتائج كما يلي:

$$E_{g \max} = 2.2 k_B T_{\odot}; \quad \eta_{u \max} = 0.44. \quad (9-26)$$

بافتراض أن $T_{\odot}$ تساوي 5800K، فإن $k_B T_{\odot}$ تساوي تقريباً 0.5eV. وفجوة النطاق المثلّي هي 1.1eV. ويطلق عليها شوكلي وكويسيه «الكفاءة القصوى».

(٢-٢) دور وقت إعادة الاتحاد

تحدد الكفاءة القصوى أقصى تيار دائرة مفتوحة لأي خلية شمسية. وإذا كانت قدرة الإشعاع الشمسي التي تستقبلها خلية شمسية هي P_S ، فإن قدرة أزواج الإلكترونات والثغرات التي يولدها الإشعاع الشمسي هي $\eta_u P_S$. وهي تكافئ أقصى تيار دائرة صغيرة للخلية الشمسية:

$$I_{sc} = \frac{q}{E_g} \eta_u P_S. \quad (9-27)$$

يُحدد فرق تيار الدائرة المفتوحة عند طرفي الخلية الشمسية من خلال معادلة الصمام الثنائي المشار إليها في المعادلة 4-9. وبالجمع بين المعادلتين 4-9 و 27-9، تكون لدينا القدرة الاسمية، وهي حاصل ضرب تيار الدائرة القصيرة وفرق جهد الدائرة المفتوحة:

$$P_{no} = I_{sc} V_{oc} = \frac{\eta_u (x_s)}{x_c} \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} - 1 \right) P_S. \quad (9-28)$$

من الواضح أن «تيار الإشباع العكسي» لأي وصلة $p-n$ ، I_0 ، هو العامل المحدد، الذي يُحدد من خلال معادلة 48-8:

$$I_0 = q n_i^2 \left(\frac{1}{N_A} \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} + \frac{1}{N_D} \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \right). \quad (9-29)$$

يمكن تقدير تيار الإشباع العكسي، المعادلة 29-9، باستخدام بيانات فعلية من أشباه الموصلات. هناك ملاحظة عامة في هذا الإطار وهي كما يلي. كلما زاد تيار الإشباع العكسي، قلَّ فرق جهد الدائرة المفتوحة. وبالنظر إلى المعادلة 29-9، من الواضح أن العامل المُحد هو «وقت إعادة الاتحاد»، τ_p و τ_n . وبمجرد توليد زوج إلكترون وثغرة بامتصاص فوتون، يكون لدى الزوج ميل لإعادة الاتحاد بتوليد إشعاع أو إطلاق طاقة للشبكة. وقد توصل شوكلي وكويسيه إلى حد أساسي بسبب إعادة الاتحاد الإشعاعي لأزواج الإلكترونات والثغرات اعتمادًا على حجة تقوم على التوازن التفصيلي.

(٢-٣) المعالجة القائمة على التوازن التفصيلي

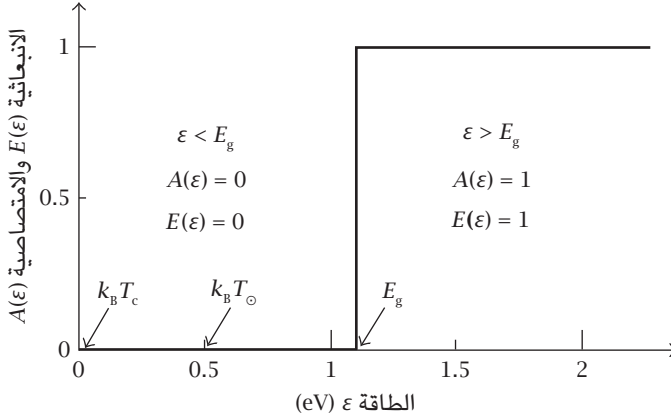
في الحالة الثابتة، تخضع أزواج الإلكترونات والثغرات في أي خلية شمسية لنوعين رئيسيين من العمليات: توليد الأزواج من قبل الإشعاع الشمسي بمعدل F_s وعدة عمليات إعادة اتحاد. ومعدل التوليد F_s يُحسب بافتراض أن الكثافة الطيفية لضوء الشمس هي إشعاع جسم أسود بدرجة حرارة $T_\odot$ لكنها مخففة بسبب المسافة بين الشمس والأرض بعامل f قدره 2.15×10^{-5} ، والمُعرف من خلال المعادلة 22-9. ويُعبر عن عدد أزواج الإلكترونات والثغرات المولدة لكل وحدة مساحة ووحدة زمنية على سطح عمودي على ضوء الشمس من خلال طاقة زوج الإلكترون والثغرة (المعادلة 23-9):

$$F_s = \frac{P_{ep}}{E_g} = \frac{2\pi q^4 f}{c^2 h^3} \int_{E_g}^{\infty} \frac{\epsilon^2}{\exp(\epsilon/k_B T_\odot) - 1} d\epsilon. \quad (9-30)$$

يمكن تقليل أو تجنب العوامل العديدة التي تؤدي لإعادة الاتحاد، مثل تلك المرتبطة بالعيوب أو الأسطح، لكن إعادة الاتحاد الإشعاعي، F_c ، عملية تضع حدًا أساسيًا لكفاءة الخلايا الشمسية. ولتقدير معدل إعادة الاتحاد الإشعاعي لأزواج الإلكترونات والثغرات، درس شوكلي وكويسيه توازن الخلية الشمسية مع البيئة في درجة حرارة الخلية T_c ، بوجه عام 300K، دون وجود ضوء الشمس. ويتطلب مبدأ التوازن التفصيلي أن يكون معدل التوليد مساويًا لمعدل إعادة الاتحاد، وينص هذا المبدأ، الممثل في قانون كيرشوف، على أن الانبعاثية تساوي الامتصاصية عند أي طول موجي معين. وفيما يتعلق بالنموذج المبسط لشوكلي وكويسيه [77]، وبالنسبة للفوتونات ذات الطاقة الأكبر من فجوة الطاقة الخاصة بشبه الموصل، فإن الانبعاثية تساوي 1، وفي غير ذلك، تساوي صفرًا (انظر الشكل 9-8).

ويمكن حساب معدل إعادة اتحاد الإلكترونات والثغرات الإشعاعية باستخدام تكامل مماثل لما في المعادلة 9-30 ولكن في درجة حرارة البيئة T_c :

$$F_{c0} = \frac{2\pi q^4}{c^2 h^3} \int_{E_g}^{\infty} \frac{\epsilon^2}{\exp(\epsilon/k_B T_c) - 1} d\epsilon. \quad (9-31)$$



شكل 9-8: نموذج ضوئي مبسط لأشباه الموصلات: لتقدير تأثير إعادة الاتحاد الإشعاعي، استخدم شوكلي وكويسيه نموذجًا ضوئيًا مبسطًا لأشباه الموصلات. وبالنسبة للفوتونات ذات الطاقة الأكبر من فجوة النطاق الخاصة بشبه الموصل، فإن الانبعاثية تساوي 1، وفي غير ذلك، تساوي صفرًا.

بوجه عام، المعامل x_c في المعادلة 9-20 يساوي $E_g/k_B T_c$ ، أي، من 40 إلى 80؛ ومن ثم يمكن تجاهل الحد الأول في مقام الدالة المتكاملة في المعادلة 9-31. وللدقة العالية، يكون الناتج:

$$F_{c0} = \frac{2\pi q^4 (k_B T_c)^3}{c^2 h^3} \int_{x_c}^{\infty} x^2 e^{-x} dx \quad (9-32)$$

$$= \frac{2\pi q^4 (k_B T_c)^3}{c^2 h^3} e^{-x_c} [x_c^2 + 2x_c + 2].$$

يكون الناتج السابق صحيحاً عندما يكون شبه الموصل في حالة توازن. مع وجود ضوء الشمس، تولّد حاملات شحنة أقلية زائدة. على سبيل المثال، إذا كان الجزء الأكبر من أي خلية شمسية مصنّعاً من شبه موصل من النوع p ، فطبقاً لمعادلة 8-34 وبفارق جهد خارجي V ، يتغير تركيز الإلكترونات من قيمة التوازن الخاصة به n_{p0} إلى:

$$n_p = n_{p0} \exp \left(\frac{qV}{k_B T_c} \right). \quad (9-33)$$

ومن ثم، يزيد معدل إعادة الاتحاد الإشعاعي إلى:

$$F_c (V) = F_{c0} \exp \left(\frac{qV}{k_B T_c} \right). \quad (9-34)$$

في الحالة الثابتة، يجب أن يساوي معدل توليد أزواج الإلكترونات والثغرات معدل إعادة الاتحاد الإشعاعي إلى جانب معدل استهلاك الإلكترونات نتيجة للتيار I الذي تسحبه الدائرة الخارجية:

$$F_s = F_c (V) + \frac{I}{q}. \quad (9-35)$$

بتقصير الطرفين معاً، يكون فرق الجهد V صفراً ويكون «تيار الدائرة القصيرة»:

$$I_{sc} = q(F_s - F_{c0}). \quad (9-36)$$

وباستخدام المعادلة 9-34، يكون تيار الحمل الخارجي، I :

$$I = I_{sc} + qF_{c0} \left[1 - e^{qV/k_B T_c} \right]. \quad (9-37)$$

وبتعريف تيار الإشباع العكسي I_0 كما يلي:

$$I_0 = qF_{c0}, \quad (9-38)$$

تصبح المعادلة 9-37 كما يلي:

$$I = I_{sc} + I_0 \left[1 - e^{qV/k_B T_c} \right]. \quad (9-39)$$

ويمكن الحصول على فرق جهد الدائرة المفتوحة بضبط I على صفر، كما يلي:

$$V_{oc} = \frac{k_B T_c}{q} \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} - 1 \right). \quad (9-40)$$

ولأن $F_s \gg F_{c0}$ ، فيمكن تبسيط المعادلة 9-40 إلى:

$$V_{oc} = \frac{k_B T_c}{q} \ln \left(\frac{F_s}{F_{c0}} - 1 \right). \quad (9-41)$$

(٤-٢) الكفاءة الاسمية

عرف شوكلي وكويسيه «الكفاءة الاسمية» كما يلي:

$$\eta_n = \frac{V_{oc} I_{sc}}{P_s}. \quad (9-42)$$

وباستخدام المعادلات 9-41 و 9-27 و 9-20، وبعد بعض الاختزال، نحصل على التعبير التالي:

$$\eta_n = \eta_u \eta_d, \quad (9-43)$$

بحيث تُعرف الكفاءة القصوى η_u من خلال المعادلة 9-25، وتُعرف كفاءة التوازن التفصيلي η_d كما يلي:

$$\eta_d = \frac{qV_{oc}}{E_g} = \frac{1}{x_c} \ln \left(\frac{F_s}{F_{c0}} - 1 \right), \quad (9-44)$$

وباستخدام المعادلتين 9-30 و 9-31، نحصل على:

$$\frac{F_s}{F_{c0}} = \frac{f\left(\frac{x_c}{x_s}\right)^3 \int_{x_s}^{\infty} \frac{x^2 dx}{e^x - 1}}{e^{-x_c} [x_c^2 + 2x_c + 2]}. \quad (9-45)$$

كما هو واضح من المعادلة 9-44، تُعد كفاءة التوازن التفصيلي η_d الحد الأقصى الأساسي لمعدل فرق جهد الدائرة المفتوحة وفجوة نطاق شبه الموصل بوحدة الفولت. وهي تعتمد على درجة حرارة الخلية. فإذا كانت درجة حرارة الخلية الشمسية منخفضة جدًا؛ أي عندما تقترب x_c من اللانهاية، تصبح كفاءة التوازن التفصيلي:

$$\eta_d \rightarrow \frac{1}{x_c} \ln (Ce^{x_c}) \rightarrow \frac{x_c + \ln C}{x_c} \rightarrow 1, \quad (9-46)$$

لأن التعبير C يختلف على نحو أقل بكثير من الدالة الأسية. ومن ثم، عند درجات حرارة منخفضة جدًا للخلية، إذا لم تكن هناك آلية إعادة اتحاد أخرى غير إعادة الاتحاد الإشعاعي، فيقترب فرق جهد الدائرة المفتوحة من طاقة فجوة النطاق بوحدة الفولت وتقترب الكفاءة الاسمية من الكفاءة القصوى.

إن تيار الإشعاع العكسي في المعادلة 9-38 هو الحد الأقصى لتيار الإشعاع العكسي المرصود (المعادلة 9-29). وبالإضافة إلى إعادة الاتحاد الإشعاعي، هناك أنواع أخرى من عمليات إعادة الاتحاد التي تزيد تيار الإشعاع العكسي ومن ثم تقلل من كفاءة الخلايا الشمسية؛ انظر الفصل التاسع - قسم (٣).

(٥-٢) حد الكفاءة الخاص بشوكلي وكويسيه

مع وجود حمل ذي معاوقة موائمة، يمكن تعظيم قدرة خرج أي خلية شمسية. وكما هو موضح في الفصل التاسع - قسم (٣-١)، ترتبط القدرة القصوى بالقدرة الاسمية بعامل شكل η_f هو تقريبًا:

$$\eta_{SQ} = \eta_u \eta_d \eta_f \approx \eta_u \eta_d \left[1 - \frac{1 + \ln \ln (I_{sc}/I_0)}{\ln (I_{sc}/I_0)} \right]. \quad (9-47)$$

يظهر حد كفاءة التوازن التفصيلي، إلى جانب الكفاءة القصوى والكفاءة الاسمية في ظل $T_{\odot}$ تساوي 5800K و T_c تساوي 300K في الشكل ٩-٩. والإحداثي الأفقي هو فجوة النطاق لشبه الموصل بالإلكترون فولت. تظهر قيم عدة مواد مهمة تُصنع منها الخلايا الشمسية. وتتحدد الكفاءة القصوى من خلال حافة الامتصاص وتبديد الإلكترونات المثارة على هيئة حرارة. والكفاءة الاسمية، التي تكون دائماً أقل من الكفاءة القصوى، تكون نتيجة لإعادة الاتحاد الإشعاعي للإلكترونات والثغرات. ومع دفع حمل خارجي بقدرة قصوى، يزيد إعادة الاتحاد الإشعاعي أكثر، وتقل الكفاءة أكثر.

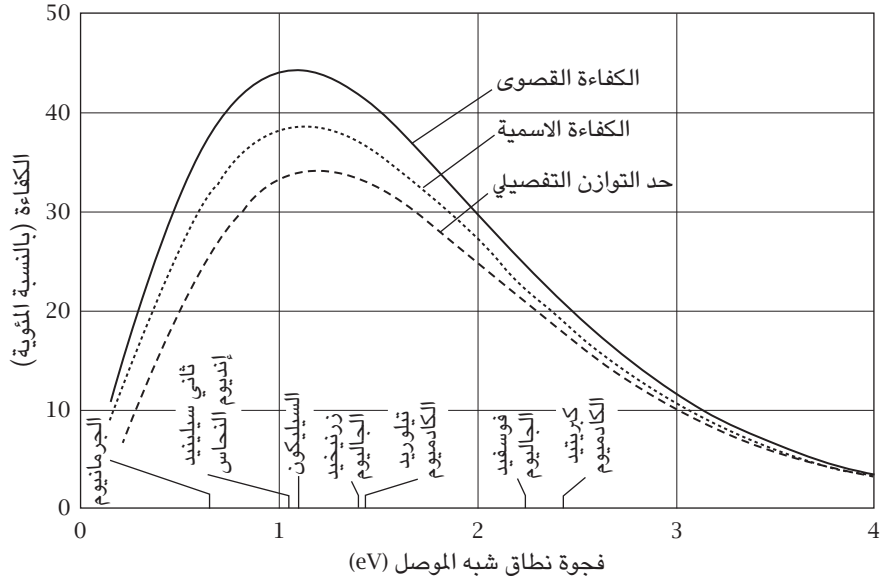
في البحث الأصلي [77]، ناقش شوكلي وكويسيه أيضاً عدة عوامل تؤثر على حد الكفاءة، مثل إمكانية إشعاع جانبي الخلية الشمسية رغم أن أحدهما فقط هو الذي يستقبل ضوء الشمس، والسلوك غير المماثل لسلوك الجسم الأسود الخاص بالخلية، وعمليات إعادة الاتحاد الإشعاعي لأزواج الإلكترونات والثغرات، والفرق بين الثابت الشمسي والإشعاع الشمسي لكتلة هواء 1.5. وتؤدي تلك العوامل إلى تقليل الكفاءة أكثر ببضع نقاط مئوية.

(٦-٢) حد الكفاءة لإشعاع كتلة هواء 1.5

افترض شوكلي وكويسيه أن الإشعاع الشمسي إشعاع جسم أسود [77]. ويتأثر طيف الإشعاع الشمسي الفعلي المُستقبل على الأرض من خلال التشتت وامتصاص بخار الماء وثنائي أكسيد الكربون وهكذا؛ ومن ثم فهو يختلف عن إشعاع الجسم الأسود؛ أرجع للفصل الخامس - قسم (٢). السؤال الآن: كيف يختلف حد كفاءة طيف الإشعاع الشمسي الفعلي عن ذلك الخاص بإشعاع الجسم الأسود؟

يمكن حل هذه المسألة باستخدام نفس الطريقة الخاصة بشوكلي وكويسيه، فبدلاً من استخدام طيف إشعاع الجسم الأسود، يُستخدم الإشعاع الشمسي المُقاس، طيف كتلة الهواء 1.5 القياسي (انظر ملحق الصور الشكل ١) لحساب القيم المتكاملة في المعادلتين 9-25 و 9-45. ولأن أقوى امتصاص وتشتت يحدث في مناطق الضوء فوق البنفسجي والضوء تحت الأحمر القريب والمتوسط، فيكون الضوء المرئي على نحو أساسي ثابتاً. ولأن الإشعاع تحت الأحمر بطاقة فوتونات أقل من فجوة طاقة شبه الموصل لا يشارك في توليد زوج الإلكترون والثغرة، تكون الكفاءة فيما يتعلّق بقدرة الإشعاع الإجمالية أعلى

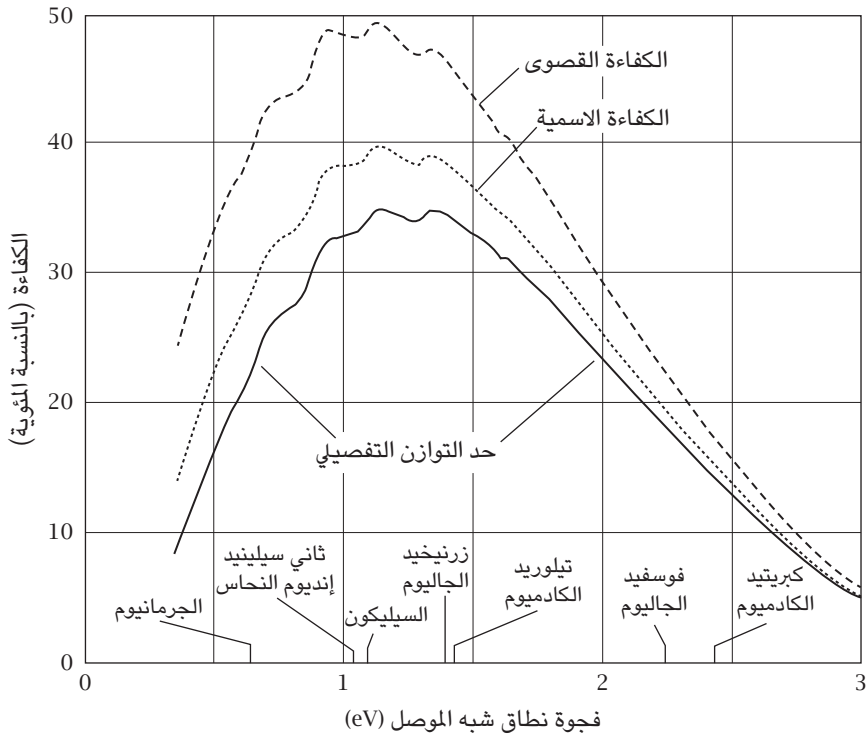
الخلايا الشمسية المصنوعة من أشباه موصلات



شكل ٩-٩: حد كفاءة الخلايا الشمسية: يتحدد حد الكفاءة من خلال التوازن التفصيلي. ويُقرب الإشعاع الشمسي من خلال إشعاع الجسم الأسود عند درجة حرارة 5800K. ومن المفترض أن تكون درجة حرارة الخلية الشمسية ومحيطها 300K. والإحداثي الأفقي هو فجوة النطاق لشبه الموصل بـ eV. تظهر قيم عدة مواد مهمة تُصنع منها الخلايا الشمسية. وتتحدد الكفاءة القصوى من خلال حافة الامتصاص وتبديد الإلكترونات المثارة على هيئة حرارة. والكفاءة الاسمية، التي تكون دائماً أقل من الكفاءة القصوى، تكون نتيجة لإعادة الاتحاد الإشعاعي للإلكترونات والثغرات. ومع دفع حمل خارجي بقدرة قصوى، يزيد إعادة الاتحاد الإشعاعي أكثر، وتقل الكفاءة أكثر. وحد الكفاءة المعتمد على التوازن التفصيلي هو حد أساسي للأحوال التي درسها شوكلي وكويسيه. نقلًا عن مرجع [77].

قليلاً. تُبسط أعلى وأدنى قيم الامتصاص القوي من خلال عملية التكامل؛ ومن ثم تتماثل النتيجة النهائية كميّاً مع تلك الخاصة بتقريب إشعاع جسم أسود. وهكذا، يكون تقريب الجسم الأسود ملائماً ومفيداً.

فيزياء الطاقة الشمسية



شكل ٩-١٠: حد كفاءة الخلايا الشمسية لإشعاع كتلة هواء 1.5: يتحدد حد الكفاءة من خلال التوازن التفصيلي للإشعاع الشمسي لكتلة هواء 1.5. والإحداثي الأفقي هو فجوة النطاق لشبه الموصل بـ eV. وتظهر قيم عدة مواد مهمة تُصنع منها الخلايا الشمسية. وعلى نحو مماثل للشكل ٩-٩، تظهر هنا عوامل الكفاءة القصوى والكفاءة الاسمية وحد الكفاءة المعتمد على التوازن التفصيلي، الذي هو حد أساسي للأحوال المدروسة من قبل شوكلي وكويسيه.

(٣) عمليات إعادة الاتحاد غير الإشعاعي

يعتمد حد شوكلي وكويسيه فقط على الديناميكا الحرارية لإعادة الاتحاد الإشعاعي لأزواج الإلكترونات والثغرات. وهناك عوامل وآليات إعادة اتحاد أخرى متعددة يمكن أن تحدّ من كفاءة الخلية الشمسية. بعض تلك العوامل متأصلة والبعض الآخر يمكن التقليل من تأثيرها أو تجنبها من خلال تحسين تصميم وتصنيع الخلايا.

كما هو موضح في الفصل التاسع - قسم (٢-٢)، فإن أهم العوامل المقللة من كفاءة الخلايا الشمسية هي معدل إعادة اتحاد الإلكترونات والثغرات. وطبقاً للمعادلة الأساسية للخلايا الشمسية (المعادلة 5-9)، يُحدد فرق جهد الدائرة المفتوحة كما يلي:

$$V_{oc} = \frac{k_B T}{q} \ln \frac{I_{sc}}{I_0}. \quad (9-48)$$

يُحدد تيار الظلام I_0 من خلال المعادلة 8-48. ودائمًا ما تُصنع الخلايا الشمسية من ركيزة أكثر سمكًا وذات إشابة قليلة وغشاء أرفع وذات إشابة عالية. على سبيل المثال، تُصنع الخلية الشمسية القياسية المصنوعة من السيليكون من وصلة pn^+ ؛ ومن ثم يُهيمن حد واحد فقط من الحدّين. وهكذا، يمكن تبسيط المعادلة 8-48 إلى:

$$I_0 = \frac{qn_i^2}{N} \sqrt{\frac{D}{\tau}}. \quad (9-49)$$

إن فرق جهد الدائرة المفتوحة هو:

$$V_{oc} = \text{const} + \frac{k_B T}{2q} \ln \tau. \quad (9-50)$$

من الواضح أنه كلما زاد وقت إعادة الاتحاد τ ، زاد فرق جهد الدائرة المفتوحة V_{oc} وزادت الكفاءة.

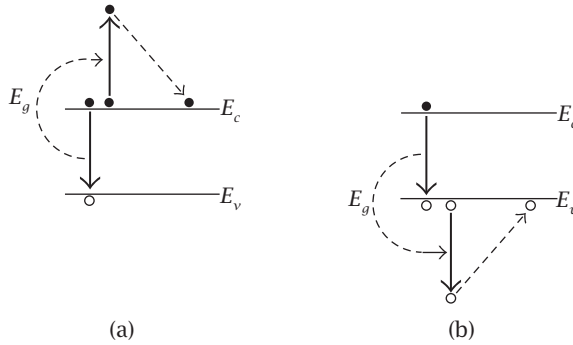
إذا كانت هناك عمليات إعادة اتحاد عديدة، فإن المعدل يكون تراكميًا؛ ومن ثم يكون معكوس وقت إعادة الاتحاد تراكميًا:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} + \dots + \frac{1}{\tau_n}. \quad (9-51)$$

تتسبب كل عملية إعادة إضافية في تقليل وقت إعادة الاتحاد الإجمالي، ومن ثم الكفاءة. نُوقشت أنواع عدة من عمليات إعادة الاتحاد غير الإشعاعية بالتفصيل في الفصل السابع من كتاب جاك آي بانكوف [65]. ونُوقش تأثيرها على كفاءة الخلايا الشمسية في الفصل الثالث من كتاب مارتين إيه جرين [34] وأعمال أخرى [35, 83].

(١-٣) إعادة اتحاد أوجيه

كما هو موضح في الفصل التاسع - قسم (٣-٢)، بعد توليد زوج إلكترون وثغرة، يحول الإلكترون الحر والثغرة الحرة بسرعة الطاقة الزائدة إلى الشبكة على هيئة فوتونات ويبقيان بالقرب من حافة النطاق. ويمكن لزوج الإلكترون والثغرة أن يعيد الاتحاد ويُصدر فوتوناً، كما هو موضح في الفصل التاسع - قسم (٣-٢). وهناك عملية بديلة، وهي عملية أوجيه، التي يحدث فيها تحويل للطاقة E_g إلى إلكترون حر قرب حافة نطاق التوصيل، E_c ، كما هو موضح في الشكل ٩-١١ (a)، أو ثغرة حرة قرب حافة نطاق التكافؤ، E_v ، كما هو موضح في الشكل ٩-١١ (b)، ثم يفقد الإلكترون المثار بسرعة طاقته الزائدة للشبكة على هيئة فوتونات.

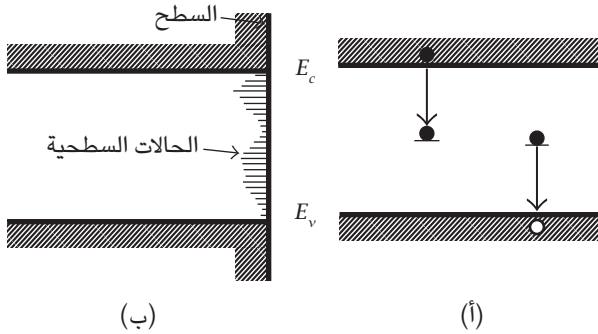


شكل ٩-١١: عملية إعادة اتحاد أوجيه: يمكن لزوج الإلكترون والثغرة أن يعيد الاتحاد ويحول الطاقة E_g إلى إلكترون حر قرب حافة نطاق التوصيل E_c ، (a)، أو ثغرة حرة قرب حافة نطاق التكافؤ، E_v ، (b)، ثم يفقد الإلكترون المثار بسرعة طاقته الزائدة للشبكة على هيئة فوتونات.

من الواضح أن عملية إعادة اتحاد أوجيه متأصلة لا يمكن تجنبها من خلال التصميم الذكي. وقد أثبتت تجارب وحسابات مفصلة فيما يتعلق بالسيليكون البلوري ذي الجودة الجيدة أن عملية إعادة الاتحاد السائدة إلى جانب إعادة الاتحاد الإشعاعي تقلل أكثر الكفاءة النظرية في حد شوكلي وكويسيه بنسبة تتراوح من نحو 32 بالمائة إلى نحو 28 بالمائة [35, 83].

(٢-٣) عمليات إعادة اتحاد الخاصة بحالات القنص

كما هو موضح في الفصل الثامن - قسم (٣-١)، تُنشئ الشوائب في أي شبه موصل حالات في فجوة الطاقة. وحالات الفجوة تكون وسائط بينية فعالة لإنتاج عملية إعادة اتحاد مكونة من خطوتين؛ انظر الشكل ٩-١٢ (أ). ومن الواضح أنه كلما زاد تركيز الشوائب، زادت حالات الفجوة؛ ومن ثم قصر عمر أزواج الإلكترونات والثغرات. وكتوجيه عام، من الأفضل استخدام مواد شبه موصلة عالية النقاء.



شكل ٩-١٢: عمليات إعادة اتحاد مكونة من خطوتين: يمكن لزوج الإلكترون والثغرة أن يعيد الاتحاد ويحول الطاقة E_g إلى إلكترون حر قرب حافة نطاق التوصيل E_c ، أو ثغرة حرة قرب حافة نطاق التكافؤ E_v ، (ب). ثم يفقد الإلكترون المثار أو الثغرة المثار بسرعة طاقته الزائدة للشبكة على هيئة فوتونات.

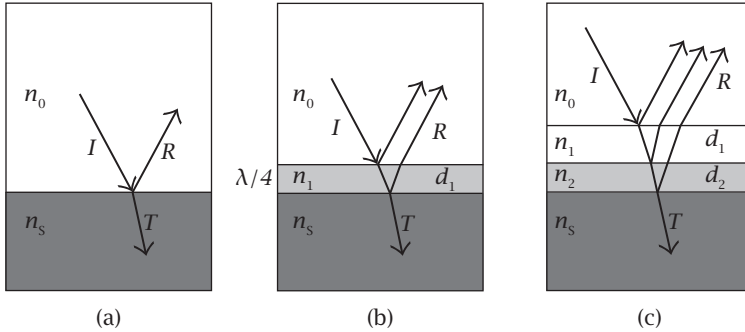
(٣-٣) عمليات إعادة الاتحاد الخاصة بالحالات السطحية

يمكن أن تتمثل أسطح المواد شبه الموصلة تركيزاً عالياً من العيوب أو الحالات السطحية، ويمكن أن تصبح كل حالة سطحية وسيطاً لعملية اتحاد مكونة من خطوتين؛ انظر الشكل ٩-١٢ (ب). هناك طريقة فعالة ومجربة معملياً لتقليل أو تجنب الحالات السطحية التي تتمثل في «التخميل». وبالنسبة للسيليكون، تتمثل الطريقتان المستخدمتان في إنشاء سطح من السيليكون وثاني أكسيد السيليكون من خلال الأكسدة أو إنشاء سطح من السيليكون والألومينا (أكسيد الألومنيوم) بترسيب طبقة رقيقة من الألومينا. إن كلاً من

ثاني أكسيد السيليكون والألومينا عازلان؛ ومن ثمَّ يمتنعان تكوُّن موصل معدني مباشر على السطح. وعلى الجانبين العلوي والخلفي، يُسمَح لمساحة صغيرة فقط بعمل تلامس أومي. وسنناقش هذا الأمر في الفصل التاسع - قسم (٥-٢).

(٤) الطلاءات المضادة للانعكاس

كما ناقشنا في الفصل الثاني - قسم (٢-٣)، ولأنَّ كل أشباه الموصلات لها معاملات انكسار عالية، فطبقاً لمعادلات فريزل، يكون فقد الانعكاس عند سطح شبه الموصل-الهواء كبيراً.



شكل ٩-١٣: الطلاءات المضادة للانعكاس: (a) على سطح ذي وسطين عازلين للكهرباء، يتحدد معامل الانعكاس من خلال معادلة فريزل. (b) بطلاء السطح بغشاء من مادة عازلة للكهرباء بمعامل انكسار مساوٍ للمتوسط الهندسي لمعاملي الهواء والمادة الجسيمة وسمك مساوٍ لربع الطول الموجي في هذا الوسط، يمكن تجنب حدوث انعكاس، لكن هذا ينجح فقط لطول موجي واحد. (c) باستخدام طلاءات متعددة، يمكن توسيع نطاق الطول الموجي للوصول إلى شبه انعكاس صفري.

ابتُكر الحل، أي، الطلاءات المضادة للانعكاس، في أوائل القرن العشرين واستُخدمت لتقليل انعكاس العدسات في النظارات والكاميرات والتلسكوبات والميكروسكوبات. ومفهوم الطلاءات المضادة للانعكاس موضح في الشكل ٩-١٣. وبدون تلك الطلاءات، يتحدد معامل

الانعكاس على سطح مكون من وسطين بمعاملي انكسار n_1 و n_2 من خلال معادلة فريزل الموضحة في المعادلة 2-78:

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2. \quad (9-52)$$

على سبيل المثال، بالنسبة للسيليكون حيث n يساوي 0.34، فإن R سيساوي 0.34 وهي قيمة عالية جدًا. وبطلاء السطح بغشاء سمكه مساوٍ لربع طول موجي في هذا الوسط، فيجب أن يكون بين الموجتين الضوئيتين المنعكستين فرق طور يساوي 180 درجة. وإذا تساوت شدة كل من الموجتين الضوئيتين المنعكستين، فيمكن أن يحدث إلغاء كامل. وحينها يكون شرط الإلغاء هو:

$$\left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 = \left(\frac{n_2 - n_3}{n_2 + n_3} \right)^2. \quad (9-53)$$

وهو يمكن أن يحدث فقط عندما يكون n_1/n_2 مساويًا لـ n_2/n_3 ، أو:

$$n_2 = \sqrt{n_1 n_3}. \quad (9-54)$$

بعبارة أخرى، يمكن تجنب حدوث انعكاس تمامًا عندما يساوي معامل الانكسار للغشاء الرفيع المتوسط الهندسي لمعاملي انكسار الهواء والوسط. ومن الواضح أن هذا ينجح فقط بالنسبة لطول موجي واحد. وكما هو موضح في الشكل ٩-١٣ (c)، وباستخدام طلاءات متعددة، يمكن إنشاء حدين أدنى اثنين أو أكثر للانعكاس، ويمكن توسيع نطاق الطول الموجي للوصول إلى شبه انعكاس صفري.

العرض السابق القائم على التداخل بديهي ولكن ليس دقيقًا؛ فعمليات انعكاس متعددة تحدث في الغشاء. ولا تنطبق فكرة التداخل البسيطة على الطلاءات المضادة للانعكاس المتعددة. والمعالجة القياسية تقوم على طريقة المصفوفة، وذلك كما سنوضح في القسم القادم.

(١-٤) طريقة المصفوفة

يمكن إيجاد معالجة عامة لبصريات الوسائط الطبقيّة في كتاب بورن وُؤولف [13] وكتاب ماكليود [57]. في هذين الكتابين، نُوقِشت حالات عامة جدًّا، والجوانب الرياضية كانت معقدة جدًّا. سنعرض هنا معالجة بسيطة لحالة السقوط العمودي. بالنسبة للطلاءات المضادة للانعكاس الخاصة بالخلايا الشمسية، تقدم تلك المعالجة معظم الجوانب الفيزيائية المهمة في هذا الشأن، كما أنها بسيطة رياضيًّا. وبالنسبة للقراء المتقدمين، فهي يمكن أن تعينهم على فهم معالجات أكثر تعقيدًا.

تخيّل وجود طلاء مضاد للانعكاس بغشائيّ s كل منهما بمعامل انكسار n_j وسمك d_j ؛ انظر الشكل ٩-١٤. تأمّل الموجة الكهرومغناطيسية باستقطاب واحد بتردد دائري ω ؛ انظر الشكل ٢-٣. ولأنه بالنسبة للفراغ، E_x تساوي cB_y (ارجع إلى المعادلة 2-26)، يمكن الجمع بينهما في شكل متجه ذي بعدين:

$$\mathbf{F}(z) = \begin{pmatrix} F_1(z) \\ F_2(z) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_x(z) \\ cB_y(z) \end{pmatrix}. \quad (9-55)$$

لأن E_x و B_y مستمران على الحد بين طبقتي العازلين الكهربيين، كما أن F_1 و F_2 مستمران أيضًا على الحد بين العازلين الكهربيين. وداخل الغشاء ذي الترتيب j ، وباتباع المعادلات من 2-41 إلى 2-44، تكون معادلات ماكسويل لكل من $F_1(z)$ و $F_2(z)$ كما يلي:

$$\frac{dF_1(z)}{dz} = ik_0 F_2(z), \quad (9-56)$$

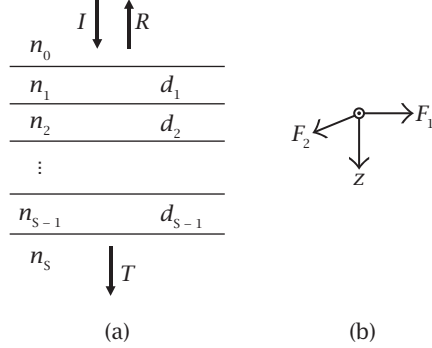
$$\frac{dF_2(z)}{dz} = in_j^2 k_0 F_1(z), \quad (9-57)$$

بحيث k_0 تساوي ω/c باعتباره متجهًا موجيًا للموجة الكهرومغناطيسية في الفراغ. يحقق كل من F_1 و F_2 المعادلتين التفاضليتين التاليتين اللتين من الدرجة الثانية:

$$\frac{d^2 F_1(z)}{dz^2} + n_j^2 k_0^2 F_1(z) = 0, \quad (9-58)$$

الخلايا الشمسية المصنوعة من أشباه موصلات

$$\frac{d^2 F_2(z)}{dz^2} + n_j^2 k_0^2 F_2(z) = 0, \quad (9-59)$$



شكل ٩-١٤: طريقة المصفوفة للطلاء المضادة للانعكاس. لكل طبقة في الطلاء المضاد للانعكاس، تكون معادلات ماكسويل لوسط مستمر صحيحة. ويمكن تمثيل تأثيرها من خلال مصفوفة 2×2 : (a) يمكن تمثيل الضوء الساقط والمنعكس والنافذ بمتجه ذي بعدين لكل منهما. (b) متجه المجال والاتجاه z .

هناك حلان سهل التحقق منهما: الأول، الموجة المتحركة للأمام:

$$\mathbf{F}(z) = \begin{pmatrix} 1 \\ n_j \end{pmatrix} F_0 e^{in_j k_0 z} \quad (9-60)$$

والموجة المتحركة للخلف:

$$\mathbf{F}(z) = \begin{pmatrix} 1 \\ -n_j \end{pmatrix} F_0 e^{-in_j k_0 z}. \quad (9-61)$$

بوجه عام، المجال مزيج خطي من الموجتين. وللحصول على الحل العام في نظام غشاء متعدد الطبقات، نكتب حليّ المعادلتين 9-56 و 9-57 مع ضبط الشرطين الحديين $F_1(0)$ و $F_2(0)$ بحيث يكون z صفرًا. ويمكن التحقق من الحلين بسهولة كما يلي:

$$F_1(z) = F_1(0) \cos k_0 n_j z + \frac{i}{n_j} F_2(0) \sin k_0 n_j z, \quad (9-62)$$

$$F_2(z) = i n_j F_1(0) \sin k_0 n_j z + F_2(0) \cos k_0 n_j z. \quad (9-63)$$

ويمكن إعادة كتابة المعادلتين 9-62 و 9-63 على نحو ملائم باستخدام شكل المصفوفة:

$$\begin{pmatrix} F_1(z) \\ F_2(z) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos k_0 n_j z & \frac{i}{n_j} \sin k_0 n_j z \\ i n_j \sin k_0 n_j z & \cos k_0 n_j z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_1(0) \\ F_2(0) \end{pmatrix}. \quad (9-64)$$

وبإدخال مصفوفة 2×2 :

$$M_j(z) = \begin{pmatrix} \cos k_0 n_j z & \frac{i}{n_j} \sin k_0 n_j z \\ i n_j \sin k_0 n_j z & \cos k_0 n_j z \end{pmatrix}, \quad (9-65)$$

يمكن إعادة كتابة المعادلة 9-64 على نحو مختصر كما يلي:

$$F(z) = M_j(z) F(0). \quad (9-66)$$

إن صيغة المصفوفة لها بعض الخواص الرائعة. فمن خلال العمليات الحسابية المباشرة، من السهل إثبات ما يلي:

$$M_j(z_1 + z_2) = M_j(z_1) M_j(z_2), \quad (9-67)$$

ومن ثَمَّ:

$$\mathbf{F}(z_1 + z_2) = \mathbf{M}_j(z_1 + z_2) \mathbf{F}(0). \quad (9-68)$$

وباستخدام معكوس المصفوفة:

$$\mathbf{M}_j^{-1}(z) = \begin{pmatrix} \cos k_0 n_j z & -\frac{i}{n_j} \sin k_0 n_j z \\ -i n_j \sin k_0 n_j z & \cos k_0 n_j z \end{pmatrix}, \quad (9-69)$$

حيث يمكن التحقق مباشرة من أن $\mathbf{M}_j(z) \mathbf{M}_j^{-1}(z) = \mathbf{M}_j^{-1}(z) \mathbf{M}_j(z) = \mathbf{I}$ يمكن إنشاء معادلة معكوسة:

$$\mathbf{F}(0) = \mathbf{M}_j^{-1}(z) \mathbf{F}(z). \quad (9-70)$$

ولأن في الحدين المركبتين x و y ل E و B مستمرتان، فبالنسبة لسلسلة من الأغشية بسمك d_j :

$$\mathbf{F}(d) = \mathbf{M}_{s-1}(d_{s-1}) \mathbf{M}_{s-2}(d_{s-2}) \dots \mathbf{M}_2(d_2) \mathbf{M}_1(d_1) \mathbf{F}(0), \quad (9-71)$$

حيث d هو السمك الإجمالي للأغشية المضادة للانعكاس، فإن التعبير العكسي يُستخدم على نحو أكثر شيوعاً:

$$\mathbf{F}(0) = \mathbf{M}_1^{-1}(d_1) \mathbf{M}_2^{-1}(d_2) \dots \mathbf{M}_{s-2}^{-1}(d_{s-2}) \mathbf{M}_{s-1}^{-1}(d_{s-1}) \mathbf{F}(d). \quad (9-72)$$

في القسمين التاليين، سنتناول الطلاءات المضادة للانعكاس أحادية الطبقة وثنائية الطبقة.

(٢-٤) الطلاء المضاد للانعكاس أحادي الطبقة

يمكن بسهولة حساب انعكاس الطلاء المضاد للانعكاس أحادي الطبقة باستخدام طريقة المصفوفة. ولأن على جانب شبه الموصل يوجد فقط ضوء نافذ، تبدأ عملية الحساب بمتجه مجال الضوء النافذ:

$$F(0) = M_1^{-1}(d_1) F(d). \quad (9-73)$$

وحيث إننا مهتمون فقط بنسبة شدتي الضوء النافذ والانعكاس، فإن المقدار والطور المطلقين للموجات الضوئية ليسا مهمين. وباتباع المعادلة 9-60، يمكن تمثيل الضوء النافذ من خلال ما يلي:

$$F(d) = \begin{pmatrix} 1 \\ n_s \end{pmatrix}, \quad (9-74)$$

بحيث n_s هو معامل الانكسار للركيزة. وبتجه المجال $F(0)$ مزيج من الموجات الضوئية المنعكسة والساقطة. ويمكن فصله باستخدام مصفوفة إسقاط:

$$P = \begin{pmatrix} n_0 & -1 \\ n_0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (9-75)$$

في واقع الأمر، من المعادلتين 9-60 و 9-61 وحين يساوي z صفراً، نحصل على:

$$PF(0) = P \left[\begin{pmatrix} 1 \\ n_0 \end{pmatrix} I + \begin{pmatrix} 1 \\ -n_0 \end{pmatrix} R \right] = 2n_0 \begin{pmatrix} R \\ I \end{pmatrix}. \quad (9-76)$$

وحيث إننا مهتمون بنسبة R و I ، فإن العامل $2n_0$ ليس له أي تأثير. وبالجمع بين معادلة 9-69 والمعادلات من 9-73 إلى 9-75، نجد أن:

$$R = (n_0 - n_s) \cos \delta_1 - i \left(n_1 - \frac{n_0 n_s}{n_1} \right) \sin \delta_1, \quad (9-77)$$

الخلايا الشمسية المصنوعة من أشباه موصلات

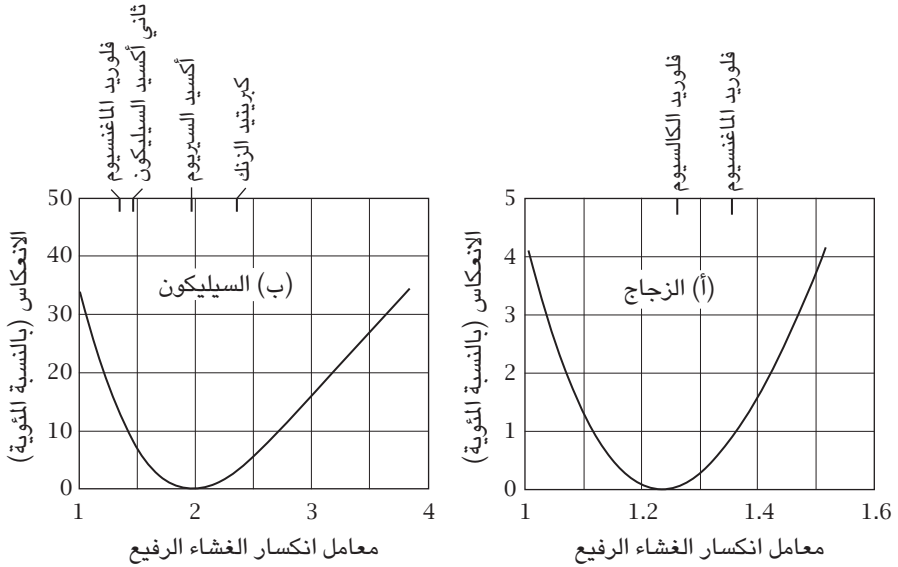
$$I = (n_0 + n_s) \cos \delta_1 - i \left(n_1 + \frac{n_0 n_s}{n_1} \right) \sin \delta_1, \quad (9-78)$$

بحيث إن δ_1 هي الإزاحة الطورية للغشاء:

$$\delta_1 = n_1 k_0 d_1. \quad (9-79)$$

إن الانعكاسية هي:

$$R = \left| \frac{R}{I} \right|^2 = \frac{n_1^2 (n_0 - n_s)^2 \cos^2 \delta_1 + (n_1^2 - n_0 n_s)^2 \sin^2 \delta_1}{n_1^2 (n_0 + n_s)^2 \cos^2 \delta_1 + (n_1^2 + n_0 n_s)^2 \sin^2 \delta_1}. \quad (9-80)$$



شكل ٩-١٥: اختيار المواد الملائمة للطلاءات المضادة للانعكاس الأحادية الطبقة: يتحدد أدنى انعكاس لأي طلاء مضاد للانعكاس الأحادي الطبقة من خلال معامل انكسار المادة؛ انظر معادلة 9-81. عرضنا هنا لحالتين. بالنسبة للزجاج، أفضل خيارين هما فلوريد الكالسيوم وفلوريد الماغنسيوم. وبالنسبة للسيليكون، أفضل خيار هو أكسيد السيريوم.

هناك حالتان خاصتان تجدر الإشارة إليهما هنا. إذا كان سمك الطلاء ربع الطول الموجي في هذا الوسط؛ أي، δ_1 تساوي $\pi/2$ ، فإن:

$$R = \left(\frac{n_1^2 - n_0 n_s}{n_1^2 + n_0 n_s} \right)^2. \quad (9-81)$$

وعندما يتساوى n_1^2 و $n_0 n_s$ ، تكون الانعكاسية صفرًا. وهذا يؤكد النتيجة اعتمادًا على فكرة التداخل البسيطة التي تؤدي لمعادلة 9-54. وإذا كان سمك الطلاء نصف الطول الموجي في هذا الوسط؛ أي، δ_1 تساوي π ، فإن:

$$R = \left(\frac{n_0 - n_s}{n_0 + n_s} \right)^2, \quad (9-82)$$

الذي يتوافق مع معادلة فريزل الموجودة في معادلة 2-80، كما لو أن الطلاء المضاد للانعكاس ليس موجودًا.

(٣-٤) الطلاءات المضادة للانعكاس الثنائية الطبقة

يمكن التوسع في المعالجة السابقة للطلاءات المضادة للانعكاس الثنائية الطبقة بسهولة. والتفاصيل الرياضية متروكة لك كتدريب. والنتائج العام للانعكاس هو:

$$R = \frac{R_1^2 + R_2^2}{I_1^2 + I_2^2}, \quad (9-83)$$

بحيث:

$$\begin{aligned} R_1 &= (n_0 - n_s) \cos \delta_1 \cos \delta_2 - \left(\frac{n_0 n_2}{n_1} - \frac{n_s n_1}{n_2} \right) \sin \delta_1 \sin \delta_2, \\ R_2 &= \left(\frac{n_0 n_s}{n_2} - n_2 \right) \cos \delta_1 \sin \delta_2 + \left(\frac{n_0 n_s}{n_1} - n_1 \right) \sin \delta_1 \cos \delta_2, \\ I_1 &= (n_0 + n_s) \cos \delta_1 \cos \delta_2 - \left(\frac{n_0 n_2}{n_1} + \frac{n_s n_1}{n_2} \right) \sin \delta_1 \sin \delta_2, \\ I_2 &= \left(\frac{n_0 n_s}{n_2} + n_2 \right) \cos \delta_1 \cos \delta_2 + \left(\frac{n_0 n_s}{n_1} + n_1 \right) \sin \delta_1 \cos \delta_2, \end{aligned} \quad (9-84)$$

والإزاحة الطورية للغشاء ذي الترتيب j هي:

$$\delta_j = n_j k_0 d_j. \quad (9-85)$$

وكحالة خاصة، إذا كان سمك الغشائين ربع طول موجي، بحيث $\delta_1 = \delta_2 = \pi/2$ ، تساوي كل جيوب التمام صفراً وكل الجيوب واحداً. ويكون لدينا ما يلي:

$$R = \left| \frac{R}{I} \right|^2 = \left(\frac{n_0 n_2^2 - n_s n_1^2}{n_0 n_2^2 + n_s n_1^2} \right)^2. \quad (9-86)$$

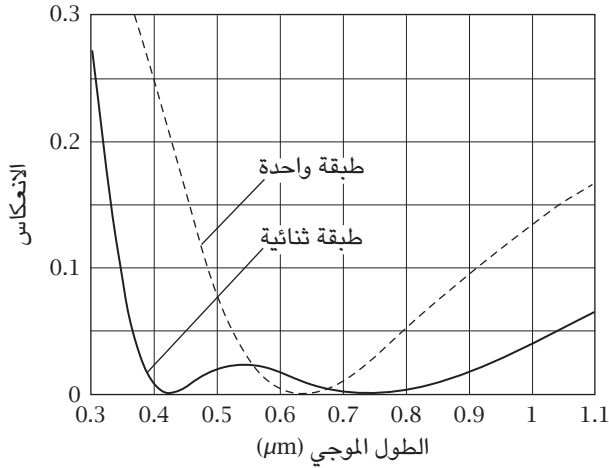
إن الشرط الخاص بالانعكاس الصفري هو:

$$n_0 n_2^2 = n_s n_1^2. \quad (9-87)$$

ومن ثمّ يمكن توسيع نطاق اختيار المواد.

إن الميزة الرئيسية للطلاءات المضادة للانعكاس المتعددة الطبقات هي نطاق الطول الموجي. وكما ناقشنا في القسم السابق، حتى إذا اختيرت أفضل مادة، فبالنسبة لطلاء مضاد للانعكاس الأحادي الطبقة، يمكن أن يحدث فقط إلغاء انعكاس كامل لطول موجي واحد. وبالنسبة للطلاءات المضادة للانعكاس الثنائية الطبقة، يمكن أن يحدث هذا لطولين موجيين مختلفين. ويمكن أن يُلاحظ ذلك من خلال تعبير الانعكاس R . وإذا تحقق الشرط في المعادلة 9-87، حيث يتلاشى جيب تمام كل من δ_1 و δ_2 بطولين موجيين مختلفين، يحدث تجنّب للانعكاس عند الطولين الموجيين. ويعرض الشكل ٩-١٦ حالتين مستخدمتين في التصنيع. المنحنى المتقطع يمثل انعكاس غشاء طلاء مضاد للانعكاس أحادي الطبقة بسمك 80nm ومصنوع من أكسيد السيريوم. أما المنحنى الفراغي، فهو يمثل انعكاس طلاء مضاد للانعكاس الثنائي الطبقة بغشاء من كبريتيد الزنك بسمك 101nm وآخر من فلوريد الماغنسيوم بسمك 56nm على ركيزة من السيليكون، مما يوفر طولين موجيين ذوي حد أدنى من الانعكاس، ويزيد نطاق الطول الموجي للانعكاس القليل على نحو كبير. انظر المرجع [91].

فيزياء الطاقة الشمسية



شكل ٩-١٦: نطاق الطول الموجي للطلاء المضادة للانعكاس: الطلاء المضاد للانعكاس الأحادي الطبقة له طول موجي واحد ذو حد أدنى من الانعكاس. موضح هنا انعكاس غشاء طلاء مضاد للانعكاس الثنائي الطبقة من أكسيد السيريوم بسلك 80nm على ركيزة من السيليكون. والطلاء المضاد للانعكاس الثنائي الطبقة يمكن أن يكون لها طولان موجيان ذو حد أدنى من الانعكاس. موضح هنا انعكاس غشاء من كبريتيد الزنك بسلك 101nm وآخر من فلوريد الماغنسيوم بسلك 56nm على ركيزة من السيليكون. ويزيد نطاق الطول الموجي للانعكاس القليل على نحو كبير. انظر المرجع [91].

(٥) الخلايا الشمسية المصنعة من السيليكون البلوري

استُخدمت أول خلية شمسية عملية، ابتُكرت في عام 1954، السيليكون البلوري. وحاليًا، ما زالت الخلايا الشمسية المصنعة من السيليكون البلوري تستحوذ على نسبة تتراوح بين 80 و90 بالمائة من السوق. ولتلك المادة مزايا متعددة:

(١) يُعد السيليكون، الذي يمثل 27 بالمائة من قشرة الأرض، ثاني أكثر عنصر توفراً بعد الأكسجين.

(٢) فجوة نطاقه تُعد مثلى تقريباً فيما يتعلق بالطيف الشمسي.

(٣) كيميائياً، هو عنصر مستقر جداً.

(٤) هو غير سام.

(٥) بفضل صناعة الإلكترونيات الدقيقة، تطورت بشدة عمليات إنتاج ومعالجة السيليكون فائق النقاء.

(٦) بعد أكثر من 50 عاماً من البحث والتطوير، اقتربت بالفعل كفاءة الخلايا الشمسية المصنوعة من السيليكون — 24.7 بالمائة بالنسبة لنماذج البحث الأولية — من حدها النظري. وقد وصلت كفاءة الوحدات المنتجة على نطاق واسع، المحدودة بالإمكانات لاعتبارات خاصة بتقليل التكلفة، إلى 20 بالمائة.

(١-٥) إنتاج السيليكون النقي

المادة الخام للسيليكون، السيليكا، أكثر المعادن وفرة على الأرض، بما في ذلك الكوارتز والعقيق الأبيض والرمل الأبيض والعديد من الأشكال غير البلورية. وتتمثل الخطوة الأولى في إنتاج السيليكون في اختزال السيليكا باستخدام فحم الكوك لإنتاج سيليكون معدني نقي:

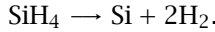
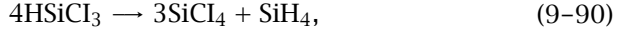
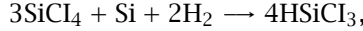


يكون السيليكون المنتج بهذه الطريقة بوجه عام نقياً بنسبة 98 بالمائة. وبالنسبة للسيليكون المستخدم في الخلايا الشمسية، فيجب أن يكون نقياً بنسبة 99.9999 بالمائة، أو ما يُسمى بالسيليكون النقي الشمسي، لكن يمكن للعديد من العمليات أن تُنتج سيليكون بمستويات شوائب تقل عن 10^{-9} ، يُستخدم في الخلايا الشمسية العالية الكفاءة. في هذا الإطار، تُستخدم عمليتان على نحو شائع: في عملية سيمنس، تُعرض قضبان السيليكون العالية النقاء لثالث كلوريد السيلان عند درجة حرارة 1150 درجة مئوية. حينها، ينحل غاز ثالث كلوريد السيلان ويترسب السيليكون الإضافي على القضبان، مما يكبر من حجمها:



يُسمى السيليكون المنتج من خلال هذه العملية والعمليات المماثلة بالسيليكون المتعدد البلورات. ولا يمكن إعادة استخدام الناتج الفرعي لتلك العملية، ألا وهو رابع كلوريد السيليكون؛ ومن ثم فهو يُهدر. كما أن استهلاك الطاقة في تلك العملية كبير.

في عام 2006، أعلنت شركة رينيوابل إنرجي النرويجية إنشاء مصنع يعتمد على تقنية الطبقة المميعة ويستخدم السيلان، الذي يتعامل مع رابع كلوريد السيليكون باعتباره نقطة البداية:



تحدث عملية التنقية في مرحلة السيلان SiH_4 . وطبقاً لهذه الشركة، يقل استهلاك الطاقة في هذه العملية الجديدة على نحو كبير مقارنةً بعملية سيمنس. كذلك، وباستخدام الطاقة الكهرومائية الشبه المجانية في النرويج، تتوقع الشركة تقليل تكلفة إنتاج السيليكون النقي الشمسي لأقل من 20 دولارًا للكيلوجرام الواحد.

وللإعداد لإنتاج الخلايا الشمسية، يمكن للسيليكون النقي أن يمر بإحدى عمليتين. بالنسبة للخلايا الشمسية المصنوعة من السيليكون الأحادي البلورة، تُستخدم عملية تشوخر السكي أو عملية المنطقة العائمة لإنتاج قوالب سيليكون أحادية البلورة. على نحو بديل، يمكن صهر السيليكون النقي في فرن لإنتاج قوالب متعددة البلورات.

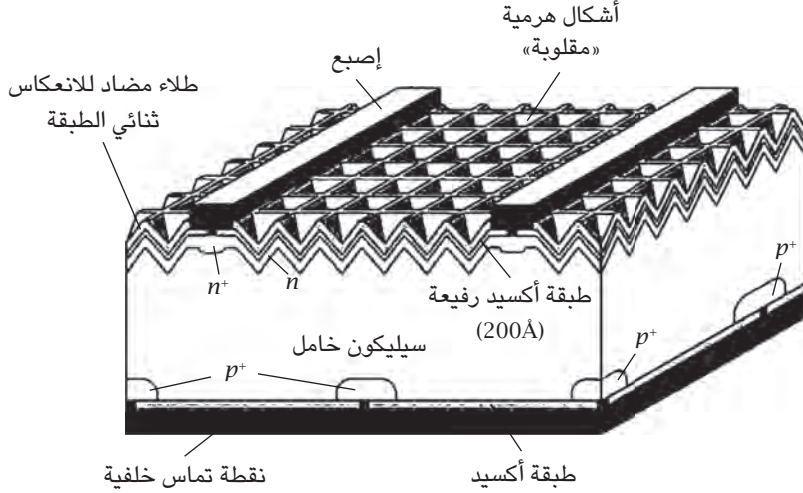
(٢-٥) تصميم ومعالجة الخلايا الشمسية

تحسّنت كفاءة الخلايا الشمسية بالتدريج منذ اختراع الخلية الشمسية المصنوعة من السيليكون في عام 1954. ومؤخرًا، اقتربت كفاءة النماذج الأولية المعملية للخلايا الشمسية المصنوعة من السيليكون الأحادي البلورة التي تبلغ 25 بالمائة من حدها النظري؛ انظر ملحق الصور الشكل ٨.

هناك تصميمات عديدة من الخلايا الشمسية المصنوعة من السيليكون. سنعرض هنا لتصميم خاص بجامعة نيو ساوث ويلز الأسترالية، «الخلايا ذات الباعث المُخمل والسطح الخلفي المنتشر محلياً» (انظر الشكل ٩-١٧)، الذي حقق كفاءة تصل إلى 24.7 بالمائة في ظل الأطياف الشمسية العالمية القياسية؛ انظر المرجعين [91] و[36].

الخلايا الشمسية المصنوعة من أشباه موصلات

ويظهر تركيب هذا التصميم في الشكل ٩-١٧. وبالإضافة لاستخدامه سيليكون أحادي البلورة عالي الجودة ذي شريحة سميكة إلى حد بعيد ($370\mu\text{m}$ أو $400\mu\text{m}$)، فإن له العديد من السمات التي تزيد من كفاءته.



شكل ٩-١٧: خلية شمسية قياسية عالية الكفاءة مصنوعة من السيليكون. الجانب الأمامي لشريحة السيليكون السميكة نسبياً مصممة بحيث تلتقط الضوء. ويُستخدم غشاء مضاد للانعكاس الثنائي الطبقة. ويُحمل الجانب الخلفي باستخدام ثاني أكسيد السيليكون لتقليل إعادة الاتحاد السطحي. وتُمكن نقاط التماس الخلفية من خلال مناطق $p+$ عالية الإشابة. نقلاً عن مرجع [91].

(أ) التخميل ونقاط التماس المعدنية

لتقليل إعادة الاتحاد السطحي، يحدث تخميل لجانبي الشريحة بطبقة من ثاني أكسيد السيليكون. ولأن ثاني أكسيد السيليكون عازل، فيجب أن تُصنع نقاط التماس المعدنية بحيث تكون هناك فجوات صغيرة في الغشاء المصنوع من ثاني أكسيد السيليكون. وبالاتسار المحلي للبورون في مناطق التماس الخلفي، يقل معدل إعادة الاتحاد الفعال بكبت تركيز حاملات الشحنة الأقلية في هذه المناطق. وتستخدم عملية الإشابة ثالث

بروميد البورون باعتباره عامل الإشابة الرئيسي. وتقل أيضًا مقاومة نقاط التماس على نحو ملحوظ. وعلى الجانب الأمامي، تحدث إشابة فوسفورية عالية باستخدام ثالث بروميد الفوسفور باعتباره حامل شحنة عامل الإشابة. ويقل عرض نقطة التماس المعدنية الأمامية.

(ب) السطح الأمامي

صُمم السطح الأمامي بحيث يكون مصفوفة ثنائية الأبعاد من الأشكال الهرمية المقلوبة. ويمكن حجز الفوتونات الداخلة للركيزة من خلال السطح الأمامي.

(ج) الطلاء المضاد للانعكاس الثنائي الطبقة

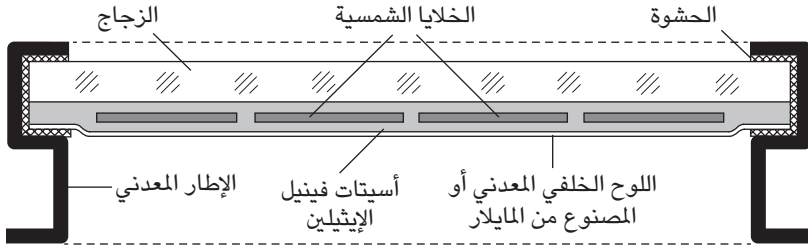
كما عرضنا في الفصل التاسع - قسم (٤)، الطلاءات المضادة للانعكاس الثنائية الطبقة يمكن أن تُحسن على نحو كبير من الكفاءة الكلية؛ لذا في هذا التصميم، يحدث تبخير لطلاء من هذا النوع مصنوع من كبريتيد الزنك وفلوريد الماغنسيوم على الخلايا.

(٣-٥) تصنيع الوحدات

تكون الخلايا الشمسية الفردية المصنوعة من السيليكون هشة وقابلة للتأثر بالعناصر؛ لذا في كل التطبيقات، فهي تُوَطر وتُحمى لكي تصبح وحدات شمسية. يعرض الشكل ٩-١٨ لقطاع عرضي لوحدة شمسية قياسية. ولتصنيع مثل هذه الوحدة، تُجمع المكونات التالية معًا في آلة كبس حراري: قطعة من زجاج النوافذ منخفض الحديد ولوحين من أغشية أسيتات فينيل الإيثيلين (بسمك قياسي قدره 0.5mm) ومصفوفة مستطيلة من الخلايا الشمسية ولوح خلفي، إما غشاء من المايلاز أو لوح من المعدن. وتُخفف أسيتات فينيل الإيثيلين عند درجة حرارة تصل تقريبًا لـ 150 درجة مئوية، ثم يُدمج بإحكام مع الخلايا الشمسية والمكونات الأخرى. وفي النهاية، تُوَطر الوحدة الزجاجية بهيكل معدني مزود بحشوة حماية.

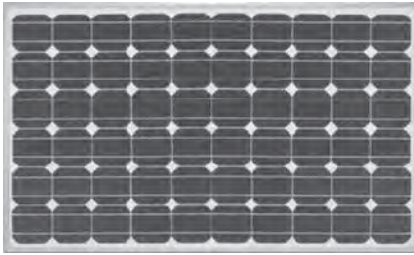
يمكن التفرقة بين الوحدة الشمسية الأحادية البلورة والوحدة الشمسية المتعددة البلورات من خلال الشكل. ويعرض الشكل ٩-١٩ لنوعي الوحدات الشمسية. يعرض الشكل ٩-١٩ (a) لوحدة شمسية أحادية البلورة. والخلايا الشمسية مُقطعة من بلورة

الخلايا الشمسية المصنوعة من أشباه موصلات

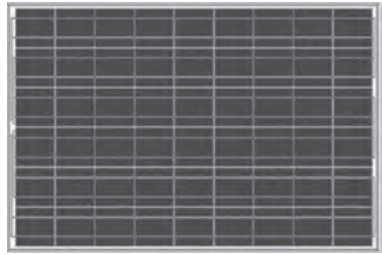


شكل ٩-١٨: قطاع عرضي لوحدة شمسية قياسية. تتكون أي وحدة شمسية كاملة من قطعة من زجاج النوافذ منخفض الحديد ولوحين من أغشية أسيتات فينيل الإيثيلين ومصفوفة من الخلايا الشمسية ولوح خلفي. وتُجمع هذه المكونات معًا من خلال آلة كبس حراري.

واحدة أسطوانية لتُكوّن قطعة مُثمّنة. ويعرض الشكل ٩-١٩ (b) لوحدة مكونة من خلايا شمسية متعددة البلورات مُقطّعة من قالب مستطيلي.



(a)



(b)

شكل ٩-١٩: وحدة شمسية أحادية البلورة ووحدة شمسية متعددة البلورات: (a) الخلايا الشمسية الأحادية البلورة مُقطّعة من بلورة واحدة أسطوانية. ولتوفير المادة والمساحة، الخلايا مُقطّعة لتُكوّن قطعة مُثمّنة. وهناك دائمًا بعض الفقد في المساحة بسبب أركان القطع. (b) تُقطّع الخلايا الشمسية المتعددة البلورات من قالب مستطيلي. وعادة ما تكون الخلايا على شكل مربعات تامة. ولا يوجد فقد في المساحة.

(٦) الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة

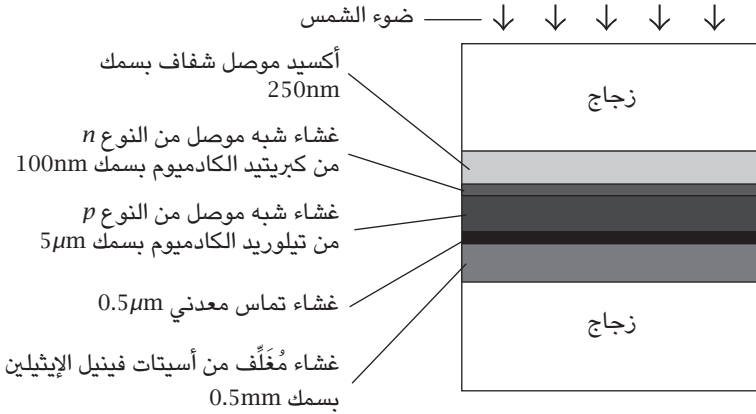
إن للسيليكون كمادة تُصنع منها الخلايا الشمسية مزايا متعددة، لكنه له عيب أيضًا، فكما أوضحنا في الفصل التاسع - قسم (١)، هو شبه موصل غير مباشر. فمعامل الامتصاص قرب حافة نطاقه قليل؛ ومن ثمّ فهناك حاجة لركيزة سميكة نوعًا ما. تُقَطَّع الشريحة من بلورة واحدة أو قالب متعدد البلورات. ويتراوح أدنى سمك يمكنه الحفاظ على امتصاص ومثانة ميكانيكية معقولين بين 0.1mm و 0.2mm. وتكون تكلفة المادة والمعالجة الميكانيكية كبيرة. وعادة ما يكون لأشباه الموصلات المباشرة معامل امتصاص أعلى بقيمة أسية واحدة أو اثنتين من السيليكون؛ ارجع إلى الشكل ٩-٣. وبالنسبة لتلك المواد، يكون سمك قدره بضعة ميكرومترات كافيًا. وبالإضافة إلى معامل امتصاص عالٍ قرب فجوة النطاق التي تقترب من إلكترون فولت واحد، هناك العديد من العوامل الأخرى التي تحدد مدى عملية صنع الخلية الشمسية. وحاليًا، وإلى جانب السيليكون، وصلت مادتان فقط من تلك المواد لمرحلة الإنتاج على نطاق واسع، وهما تيلوريد الكاديوم (CdTe) وثاني سيلينيد جاليوم إنديوم النحاس Cu(InGe)Se_2 ، التي عادة ما تُسمى سيلينيد جاليوم إنديوم النحاس، لكن تكلفة المادة الخاصة بهما لا تزال عالية. والخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة المُصنعة من السيليكون غير البلوري، رغم كفاءتها القليلة نسبيًا، تُنتج على نطاق واسع لتطبيقات لا تحتاج لكفاءة عالية؛ ارجع للجدول ١-٦.

(١-٦) الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة المُصنعة

من تيلوريد الكاديوم

نظرًا لمعامل الامتصاص العالي لتيلوريد الكاديوم (CdTe) وسهولة استخدامها في صنع مادة من النوع p ، فهي المادة الأكثر شيوعًا حاليًا في صناعة الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة [16, 19, 69]. هناك ميزة أخرى وهي توافقها مع مادة كبريتيد الكاديوم (CdS)، وهي شبه موصل ذي فجوة نطاق كبيرة يسهل عليه إنتاج غشاء من النوع n . ولأن حافة الامتصاص لكبريتيد الكاديوم تساوي 2.4eV، فهي شفافة لمعظم الإشعاع الشمسي. ويظهر التركيب القياسي لأي خلية شمسية ذات أغشية رقيقة مصنوعة من تيلوريد الكاديوم في الشكل ٩-٢٠. وكما هو موضح، الخلية الشمسية محشورة بين

لوحيّ من زجاج النوافذ، وهي مُصنعة من غشاء من تيلوريد الكاديوم سمكه $5\mu\text{m}$ مغطى بغشاء رفيع من كبريتيد الكاديوم سمكه 100nm لتكوين وصلة pn . ويوجد على الجانب المواجه للشمس غشاء من أكسيد موصل شفاف للسماح للإشعاع بالنفوذ وهو يعمل كموصل. ويوجد على الجانب الخلفي غشاء معدني للتماس الكهربائي. ويُضاف غشاء من أسيتات فينيل الإيثيلين سمكه 0.5mm للحماية الميكانيكية. وتصل أفضل كفاءة للخلايا الشمسية ذات الأغشية الرفيعة المصنوعة من تيلوريد الكاديوم إلى 16.5 بالمائة، ومن المتوقع أن تصل إلى 20 بالمائة.



شكل ٩-٢٠: تركيب قياسي لخلية شمسية ذات أغشية رفيعة مصنوعة من تيلوريد الكاديوم. إن وصلة pn المصنوعة من تيلوريد الكاديوم وكبريتيد الكاديوم محشورة بين لوحيّ زجاجيين. انظر مراجع [16] و[19] و[69].

هناك مخاوف عادةً ما تُثار فيما يتعلّق بِسُمِّيّة عنصر الكاديوم، لكن طبقاً لدراسة حديثة، فإنه ما دامت كمية الكاديوم المستخدمة في تلك الخلايا قليلة جداً وما دام مُغطى بالزجاج بالكامل، فإن التأثير البيئي هنا لا يكاد يُذكر.

إن أكبر مُصنّع للخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة المصنوعة من تيلوريد الكاديوم هو شركة فيرست سولر التي يوجد مقرها الرئيسي في مدينة تامبا بولاية أريزونا الأمريكية.

ولعدة أعوام منذ عام 2002، كانت هذه الشركة هي أكبر مُصنّع للخلايا الشمسية في العالم. فقط في أواخر عام 2011، حلت محلها شركة صن تك. وفي سبتمبر من عام 2009، وقعت شركة فيرست سولر عقدًا مع الصين لإنشاء حقل شمسي سعته 2GW في مدينة أورديوس في إقليم منغوليا الداخلية، الذي يُعد حتى الآن إلى حد بعيد أكبر حقل شمسي قيد الإنشاء في العالم.

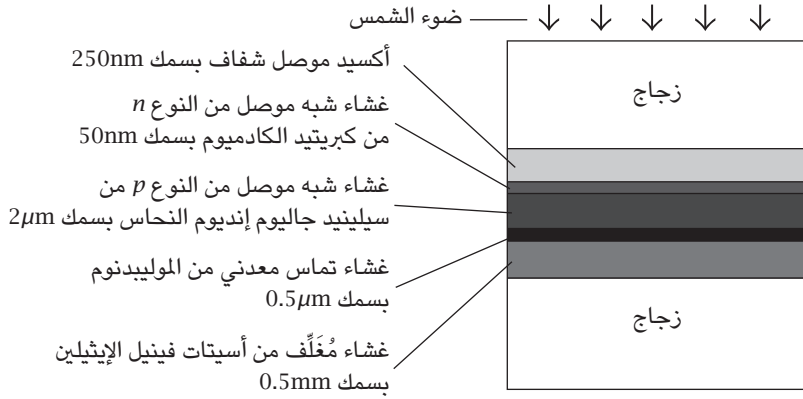
(٢-٦) الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة المصنوعة من سيلينيد جاليوم إنديوم النحاس

اكتُشف النظام المعتمد على سيلينيد جاليوم إنديوم النحاس وتيلوريد الكاديوم في عام 1974 باعتباره كاشفًا كهروضوئيًا [87]. وفي عام 1975، أُنشئت خلية شمسية، باستخدام هاتين المادتين، كانت لها كفاءة قريبة من كفاءة الخلايا الشمسية المصنوعة من السيليكون في ذلك الوقت [76]. وفي العقد الأول من القرن الحادي والعشرين، وصلت كفاءة الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة المصنوعة من سيلينيد جاليوم إنديوم النحاس إلى 19.9 بالمائة، وهي نسبة قريبة من تلك الخاصة بالخلايا الشمسية المصنوعة من السيليكون المتعدد البلورات [19, 69, 78]؛ انظر ملحق الصور الشكل ٨. وكما هو موضح في الشكل ٩-٣، فجوة نطاق سيلينيد جاليوم إنديوم النحاس قريبة جدًا من القيمة المثلى، لكن معامل امتصاصها أكبر بنحو 100 مرة من السيليكون؛ من ثَم حتى لو كان الغشاء شبه الموصل رقيقًا بحيث يصل سمكه إلى $2\mu\text{m}$ ، فسيمتص أكثر من 90 بالمائة من الضوء المرئي والضوء تحت الأحمر القريب.

والتركيب القياسي لأي خلية شمسية ذات أفلام رقيقة مصنوعة من سيلينيد جاليوم إنديوم النحاس يظهر في الشكل ٩-٢١. وعلى نحو مشابه للخلايا الشمسية المصنوعة من تيلوريد الكاديوم، يُستخدم غشاء من كبريتيد الكاديوم من النوع n بسمك 50nm لتكوين وصلة pn . مرة أخرى، لأن كمية الكاديوم المستخدمة هنا قليلة جدًا، ومحشورة بين لوحين زجاجيين، فإن التأثير البيئي لا يكاد يُذكر.

يمكن إنتاج الخلية الشمسية المصنوعة من سيلينيد جاليوم إنديوم النحاس من خلال الطريقة الرطبة دون الحاجة لفراغ؛ ومن ثَم يمكن أن تكون تكلفة التصنيع قليلة. هناك ميزة أخرى لتلك الخلايا وهي أن التوصيلات البينية يمكن أن تُنشأ على نفس التركيب،

الخلايا الشمسية المصنوعة من أشباه موصلات



شكل ٩-٢١: التركيب القياسي لخلاية شمسية ذات أغشية رقيقة مصنعة من سيلينيد جاليوم إنديوم النحاس. إن وصلة pn المصنوعة من سيلينيد جاليوم إنديوم النحاس وكبريتيد الكاديوم محشورة بين لوحين زجاجيين. انظر مراجع [19] و [69] و [76] و [78] و [87].

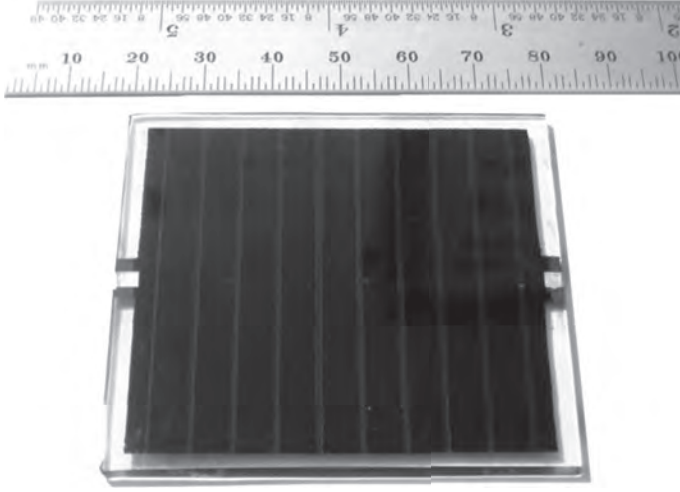
على نحو مماثل للدائرة المتكاملة؛ ومن ثم يمكن إنشاء خلية واحدة ذات فرق جهد أعلى — على سبيل المثال، 12V — دون الحاجة لتوصيلات خارجية. يعرض الشكل ٩-٢٢ 5V خلاية شمسية تجريبية مصنعة من سيلينيد جاليوم إنديوم النحاس ذات فرق جهد 12V أُنتجت من 10 خلايا شمسية فردية من سيلينيد جاليوم إنديوم النحاس في غلاف زجاجي واحد. والحدود بين الخلايا الشمسية المتجاورة واضحة.

(٣-٦) الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة المصنعة

من السيليكون غير البلوري

نظرًا لأن تكلفة بعض المواد الرئيسية في الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة المصنعة من سيلينيد جاليوم إنديوم النحاس وتيلوريد الكاديوم، وبخاصة التيلوريوم والإنديوم؛ عالية، فقد أُنتجت الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة المصنوعة من السيليكون، رغم كفاءتها القليلة، على نطاق واسع منذ عدة سنوات؛ فبالنسبة للتطبيقات التي لا تكون الكفاءة فيها مهمة، مثل الآلات الحاسبة اليدوية والحقول الشمسية ذات السعة الكبيرة في

فيزياء الطاقة الشمسية



شكل ٩-٢٢: شكل الدائرة المتكاملة من الخلية الشمسية المصنعة من سيلينيد جاليوم إنديوم النحاس: خلية شمسية تجريبية مُنتجة من 10 خلايا فردية من سيلينيد جاليوم إنديوم النحاس. وفرق الجهد الاسمي لكل خلية منها يساوي 0.5V. ويربط الخلايا العشرة معاً داخلياً على نحو تسلسلي، تتكون خلية شمسية ذات فرق جهد 5V. ولأن التوصيلات متكاملة، فالخلية مضغوطة ومتينة. الصورة التقطها المؤلف.

الصحاري، تُعد هذه الخلايا مناسبة أكثر. وهناك ميزة أخرى لها وهي أنه يمكن تصنيعها على ركائز مرنة.

هناك عيب كبير في السيليكون وهو معامل امتصاصه القليل، لكن بالإشابة العالية للسيليكون غير البلوري بالهيدروجين، بنسبة تصل إلى 10 بالمائة، يمكن أن يزيد معامل امتصاصه ليصل إلى 10^5cm^{-1} ، مع تغير فجوة النطاق من 1.1eV إلى 1.75eV، ليقترّب من قيمة فجوة نطاق تيلوريد الكاديوم. وفي المراجع المتخصصة، عادة ما يكون اختصار تلك المادة هو a-Si:H [19]. ونظرًا لأن كثافة العيوب عالية، فإن معدل إعادة الاتحاد يكون عاليًا. وتصل كفاءة أفضل خلايا شمسية تجريبية مُصنعة من تلك المادة إلى نحو 10 بالمائة، وإلى نحو 5 بالمائة بالنسبة للخلايا الشمسية المُنتجة على نطاق واسع.

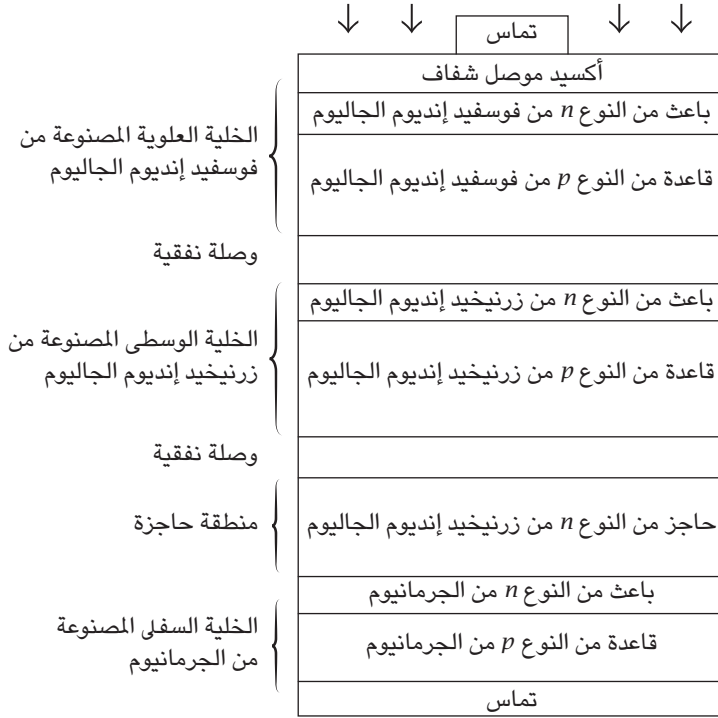
(٧) الخلايا الشمسية الترادفية

كما أوضحنا في الفصل التاسع - قسم (٢-١)، تأتي أعلى كفاءة، عبر الطيف الشمسي بأكمله، من فوتونات بطاقة أكبر قليلاً من فجوة نطاق المادة شبه الموصلة. وبالنسبة للفوتونات التي طاقتها أقل من فجوة النطاق، يكون شبه الموصل شفافاً. ولا يوجد حفظ للطاقة. وبالنسبة للفوتونات التي طاقتها أعلى بكثير من فجوة النطاق، فإن طاقة زوج الإلكترون والثغرة تقل سريعاً لتتساوى مع فجوة النطاق. وتُفقد طاقة الفوتونات الزائدة عبر فجوة النطاق؛ ومن ثم بتكديس خليتين شمسيّتين أو أكثر معاً على نحو ترادفي، يمكن أن تكون الكفاءة أعلى بكثير من حد شوكلي وكويسيه.

يعرض الشكل ٩-٢٣ مخطط خلية ترادفية ثلاثية الوصلات. الخلية العلوية مصنوعة من فوسفيد إنديوم الجاليوم، بفجوة نطاق قدرها 1.9eV. وستولد الفوتونات التي طاقتها أكبر من 1.9eV زوج إلكترون وثغرة بطاقة تصل إلى نحو 1.9eV. وبالنسبة للفوتونات التي طاقتها أصغر من 1.9eV، فإن تلك الطبقة المصنوعة من فوسفيد إنديوم الجاليوم تكون شفافة. وستمتص الخلية الوسطى، المصنوعة من زرنيخيد إنديوم الجاليوم بفجوة نطاق قدرها 1.35eV، الفوتونات التي طاقتها تتراوح بين 1.35eV و 1.9eV، وتولد زوج إلكترون وثغرة بطاقة تصل إلى نحو 1.35eV. إن الغشاء المصنوع من زرنيخيد إنديوم الجاليوم شفاف للفوتونات التي طاقتها أقل من 1.35eV. وتنتقل هذه الفوتونات بعد ذلك لطبقة من الجرمانيوم، بفجوة نطاق 0.67eV. وبالنسبة للفوتونات التي طاقتها أكبر من 0.67eV وأصغر من 1.35eV، يُولد زوج إلكترون وثغرة في الخلية السفلى. يجب أن يكون التيار مستمراً، لكن فرق الجهد يكون تراكمياً. ومن ثم، بالنسبة لإشعاع شمسي بطيف غني، يمكن للخلية الترادفية أن تولد طاقة أكبر بكثير من الخلايا الفردية؛ ومن ثم هي عادة ما تتجاوز حد شوكلي وكويسيه. ومؤخراً، أنتجت مجموعة في شركة سبكترولاب خلية شمسية ترادفية بكفاءة تزيد عن 40 بالمائة. انظر المرجع [43].

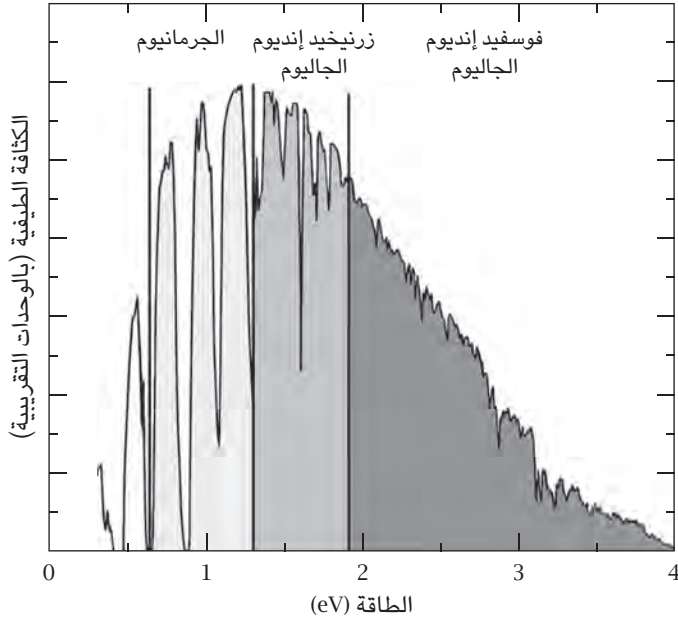
معظم المواد المستخدمة في الخلايا الشمسية الترادفية غالية الثمن. والتطبيق الأساسي لتلك الخلايا يكون مع الإشعاع الشمسي المركز. فزيادة تركيز الإشعاع الشمسي بمائة ضعف أو أكثر، تقل مساحة الخلية الشمسية إلى 1 بالمائة عما هي عليه بدون تركيز. من الناحية الاقتصادية، يمكن أن تكون تلك الخلايا أفضل من الخلايا الشمسية المصنعة من السيليكون البلوري.

فيزياء الطاقة الشمسية



شكل ٩-٢٣: خلية شمسية ترادفية متعددة الوصلات: عبر طبقة الأكسيد الموصل الشفاف، يسقط ضوء الشمس في البداية على الخلية العلوية. للمادة شبه الموصلة المصنوع منها تلك الخلية، وهي فوسفيد إنديوم الجاليوم، فجوة نطاق كبيرة؛ 1.9eV . وهذه الطبقة شفافة للفوتونات التي طاقتها أقل من 1.9eV . أما عن الفوتونات التي طاقتها أكبر من 1.9eV ، فستولد زوج إلكترون وثغرة بطاقة تصل إلى نحو 1.9eV . والخلية الوسطى، المصنوعة من زرنيخيد إنديوم الجاليوم، ذات فجوة نطاق قدرها 1.35eV . والفوتونات التي طاقتها تتراوح بين 1.35eV و 1.9eV ستولد زوج إلكترون وثغرة بطاقة تصل إلى نحو 1.35eV . أما عن الخلية السفلية، فهي مصنوعة من الجرمانيوم، بفجوة نطاق قدرها 0.67eV . وبالنسبة للفوتونات التي طاقتها أكبر من 0.67eV وأصغر من 1.35eV ، يُولد زوج إلكترون وثغرة بطاقة تصل إلى نحو 0.67eV . يكون فرق الجهد تراكمياً؛ ومن ثمّ يمكن للخلية الترادفية أن تولد طاقة أكبر بكثير من الخلايا الفردية، متجاوزة في الغالب حد شوكلي وكويسيه.

الخلايا الشمسية المصنوعة من أشباه موصلات



شكل ٩-٢٤: طريقة عمل الخلايا الشمسية الترادفية المتعددة الوصلات: ينقسم الطيف الشمسي إلى ثلاثة أقسام، ويُولد كل قسم فرق جهد. ويمكن اعتبار الخلية الترادفية بمنزلة بطارية شمسية مكونة من ثلاث خلايا. ويكون فرق الجهد تراكمياً؛ ومن ثمّ يمكن أن تولّد الخلية طاقة أكبر بكثير من الخلايا الفردية، متجاوزة في الغالب حد شوكلي وكويسيه.

مسائل

(9-1) يمكن بسهولة حساب الكفاءة القصوى الخاصة بشوكلي وكويسيه بتوسيع مقام معادلة 9-25 كما يلي:

$$\begin{aligned}\eta_u(x_s) &= \frac{15}{\pi^4} x_s \int_{x_s}^{\infty} \frac{x^2 dx}{e^x - 1} \\ &= \frac{15}{\pi^4} x_s \sum_{n=1}^{\infty} \int_{x_s}^{\infty} e^{-nx} x^2 dx.\end{aligned}\quad (9-91)$$

أثبت ما يلي:

$$\eta_u(x_s) = \frac{15}{\pi^4} x_s \sum_{n=1}^{\infty} e^{-nx_s} \left[\frac{x_s^2}{n} + \frac{2x_s}{n^2} + \frac{2}{n^3} \right]. \quad (9-92)$$

(9-2) إذا كان يمكن الإبقاء على درجة حرارة الخلية الشمسية عند درجة حرارة الغرفة، فما تأثير زيادة تركيز ضوء الشمس بمائة ضعف على كفاءة الخلية؟ وبالنسبة لإشعاع الجسم الأسود، حدد التأثير بالنسبة لخلية شمسية مصنوعة من السيليكون. **تلميح:** بدلاً من استخدام العامل الهندسي f المعتاد الذي يساوي 2.15×10^{-5} ، يُستخدم عدد أكبر؛ على سبيل المثال، $100f$ ، في المعادلة 9-45.

(9-3) معاملات الامتصاص لبعض أكثر المواد المستخدمة في الخلايا الشمسية في وسط طيف الضوء المرئي معروضة في الجدول 9-1. لتحقيق إجمالي امتصاص قدره 95 بالمائة، ما هو السمك المطلوب؟

(9-4) إن خلية شمسية قياسية مصنوعة من قطعة حجمها $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ من السيليكون الأحادي البلورة. إن تيار الإشعاع العكسي I_0 يساوي $3.7 \times 10^{-11} \text{A/cm}^2$. بالنسبة لـ V يساوي 0 و 0.05 و 0.1 و ... و 0.55 و 0.6 فولت، احسب التيار الأمامي للخلية الشمسية في درجة حرارة الغرفة.

(9-5) بالنسبة لخلية شمسية قياسية مصنوعة من السيليكون، يساوي تركيز الذرات المستقبلية في المنطقة p ، $N_A = 1 \times 10^{16} / \text{cm}^3$ ، وتركيز الذرات المانحة في المنطقة n ، $N_D = 1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$. بافتراض أن الجهد الداخلي يساوي 0.5V، احسب سعة وصلة pn لخلية شمسية حجمها $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ (علماً بأن سماحية الفضاء، ϵ_0 ، تساوي $8.85 \times 10^{-14} \text{F/cm}$ ، والسماحية النسبية للسيليكون، ϵ_r ، تساوي 11.8). **تلميح:** إن تركيز الذرات المانحة عالٍ جداً؛ ومن ثم فإن سمك المنطقة التي من النوع n لا يُذكر. وهكذا يكون تركيز الذرات المستقبلية فقط هو المطلوب في عملية الحساب. هذا بالإضافة إلى أن ثابت العازل الكهربائي (السماحية) للسيليكون هو حاصل ضرب سماحية الفضاء والسماحية النسبية للسيليكون.

(9-6) لسطح من الهواء والزجاج بمعامل انكسار n ، أثبت أن نفاذية كل سطح تساوي:

$$\tau = \frac{4n}{(1+n)^2}. \quad (9-93)$$

تحقق من صحة العلاقة بإثبات أن n لو كانت تساوي 1، فإن τ تساوي 1.
(9-7) إذا كان جهاز شمسي مغطى بالواح من الزجاج N بمعامل انكسار n ، أثبت أن نفاذية الطبقة بالكامل تساوي:

$$\tau = \frac{(4n)^{2N}}{(1+n)^{4N}}. \quad (9-94)$$

(9-8) إن لخلية شمسية بمساحة قدرها 100cm^2 تيار ظلام ذا انحياز عكسي قدره $2 \times 10^{-9}\text{A}$ ، وتيار دائرة قصيرة عند 1 sun (1kW/m^2) قدره 3.5A . في درجة حرارة الغرفة، كم يساوي فرق جهد الدائرة المفتوحة؟ وما مقاومة الحمل المثلى (V_{mp}/I_{mp})؟ وما قدرة الخرج القصوى؟

(9-9) خلية شمسية قياسية من السيليكون لها المواصفات الآتية:

فجوة نطاق السيليكون تساوي 1.1eV .

ومادة النوع p ذات تركيز ذرات مستقبلية N_A يساوي $1 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ ، بمعامل انتشار ثغرات D_p يساوي $40\text{cm}^2/\text{s}$ ، وعمر τ_p يساوي $5\mu\text{s}$.

ومادة النوع n ذات تركيز ذرات مانحة N_D يساوي 10^{19}cm^{-3} ، بمعامل انتشار إلكترونات D_n يساوي $40\text{cm}^2/\text{s}$ ، وعمر τ_n يساوي $1\mu\text{s}$.

إن تركيز حامل الشحنة النقي في السيليكون n_i يساوي $1.5 \times 10^{10}\text{cm}^{-3}$.
لخلية شمسية حجمها $1\text{cm} \times 1\text{cm}$ ، احسب ما يلي:

(1) تيار الإشباع العكسي I_0 .

(2) تيار الدائرة القصيرة في ظل إشعاع شمسي مقداره 1 sun .

(3) فرق جهد الدائرة المفتوحة في درجة حرارة الغرفة.

الفصل العاشر

الكيمياء الضوئية الشمسية

في الفصل السابق، ناقشنا الخلايا الشمسية المصنوعة من أشباه موصلات، حيث تولد الفوتونات القادمة من الشمس أزواج إلكترونات وثغرات، ثم تحول الطاقة الموجودة في تلك الأزواج إلى طاقة كهربائية. أما الكيمياء الضوئية الشمسية، فتتبع مساراً مختلفاً؛ إذ تتسبب الفوتونات القادمة من الشمس في انتقال أي جزيء من حالة الاستقرار الخاصة به إلى حالة إثارة. ويمكن تحويل الطاقة المخزنة في الجزيء المثار إلى طاقة كهربائية أو طاقة كيميائية دائمة. وأهم مثال على الكيمياء الضوئية الشمسية هو التمثيل الضوئي؛ أي تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كيميائية مخزنة في مادة عضوية، مثل الجلوكوز.

(١) فيزياء التمثيل الضوئي

إن معظم الطاقة التي يستخدمها المجتمع البشري حالياً مصدرها عملية التمثيل الضوئي؛ فالطاقة المخزنة في الطعام وأنواع الوقود التقليدية، مثل الحطب، مصدرها على نحو مباشر أو غير مباشر عملية التمثيل الضوئي. فالوقود الحفري هو بقايا الكائنات الحية القديمة؛ أي، الناتج المخزن لعملية التمثيل الضوئي. والتمثيل الضوئي باعتباره مصدر الطاقة لكل مظاهر الحياة على الأرض عملية طبيعية تطورت في المليار عام الأخيرة من خلال الانتقاء الطبيعي. ودراسة هذه العملية ستلهمنا إنشاء نظم عالية الكفاءة للاستفادة المثلى من الطاقة الشمسية. ولمزيد من المعلومات عن هذه العملية، انظر كتاب بلانكنشيب [11] وفوت [86].

يمكن الزعم أن التمثيل الضوئي أهم تفاعل كيميائي على كوكب الأرض. وكدليل على ذلك، حصل تسعة علماء على جائزة نوبل في الكيمياء بسبب أبحاثهم في مجال التمثيل الضوئي، وهم كالتالي:

1915: ريتشارد مارتن فيلشتيتير، لأبحاثه عن تنقية الكلوروفيل وتركيبه والكاروتينات والأنثوسيانينات.

1930: هانس فيشر، لأبحاثه عن تخليق الهيم وكيمياء الكلوروفيل.

1937: بول كارر، لأبحاثه عن تركيب الكاروتينات والفلافينات وفيتامين ب2.

1938: ريتشارد كون، لأبحاثه عن الكاروتينات والفيتامينات.

1961: ملفين كلفن، لأبحاثه عن تثبيت ثاني أكسيد الكربون.

1965: روبرت برنز وودوارد، لأبحاثه عن التخليق الكامل لفيتامين ب12 والكلوروفيل ومنتجات طبيعية أخرى.

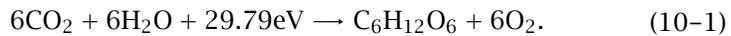
1978: بيتر ميتشل، لأبحاثه عن الفسفرة التأكسدية والضوئية ونظرية التناضح الكيميائي.

1988: هارتموت ميتشل وروبرت هوبر ويوهان دايزنهوفر، لأبحاثهم عن تحديد تركيب مركز تفاعل التمثيل الضوئي البكتيري بالأشعة السينية.

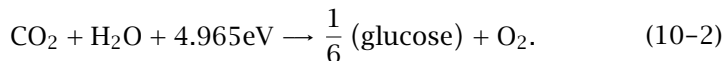
1992: رودولف ماركوس، لأبحاثه عن نظرية انتقال الإلكترونات وتطبيقها على الفصل الأولي للشحنات في عملية التمثيل الضوئي.

1997: بول دي بوير وجون إيه ووكر، لاكتشافهما الآلية الإنزيمية لتخليق الأدينوسين الثلاثي الفوسفات.

تتمثل المعادلة الكيميائية القياسية للتمثيل الضوئي في إنتاج الجلوكوز أو الفركتوز، $C_6H_{12}O_6$ ، من ثاني أكسيد الكربون والماء والطاقة من الإشعاع الشمسي، وذلك كما يلي:



لفهم العملية الأساسية، عادة ما تُكتب المعادلة السابقة كما يلي:



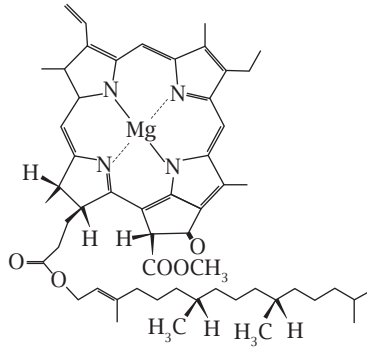
ولأن الطاقة القياسية لفوتون من ضوء الشمس تتراوح بين 1-3eV، فإن العملية السابقة بلا شك عملية متعددة الفوتونات.

(١-١) الكلوروفيل

على الرغم من أنه كانت هناك العديد من عمليات التمثيل الضوئي المختلفة، فقد بقي عدد قليل جداً منها فقط بسبب عملية الانتقاء الطبيعي وذلك لدعم الحياة على الأرض. وتعتمد عملية التمثيل الضوئي على الكلوروفيل، وهي المادة الصبغية الخضراء في النباتات. والمقابل الإنجليزي لكلمة كلوروفيل chlorophyll، مشتق من الكلمتين اليونانيتين cholos (خضراء) و phyllon (ورقة).

ونوع الكلوروفيل الأكثر شيوعاً في النباتات والطحالب هو الكلوروفيل أ. ويظهر التركيب الكيميائي له في الشكل ١٠-١. وهو جزيء مستوي قريب الشبه بالمربع طوله نانومتر واحد على كلا الجانبين. تتوافق ذرة ماغنسيوم موجودة في مركز الجزيء مع أربع ذرات نيتروجين. كل ذرة نيتروجين جزء من حلقة بيرول. وفي المواضع الخارجية، ترتبط مجموعات مثل CH_3 و C_2H_5 . وللعديد من الأنواع الأخرى للكلوروفيل نفس هذا التركيب الأساسي، لكنها تختلف في المجموعات الموجودة في المواضع الخارجية.

يظهر طيف امتصاص الكلوروفيل أ وشرحه في الشكل ١٠-٢. إن له ثلاث مجموعات رئيسية من ذروات الامتصاص، التي تتمركز عند طول موجي 662nm (المنطقة الحمراء) و 578nm (المنطقة الصفراء) و 430nm (المنطقة الزرقاء). والمنطقة الخضراء شفافة، مما يؤدي إلى لونه الأخضر المميز له. ويظهر مخطط طاقة الكلوروفيل أ في الشكل ١٠-٢(ب). فبالإضافة إلى أعلى مدار جزيئي مشغول وأدنى مدار جزيئي غير مشغول، هناك حاجة لمستويي طاقة إضافيين؛ الأول: أقل من أعلى مدار جزيئي مشغول، والآخر: أعلى من أدنى مدار جزيئي غير مشغول، لشرح طيف الامتصاص في الضوء المرئي. وتقابل ذروة الامتصاص في المنطقة الحمراء، بالقرب من 660nm، الانتقال من أعلى مدار جزيئي مشغول إلى أدنى مدار جزيئي غير مشغول. وتقابل ذروة الامتصاص في المنطقة الصفراء، عند نحو 570nm، الانتقال من مستوى واحد أسفل أعلى مدار جزيئي مشغول إلى أدنى مدار جزيئي غير مشغول. والذروة في المنطقة البنفسجية، بالقرب من 430nm، تقابل الانتقال من مستويات الطاقة التي توجد أسفل أعلى مدار جزيئي مشغول إلى تلك التي توجد أعلى أدنى مدار جزيئي غير مشغول. وفي فترة زمنية قصيرة جداً، تسترخي كل



شكل ١٠-١: الكلوروفيل: التركيب الكيميائي لأكثر أنواع الكلوروفيل شيوعاً، الكلوروفيل أ. يوجد في وسط الجزيء القريب المربع الشكل ذرة ماغنسيوم. وكل ذرة نيتروجين جزء من حلقة بيرول. ويرتبط ذيل من الهيدروكربونات عبر موضع ذرة أكسجين. وفي المواضع الخارجية، ترتبط مجموعات مختلفة.

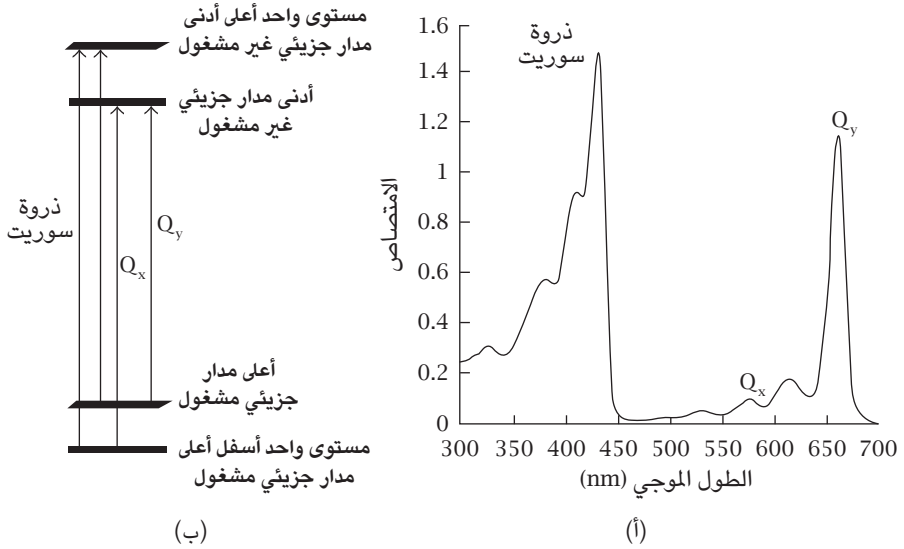
حالات الإثارة تلك للحالة الجزيئية التي بأدنى مدار جزيئي غير مشغول واحد، وتكون نحو 1.88eV فوق حالة الاستقرار.

تنتقل الطاقة المخزنة في جزيء الكلوروفيل المثار إلى جزيء تخزين طاقة، الأدينوسين الثلاثي الفوسفات، الذي يدفع عملية إنتاج السكر من ثاني أكسيد الكربون والماء.

(٢-١) الأدينوسين الثلاثي الفوسفات: عملة الطاقة العامة للحياة

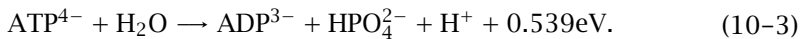
يظهر تركيب كل من الأدينوسين الثلاثي الفوسفات (ATP) وجزيء آخر مرتبط به وهو الأدينوسين ثنائي الفوسفات (ADP) في الشكل ١٠-٣. كلا الجزيئين لهما قاعدة نيتروجينية تُسمى «أدينين»، وسكر مكون من خمس ذرات كربون يُسمى «ريبوز»، ومجموعتين أو ثلاث مجموعات من «الفوسفات». (الأدينين هو أيضاً إحدى القواعد النيتروجينية الأربعة التي تُعد المكونات الأساسية للحمض النووي، وهو مادة الشفرة الجينية.) يُعد هذان الجزيئان البطاريتين العامتين القابلتين لإعادة الشحن في النظم البيولوجية: الأدينوسين الثلاثي الفوسفات هو البطارية المشحونة والأدينوسين الثنائي الفوسفات هو البطارية المفرغة. ويحتاج الأمر لبعض الطاقة لإلحاق مجموعة فوسفات بالأدينوسين

الكيمياء الضوئية الشمسية

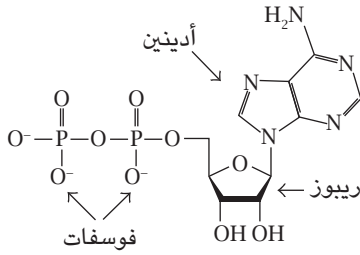


شكل ١٠-٢: طيف امتصاص الكلوروفيل أ: (أ) ذروات الامتصاص للكلوروفيل أ هي في المناطق الحمراء والصفراء والزرقاء في الضوء فوق البنفسجي القريب. والمنطقة الخضراء شفافة، مما يؤدي إلى لونه الأخضر المميز له. (ب) مخطط مستويات طاقة الكلوروفيل أ. تقابل ذروة الامتصاص في المنطقة الحمراء، بالقرب من 660nm، الانتقال من أعلى مدار جزيئي مشغول إلى أدنى مدار جزيئي غير مشغول. وتقابل ذروة الامتصاص في المنطقة الصفراء، عند نحو 570nm، الانتقال من مستوى واحد أسفل أعلى مدار جزيئي مشغول إلى أدنى مدار جزيئي غير مشغول. والذروة في المنطقة البنفسجية، بالقرب من 430nm، تقابل الانتقال من مستويات الطاقة التي توجد أسفل أعلى مدار جزيئي مشغول إلى تلك التي توجد أعلى أدنى مدار جزيئي غير مشغول. وفي فترة زمنية قصيرة جداً، تسترخي كل حالات الإثارة تلك للحالة الجزيئية التي بأدنى مدار جزيئي غير مشغول واحد، وتكون نحو 1.88eV فوق حالة الاستقرار.

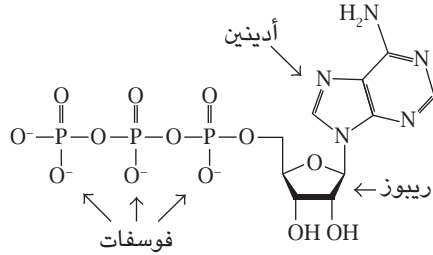
الثنائي الفوسفات لتكوين الأدينوسين الثلاثي الفوسفات. وبإزالة مجموعة فوسفات من الأدينوسين الثلاثي الفوسفات لتكوين الأدينوسين الثنائي الفوسفات، تُطلق طاقة:



فيزياء الطاقة الشمسية



(ب) الأدينوسين ثنائي الفوسفات



(أ) الأدينوسين ثلاثي الفوسفات

شكل ١٠-٣: الأدينوسين الثلاثي الفوسفات والأدينوسين الثنائي الفوسفات: يحتوي كلا الجزيئين على أدينين وريبوز، ومجموعتين أو ثلاث مجموعات من الفوسفات. ويحتاج الأمر لبعض الطاقة لإلحاق مجموعة فوسفات بالأدينوسين الثنائي الفوسفات لتكوين الأدينوسين الثلاثي الفوسفات. وإزالة مجموعة فوسفات من الأدينوسين الثلاثي الفوسفات لتكوين الأدينوسين الثنائي الفوسفات، تُطلق طاقة. ويُعد الأدينوسين الثلاثي الفوسفات «البطارية القابلة لإعادة الشحن» العامة في النظم البيولوجية.

عُزل هذان الجزيئان في عام 1929 من أنسجة عضلية. وفي عام 1940، افترض فريتس ليبمان (الذي نال جائزة نوبل في الفسيولوجيا والطب عام 1953) أن الأدينوسين الثلاثي الفوسفات هو عملة الطاقة العامة في الخلايا. على سبيل المثال، عندما يقوم أي شخص بتدريب هوائي، يتأكسد الجلوكوز من خلال الأكسجين الموجود في الدم ويتحول إلى ثاني أكسيد الكربون وماء، وفي الوقت نفسه يُطلق طاقة. وتُخزن الطاقة على نحو مؤقت على هيئة الأدينوسين الثلاثي الفوسفات. ثم يدفع الأدينوسين الثلاثي الفوسفات المزود بالطاقة عملية انقباض العضلات.

افترض دانيال آرنون الدور الرئيسي للأدينوسين الثلاثي الفوسفات في عملية التمثيل الضوئي في خمسينيات القرن العشرين. وقد قوبلت فكرته بكثير من الشك. ثم قام زميل له في نفس الجامعة، جامعة بيركلي، ملفين كلفن، بسلسلة من التجارب واكتشف عملية التمثيل الضوئي وتحقق من افتراض آرنون.

يلعب جزيء الأدينوسين الثلاثي الفوسفات دورًا مهمًا للغاية في علم طاقة الحياة لدرجة أن شرح آلية إنتاجه جعل صاحبها بول دي بوير وجون إي ووكر يحصلان على

جائزة نوبل في الكيمياء لعام 1997، وقد أطلقت مجلة «ساينس» عليه في عام 1998 لقب «جزء العام».

(٣-١) فوسفات ثاني نيوكليوتيد الأدينين والنيكوتيناميد وفوسفات ثاني نيوكليوتيد الأدينين والنيكوتيناميد المختزل

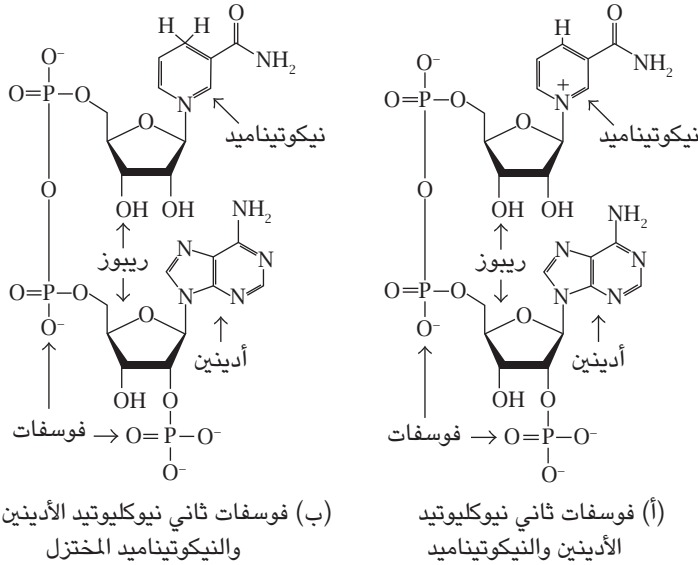
إلى جانب انتقال الطاقة، هناك حاجة أيضًا لاختزال ثاني أكسيد الكربون إلى هيدريد الكربون من أجل إنتاج الجلوكوز. وعامل الاختزال في هذه العملية هو فوسفات ثاني نيوكليوتيد الأدينين والنيكوتيناميد المختزل (NADPH)، الذي يمكن أن يُطلق ذرة هيدروجين مع إلكترون ويصبح فوسفات ثاني نيوكليوتيد الأدينين والنيكوتيناميد (NADP⁺). وكلا الجزيئين يحتويان على مجموعة نيكوتيناميد ومجموعة أدينين ومجموعتي ريبوز وثلاث مجموعات فوسفات (انظر الشكل ١٠-٤).

(٤-١) دورة كلفن

في أربعينيات القرن العشرين وخمسينياته، قام ملفين كلفن وزملاؤه بسلسلة من التجارب باستخدام أحد نظائر الكربون وتوصلوا إلى مسار عملية التمثيل الضوئي. فبالإضافة لـ $^{14}\text{CO}_2$ لسائل يحتوي على الطحلب الأخضر كلوريل البرينويدوزا وباستخدام مخططين كروماتوغرافيين ورقيين ثنائيي الأبعاد، حدث تتبع للجزيئات التالية لعملية التمثيل الضوئي من خلال النشاط الإشعاعي لذرات ^{14}C . وبالنسبة لتفاصيل العملية، أو ما يُطلق عليه «دورة كلفن»، فهي معقدة إلى حد ما. وأقترح أن يرجع القراء المهتمون بهذا الموضوع لكتاب بلانكنشيب [11] أو الفصل الرابع والعشرين من كتاب فوت [86]. سنعرض هنا بعض النقاط الرئيسية في دورة كلفن فيما يتعلق بعمليات انتقال الطاقة:

يعرض الشكل ١٠-٥ الخطوات الأساسية في دورة كلفن. إن أهم اكتشاف في تجارب كلفن هو أن تثبيت الكربون من ثاني أكسيد الكربون يؤدي إلى إنتاج جزيئين متماثلين ثلاثيي الكربون (3-فوسفوجليسيرات) بإدخال ذرة كربون ثم تكسير جزيء خماسي الكربون (ريبولوز-1,5-ثاني الفوسفات). تُسمى الخطوة الأولى في دورة كلفن «تثبيت الكربون». وتتمثل الخطوة التالية في اختزال المجموعة الكربوكسيلية لتكوين فوسفات الترايوز باستخدام فوسفات ثاني نيوكليوتيد الأدينين والنيكوتيناميد المختزل. تتطلب

فيزياء الطاقة الشمسية



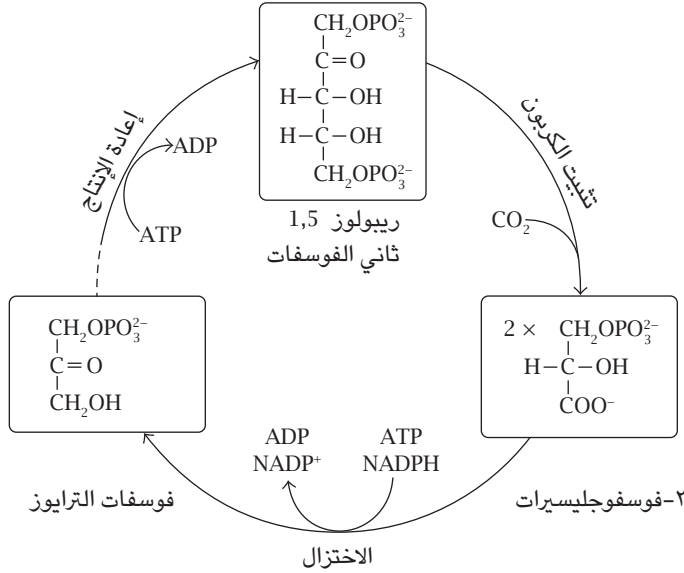
شكل ١٠-٤: فوسفات ثاني نيوكليوتيد الأدينين والنيكوتيناميد وفوسفات ثاني نيوكليوتيد الأدينين والنيكوتيناميد المختزل: كلا الجزيئين يحتويان على مجموعة نيكوتيناميد ومجموعة أدينين ومجموعتي ريبوز وثلاث مجموعات فوسفات. فوسفات ثاني نيوكليوتيد الأدينين والنيكوتيناميد المختزل لديه ذرتا هيدروجين في موقع على مجموعة النيكوتيناميد. وأثناء عملية الاختزال، يُطلق ذرة هيدروجين مع إلكترون ويصبح فوسفات ثاني نيوكليوتيد الأدينين والنيكوتيناميد.

العملية الكاملة لإنتاج الجلوكوز تكرر عملية تثبيت الكربون ست مرات. وفي كل مرة، يجب إعادة إنتاج الجزيء الخماسي الكربون (ريبولوز-1,5-ثاني الفوسفات) للإعداد لعملية تثبيت الكربون التالية. ويتطلب الأمر من 9 إلى 10 فوتونات لإتمام عملية تثبيت كل ذرة كربون في المنتج النهائي، على سبيل المثال، الجلوكوز.

(٥-١) النباتات الرباعية الكربون في مقابل النباتات الثلاثية الكربون

في دورة كلفن التقليدية، هناك تفاعل بديل في خطوة تثبيت الكربون، وهو أن جزيء أكسجين يمكن أن يأخذ دور ثاني أكسيد الكربون وينتج منتجين مختلفين؛ الأول بثلاث

الكيمياء الضوئية الشمسية



شكل ١٠-٥: الخطوات الأساسية في دورة كلفن: لدورة كلفن ثلاث خطوات أساسية. تتمثل الخطوة الأولى، «تثبيت الكربون»، في إدراج جزيء ثاني أكسيد كربون في جزيء مكون من خمس ذرات كربون ومجموعتي فوسفات. وينقسم الجزيء الناتج إلى جزيئين متماثلين يتكون كل منهما من 3 ذرات كربون. وفي الخطوة التالية، يُختزل الجزيء بفعل فوسفات ثاني نيوكليوتيد الأدينين والنيكوتيناميد المختزل. وتكرر العملية ست مرات لإنتاج جزيء جلوكوز. وفي كل مرة، يجب إعادة إنتاج الجزيء الخماسي الكربون (ريبيلوز-1,5-ثاني الفوسفات) للإعداد لعملية تثبيت الكربون التالية.

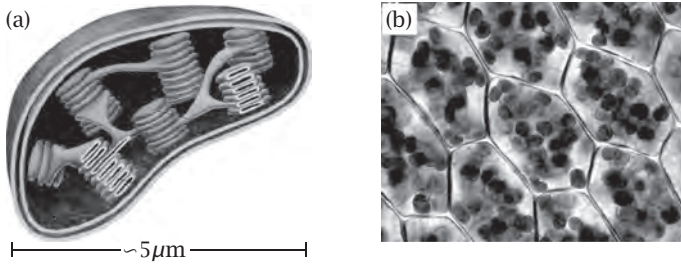
ذرات كربون والآخر بذرتي كربون. وتقلل العملية التي تستخدم الأكسجين، التي يُطلق عليها «التنفس الضوئي»، من كفاءة عملية التمثيل الضوئي.

في بعض النباتات، مثل الذرة وقصب السكر، تحدث عملية أفضل في خطوة تثبيت الكربون للتحايل على عملية التنفس الضوئي، وذلك من خلال آلية ضخ ثاني أكسيد الكربون التي تنتج كسرتين جزيئيتين متماثلتين تتكون كل منهما من 4 ذرات كربون. ولأن المنتج الأساسي لعملية تثبيت الكربون هو جزيء رباعي ذرات الكربون وليس ثلاثي ذرات الكربون، فإن هذا الشكل المختلف من دورة كلفن يُسمى دورة رباعية الكربون وتُسمى النباتات مثل الذرة وقصب السكر النباتات الرباعية الكربون. وخاصةً في ظل

درجة حرارة عالية وبيئات ذات معدل تشميس عالٍ، تكون كفاءة عملية التمثيل الضوئي للنباتات الرباعية الكربون أعلى بكثير من تلك الخاصة بغالبية النباتات التي لديها دورة ثلاثية الكربون [11].

(٦-١) البلاستيدات الخضراء

في النباتات، تحدث خطوات عملية التمثيل الضوئي وتوجد محتوياتها في وحدات طبقية الشكل تُسمى «البلاستيدات الخضراء»؛ انظر الشكل ٦-١٠ (a). إن للبلاستيدة الخضراء، التي بحجم قياسي قدره $5\mu\text{m}$ ، تركيباً واضح المعالم لتسهيل تدفق الماء وثنائي أكسيد الكربون والمنتجات. بوجه عام، تحتوي أي خلية ورقية على 20 إلى 60 بلاستيدة خضراء؛ انظر الشكل ٦-١٠ (b). ويمكن أن يشتمل مقطع حجمه 1mm^2 في أي ورقة ذرة قياسية على عدد كبير من البلاستيدات الخضراء قد يصل إلى نصف مليون.

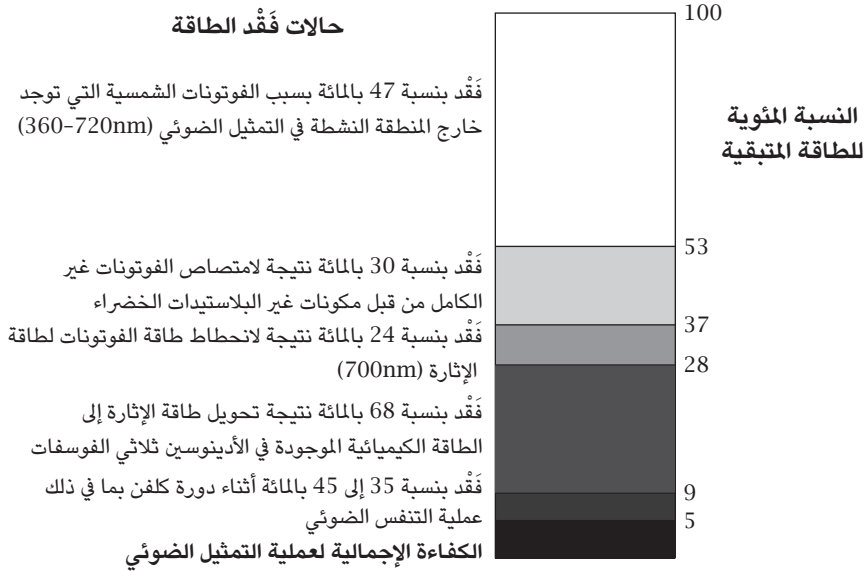


شكل ٦-١٠: البلاستيدات الخضراء: (a) تحدث خطوات عملية التمثيل الضوئي في النباتات في البلاستيدة الخضراء. وللبلاستيدة الخضراء، التي بحجم قياسي قدره $5\mu\text{m}$ ، تركيب واضح المعالم لتسهيل تدفق الماء وثنائي أكسيد الكربون والمنتجات. (b) تحتوي أي خلية ورقية على 20 إلى 60 بلاستيدة خضراء.

(٧-١) كفاءة عملية التمثيل الضوئي

من وجهة نظر هندسية، تُعد كفاءة عملية التمثيل الضوئي عاملاً مهماً. ونعني بالكفاءة نسبة الطاقة الكيميائية لمنتجات عملية التمثيل الضوئي والطاقة الشمسية الساقطة على الأوراق.

يعرض الشكل ١٠-٧ نتائج دراسة قام بها بولتون وهول [12]. يرجع الفقد الأول لنطاق الطول الموجي. ويمتص الكلوروفيل فقط أقل من نصف الإشعاع الشمسي؛ أي الضوء الأحمر والضوء البرتقالي والضوء الأزرق. أما الباقي، فليس له أي تأثير. أما الفقد الثاني، فيرجع للاسترخاء. وكما هو موضح في الشكل ١٠-٢، يسترخي الجزيء المثار بسرعةٍ للحالة التي لها أدنى مدار جزيئي غير مشغول واحد، والتي تكون عند نحو 1.8eV. ويجب أن تُخزّن الطاقة الموجودة في حالة الإثارة للكلوروفيل على نحو مؤقت على هيئة طاقة كيميائية قابلة للاستخدام، الطاقة الموجودة في الأدينوسين الثلاثي الفوسفات وفوسفات ثاني نيوكليوتيد الأدينين والنيكوتيناميد المختزل، التي تكون عند نحو 0.54eV لكل جزيء. تُفقد 68 بالمائة من الطاقة. كفاءة دورة كلفن أيضًا ليست كاملة؛ حيث يُفقد ما يتراوح بين 35 و45 بالمائة من الطاقة؛ ونتيجة لذلك، تصل الكفاءة الإجمالية إلى نحو 5 بالمائة.



شكل ١٠-٧: كفاءة عملية التمثيل الضوئي: تصل الكفاءة الإجمالية لعملية التمثيل الضوئي إلى نحو 5 بالمائة. لاحظ أن أكبر نسبة فَقْد ترجع لتحويل طاقة الإثارة في الكلوروفيل إلى الأدينوسين الثلاثي الفوسفات؛ أي شحن البطارية البيولوجية القابلة لإعادة الشحن، ونطاق الطول الموجي المحدود لطيف امتصاص الكلوروفيل [12].

على الرغم من أن القيمة العددية للكفاءة تبدو هزيلة، ونظرًا للمساحة الهائلة للأرض المغطاة بالنباتات، فإن الإنتاج الإجمالي للطاقة الكيميائية من قبل عملية التمثيل الضوئي عبر العالم سنويًا يساوي $3 \times 10^{21} \text{ J}$ ، الذي يزيد 6 مرات عن إجمالي الاستهلاك العالمي للطاقة في عام 2008.

لمقارنة عملية التمثيل الضوئي بعمليات استخدام الطاقة الشمسية الأخرى، فإن المقياس الذي عادة ما يُستخدم هو «كثافة القدرة» بـ W/m^2 ، وهي الطاقة الكيميائية المنتجة سنويًا على متر مربع من الأرض مقسومة على عدد الثواني الموجودة في العام الواحد. لاحظ أن المنتج النهائي القابل للاستخدام، على سبيل المثال، السكر أو الديزل الحيوي، هو جزء صغير فقط من الناتج الكيميائي الإجمالي لعملية التمثيل الضوئي. وجزء كبير من منتجات هذه العملية، مثل الجذور والأفرع والأوراق، غير مفيد. يعتمد الجدول ١٠-١ على بيانات قدمها تقرير نشره برنامج الأمم المتحدة الإنمائي [72]. وللمقارنة، ضمنا أيضًا بيانات الإشعاع الشمسي الإجمالي وكثافة قدرة الخلايا الشمسية القياسية. ومتوسط معدل التشميس يصل إلى 1500 h/year . ومتوسط كفاءة الخلية الشمسية المصنوعة من السيليكون البلوري يصل إلى 15 بالمائة. وما زالت كفاءة طاقة الكتلة الحيوية أقل بكثير من تلك الخاصة بالخلايا الشمسية القياسية، لكن تكلفة النباتات أقل بكثير من تلك الخاصة بالخلايا الشمسية.

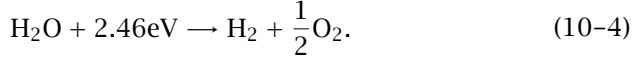
جدول ١٠-١: كثافة قدرة عملية التمثيل الضوئي.*

العنصر	كثافة الطاقة	كثافة القدرة
الوحدة	(MJ/year/m^2)	(W/m^2)
الإشعاع الشمسي المتوسط	5400	171
الخلية الشمسية المتوسطة المصنوعة من السيليكون	810	25.6
الخشب (الغابات التجارية)	3-8	0.095-0.25
بذور اللفت (شمال غرب أوروبا)	5-9	0.16-0.29
قصب السكر (البرازيل وزامبيا)	40-50	1.27-1.58

* المصدر: «تقييم الطاقة في العالم: الطاقة وتحدي الاستدامة»، برنامج الأمم المتحدة الإنمائي، 2000 [72].

(٢) التمثيل الضوئي الاصطناعي

لعدة عقود، أخذ العلماء يحاولون محاكاة عملية التمثيل الضوئي المبهرة لتحويل ضوء الشمس إلى وقود يمكن تخزينه واستخدامه، على سبيل المثال، في النقل. والطريقة الأكثر دراسة هي استخدام ضوء الشمس في تقسيم الماء إلى هيدروجين وأكسجين:



يمكن استخدام الهيدروجين مباشرة باعتباره وقودًا نظيفًا. وبمجرد إنتاج الهيدروجين، يمكن ربطه مع ثاني أكسيد الكربون لإنتاج وقود سائل؛ ومن ثم إذا أمكن تنفيذ هذه العملية، فستعد ثورة حقيقية.

الوضع الراهن والصعوبات الحالية لهذه الطريقة معروضان بإيجاز في ورقة بحثية [6]. ما زال الانقسام المباشر للماء إلى هيدروجين وأكسجين بفعل ضوء الشمس حلمًا بعيدًا. وتتمثل إحدى الطرق المتحقق منها معملياً لإنتاج الهيدروجين والأكسجين بكمية كبيرة في توليد الكهرباء باستخدام الخلايا الشمسية ثم تقسيم الماء باستخدام التحليل الكهربائي، ولكن نظرًا للتكلفة العالية والكفاءة المنخفضة لتلك الطريقة، فهي لا يمكن مقارنتها مع طرق تخزين الطاقة الأخرى، مثل البطاريات القابلة لإعادة الشحن (انظر الفصل الثاني عشر).

(٣) الطحالب المعدلة وراثيًا

على الرغم من أن التمثيل الضوئي الاصطناعي يتطور ببطء، فهناك طريقة بديلة تستخدم التكنولوجيا الحيوية يبدو أنها واعدة للغاية. والتركيز هنا على الطحالب. والطحالب — باعتبارها مصدرًا لوقود حيوي — لها عدة مزايا؛ أولاً: هي تعيش في الماء ومن ثم لا تشغل أرضًا مزروعة أو تحتاج لري. ثانيًا: يمكن أن تشتمل على نسبة عالية جدًا من الزيت، قد تصل إلى 50 بالمائة. ثالثًا: مسألة التخلص من الفضلات قد تكون محدودة للغاية. ويمكن أن يكون إنتاج الزيت سنوياً لكل وحدة مساحة من الطحالب أكبر عدة مرات حتى من أكثر النباتات المزروعة كفاءةً في إنتاج الزيت، ألا وهو: زيت النخيل. ومؤخرًا، حظي استخدام الطحالب المعدلة وراثيًا لإنتاج الوقود السائل باهتمام كبير. وعبر التعديل الوراثي إلى جانب الانتخاب الموجه، يمكن إنتاج أنواع جديدة من الطحالب أو إدخال

تعديلات وراثية على أخرى موجودة ستتمو أسرع وتحتوي على وقود أكبر وتكون سهلة في حصادها. ولعرفة التفاصيل، اطلع على تقرير أصدرته وزارة الطاقة الأمريكية [25].

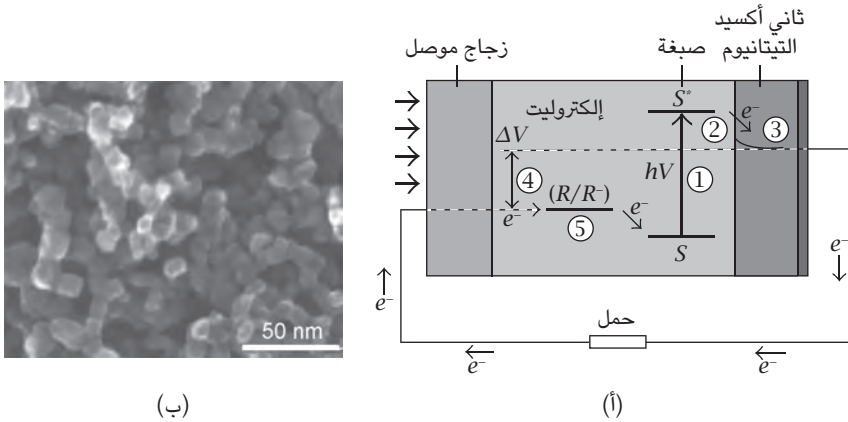
(٤) الخلايا الشمسية الصبغية

ألهمت آلية عمل عملية التمثيل الضوئي ابتكار نوع جديد من الخلايا الشمسية، ألا وهو: «الخلايا الشمسية الصبغية» [32, 33, 64]. وهو يملك عدة مزايا يتفوق بها على الخلايا الشمسية الشائعة المصنوعة من السيليكون البلوري. وقد انخفضت تكلفة المواد والمعالجة الخاصة بتلك الخلايا على نحو كبير؛ لأن الجانب الأكبر من العملية يحدث عن طريق ترسيب الطور السائل وليس في فراغ. وبالإضافة إلى ذلك، يمكن إنشاؤها على ركائز مرنة خفيفة الوزن. وحاليًا، هي تحقق إجمالي كفاءة تحويل إشعاع شمسي لكتلة هواء 1.5 طاقة كهربية بنسبة تصل إلى نحو 10 بالمائة.

لقد استُخدم تحسس أشباه الموصلات للضوء بطول موجي أطول من ذلك المقابل لفجوة النطاق في التصوير الفوتوغرافي والكيمياء الكهربائية الضوئية. فلهاييدات الفضة المستخدمة في التصوير الفوتوغرافي فجوات نطاق تتراوح بين 2.7eV و 3.2eV، كما أنها ليست حساسة لمعظم الطيف المرئي. وصُنعت الأفلام البانكروميتية بإضافة صبغات لتحسيس هالييدات الفضة؛ مما جعلها حساسة للضوء المرئي.

يظهر التركيب القياسي للخلية الشمسية الصبغية في الشكل ١٠-٨. ولشبه الموصل الأكثر استخدامًا، ثاني أكسيد التيتانيوم (TiO_2)، مزايا عديدة للكيمياء الكهربائية الضوئية والكيمياء الضوئية المحسنة؛ فهو مادة منخفضة التكلفة ومتاحة على نطاق واسع وغير سامة وملائمة حيويًا؛ لذا فهو يُستخدم أيضًا في منتجات العناية بالصحة والتطبيقات المنزلية مثل صباغة الدهانات. وتقع فجوة النطاق، 3.05eV، المقابلة لطول موجي قدره 400nm، في المنطقة فوق البنفسجية القريبة، وهي عالية جدًا بالنسبة للطيف الشمسي؛ لذا تكون هناك حاجة لإحدى الصبغات للتعامل مع هذه المشكلة.

والمُحسَّس المثالي لخلية كهروضوئية، ذات وصلة واحدة تحول ضوء شمس عام قياسي لكتلة هواء 1.5 إلى كهرباء، يجب أن يمتص كل الضوء الذي يوجد أسفل طول موجي حدي قدره نحو 920nm. بالإضافة إلى ذلك، يجب أيضًا أن يحمل مجموعات ربط مثل الكربوكسيلات أو الفسفونات كي يلتحم بإحكام بالسطح الأكسيدي شبه الموصل. وعند الإثارة، يجب أن يُدخل إلكترونات للجزء الصلب بناتج كمي قدره 1 تقريبًا. ويجب



شكل ١٠-٨: تركيب خلية شمسية صبغية: (أ) تُنشأ الخلية فوق ركيزة من الزجاج ذات غشاء موصل. ويُضاف غشاء من ثاني أكسيد التيتانيوم مُنشأ باستخدام تقنية النانو بحجم الحبة الذي يصل إلى نحو 15nm وسُمك يصل إلى نحو 10µm فوق هذا الغشاء الموصل. وتُرسب جزيئات صبغة ذات نطاق امتصاص قوي في المنطقة المرئية فوق سطح من جسيمات نانوية من ثاني أكسيد التيتانيوم. والإلكترود المضاد غشاء من أكسيد موصل شفاف. وتُملأ المنطقة فيما بين الكاثود والأنود بالإلكترود، يكون بوجه عام محلولاً من يوديد الليثيوم. (ب) صورة ميكروسكوبية لغشاء من ثاني أكسيد التيتانيوم. تسير عملية توليد الطاقة الكهربائية على النحو التالي؛ أولاً: يحدث امتصاص لفوتون من قبل الصبغة لرفع إلكترون لحالة الإثارة، بوجه عام أدنى مدار جزيئي غير مشغول. ثانياً: يُنقل الإلكترون للغشاء الذي من ثاني أكسيد التيتانيوم. ثالثاً: يحدث استرخاء للإلكترون ليصبح في الجزء السفلي من نطاق توصيل ثاني أكسيد التيتانيوم. رابعاً: تُؤخذ الخلية فرق جهد ضوئي، يقابل الفرق بين مستوى فيرمي في شبه الموصل وجهد نرنست لزوج الاختزال والأكسدة في الإلكتروليت. منقول بتصرف من المرجعين [33] و[64].

أن يتوافق مستوى طاقة حالة الإثارة مع الحد السفلي من نطاق التوصيل للأكسيد لتقليل حالات فقد الطاقة أثناء عملية انتقال الإلكترونات. ويجب أن يكون جهد الاختزال الخاص به عاليًا على نحو كافٍ بحيث يمكن إعادة إنتاجه عبر منح إلكترونات من إلكترونيات الاختزال والأكسدة أو موصل الثغرات. وأخيرًا، يجب أن يكون مستقرًا بالقدر الكافي ليتحمل نحو 20 عامًا من التعرض للضوء الطبيعي. وجانب كبير من البحث في مجال

كيمياء الصبغات موجه لتحديد وتخليق الصبغات التي تتوفر فيها هذه المتطلبات مع الحفاظ على الاستقرار في البيئة الكيميائية الكهربائية الضوئية. وتضمن مجموعة الربط الخاصة بالصبغة أنها ستتجمع على نحو تلقائي على هيئة طبقة جزيئية عند تعريض الغشاء الأكسيدي لحلول صبغية.

من أكثر الصبغات استخدامًا وخضوعًا للدراسة معقد الروثينيوم إن-3 الموضح في الشكل ١٠-٩. يجعل الامتصاص القوي في المنطقة المرئية لون الصبغة أسود عميقًا مائلًا للبنّي، ومن هنا جاء اسمها «الصبغة السوداء». إن الصبغات لديها فرصة رائعة لتحويل الفوتونات إلى إلكترونات، وقد وصلت نسبتهما في البداية إلى نحو 80 بالمائة ولكنها أخذت تتحسن للقيام بعملية تحويل شبه كاملة وذلك في الصبغات الأحدث. تصل الكفاءة الإجمالية إلى نحو 90 بالمائة، وترجع العشرة بالمائة «المفقودة» على نحو كبير إلى حالات الفقد الضوئية في الإلكترود العلوي. وتظهر الاستجابة الطيفية لخلية شمسية صبغية تستخدم صبغة الروثينيوم N3 في الشكل ١٠-٩ (ب). وتظهر أيضًا استجابة التيار الضوئي لغشاء غير مغطى من ثاني أكسيد التيتانيوم للمقارنة.

فيما يلي الخطوات الأربع للعملية الخاصة بتوليد الطاقة الكهربائية (ارجع إلى الشكل ١٠-٨ (أ)):

(١) تمتص الصبغة فوتونًا لرفع إلكترون لحالة الإثارة، بوجه عام إلى أدنى مدار جزيئي غير مشغول.

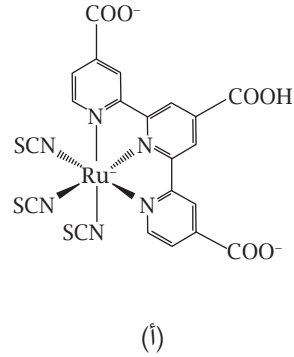
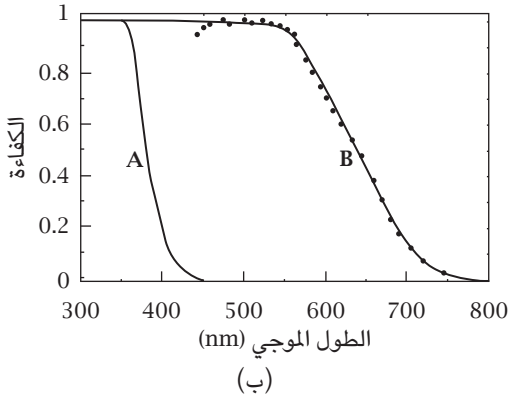
(٢) يُنقل الإلكترون إلى غشاء من ثاني أكسيد التيتانيوم.

(٣) يحدث استرخاء للإلكترون ليصبح في الجزء السفلي من نطاق توصيل ثاني أكسيد التيتانيوم.

(٤) تُؤدّ الخلية فرق جهد ضوئي، يقابل الفرق بين مستوى فيرمي في شبه الموصل وجهد نرنست لزوج الأكسدة والاختزال في الإلكتروليت.

رغم كل ما سبق، فإن للخلايا الشمسية الصبغية بعض العيوب؛ أولاً: تبلغ كفاءتها نحو نصف كفاءة الخلايا الشمسية المصنوعة من السيليكون البلوري. ثانياً: تجعل ضرورة وجود إلكتروليت في الطور السائل الخلية الشمسية ضعيفة من الناحية الميكانيكية. ثالثاً: فإن الاستقرار الطويل الأجل للمواد العضوية ما زال يحتاج لتحسين.

الكيمياء الضوئية الشمسية



شكل ١٠-٩: صبغة الروثينيوم إن-3 وطيف التيار الضوئي: (أ) التركيب الكيميائي لمعقد الروثينيوم إن-3 المستخدم كمُحسّن انتقال الشحنة في الخلايا الشمسية الصبغية. (ب) طيف استجابة التيار الضوئي الناتج مع استخدام الصبغة كمُحسّن، المنحنى ب. وتظهر أيضًا استجابة التيار الضوئي لغشاء غير مغطى من ثاني أكسيد التيتانيوم، المنحنى أ، للمقارنة. منقول بتصرف من المرجعين [33] و[64].

(٥) الخلايا الشمسية العضوية الثنائية الطبقة

هناك طريقة أخرى لتفادي التكلفة العالية للخلايا الشمسية المصنوعة من السيليكون البلوري التي تتمثل في استخدام أشباه موصلات عضوية، أو بوليمرات شبه موصلة، بدلاً من السيليكون النقي الغالي. فيكفي استخدام غشاء رفيع جدًا مصنوع من مادة عضوية؛ وذلك بسبب معامل امتصاصه العالي في المنطقة المرئية. ويمكن ترسيب هذه البوليمرات من خلال الطباعة بالشاشة الحريرية أو الطباعة بنفث الحبر أو الرش، حيث إن تلك المواد عادة ما تكون قابلة للذوبان في مذيب. علاوة على ذلك، يمكن أن تُستخدم تقنيات الترسيب هذه في ظل درجة حرارة منخفضة، مما يسمح بتصنيع وحدات مرنة على ركائز بلاستيكية. ويظهر التركيب الأساسي لأي خلية شمسية عضوية ثنائية الطبقة في الشكل ١٠-١٠(أ). هناك طبقتان من الغشاء البوليمري؛ غشاء من بوليمر ماص — «مانح الإلكترونات» — وآخر «مستقبل للإلكترونات». والطبقتان محشورتان بين غشاء من

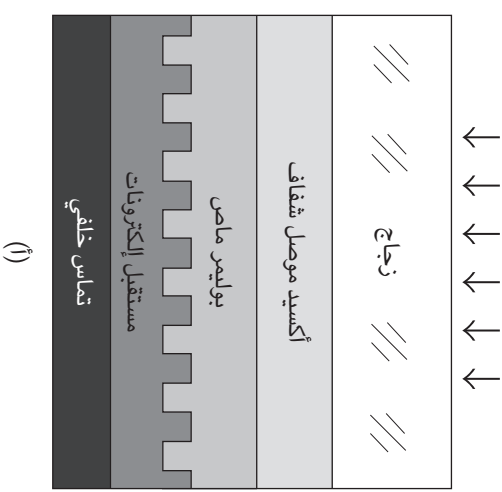
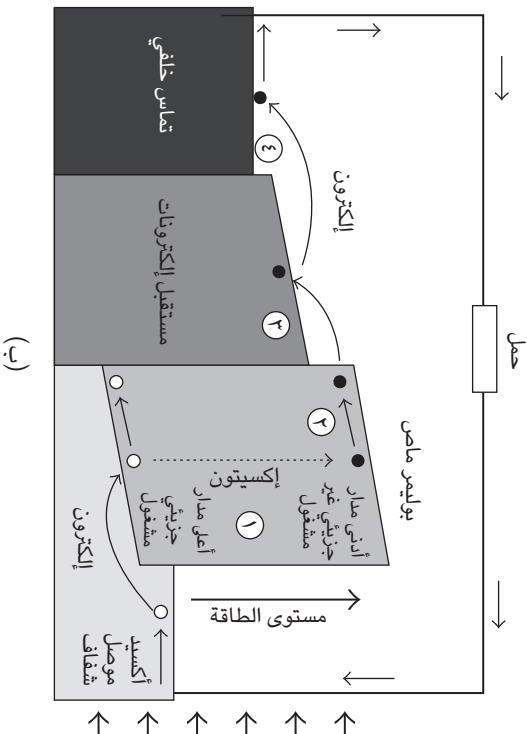
أكسيد موصل شفاف (الأنود)، وغشاء تماس خلفي معدني (الكاثود). وتتكون عملية توليد التيار الضوئي من أربع خطوات؛ انظر الشكل ١٠-١٠ (ب). في الخطوة الأولى: يُمتص فوتون من جانب البوليمر، أو مانح الإلكترونات. ويتولد إكسيتون — زوج إلكترون وثغرة. وفي الخطوة الثانية: ينتشر الإكسيتون داخل البوليمر الماص (المانح) باتجاه السطح ناحية مُستقبل الإلكترونات. في الخطوة الثالثة: ينتقل الإلكترون لمستقبل الإلكترونات. وفي الخطوة الأخيرة: يجمع الكاثود، أو التماس الخلفي، الإلكترون. وعبر الدائرة الكهربائية الخارجية، يرجع الإلكترون للأنود (الأكسيد الموصل الشفاف) ويزيل الثغرة.

في أول خلية شمسية عضوية ثنائية الطبقة ناجحة، استُخدمت مادة فثالوسيانين النحاس (CuPc) للبوليمر الماص [80]. ويظهر التركيب الكيميائي وطيف الامتصاص لهذه المادة في الشكل ١٠-١١. وهو مادة صلبة ذات لون أزرق داكن، حيث إن الإشعاعات الحمراء والصفراء والخضراء والبنفسجية تُمتص بكثافة. ويصل معامل الامتصاص في بعض النطاقات إلى أكثر من 10^6 cm^{-1} ؛ ومن ثم يُستخدم غشاء رفيع جدًا من البوليمر الماص، بوجه عام حجمه نحو 100nm. إن وجود سُمك أكبر على العكس يُعد عيبًا بسبب طول الانتشار القصير، وفيما يلي توضيح هذه النقطة:

تستحق العملية الثانية، انتشار الإكسيتون، اهتمامًا كبيرًا. فبخلاف الخلايا الشمسية المصنوعة من أشباه موصلات، تكون «أطوال انتشار» الإكسيتونات في البوليمرات العضوية قصيرة جدًا؛ بوجه عام من 5-10nm؛ ومن ثم فإن عمر الإكسيتونات قصير جدًا. وإذا كان البوليمر سميكًا جدًا، فقد لا تصل الإكسيتونات المولدة من الإثارة الضوئية لسطح مانح ومستقبل الإلكترونات ثم تختفي. ومن أجل زيادة احتمالية وصول الإكسيتونات لمستقبل الإلكترونات، عادة ما يُستخدم سطح غير مستو؛ انظر الشكل ١٠-١٠ (أ).

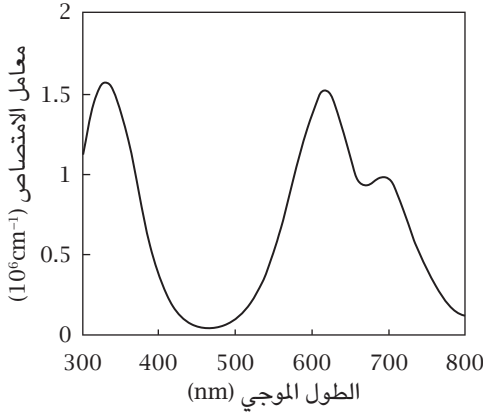
في العملية الثالثة، يتفكك الإكسيتون إلى إلكترون حر وثغرة حرة. ويجب أن تسهل مادة مستقبل الإلكترونات عمليتي التفكك والانتقال الأخير لحامل الشحنة للتماس الخلفي، الكاثود. وفي التجربة الناجحة الأولى لإنشاء خلية شمسية عضوية ثنائية الطبقة، استُخدم أحد مشتقات رباعي كربوكسيليك البيريلين [80]. ولاحقًا، عادة ما يُستخدم بوكيمينستر فوليرين (C_{60}) ومشتقاته [15, 38].

وكما هو الحال بالنسبة للخلايا الشمسية الصبغية، فإن الخلايا الشمسية العضوية الثنائية الطبقة لها عيوب؛ فكفاءتها أقل بمقدار النصف عن كفاءة الخلايا الشمسية المصنوعة من السيليكون البلوري، كما أن الاستقرار الطويل الأجل للمواد العضوية ما زال يحتاج إلى تحسين.

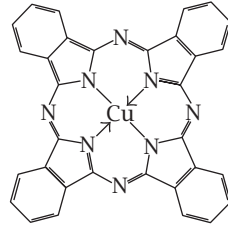


شكل ١٠-١: خلية شمسية عضوية ثنائية الطبقة: (أ) مقطع عرضي للخلية الشمسية. الإشعاع الشمسي يأتي من أعلى، وعبر ركيزة زجاجية وفشاء من أكسيد موصل شفاف، يُمتص الضوء من قبل غشاء البوليمر الماص، أو «مانع الإلكترونات»، وينتقل الإلكترون المولد على هذا النحو إلى «مستقبل الإلكترونات»، ثم إلى غشاء تماس خلفي معدني، أو الكاثود. (ب) خطوات عملية توليد التيار الضوئي؛ أولاً: يولد فوتون إكسيتون؛ على نحو أساسي إلكترونًا في أدنى مدار جزيئي غير مشغول ويترك ثغرة في أعلى مدار جزيئي مشغول. ثانيًا: ينتشر الإكسيتون باتجاه مُستقبل الإلكترونات. ثالثًا: يتفكك الإكسيتون إلى إلكترون حر وثغرة. وفي النهاية، ينتقل الإلكترون إلى الكاثود، ثم يُحرك الدائرة الكهربية الخارجية، منقولًا بصرف من المرجعين [80] و [38].

فيزياء الطاقة الشمسية



(ب)



(أ)

شكل ١٠-١١: فثالوسيانين النحاس وطيف امتصاصه: (أ) التركيب الكيميائي لفثالوسيانين النحاس. (ب) طيف امتصاص غشاء رفيع صلب من فثالوسيانين النحاس. تُمتص الإشعاعات الحمراء والصفراء والخضراء والبنفسجية بكثافة، وتلك المادة لونها أزرق داكن. منقول بتصرف من مرجع [38].

مسائل

(10-1) افترض أن 50 بالمائة من سطح الورقة ممتلئ بالكلوروفيل وأن 30 بالمائة من الفوتونات الشمسية الساقطة على الكلوروفيل تولد الأدينوسين الثلاثي الفوسفات، وأننا نحتاج إلى عشرة من جزيئات الأدينوسين الثلاثي الفوسفات لتوليد سدس الجلوكوز؛ أي وحدة فورماليدهايد. فما كفاءة عملية التمثيل الضوئي هذه؟
تلميح: استخدام صيغة إشعاع الجسم الأسود لحساب متوسط طاقة فوتونات ضوء الشمس. لاحظ أن:

$$\int_0^{\infty} \frac{x^2 dx}{e^x - 1} = 2\zeta(3) = 2.404. \quad (10-5)$$

(10-2) إن تاج شجرة قيقب القياسي هو شكل شبه كروي نصف قطره 5m، إذا كانت عملية التمثيل الضوئي للأوراق موجهة لصناعة الشراب، ففي يوم صيفي مشمس، كم عدد كيلوجرامات شراب القيقب المكثف (الذي يكون 60 بالمائة من وزنه سكرًا) التي يمكن لتلك الشجرة إنتاجها؟

تلميح: إن 1eV يساوي 96.5kJ/mol. استخدم القيمة التجريبية لكفاءة عملية التمثيل الضوئي (5 بالمائة) لحساب الإشعاع الشمسي المطلوب لإنتاج كيلوجرام واحد من الشراب.

الطاقة الحرارية الشمسية

(١) التطبيقات الحرارية الشمسية القديمة

توجد إحدى أقدم حالات توثيق تطبيقات الطاقة الحرارية الشمسية في «قانون تشو» (تشو لي)، وهو وثيقة حكومية عن تنظيم وقوانين أسرة تشو الغربية الصينية (القرن الحادي عشر قبل الميلاد – 771 قبل الميلاد). هناك مدخل في هذا العمل يقول: «يستخدم صانع النار مُشعلاً شمسياً (مرآة شمسية) لإشعال نار باستخدام ضوء الشمس». وأوضح موزي، وهو فيلسوف وفيزيائي من أسرة تشو (468 قبل الميلاد – 376 قبل الميلاد)، الخواص التصويرية للمرايا المقعرة. وقد تُوصل إلى فهم كمي جيد في ذلك الوقت. وحتى اليوم، عُثر على ستة من مثل هذه المُشعّلات الشمسية في عدة مقابر تعود لأسرة تشو الغربية. وقد اكتُشفت أيضاً 16 أخرى تعود لأسرة تشو الشرقية (770 قبل الميلاد – 221 قبل الميلاد). ويعرض الشكل ١-١١ مثلاً، يعود إلى نحو عام 1000 قبل الميلاد، اكتُشف في عام 1995 في مقاطعة فوفونج بإقليم شانسي. يبلغ قطره 90.5mm، ونصف قطر انحنائه 207.5mm وطوله البؤري 103.75mm. المرآة الأصلية كان يعلوها الصدأ، ويعمل نسخة من هذا المُشعل وصبها في البرونز ثم صقله، يمكنها أن تُشعل النار في قطعة من القش باستخدام ضوء الشمس وذلك في بضع ثوانٍ. وقد عُثر على مُشعّلات شمسية مماثلة في ثقافات أخرى تعود للعصر البرونزي عبر العالم.

طبقاً لخرافة يونانية، في عام 212 قبل الميلاد، استخدم أرشميدس المرايا لتركيز ضوء الشمس على سفن أسطول روماني غازي في مدينة سرقوسة وقد أدى هذا إلى تدمير الأسطول. كان استخدام المرايا الحارقة للأغراض العسكرية موضوعاً مفضلاً لعلماء

فيزياء الطاقة الشمسية

منظر جانبي



منظر خلفي



شكل ١١-١: مُشعل شمسي عمره 3 آلاف عام: في عام 1995 في مقاطعة فوفونج بإقليم شانسي، اكتُشف مُشعل شمسي (مرآة شمسية) مصنوع من البرونز يعود لأسرة تشو القديمة ويرجع تاريخه إلى عام 1000 قبل الميلاد. يبلغ نصف قطر انحنائه 207.5mm وطوله البؤري 103.75mm. ويمكن لنسخة منه أن تُشعل النار في قطعة من القش باستخدام ضوء الشمس وذلك في بضع ثوانٍ.

العصور الوسطى وعصر النهضة، لكن التجارب اللاحقة التي أُجريت بدءًا من القرن السابع عشر وحتى القرن التاسع عشر أثبتت أن ضوء الشمس، حتى في وجود التقنيات الحديثة والمرايا الكبيرة، ليس قويًا بالقدر الكافي بحيث يحرق سفنًا موجودة على بعد مسافة معقولة. وهذه القصة على الأرجح خرافة.

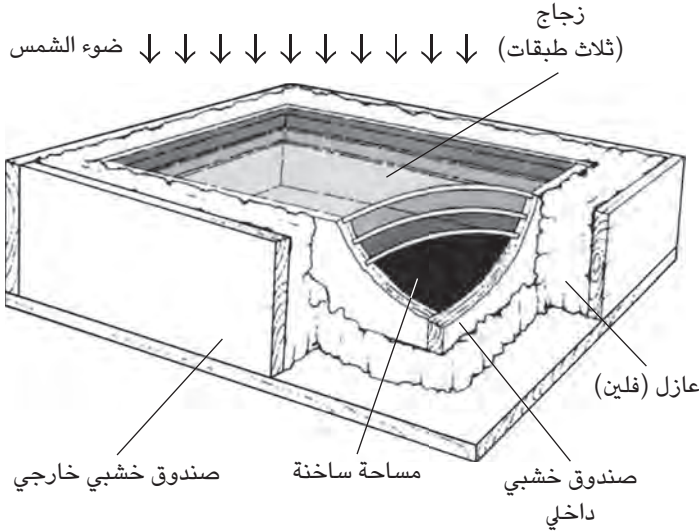
في عام 1767، صمم العالم السويسري الفرنسي هوراس بنديكت دي سوسير ونفذ أول فرن حراري شمسي يمكن استخدامه في الطهي [17]. يعرض الشكل ١١-٢ تصميم هذا الجهاز، وهو مصنوع من صندوقين خشبيين، صندوق صغير داخل آخر كبير، يوجد

بينهما عازل (فلين). والجزء الداخلي من الصندوق الصغير مطلي بالأسود، والجزء العلوي منه مغطى بثلاث طبقات منفصلة من الزجاج، مع وجود هواء بين الطبقات الزجاجية المتجاورة. وبجعل الجزء العلوي من هذا الصندوق مواجهاً للشمس، وتحريكه حتى يصبح الزجاج عمودياً على ضوء الشمس، في بضع ساعات، ستصل درجة الحرارة بداخله إلى ما يزيد عن 100 درجة مئوية. وهكذا، يصبح صندوقاً حرارياً تُسخنه الشمس. ولتحديد مصدر الحرارة، حمل دي سوسير الصندوق الحراري لقمة جبل كارمون. ووجد أنه على الرغم من أن درجة حرارة الهواء هناك أقل بنحو خمس إلى عشر درجات مما هي عليها في الأرض المنبسطة، فإن الجزء الداخلي للصندوق يمكن أن تصل أيضاً درجة حرارته إلى درجة غليان الماء. وقد أرجع هذا التأثير لنقاء الهواء بأعلى الجبل، حيث يكون الإشعاع الشمسي أقوى.

تعد تجربة هوراس دي سوسير إثباتاً لـ «تأثير الدفيئة»، وقد دفعت جوزيف فورييه لتفسير درجة حرارة توازن الأرض من خلال الامتصاص تحت الأحمر للغلاف الجوي للأرض. وقد شرح فورييه نظريته عن تأثير الدفيئة بالقياس بالصندوق الحراري لدي سوسير حيث تحفظ الطبقات الزجاجية الحرارة بداخله.

لكن الصندوق الحراري الخاص بدي سوسير كان بطيئاً جداً في عملية التسخين، ولم تكن درجة حرارته عالية بالقدر الكافي لاستخدامه في عملية الطهي؛ على سبيل المثال، 150 درجة مئوية. وربما كان هذا هو السبب في أنه لم يصبح منتجاً مشهوراً. وكان أول جهاز حراري شمسي يُنتج على نطاق واسع هو الفرن الشمسي الذي اخترعه ديليو آدامز في سبعينيات القرن التاسع عشر في بومباي بالهند [3]. فقد أضاف جهاز تركيز صغيراً للطاقة الشمسية للصندوق الحراري الخاص بدي سوسير، وذلك كما هو موضح في الشكل ١١-٣. وفيه تكون 8 مرايا زجاجية (أ) عاكساً مُثمن الشكل. ويتدفق ضوء الشمس المركز إلى الصندوق الخشبي المغطى بالزجاج (ب)، الذي يشتمل على إناء (ج). تُمِلُّ المرايا والزجاج بحيث تسقط أشعة الشمس عمودية على الصندوق. وعندما تتحرك الشمس، يمكن تدوير الصندوق بحيث يحاذي ضوء الشمس. وفي ورقة بحثية نُشرت في عام 1878 في مجلة «ساينتيفك أمريكان» [3]، قال آدامز: «تُطبخ حصص طعام سبعة جنود، تتكون من لحم وخضراوات، بالكامل باستخدام هذا الفرن وذلك في ساعتين في يناير، الذي يُعد أبرد شهر في العام في بومباي، وقد ذكر الجنود أن الطعام المطهو على هذا النحو أفضل بكثير من ذلك المطهو بالطريقة العادية.» وفي ذلك الوقت، أُنتج فرنه

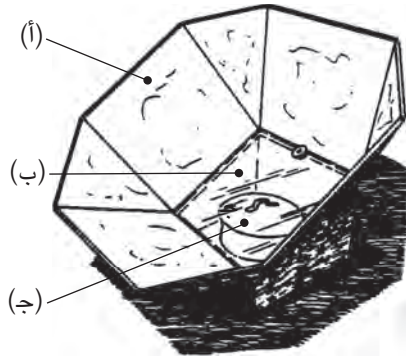
فيزياء الطاقة الشمسية



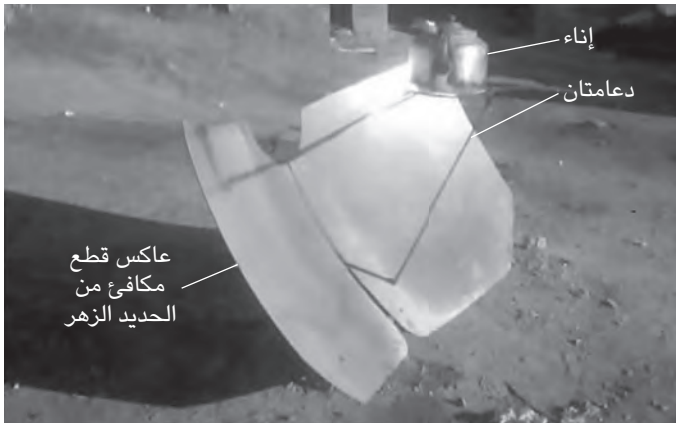
شكل ١١-٢: الصندوق الحراري الخاص بهوراس دي سوسير: في عام 1767، صمم هوراس دي سوسير ونفذ أول جهاز طهي شمسي وهو الصندوق الحراري. ومن خلال ثلاث طبقات من الزجاج، يمكن أن يدخل ضوء الشمس للصندوق، لكن لا يمكن أن تهرب الحرارة منه؛ مما يجعل درجة الحرارة داخله ترتفع لدرجة نقطة غليان الماء. منقول بتصرف من بوتلي وبيزلن [17]، بإذن من جون بيرلن.

الشمسي على نطاق واسع في الهند وذاعت شهرته، وقد أصبح أيضًا منتجًا مشهورًا في الولايات المتحدة واستُخدم في المعسكرات وكجهاز تعليمي للطلاب المراهقين. يظهر الفرن الشمسي الشائع الاستخدام حاليًا في دول العالم الثالث في الشكل ١١-٤. وهو عاكس على شكل قطع مكافئ مصنوع من الحديد الزهر ومطلي بالكروم. تحمل دعامتان من الصلب حاملًا من الصلب يُوضع عليه إناء. ودائمًا ما يُوضع الإناء بالقرب من النقطة البؤرية لطبق القطع المكافئ. وبضبط محور الطبق يدويًا بحيث يصبح محاذيًا لضوء الشمس، يمكن للإناء استقبال أقصى قدر من حرارة الشمس. وهذا النوع من الفرن الشمسي يُنتج على نطاق واسع في شرق الصين، وتُباع أكثر من 10 آلاف وحدة منه سنويًا في منطقة التبت.

الطاقة الحرارية الشمسية



شكل ١١-٣: الفرن الشمسي الخاص بأدامز: في عام 1878، اخترع ديليو آدامز فرنًا شمسيًا في بومباي بالهند. يتكون الجهاز من 8 مرايا مصنوعة من الزجاج المطلي بالفضة (أ) تشكل عاكسًا مُثمنًا. ويُركز ضوء الشمس ويتدفق إلى صندوق خشبي مغطى بالزجاج (ب)، يحتوي على إناء (ج). ويمكن تدوير الصندوق يدويًا بحيث يحاذي ضوء الشمس. ويمكن أن تزيد درجة الحرارة داخل الصندوق عن 200 درجة مئوية [3].



شكل ١١-٤: فرن شمسي مصنوع من حديد الزهر: عاكس على شكل قطع مكافئ من حديد الزهر موضوع على حامل ثلاثي القوائم مزود بمفصلة يمكن أن تُدار في محورين. وتحمل دعامتان من الصلب حاملًا من الصلب يُوضع عليه إناء. وبضبط محور الطبق يدويًا بحيث يصبح محاذيًا لضوء الشمس، يمكن للإناء استقبال أقصى قدر من حرارة الشمس.

في القرن العشرين، اخترع سخان الماء الشمسي وأدخلت عليه تحسينات عديدة، وأصبح مشهوراً على نحو متزايد. وقد عرضنا نبذة تاريخية عنه في الفصل الأول من هذا الكتاب. على الجانب الآخر، تُعد الكهرياء الحرارية الشمسية المُركزة نقطة مضيئة في مجال توليد الطاقة الشمسية. وفي الأقسام التالية، سنستعرض فيزياء تطبيقات الطاقة الحرارية الشمسية.

(٢) المُجمعات الحرارية الشمسية

بالنسبة لكل التطبيقات الحرارية الشمسية، تتمثل الخطوة الأولى في تحويل طاقة الإشعاع الشمسي إلى حرارة. وفيما يتعلّق بالمواد والتركيب الميكانيكي، يكمن المتطلب الأساسي في امتصاص أكبر قدر ممكن من ضوء الشمس وفقد أقل قدر ممكن من الطاقة الحرارية. في هذا الإطار، تُستخدم ثلاث طرق: سطح امتصاص انتقائي، وفراغ لمنع التوصيل والحمل الحراريين، وتركيز ضوء الشمس لتغيير نسبة مساحة السطح الماص ومساحة السطح المُشع.

(١-٢) سطح الامتصاص الانتقائي

في التطبيقات الحرارية الشمسية المبكرة، مثل سخانات الماء الشمسية في أوائل القرن العشرين، كان سطح الامتصاص يُطلى بلون أسود كامد. وباعتباره جسماً أسود، كان بإمكانه امتصاص أقصى قدر من الإشعاع الشمسي. وعندما كان يسخن، كان يفقد طاقة بسبب الإشعاع.

يمكن تمييز طيفي إشعاع الجسم الأسود للشمس وأي جسم ساخن — على سبيل المثال، إناء به ماء مغلي أو سطح ماص حراري شمسي بدرجة حرارة 400 درجة مئوية — على مقياس الطاقة؛ ارجع إلى الجدول ٢-٣ والشكل ٢-٣. ويصبح من البديهي أكثر تمثيل كثافة القدرة الطيفية النسبية على مقياس لوغاريتمي للطول الموجي (ارجع لمسألة 3-2):

$$u(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 [e^{hc/\lambda k_B T} - 1]} \quad (11-1)$$

$$= \frac{3.75 \times 10^8}{\lambda^5 [e^{\lambda_T/\lambda} - 1]} \left(\frac{W}{m^2} \right) \left(\frac{1}{\mu m} \right),$$

بحيث يُعبّر عن كثافة القدرة بـ W/m^2 والطيف فيما يتعلّق بالطول الموجي بالميكرومتر. ويعرض الشكل ١١-٥ لكثافة القدرة الطيفية النسبية لإشعاع شمسي لكثافة هواء 1.5 ولأجسام ساخنة. كما هو واضح، تكون ذروة الإشعاع الشمسي عند نحو $0.5\mu m$. على الجانب الآخر، يكون الإشعاع من جسم ساخن بدرجة حرارة 400 درجة مئوية $4\mu m$ ، ومن ماء مغلي $8\mu m$. ويمكن تمييز طيف إشعاع الجسم الأسود للسائل الساخن عن ذلك الخاص بالإشعاع الشمسي؛ لذا بتصميم مادة لها امتصاصية عالية لطول موجي أقصر من $2\mu m$ وانبعائية قليلة لطول موجي أطول، يمكن زيادة امتصاص الإشعاع الشمسي لأقصى حد وتقليل فقده لأقل حد.

في أدبيات الطاقة الشمسية، عادة ما يُوصف السطح من خلال «انعكاسيته» عند أطوال موجية مختلفة، $R(\lambda)$. وسطح امتصاص التطبيقات الحرارية الشمسية يكون معتمًا. ويحتم مبدأ حفظ الطاقة أن يساوي حاصل جمع الانعكاسية والامتصاصية 1:

$$R(\lambda) + A(\lambda) = 1; \quad (11-2)$$

ارجع إلى المعادلة 2-5. طبقًا لقانون كيرشوف، تساوي انبعائية أي سطح امتصاصيته (ارجع إلى المعادلة 3-5):

$$E(\lambda) = A(\lambda). \quad (11-3)$$

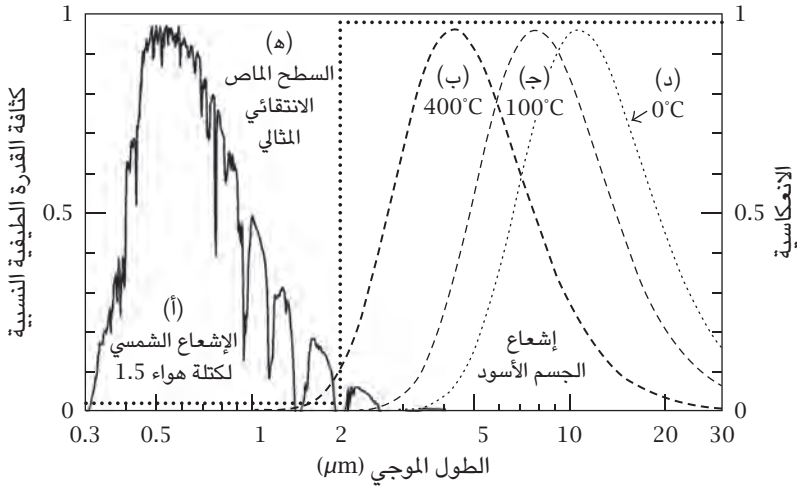
من ثمّ يتمثّل المتطلّب الأساسي لأي سطح امتصاص انتقائي مثالي في انعكاسية منخفضة لأطوال موجية أقصر من $2\mu m$ وانعكاسية عالية لأطوال موجية أطول. تُعرف كميتان لابعديتان لوصف الأداء العام لسطح الامتصاص الانتقائي وذلك كما يلي: تُعرف الامتصاصية الشمسية α كما يلي:

$$\alpha = \frac{\int_0^\infty u_\odot(\lambda) [1 - R(\lambda)] d\lambda}{\int_0^\infty u_\odot(\lambda) d\lambda}, \quad (11-4)$$

بحيث تكون كثافة قدرة الإشعاع الشمسي $u_\odot(\lambda)$ كثافة القدرة الطيفية العادية المباشرة لكثافة هواء 1.5. وتُعرف الانبعائية الحرارية ε كما يلي:

$$\varepsilon = \frac{\int_0^\infty u(\lambda, T) [1 - R(\lambda)] d\lambda}{\int_0^\infty u(\lambda, T) d\lambda}, \quad (11-5)$$

فيزياء الطاقة الشمسية



شكل ١١-٥: كثافة القدرة الطيفية للإشعاع الشمسي والأجسام الساخنة: (أ) الكثافة الطيفية للإشعاع الشمسي تتركز عند أطوال موجية أقصر من $2\mu\text{m}$. (ب) وحتى (د) الكثافة الطيفية للأجسام على الأرض، حتى عند درجة حرارة 400 درجة مئوية، تتركز عند أطوال موجية أكبر من $2\mu\text{m}$. (هـ) السطح الماص الانتقائي المثالي جسم أسود مثالي لطول موجي أقل من $2\mu\text{m}$ ومرآة مثالية لطول موجي أكبر من $2\mu\text{m}$.

بحيث يكون $u(\lambda, T)$ هو إشعاع الجسم الأسود للجهاز الشمسي عند درجة حرارة T والمُعَرَّف في معادلة 11-1. ويمكن حساب كفاءة التحويل الحراري الضوئي باستخدام الصيغة التالية:

$$\eta = \alpha - \varepsilon \frac{\sigma T^4}{CI_{\odot}}, \quad (11-6)$$

بحيث σ هو ثابت ستيفان-بولتزمان و T هي درجة حرارة المُجمَع الحراري الشمسي و C هو عامل التركيز و $I_{\odot}$ هي كثافة قدرة الإشعاع الشمسي، بقيمة قياسية قدرها 1kW/m^2 في يوم مشمس في ظل سقوط عمودي.

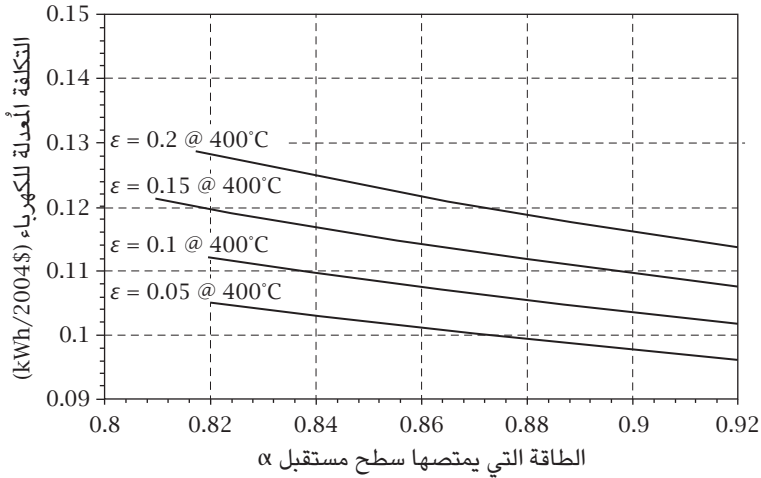
منذ أن طُرح مفهوم «سطح الامتصاص الانتقائي» في خمسينيات القرن العشرين، أصبح مشروعًا دوليًا يخضع لبحث مكثف، خصوصًا في الولايات المتحدة الأمريكية وإسرائيل وأستراليا. وللحصول على عرض له يشتمل على قائمة كبيرة من المراجع، انظر المرجع [41]. وللحصول على معالجة منهجية للنظرية والعمليات، انظر المرجع [47]. ومنحنى الامتصاص الانتقائي المثالي هو الخط المتقطع في الشكل ١١-٥، بحيث α تساوي 1، و ϵ تساوي صفرًا. ومع ذلك، تُوصل إلى نتائج جيدة جدًا. وما زال هناك اهتمام بحثي كبير في هذا الشأن، وبخاصة فيما يتعلق بتطبيقات الكهرباء الحرارية الشمسية حيث يجب أن تكون درجة حرارة السائل عالية قدر الإمكان. وطبقًا لمبادئ الديناميكا الحرارية الأساسية، تتمثل الكفاءة القصوى في كفاءة كارنو (ارجع إلى المعادلة 19-6):

$$\eta_c = 1 - \frac{T_L}{T_H}. \quad (11-7)$$

على سبيل المثال، إذا كانت درجة حرارة السائل الذي يُسخّنه الإشعاع الشمسي أعلى بأربعين درجة مئوية من درجة الحرارة المحيطة عند 20 درجة مئوية (293K)، فستصل الكفاءة القصوى للمحرك الحراري إلى 12 بالمائة. ويجب أن تتراوح درجة حرارة السائل بين 400 و500 درجة مئوية في المجمع الحراري الشمسي. ومع ذلك، عند درجة الحرارة هذه، يكون فقد الإشعاع أعلى على نحو كبير. ويعرض الشكل ١١-٦ تقديرًا لتأثير الامتصاصية الشمسية α والانبعائية الحرارية ϵ على التكلفة المعدلة للكهرباء المُولدة من خلال نظام حراري شمسي (أي، سعر الكيلو واط على فترة التشغيل الكاملة). وكما هو واضح، يُعد تحسين طلاء الامتصاص الانتقائي عاملاً مهمًا لتحقيق تكافؤ الشبكة. فيما يلي المتطلبات الخاصة بطلاء الامتصاص الانتقائي:

- (١) امتصاصية شمسية عالية؛ على نحو مثالي، α تتراوح بين 90 و97 بالمائة.
- (٢) انبعائية حرارية منخفضة؛ على نحو مثالي، ϵ تتراوح بين 3 و10 بالمائة.
- (٣) عمر طويل في ظل درجة حرارة التشغيل؛ على سبيل المثال، 30 عامًا عند درجة حرارة 400 درجة مئوية.
- (٤) استقرار في الهواء.
- (٥) انخفاض تكلفة التصنيع على نطاق واسع.

فيزياء الطاقة الشمسية



شكل ١١-٦: تأثير الامتصاص الانتقائي على الأجهزة الحرارية الشمسية: التأثير المقدر للامتصاصية الشمسية α والانبعاثية الحرارية ϵ على التكلفة المعدلة للكهرباء المُولدة من خلال نظام حراري شمسي. وكما هو واضح، يُعد تحسين طلاء الامتصاص الانتقائي عاملاً مهماً لتحقيق تكافؤ الشبكة. نقلاً عن مرجع [41].

وهناك أنواع متعددة من أسطح الامتصاص الانتقائي:

- (١) الأسطح الماصة الانتقائية النقية مثل أشباه الموصلات.
- (٢) المرآة المعدنية المغطاة بطبقة امتصاص رقيقة.
- (٣) غشاء رفيع شفاف على نافذة زجاجية.
- (٤) غشاء تداخل متعدد الطبقات.

ونظراً للاستقرار والتباين العالين والسهولة النسبية فيما يتعلق بالإنتاج على نطاق واسع للمرايا المعدنية المغطاة بطبقة امتصاص رقيقة، فهي تُعد أشهر أنواع أسطح الامتصاص الانتقائي. ويمكن صنع المرايا من أي معدن له انعكاسية عالية للإشعاع تحت الأحمر مثل النحاس أو الألومنيوم أو النيكل أو الصلب المقاوم للصدأ. ويُصنع غشاء الامتصاص من أكاسيد المعادن وتُسمى تلك المرايا «المرايا المظلمة».

يعرض الجدول ١١-١ العديد من المرايا المظلمة التجارية والمدروسة بعناية. تُنتج الحالات الثلاث الأولى، النيكل الأسود والكروم الأسود والنحاس الأسود، من خلال عملية معالجة في طور السائل وتكون مستقرة في الهواء، حتى بضع مئات من الدرجات المئوية. تجب معالجة النظام المصنوع من الألومنيوم ونتريد الألومنيوم في غرفة مفرغة ويكون مستقرًا في فراغ، حتى 500 درجة مئوية. وهو مناسب على نحو خاص لنظم الامتصاص الحراري ذات الأنبوب المفرغ؛ لأن من الممكن ترسيب الألومنيوم ونتريد الألومنيوم في نفس غرفة المعالجة. وتتم الخطوة الأولى، ترسيب الألومنيوم، في فراغ. ثم من خلال الاستنزاف المُحكم للنتروجين، يمكن إنشاء غشاء ذي جودة جيدة من نتريد الألومنيوم. ولأن الطلاء الانتقائي يعمل في فراغ، فهو لا يتلف.

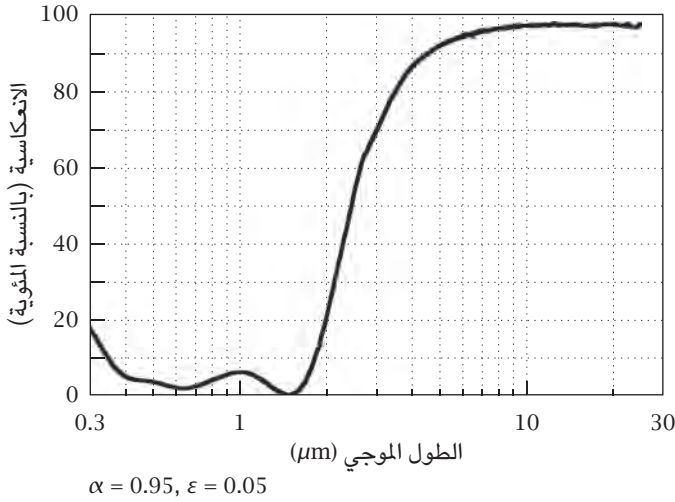
جدول ١١-١: أسطح امتصاص انتقائي*.

النظام	المراة	السطح الماص	الامتصاصية	الانبعاثية
النيكل الأسود	النيكل أو الصلب	كبريتيد النيكل-كبريتيد الزنك	0.88-0.96	0.03-0.10
الكروم الأسود	الكروم	أكسيد الكروم الثلاثي	0.97	0.09
النحاس الأسود	النحاس	أكسيد النحاس الأحادي-أكسيد النحاس الثنائي	0.97-0.98	0.02
نتريد الألومنيوم	الألومنيوم	نتريد الألومنيوم	0.97	0.10

* المرجع: مرجع [41].

بالنسبة للنظم ذات درجات الحرارة العالية؛ على سبيل المثال، نظام كهرباء حرارية شمسية يعمل عند درجة حرارة تتراوح بين 400 و 500 درجة مئوية ويحتاج لأن يتمتع بالاستقرار في الهواء، من المفضل استخدام طلاء من السيرمت. إن السيرمت مركب يتكون من السيراميك والمعادن يمكن أن تكون له خواص كل من السيراميك — على سبيل المثال، مقاومة الحرارة العالية والصلابة — والمعادن، على سبيل المثال، القدرة على تحمل التشوه اللدن؛ ومن ثم يمكن لطلاءات سيرمتية مصممة جيدًا أن تتحمل الحرارة العالية وأن تكون مستقرة في الهواء [42, 89, 90]. يعرض الشكل ١١-٧ طيف الانعكاسية لسطح مغطى بطلاء من مركب سيرمت نتريد الألومنيوم على قاعدة من الصلب المقاوم للصدأ. وكما هو موضح، فهو يقترب من السلوك المثالي الموضح في الشكل ١١-٥.

فيزياء الطاقة الشمسية

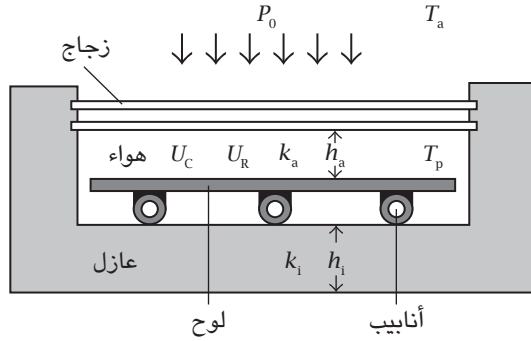


شكل ١١-٧: منحنى الانعكاسية لسطح امتصاص انتقائي من السيرمت. طيف الانعكاسية المقيس لسطح مغطى بطلاء من مركب سيرمت نتريد الألومنيوم على قاعدة من الصلب المقاوم للصدأ [89] و [90]. إنه يقترب من السلوك المثالي الموضح في الشكل ١١-٥.

(٢-٢) المجمعات الحرارية ذات الألواح المسطحة

كما ناقشنا في الفصل الأول - قسم (١-٥)، استُخدِمَ أول سخان ماء شمسي ناجح، «داي أند نايت»، مجمعات حرارية شمسية ذات ألواح مسطحة. وهو من السهل نسبياً صنعه، كما أنه متين بالقدر الكافي لتحمل العناصر. في واقع الأمر، أُنتِج الآلاف من المجمعات الحرارية الشمسية ذات الألواح المسطحة هذه في عشرينيات القرن العشرين، وهي لا تزال تعمل على نحو جيد في فلوريدا بعد أكثر من 80 عاماً من التعرض لظروف الطقس القاسية. وفي نظام التسخين الشمسي للماء بأكمله، يحتاج خزان الماء فقط لتحديثه باستخدام البولي يوريثان فوم كمادة عازلة. يعرض الشكل ١١-٨ مخططاً لأحد هذه المجمعات. هو في الأساس صندوق حراري خاص بدي سوسير (ارجع إلى الشكل ١١-٢) يحوي لوحاً نحاسياً مطلياً باللون الأسود وملحوماً به أنابيب نحاسية. وعادة ما تُركب طبقة أو طبقتان من الزجاج للعزل الحراري للجانب العلوي. ويمكن تسخين الماء حتى 60 أو 80 درجة مئوية من خلال ضوء الشمس. إنه جهاز متين جداً يمكن أن يبقى لعدة عقود.

الطاقة الحرارية الشمسية



شكل ١١-٨: مجمع حراري شمسي ذو لوح مسطح: هو في الأساس صندوق حراري خاص بدي سوسير (ارجع إلى الشكل ١١-٢) يحوي لوحًا نحاسيًا مطليًا باللون الأسود وملحومًا به أنابيب نحاسية. وعادة ما تُركب طبقة أو طبقتان من الزجاج للعزل الحراري للجانب العلوي. ويمكن تسخين الماء حتى 60 أو 80 درجة مئوية من خلال ضوء الشمس. وهو جهاز متين جدًا يمكن أن يبقى لعدة عقود.

تعتمد المعالجة القياسية للمجمعات الحرارية الشمسية ذات الألواح المسطحة على نموذج هوتيل-ويلير [39]. ويمكن إيجاد التفاصيل في كتابي دوفي وبيكمان [23, 24]، وكتاب لوند [54]، وأبحاث أخرى [44, 46, 70]. إن معظم المجمعات الحرارية الشمسية مغطاة بالزجاج. ونفاذية السقوط العمودي للطبقة الزجاجية هي (ارجع للفصل التاسع):

$$\tau = \frac{(4n)^{2N}}{(1+n)^{4N}}, \quad (11-8)$$

بحيث N هو عدد الطبقات و n هو معامل انكسار الزجاج؛ بوجه عام n يساوي 1.5 (ارجع إلى الفصل التاسع - قسم (٤)).

تصور لوح مجمع شمسي بمساحة كلية A وامتصاصية α . إذا كان جزء مساحة الامتصاص الفعال هو F وكثافة القدرة الشمسية هي P_0 ، فإن قدرة الدخل للوح هي:

$$Q_I = FA\tau\alpha P_0. \quad (11-9)$$

وبسبب القدرة الشمسية، ترتفع درجة حرارة اللوح من درجة الحرارة المحيطة T_a إلى T_p . وإذا لم يكن فرق درجة الحرارة كبيراً جداً، فسيتناسب فقد الحرارة مع فرق درجة الحرارة. وفي كل الحالات العملية، تكون مساحة اللوح، FA ، أكبر بكثير من مساحة الحافة. ومن أجل الوضوح والإيجاز، تجاهلت تأثير الحافة. ويتناسب فقد الحرارة أيضاً مع مساحة اللوح الساخن:

$$Q_L = U_L FA (T_p - T_a). \quad (11-10)$$

هنا، U_L هو «معامل فقد الحرارة المجمع». أما كفاءة مجمع الطاقة الحرارية الشمسية، فهي:

$$\eta = \frac{Q_I - Q_L}{P_0 A} = F \left(\tau \alpha - \frac{1}{P_0} U_L (T_p - T_a) \right)^+. \quad (11-11)$$

تشير علامة الزائد إلى أنه يؤخذ فقط قيمة موجبة للمقدار. بعبارة أخرى، إذا كان المقدار سالباً، تُعتبر القيمة صفراً.

لذا، فإن مشكلة كفاءة المجمع الحراري الشمسي تُختزل في رفع معامل فقد الحرارة U_L . بالنسبة للمجمعات ذات الألواح المسطحة، فإن هذه المشكلة ليست بسيطة؛ إذ تساهم عوامل عدة في الفقد عبر الواجهة الأمامية، التي بعضها من الصعب جداً قياسه:

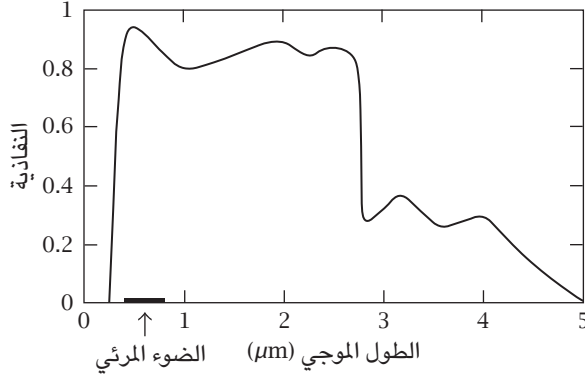
- (١) التوصيل عبر عازل الجانب الخلفي من السهل قياسه، حيث إن عامل الفقد المقابل يساوي k_i/h_i ؛ أي، الموصلية الحرارية والسُمك الخاصين بالمادة العازلة.
- (٢) التوصيل عبر حيز الهواء أيضاً من السهل قياسه، حيث إن عامل الفقد المقابل يساوي k_a/h_a ؛ أي، الموصلية الحرارية والسُمك الخاصين بالهواء.
- (٣) الحمل الحراري في حيز الهواء من الصعب قياسه، وله اعتماد معقد على التباعد وزاوية الميل.

(٤) الحمل الحراري خارج الطبقة الزجاجية يعتمد ليس فقط على درجة الحرارة وإنما أيضاً على سرعة الرياح الخاصة بالهواء المحيط.

(٥) الإشعاع الحراري للوح يصل أولاً إلى اللوح الزجاجي. وهو يمتص في الأساس معظم الإشعاع. ويشع اللوح الزجاجي بعد تسخينه ثانية للحيز المحيط.

الطاقة الحرارية الشمسية

يظهر طيف النفاذية الخاص بزجاج النوافذ العادي في الشكل ٩-١١. وهو شفاف للإشعاع المرئي وتحت الأحمر القريب، لكن معتم للإشعاع فوق البنفسجي وتحت الأحمر البعيد؛ لذا يمتص الزجاج إشعاع الجسم الأسود من اللوح الساخن تقريبًا بالكامل.



شكل ٩-١١: نفاذية زجاج النوافذ: إن زجاج النوافذ شفاف للإشعاع المرئي وتحت الأحمر القريب، لكن معتم للإشعاع فوق البنفسجي وتحت الأحمر البعيد؛ لذا يمتص الزجاج إشعاع الجسم الأسود من اللوح الساخن تقريبًا بالكامل. رُسم هذا الشكل اعتمادًا على بيانات مأخوذة من «دليل المعهد الأمريكي للفيزياء».

يمكن تقدير «معامل فقد الحرارة المجمع» كما يلي:

$$U_L = \frac{k_a}{h_a} + \frac{k_i}{h_i} + U_C + U_R. \quad (11-12)$$

بحيث إن k_a و k_i يمثلان الموصلية الحرارية لكل من الهواء والمادة العازلة، على التوالي، في حين يمثل h_a و h_i سُمك الهواء والجدار العازل، على التوالي (ارجع إلى الشكل ٨-١١)، و U_C هو معامل فقد الحرارة عن طريق الحمل الحراري و U_R هو معامل فقد الحرارة بسبب الإشعاع. ويمكن تقدير أول حدين باستخدام المعاملات القياسية المعروضة في الجدول ٩-١١:

$$\frac{k_a}{h_a} + \frac{k_i}{h_i} \approx 1.36 \left(\text{W/m}^2 \cdot \text{K} \right). \quad (11-13)$$

فيزياء الطاقة الشمسية

جدول ١١-٢: المعاملات القياسية للمجمعات الحرارية الشمسية ذات الألواح المسطحة.

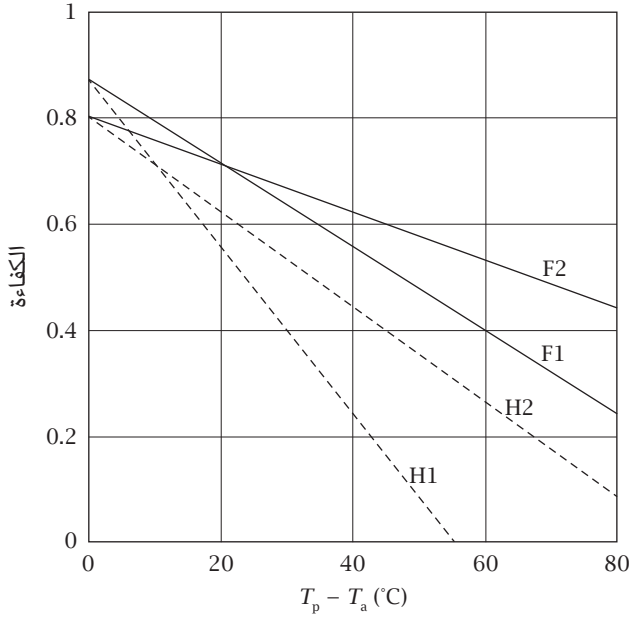
المعامل	الوصف	الرمز	الوحدة	القيمة
الطبقة الزجاجية	معامل الانكسار	n	—	1.50
اللوحي	الامتصاصية	α	—	0.95
العازل	الموصلية الحرارية	k_i	$W/m^2 \cdot K$	0.02
العازل	السُمك	d_i	m	0.05
حيز الهواء	الموصلية الحرارية	K_a	$W/m^2 \cdot K$	0.024
حيز الهواء	السُمك	d_a	m	0.25

لكن الحدين الآخرين عادةً ما يكونان أكبر بكثير من الحدين السابقين. وهناك طريقة فعالة لتقليل الفقد عن طريق الإشعاع والحمل الحراري التي تتمثل في زيادة عدد الطبقات الزجاجية. فطبقاً للعمليات الحسابية لدوفي وبيكمان [23, 24]، في ظل الظروف العادية (سرعة رياح 5.0m/s ومتوسط درجة حرارة للوح 60 درجة مئوية وميل 45 درجة ودرجة حرارة محيطية تتراوح بين 20- و 40 درجة مئوية)، يصل معامل الفقد الأقصى إلى $6.9W/m^2 \cdot K$ عند وجود طبقة واحدة، و $3.5W/m^2 \cdot K$ عند وجود طبقتين، و $2.4W/m^2 \cdot K$ عند وجود ثلاث طبقات، لكن إضافة المزيد من الطبقات يؤدي إلى مزيد من الفقد عن طريق النفاذية. فمن خلال المعادلة 8-11، تكون نفاذية طبقة واحدة من الزجاج 0.92، وتقل إلى 0.85 عند وجود طبقتين و 0.782 عند وجود ثلاث طبقات؛ لذا فإن استخدام ثلاث طبقات لا يضيف شيئاً.

تعتمد الكفاءة أيضاً على كثافة قدرة الإشعاع الشمسي. وحيث إن فقد الحرارة لا يعتمد على الإشعاع الشمسي، فكلما ضعف الإشعاع الشمسي، قلت الكفاءة. يوضح الشكل ١١-١٠ كيف أن الكفاءة تعتمد على نحو أساسي على قدرة الإشعاع الشمسي وارتفاع درجة الحرارة. يوضح منحنى F1 الكفاءة في ظل ضوء شمس كامل، $1kW/m^2$ ، وطبقة زجاجية واحدة؛ في حين يوضحها منحنى F2 في ظل وجود طبقتين زجاجيتين. ويوضح منحنى H1 الكفاءة في ظل نصف ضوء شمس كامل، $0.5kW/m^2$ وطبقة زجاجية واحدة؛ في حين يوضحها منحنى H2 في ظل وجود طبقتين زجاجيتين. ومن أجل التبسيط، من المفترض

الطاقة الحرارية الشمسية

أن نسبة المساحة F تساوي 1، التي هي تقريباً صحيحة في معظم الحالات العملية. ومع زيادة درجة حرارة اللوح، تقل الكفاءة على نحو سريع نظراً لفقد الحرارة عبر الطبقة الزجاجية العلوية. وعند نقطة ما، يزيد فقد الحرارة عن الطاقة الشمسية التي يستقبلها اللوح. وتصبح الكفاءة بالسالب؛ أي تنخفض درجة حرارة اللوح بدلاً من أن ترتفع.



شكل ١١-١٠: كفاءة المجمعات ذات الألواح المسطحة: اعتماد الكفاءة على قدرة الإشعاع الشمسي وارتفاع درجة الحرارة. يوضح المنحنى F1 الكفاءة في ظل ضوء شمس كامل، 1kW/m^2 ، وطبقة زجاجية واحدة؛ في حين يوضحها المنحنى F2 في ظل وجود طبقتين زجاجيتين. ويوضح المنحنى H1 الكفاءة في ظل نصف ضوء شمس كامل، 0.5kW/m^2 ، وطبقة زجاجية واحدة؛ في حين يوضحها المنحنى H2 في ظل وجود طبقتين زجاجيتين. ومع زيادة درجة حرارة اللوح، تقل الكفاءة على نحو سريع نظراً لفقد الحرارة عبر الطبقة الزجاجية العلوية. وعند نقطة ما، يزيد فقد الحرارة عن الطاقة الشمسية التي يستقبلها اللوح، وتصبح الكفاءة صفراً.

(٣-٢) المجمعات ذات الأنابيب المفرغة الزجاجية بالكامل

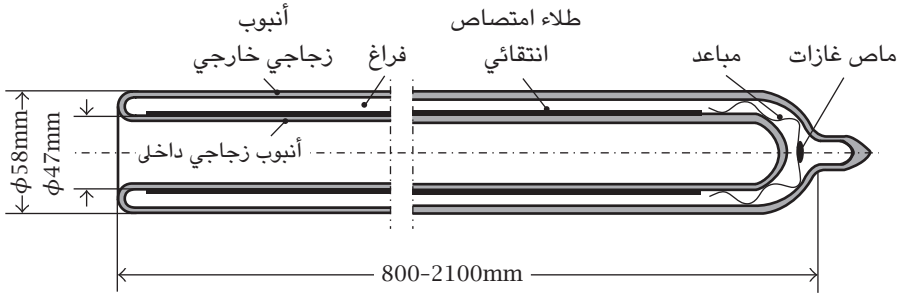
كما أوضحنا في القسم السابق، يُعد فقد الحرارة عبر الطبقة العلوية هو العامل الأهم الذي يؤثر على كفاءة المجمعات الحرارية الشمسية. وفي وقت مبكر يعود لعام 1911، اخترع وليم إل آر إيميت المجمعات الحرارية ذات الأنابيب المفرغة (براءة اختراع أمريكية رقم: 980505) التي يمكنها نظرياً حل مشكلة فقد الحرارة عبر الطبقة العلوية. وقد احتاج الأمر 80 عاماً لجعلها مناسبة للإنتاج على نطاق واسع.

يعرض الشكل ١١-١١ مجمّعاً حراريّاً شمسيّاً ذا أنبوبين مفرغين. وهو يتكون من أنبوبين زجاجيين متّحدَي المركز ومحكمَي الغلق عند نهاية واحدة. والحيز فيما بينهما يُفرّغ بحيث يكون فراغاً عالياً بدرجة متوسطة. يُوضع مبادل معدني فيما بين الأنبوبين لدعمهما وكمصدر لماس الغازات، الذي يكون بوجه أساسي مزيّجاً من الباريوم والتيتانيوم. وبعد أن يُحكّم غلق حامل ماس الغازات، يُسخّن من الخارج باستخدام طاقة ميكرونية لتبخير الماس للغازات إلى السطح الداخلي للأنبوبين الزجاجيين. وهكذا، يمكن الحفاظ على وجود فراغ عالٍ. ويجب أن يكون للأنابيب المفرغة ذات الجودة الجيدة فراغ أعلى من 10^{-4} Pa أو 10^{-6} Torr. ويُوضع طلاء امتصاص انتقائي على «السطح الخارجي» لـ «الأنبوب الزجاجي الداخلي». وهكذا، يكون الطلاء الانتقائي دائماً في فراغ عالٍ. وللمجمعات الحرارية ذات الأنابيب المفرغة ميزة كبيرة على المجمعات الحرارية ذات الألواح المسطحة التي تتمثل في عدم الحاجة لطلاء امتصاص انتقائي يكون مستقرّاً في الهواء، وأن هذا الطلاء يمكن أن يبقى دون أن يتلف نهائياً. بالإضافة إلى ذلك، يمكن وضع غشاء مضاد للانعكاس فوق طلاء الامتصاص الانتقائي حتى لو لم يكن الغشاء مستقرّاً في الهواء.

هناك ميزة أخرى للمجمعات الحرارية الشمسية ذات الأنابيب المفرغة على تلك ذات الألواح المسطحة، التي تكمن في أن المواد التي تُصنّع منها غير باهظة الثمن ومتوفرة ويمكن إنتاجها على نطاق واسع بتكلفة قليلة جداً. وحالياً، يُنتج سنوياً في الصين 200 مليون أنبوب مفرغ.

هناك اعتبار مهم يتمثل في أن نسبة المساحة F تكون أقل بكثير من 1 بالنسبة للمجمعات ذات الأنابيب المفرغة؛ وذلك لأن قطر الأنبوب الداخلي يحدد مساحة الامتصاص، وعندما تُركّب الأنابيب في نظام، يجب أن يكون هناك تباعد بين الأنابيب الخارجية المتجاورة. بوجه أساسي، تساوي المساحة 20mm. وتساوي نسبة المساحة القياسية $F = 47 / (58 + 20)$ ؛ أي، تقريباً 0.6. وقيمة F الصغيرة في واقع الأمر ليست عيباً خطيراً؛

الطاقة الحرارية الشمسية



شكل ١١-١١: مجمع حراري شمسي ذو أنبوبين مفرغين: يتكون المجمع من أنبوبين زجاجيين متحدَي المركز ومحكمَي الغلق عند نهاية واحدة. والحيز فيما بينهما يُفرغ لأعلى من 10^{-4} Pa أو 10^{-6} Torr. ويُوضع مبادع معدني ليكون مصدرًا لِمَص الغازات، الذي يكون بوجه أساسي مزيجًا من الباريوم والتيتانيوم. وبعد أن يُحكم غلق ماص الغازات، يُسخن من الخارج باستخدام طاقة ميكرونية لتبخير ماص الغازات إلى السطح الداخلي للأنبوبين الزجاجيين. وهكذا، يمكن الحفاظ على وجود فراغ كبير. ويُوضع طلاء امتصاص انتقائي على السطح الخارجي للأنبوب الزجاجي الداخلي.

أولاً: في التطبيقات الموجودة في الأماكن السكنية، هناك دائماً مساحة سقف أكبر مما هو مطلوب. ثانياً: هناك اعتبار مهم يتمثل في «تكلفة» مجمع الطاقة الحرارية الشمسية؛ فنظراً لوجود مساحة خالية بين الأنابيب، فلا توجد تكلفة إضافية. ثالثاً: بسبب المساحة الخالية، لا يوجد حمل إضافي على السقف. وأخيراً: إذا لم يكن ضوء الشمس عمودياً على مستوى الأنابيب، بحد أقصى عند تساوي زاوية السقوط θ مع قوس جيب تمام F ، فيمكن الحفاظ على أقصى قدر من الطاقة.

يقارن الشكل ١١-١٢ بين أداء سخانات الماء الشمسية التي تستخدم مجمعات ذات ألواح مسطحة وتلك التي تستخدم مجمعات ذات أنابيب مفرغة. إن سخان الماء الشمسي ذا اللوح المسطح المستخدم هنا من طراز ثيرمو دايناميكس إس 42-بي أمّا السخان ذو الأنبوب المفرغ فمن طراز صن ماكس 20 إي في تي. والنتيجة ذكرها وليم فيرجسون على ويكيبيديا. بالنسبة للطقس المشمس ومتطلبات $T_p - T_a$ المنخفضة، فمن الواضح أن النظام ذا اللوح المسطح أفضل بسبب القيمة العالية لنسبة المساحة F . وبالنسبة للطقس الغائم ومتطلبات $T_p - T_a$ العالية، فإن النظام ذا الأنبوب المفرغ أفضل؛ لأنه لا يكون

هناك فقد للحرارة نتيجة للجمل والتوصيل الحراريين. بالإضافة إلى ذلك، يمكن استخدام طلاء امتصاص انتقائي عالي الأداء؛ لأن عامل استقرار الهواء ليس مهماً، كما أن فقد الحرارة نتيجة للإشعاع يكاد لا يُذكر. ويرجع فقد الحرارة الملاحظ هنا بالنسبة للنظم ذات الأنابيب المفرغة لفقد الحرارة الخاص بخزان الماء. والاتجاه العام يتوافق مع التحليل المعروض في هذا القسم.

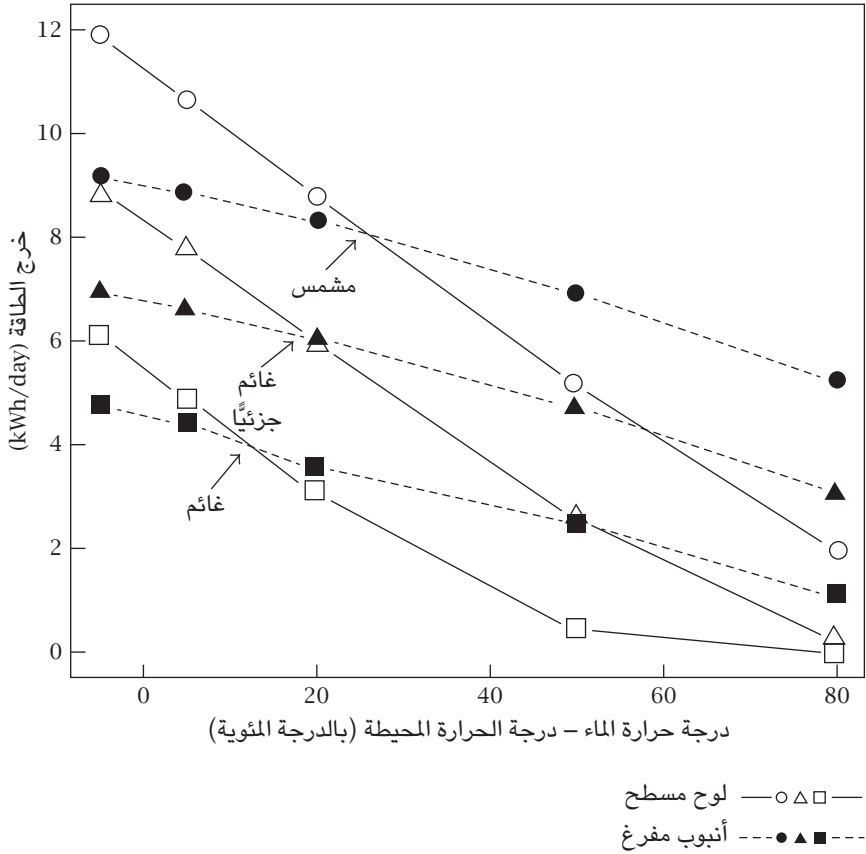
(٢-٤) المجمعات الحرارية الشمسية المعتمدة على طريقة الثعب الحراري

تُستخدم مجمعات الطاقة الشمسية ذات الأنابيب المفرغة على نحو أساسي في سخانات الماء الشمسية التي تعتمد على طريقة التدفق المباشر، حيث يذهب الماء القابل للاستخدام مباشرة للأنابيب. وهي ذات كفاءة عالية جداً، لكن الماء الساخن يمكن أن يتلوث بسبب النظام ويأتي الضغط على نحو مباشر بفعل الجاذبية؛ لذا بالنسبة للنظم التي تتطلب ماء ساخناً مضغوطاً ونقياً أكثر، يُستخدم نوع آخر من المجمعات الشمسية وهي المجمعات المعتمدة على طريقة الثعب الحراري.

يعرض الشكل ١١-١٣ (أ) مقطعاً عرضياً لمجمع حراري شمسي معتمد على طريقة الثعب الحراري. يوجد في الوسط أنبوب معدني محكم الغلق، من النحاس في الغالب، ويوجد به قدر قليل من السائل المتطاير؛ ماء في الغالب. وهو موصل بزعانف معدنية مغطاة بطلاءات امتصاص انتقائي. وهو مركب على شفة معدنية؛ من الصلب المقاوم للصدأ في الغالب. وتتكون وصلة زجاجية معدنية بين الشفة والأنبوب الزجاجي. ويُسحب فراغ إلى الأنبوب الزجاجي. ويعرض الشكل ١١-١٣ (ب) صورة فوتوغرافية لهذا الجهاز. ويجب تركيب الأنبوب في وضع مائل مع وجود المبخّر في الجزء العلوي. ومع سقوط ضوء الشمس على الزعانف المعدنية، يتبخر السائل الموجود في الأنبوب المعدني ثم يتكثف في الجزء العلوي، الموصل حرارياً بحمل حراري.

هناك مسألة فنية أساسية تتعلق بإنشاء الوصلة الزجاجية المعدنية. هناك تقنية مستخدمة على نطاق واسع، وهي استخدام حشوة من معدن ذي نقطة انصهار منخفضة نسبياً مثل القصدير أو الرصاص أو الألومنيوم. وبتسخين الوصلة تحت ضغط عند درجة حرارة أقل، ولكن قريبة من نقطة انصهار الحشوة المعدنية، يمكن إنشاء وصلة جيدة. ويبذل الفراغ العالي في الأنبوب على نحو منتظم ضغطاً على الوصلة الزجاجية المعدنية؛ ومن ثم فإن احتمالية حدوث تسرب تكون قليلة. ومقارنة بالأنابيب المفرغة الزجاجية

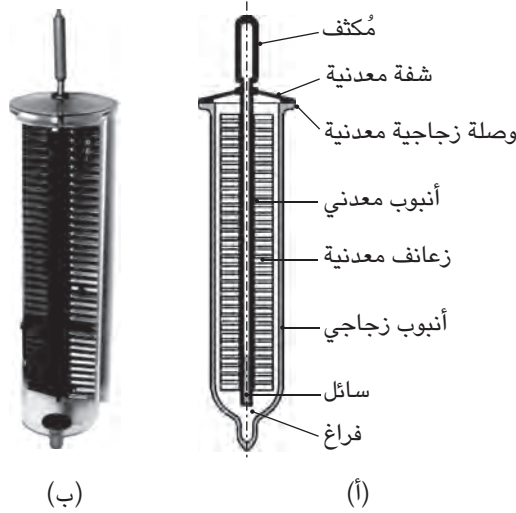
الطاقة الحرارية الشمسية



شكل ١١-١٢: مقارنة أداء كل من المجمعات ذات الألواح المسطحة والمجمعات ذات الأنابيب المفرغة: بالنسبة للطقس المشمس ومتطلبات $T_p - T_a$ المنخفضة، من الواضح أن النظام ذا اللوح المسطح أفضل بسبب القيمة العالية لنسبة المساحة F . وبالنسبة للطقس الغائم ومتطلبات $T_p - T_a$ العالية، فإن النظام ذا الأنابيب المفرغ أفضل؛ لأنه لا يكون هناك فقد للحرارة نتيجة للجمل والتوصيل الحراريين. نقلاً عن تقرير لوليم فيرجسون على موقع ويكيبيديا.

بالكامل، فإن للمجمعات الحرارية الشمسية المعتمدة على طريقة الشعب الحراري مزايا عديدة؛ أولاً: نظراً لعدم وجود ماء جارٍ في الأنابيب، يمكنها تحمل البرد القارس دون أن ينكسر الزجاج. ثانياً: لأن الكتلة الحرارية للأنبوب أصغر بكثير من الماء الموجود في

فيزياء الطاقة الشمسية



شكل ١١-١٣: مجمع حراري شمسي معتمد على طريقة الشعب الحراري: (أ) تركيب مجمع حراري شمسي معتمد على طريقة الشعب الحراري. يوجد في الوسط أنبوب معدني محكم الغلق، من النحاس في الغالب. ويوجد به قدر قليل من السائل المتطاير؛ ماء في الغالب. وهو موصل بزعانف معدنية مغطاة بطلاءات امتصاص انتقائي. وهو مُركب على شفة معدنية؛ من الصلب المقاوم للصدأ في الغالب. وتتكون وصلة زجاجية معدنية بين الشفة والأنبوب الزجاجي. ويُسحب فراغ إلى الأنبوب الزجاجي. (ب) صورة فوتوغرافية لهذا المجمع. مع سقوط ضوء الشمس على الزعانف المعدنية، يتبخر السائل الموجود في الأنبوب المعدني ثم يتكثف في الجزء العلوي، الموصل حراريًا بحمل حراري.

الأنابيب الزجاجية بالكامل، فإن وقت بدء العمل يكون أقصر بكثير. ثالثاً: حتى إذا كُسر أحد الأنابيب الزجاجية؛ على سبيل المثال، بسبب تساقط الثلوج الشديد عليها، فلن يحدث تسرب للماء. رابعاً: لأن الماء الساخن لا يتدفق في الأنابيب، فيمكن أن يصبح الخزان مضغوطاً ويطلق ماءً نظيفاً عالي الجودة. وأخيراً: لأن السائل يعود لأسفل أنبوب الشعب الحراري بفعل الجاذبية، فهناك ما يُسمى بـ «تأثير الصمام الثنائي الحراري»؛ أي، تتدفق الحرارة فقط من المجمع إلى الخزان ولا يمكن عكس مسارها، لكن بسبب التركيب المعدني

والوصلة الزجاجية المعدنية، تكون التكلفة أعلى بكثير من الأنابيب الزجاجية بالكامل؛ لذا فهي تُستخدم في سخانات الماء الشمسية المتطورة الغالية الثمن.

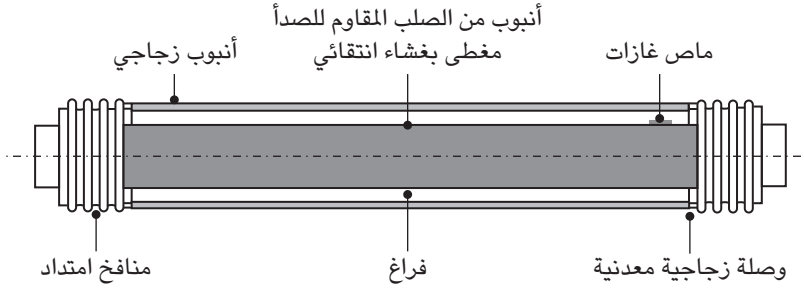
(٢-٥) المجمعات ذات الأنابيب المفرغة العالية الضغط

بالنسبة للتطبيقات الحرارية الشمسية، لا يكون سائل التشغيل داخل الأنبوب ماءً ساخنًا؛ فهو يكون زيتاً عند درجة حرارة عالية (300 درجة مئوية أو أكثر) أو بخار فائق الحرارة عند ضغط عالٍ (10-100 atm). والأنبوب الزجاجي لن يتحمل هذا الضغط ودرجة الحرارة هذه؛ لذا يجب أن يكون الأنبوب الداخلي مصنوعاً من معدن قوي؛ صلب مقاوم للصدأ في الغالب. ويجب أن يكون الأنبوب الخارجي شفافاً، أي، مصنوعاً من الزجاج؛ لذا فهناك مشكلة عدم تطابق معاملي التمدد الحراري وتكون هناك حاجة لوصلة معدنية زجاجية. ويظهر التركيب القياسي لمثل هذا المجمع الحراري الشمسي في الشكل ١١-١٤. ففي الوسط، يوجد أنبوب من الصلب المقاوم للصدأ مغطى بغشاء امتصاص انتقائي. وكلتا النهايتين مزودتان بمنافخ امتداد. وعبر وصلة زجاجية معدنية، يُوصل كل طرف بإحدى نهايتي الأنبوب الزجاجي. ويُسحب فراغ بين الأنبوب المصنوع من الصلب المقاوم للصدأ والأنبوب الزجاجي. ويُستخدم ماص للغازات لضمان وجود تفريغ جيد.

(٣) سخانات الماء الشمسية

إن أكثر سخانات الماء الشمسية استخداماً نظام يعمل بالتدفق المباشر مستخدماً مجمعات حرارية شمسية ذات أنابيب مفرغة زجاجية بالكامل؛ ارجع إلى الفصل الأول - قسم (٣-٥)، وخاصة الشكل ١-٣٢. عادة ما يُركب هذا النظام على سقف منزل أسرة واحدة أو مبنى سكني. ويتدفق الماء الساخن ببساطة بفعل الجاذبية. وبسبب التكلفة التصنيعية المنخفضة لهذا النظام نتيجة لإنتاجه على نطاق واسع، فحينما يمكن استخدامه، يمكن استرجاع الاستثمار في خلال بضعة أعوام دون الحاجة لدعم مالي حكومي. وبعد تغطية التكلفة الأولية، يمكن أن يعمل النظام على نحو جيد لمدة تتراوح من عشرين لثلاثين عاماً دون الحاجة لأي صيانة. وهناك أكثر من عشرة ملايين من تلك النظم مُركبة في الصين وحدها.

فيزياء الطاقة الشمسية



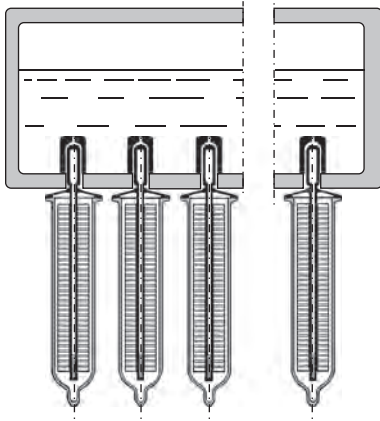
شكل ١١-١٤: مجمع ذو أنبوبين مفرغين عالي الضغط: في الوسط، يوجد أنبوب من الصلب المقاوم للصدأ مغطى بغشاء امتصاص انتقائي. كلتا النهايتين مزودتان بمنافخ امتداد. وعبر وصلة زجاجية معدنية، يُوصل كل طرف بإحدى نهايتي الأنبوب الزجاجي. ويُسحب فراغ بين الأنبوب المصنوع من الصلب المقاوم للصدأ والأنبوب الزجاجي. ويُستخدم ماص للغازات لضمان وجود تفريغ جيد.

إن لهذا النظام البسيط والرائع بعض العيوب؛ فلا يمكن ضغط الماء الساخن. كما أن أي تلوث في النظام سيظهر عند المخرج. وإذا انكسر أحد الأنبوبين، فإن كل الماء سيتسرب للخارج على الفور. وقد طُوِّرت أنواع عديدة مُحسنة من هذا النظام وجُربت عملياً.

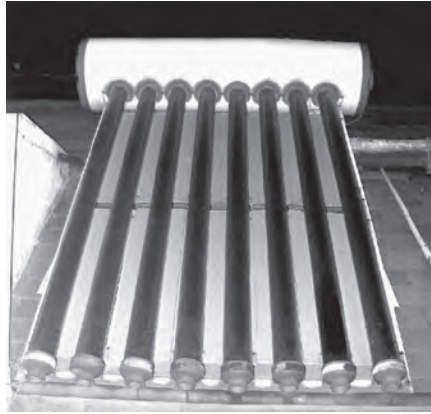
(١-٣) النظام ذو المجمعات الحرارية الشمسية المعتمدة على طريقة الشعب الحراري

باستخدام المجمعات الحرارية الشمسية المعتمدة على طريقة الشعب الحراري بدلاً من الأنابيب المفرغة الزجاجية بالكامل، لا يحدث أي اتصال حراري بين الماء الساخن الجاري والمجمعات الحرارية. ويحدث الانتقال الحراري من خلال المُبَخِّرات الخاصة بالمجمع والقوالب (التي عادةً ما تكون نحاسية) الموجودة داخل خزان الماء؛ انظر الشكل ١١-١٥ (a). ويمكن أن يُنظف الماء الموجود داخل الخزان جيداً. وإذا انكسر أحد أنابيب المجمع، ستعمل باقي الأنابيب ولن تجعل النظام يتوقف عن العمل، على الرغم من تأثر قدرته التشغيلية بعض الشيء، حتى يُستبدل الأنبوب التالف. ويعرض الشكل ١١-١٥ (b) صورة فوتوغرافية لنظام مثل هذا مُركب على سقف وذلك بعد أكثر من 10 سنوات من التشغيل. من الملاحظ عدم وجود أي عطب أو تلف به.

الطاقة الحرارية الشمسية



(a)



(b)

شكل ١١-١٥: سخان ماء شمسي بمجمعات معتمدة على طريقة الشعب الحراري: (a) تصميم سخان الماء الشمسي. يحدث اتصال حراري بين مُبخرات المجمع الحراري الشمسي المعتمد على طريقة الشعب الحراري والماء في الخزان عبر القوالب النحاسية. (b) نظام على سقف بعد أكثر من 10 سنوات من التشغيل. من الملاحظ عدم وجود أي تلف أو عطب. الصورة التقطها المؤلف.

(٢-٣) النظام ذو ملفات التبادل الحراري المضغوطة

يمكن إنشاء نظام أكثر نقاءً بتركيب ملف تبادل حراري داخل خزان الماء المعزول. هنا، سيستخدم الماء الموجود في الأنابيب المفرغة وخزان الماء المعزول للتبادل الحراري فقط؛ انظر الشكل ١١-١٦. ويجري الماء الساخن القابل للاستخدام فقط في ملف التبادل الحراري؛ ومن ثم يمكن ضغطه ولن يتلوث بسبب نظام التجميع الحراري. والصورة الدعائية المعروضة في الشكل ١١-١٦ توضح بعض تفاصيل ملف التبادل الحراري.

(٣-٣) النظام المشتمل على خزان تبادل حراري منفصل

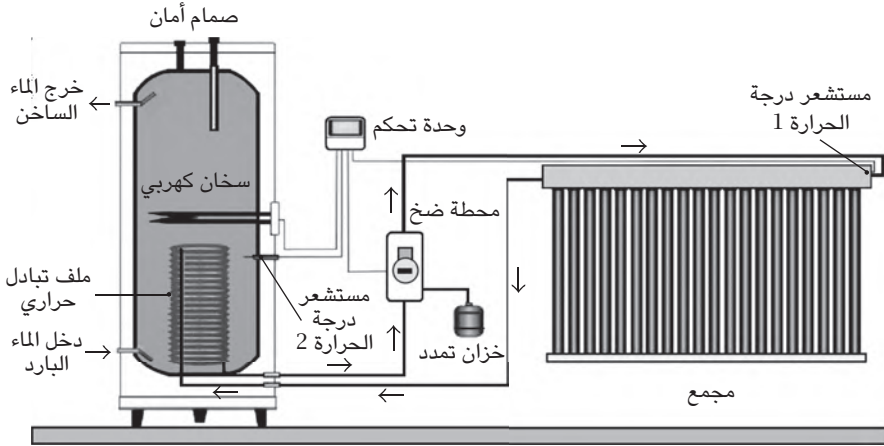
باستخدام خزان ماء منفصل وملف تبادل حراري داخل الخزان، يمكن عزل الماء الساخن القابل للاستخدام بالكامل عن المجمعات الحرارية. ويعرض الشكل ١١-١٧ التركيب القياسي لمثل هذا النظام.



شكل ١١-١٦: سخان ماء شمسي ذو ملفات تبادل حراري مضغوطة: يجري الماء الساخن القابل للاستخدام فقط في ملف التبادل الحراري داخل الخزان المعزول؛ ومن ثم يمكن ضغطه ولن يتلوث بسبب نظام التجميع الحراري. وتوضح الصورة الدعائية بعض تفاصيل ملف التبادل الحراري.

يُمَلَأ المجمع الحراري الشمسي بسائل تبادل حراري يمكن أن يكون ماءً أو سائلاً مانعاً للتجمد؛ على سبيل المثال، مزيج من الماء والجليسروول. وبالنسبة لمجمع شمسي ذي لوح مسطح، وفي المناطق التي تصل فيها درجة الحرارة لدرجة التجمد، يكون السائل المانع للتجمد ضروريًا. أما في المجمعات ذات الأنابيب المفرغة، وبسبب العزل الفائق، يمكن استخدام الماء العادي. ويحدث سريان لسائل التبادل الحراري من خلال مضخة. تُستشعر درجة حرارة خزان الماء من خلال ترمومتر. ويمكن ضبط درجة حرارة الماء الخارج على نحو مسبق باستخدام وحدة تحكم، تتحكم في محطة الضخ.

الطاقة الحرارية الشمسية



شكل ١١-١٧: نظام مشتمل على خزان تبادل حراري منفصل: يُملأ المجمع الحراري الشمسي بسائل تبادل حراري، ويحدث سريان له من خلال مضخة. وتُستشعر درجة حرارة خزان الماء من خلال ترمومتر. ويمكن ضبط درجة حرارة الماء الخارج على نحو مسبق باستخدام وحدة تحكم، تتحكم في محطة الضخ.

(٤) نظم الطاقة الحرارية الشمسية

هناك مجال أكثر أهمية، فيما يتعلّق بالتطبيقات الحرارية الشمسية، يتمثل في إنتاج الطاقة الكهربائية. وطبقاً للقانون الثاني للديناميكا الحرارية، الحد الأقصى لكفاءة تحويل الحرارة لطاقة ميكانيكية هو كفاءة كارنو (معادلة 19-6):

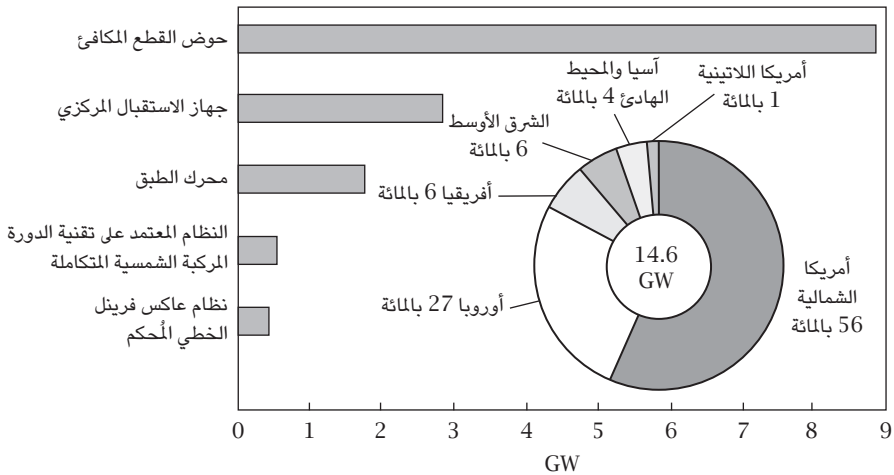
$$\eta_c = 1 - \frac{T_L}{T_H}, \quad (11-14)$$

بحيث T_L هي درجة حرارة الخزان البارد و T_H هي درجة حرارة المصدر الساخن. ومن أجل تحسين الكفاءة، يجب أن تكون درجة حرارة المصدر الساخن عالية قدر الإمكان. وحيث إن T_L لا يمكن أن تكون أقل من درجة الحرارة المحيطة، في المتوسط $300K$ ، فمن

فيزياء الطاقة الشمسية

أجل الوصول إلى كفاءة قدرها 50 بالمائة، يجب أن تكون T_H على الأقل 600K أو 327 درجة مئوية. وبدون تركيز للإشعاع الشمسي، يمكن أن تصل درجة الحرارة بالكاد إلى 150 درجة مئوية.

وللوصول إلى درجات حرارة عالية مثل هذه، يكون تركيز الإشعاع الشمسي ضرورة. طُورت ثلاثة توصيفات شائعة الاستخدام حالياً لنظم الطاقة الحرارية الشمسية المستقلة في سبعينيات القرن العشرين، وهي: نظام التركيز ذو حوض القطع المكافئ ونظام التركيز ذو طبق القطع المكافئ ونظام التركيز ذو جهاز الاستقبال المركزي المزود بالهيليوستات. ومؤخراً، لقي النظام المعتمد على تقنية الدورة المركبة الشمسية المتكاملة اهتماماً كبيراً، وقد حدث تطور سريع للنظام الملائم للعمل معه وهو نظام عاكس فريزل الخطي المُحكم. ويعرض الشكل ١١-١٨ التركيب التراكمي لتلك النظم حتى عام 2009 [88].



شكل ١١-١٨: التركيب التراكمي لنظم تركيز الطاقة الشمسية: تركيب تلك النظم حتى عام 2009، بما في ذلك النظم ذات حوض القطع المكافئ والنظم ذات طبق القطع المكافئ والنظم ذات جهاز الاستقبال المركزي المزود بالهيليوستات والنظم المعتمدة على تقنية الدورة المركبة الشمسية المتكاملة ونظم عاكس فريزل الخطي المُحكم [88].

(١-٤) مُرْكُز حوض القطع المكافئ

كما هو واضح من الشكل ١١-١٨، ففي الوقت الحالي نحو ثلثي الكهرباء المولدة من خلال محطات الطاقة الحرارية الشمسية المركزة يأتي من نظام تركيز حوض القطع المكافئ. ويظهر تركيب هذا النظام في ملحق الصور الشكل ١٠. تُركب مرايا على شكل قطع مكافئ على محور لتتبع ضوء الشمس. ويوجد عند الخط البؤري لتلك المرايا مجمع خطي، بوجه عام، أنبوب مفرغ ذو درجة حرارة عالية. انظر ملحق الصور الشكل ١١. حالياً، أكبر محطات الطاقة الشمسية هي ما يُطلق عليه «نظم توليد الكهرباء من الطاقة الشمسية» التي توجد في صحراء موهافي بكاليفورنيا. وقد بُني هذا الصرح المكون من تسع محطات فيما بين عامي 1984 و 1990 بسعة إجمالية قدرها 354MW والمساحة الإجمالية لمرايا القطع المكافئ التي يصل عددها إلى 232500 تبلغ 6.5km^2 ، بطول إجمالي قدره 370km. ويرتد ضوء الشمس من المرايا ويُوجه لأنبوب مركزي ممتلئ بزيت اصطناعي يُسخن لدرجة حرارة تزيد عن 400 درجة مئوية. والضوء المنعكس المُركّز على الأنبوب المركزي أشد في قوته من 71 إلى 80 مرة من ضوء الشمس العادي. وينقل الزيت الاصطناعي حرارته للماء الذي يغلي ويدفع توربيناً بخارياً يعمل بدورة رانكن، مما يؤدي إلى توليد الكهرباء. ويُستخدم الزيت الاصطناعي لحمل الحرارة (بدلاً من الماء) للحفاظ على الضغط في ظل الحدود التي يمكن السيطرة عليها. انظر ملحق الصور الشكل ١٢. يعرض الشكل ١١-١٩ صورة جوية لهذا الصرح. إن محور مرايا القطع المكافئ شمالي-جنوبي، الذي يتحول من الشرق للغرب يومياً. وأعلى الأجزاء في تلك المحطات هي المرايا المنحنية، التي تتضرر باستمرار بسبب الرياح، مما يؤدي إلى استبدال نحو 3 آلاف منها كل عام. تُنظف المرايا على نحو منتظم باستخدام آلة خاصة، ولتجنب الظلال الساقطة من المرايا المجاورة، تصل المسافة بين المرايا نحو ضعف عرضها. ولا تزال تكلفة الكهرباء من هذا الصرح العملاق غير تنافسية مع تلك المولدة من محطات الطاقة العاملة بحرق الفحم.

(٢-٤) جهاز الاستقبال المركزي المزود بالهيليوستات

للتركيز العالي للشمس على جهاز استقبال مركزي، تُستخدم مئات أو آلاف «الهيليوستات»، وهي مرايا تُركّب على عمود إدارة ثنائي الأبعاد لتتبع موضع الشمس من خلال كمبيوتر

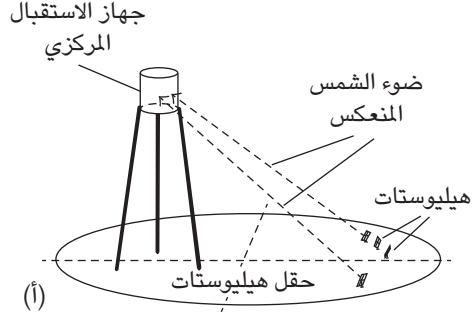
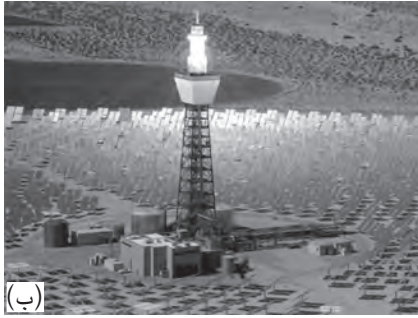


شكل ١١-١٩: صورة جوية لأكبر صرح للطاقة الشمسية في العالم. إن محاور مرايا القطع المكافئ شمالية-جنوبية، والتي تتحول من الشرق للغرب يوميًا. يُستبدل نحو 3 آلاف من المرايا كل عام بسبب تعرضها للضرر من جانب الرياح. ويظهر أيضًا في هذه الصورة عدد من المرايا المتضررة. ولتجنب الظلال الساقطة من المرايا المجاورة، تصل المسافة بين المرايا نحو ضعف عرضها.

مركزي موزع على حقل دائري أو بضاوي الشكل في الغالب؛ انظر الشكل ١١-٢٠. ولأنه يمكن الوصول إلى درجات حرارة عالية جدًا، (على سبيل المثال، 565 درجة مئوية)، عادةً ما يُستخدم ملح منصهر أو بخار فائق الحرارة (على سبيل المثال، 60 بالمائة NaNO_3 + 40 بالمائة KNO_3) باعتباره مادة التشغيل. وفي النهاية، يدفع الجهاز توربينًا بخاريًا يعمل بفعل دورة رانكن قياسية لتوليد طاقة كهربائية [73].

اكتمل أول مشروع تجريبي يعتمد على هذه التقنية، سولر وان، في صحراء موهافي في عام 1981، ودخل حيز التشغيل فيما بين عامي 1982 و1986. وكان يتكون من 1818 مرآة، كل منها مساحتها 40m^2 . واستُخدم زيت أو ماء باعتباره سائل التشغيل. وقد تحققت كفاءة قدرها 6 بالمائة. وتظهر صورة فوتوغرافية لهذا المشروع في الشكل ١١-٢٠(ب). وفي عام 1995، تغير مشروع سولر وان إلى سولر تو. واستُخدم الملح المنصهر — 60 بالمائة نتريد صوديوم و40 بالمائة نتريد بوتاسيوم — باعتباره مادة

الطاقة الحرارية الشمسية



شكل ١١-٢٠: محطة طاقة شمسية قائمة على جهاز استقبال مركزي: للتركيز العالي للشمس على جهاز استقبال مركزي، تُستخدم مئات أو آلاف «الهيليوستات»، وهي مرايا تُركب على عمود إدارة ثنائي الأبعاد لتتبع موضع الشمس من خلال كمبيوتر مركزي. ويمكن أن تصل درجة حرارة جهاز الاستقبال المركزي إلى خمسمائة درجة مئوية أو أكثر.

التشغيل. وقد تحقق عشرة ميغا واط من الطاقة، ووصلت الكفاءة إلى 16 بالمائة. وفي 25 نوفمبر من عام 2009، توقف المشروع وهدم برج الطاقة الخاص به. وحتى يُستخدم مثل هذا النظام كمحطة طاقة قائمة بذاتها، هناك حاجة لنظام لتخزين الطاقة. وتُستخدم الحرارة الكامنة للملح المنصهر لتخزين الطاقة. لكن التكلفة لكل KWh ستزيد مما يتراوح بين 0.08 و0.15 دولار إلى ما يتراوح بين 0.15 و0.20 دولار مع إضافة وحدة تخزين الطاقة [73].

(٣-٤) مُركز طبق القطع المكافئ المزود بمحرك ستيرلنج

يتمثل النوع الثالث من نظم الطاقة الشمسية المركزة في مُركز طبق القطع المكافئ المزود بمحرك ستيرلنج، الذي يظهر في ملحق الصور الشكل ١٠. وطبقاً لتقرير أصدرته مختبرات سانديا الوطنية في فبراير من عام 2008، أظهر النظام المعتمد على محرك ستيرلنج كفاءة في تحويل الطاقة الشمسية لكهرباء موصلة بالشبكة قدرها 31.25 بالمائة، وهي أعلى كفاءة لتحويل الطاقة الشمسية لكهرباء سُجلت في يوم شتاء بارد وصافٍ على نحو مثالي بنيو مكسيكو [48].

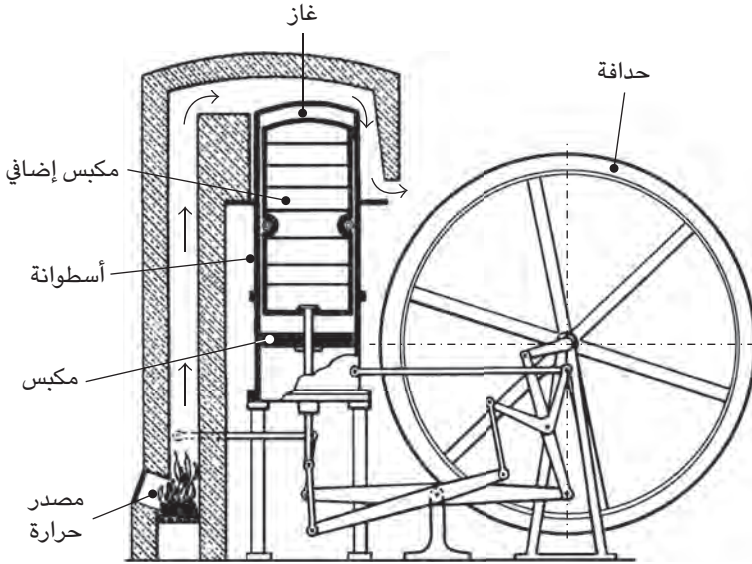
اخترع محرك ستيرلنج في عام 1816 على يد روبرت ستيرلنج، وهو قس كان يدرس الهندسة الميكانيكية باعتبارها هواية، وقد ابتكر هذا المحرك في ورشة الآلات الموجودة بمنزله. ويعرض الشكل ١١-٢١ مخططاً لهذا المحرك. ويختلف هذا المحرك عن المحركين الحراريين الشهيرين: المحرك البخاري ومحرك الاحتراق الداخلي. وعلى نحو مماثل للمحرك البخاري، يستخدم هذا المحرك «مصدر حرارة خارجي»، لكن بدلاً من التبخير المستمر للماء وتحويله لبخار ومن ثم التخلص منه، يستخدم المحرك قدرًا ثابتًا من الغاز في أسطوانة مغلقة. وهو أبسط المحركات الحرارية؛ فلا يشتمل على أي صمامات. ويمكن أن يقترب من كفاءة كارنو. ويمكن أن يعمل من خلال أي نوع من المصادر الحرارية؛ لذا فإن ضوء الشمس المركز مثالي. في الشكل ١١-٢١، تُوفّر الحرارة من خلال حرق الخشب أو الفحم. ويُدخل مكبس بإحكام في أسطوانة تدفع حذافة عبر عمود مرفقي، ويُدفع مكبس غاز إضافي، ملحق على نحو غير محكم بالأسطوانة، من قبل العمود المرفقي بإزاحة دورية في حركة المكبس. ووسط التشغيل، الغاز، دائماً ما يكون محبوساً في الأسطوانة. وتظهر تفاصيل دورات عمله في الشكل ١١-٢٢. أثناء خطوة (أ)، يكون الغاز بارداً ويكون المكبس الإضافي في أقصى الداخل، ويُدفع المكبس لداخل الأسطوانة، ثم يُسخن مصدر الحرارة الغاز في خطوة (ب). وأثناء خطوة (ج)، يدفع الغاز الساخن المتمدد المكبس للخارج. وأخيراً، في خطوة (د)، يرجع المكبس الإضافي لأقصى الداخل، ويبرد الغاز بفعل الوسط المحيط. من أجل التشغيل الفعال، يجب أن يكون للغاز موصلية حرارية عالية. وأكثر الغازات استخداماً هو الهيدروجين، لكن معامل انتشار الهيدروجين في الصلب عالٍ جداً؛ لذا إما أن تُستخدم مادة خاصة معامل انتشار الهيدروجين فيها منخفض لصنع الأسطوانة أو يحدث إمداد منتظم بالهيدروجين.

لا يُعد محرك ستيرلنج مناسباً للتطبيقات المتعلقة بالمركبات لكبر حجمه واحتياجه لآلية تبريد فعالة.

(٤-٤) الدورة المركبة الشمسية المتكاملة

في الأقسام السابقة، ناقشنا نظم الطاقة الحرارية الشمسية المصممة لمحطات الطاقة القائمة بذاتها. وبسبب الطبيعة المتقطعة للطاقة الشمسية، هناك حاجة لنظم تخزين طاقة كبيرة مثل استخدام الحرارة المحسوسة والحرارة الكامنة أثناء التغير الطوري وكذلك البطاريات، لكن تخزين الطاقة الواسع النطاق مكلف للغاية. بالإضافة إلى ذلك، تحتاج

الطاقة الحرارية الشمسية

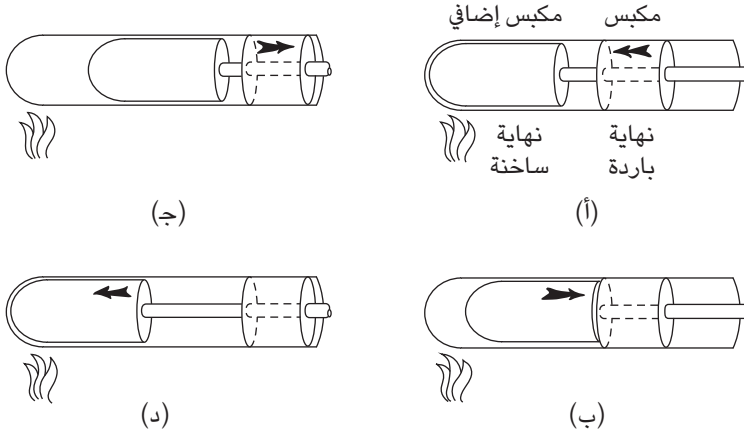


شكل ١١-٢١: محرك ستيرلينج: اخترع هذا المحرك في عام 1816 على يد روبرت ستيرلينج، وهو غير مزود بصمام؛ لذا يُعد أبسط المحركات الحرارية. وهو يستخدم قدرًا ثابتًا من الغاز، بوجه أساسي الهيدروجين، باعتباره وسط التشغيل. ويمكن أن يعمل اعتمادًا على مصدر حراري واحد، بكفاءة تقترب من حد كارنو. ويُعد المحرك الحراري المثالي الذي يُمكن أن يعمل بضوء الشمس المركز.

محطات الطاقة الشمسية الصّرفة تجهيزات خاصة مثل محرك ستيرلينج أو محولات تيار متردد-تيار مستمر أو نظم انتقال حراري قائمة على الملح المنصهر.

هناك اتجاه حديث في مجال استخدام الطاقة الشمسية يتمثل في الدخول في «تنافس» مع محطات الطاقة التقليدية مثل الغلايات المعتمدة على الوقود الحفري أو تلك القائمة على الطاقة النووية، وإنما «التكامل» معها. إنه يُطلق عليه «الدورة المركبة الشمسية المتكاملة». في هذا النموذج، يُضاف حقل شمسي إلى محطة طاقة تقليدية، وذلك كما يتضح من الشكل ١١-٢٣. يمكن للحقل الشمسي أن يأخذ الماء كمدخل ويسخنه لتوليد بخار فائق الحرارة ثم يوفر البخار عند نقطة درجة الحرارة القصوى (التشغيل عالي

فيزياء الطاقة الشمسية

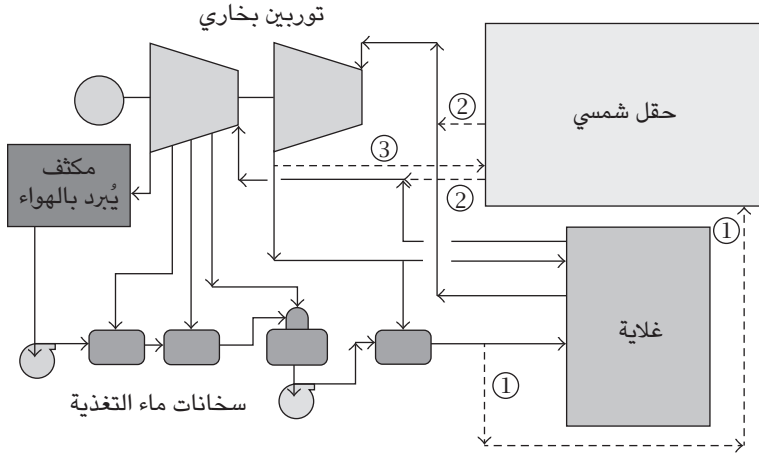


شكل ١١-٢٢: مبدأ عمل محرك ستيرلنج: (أ) يكون الغاز باردًا ويكون المكبس الإضافي في أقصى الداخل، ويُدفع المكبس إلى داخل الأسطوانة. (ب) يُسخن مصدر الحرارة الغاز. (ج) يدفع الغاز الساخن المتمدد المكبس للخارج. (د) يرجع المكبس الإضافي إلى أقصى الداخل، ويُبرد الغاز بفعل الوسط المحيط.

درجة الحرارة) أو نقطة أقل من درجة الحرارة القصوى (التشغيل متوسط أو منخفض درجة الحرارة)؛ انظر الشكل ١١-٢٣.

هناك ميزة مهمة لهذا النظام، وهو أن مكون الطاقة الشمسية يُبنى باستخدام تقنية توليد طاقة تقليدية متطورة باستثمار إضافي محدود مع الاستفادة المثلى من تضمين الطاقة الشمسية. ومن الممكن حتى تعديل محطة طاقة حالية تعمل بالوقود الحفري بإضافة مكون طاقة شمسية «دون مقاطعة عملها»؛ لذا فإن هذا النظام دمج مفيد لكل من المحطتين الشمسية والتقليدية فيما يتعلق بالتكلفة الرأسمالية المخفضة والإمداد المستمر بالطاقة. وهناك ميزة أخرى لهذا النظام تتمثل في أنه يولد طاقة عندما تكون الحاجة إليها قصوى في أثناء أوقات الذروة في اليوم والعام حيث تعمل مكيفات الهواء بأقصى سعة لها؛ ومن ثم بإضافة حقل شمسي، يمكن أن تقل على نحو كبير السعة الاسمية لمحطة الطاقة لنفس الخدمة في منطقة معينة. ومنذ عام 2008، أقيمت 8 محطات طاقة بهذا الشكل، بوجه خاص في شمال أفريقيا. وتتراوح نسبة الطاقة الشمسية بين 5 و20 بالمائة.

الطاقة الحرارية الشمسية

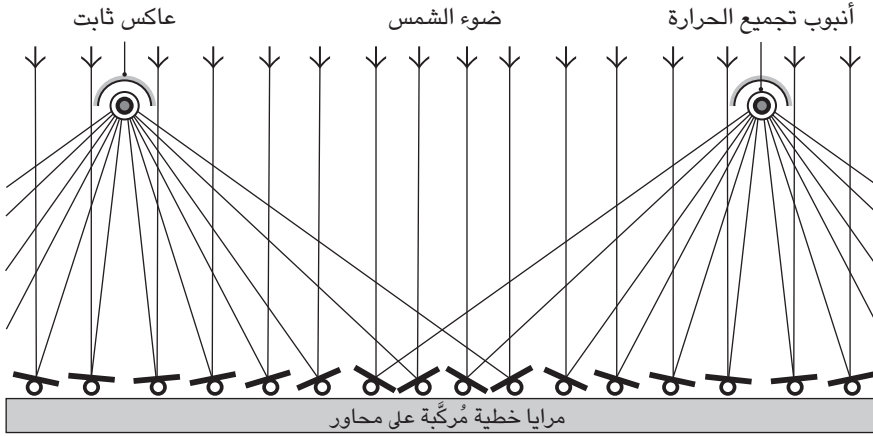


شكل ١١-٢٣: مخطط الدورة المركبة الشمسية المتكاملة: بإضافة حقل شمسي لمحطة طاقة تقليدية تقوم على التوربين البخاري، يحدث استخدام منخفض التكلفة للطاقة الشمسية. وفي التنفيذ عالي درجة الحرارة من هذا النظام، يُستخدم ضوء الشمس لتوليد بخار فائق الحرارة، المُشار إليه بخطوط متقطعة في الشكل. (1) بتغذية الحقل الشمسي بالماء، تُمد التوربينات ببخار فائق الحرارة إما عند درجة حرارة عالية (2)، وإما عند درجة حرارة أقل من درجة الحرارة القصوى، عبر مسار (3). نقلاً عن تقرير لشركة بكتل [84].

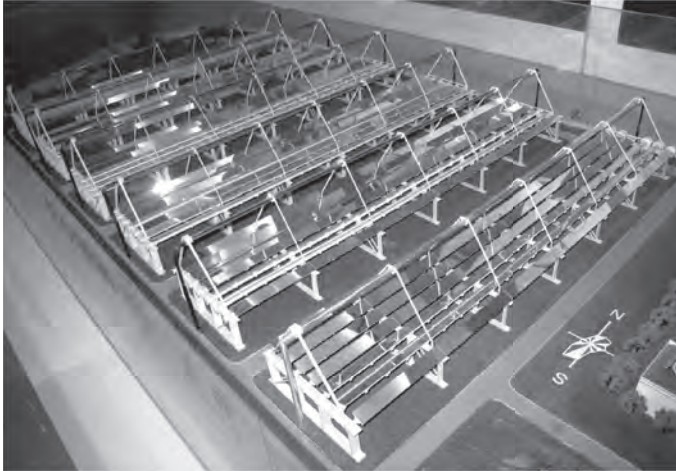
(٥-٤) عاكس فريزل الخطي

يستخدم مُركّز حوض القطع المكافئ مرايا كبيرة مصممة على نحو فردي لإنشاء نظام ميكانيكي ضخم. وتكلفة النظام الميكانيكي عالية، كما أنه معرض للتدمير بفعل الرياح. هذا بالإضافة إلى أن تنظيفه وإصلاحه مكلفان. وأحد حلول هذه المشكلة يتمثل في استخدام «مُركّز فريزل الخطي»؛ انظر الشكل ١١-٢٤. فبدلاً من استخدام مرايا كبيرة ذات تصميم مُخصص، تُستخدم مرايا مسطحة طويلة وضيقة. وتُركّب هذه المرايا على محور أحادي البعد وتتحرك بنحو فردي لتعكس ضوء الشمس على المرأة المقعرة الخطية الصغيرة ثم تُركّزه على ماص الأنبوب المفرغ. عادة ما يكون سائل الانتقال الحراري هو الماء، لتوليد بخار فائق الحرارة تصل درجة حرارته بحد أقصى إلى نحو 365 درجة مئوية

فيزياء الطاقة الشمسية

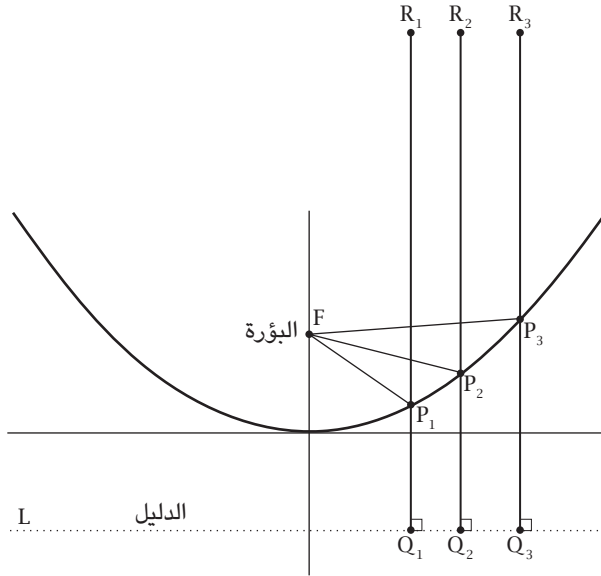


شكل ١١-٢٤: نظام يقوم على عاكس فريزل خطي: مصفوفة من المرايا الخطية (الضيقة والطويلة) مُركبة على محور يمكن تدويره ليحاكي ضوء الشمس على نحو فردي. ويُركّز ضوء الشمس أكثر من خلال مرآة مقعرة خطية صغيرة لماص الأنبوب المفرغ.



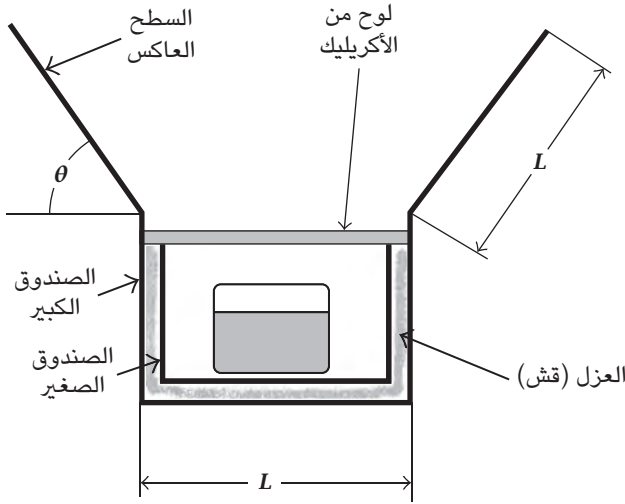
شكل ١١-٢٥: نموذج لنظام يقوم على عاكس فريزل خطي: نموذج في متحف هيمين للطاقة الشمسية بمدينة ديزو بالصين. الصورة الفوتوغرافية التقطها المؤلف، بإذن من مجموعة هيمين للطاقة الشمسية.

يعمل على نحو مباشر على تشغيل التوربين. في هذا الترتيب، يمكن وضع المرايا قريبًا جدًا من الأرض. هناك مزايا عدة لذلك؛ أولاً: هناك أجهزة استقبال عديدة خطية في النظام، فإن كانت قريبة من بعضها على نحو كاف، فالعواكس الفردية يكون لديها خيار توجيه الإشعاع الشمسي المنعكس لجهازي استقبال على الأقل. ويسمح هذا المتغير الإضافي فيما يتعلّق بتوجيه العواكس بوجود مصفوفات مكدسة أكثر بكثير وارتفاعات أبراج ماصات أقل لأن أنماط توجيه العاكس البديل يمكن إنشاؤها بحيث يمكن وضع العواكس المكدسة بالقرب من بعضها البعض دون أن يعيق كل منها عمل الآخر. ويمكن تقليل تأثير الظلال، كما هو موضح في الشكل ١١-٢٤، وستتحسن كفاءة استخدام الأراضي. كما أن التراكيب الميكانيكية ستكون قريبة من الأرض، وستقل التكلفة على نحو كبير. علاوة على ذلك، ستصبح عملية التنظيف والإصلاح أبسط بكثير مما هي عليه الحال في النظام المعتمد على مركز حوض القطع المكافئ. ويعرض الشكل ١١-٢٥ لنموذج نظام يعتمد على عاكس فريزل الخطي، موجود في متحف هيمين للطاقة الشمسية بمدينة ديزو بالصين.



شكل ١١-٢٦: خاصية التركيز البؤري للقطع المكافئ.

فيزياء الطاقة الشمسية



شكل ١١-٢٧: صندوق كيوتو. فرن شمسي بسيط يُستخدم بكثافة في أفريقيا.

مسائل

(11-1) اعتمادًا على التعريف الجبري للقطع المكافئ: $y = x^2/4f$ ، أثبت أن القطع

المكافئ هو الموضع ذو البعد المتساوي بين بؤرة ودليل. انظر الشكل ١١-٢٦.

(11-2) باستخدام التعريف الهندسي الخاص بالمسألة 11-1، أثبت أن كل الأشعة

الضوئية الموازية للمحور الصادي سيعكسها سطح على شكل قطع مكافئ للبؤرة.

انظر الشكل ١١-٢٦.

- (11-3) هناك مُجمّع حراري شمسي ذو أنابيب مفرغة له قطر داخلي قدره 1800mm وطول 45mm وممتلئ بالماء بدرجة حرارة 20 درجة مئوية. ومحور الأنبوب عمودي على ضوء الشمس. بافتراض أن الكفاءة تساوي 90 بالمائة، ففي ظل ضوء الشمس الكامل، كم من الوقت سيستغرقه غلي الماء داخل الأنبوب؟
- (11-4) يحتوي نظام تسخين ماء شمسي على 24 أنبوباً مفرغاً بمحيط خارجي قدره 58mm ومحيط داخلي 47mm وطول 1800mm. هو متصل بخزان معزول يحتوي على 200 لتر من الماء. في يوم مشمس، ومع كون ضوء الشمس عمودياً على مستوى الأنابيب المفرغة وفي ظل كفاءة قدرها 90 بالمائة، كم من الوقت يحتاجه لتسخين الماء لدرجة حرارة 20 درجة مئوية؟ (ارجع للأشكال ١-٣٢ و ١١-١١ و ١١-١٧).
- (11-5) إن صندوق كيوتو هو فرن شمسي بسيط يُستخدم بكثرة في أفريقيا؛ انظر الشكل ١١-٢٧. بافتراض وجود صندوق مربع الشكل بأربعة عواكس بـ L يساوي 75cm، ففي يوم مشمس بضوء شمس مباشر من نقطة السميت، ما زاوية السقوط المثل θ ؟ وما الطاقة الشمسية الإجمالية المُستقبلية من الصندوق؟ وإذا كانت الكفاءة تساوي 70 بالمائة، فكم من الوقت سيستغرقه الصندوق لتسخين جالون (3.785 لتر) من الماء من درجة حرارة 25 درجة مئوية لنقطة الغليان؟

الفصل الثاني عشر

تخزين الطاقة

الطاقة الشمسية متقطعة؛ ومن ثم فعملية تخزين الطاقة ضرورية إذا كانت الشمس هي مصدر الطاقة الرئيسي. بوجه عام، هناك نوعان من تخزين الطاقة: تخزين الطاقة الواسع النطاق في شبكة طاقة كهربية، وتخزين الطاقة الموزع المرتبط بالتطبيق. بالنسبة للنوع الأول، تتمثل أكثر الطرق فاعلية في استخدام محطة كهرومائية قابلة للعكس تخزن الطاقة الميكانيكية كطاقة كامنة في خزان عالي المستوى. وقد ناقشنا هذا في الفصل الأول – قسم (٣-١). أما عن أكثر طريقتين واعدتين لتخزين الطاقة الموزع، فهما تخزين الطاقة الحرارية والبطاريات القابلة لإعادة الشحن. وبوجه خاص بالنسبة لوسائل النقل (السيارات والسفن الصغيرة)، ستصبح البطاريات القابلة لإعادة الشحن وسيلة تخزين الطاقة الأساسية. والهواء المضغوط والحداقات أيضًا مهمان، لكنهما لن يُستخدمَا على نحو واسع الانتشار مثل البطاريات الحرارية والبطاريات القابلة لإعادة الشحن. في هذا الفصل، سنركز على تخزين الطاقة الحرارية والبطاريات القابلة لإعادة الشحن.

(١) تخزين الطاقة الحرارية المحسوسة

إن تخزين الطاقة باعتبارها المحتوى الحراري للمادة غير مُكلف وسهل التنفيذ، ويمكن استخدامه في تدفئة وتبريد المساحات وكذلك توليد الطاقة. يُستخدم نوعان من الطاقة الحرارية: الطاقة الحرارية المحسوسة، التي تتناسب بوجه أساسي مع فرق درجة الحرارة. والطاقة الحرارية المتغيرة الطور مثل الحرارة الكامنة أثناء التجميد والانصهار، التي يمكن أن تحافظ على درجة حرارة ثابتة بمحتوى طاقة أكبر بكثير من الطاقة الحرارية المحسوسة. وتناسب المواد المتغيرة الطور جيدًا عملية تخزين الطاقة الشمسية.

يستخدم تخزين الطاقة الحرارية المحسوسة السعة الحرارية والتغير الحادث في درجة حرارة المادة أثناء عملية الشحن أو تفريغ الشحن؛ إذ ترتفع درجة حرارة المادة المخزنة عند امتصاص الطاقة وتنخفض عند استعادتها. ومن أبرز سمات نظم تخزين الحرارة المحسوسة أن عمليتي الشحن وتفريغ الشحن يمكن توقع أن تكونا قابلتين للعكس على نحو كامل لعدد غير محدود من الدورات؛ أي على مدى عمر التخزين. في تخزين الطاقة الحرارية المحسوسة، تكون العملية الديناميكية الحرارية للمادة دائماً «متساوية الضغط» تقريباً؛ أي تحت ضغط منتظم، بوجه عام، الضغط الجوي. وعادةً ما تُستخدم مادة صلبة أو سائلة. إن الحرارة النوعية للغاز تكون منخفضة جداً وهي ليست عملية بالنسبة لتخزين الطاقة الحرارية. فالحرارة Q الناتجة عن المادة من درجة الحرارة الأولية T_1 لدرجة الحرارة النهائية T_2 هي:

$$Q = M \int_{T_1}^{T_2} c_p dT, \quad (12-1)$$

بحيث إن M هي الكتلة و c_p هي الحرارة النوعية المتساوية الضغط. في معظم التطبيقات، يمكن التعامل مع الكثافة والحرارة النوعية باعتبارهما ثابتاً. ويمكن تبسيط المعادلة 12-1 كما يلي:

$$Q = Mc_p (T_2 - T_1). \quad (12-2)$$

تتناسب كمية المادة المطلوبة لخزان التخزين وحالات فقد الحرارة تقريباً مع المساحة السطحية للخزان. وتتناسب السعة التخزينية مع حجم الخزان. والخزانات الأكبر لها نسبة مساحة سطحية-حجم أصغر؛ ومن ثم أرخص ثمناً وذات حالات فقد أقل للحرارة لكل وحدة طاقة مخزنة.

هناك مسألة مهمة فيما يتعلق بتخزين الطاقة الحرارية التي تتمثل في التوصيل الحراري أو تكافؤ درجة الحرارة في الوسط. ففي السوائل، التوصيل الحراري له مساران رئيسيان: التوصيل والحمل. فيمكن إحداث تكافؤ لدرجة الحرارة في وسط سائل على نحو أسرع كثيراً مما هو عليه الحال في وسط صلب؛ لذا فإن السائل يفضل متى أمكن. يعرض الجدول ١٢-١ بعض الخواص الحرارية لأكثر السوائل المستخدمة في تخزين الطاقة الحرارية المحسوسة.

تخزين الطاقة

جدول ١٢-١: الخواص الحرارية لبعض المواد الأكثر استخدامًا.*

المواد	الكثافة ρ (ب) (10^3 kg/m^3)	السعة الحرارية c_p (ب) ($10^3 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$)	الناتج ρc_p (ب) ($10^6 \text{ J/m}^3 \cdot \text{K}$)	نطاق درجة الحرارة (بالدرجة المئوية) ΔT
الماء	1.00	4.19	4.19	0-100
الإيثانول	0.78	2.46	1.92	-117-79
الجليسرين	1.26	2.42	3.05	17-290
زيت الكانولا	0.91	1.80	1.64	-10-204
الزيت الاصطناعي	0.91	1.80	1.64	-10-400

* المصدر: «دليل المعهد الأمريكي للفيزياء»، الطبعة الثالثة، المعهد الأمريكي للفيزياء، نيويورك، 1972.

(١-١) الماء

كما يتضح من الجدول ١٢-١، فإن للماء أكبر سعة حرارية لكل وحدة حجم ووحدة وزن؛ لذا من المنطقي استخدامه كمادة لتخزين الطاقة الحرارية المحسوسة. والمثال القياسي هو خزان الماء الساخن المستخدم في معظم المنازل. فبوجه عام، يُعزل الخزان بالبولي يوريثان فوم، الذي له موصلية حرارية k تساوي 0.02 W/mK ، وكثافة ρ تساوي 30 kg/m^3 . إذا امتلأ الخزان بالكامل بالماء، فسيساوي الحجم:

$$V = \frac{1}{4} \pi D^2 L \quad (12-3)$$

والسعة الحرارية:

$$C_p = \rho c_p V. \quad (12-4)$$

والمساحة السطحية الكلية للخزان هي:

$$A = \frac{1}{2} \pi D^2 + \pi D L. \quad (12-5)$$

ومعدل فقد الحرارة هو:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{\kappa A}{\tau} (T_w - T_a), \quad (12-6)$$

بحيث إن $T_w - T_a$ هو الفرق بين درجة حرارة الماء T_w ودرجة الحرارة المحيطة T_a .
ومعدل فقد درجة الحرارة هو:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{2\kappa (D + 2L)}{\tau \rho c_p D L} (T_w - T_a). \quad (12-7)$$

يتناسب معدل انخفاض درجة الحرارة عبر السطح الخارجي للخزان مع المساحة السطحية الكلية ويتناسب عكسيًا مع الحجم. وإذا كان الخزان رقيقًا أو مسطحًا جدًا، فسيكون فقد الحرارة عاليًا؛ من ثَمَّ بالنسبة لخزان بحجم ثابت، يجب أن تكون هناك نسبة L/D مثلى لتقليل فقد الحرارة. بديهيًا، يجب أن يكون L مساويًا تقريبًا لـ D . في المسألة 12-1، يمكن أن نثبت أن هذه الفكرة صحيحة: الوضع المثالي هو أن يكون L مساويًا لـ D ، وتصبح المعادلة 12-7 كما يلي:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{6\kappa}{\tau \rho c_p D} (T_w - T_a). \quad (12-8)$$

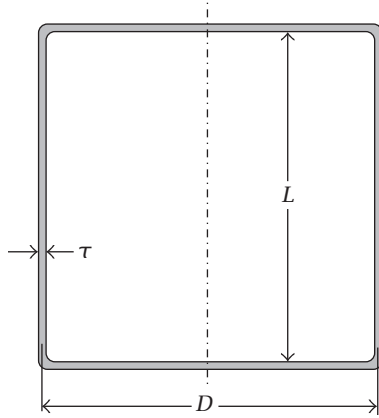
يُثبت حجة نوعية أخرى، وهي: كلما كان البعد أكبر، زادت قدرة الخزان على الاحتفاظ بدرجة الحرارة.

فيما يلي مثال رقمي. إذا كان $D = L = 1\text{m}$ ، و $\tau = 5\text{cm} = 0.05\text{m}$ ، و $T_w = 80$ درجة مئوية و T_a تساوي 20 درجة مئوية، فإن معدل انخفاض درجة الحرارة يساوي:

$$\begin{aligned} \frac{dT}{dt} &= \frac{6 \times 0.02}{0.05 \times 4.19 \times 10^6 \times 1} \times 60 \\ &= 3.4 \times 10^{-5} \text{C/s} = 0.124 \text{C/h}. \end{aligned} \quad (12-9)$$

يستغرق انخفاض درجة الحرارة درجة مئوية واحدة 8 ساعات. ووحدات تخزين الطاقة هذه تُستخدم بكثافة في نظم تسخين الماء.

تخزين الطاقة



شكل ١٢-١: ماء في خزان معزول: حساب سلوك تخزين الطاقة في خزان ماء معزول. يتناسب فقد الحرارة مع المساحة السطحية الكلية ويتناسب محتوى الطاقة مع الحجم. ويقل معدل انخفاض درجة الحرارة عندما يساوي القطر D الطول L . فبالنسبة لخزان ذي بُعد حطّي قدره نحو متر بطبقة عازلة من البولي يوريثان فوم سمكها 5cm، يحتاج لثماني ساعات كي تنخفض درجة حرارة الماء درجة مئوية واحدة.

(٢-١) مواد تخزين الحرارة المحسوسة الصلبة

على عكس الماء والمواد السائلة الأخرى، يمكن أن توفر المواد الصلبة نطاق درجة حرارة أكبر ويمكن استخدامها بدون حاوية، لكن الموصلية الحرارية تصبح معاملاً مهماً. يعرض الجدول ١٢-٢ للخواص الحرارية لأكثر المواد الصلبة المستخدمة في تخزين الطاقة الحرارية المحسوسة. بالنسبة للعديد من المواد المعروضة بهذا الجدول، مثل التربة والصخر، القيم تقريبية أو متوسطة فقط، لأن تلك المواد تختلف على نحو واسع. على سبيل المثال، يمكن أن تختلف المعاملات الحرارية للتربة بقيمة أسية واحدة اعتماداً على محتوى الماء بها.

كما يتضح من الجدول ١٢-٢، عادة ما يكون للمواد ذات الموصلية الحرارية العالية سعة حرارية منخفضة. وعند استخدام مواد صلبة ذات ساعات حرارية عالية، من المتوقع أن يستغرق تكافؤ درجة الحرارة وقتاً طويلاً.

فيزياء الطاقة الشمسية

جدول ١٢-٢: الخواص الحرارية للمواد الصلبة.*

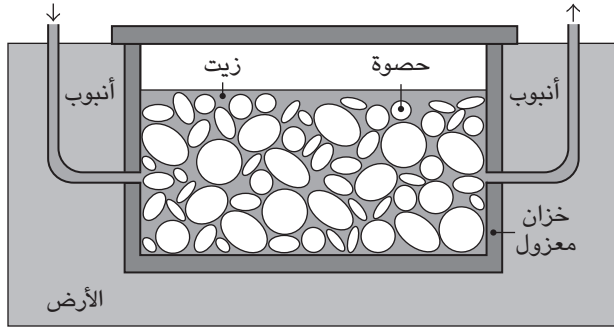
المادة	الكثافة ρ (ب) (10^3 kg/m^3)	السعة الحرارية c_p (ب) (10^3 J/kg.K)	الناتج pc_p (ب) ($10^6 \text{ J/m}^3.\text{K}$)	الموصلية الحرارية K (ب) (W/m.K)
الألومنيوم	2.7	0.89	2.42	204
حديد الزهر	7.90	0.837	3.54	29.3
النحاس	8.95	0.38	3.45	385
التربة	1.7	2.1	3.57	2.5
الطين	1.26	0.795	1	0.25
الحجر الجيري	2.5	0.91	2.27	1.3
الرخام	2.6	0.80	2.08	2.07–2.94
الجرانيت	3.0	0.79	2.37	3.5
الطوب	1.7	0.84	1.47	0.69
الخرسانة	2.24	1.13	1.41	0.9–1.3
خشب البلوط	0.48	2	0.96	0.16

* المصدر: «دليل المعهد الأمريكي للفيزياء»، الطبعة الثالثة، المعهد الأمريكي للفيزياء، نيويورك، 1972؛ ومرجع [31].

(٣-١) الزيت الاصطناعي في الأعمدة المعبأة

لأن نطاق درجة حرارة الماء محدود، فمن أجل تخزين حرارة محسوسة بدرجة حرارة أعلى، على سبيل المثال، في نظم توليد الكهرباء من الطاقة الشمسية، يجب أن يُستخدَم زيت اصطناعي، لكن هذا الزيت غالي الثمن. وهناك حل وسط يتمثل في استخدام مزيج من الزيت الاصطناعي ومواد صلبة رخيصة مثل الحصى. يعرض الشكل ١٢-٢ تخطيطاً لمثل هذا النظام لتخزين الطاقة الحرارية. فيمكن إنشاء نظام تخزين طاقة حرارية بدرجة حرارية عالية (على سبيل المثال، 400 درجة مئوية) بتكلفة محدودة. ويحدث التوصيل الحراري على نحو أساسي من خلال الحمل الحراري للزيت، في حين يوفر الحصى السعة الحرارية.

تخزين الطاقة



شكل ١٢-٢: نظام تخزين طاقة حرارية قائم على الحصى: باستخدام مزيج من الزيت الاصطناعي والحصى، يمكن إنشاء نظام تخزين طاقة حرارية بدرجة حرارة عالية (على سبيل المثال، 400 درجة مئوية) بتكلفة معقولة. ويحدث التوصيل الحراري على نحو أساسي من خلال الحمل الحراري للزيت، في حين يوفر الحصى السعة الحرارية.

(٢) تخزين الطاقة الحرارية القائم على التغير الطوري

في نظم تخزين الطاقة الحرارية المحسوسة، ترتبط عملية شحن الطاقة أو تفريغ شحنها بحدوث تغير في درجة الحرارة التي ترتبط بدورها بقدر محتوى الطاقة الحرارية. وتعتمد كثافة التخزين على السعة الحرارية للمادة المستخدمة. وباستخدام مواد متغيرة الطور، يمكن تحقيق كثافة تخزين طاقة حرارية أعلى بكثير تستطيع امتصاص أو إطلاق كميات كبيرة من الطاقة (أو ما يُطلق عليه «الحرارة الكامنة») عند درجة حرارة ثابتة عن طريق إحداث تحول في الطور. نظرياً، يمكن تنفيذ الأنواع الثلاثة للتغير الطوري؛ سواء من الطور الصلب للطور الغازي، أو من الطور السائل للطور الغازي أو من الطور الصلب للطور السائل. وأول نوعين من أنواع التغير الطوري لا يُستخدمان بوجه عام في تخزين الطاقة رغم قدر الحرارة الكامنة العالية لهما؛ إذ إن الغازات تكون لها أحجام أكبر. والتغيرات الكبيرة في الحجم تجعل النظام كبيراً ومعقداً وغير عملي. وعمليات التحول من الطور الصلب للطور السائل تتضمن تغيراً قليلاً في الحجم (عادةً بضع نسب مئوية)؛ ومن ثم فهي مناسبة لتخزين الطاقة المتغير الطور.

بوجه عام، تكون الحرارة الممتصة أو المطلقة أثناء التغير الطوري هي:

$$\Delta Q = H_2 - H_1, \quad (12-10)$$

بحيث H هي المحتوى الحراري قبل التغير الطوري وبعده. وتُعرف الحرارة الكامنة h أو المحتوى الحراري النوعي، كما يلي:

$$H = hV, \quad (12-11)$$

بحيث إن V هو حجم المادة.

يعرض الجدول ٣-١٢ للخواص الحرارية للعديد من المواد المتغيرة الطور الشائعة الاستخدام. إن المادة المتغيرة الطور الجيدة يجب أن توفر تخزيناً للطاقة عند درجة الحرارة المرغوبة، وأن تمتص حرارة كامنة كبيرة أو يحدث تغيراً صغيراً في حجمها عند استخدامها في تخزين الطاقة، وأن تكون غير قابلة للاشتعال والصدأ وغير سامة ورخيصة الثمن.

جدول ٣-١٢: المواد المتغيرة الطور الشائعة الاستخدام.*

المواد	درجة حرارة التغير (بالدرجة المئوية)	الكثافة ρ (ب) (10^3 kg/m^3)	الحرارة الكامنة (ب) h (10^6 J/m^3)
الماء/الثلج	0	1.00	335
شمع البرافين	58-60	0.90	180-200
الشحم الحيواني	20-50	0.90	120-210
6 مولات كلوريد كالسيوم لكل مولين من الماء	29	1.71	190.8
10 مولات كبريتات صوديوم لكل مول من الماء	32.4	1.46	251
8 مولات هيدروكسيد باريوم لكل مول من الماء	72	2.18	301
6 مولات من كلوريد ماغنسيوم لكل 4 مولات من الماء	117	1.57	172

* المصدر: المرجعان [28] و[31].

بوجه عام، تُعد المواد المتغيرة الطور أغلى ثمنًا من نظم الحرارة المحسوسة. فهي تتحول إلى الطور الصلب؛ ومن ثم لا يمكن أن تُستخدم بصفة عامة كوسط لانتقال الحرارة في مجمع شمسي أو حمل حراري. ويجب استخدام وسط انتقال حراري منفصل مع استخدام مبادل حراري فيما بين الوسط والمادة. والعديد من تلك المواد تكون موصليتها الحرارية منخفضة؛ ومن ثم تحتاج لكمية أكبر من سائل التبادل الحراري. هذا في حين أن بعضها قابل للصدأ ويحتاج لحاويات خاصة. وهذا يزيد من تكلفة النظام.

(١-٢) النظم المعتمدة على الماء/ الثلج

كما يتضح من الجدول ١٢-٣، تكون الحرارة الكامنة لتجميد الماء أو إذابة الثلج عالية جدًا. ويُستخدم النظام المعتمد على الماء/ الثلج بالفعل في الصناعة لتوفير الطاقة في نظم تكييف الهواء. ويعرض الشكل ١٢-٣ صورة فوتوغرافية لنظام تخزين طاقة معتمد على الماء/ الثلج يُسمى «آيس بير» صممه وصنعت شركة آيس إنرجي المحدودة. ويتكون النظام من خزان معزول كبير مملوء بالماء والعديد من ملفات التبادل الحراري النحاسية. وفي أثناء الليل، يستخدم المبرد كهرباء رخيصة ويبرد الهواء ليحول الماء إلى ثلج. وكما أوضحنا في الفصل السادس، كلما قلَّت درجة الحرارة المحيطة، زاد معامل الأداء؛ لذا لصنع قدر محدد من الثلج أثناء الليل، تكون تكلفة الكهرباء أقل بكثير مما هي عليها في وقت النهار الحار الذي في أثناءه يستخدم النظام الثلج ليعبر المبنى، ولكن باستخدام هذا النظام، يمكن أن تكون كفاءة تخزين الطاقة أعلى من 90 بالمائة. ويمكن أن يكون إجمالي التوفير في الطاقة كبيرًا بحيث يصل إلى 30 بالمائة.

فيما يلي مثال رقمي على نظام معتمد على الماء/ الثلج. باستخدام الحاوية المعزولة المعروضة في الشكل ١٢-١، تكون الحرارة الكامنة الإجمالية هي:

$$Q = \Delta H = H_2 - H_1, \quad (12-12)$$

باستخدام المعادلة 12-3:

$$\Delta H = \frac{1}{4} \pi h D^2 L. \quad (12-13)$$



شكل ١٢-٣: نظام تخزين الطاقة آيس بير: خزان معزول مملوء بالماء والعديد من ملفات التبادل الحراري النحاسية. في أثناء الليل، يستخدم المبرد كهرباء رخيصة ويبرد الهواء ليحول الماء إلى ثلج. وكما أوضحنا في الفصل السادس، كلما قلت درجة الحرارة المحيطة، زاد معامل الأداء؛ لذا لصنع قدر محدد من الثلج أثناء الليل، تكون تكلفة الكهرباء أقل بكثير مما هي عليها في وقت النهار الحار. الصورة معروضة بإذن شركة آيس إنرجي المحدودة.

ولخزان D فيه تساوي L تساوي مترًا واحدًا، فإن إجمالي المحتوى الحراري للتغير الطوري هو:

$$\Delta H = 335 \times \pi \times 4 \times 10^6 \text{ J} = 2.63 \times 10^8 \text{ J}. \quad (12-14)$$

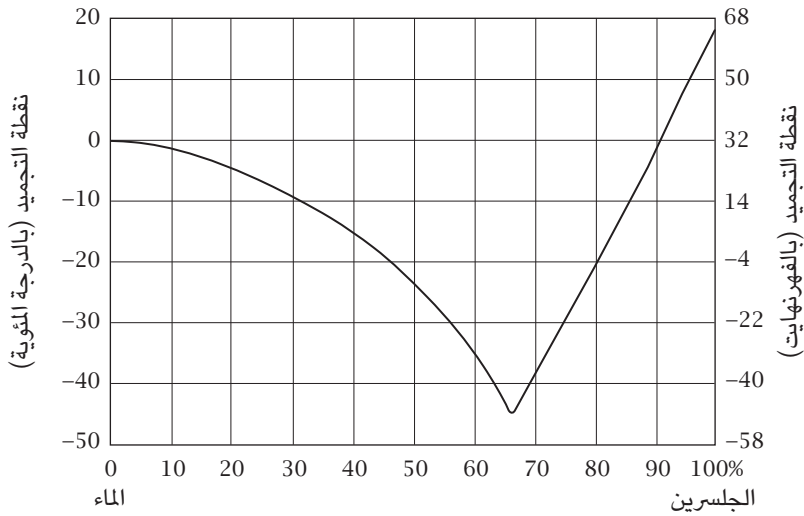
فإذا كانت درجة الحرارة المحيطة هي 20 درجة مئوية، فبالنسبة لهذا الخزان، وطبقًا للمعادلة 12-6، يكون معدل فقد الحرارة هو:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{3 \times \pi \times 0.02}{2 \times 0.05} \times 20 = 1.89 \text{ W}. \quad (12-15)$$

إذا كان الخزان في البداية مملوءًا بالثلج، فيمكنه الإبقاء على درجة الحرارة عند صفر درجة مئوية لمدة 4.4 أعوام ($2.63 \times 10^8 / 1.89 = 1.39 \times 10^8 \text{ s}$)؛ لذا باستخدام أدوات معقولة، يكون تخزين الطاقة جيدًا.

تخزين الطاقة

إن درجة الحرارة التي عندها يتجمد الماء الصافي هي صفر درجة مئوية. وإذا لم تكن درجة حرارة التشغيل صفرًا، فيمكن لمزيج من الماء ومواد أخرى أن تؤدي المهمة المطلوبة. ومثال على ذلك المبرد الذي يعمل بالطاقة الشمسية (براءة اختراع أمريكية رقم: 7543455). يجب أن يعمل المُجمد عند درجة حرارة -10 درجة مئوية تقريبًا. ونظرًا لأن المبرد يُستخدم في حفظ الطعام والأدوية، فيجب أن تكون المادة المضافة غير سامة. ويُعد الجلوسرين والإيثانول من المواد الجيدة في هذا الشأن لأن كليهما من المكونات المستخدمة في الأطعمة والأدوية. ويعرض الشكل ١٢-٤ لنقاط التجميد لمزيج من الماء والجلوسرين. وبمزج الماء مع الكحول، يمكن أن تكون درجة حرارة التجميد أقل أكثر.

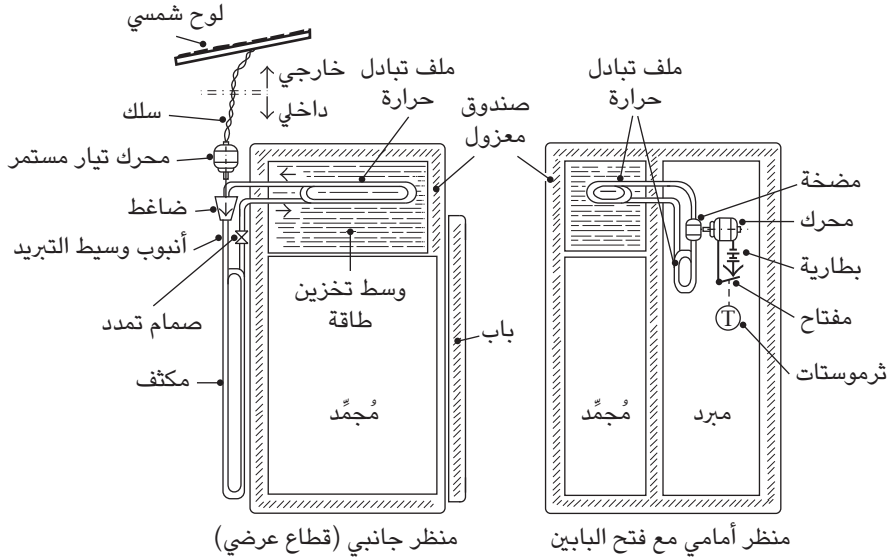


شكل ١٢-٤: نقاط التجميد لنظام يعتمد على مزيج من الماء والجلوسرين: بمزج الماء والجلوسرين، يمكن أن تنخفض نقطة التجميد من صفر إلى -40 درجة مئوية، اعتمادًا على النسبة بين الاثنين. وبمزج الماء بنسبة قليلة من الكحول، يمكن أن تقل نقطة التجميد أكثر.

إن الجلوسرين منتج فرعي من عملية إنتاج الديزل الحيوي، وهناك فائض من الجلوسرين الخام. والشوائب الموجودة في الجلوسرين الخام، باعتباره منتجًا فرعيًا من عملية إنتاج الديزل الحيوي، هي الماء والملح والأحماض الدهنية والكحول، ولذلك، ليست

فيزياء الطاقة الشمسية

هناك حاجة لاستخدام جلسرين عالي النقاء؛ من ثم فهو مفضل من الناحية الاقتصادية. ويعرض الشكل ١٢-٥ تصميم مبرد يعمل بالطاقة الشمسية. وتحدد مكونات النظام المعتمد على الماء والجلسرين والكحول درجة حرارة التشغيل الخاصة بالمجمد. يجري التحكم في درجة حرارة المبرد باستخدام ثرموستات وفقاً لسريان المزيج، التي يمكن أن يضبطها المستخدم.



شكل ١٢-٥: مبرد يعمل بالطاقة الشمسية: تصميم مبرد يعمل بالطاقة الشمسية. تحدد مكونات النظام المعتمد على الماء والجلسرين والكحول درجة حرارة التشغيل الخاصة بالمجمد. ويُتحكم في درجة حرارة المبرد باستخدام ثرموستات يمكن أن يضبطها المستخدم وفقاً لسريان المزيج. انظر براءة اختراع أمريكية رقم: 7543455.

(٢-٢) شمع البرافين وغيرها من المواد العضوية

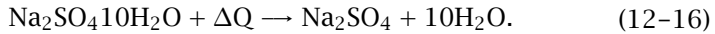
يُعد شمع البرافين منتجاً فرعياً لتكرير النفط. وتتراوح نقطة انصهاره ما بين 50 و 90 درجة مئوية. وحالياً، ليس له سوى استخدامات تجارية قليلة مثل الشموع وتلميع الأرضيات. وبالنسبة لتلك الاستخدامات، الأنواع فقط التي تتراوح نقطة تجمدها ما بين

تخزين الطاقة

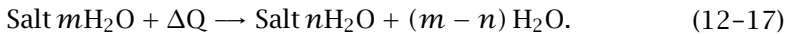
58 و 60 درجة مئوية هي المستخدمة، لكن شمع البرافين بوجه عام متوفر بكثرة. وتتوافق درجة تجمّده مع النطاق المطلوب لتدفئة المساحات وتسخين الماء المنزلي، كما أنه غير سام وغير قابل للصدأ، لكن هناك مشكلة واحدة فيه وهي موصليته الحرارية الضعيفة، التي يمكن التغلب عليها من خلال التغليف؛ انظر الفصل الثاني عشر - قسم (٢-٤). هناك مواد عضوية أخرى لها خواص مماثلة لتلك الخاصة بشمع البرافين. ومثال على ذلك الشحم الحيواني، فشحم الخنزير والدجاج يُعد ضاراً لصحة الإنسان؛ لأنه يمكن أن يزيد نسبة ثلاثي الجليسريد في الدم ويتسبب في السمّة. وهو من بعض النواحي يُعد من مخلفات صناعة الأطعمة المعالجة، لكنه غير سام وغير قابل للصدأ؛ ومن ثمّ يمكن استخدامه بأمان في تخزين الطاقة في البيئات السكنية.

(٣-٢) هيدرات الأملاح

تتبلور العديد من الأملاح غير العضوية عندما يُضاف إليها عدد محدد من جزيئات الماء لتتحول إلى هيدرات الأملاح التي عند تسخينها تتغير لطورها المميّة. على سبيل المثال، تخضع كبريتات الصوديوم المميّه (ملح جلوبر) لعملية التغير الطوري هذه عند درجة حرارة 32.4 درجة مئوية:



بوجه عام، تكون هذه العملية كما يلي:



ومن ثمّ، فعند نقطة الانصهار، تتفكك بلورات الهيدرات إلى ملح غير مميّه وماء أو هيدرات أقل وماء. ويمكن أن تكون الحرارة الكامنة كبيرة جداً؛ ومن ثمّ يمكن أن تكون كثافة التخزين عالية جداً. وإذا كان الماء المطلق كافياً، يتكون محلول مائي من الماء غير المميّه (جزئياً).

يمكن استخدام هيدرات الأملاح هذه في نظم تسخين الماء أو تدفئة المساحات المعتمدة على الطاقة الشمسية لتوفير درجة حرارة منتظمة لفترة زمنية أطول.

(٢-٤) تغليف المواد المتغيرة الطور

للتغلب على مشكلة ضعف الموصلية الحرارية للمواد المتغيرة الطور، عادة ما تُغلف تلك المواد بأشكال مختلفة. يعرض الشكل ١٢-٦ مثالاً لمادة متغيرة الطور مغلفة في أغلفة مسطحة أو أنبوبية. وهناك حاجة لسائل انتقال حراري حتى تؤدي المادة عملها.



شكل ١٢-٦: تغليف مادة متغيرة الطور: مثال لمادة متغيرة الطور مغلفة في أغلفة مسطحة أو أنبوبية للتغلب على مشكلة الموصلية الحرارية المنخفضة للمواد المتغيرة الطور.

(٣) البطاريات القابلة لإعادة الشحن

في العقود الأخيرة، حدث تطور نوعي في تكنولوجيا البطاريات القابلة لإعادة الشحن. حالياً، ما زالت بطاريات الرصاص الحمضية القابلة لإعادة الشحن التي عمرها مائة عام تشهد تطوراً منتظماً، وما زالت تُستخدم على نطاق واسع. وتشهد أنواعاً جديدة من البطاريات، وبخاصة بطاريات الليثيوم أيون القابلة لإعادة الشحن، نمواً كبيراً، وستصبح قريباً وسيلة التخزين الموزع الرئيسية للكهرباء.

يعرض الجدول ١٢-٤ مواصفات الأنواع المتعددة للبطاريات القابلة لإعادة الشحن. ويتمثل أحد العوامل الأساسية في هذا الإطار في فرق الجهد الاسمي. فالخلايا ذات فرق الجهد الاسمي الأعلى بالتأكيد أفضل؛ لأننا سنحتاج لخلايا أقل لإنشاء النظام المرغوب. وهناك عاملان مهمان أيضاً وهما كثافة الطاقة والطاقة النوعية. وبالنسبة للاستخدامات الثابتة مثل أعمدة إنارة الشوارع، فإن الطاقة النوعية المنخفضة ليست مسألة مهمة. أما بالنسبة للاستخدامات الخاصة بالمركبات، فتعد كثافة الطاقة والطاقة النوعية عاملين

تخزين الطاقة

مهمين. كما أن العمر الافتراضي عامل مهم أيضاً بالنسبة للاستخدامات الخاصة بالمركبات. ولم نعرض هنا لتكلفة الوحدة، لكن حالياً لا تزال بطاريات الرصاص الحمضية هي الأقل ثمناً ومن ثم الأكثر استخداماً.

جدول ١٢-٤: مقارنة بين البطاريات القابلة لإعادة الشحن.

النوع	فرق الجهد (V)	كثافة الطاقة (Wh/liter)	الطاقة النوعية (Wh/kg)	العمر الافتراضي (بالدورات)
بطاريات الرصاص الحمضية	2.1	70	30	300
بطاريات هيدريد النيكل المعدنية	1.4	240	75	800
بطاريات أكسيد كوبالت الليثيوم	3.7	400	150	1000
بطاريات أكسيد منجنيز الليثيوم	4.0	265	120	1000
بطاريات فوسفات حديد الليثيوم	3.3	220	100	3000

(٣-١) الكيمياء الكهربائية للبطاريات القابلة لإعادة الشحن

يظهر التركيب الأساسي للبطاريات القابلة لإعادة الشحن وعملية الشحن وتفريغ الشحن في الشكل ١٢-٧. للمرجعية، تظهر التعريفات الخاصة بهذا المجال فيما يلي. ولزيد من التفاصيل، انظر، على سبيل المثال، كتاب «الدليل الخاص بالبطاريات» [51].

الخلية: الوحدة الكيميائية الكهربائية الأساسية التي تحول الطاقة الكيميائية الكهربائية إلى طاقة كهربائية.

البطارية: خلية كيميائية كهربائية واحدة أو أكثر موصلة على نحو تسلسلي أو متوازٍ لتوفير الطاقة الكهربائية.

الخلايا أو البطاريات الأولية: مصدر يُستخدم لمرة واحدة لتوفير الكهرباء ولا يمكن إعادة شحنه بعد الاستخدام ويتم التخلص منه بعد الاستخدام.

الخلايا أو البطاريات الثانوية (القابلة لإعادة الشحن): خلايا أو بطاريات يمكن إعادة شحنها كهربياً بعد استخدامها لتعود إلى حالتها الأصلية.

الأكسدة: فقد إلكترون (إلكترونات).

الاختزال: كسب إلكترون (إلكترونات).

تفاعل الاختزال والأكسدة: تفاعل يحدث فيه اختزال وأكسدة.

الأيون: الأيون السالب بعد كسب إلكترون (إلكترونات).

الكاتيون: الأيون الموجب بعد فقد إلكترون (إلكترونات).

الأنود: عملية أكسدة تحدث. أثناء الشحن، يكون هو الإلكترود الموجب. وفي أثناء تفريغ الشحن، يكون الإلكترود السالب.

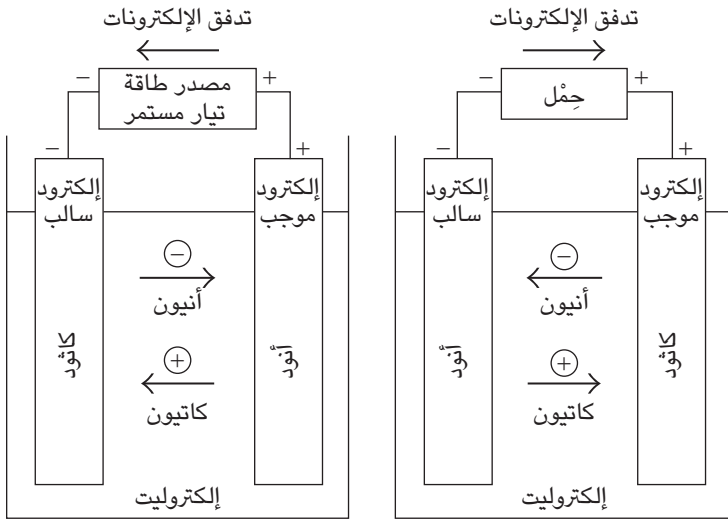
الكاثود: عملية اختزال تحدث. أثناء الشحن، يكون هو الإلكترود السالب. وفي أثناء تفريغ الشحن، يكون الإلكترود الموجب.

الإلكترولييت: بوجه عام، سائل موصل أيوني.

يعرض الشكل ١٢-٧ (أ) عملية تفريغ الشحن. فبتوصيل الخلية بحمل خارجي، تتدفق الإلكترونات من الإلكترود السالب، الأنود، الذي يكون متأكسداً، عبر الحمل الخارجي إلى الإلكترود الموجب، الكاثود، حيث تُكتسب الإلكترونات وتُختزل مادة الكاثود. تكتمل الدائرة الكهربائية في الإلكترونيت من خلال تدفق الأنيونات (الأيونات السالبة) والكاتيونات (الأيونات الموجبة) إلى الأنود والكاثود، على الترتيب.

يعرض الشكل ١٢-٧ (ب) عملية الشحن. تُوصّل البطارية بمصدر طاقة تيار مستمر خارجي. ويجبر المجال الكهربائي الخارجي الإلكترونات على التدفق إلى الإلكترود السالب حيث تحدث عملية اختزال. على الجانب الآخر، تحدث عملية أكسدة عند الإلكترود الموجب، الذي تتدفق منه الإلكترونات. وحيث إن الأنود، من حيث التعريف، هو الإلكترود الذي تحدث عنده عملية الأكسدة بخلاف الكاثود الذي تحدث عنده عملية الاختزال، يكون الإلكترود الموجب هو الأنود والإلكترود السالب هو الكاثود.

تخزين الطاقة



(ب) عملية الشحن

(أ) عملية تفريغ الشحن

شكل ١٢-٧: الكيمياء الكهربائية للبطاريات القابلة لإعادة الشحن: (أ) عملية تفريغ الشحن: بتوصيل الخلية بجمل خارجي، تتدفق الإلكترونات من الإلكترود السالب، الأنود، إلى الإلكترود الموجب، الكاثود. وتكتمل الدائرة الكهربائية في الإلكتروليت من خلال تدفق الأنيونات والكاتيونات إلى الأنود والكاثود، على الترتيب. (ب) عملية الشحن: يجبر مصدر طاقة تيار مستمر خارجي الإلكترونات على التدفق إلى الإلكترود السالب، ثم تكتمل الدائرة الكهربائية في الإلكتروليت من خلال تدفق الأنيونات والكاتيونات.

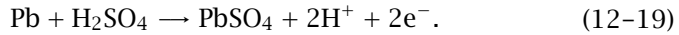
(٢-٣) بطاريات الرصاص الحمضية

حاليًا، تُعد بطارية الرصاص الحمضية أكثر البطاريات القابلة لإعادة الشحن استخدامًا. وكل مركبة يجب أن تشتمل على واحدة مكونة من ست خلايا. وبالنسبة لبطارية مشحونة بالكامل من هذا النوع، يكون الإلكترود الموجب مصنوعًا من ثاني أكسيد الرصاص، والسالب من الرصاص الخالص. ويكون الإلكتروليت حمض كبريتيك مخفف. وبعد تفريغ الشحن، يصبح كل من الإلكترود السالب والإلكترود الموجب كبريتات الرصاص؛

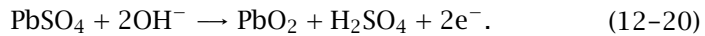
ومن ثم فإن حمض الكبريتيك يُستنفَد. وبقياس الوزن النوعي للإلكتروليت، ومن ثم تركيز حمض الكبريتيك، يمكن تحديد حالة تفريغ الشحن، ومن ثم، الطاقة المتبقية. أما عن الجوانب الكيميائية الكهربية، فهي كالتالي؛ أثناء تفريغ الشحن، عند الإلكترود الموجب، يُختزل ثاني أكسيد الرصاص كما يلي:



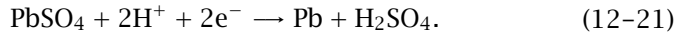
وعند الإلكترود السالب، تحدث أكسدة للرصاص، كما يلي:



وأثناء عملية الشحن، عند الإلكترود الموجب، تحدث أكسدة لكبريتات الرصاص، كما يلي:



وعند الإلكترود السالب، يحدث اختزال لكبريتات الرصاص، كما يلي:



إن الرصاص معدن ثقيل وسام. وحمض الكبريتيك سائل خطير. والعمر الافتراضي لهذا النوع من البطاريات قصير (300 دورة)؛ لذا هو غير مناسب للأجهزة المحمولة والمركبات، لكن نظرًا لأن الرصاص بوجه عام معدن رخيص ويمكن إعادة تدويره، فإن التكلفة الإجمالية للبطارية تكون منخفضة. ومن المتوقع أن تظل تلك البطاريات مستخدمة على نطاق واسع في المستقبل القريب؛ على سبيل المثال، كوحدة لتخزين الطاقة في المناطق البعيدة أو في الأدوار السفلية للمباني السكنية لتخزين الكهرباء المولدة عن طريق الطاقة الشمسية.

(٣-٣) بطاريات هيدريد النيكل المعدنية

في العقود الحديثة، استُخدم هذا النوع من البطاريات القابلة لإعادة الشحن على نطاق واسع في المركبات والأجهزة الإلكترونية المحمولة كبيرة الحجم نسبيًا. ويكون

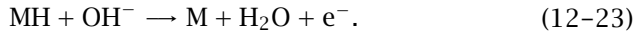
تخزين الطاقة

الإلكترود الموجب هنا من هيدروكسيد النيكل والسالب من مركب بين معدني. وأكثر المعادن استخدامًا له الشكل العام AB_5 ، حيث إن A مزيج من عناصر أرضية نادرة ولاثنانوم وسيريوم ونيوديميوم وبراسوديوم، وB مزيج من النيكل والكوبالت والمنجنيز والألمنيوم.

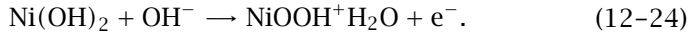
أما عن الجوانب الكيميائية الكهربائية المتعلقة بهذا النوع من البطاريات، فهي كما يلي. في أثناء تفريغ الشحن، عند الإلكترود الموجب، يُختزل هيدروكسيد أكسيد النيكل، كما يلي:



وعند الإلكترود السالب، يتأكسد هيدريد المعدن، كما يلي:



وأثناء الشحن، عند الإلكترود الموجب، يتأكسد هيدروكسيد النيكل، كما يلي:



وعند الإلكترود السالب، يُختزل المعدن، كما يلي:



عند الشحن الزائد بمعدلات قليلة، يمر الأكسجين المنتج عند الإلكترود الموجب عبر العازل ويتحد عند سطح الإلكترود السالب، ويتم وقف إطلاق الهيدروجين وتتحول طاقة الشحن إلى حرارة، وتسمح هذه العملية لخلايا هيدريد النيكل المعدنية بأن تبقى محكمة الغلق أثناء التشغيل العادي وألا تحتاج للصيانة.

يُستخدم هذا النوع من البطاريات بكثافة في المركبات الكهربائية مثل: إي في وان التي أنتجتها شركة جنرال موتورز، وإي في بلاس التي أنتجتها شركة هوندا، ورينجر إي التي أنتجتها شركة فورد، والسكوتر الذي أنتجته شركة فيكتريكس. وقد استخدمتها أيضًا المركبات الهجينة مثل: بريوس التي أنتجتها شركة تويوتا، وإنسايت التي أنتجتها

شركة هوندا، وإيسكيب التي أنتجتها شركة فورد، وماليبو التي أنتجتها شركة شيفروليه، وسيفيك التي أنتجتها شركة هوندا. وتُستخدم تقنية هيدريد النيكل المعدنية بكثافة في البطاريات القابلة لإعادة الشحن الخاصة بالأجهزة الإلكترونية الاستهلاكية.

(٤-٣) بطاريات الليثيوم أيون

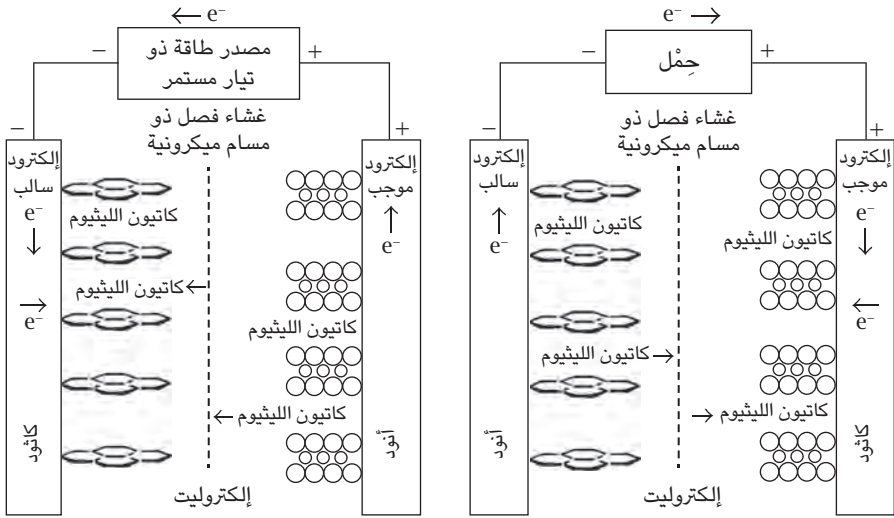
تُعد بطارية الليثيوم أيون حالياً أسرع وحدات تخزين الطاقة نمواً. فبعد وقت قصير من اختراع بطارية أكسيد كوبالت الليثيوم أيون في عام 1991، أصبحت مصدر الطاقة السائد في الأجهزة الإلكترونية المحمولة الصغيرة مثل الهواتف المحمولة والكاميرات الرقمية وأجهزة الكمبيوتر المحمول. وهناك اعتقاد سائد بأنها أفضل خيار لتزويد السيارات بالطاقة لأنها توفر أعلى طاقة نوعية، كما أن عمرها الافتراضي هو الأطول؛ ارجع إلى الجدول ١٢-٤.

من بعض النواحي، تُعد الجوانب الكيميائية الكهربائية لبطاريات الليثيوم أيون هي الأبسط. فالأيون الوحيد المتضمن فيها هو كاتيون الليثيوم، Li^+ . وله أصغر نصف قطر وأعلى جهد معياري، -3.01eV . كما أن الإلكترود السالب مصنوع من الجرافيت، في حين أن أيون الليثيوم الصغير مقحوم في المسافة بين رقائق الجرافين المتجاورة. والإلكترود الموجب هو أكسيد معدن انتقالي، حيث يمكن أن يكون للمعدن القاعدي حالات تكافؤ مختلفة للسماح لذرة الليثيوم بالاندماج أو الانفصال.

يعرض الشكل ١٢-٨ العمليتين الكيميائيتين الكهربيتين المتضمنتين في أي خلية ليثيوم أيون. في حالة الشحن الكامل، تُدفن معظم أيونات الليثيوم في طبقات الجرافيت. وأثناء عملية تفريغ الشحن، كما هو موضح في الشكل ١٢-٨(أ)، تترك أيونات الليثيوم الإلكترود السالب، وتمر خلال الإلكتروليت وتتجاوز غشاء الفصل ذا المسام الميكرونية وتتحد مع أكسيد المعدن في الإلكترود الموجب. وفي نهاية عملية تفريغ الشحن، تتحد معظم أيونات الليثيوم مع أكسيد المعدن في الإلكترود الموجب. وأثناء عملية الشحن، كما هو موضح في الشكل ١٢-٨(ب)، يُجبر فرق الجهد الخارجي أيونات الليثيوم على ترك أكسيد المعدن والممرور خلال الإلكتروليت وتجاوز غشاء الفصل ذي المسام الميكرونية والدخول عبر الجرافيت.

تستخدم معظم بطاريات الليثيوم أيون الخاصة بالأجهزة الإلكترونية الصغيرة مثل الهواتف المحمولة والكاميرات الرقمية؛ أكسيد الكوبالت كأساس للإلكترود الموجب. وأثناء

تخزين الطاقة

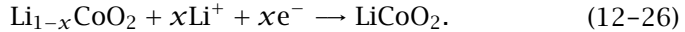


(ب) الشحن

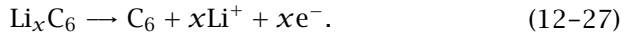
(أ) تفريغ الشحن

شكل ١٢-٨: العمليتان الكيميائيتان الكهربيتان في أي خلية ليثيوم أيون: (أ) أثناء عملية تفريغ الشحن، تترك أيونات الليثيوم الإلكترود السالب، وتمر خلال الإلكتروليت وتتجاوز غشاء الفصل ذا المسام الميكرونية وتتحد مع أكسيد المعدن في الإلكترود الموجب. (ب) أثناء عملية الشحن، يُجبر فرق الجهد الخارجي أيونات الليثيوم على ترك أكسيد المعدن والدخول عبر الجرافيت.

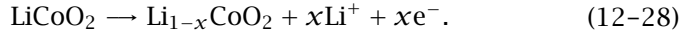
تفريغ الشحن، عند الإلكترود الموجب، يتحد أيون الليثيوم مع أكسيد الكوبالت، وذلك كما يلي:



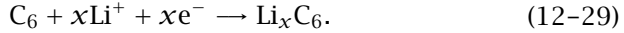
وعند الإلكترود السالب، تُستخلص أيونات الليثيوم، كما يلي:



وأثناء الشحن، عند الإلكتروود الموجب، تُستخلص أيونات الليثيوم، كما يلي:



وعند الإلكتروود السالب، تُقحم أيونات الليثيوم في الجرافيت، كما يلي:



في التفاعلات السابقة، إن x التي هي أكبر من أو تساوي 0 وأصغر من 1 هي جزء أيون الليثيوم المتفاعل.

إن لبطارية الليثيوم أيون المعتمدة على أكسيد الكوبالت طاقة نوعية عالية جداً. وهي مفضلة في التطبيقات التي يكون الوزن فيها عاملاً مهماً، لكن عنصر الكوبالت غالي الثمن. هذا بالإضافة إلى أنه سُجلت حالات انفجار لبطاريات كبيرة الحجم من هذا النوع؛ لذلك، بالنسبة لتطبيقات الطاقة، بطاريات الليثيوم أيون القائمة على أكسيد المنجنيز وفوسفات الحديد مفضلة أكثر.

اكتشفت مجموعة جون جودانف البحثية في جامعة تكساس في عام 1996 فوسفات حديد الليثيوم كمادة للإلكتروود الموجب في بطاريات الليثيوم أيون. ونظراً لخص ثمنها وعدم سميتها وتوفر الحديد بنسبة كبيرة واستقرارها الحراري العالي وخواصها الآمنة وأدائها الكيميائي الكهربائي الجيد وسعتها النوعية العالية ($170\text{mA} \cdot \text{h/g}$ أو 610C/g)، فقد اكتسبت قبولاً كبيراً في السوق.

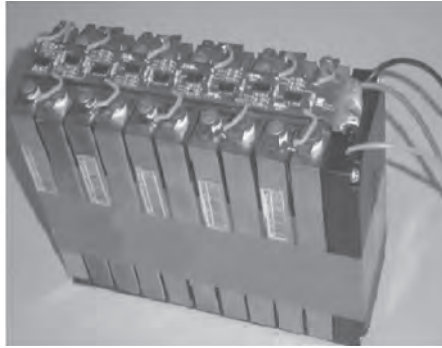
ورغم أن خلايا الليثيوم أيون المعتمدة على فوسفات حديد الليثيوم لها فرق جهد وكثافة طاقة أقل من تلك المعتمدة على أكسيد الكوبالت، فيمكن التغلب على هذا العيب بمرور الوقت بفضل معدل فقد السعة الأقل (أو العمر الأكبر) لفوسفات حديد الليثيوم عند مقارنتها بالمواد الأخرى التي تعتمد عليها بطاريات الليثيوم أيون. على سبيل المثال، بعد عام من الإنتاج، تكون لخلية معتمدة على فوسفات حديد الليثيوم بوجه عام نفس كثافة الطاقة تقريباً التي لخلية معتمدة على أكسيد الكوبالت، وبعد مرور أكثر من عام على الإنتاج، من المفترض أن تكون لها كثافة طاقة أعلى نظراً للاختلافات في عمريهما.

إن الجوانب الكيميائية الكهربائية الأساسية للبطارية المعتمدة على فوسفات حديد الليثيوم هي كما يلي: إن الحديد له حالتا أكسدة؛ أكسيد الحديد الثنائي وأكسيد الحديد

تخزين الطاقة



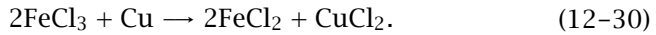
(a)



(b)

شكل ١٢-٩: بطاريات ليثيوم أيون: (a) بطارية ليثيوم أيون واحدة بفرق جهد اسمي قدره 3.7V. (b) عشر بطاريات ليثيوم أيون موصلة معًا على نحو تسلسلي بإجمالي فرق جهد اسمي قدره 37V. صورة فوتوغرافية التقطها المؤلف، ومعرضة بإذن من شركة فيليون للبطاريات ومقرها مدينة سوجو، الصين.

الثلاثي. وعادةً ما تكون مركبات أكسيد الحديد الثلاثي عوامل أكسدة قوية. على سبيل المثال، الطريقة القياسية لحفر النحاس من أجل صنع لوحات دوائر مطبوعة هي استخدام كلوريد الحديد الثلاثي، وذلك كما يلي:



من ثَم، فإن فوسفات الحديد وفوسفات حديد الليثيوم مركبان مستقران. ونظرًا لأن الليثيوم أيون صغير جدًا، فالاختلاف في الحجم المولي بين هذين المركبين لا يُذكر وهما يشتركان في نفس التركيب البلوري.

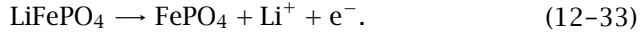
فيما يلي عرض لعمليتي الشحن وتفريغ الشحن: في بطارية معتمدة على فوسفات حديد الليثيوم مشحونة بالكامل، يكون الإلكترود الموجب في الغالب فوسفات حديد والجرافيت في الإلكترود السالب يكون مملوءًا بذرات الليثيوم. وأثناء تفريغ الشحن، عند الإلكترود الموجب، تُضغط أيونات الليثيوم إلى فوسفات الحديد، وذلك كما يلي:



وعند الإلكترود السالب، تُستخلص أيونات الليثيوم من الجرافيت:



أثناء الشحن، عند الإلكترود الموجب، تُستخلص أيونات الليثيوم من فوسفات الحديد:



وعند الإلكترود السالب، تدخل أيونات الليثيوم في الجرافيت:



(٥-٣) خام الليثيوم

مع ازدياد أهمية بطاريات الليثيوم أيون بالنسبة لمركبات المستقبل، فإن مشكلة توفر خام الليثيوم أصبحت حالياً محل اهتمام. أولاً، دعنا نحسب قدر الليثيوم الذي يكفي كل السيارات في العالم ثم نقارنه بما يتوفر لدينا من مخزون منه.

إن الوزن الذري لليثيوم هو 6.94g/mol. وكل مول من الليثيوم له 96490C من الشحنة الكهربائية. وفرق جهد التشغيل لبطارية الليثيوم أيون هو 3.5V؛ ومن ثم فإن السعة النوعية لليثيوم هي:

$$P = \frac{96490 \times 3.5}{3600 \times 6.94} = 13.5 \text{ kWh/kg} . \quad (12-35)$$

إذا احتاجت كل سيارة إلى بطارية بسعة 30kWh، إذن فهناك حاجة إلى 2.2kg من الليثيوم. وحالياً، هناك 600 مليون سيارة في العالم؛ لذا فإجمالي الليثيوم المطلوب يصل إلى 1.32 مليون طن.

طبقاً للمسح الجيولوجي الأمريكي لعام 2009 [2]، فإن قاعدة احتياطي الليثيوم الإجمالية المتحقق منها في العالم تبلغ 11 مليون طن، وهذا يعني إمكانية توفير احتياجات كل السيارات في العالم عدة مرات. ومؤخراً، وطبقاً لصحيفة «نيويورك تايمز» [71]،

وُجدت كمية كبيرة من ترسبات الليثيوم في أفغانستان. وطبقًا لتقرير داخلي للبنتاغون، يمكن لأفغانستان أن تصبح «في مجال الليثيوم كالسعودية في مجال النفط». ونظرًا لأن معظم خام الليثيوم حاليًا من بحيرات ملحية ذات ارتفاع عالٍ، فإن اكتشاف الليثيوم في أفغانستان ليس بمفاجأة.

(٤) الطاقة الشمسية والمركبات الكهربائية

طبقًا لإدارة معلومات الطاقة الأمريكية، تستخدم وسائل النقل في أمريكا 26.5 بالمائة من إجمالي الطاقة المستهلكة، أو 67.6 بالمائة من النفط. ولتقليل استخدام الطاقة المستمدة من مصادر الوقود الحفري، يُعد أفضل السبل هو التحول إلى السيارات الكهربائية التي تستخدم بطاريات قابلة لإعادة الشحن، وبخاصة بطاريات ليثيوم أيون، كوسط تخزين، والطاقة الشمسية كمصدر للطاقة. وللسيارات الكهربائية العديد من السمات الرائعة، منها:

- الكفاءة الذاتية للمحركات الكهربائية عالية جدًا؛ بوجه عام 90 بالمائة.
- كفاءة تخزين الطاقة في البطاريات القابلة لإعادة الشحن، وبخاصة بطاريات الليثيوم أيون، عالية جدًا؛ بوجه عام نحو 90 بالمائة.
- التركيب الميكانيكي للسيارات الكهربائية أبسط بكثير من السيارات ذات المحركات الأوتو أو محركات الديزل.
- يمكن تنفيذ نظام الكبح بالتوليد المعاكس على نحو طبيعي. في واقع الأمر، ترجع الكفاءة المحسنة للسيارات الهجينة، مثل بريوس التي تنتجها شركة تويوتا، على نحو أساسي لنظام الكبح بالتوليد المعاكس.
- مع التطور السريع لتقنية البطاريات، ستخفض تكلفة تصنيع السيارات الكهربائية على نحو سريع.
- تستطيع السيارات الكهربائية تركيب لوح شمسي تولد من خلاله الكهرباء اللازمة لعملها.
- إنها تقريبًا لا تحدث ضجيجًا.

دعنا أولاً نستعرض بعض المعلومات الفنية: في الولايات المتحدة، تُقاس كفاءة السيارات بـ mpg من الجازولين. وفي النظام الدولي للوحدات، يُعد أنسب قياس لتلك الكفاءة هو km/kWh، أو kWh/1km. ونظرًا لأن محتوى الطاقة الخاص بالجازولين

فيزياء الطاقة الشمسية

يساوي تقريباً $1.3 \times 10^8 \text{J/gallon}$ والميل الواحد يساوي 1.609km، فبحسبة بسيطة، نجد 1km/kWh يساوي 22.37mpg. ويعرض الجدول ١٢-٥ البيانات المقيسة للعديد من السيارات الشهيرة.

جدول ١٢-٥: كفاءة عدد من السيارات الشهيرة.*

الاسم	mpg	km/kWh	kWh/km
سيارة الهيدروجين التي تنتجها شركة بي إم دبليو	10	0.45	2.24
رينج روفر	20	0.89	1.19
كامري التي تنتجها شركة تويوتا	32	1.43	0.70
بريوس التي تنتجها شركة تويوتا	55	2.46	0.41
فولت التي تنتجها شركة شيفروليه	150	6.67	0.15

* المصدر: كتاب ديفيد جيه سي ماكاي «الطاقة المتجددة: بدون مبالغة» [56].

لعدة عقود، اعتُبرت خلية الوقود الهيدروجيني بديلاً لمحركي الأوتو والديزل في السيارات، واستُخدمت تعبيرات بها قدر كبير من المبالغة مثل عصر الهيدروجين واقتصاد الهيدروجين وحقبة الهيدروجين، لكن وفقاً لتحليل قام به جوزيف جيه روم [74] — الذي كان أحد نواب وزير الطاقة في إدارة كلينتون والمسئول عن مشروعات الهيدروجين؛ اعتماداً على خبرته الكبيرة — لن يصبح استخدام الهيدروجين في المستقبل المنظور طريقة صالحة تجارياً لتخزين الطاقة؛ فهي غالية الثمن للغاية وخطيرة على نحو كبير، وهي غير مناسبة على نحو خاص لسيارات؛ لأن كثافة تخزين الهيدروجين المضغوط على نحو عالٍ تبلغ فقط عُشر تلك الخاصة بالجازولين. هذا إلى جانب أن خلايا الوقود الهيدروجينية ذات كفاءة منخفضة (مقارنةً بالبطاريات القابلة لإعادة الشحن) وعمر افتراضي أقل، وتستخدم معادن ثمينة غالية الثمن.

في المستقبل، ستصبح الخلايا الكهروضوئية الشمسية المصدر الأساسي للكهرباء، وهي تقنية مناسبة جداً للسيارات الكهربائية. على وجه الخصوص، يمكن أن تشحن تلك الخلايا بطاريات السيارات الكهربائية دون الحاجة إلى الحصول على طاقة من شبكة الكهرباء. إن لهذا الأسلوب مزايا مهمة؛ فهو يجنبنا التكلفة وفقد الطاقة بسبب عاكس التيار المتردد-التيار المستمر وعاكس التيار المستمر-التيار المتردد. علاوة على ذلك، فإن

تخزين الطاقة

تقطع الطاقة الشمسية لم يعد عيباً لأنه لم تعد هناك حاجة لمصدر طاقة مستقر جداً من أجل شحن البطاريات. ويمكن تحسين وحدة شحن البطاريات العاملة بالطاقة الشمسية أكثر باستخدام إجراء تبديل البطاريات؛ حيث تُشحن البطاريات الاحتياطية عندما يكون هناك ضوء شمس. ويمكن للسيارة التي استنفدت بطاقتها طاقتها أن يذهب بها صاحبها لمحطة الشحن كي يحصل على أخرى مشحونة بالكامل وذلك في غضون بضع دقائق، ربما حتى أسرع من ملء خزان الوقود. ويعرض الشكل ١٢-١٠ محطة شحن سيارات كهربائية تعمل بالطاقة الشمسية في مدينة كيوتو التي قدمتها شركة نيسين إلكتريك المحدودة. وهي مزودة بحزمة بطاريات وعاكس تيار ووحدة شحن سريع.



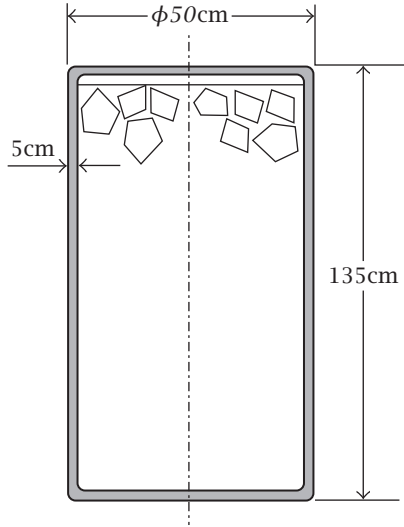
شكل ١٢-١٠: محطة شحن سيارات كهربائية تعمل بالطاقة الشمسية في كيوتو: محطة الشحن، التي قدمتها شركة نيسين إلكتريك المحدودة، مزودة بحزمة بطاريات وعاكس تيار ووحدة شحن سريع. الصورة معروضة بإذن من جامعة كيوتو.



شكل ١٢-١١: محطة شحن سيارات كهربائية تعمل بالطاقة الشمسية في تينيسي: في الولايات المتحدة، أخذت ولاية تينيسي خطوة أخرى في تشييد بنيتها التحتية الخاصة بشحن السيارات الكهربائية وأصبحت تتضمن الآن أول محطة شحن سيارات كهربائية تعمل بالطاقة الشمسية، ومن المنتظر أن تبني محطات أخرى في المستقبل القريب [10].

في الولايات المتحدة، ستنتج شركتا جنرال موتورز ونيسان سيارات كهربائية — من طرازي شيفروليه فولت ونيسان ليف — على نطاق واسع في ولاية تينيسي؛ لذا من المنطقي أن يبدأ سكان الولاية في توفير البنية التحتية الخاصة بشحن تلك السيارات. وقد حدث هذا بالفعل في مدينة بولاسكي بالولاية. ففي أغسطس من عام 2010، افتتحت أول ساحة انتظار شمسية تتكون من أماكن انتظار مزودة بوحدة شحن خاصة بالسيارات الكهربائية تعمل بالطاقة الشمسية؛ انظر الشكل ١٢-١١. وفي حفل الافتتاح، وبعد الإشادة باستقلال مجال الطاقة في أمريكا ومدى ما يوفره من وظائف، شغل عضو الكونجرس لنكولن دافيس المصفوفة الشمسية، مرسلاً الطاقة الشمسية لشبكة الطاقة. وقد ذُكر أن «كل المكونات هنا أمريكية الصنع، وأن هذا مثال على كيف أن التصنيع والأعمال الصغيرة في أمريكا ينموان في ظل الاقتصاد الأخضر الجديد [10].»

تخزين الطاقة



شكل ١٢-١٢: خزان ماء ساخن منزلي قياسي.

مسائل

- (12-1) خزان ماء ساخن منزلي قياسي بقطر D يساوي 50cm وارتفاع H يساوي 135cm بعزل سمكه τ يساوي 5cm مصنوع من مادة البولييميد فوم في شكلها الصلب؛ انظر الشكل ١٢-١٢. إذا كان الفرق بين درجتَي الحرارة الخارجية والداخلية 45 درجة مئوية، فما مقدار فقد الطاقة الخاص بهذا الخزان بالواط؟ (الموصلية الحرارية k لهذه المادة تساوي $0.026\text{W}/(\text{m}^\circ\text{C})$)
- (12-2) عند تخزين الماء الساخن في هذا الخزان عند درجة حرارة 65 درجة مئوية وفي ظل درجة حرارة محيطه تساوي 20 درجة مئوية، كم من الوقت يحتاجه لتقليل درجة حرارة الماء درجة مئوية واحدة؟
- (12-3) عند تخزين ثلج بدرجة حرارة صفر درجة مئوية في هذا الخزان المعزول وفي ظل درجة حرارة خارجية قدرها 25 درجة مئوية، كم من الوقت يحتاجه حتى ينصهر كل الثلج؟ (للعلم، الحرارة الكامنة للثلج تساوي $335\text{kJ}/\text{liter}$).

البناء والطاقة الشمسية

في حوار مع موقع «يو إس نيوز آند وورلد ريبورت» (مارس عام 2009)، قال ستيفين تشو، وزير الطاقة الأمريكي، ما يلي عن أهمية تحسين تصميم المباني للحفاظ على الطاقة [30]:

يقول الناس في بعض الأحيان إن كفاءة استخدام الطاقة وترشيدها ليسا أمرين جذابين؛ فهما لا يعتمدان على أحدث التقنيات. وهذا في واقع الأمر غير صحيح. فمن الممكن أن يصبحا جذابين ويعتمدان على أحدث التقنيات. ... دعنا نفترض أنك تبني منزلًا جديدًا. لقد قامت شركة ماكنزي بدراسة تقول إن استثمار ألف دولار أكثر في مواد البناء والعمالة يمكن أن تسترجعه في عام ونصف العام، ويمكنك في نفس الوقت توفير قدر هائل من الطاقة. فيما يتعلّق بالمنازل والمباني الجديدة، جزء من هذا أمر تنظيمي، لكن عليك أيضًا أن تقنع الناس — يجب أن يؤمنوا — أن تكبد تكلفة إضافية قليلة ستقلل بالفعل من الفواتير الشهرية التي يدفعونها.

التفاصيل موجودة في تقريرين نشرتهما شركة ماكنزي في عام 2009: الأول تحت عنوان «الكشف عن كفاءة استخدام الطاقة في الاقتصاد الأمريكي» [60] و«الثورة الخضراء في الصين» [59]، وهما يتناولان المشكلات التي يواجهها أكبر مستخدمين للطاقة المستمدة من الوقود الحفري في العالم مع تقديم بعض المقترحات لحلها. والخلاصة الأساسية نجدها متمثلة فيما يلي [60]:

توفر كفاءة استخدام الطاقة مصدرًا هائلًا ومنخفض التكلفة للطاقة للاقتصاد الأمريكي، لكن هذا لن يتأتى إلا إذا استطاعت الأمة اتباع أسلوب شامل ومبتكر

لتحقيقها. فيجب تجاوز عوائق مهمة ودائمة على مستويات متعددة لزيادة الطلب على كفاءة استخدام الطاقة وإدارة توصيلها عبر أكثر من 100 مليون مبنى، وفي واقع الأمر، مليارات الأجهزة. فإذا اتُّبع «أسلوب شمولي» على نطاق واسع، فسوف يحقق توفيراً هائلاً في الطاقة تزيد قيمته عن 1.2 تريليون دولار، وهو مبلغ يزيد كثيراً عن الـ 520 مليار دولار المطلوبة للاستثمار الإضافي في الإجراءات المتعلقة بكفاءة استخدام الطاقة ...

في واقع الأمر، يتمثل أكثر الأساليب فاعلية فيما يتعلّق بتوفير الطاقة في تطبيق التصميم الشمسي السلبي للمباني في مجال الهندسة المعمارية. فبوجه عام، تستهلك المباني نحو 40 بالمائة من الطاقة العالمية. وباستخدام الأسلوب الشمولي لتصميم المنازل، يمكن توفير ما يصل إلى 50 بالمائة من هذه الطاقة. وتتضمن المبادئ الخاصة بذلك ما يلي [59]:

- (١) توجيه أو إقامة المبنى بحيث يمتص حرارة الشمس في المناطق الباردة ويحسن استغلالها في المناطق الحارة.
- (٢) بناء نوافذ يمكن فتحها لتقليل الاعتماد على مكيفات الهواء والمراوح والدفايات.
- (٣) استخدام دفايات أو مبردات أصغر، مع الأخذ في الاعتبار أن التصميم الشمسي السلبي يقلل الحاجة إليهما.

هناك تحديان يقفان أمام هذا الأسلوب [59]: الأول: هو إقناع المتخصصين في قطاع البناء به. حالياً، ما زالت نظم التدفئة والتبريد النشطة، التي عادة ما تستخدم مصادر الوقود الحفري، هي الحلول السائدة. والثاني: هو التغلب على نقص الحوار الفعال بين المهندسين المعماريين والمهندسين المدنيين. فكفاءة استخدام الطاقة نادراً ما تُدرس في المناهج الخاصة بالهندسة المعمارية. ويميل المهندسون المدنيون، الذين ربما يكونون أكثر وعياً بالاعتبارات الخاصة بكفاءة استخدام الطاقة، للتركيز على تنفيذ التصميمات ونادراً ما يشتركون في القرارات التي تؤدي إليها.

إن «الأسلوب الشمولي» لتصميم المباني الذي يستفيد من الطاقة الشمسية ليس جديداً. فالكثير من الحضارات القديمة مارسته، لكنه يكاد يكون منسياً في العالم المتقدم. ومن أجل بناء مستقبل أفضل في القرن الحادي والعشرين، نحتاج لنهضة في فن تصميم البناء الشمولي.

(١) الهندسة المعمارية الشمسية المبكرة

(١-١) الهندسة المعمارية الشمسية القديمة

تشير الأدلة الأثرية إلى أن العديد من الحضارات القديمة بنت منازلها طبقاً لمبادئ التصميم الشمسي السلبي. ف يرى سقراط أن المنزل المثالي يجب أن يكون بارداً في الصيف ودافئاً في الشتاء [17]. ورأى أيضاً أنه يمكن تحقيق هذا الهدف جزئياً من خلال جعل منفذ التهوية في المنزل متجهاً نحو الجنوب مع إنشاء رواق لتوفير الظل في الصيف. لقد كانت تقريباً كل الحضارات المهمة موجودة في نصف الكرة الأرضية الشمالي، وقد صُممت منازلها بحيث تكون مزودة بناوفاذ كبيرة متجهة ناحية الجنوب ولكن مع اتجاه جدرانها بالكامل ناحية الشمال.

إن مبادئ التصميم الشمولي الموثقة جيداً في الأدبيات الصينية القديمة التي تعود لفترة حكم أسرة تشو الغربية الصينية (القرن الحادي عشر قبل الميلاد-771 قبل الميلاد)، تُعرف باسم «فنج شوي»، وتعني حرفياً «الرياح والماء»، وتُعد الإشارة إلى الشمس من أهم جوانبها. وفي العقود الحديثة، أصبح نظام فنج شوي رائجاً في العالم الغربي. ويُعد تحديد اتجاه الجنوب الصحيح أمراً غاية في الأهمية في هذا النظام. ففي كتاب «قانون تشو» (تشو لي)، المكتوب تقريباً في القرن الحادي عشر قبل الميلاد، وُثقت طريقة لتحديد اتجاه الجنوب الصحيح وكانت كما يلي: «بتحديد النقطة التي عندها تشرق الشمس والنقطة التي تغرب عندها ثم النقطة التي في المنتصف فيما بينهما، يمكن تحديد النقطة التي عندها اتجاه الجنوب». وتعد هذه الطريقة أكثر دقة بكثير مما لو استخدمنا البوصلة المغناطيسية.

(٢-١) الهندسة المعمارية الشمولية في ريف الصين

يعرض الشكل ١-١٣ منزلاً ريفياً تقليدياً في ريف شمال الصين يجسد بعض مبادئ التصميم الشمولي التي تستفيد من الطاقة الشمسية. ربما صُمم هذا المنزل منذ ما يزيد عن ألف عام، ولكن لا يزال هذا التصميم مستخدماً في المناطق الأقل تطوراً في شمال الصين. لقد عشت أنا شخصياً في أحد المنازل المقامة بناءً على هذا التصميم وذلك لعدة سنوات. وقد انبهرت بمدى الراحة التي يوفرها.

إن المحور الطويل للمنزل هو ذلك الذي يتجه من الشرق للغرب. دائماً ما تكون النوافذ الزجاجية الكبيرة (1) على الجانب الجنوبي، ويمكن فتحها جزئياً من الجانب السفلي. وتكون حواف السطح البارزة (2) مصممة بحيث تكون النوافذ معرضة لضوء الشمس الكامل في الشتاء وتكون في الظل في الصيف. وقرب الجزء العلوي من الجدار الشمالي، توجد نوافذ صغيرة (5). في الصيف، وبفتح النوافذ الشمالية الصغيرة والنافذة الجنوبية جزئياً، ستهب الريح تلقائياً من الفتحة السفلى للنافذة الجنوبية إلى النوافذ الشمالية الصغيرة، مما يمكن أن يُبرد المنزل من خلال التهوية. في الشتاء، يتدفق الدخان الخارج من الفرن (7) إلى المدخنة (3) عبر الأنفاق المتعرجة في السرير المصنوع من الطوب النقي (4)، المعروف بالكانج، الذي يمكن أن يبقى دافئاً طوال الليل. وفي الصيف، عادة ما يُطبخ في السقائف خارج المنزل؛ ومن ثم يمكن أن يبقى سرير الكانج، المتصل مباشرة بالأرض، بارداً. وتساعد المسافة بين السقف (6) والسطح أيضاً على الحفاظ على وجود درجة حرارة مستقرة. ولتدفئة الغرف في الشتاء، عادة ما يكون الباب الأمامي (8) مزوداً بستارة كثيفة.

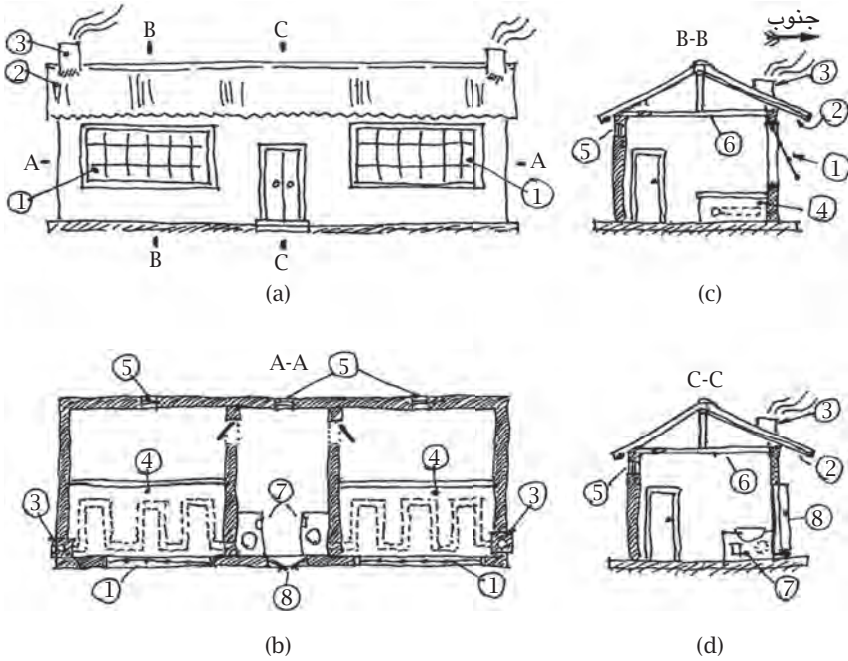
(٢) مواد البناء

يتضمن تصميم أي مبنى تفاعلاً بين الهندسة المعمارية والهندسة المدنية. في هذا القسم، سنعرض بعض المفاهيم الأساسية الخاصة بالهندسة المدنية والمتعلقة بتصميم المباني.

(١-٢) المقاومة الحرارية

المقاومة الحرارية، R ، هي قياس خاصية العزل للوح أو شريحة من مادة بناء، مثل لوح جداري أو باب أو نافذة. وهي نسبة فرق درجة الحرارة بين السطحين والتدفق الحراري (أي، تدفق الحرارة لكل وحدة مساحة). في نظام الوحدات الدولي، هي فرق درجة الحرارة (بـ K) المطلوب لتسريب طاقة حرارية بـ W لكل وحدة مساحة (W/m^2)؛ لذا فإن وحدة قياسها في هذا النظام هي $K \cdot m^2/W$. في نظام الوحدات البريطاني، هي فرق درجة الحرارة (بالفهرنهايت) المطلوب لتسريب طاقة حرارية بالوحدة الحرارية البريطانية في الساعة لكل وحدة مساحة؛ لذا فإن وحدة قياسها في هذا النظام هي $F \cdot h \cdot ft^2/Btu$. ومن أجل التحويل بين النظامين، فإن وحدة المقاومة الحرارية بنظام الوحدات الدولي تساوي

البناء والطاقة الشمسية



شكل ١٣-١: منزل ريفي في ريف شمال الصين: إن المحور الطويل للمنزل هو ذلك الذي يتجه من الشرق للغرب. وتكون النوافذ (1) على الجانب الجنوبي. وتكون حواف السطح البارزة الطويلة (2) مصممة بحيث تكون النوافذ معرضة لضوء الشمس الكامل في الشتاء وتكون في الظل في الصيف. تُخزن الحرارة الصادرة من الفرن (7) في الأسرة المبنية من الطوب النقي (4)، التي يمكن أن تبقى دافئة طوال الليل. في الصيف، تجعل الرياح التي تهب من النافذة الأمامية إلى النوافذ الشمالية الصغيرة (5) المنزل باردًا.

وحدة المقاومة الحرارية بنظام الوحدات البريطاني مضروبة في 5.678، ووحدة المقاومة الحرارية بنظام الوحدات البريطاني تساوي وحدة المقاومة الحرارية بنظام الوحدات الدولي مضروبة في 0.1761.

بالنسبة لجدار يتكون من عدة طبقات، تكون المقاومة الحرارية تراكمية:

$$R = \sum_i R_i, \quad (13-1)$$

بحيث إن R_i هي المقاومة الحرارية لطبقة المادة التي ترتيبها i . وفيما يلي بعض الأمثلة:

- نافذة مكونة من لوح زجاجي واحد: $R - 1$ (قيمة المقاومة الحرارية بنظام الوحدات الدولي: 0.18).
- نافذة مكونة من لوحين زجاجيين: $R - 2$ (قيمة المقاومة الحرارية بنظام الوحدات الدولي: 0.35).
- نافذة علوية مغطاة بطلاء ذي انبعاثية منخفضة: $R - 3$ (قيمة المقاومة الحرارية بنظام الوحدات الدولي: 0.52).

(٢-٢) المقاومة الحرارية النوعية

تُقاس خاصية العزل لأي مادة، على سبيل المثال، الأسمنت أو صوف الألياف الزجاجية أو البولي يوريثان فوم، من خلال «المقاومة الحرارية النوعية» الخاصة بها، أو r . في نظام الوحدات الدولي، تُعرف المقاومة الحرارية النوعية بأنها فرق درجة الحرارة (بـ K) لكل وحدة سُمك (بـ M) المطلوب لتسريب طاقة حرارية بـ W لكل وحدة مساحة (بـ W/m^2). في نظام الوحدات البريطاني، تُعرف بأنها فرق درجة الحرارة (بـ الفهرنهايت) لكل وحدة سمك (بـ البوصة) المطلوب لتسريب طاقة حرارية بالوحدة الحرارية البريطانية في الساعة لكل وحدة مساحة ($Btu/h \cdot ft^2$). ومن أجل التحويل بين النظامين، فإن وحدة المقاومة الحرارية النوعية بنظام الوحدات الدولي تساوي وحدة المقاومة الحرارية النوعية بنظام الوحدات البريطاني مضروبة في 0.125، ووحدة المقاومة الحرارية النوعية بنظام الوحدات البريطاني تساوي وحدة المقاومة الحرارية النوعية بنظام الوحدات الدولي مضروبة في 8. بالنسبة لجدار مكون من عدة طبقات، المقاومة الحرارية هي مجموع حاصل ضرب السُمك والمقاومة الحرارية النوعية لكل طبقة:

$$R = \sum_i t_i r_i, \quad (13-2)$$

بحيث إن t_i هو سمك الطبقة التي ترتيبها i و r_i هي المقاومة الحرارية النوعية لمادة الطبقة ذات الترتيب i .

يعرض الجدول ١٣-١ قيم المقاومة الحرارية النوعية لبعض مواد البناء الشائعة. في الولايات المتحدة، يُعد صوف الألياف الزجاجية هو أكثر المواد العازلة استخدامًا. فهو له

مقاومة حرارية نوعية عالية على نحو معقول وخفيف الوزن ورخيص وخامل كيميائياً وغير قابل للاشتعال. ومادة البولي يوريثان فوم لها مقاومة حرارية نوعية أعلى بكثير، وهي متوفرة في شكل ألواح صلبة أو مادة رش تملأ المسافة في الجدار، على سبيل المثال، بين لوح من الخشب الرقائقي واللوح الجصي الخاص بجدار. والاسم التجاري لمادة الرش هو آيسينين. وفيما يتعلّق بالعزل الحراري، الأسمت أسوأ بكثير من المادتين القياسيتين السابقتين.

جدول ١٣-١: المقاومة الحرارية النوعية لبعض مواد البناء الشائعة.

المادة	المقاومة الحرارية النوعية (بنظام الوحدات البريطاني)	المقاومة الحرارية النوعية (بنظام الوحدات الدولي)
الألواح الخشبية	2.5	20
الصوف الصخري أو صوف الألياف الزجاجية	3.1-3.6	25-30
الآيسينين	3.6	30
ألواح البولي يوريثان الصلبة	7	56
الأسمنت المصبوب	0.08	0.64

يمكن حساب المقاومة الحرارية لبعض ألواح العزل القياسية الخاصة بالجدران باستخدام المعادلة 2-13 والبيانات الموجودة في الجدول ١٣-١. وتظهر بعض النتائج القياسية في الجدول ١٣-٢.

جدول ١٣-٢: قيم المقاومة الحرارية القياسية الخاصة بعزل الجدران.

المادة	المقاومة الحرارية (بنظام الوحدات البريطاني)	المقاومة الحرارية (بنظام الوحدات الدولي)
ألواح ألياف زجاجية بسمك 4 بوصات	$R - 13$	2.3
ألواح ألياف زجاجية بسمك 6 بوصات	$R - 19$	3.3

المادة	المقاومة الحرارية (بنظام الوحدات البريطاني)	المقاومة الحرارية (بنظام الوحدات الدولي)
ألواح ألياف زجاجية بسمك 12 بوصة	$R - 39$	6.7
ألواح آيسينين بسمك 6 بوصات	$R - 22$	3.8
جدار أسمنتتي بسمك 10 بوصات	$R - 0.8$	0.14

(٣-٢) معامل الانتقال الحراري

لحساب إجمالي فقد الحرارة لبناء أو غرفة، لا تُعد المقاومة الحرارية ملائمة؛ لذا يُستخدم معكوس المقاومة الحرارية، أو ما يُعرّف بمعامل الانتقال الحراري، U . في نظام الوحدات الدولي، يُعرّف هذا المعامل بأنه فقد الحرارة بالواط لكل وحدة متر مربع لكل فرق درجة حرارة بالكلفن ($W/K \cdot m^2$). في نظام الوحدات البريطاني، هو فقد الحرارة بالوحدة الحرارية البريطانية في الساعة لكل وحدة قدم مربعة لكل فرق درجة حرارة بالفهرنهايت ($Btu/h \cdot f^2$). ومن أجل التحويل بين النظامين، فإن وحدة معامل الانتقال الحراري بنظام الوحدات الدولي تساوي وحدة معامل الانتقال الحراري بنظام الوحدات البريطاني مضروبة في 0.1761، معامل الانتقال الحراري بنظام الوحدات البريطاني تساوي معامل الانتقال الحراري بنظام الوحدات الدولي مضروبة في 5.678. وعلاقة هذا المعامل بالمقاومة الحرارية هي كما يلي:

$$U = \frac{1}{R}. \quad (13-3)$$

بالنسبة لغرفة أو بناء به جدران ونوافذ وغير ذلك، يمكن حساب فقد الحرارة Q باعتباره مجموع حاصل ضرب مساحة ومعامل الانتقال الحراري لكل مكون، وذلك كما يلي:

$$Q = \Delta T \sum_i A_i U_i = \Delta T \sum_i \frac{A_i}{R_i}, \quad (13-4)$$

بحيث تكون A_i هي المساحة و U_i هو معامل الانتقال الحراري للمكون ذي الترتيب i و ΔT هو فرق درجة الحرارة.

(٢-٤) الكتلة الحرارية

يعتمد استقرار درجة حرارة أي غرفة على كم الحرارة الذي يمكن الاحتفاظ به داخلها. وهو مجموع الكتل الحرارية للمكونات:

$$M = \sum_j V_j \rho_j c_{pj}, \quad (13-5)$$

بحيث يكون V_j هو الحجم و $\rho_j c_{pj}$ هي السعة الحرارية النوعية لكل حجم للمكون ذي الترتيب j . ويكون معدل انخفاض درجة الحرارة هو:

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{Q}{M} = -\frac{\Delta T}{M} \sum_i A_i U_i = -\frac{\Delta T}{M} \sum_i \frac{A_i}{R_i}. \quad (13-6)$$

لذا، كلما زادت الكتلة الحرارية، كان انخفاض درجة الحرارة أبطأ. لقد عرض الجدولان ١٣-١ و ١٣-٢ الخواص الحرارية لمواد البناء الأكثر استخداماً. ومن خلالهما، نجد أن الماء إلى حد بعيد هو أفضل مادة لتخزين الطاقة المحسوسة، وأن الأسمنت والطوب هما الأسوأ، ولكنهما مع الأسف المادتان الأكثر استخداماً.

(٢-٥) التزجيج

تسمح النوافذ الزجاجية لضوء الشمس بالدخول إلى الغرف، ومن ثم، توفر الدفء فيها في الشتاء، لكن، كما رأينا في الجدول ١٣-٢، حتى النوافذ العالية الجودة مواد عازلة سيئة. فالنوافذ الزجاجية الثنائية اللوح توفر مقاومة حرارية باستخدام نظام الوحدات الدولي تصل إلى 0.35، في حين أن المقاومة الحرارية لألواح الألياف الزجاجية العادية التي سمكها 6 بوصات تصل إلى 3.3، وهكذا يتضح أن هناك فرقاً قدره قيمة أسية واحدة. لقد أصبح من الشائع استخدام قدر كبير من الزجاج في المباني الحديثة، لكن هذا يتطلب قدرًا كبيرًا من الكهرباء في الصيف لتبريد المبنى وقدرًا كبيرًا من الغاز الطبيعي (أو الأسوأ الكهرباء) في الشتاء لتدفئته؛ لذا فاستخدام قدر كبير من الزجاج يؤدي إلى فقد كبير للطاقة.

يعرض الشكل ١٣-٢ مثلاً على ذلك. تشتمل غرفة في أحد أركان المنزل على خزان ماء سعته 1m^3 يعمل بمنزلة وسط التخزين الحراري. وحجم الغرفة يساوي $3.8\text{m} \times 5\text{m} \times 2.5\text{m}$. دعنا نفترض أن درجة حرارة الغرفة هي 20 درجة مئوية وأن درجة الحرارة الخارجية هي صفر درجة مئوية. إن الكتلة الحرارية M تساوي $4.19 \times 10^6 \text{J/K}$. يمكن تجاهل فقد الحرارة عبر الجدران الداخلية. كما هو موضح في الشكل ١٣-٢ (أ)، إذا كانت كل الجدران الخارجية مزودة بنوافذ زجاجية ثنائية الألواح، فالمساحة الإجمالية للزجاج ستبلغ 22m^2 . ويكون معدل فقد الحرارة كما يلي:

$$Q = \frac{20 \times 22}{0.35} = 1257\text{W}. \quad (13-7)$$

ويكون معدل انخفاض درجة الحرارة كما يلي:

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{1257}{4.19 \times 10^6} = -3 \times 10^{-4} \text{K/s} = -1.08 \text{K/h}. \quad (13-8)$$

لذا، حتى في ظل الكتلة الحرارية الكبيرة تلك، ستصبح الغرفة بدون وسيلة تدفئة باردة جداً بعد عدة ساعات.

يعرض الشكل ١٣-٢ (ب) منزلاً به ثلاث نوافذ ثنائية الألواح مساحة كل منها 1.2m^2 . وباقي الجدار معزول بألواح ألياف زجاجية ذات سمك 6 بوصات (150mm). هنا، يكون معدل فقد الحرارة هو:

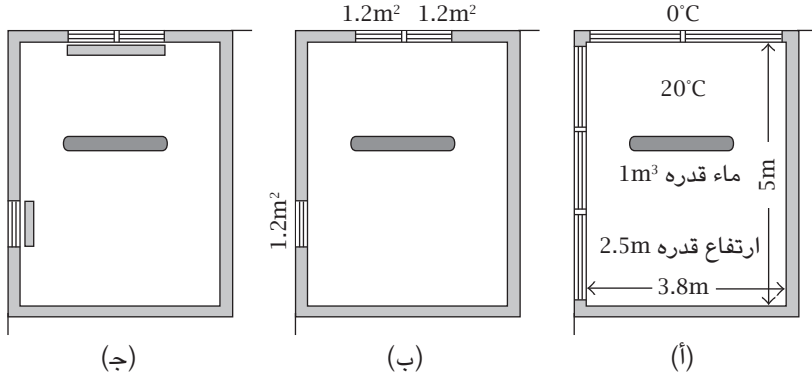
$$Q = 20 \times \left(\frac{22 - 3.6}{3.3} + \frac{3.6}{0.35} \right) = 317\text{W}. \quad (13-9)$$

في حين يكون معدل انخفاض درجة الحرارة:

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{317}{4.19 \times 10^6} = -7.6 \times 10^{-5} \text{K/s} = -0.27 \text{K/h}. \quad (13-10)$$

بعد 8 ساعات، ستخفض درجة الحرارة 2.2 درجة مئوية. أثناء الليل، لا يوجد ضوء شمس وستكون النوافذ مصدر استنزاف للطاقة. وبتغطية النوافذ بالألواح بولي يوريثان صلبة بسمك 25mm بمقاومة حرارية قدرها 6.5، ستزيد

البناء والطاقة الشمسية



شكل ١٣-٢: تأثير التزجيج على العزل: (أ) غرفة كل جدرانها الخارجية مزودة بنوافذ زجاجية ثنائية الألواح. (ب) ثلاث نوافذ ثنائية الألواح مساحة كل منها 1.2m². (ج) بعد تغطية النوافذ بألواح بولي يوريثان.

المقاومة الحرارية للنوافذ إلى 8.5، أو 1.5 بنظام الوحدات الدولي. وسيكون معدل فقد الحرارة:

$$Q = 20 \times \left(\frac{22 - 3.6}{3.3} + \frac{3.6}{1.5} \right) = 159W. \quad (13-11)$$

وسيكون معدل انخفاض درجة الحرارة:

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{159}{4.19 \times 10^6} = -3.32 \times 10^{-5} K/s = -0.136 K/h. \quad (13-12)$$

من ثم، ستنخفض درجة الحرارة درجة مئوية واحدة تقريبًا طوال الليل. وإذا كان هناك أناس يعيشون في هذه الغرفة، فسيكون الانخفاض أقل لأن الحرارة المنتجة من قبل كل شخص منهم ستكون مساوية تقريبًا لتلك الخاصة بمصباح متوهج؛ أي، 40-60W. وهذا سيعوض جزئيًا فقد الحرارة عبر الجدران والنوافذ وسيجعل درجة الحرارة شبه ثابتة.

إن النوافذ في هذه الغرفة كبيرة بالفعل على نحو كافٍ بحيث تسمح بدخول ضوء شمس كافٍ لتدفئة الغرفة في الشتاء. ووفق الشكل ٤-٧، في الأماكن القريبة من دائرة عرض 40 درجة، يكون الإشعاع الشمسي اليومي على نافذة مواجهة للجنوب، فيما بين شهري نوفمبر وفبراير، أكبر من 6.5 kWh/m^2 . ويمكن للنافذتين اللتين مساحة كل منهما 1.2 m^2 السماح بنفاذ أكثر من 10 kWh من الطاقة الحرارية في الأيام المشمسة. والطاقة الحرارية الشمسية بالفعل أكبر بكثير من فقد الحرارة؛ لذا ستبقى الغرفة دافئة بالقدر الكافي فقط بسبب ضوء الشمس الداخل إليها من النوافذ. وعلى الأرجح، سيجعل الاستخدام المفرط للنوافذ الغرفة حارة جدًا أثناء النهار.

(٣) مثال على التصميم الشمولي

وفقًا لستيفين تشو [30] وشركة ماكنزي [59, 60]، عندما يحاول شخص بناء منزل جديد، فمن الممكن باستخدام قدر أكبر قليلًا من مواد البناء والعمال توفير كمية كبيرة من الطاقة؛ ومن ثم توفير مبلغ كبير من المال. لقد اختبرت هذه المقولة عند بناء بيتي، ووجدت حتى أن الاستثمار الإضافي القليل هذا ليس ضروريًا؛ فالهم هو وضع تصميم يعظم الاستفادة من ضوء الشمس. وحيث إنني كنت المهندس المعماري الذي صمم منزلي والمهندس المدني الرئيسي في تنفيذ هذا التصميم، فقد كانت التكلفة الإضافية الوحيدة هي الوقت الإضافي الذي قضيته في التصميم والبناء.

قبل وضع التصميم، قرأت تقريبًا كل الكتب والأبحاث التي استطعت الحصول عليها عن المنازل المصممة وفق معطيات الطاقة الشمسية. لقد أصبت بخيبة أمل بعض الشيء لأن الكثير من تصميمات تلك المنازل كانت غريبة وتتطلب مواد وتقنيات بناء غير مألوفة، أو كانت تركز بشدة على توفير الطاقة؛ بحيث تبني منازل تعتمد فقط على الطاقة الشمسية مع التضحية بعامل الراحة. بالإضافة إلى ذلك، تطلب مجلسا التخطيط والمراجعة المعمارية في بلدي أن يكون هناك انسجام بين منزلي والمنازل المحيطة به، وقد أصرت شركة البناء على استخدام مواد البناء التي يمكنها إيجادها بسهولة.

بالإضافة إلى بناء منزل مريح، كان لدي بعض المتطلبات الإضافية؛ أولًا: أمتلك بيانو ألماني من طراز شتاينواي، يحتاج لغرفة كبيرة جدًا ذات مستوى صدى جيد ورطوبة ودرجة حرارة مستقرة. ثانيًا: أردت بناء مسرح سينمائي منزلي متقدم يمكن تشغيله في

أي يوم من العام وفي أي وقت من اليوم. ثالثاً: أردت بناء غرفة للعب مساحتها تزيد عن $60m^2$ لأحفادي.

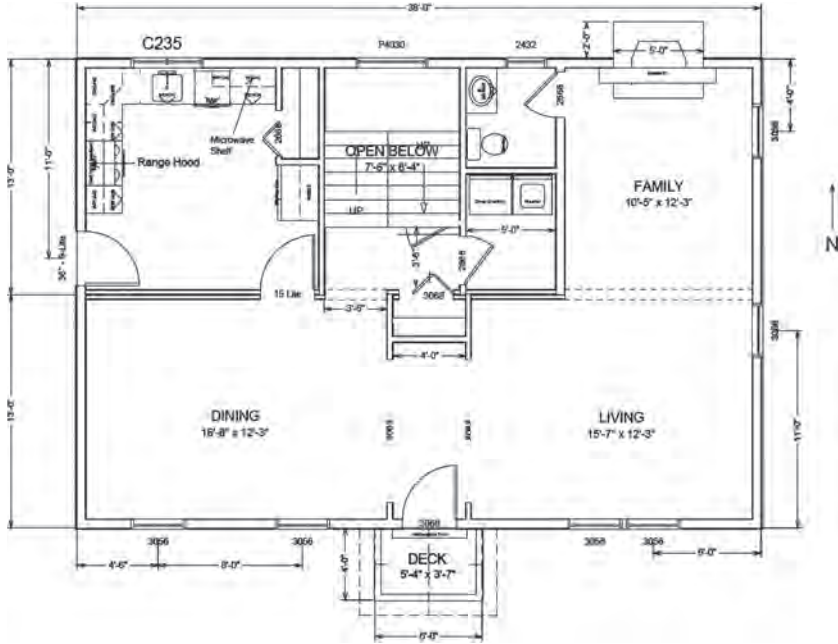
لحسن الحظ، وجدت قطعة أرض خالية في بلدة نورث وايت بلينز تفي بالمتطلبات؛ أرض مساحتها 0.89 فدان ($3500m^2$) منحدره باتجاه الجنوب. وبسبب المنحدر، ورغم محاولات مثابرة عديدة، لم يتمكن الملاك السابقون من وضع تصميم يفي بمتطلبات مجلس تخطيط البلدة. وبمراجعة وثائق ورسومات التصميم السابق، وجدت أن هؤلاء الملاك أرادوا شق مساحة مسطحة كبيرة عبر المنحدر، مما يتطلب قدرًا هائلاً من التفجير والحفر، إلى جانب جدار ساند ارتفاعه 8 أمتار، الأمر الذي سيكون خطيراً جداً.

قررت الاستفادة من المنحدر وإخفاء جزء من المنزل تحت السطح؛ لذا فإن جزءاً من البناء أُقيم داخل الأرض، مما أتاح إمكانية استغلال الطاقة الحرارية الأرضية الضحلة، وهي الطاقة الشمسية المخزنة في الأرض. والجزء الأمامي من المنزل مواجه لاتجاه الجنوب الصحيح، ولا يوجد شيء يحجز ضوء الشمس. والنوافذ الكبيرة مواجهة للجنوب كي تسمح بدخول أكبر قدر ممكن من ضوء الشمس. والجانب الشمالي من المنزل قريب من التل. وكانت هناك حاجة لعدد قليل جداً من النوافذ. وقد وافق مجلسا التخطيط والمراجعة المعمارية سريعاً على الفكرة.

يظهر رسماً التصميم في الشكلين ١٣-٣ و ١٣-٤. من الخارج للداخل، المنزل يبدو منزلاً على الطراز الاستعماري التقليدي المكون من صالة رئيسية، لكن الطاقة الشمسية تُستغل فيه على نحو واسع. يضم الطابق الأول، عالي السقف، البيانو الألماني باعتباره أهم معالنه. وكل النوافذ الكبيرة تواجه الجنوب. والغرف الأقل أهمية، مثل السلم مقصّي الشكل والحمام، توجد في الجانب الشمالي. وفي الطابق الثاني، توجد الغرفتان الأكثر استخداماً وغرفة النوم الرئيسية والمكتب (غرفة النوم 2) في الجانب الجنوبي، وكل النوافذ الكبيرة تواجه الجنوب. وتوجد الغرف الأقل أهمية، مثل غرفة الضيوف (غرفة النوم 3) والحمامات في الجانب الشمالي.

حددت شركة ويست تشستر للمنازل النموذجية الجاهزة التفاصيل وبنّت المنزل باستخدام بعض أفضل مواد وطرق البناء الشائعة. فكل النوافذ كانت نوافذ ثنائية اللوح محكمة من إنتاج شركة أندرسين. وعزل السقف كان بمقاومة حرارية R39 وبالنسبة لباقي المكونات R19. وكان الأساس خرسانة مصبوبة. وقد اكتمل البناء في أغسطس من عام 2009. انظر ملحق الصور الشكل ١٨.

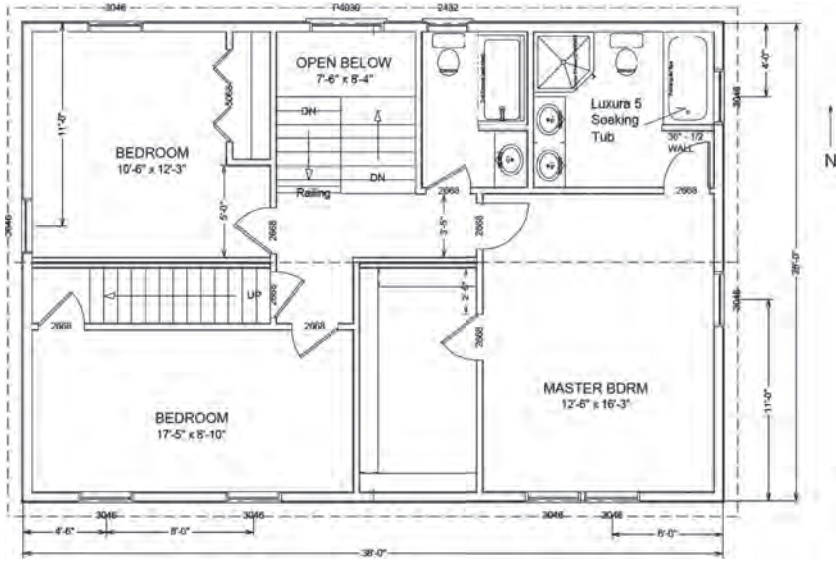
فيزياء الطاقة الشمسية



شكل ١٣-٣: تصميم منزل مبني وفقاً لمقتضيات الطاقة الشمسية: الطابق الأول. كل النوافذ الكبيرة مواجهة للجنوب، والصالة الرئيسية بالكامل موجودة في الجانب الجنوبي. وتوجد الغرف الأقل أهمية، مثل السلم والحمام، في الجانب الشمالي.

في أيام الشتاء المشمسة والباردة، عادة ما يجعل ضوء الشمس الداخل من النوافذ الكبيرة المواجهة للجنوب درجة حرارة الغرفتين الأكثر استخداماً تزيد عن 22 درجة مئوية، مما يجعل الترموستات تقريباً لا يعمل. وهذا مقبول من منظور الإشعاع الشمسي. فكما هو موضح في الشكل ٤-٧، في الأماكن الواقعة عند دائرة عرض 40 درجة، في الأيام المشمسة في الشتاء، يمكن أن ينتج ضوء الشمس طاقة حرارية تزيد عن 10kWh. وفي الصيف، وبسبب حواف السطح البارزة، لا يدخل ضوء الشمس للغرف. بالإضافة إلى ذلك، هناك مروحة عليّة في السقف تساعد على تقليل درجة الحرارة في العليّة والمنزل بأكمله.

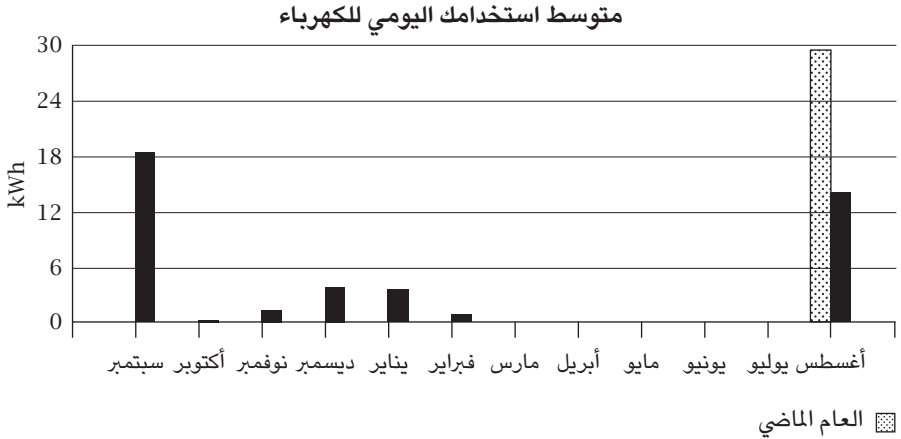
البناء والطاقة الشمسية



شكل ١٣-٤: تصميم منزل مبني وفقاً لمقتضيات الطاقة الشمسية: الطابق الثاني. كل النوافذ الكبيرة مواجهة للجنوب، والغرفتان الأكثر استخداماً موجودتان في الجانب الجنوبي. وتوجد الغرف الأقل أهمية، غرفة الضيوف والحمامات، في الجانب الشمالي.

وُضع المسرح المنزلي في الركن الأقصى للأساس، وهو المكان الأعمق في الأرض. وباستخدام الطاقة الشمسية المخزنة في الأرض، وحتى بدون استخدام وحدة تكييف هواء أو مصدر تدفئة خارجي، تبقى درجة الحرارة مستقرة ومناسبة خلال العام. بالإضافة إلى ذلك، عمل النظام الكهروضوئي الذي قدرته 4.2kW كما هو مخطط له. ولأن اتجاه السقف كان مواجهاً بدقة ناحية الجنوب، وكانت زاوية الميلان تساوي دائرة العرض، وكان ضوء الشمس لا يعترضه شيء تقريباً؛ فقد كانت الكفاءة عالية. إن الشكل ١٣-٥ مأخوذ من فاتورة الكهرباء الخاصة بشركة كون إديسون لأغسطس عام 2010. كان إجمالي الكهرباء المستهلكة لذلك العام 1600kWh، أي، نحو عُشر تلك الخاصة بمنزل عادي بحجم مماثل.

فيزياء الطاقة الشمسية



شكل ١٣-٥: فاتورة الكهرباء الخاصة بشركة كون إديسون لأغسطس عام 2010. منذ تركيب النظام الكهروضوئي الذي قدرته 4.2kW في سبتمبر عام 2009، أنتج كهرباء قدرها 6129kWh. وكان إجمالي الكهرباء المستهلكة على مدار العام بالكامل 1688kWh.

في الفترة ما بين أغسطس عام 2009 إلى أغسطس عام 2010، أنتج النظام الكهروضوئي كهرباء قدرها 6129kWh. وفي وايت بليتز، تكلفة الكهرباء تصل إلى 0.226\$/kWh. وبالنسبة لعام كامل، كانت القيمة المنتجة 1385 دولار. وتكاليف النظام الفعلية كانت 9800 دولار؛ ومن ثم يمكن استرجاع الاستثمار المدفوع في النظام في غضون نحو سبع سنوات. ويمكن أن ينتج النظام كهرباء مجانية لنحو 25 سنة. على الرغم من أن الأهداف الفورية لهذا المنزل المبني وفقاً لمقتضيات الطاقة الشمسية قد تحققت بالفعل، فهناك عدة تجارب أخرى خاصة بالطاقة الشمسية ما زالت قيد التنفيذ. فالنظام الكهروضوئي الذي قدرته 4.2kW يشغل فقط نحو نصف السقف، والنصف الآخر مخصص لنظام كهروضوئي يعتمد على التيار المستمر الهدف منه شحن السيارات الكهربائية وإمداد الأجهزة المعتمدة على التيار المستمر بالطاقة. وهناك نظام شمسي لتكييف الهواء ما زال في مرحلة التخطيط. وهناك مشروع حراري شمسي قيد التنفيذ لتقليل استخدام الغاز الطبيعي إلى الحد الأدنى.

(٤) استخدام الأراضي في المجتمعات القائمة على الطاقة الشمسية

إن تصميم أي مبنى وفقاً لمقتضيات الطاقة الشمسية سينجح إذا لم يكن هناك شيء يحجب ضوء الشمس عن المبنى. وهذا الشرط يمكن الوفاء به بسهولة بالنسبة للمباني الموجودة في أماكن منعزلة، لكن في المدن والبلدات، الأراضي ثمينة ويمكن أن تحجب المباني المجاورة ضوء الشمس. ومن أجل الاستغلال الكامل لضوء الشمس، يجب أن يكون هناك حد أدنى من التباعد بين المباني المتجاورة، التي يمكن تحديدها من خلال النظرية المعروضة في الفصل الرابع.

يعرض الشكل ١٣-٦ تخطيطاً قياسياً لمجتمع قائم على الطاقة الشمسية في نصف الكرة الأرضية الشمالي يشتمل على مجموعة من المباني، مع اتجاه محورها الطويل من الشرق للغرب. وأغلب النوافذ الكبيرة تكون على الجانب الجنوبي للمباني. دعنا نفترض أن المسافة الرأسية من الحافة الدنيا لنوافذ الطابق الأرضي إلى سقف المبنى هي H والمسافة الأفقية من النافذة لسقف المبنى المجاور هي L . فإذا كان ارتفاع الشمس هو h والسمت A ، فباستخدام حساب المثلثات، يمكن إثبات أن «زاوية الظل» θ من المبنى المجاور تُحدّد من خلال ما يلي:

$$\tan \theta = \frac{\cos A}{\tan h}. \quad (13-13)$$

باستخدام صيغتي التحويل الإحداثي 15-4 و 19-4، نحصل على ما يلي:

$$\tan \theta = \frac{\sin \phi \cos \delta \cos \omega - \cos \phi \sin \delta}{\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega}. \quad (13-14)$$

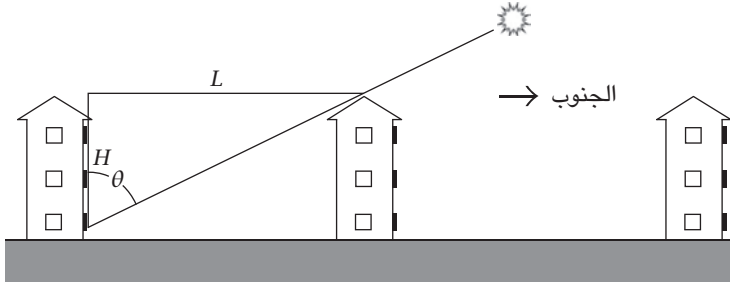
بإدخال الزاوية ξ :

$$\tan \xi = \frac{\tan \delta}{\cos \omega}, \quad (13-15)$$

يمكن اختزال المعادلة 13-14 إلى ما يلي:

$$\tan \theta = \frac{\tan \phi - \tan \xi}{1 + \tan \phi \tan \xi}. \quad (13-16)$$

فيزياء الطاقة الشمسية



شكل ١٣-٦: الحد الأدنى للتباعد بين المباني المتجاورة: تخطيط قياسي لمجتمع قائم على الطاقة الشمسية في نصف الكرة الأرضية الشمالي الذي يشتمل على مصفوفة من المباني، مع اتجاه محورها الطويل من الشرق للغرب. وأغلب النوافذ الكبيرة تكون على الجانب الجنوبي للمباني. والمسافة الرأسية من الحافة الدنيا لنوافذ الطابق الأرضي إلى سقف المبنى هي H والمسافة الأفقية من النافذة لسقف المبنى المجاور هي L .

وأخيراً، سنحصل على ما يلي:

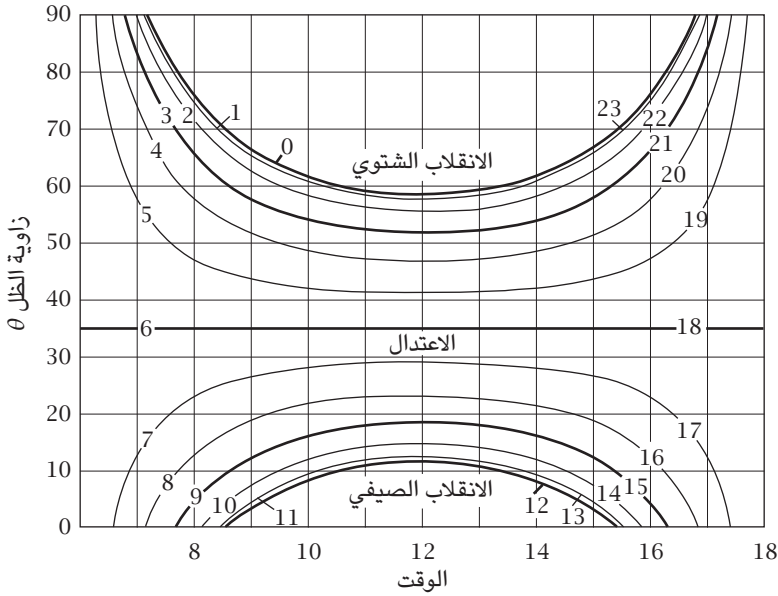
$$\theta = \phi - \xi = \phi - \arctan \left(\frac{\tan \delta}{\cos \omega} \right). \quad (13-17)$$

لتجنب حجب ضوء الشمس من جانب المبنى المجاور، يجب أن يكون التباعد بين المبنيين L كبيراً بالقدر الكافي بحيث يكون:

$$L > H \tan \theta. \quad (13-18)$$

يوضح الشكل ١٣-٧ اعتماد زاوية الظل على التاريخ والوقت بالنسبة لراصد على دائرة عرض جغرافية ϕ تساوي 35 درجة. وتعريف زاوية الظل هو أنه عندما تكون θ صفراً، فلا يوجد ظل، وعندما تكون 90 درجة، فإنه يوجد ظل كامل. وفي أحد الاعتدالين، تكون تلك الزاوية مساوية لدائرة عرض المكان. في الشتاء، تكون الزاوية أكبر، مما يشير إلى وجود ظل أكبر. وفي الصيف، تكون أصغر، مما يشير إلى وجود ظل أقل. ويشير الرقم الموجود على المنحنى إلى ترتيب الفصل الشمسي، الذي يحدد التاريخ في العام ومن ثم ميل δ الشمس؛ ارجع إلى الفصل الرابع - قسم (٣-٥).

البناء والطاقة الشمسية



شكل ٧-١٣: اعتماد زاوية الظل على التاريخ والوقت: اعتماد زاوية الظل على التاريخ والوقت بالنسبة لراصد على دائرة عرض جغرافية ϕ تساوي 35 درجة. في الشتاء، تكون الزاوية أكبر، مما يشير إلى وجود ظل أكبر. وفي الصيف، تكون أصغر، مما يشير إلى وجود ظل أقل. ويشير الرقم الموجود على المنحنى إلى ترتيب الفصل الشمسي، وهي طريقة مناسبة ودقيقة لتحديد التاريخ في العام فيما يتعلق بحركة الشمس؛ ارجع إلى الفصل الرابع - قسم (٣-٥).

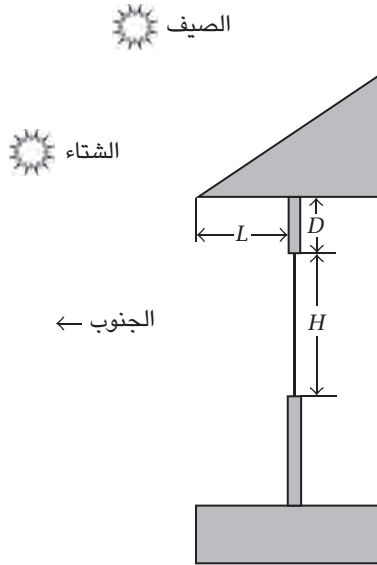
كما هو واضح، في الشتاء، في الصباح الباكر وقبل الغروب، يمكن أن تصل زاوية الظل θ إلى 90 درجة؛ لذا بغض النظر عن التباعد بين المباني، من المستحيل الحصول على ضوء شمس كامل طوال اليوم. يجب أن يكون هناك حل وسط؛ على سبيل المثال، بحيث يكون ضوء الشمس الكامل متاحًا لمدة ست ساعات على الأقل في الانقلاب الشتوي. وكما هو موضح في الشكل ٧-١٣، يحتاج هذا إلى أن $\theta = 66$ درجة. وبالنسبة لمبنى من ثلاثة طوابق بـ H يساوي عشرة أمتار.

$$L > 10 \times \tan 66^\circ \approx 22\text{m}. \quad (13-19)$$

فيزياء الطاقة الشمسية

بسبب المعادلة 13-17، بالنسبة للأماكن التي تقع على دائرة عرض مختلفة، يمكن الحصول على النتائج ببساطة بجمع فرق دائرة العرض. على سبيل المثال، في مكان على ϕ تساوي 40 درجة، يجب أن يكون التباعد بين المباني:

$$L > 10 \times \tan 71^\circ \approx 29\text{m}. \quad (13-20)$$



شكل ١٣-٨: الحسابات الخاصة بحواف السطح البارزة.

من المناقشات السابقة، يمكننا استخلاص بعض النتائج العامة: فمن أجل أن يكون هناك ضوء شمس كامل على الجانب الجنوبي لصف من المباني، يجب أن يتناسب التباعد المطلوب بين المباني مع الارتفاع. تعني تلك النتيجة المفهومة بديهياً ضمناً أن المباني المرتفعة ليست مفضلة إذا كانت التدفئة الشمسية السلبية مطلوبة. بالإضافة إلى ذلك، تحتاج عادة تلك المباني إلى هيكل من الخرسانة والصلب، مما يُضعف أكثر خواصها الحرارية. بالنسبة للمباني المكونة من طابقين وحتى خمسة طوابق، يمكن استخدام مواد

بناء خفيفة، وبخاصة تلك التي لها خواص عزل عالية، يمكن تصميمها بحيث تحصل على الحرارة من خلال الطاقة الشمسية السلبية.

مسائل

(13-1) تخيل منزلاً طوله 12m وعرضه 8m وارتفاعه 5m بعزل قياسي من الألياف الزجاجية قدره 6in من النوع R-19 في الوحدات الطرفية و12in من النوع R-39 في السقف والأرضيات. في الصيف، تكون متوسط درجة الحرارة الخارجية 80 درجة فهرنهايت (26.67 درجة مئوية)، لكن درجة الحرارة الداخلية المريحة تكون 68 درجة فهرنهايت (20 درجة مئوية). وباستخدام الحرارة الكامنة لخزان ثلج لتبريد المنزل (المزود بثرموستات وآلية للتدوير)، كم من الوقت يمكن لهذا الخزان أن يحافظ على ثبات درجة حرارة الغرفة؟

(13-2) في منطقة نيويورك ($40^{\circ}47'$)، تخيل أنه على الجانب الجنوبي لأحد المنازل توجد نافذة بارتفاع H يساوي 1.67m؛ انظر الشكل ١٣-٨. من أجل الاستفادة الكاملة من ضوء الشمس في الانقلاب الشتوي والحجب الكامل لضوء الشمس في الانقلاب الصيفي، ماذا يجب أن يكون عليه طول L حواف السطح البارزة والمسافة D بين أعلى النافذة وقاعدة تلك الحواف؟

(13-3) تخيل غرفة تقليدية في منزل معزول جيداً طولها 20ft وعرضها قدمًا وارتفاعها 8ft. كل الجدران، بما في ذلك السقف والأرضية، معزولة بمادة R39. في الشتاء، تكون درجة الحرارة الخارجية صفر درجة مئوية، وتكون درجة حرارة الغرفة 20 درجة مئوية. فما مقدار فقد الحرارة بـ W ؟ وإذا احتوت الغرفة على طن من الماء باعتباره الكتلة الحرارية، فما معدل فقد درجة الحرارة بالدرجة المئوية في الساعة؟

ملاحق

(١) ملحق أ: تحويل وحدات الطاقة

لأن الطاقة أحد أهم الكميات، فهناك العديد من وحدات الطاقة التي عادة ما تسبب الحيرة. عبر هذا الكتاب، استخدمنا وحدات نظام الوحدات الدولي مع كل الكميات الفيزيائية. فوحدة الطاقة في هذا النظام هي الجول، المَعْرِفَة بأنها الطاقة القادرة على دفع جسم بقوة قدرها نيوتن واحد عبر مسافة متر واحد، وذلك كما يلي:

$$J = N \cdot m. \quad (A-1)$$

إن وحدة هذا النظام الخاصة القدرة وهي الواط تساوي جول في الثانية:

$$W = J/s. \quad (A-2)$$

يعرض الجدول أ-1 لأكثر وحدات الطاقة والقدرة شيوعًا.

جدول أ-1: وحدات الطاقة والقدرة.

الاسم	الرمز	يساوي
كيلوجول	kJ	$10^3 J$
ميغاجول	MJ	$10^6 J$
جيجاجول	GJ	$10^9 J$

فيزياء الطاقة الشمسية

الاسم	الرمز	يساوي
إكساجول	EJ	10^{18}J
كيلوواط	kW	10^3W
ميغاواط	MW	10^6W
جيجاواط	GW	10^9W
تيراواط	TW	10^{12}W

إن القدرة الكهربائية هي حاصل ضرب التيار بالأمبير وفرق الجهد بالفولت:

$$W = A \cdot V. \quad (\text{A-3})$$

عادة ما تستخدم شركات الطاقة وحدة طاقة مشتقة من القدرة الكهربائية وهي الكيلوواط في الساعة:

$$1 \text{kWh} = 3600 \text{kJ} = 3.6 \text{MJ}. \quad (\text{A-4})$$

في الفيزياء الميكروسكوبية، عادة ما تُستخدم الإلكترون فولت (eV) كوحدة للطاقة. ولأن شحنة الإلكترون هي e تساوي $1.60 \times 10^{-19} \text{C}$ ، فإن 1eV يساوي $1.60 \times 10^{-19} \text{J}$. هناك وحدة أخرى يُشاع استخدامها في الأدبيات الفيزيائية وهي الكالوري، وتعريفها هو: الطاقة المطلوبة لرفع درجة جرام واحد من الماء بمقدار درجة مئوية واحدة. ولأن قدر الطاقة المطلوب في درجات الحرارة المختلفة يكون مختلفاً، فإن تعريف هذه الوحدة غير معروف، لكن هناك تعريف لها دقيق ومقبول على نطاق واسع وهو:

$$1 \text{cal} = 4.184 \text{J}. \quad (\text{A-5})$$

إن الكيلو كالوري الواحد يساوي بالضبط 4184J ؛ لذا فإن استخدام وحدات نظام الوحدات الدولي مفضل أكثر، إلا إذا اقتضت الضرورة غير ذلك.

في الولايات المتحدة الأمريكية، عادة ما تُستخدم الوحدة الحرارية البريطانية (Btu) باعتبارها وحدة الطاقة. وتعريفها هو: الطاقة اللازمة لرفع درجة حرارة رطل واحد من

الماء بمقدار درجة فهرنهايت واحدة. على نحو مماثل للكالوري، إن القيمة الدقيقة لتلك الوحدة غير معروفة. يُعرّف الجدول الدولي تلك الوحدة بأنها تساوي 1055.06J، وهي قيمة قريبة جدًا من 1kJ. وعند التعامل مع مشكلات الطاقة المتجددة، يمكن استخدام التقريب التالي:

$$1\text{Btu} \approx 1\text{kJ}. \quad (\text{A-6})$$

بالنسبة للكميات الكبيرة من الطاقة، هناك وحدة شائعة الاستخدام هي الإكسا جول التي تساوي 10^{18}J . في الولايات المتحدة الأمريكية، الوحدة المقابلة للكميات الكبيرة من الطاقة هي كوادريليون الوحدة الحرارية البريطانية والتي تعريفها 10^{15}Btu . ولأن الوحدة الحرارية البريطانية الواحدة قريبة جدًا من 1kJ، فلأغراض عملية، يمكننا اعتبار أن الودحتين متساويتان تقريبًا.

$$1\text{quad} \approx 1\text{EJ}. \quad (\text{A-7})$$

هناك وحدة أخرى للكميات الكبيرة من الطاقة وهي التيرا واط في الساعة (TWh). وهي مساوية لمليار كيلو واط في الساعة أو 0.0036EJ. وهي تساوي أيضًا $3.6 \times 10^{15}\text{J}$. والإكسا جول الواحد يساوي 277.8TWh.

في مجال صناعة الطاقة، عادة ما تُستخدم وحدتا الجيجا واط والتيرا واط. والجيجا واط في العام تساوي $3.156 \times 10^{16}\text{J}$ ، أي، تقريبًا 1/32EJ. والتيرا واط في العام تساوي $3.156 \times 10^{19}\text{J}$ ، أي، تقريبًا 32EJ. في عام 2007، وصل معدل استهلاك العالم من الطاقة تقريبًا إلى 500EJ أو متوسط قدرة قدره 15TW، أما عن معدل استهلاك الطاقة في أمريكا، فوصل تقريبًا إلى 100EJ أو متوسط قدرة قدره 3TW. في عام 2008، قل الاستهلاك الأمريكي قليلًا عن هذا الرقم.

فيما يلي بعض العلاقات التقريبية المهمة التي يجب ذكرها في هذا الإطار:

- البرميل الواحد من النفط الخام يساوي $5.8 \times 10^6\text{Btu}$.
- القدم المكعب الواحد من الغاز الطبيعي يساوي تقريبًا 1000Btu أو 1MJ.
- الثريم الواحد من الغاز الطبيعي يساوي 100000Btu؛ أي، تقريبًا 100MJ.
- الكيلو جول لكل مول يساوي 0.01036eV؛ أي، تقريبًا 10meV.
- الكيلو كالوري لكل مول الواحد يساوي 0.0434eV.

(٢) ملحق ب: حساب المثلثات الكروية

عندما ننظر إلى السماء، يبدو أن الشمس وكل النجوم موجودة في «كرة» ذات نصف قطر كبير لكن غير معروف. بعبارة أخرى، يُحدّد موقع الشمس من خلال نقطة على «الكرة السماوية». من ناحية أخرى، سطح كوكب الأرض، إلى حد بعيد، كرة. ويمكن تحديد أي موقع على الأرض من خلال نقطة على «الكرة الأرضية»؛ تحديداً من خلال دائرة العرض وخط الطول. في كلتا الحالتين، نحن نتعامل مع هندسة الأشكال الكروية.

من أجل دراسة موقع الشمس بالنسبة لموقع محدد على الأرض، سنربط إحداثيات الموقع الموجود على الكرة الأرضية مع موقع الشمس على الكرة السماوية. وستكون الأداة الرياضية في هذه الدراسة هي «حساب المثلثات الكروية». في هذا الملحق، سنعرض مقدمة موجزة عن هذا الفرع من حساب المثلثات، تكفي للتعامل مع مشكلة تتبع ضوء الشمس.

(١-٢) المثلث الكروي

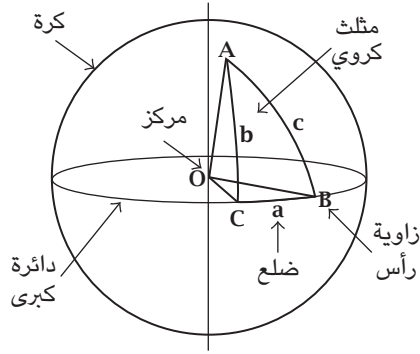
يقطع أي مستوى يمر بمركز كرة O السطح في دائرة تُسمى «الدائرة الكبرى». وبالنسبة لأي نقطتين A و B على الكرة، إذا لم يمر الخط AB بالمركز O ، فهناك دائرة كبرى واحدة فقط تمر بالنقطتين. وتعريف الزاوية $\widehat{AOB}$ ، التي تقل عن 180 درجة أو π بالراديان، هو طول قوس AB . ومع وجود النقاط الثلاثة A و B و C على الكرة، يمكن تحديد ثلاث دوائر كبرى. وتكوّن الأقواس الثلاثة AB و BC و CA ، الذي كل منها أقل من 180 درجة أو π بالراديان، «مثلثاً كروياً»؛ انظر الشكل ب-1.

باستخدام الترميز القياسي، رمزنا لأضلاع المثلث BC و CA و AB بـ c و b و a ، على التوالي. إن طول الضلع a يساوي قيمة زاوية $\widehat{BOC}$ وطول الضلع b يساوي قيمة زاوية $\widehat{COA}$ وطول الضلع c يساوي قيمة زاوية $\widehat{AOB}$. وتتحدد زوايا الخاصة بالمثلث بشكل مشابه؛ فزاوية الرأس A هي الزاوية بين خط مستقيم AD المماس مع AB وخط مستقيم آخر AE المماس مع AC ، وهكذا.

(٢-٢) صيغة جيب التمام

في حساب المثلثات المستوية، هناك ما يُعرف بصيغة جيب التمام:

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cos A. \quad (B-1)$$



شكل ب-١: المثلث الكروي: «الدائرة الكبرى» هي تقاطع مستوى يقطع الكرة في نصفين متساويين مع الكرة. ومع وجود النقاط الثلاثة A و B و C على الكرة، يمكن تحديد ثلاث دوائر كبرى. وتكون الأقواس الثلاثة AB و BC و CA ، الذي كل منها أقل من 180 درجة أو π بالراديان، «مثلثاً كروياً».

في حساب المثلثات الكروية، هناك صيغة مماثلة:

$$\cos a = \cos b \cos c + \sin b \sin c \sin A. \quad (B-2)$$

عندما تكون الأقواس قصيرة ويقترب المثلث الكروي من المثلث المستوي، تُختزل المعادلة B-2 إلى المعادلة B-1. في واقع الأمر، بالنسبة للأقواس الصغيرة:

$$\cos b \approx 1 - \frac{1}{2}b^2, \quad (B-3)$$

و

$$\sin b \approx b, \quad (B-4)$$

وهكذا. وتعويض المعادلتين B-3 و B-4 في المعادلة B-2 يختزلها في المعادلة B-1. سنعطي هنا برهاناً بسيطاً على صيغة جيب التمام في حساب المثلثات الكروية بالقياس بتلك الخاصة بحساب المثلثات المستوية. لتبسيط الترميز، سنجعل نصف قطر

فيزياء الطاقة الشمسية

الكرة $OA = OB = OC = 1$. وبمد الخط OB ليتقاطع مع خط متماس مع AB في النقطة D ، سيكون لدينا:

$$AD = \tan c; OD = \sec c. \quad (B-5)$$

بالمثل، بمد الخط OC ليتقاطع مع خط متماس مع AC في النقطة E ، سيكون لدينا:

$$AE = \tan b; OE = \sec b. \quad (B-6)$$

بالنسبة للمثلث المستوي DAE ، باستخدام صيغة جيب التمام المستوية، نحصل على:

$$\begin{aligned} DE^2 &= AD^2 + AE^2 - 2AD \cdot AE \cos \widehat{DAE} \\ &= \tan^2 c + \tan^2 b - 2 \tan b \tan c \cos A. \end{aligned} \quad (B-7)$$

بالمثل، بالنسبة للمثلث المستوي DOE :

$$\begin{aligned} DE^2 &= OD^2 + OE^2 - 2OD \cdot OE \cos \widehat{DOE} \\ &= \sec^2 c + \sec^2 b - 2 \sec b \sec c \cos a. \end{aligned} \quad (B-8)$$

ب طرح المعادلة B-7 من المعادلة B-8، وملاحظة أن:

$$\sec^2 b = 1 + \tan^2 b, \quad \sec^2 c = 1 + \tan^2 c, \quad (B-9)$$

نحصل على:

$$2 - 2 \sec b \sec c \cos a = -2 \tan b \tan c \cos A. \quad (B-10)$$

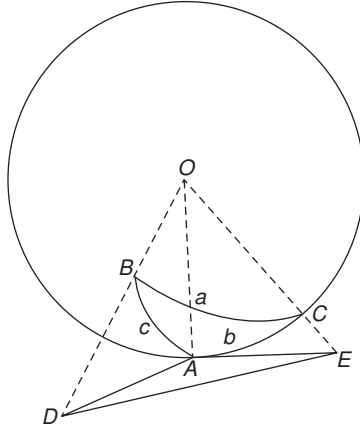
وبضرب الطرفين في $\cos b \cos c$ ، نحصل على:

$$\cos a = \cos b \cos c + \sin b \sin c \cos A. \quad (B-11)$$

بالمثل، بالنسبة لزاويتي الرأس B و C :

$$\cos b = \cos c \cos a + \sin c \sin a \cos B; \quad (B-12)$$

$$\cos c = \cos a \cos b + \sin a \sin b \cos C. \quad (B-13)$$



شكل ب-٢: اشتقاق صيغة جيب التمام: يعتمد الاشتقاق على إسقاط مثلث كروي على مستوى وصيغة جيب التمام في حساب المثلثات المستوية. يتقاطع خط مستقيم متماس مع القوس AB مع امتداد الخط OB في النقطة D . ويتقاطع خط مستقيم آخر متماس مع القوس AC مع امتداد الخط OC في النقطة E . وبتطبيق صيغة جيب التمام في حساب المثلثات الكروية على المثلثين ODE و ADE وبعد بعض العمليات الجبرية البسيطة، نحصل على صيغة جيب التمام المقابلة.

(٣-٢) صيغة الجيب

في حساب المثلثات المستوية، هناك ما يُعرف بصيغة الجيب:

$$\frac{a}{\sin A} = \frac{b}{\sin B} = \frac{c}{\sin C}. \quad (B-14)$$

في حساب المثلثات الكروية، هناك صيغة مماثلة:

$$\frac{\sin a}{\sin A} = \frac{\sin b}{\sin B} = \frac{\sin c}{\sin C}. \quad (\text{B-15})$$

من الواضح أنه بالنسبة للأقواس الصغيرة، ستختزل المعادلة B-15 إلى المعادلة B-14. لإثبات المعادلة B-14، سنعيد كتابة المعادلة B-2 على النحو التالي:

$$\sin b \sin c \cos A = \cos a - \cos b \cos c. \quad (\text{B-16})$$

بالتربيع، سنحصل على:

$$\begin{aligned} \sin^2 b \sin^2 c \cos^2 A &= \cos^2 a \\ -2 \cos a \cos b \cos c + \cos^2 b \cos^2 c. \end{aligned} \quad (\text{B-17})$$

يمكن إعادة كتابة الجانب الأيسر كما يلي:

$$\sin^2 b \sin^2 c - \sin^2 b \sin^2 c \sin^2 A, \quad (\text{B-18})$$

أو

$$1 - \cos^2 b - \cos^2 c + \cos^2 b \cos^2 c - \sin^2 b \sin^2 c \sin^2 A. \quad (\text{B-19})$$

حيث إن:

$$\begin{aligned} \sin^2 b \sin^2 c \sin^2 A &= 1 - \cos^2 a - \cos^2 b \\ -\cos^2 c + 2 \cos^2 a \cos^2 b \cos^2 c. \end{aligned} \quad (\text{B-20})$$

تحدد:

$$Z = \frac{\sin^2 a \sin^2 b \sin^2 c}{1 - \cos^2 a - \cos^2 b - \cos^2 c + 2 \cos^2 a \cos^2 b \cos^2 c}. \quad (\text{B-21})$$

يمكن إعادة كتابة المعادلة B-20 كما يلي:

$$\frac{\sin a}{\sin A} = \pm \sqrt{Z}. \quad (\text{B-22})$$

بالتعريف، في المثلث الكروي، دائمًا ما تكون الأضلاع وزوايا الرؤوس أقل من 180 درجة. ومن ثم، في المعادلة B-22، يكون مسموحًا فقط بالعلامة الموجبة. ولأن Z متماثلة مع A و B و C ، نحصل على:

$$\frac{\sin a}{\sin A} = \frac{\sin b}{\sin B} = \frac{\sin c}{\sin C}. \quad (\text{B-23})$$

(٤-٢) الصيغة C

سنكتب صيغة جيب التمام B-11 بالشكل التالي، ونستخدم المعادلة B-13:

$$\begin{aligned} \sin b \sin c \cos A &= \cos a - \cos b \cos c \\ &= \cos a - \cos b (\cos a \cos b + \sin a \sin b \cos C) \\ &= \cos a \sin^2 b - \cos b \sin a \cos b \cos C. \end{aligned} \quad (\text{B-24})$$

بقسمة الطرفين على $\sin b$ ، نحصل على «الصيغة C »:

$$\sin c \cos A = \cos a \sin b - \sin a \cos b \cos C. \quad (\text{B-25})$$

بالمثل:

$$\sin a \cos B = \cos b \sin c - \sin b \cos c \cos A, \quad (\text{B-26})$$

$$\sin a \cos C = \cos c \sin b - \sin c \cos b \cos A, \quad (\text{B-27})$$

وهكذا.

مسائل

- (ب-1) أثبت أنه إذا كان أحد الأضلاع يساوي 180 درجة، فلا يمكن إنشاء مثلث كروي.
 (ب-2) إذا كانت إحدى زوايا الرؤوس لمثلث كروي، على سبيل المثال، C ، زاوية قائمة، أثبت أنه بالنسبة للأضلاع الصغيرة تؤدي صيغة جيب التمام إلى نظرية فيثاغورس.
 (ب-3) باستخدام صيغتي جيب التمام والجيب، أثبت أن:

$$\cot a \sin b = \cot A \sin C + \cos b \cos C, \quad (\text{B-28})$$

$$\cot c \sin a = \cot C \sin B + \cos a \cos B, \quad (\text{B-29})$$

وهكذا.

- (ب-4) بالنسبة لمثلث كروي مستطيلي حيث C تساوي 90 درجة، أثبت أن:

$$\sin a = \sin c \sin A, \quad (\text{B-30})$$

$$\sin b = \sin c \sin B, \quad (\text{B-31})$$

$$\tan a = \tan c \cos B, \quad (\text{B-32})$$

$$\tan b = \tan c \cos A, \quad (\text{B-33})$$

$$\tan a = \sin b \tan A, \quad (\text{B-34})$$

$$\tan b = \sin a \tan B. \quad (\text{B-35})$$

(٣) ملحق ج: مقدمة لميكانيكا الكم

عادة ما تبدأ أي مقدمة لميكانيكا الكم بتناول معادلة شرودنجر واستخدام المعادلات التفاضلية الجزئية كأدوات رياضية. على سبيل المثال، تُحل مسألة ذرة الهيدروجين من خلال التوافقيات الكروية ومتعددات حدود لاجير. من العيوب المحتملة لهذا الأسلوب

أن القراء يغرقون في صفحات عديدة من الصيغ الرياضية ويفقدون الفهم المفاهيمي للجانب الفيزيائي. تاريخياً، قبل اكتشاف إرفين شرودنجر لصيغة المعادلة التفاضلية الجزئية، طور هايزنبرج وباولي الأسلوب الجبري لميكانيكا الكم، وحلَّ العديد من المسائل الأساسية في ميكانيكا الكم، بما في ذلك الهزاز التوافقي والزخم الزاوي وذرة الهيدروجين. ومن منظور تعليمي، يمكن أن يكون الترميز المقتضب للأسلوب الجبري، وبخاصة ترميز ديراك، من الناحية المفاهيمية مرتبطاً على نحو مباشر أكثر مع الجوانب الفيزيائية الخاصة به. ومن منظور عملي، لتناول المسائل المتعلقة باستخدام الطاقة الشمسية، لا يُعد استخدام أسلوب تحليليٍّ للمعادلات التفاضلية الجزئية طريقة مفيدة؛ لأن الحسابات الرقمية والطرق الاضطرابية هي الأسلوب السائد في هذا الشأن. علاوة على ذلك، تعتمد الطرق الأكثر تقدماً الخاصة بميكانيكا الكم، مثل الديناميكا الكهربائية الكمية، على الأسلوب الجبري وليس أسلوب المعادلات التفاضلية الجزئية.

يعرض هذا الملحق ملخصاً موجزاً للأسلوب الجبري الخاص بميكانيكا الكم، ممثلاً في مسائل الهزاز التوافقي والزخم الزاوي وذرة الهيدروجين. من أجل الوضوح، نستخدم ترميز ديراك مع إضافة علامة إقحام فوق المؤثر لتمييزه عن العدد (بوجه عام المركب).

(١-٣) الهزاز التوافقي

إن المؤثر الهاملتوني لهزاز توافقي أحادي البعد هو:

$$\hat{H} = \frac{1}{2m}\hat{p}^2 + \frac{m\omega^2}{2}\hat{q}^2, \quad (C-1)$$

بحيث يحقق الزخم $\hat{p}$ والإحداثي $\hat{q}$ علاقة التبادل:

$$[\hat{p}, \hat{q}] \equiv \hat{p}\hat{q} - \hat{q}\hat{p} = i\hbar. \quad (C-2)$$

سنُدخل مؤثرين؛ الأول «مؤثر الإفناء»:

$$\hat{a} = \frac{1}{\sqrt{2m\hbar\omega}}\hat{p} + i\sqrt{\frac{m\omega}{2\hbar}}\hat{q}, \quad (C-3)$$

والثاني «مؤثر التخليق»:

$$\hat{a}^\dagger = \frac{1}{\sqrt{2m\hbar\omega}}\hat{p} - i\sqrt{\frac{m\omega}{2\hbar}}\hat{q}, \quad (C-4)$$

وسيتضح معناهما جيداً بعد قليل. باستخدام علاقة التبادل C-2، نحصل على:

$$\hat{H} = \hbar\omega\hat{a}^\dagger\hat{a} + \frac{1}{2}\hbar\omega, \quad (C-5)$$

وعلاقة التبادل:

$$[\hat{a}, \hat{a}^\dagger] \equiv \hat{a}\hat{a}^\dagger - \hat{a}^\dagger\hat{a} = 1. \quad (C-6)$$

للوصول إلى الحالات الذاتية ومستويات الطاقة الخاصة بالمؤثر الهاملتوني C-1:

$$\hat{H}|n\rangle = E_n|n\rangle, \quad (C-7)$$

يكفي تحديد الحالات والقيم الذاتية للمؤثر $\hat{a}^\dagger\hat{a}$:

$$\hat{a}^\dagger\hat{a}|n\rangle = u_n|n\rangle, \quad (C-8)$$

و $E_n = \left(u_n + \frac{1}{2}\right)\hbar\omega$. ونتيجة للمعادلة C-6، إذا كانت $|n\rangle$ حالة ذاتية بقيمة ذاتية u_n ، فإن $\hat{a}|n\rangle$ أيضاً حالة ذاتية:

$$\hat{a}^\dagger\hat{a}\hat{a}|n\rangle = (u_n - 1)\hat{a}|n\rangle \quad (C-9)$$

بقيمة ذاتية $u_n - 1$. ولأن $\langle n|\hat{a}^\dagger\hat{a}|n\rangle$ لا يجب أن يكون سالباً، فيجب أن تكون هناك حالة ذاتية بقيمة دنيا، $u_n = 0$. وبالنسبة لحالة كهذه:

$$\hat{a}^\dagger\hat{a}|0\rangle = 0. \quad (C-10)$$

على الجانب الآخر، إذا كانت $|n\rangle$ حالة ذاتية بقيمة ذاتية u_n ، فإن $\hat{a}^\dagger|n\rangle$ أيضًا حالة ذاتية:

$$\hat{a}^\dagger \hat{a} (\hat{a}^\dagger |n\rangle) = (u_n + 1) (\hat{a}^\dagger |n\rangle) \quad (C-11)$$

بقيمة ذاتية $u_n + 1$. وبدءًا من $|0\rangle$ ، بتطبيق $\hat{a}^\dagger$ عدة مرات، نحصل على:

$$\hat{a}^\dagger \hat{a} (\hat{a}^\dagger)^n |0\rangle = n (\hat{a}^\dagger)^n |0\rangle. \quad (C-12)$$

من ثم، نخلص إلى أن القيم الذاتية للمؤثر $\hat{a}^\dagger \hat{a}$ أعداد صحيحة غير سالبة ويمكن إنشاء الحالات الذاتية من الحالة التي قيمتها الذاتية صفر:

$$|n\rangle = C_n (\hat{a}^\dagger)^n |0\rangle. \quad (C-13)$$

الخطوة الأخيرة هي تحديد ثابت المعايرة C_n . والحالة ذات الترتيب صفر بالتعريف تكون معايرة:

$$\langle 0|0\rangle = 1. \quad (C-14)$$

بتطبيق $\hat{a}^\dagger$ عدة مرات، نحصل على:

$$\langle 0|(\hat{a})^n (\hat{a}^\dagger)^n |0\rangle = n!. \quad (C-15)$$

وهكذا نحصل على ما يلي: $C_n = (n!)^{-1/2}$ ، وأخيرًا:

$$|n\rangle = \frac{1}{\sqrt{n!}} (\hat{a}^\dagger)^n |0\rangle. \quad (C-16)$$

وتلك أيضًا حالات ذاتية لمسألة الهزاز التوافقي:

$$\hat{H}|n\rangle = \left(n + \frac{1}{2}\right) \hbar \omega |n\rangle. \quad (C-17)$$

وهكذا أصبح مستوى الطاقة للهاز التوافقي مكمماً، بكموم طاقة $\hbar\omega$. ويضيف المؤثر $\hat{a}^+$ كموم طاقة للهاز، ومن هنا، جاءت التسمية «مؤثر التخليق»؛ في حين أن المؤثر $\hat{a}$ يحذف كموم طاقة من الهاز، ومن هناك جاءت التسمية «مؤثر الإفناء». ويلعب هذان المؤثران دوراً مهماً في الديناميكا الكهربائية الكمية أو النظرية الكمية الرئيسية للإشعاع.

(٢-٣) الزخم الزاوي

يشبه تعريف الزخم الزاوي في ميكانيكا الكم ذلك الخاص بالميكانيكا الكلاسيكية، فيما عدا أن ترتيب الإحداثي $\mathbf{r}$ والزخم $\mathbf{p}$ ثابت:

$$\hat{\mathbf{m}} = \hat{\mathbf{r}} \times \hat{\mathbf{p}}, \quad (\text{C-18})$$

أو بترميز الممتدات:

$$\hat{m}_i = \epsilon_{ijk} \hat{x}_j \hat{p}_k, \quad (\text{C-19})$$

بحيث إن «الممتد المحوري الواحد» هو ممتد غير متماثل لكل اللواحق الثلاثة، مع كون $\epsilon_{123} = 1$ ، ويغير العلامة عن طريق تبادل ترقيمين متطابقين، بحيث تكون القيمة صفراً. ويضمن المجموع فوق j و k . لتبسيط الترميز، سنعرّف نسخة لابعدية من الزخم الزاوي:

$$\hat{l}_i = \hbar^{-1} \hat{m}_i = \hbar^{-1} \epsilon_{ijk} \hat{x}_j \hat{p}_k. \quad (\text{C-20})$$

يمكن الوصول إلى علاقات التبادل من علاقات تبادل الزخم والإحداثي:

$$[\hat{p}_j, \hat{x}_k] = i\hbar \delta_{jk}, \quad (\text{C-21})$$

وهي:

$$\begin{aligned} \hat{l}_x \hat{l}_y - \hat{l}_y \hat{l}_x &= i\hat{l}_z, \\ \hat{l}_y \hat{l}_z - \hat{l}_z \hat{l}_y &= i\hat{l}_x, \\ \hat{l}_z \hat{l}_x - \hat{l}_x \hat{l}_z &= i\hat{l}_y, \end{aligned} \quad (\text{C-22})$$

أو بصيغة الممتدات:

$$[\hat{l}_i, \hat{l}_j] = i\epsilon_{ijk}\hat{l}_k. \quad (C-23)$$

من المركبات، يمكننا تكوين مؤثر باعتباره مربع معامل متجه الزخم الزاوي:

$$\hat{\mathbf{I}}^2 = \hat{l}_x^2 + \hat{l}_y^2 + \hat{l}_z^2. \quad (C-24)$$

ونتيجة لعلاقات التبادل C-22، $\hat{\mathbf{I}}^2$ يتبادل مع إحدى المركبات، ولتكن مثلاً:

$$[\hat{\mathbf{I}}^2, \hat{l}_z] = 0. \quad (C-25)$$

من ثم، يمكننا إيجاد الحالات $|l, m\rangle$ التي في نفس الوقت حالة ذاتية لكل من $\hat{\mathbf{I}}^2$ و $\hat{l}_z$:

$$\hat{\mathbf{I}}^2|l, m\rangle = \lambda|l, m\rangle, \quad (C-26)$$

$$\hat{l}_z|l, m\rangle = \mu|l, m\rangle.$$

فيما يلي سندخل مؤثرين مماثلين لمؤثري الإفناء والتخليق في مسألة الهزازات التوافقية:

$$\hat{l}_+ = \hat{l}_x + i\hat{l}_y, \quad (C-27)$$

$$\hat{l}_- = \hat{l}_x - i\hat{l}_y,$$

الذين لهما علاقتا التبادل:

$$[\hat{l}_z, \hat{l}_+] = \hat{l}_+, \quad (C-28)$$

$$[\hat{l}_z, \hat{l}_-] = -\hat{l}_- \quad (C-29)$$

والمطابقة:

$$\hat{\mathbf{I}}^2 = \hat{l}_- \hat{l}_+ + \hat{l}_z^2 + \hat{l}_z. \quad (\text{C-30})$$

باستخدام حجج مماثلة لتلك الموجودة في مسألة الهزاز التوافقي، سنجد أن $\hat{l}_+ |l, m\rangle$ أيضاً حالة ذاتية لـ $\hat{l}_z$ بقيمة ذاتية $\mu + 1$ وأن $\hat{l}_- |l, m\rangle$ حالة ذاتية لـ $\hat{l}_z$ بقيمة ذاتية $\mu - 1$. وبتطبيق هذين المؤثرين عدة مرات، نحصل على:

$$\hat{l}_z (\hat{l}_+)^n |l, m\rangle = (\mu + n) (\hat{l}_+)^n |l, m\rangle \quad (\text{C-31})$$

و

$$\hat{l}_z (\hat{l}_-)^n |l, m\rangle = (\mu - n) (\hat{l}_-)^n |l, m\rangle. \quad (\text{C-32})$$

لكن بسبب المعادلة C-24، القيمة الذاتية لـ $\hat{l}_z$ لا يمكن أن تزيد على نحو لا نهائي. فيجب أن يكون لقيمتها المطلقة حد أقصى. وبسبب التماثل، يجب أن تكون القيمة المطلقة لكل من الحدين الأقصى الموجب والسالب متساوية. كذلك، ولأن الفرق بين الحدين الأقصى الموجب والسالب يجب أن يكون عدداً صحيحاً، فيجب أن يكونا نصف عدد صحيح. وبالترميز لهذا العدد بـ l ، يجب أن تكون القيم الذاتية الممكنة لـ $\hat{l}_z$ ، التي عادة ما يُرمز لها بـ m ، كما يلي:

$$m = -l, \quad -l + 1, \quad -l + 2, \quad \dots, \quad l - 2, \quad l - 1, \quad l. \quad (\text{C-33})$$

بحيث:

$$l = 0, \quad \frac{1}{2}, \quad 1, \quad \frac{3}{2}, \quad 2, \quad \frac{5}{2}, \quad 3, \dots \quad (\text{C-34})$$

من الواضح أن l ، القيمة المطلقة القصوى لـ $\hat{l}_z$ هي أيضاً العدد الكمي للزخم الزاوي الإجمالي $\hat{\mathbf{I}}^2$. فيما يلي سنصل إلى القيمة الذاتية للمؤثر $\hat{\mathbf{I}}^2$. ولأن m تساوي 1 هي القيمة الذاتية القصوى لـ $\hat{l}_z$ ، فيجب أن نحصل على ما يلي:

$$\hat{l}_+ |l, l\rangle = 0. \quad (\text{C-35})$$

في ضوء المعادلة C-30:

$$\hat{\mathbf{I}}^2 |l, l\rangle = (\hat{l}_- \hat{l}_+ + \hat{l}_z^2 + \hat{l}_z) |l, l\rangle = l(l+1) |l, l\rangle. \quad (C-36)$$

ولأن l و m مستقلتان، فسنحصل أخيراً على القيم والحالات الذاتية لمؤثر الزخم الزاوي:

$$\hat{\mathbf{m}}^2 |l, m\rangle = l(l+1) \hbar |l, m\rangle, \quad (C-37)$$

$$\hat{m}_z |l, m\rangle = m \hbar |l, m\rangle.$$

(٣-٣) ذرة الهيدروجين

في الفيزياء الكلاسيكية، إذا كانت كتلة البروتون كبيرة، فإن المؤثر الهاملتوني لذرة الهيدروجين يكون:

$$H = \frac{\mathbf{p}^2}{2m_e} - \frac{\kappa}{r}, \quad (C-38)$$

بحيث κ تساوي $e^2/4\pi\epsilon_0$ ؛ ارجع للفصل الثاني. وبسبب التماثل الكروي للمسألة، يبقى الزخم الزاوي ثابتاً. ومتجه الزخم الزاوي دائماً ما يكون عمودياً على مستوى الحركة:

$$\mathbf{L} = \mathbf{r} \times \mathbf{p} = \text{const.} \quad (C-39)$$

بالإضافة إلى الزخم الزاوي، هناك متجه آخر يبقى ثابتاً وهو مرتبط بالاتجاه الثابت للمحور الطويل للمدار، الذي هو نتيجة تفاعل كولوم. وهو يُسمى متجه رنج-لنز على اسم مكتشفه:

$$\mathbf{A} = \frac{\kappa \mathbf{r}}{r} - \frac{1}{m_e} (\mathbf{p} \times \mathbf{L}) = \text{const.} \quad (C-40)$$

ولأن متجه الزخم الزاوي $\mathbf{L}$ عمودي على المستوى المداري ويوجد متجه رنج-لنز في المستوى، يكون المتجهان عموديين كل منهما على الآخر:

$$\mathbf{L} \cdot \mathbf{A} = 0. \quad (C-41)$$

في عام 1926، قبل عام من توصل شرودنجر إلى معادلته التفاضلية وحله لمسألة ذرة الهيدروجين، حل فولفجانج باولي مسألة القيمة الذاتية باستخدام الأسلوب الجبري لفيرنر هايزنبرج اعتمادًا على ثابتي حركة. كانت معالجة باولي للمسألة كما يلي:
في ميكانيكا الكم، المؤثر الهاملتوني هو مؤثر:

$$\hat{H} = \frac{\hat{\mathbf{p}}^2}{2m_e} - \frac{\kappa}{r}. \quad (\text{C-42})$$

والزخم الزاوي الذي أيضًا مؤثر:

$$\hat{\mathbf{L}} = \hat{\mathbf{r}} \times \hat{\mathbf{p}}, \quad (\text{C-43})$$

يحقق علاقة التبادل:

$$[\hat{L}_i, \hat{L}_j] = i\hbar \epsilon_{ijk} \hat{L}_k. \quad (\text{C-44})$$

ويتبادل أيضًا مع المؤثر الهاملتوني C-42، ومن ثم، ثابت حركة.
ولأن $\hat{\mathbf{p}} \times \hat{\mathbf{L}}$ ليس هرميتيًا، فقد عرّف باولي مؤثرًا هرميتيًا مكافئًا لمتجه رنج-لنز الكلاسيكي:

$$\hat{\mathbf{A}} = \frac{\kappa \hat{\mathbf{r}}}{r} - \frac{1}{2m_e} (\hat{\mathbf{p}} \times \hat{\mathbf{L}} - \hat{\mathbf{L}} \times \hat{\mathbf{p}}). \quad (\text{C-45})$$

ومع بعض العمليات الجبرية البسيطة، ولكن المرهقة جدًا، تُبَيَّن أن هذا المؤثر يتبادل مع المؤثر الهاملتوني الميكانيكي الكمي، أرجع إلى المعادلة C-42. وقد نتج عن عمليات جبرية مماثلة علاقتا التبادل التاليتين:

$$[\hat{L}_i, \hat{A}_j] = i\hbar \epsilon_{ijk} \hat{A}_k, \quad (\text{C-46})$$

$$[\hat{A}_i, \hat{A}_j] = i\hbar \left(\frac{-2\hat{H}}{m_e} \right) \epsilon_{ijk} \hat{L}_k, \quad (\text{C-47})$$

والعلاقة:

$$\hat{A}^2 = \left(\frac{2\hat{H}}{m_e} \right) (\hat{L}^2 + \hbar^2) + \kappa^2. \quad (C-48)$$

ولأن $\hat{A}$ يتبادل مع $\hat{H}$ وهناك حالات ذاتية مشتركة، يمكن تعريف متجه مختزل:

$$\hat{B} = \left(-\frac{m_e}{2\hat{H}} \right)^{1/2} \hat{A}. \quad (C-49)$$

تُختزل علاقتا التبادل في المعادلتين C-46 و C-47 إلى:

$$[\hat{L}_i, \hat{B}_j] = i\hbar \epsilon_{ijk} \hat{B}_k, \quad (C-50)$$

$$[\hat{B}_i, \hat{B}_j] = i\hbar \epsilon_{ijk} \hat{L}_k. \quad (C-51)$$

سنُدخل مؤثرين:

$$\hat{J} = \frac{1}{2} (\hat{L} + \hat{B}), \quad (C-52)$$

$$\hat{K} = \frac{1}{2} (\hat{L} - \hat{B}).$$

تُختزل علاقتا التبادل إلى علاقَتين بزخمين زاويين مستقلين:

$$[\hat{J}_i, \hat{J}_j] = i\hbar \epsilon_{ijk} \hat{J}_k, \quad (C-53)$$

$$[\hat{K}_i, \hat{K}_j] = i\hbar \epsilon_{ijk} \hat{K}_k, \quad (C-54)$$

$$[\hat{J}_i, \hat{K}_j] = 0. \quad (C-55)$$

باستخدام المعادلتين C-49 و C-52، تصبح المعادلة C-48:

$$-\frac{1}{2}\mu\kappa^2\frac{1}{\hat{H}} = 2(\hat{J}^2 + \hat{K}^2) + \hbar^2. \quad (C-56)$$

من المعادلة C-52، نجد أن $\hat{J}^2$ تساوي $\hat{K}^2$ وأن القيم الذاتية لـ $\hat{J}^2$ و $\hat{K}^2$ متطابقة. وطبقاً لنظرية الزخم الزاوي (معادلة C-37)، كلاهما يساويان $j(j+1)\hbar^2$ ؛ ومن ثم فإن الحل سيكون:

$$-\frac{1}{2}\mu\kappa^2\frac{1}{E_n} = 4j(j+1)\hbar^2 + \hbar^2 = (2j+1)^2\hbar^2. \quad (C-57)$$

من المعادلة C-34، $n = 2j + 1$ يمكن أن يكون أي عدد صحيح موجباً. وأخيراً، تكون قيم الطاقة الذاتية لذرة الهيدروجين كما يلي:

$$E_n = -\frac{\mu\kappa^2}{2\hbar^2 n^2}. \quad (C-58)$$

(٤) ملحق د: إحصاء الجسيمات

في المعالجة الميكروسكوبية للمادة تتوزع الجسيمات، على سبيل المثال الجزيئات والإلكترونات، في نظام من «مستويات الطاقة». وتُحدد كيفية توزيع الجسيمات عبر مستويات الطاقة سلوك النظام بطريقة رائعة. وفيما يتعلق بتطبيقات الطاقة الشمسية، من المهم أن يكون لدينا فهم لـ «إحصاء ماكسويل-بولتزمان» و«إحصاء فيرمي-ديراك». إن إحصاء ماكسويل-بولتزمان مناسب لنظام من «الجسيمات غير المتماثلة» مستويات طاقته تسمح بشغل غير محدود، في حين أن إحصاء فيرمي-ديراك مناسب لنظام من «الجسيمات المتماثلة» مستويات طاقته تسمح بشغل محدود؛ أي، نظام يحقق مبدأ الاستبعاد لبولي.

تتمثل نقطة البدء في الاشتقاق في تعبير بولتزمان الخاص بالقصور الحراري:

$$S = k_B \ln W, \quad (D-1)$$

بحيث k_B هو ثابت بولتزمان و W هو العدد الإجمالي لتكوينات النظام. تأمل وضعاً فيه جسيمات N في نظام يتكون من سلسلة من مستويات الطاقة. عدد الشغل للمستوى ذي الترتيب i هو N_i . وطاقة المستوى ذي الترتيب i هي E_i ، وإجمالي طاقة النظام هي E . لدينا الشرطان التاليان:

$$N = \sum_i N_i, \quad (D-2)$$

$$E = \sum_i N_i E_i.$$

إن شرط تحقيق التوازن هو أن يصل القصور الحراري، المعادلة D-1، للحد الأقصى في ظل الشرطين المذكورين في المعادلة D-2.

بديهيًا، كلما كان التوزيع منتظمًا، زادت العشوائية أو القصور الحراري. لكن يضيف شرط الطاقة الإجمالية الثابتة شرطاً آخر؛ من المفضل أن توجد جسيمات أكثر في مستويات الطاقة الأقل وجسيمات أقل في مستويات الطاقة الأعلى. ويمكن حل المسألة باستخدام مبرهنة فيرما إلى جانب طريقة «مضاعف لاجرانج». وبإدخال مضاعفي لاجرانج α و β ، يكون شرط تحقيق التوازن هو:

$$\frac{\partial}{\partial N_i} \left[S + \alpha \left(N - \sum_i N_i \right) + \beta \left(E - \sum_i N_i E_i \right) \right] = 0. \quad (D-3)$$

يمكن الوصول إلى التوزيع من خلال الجمع بين حل المعادلة D-3 والشرطين المعروضين في المعادلتين D-1 و D-2.

في عملية الحساب، نحتاج لقيمة تقريبية لمشتق $\ln N!$ كبيرة. ويمكن التعبير عن هذا ببساطة كما يلي:

$$\frac{d}{dN} \ln N! \approx \ln N! - \ln (N-1)! \approx \ln N. \quad (D-4)$$

(٤-١) إحصاء ماكسويل-بولتزمان

بالنسبة لإحصاء ماكسويل-بولتزمان، فيما يتعلّق بالنظم الذرية الكلاسيكية، تكون الجسيمات غير متماثلة وعدد جسيمات كل مستوى طاقة غير محدود. ويمكن تحديد التكوينات الممكنة W كما يلي:

افترض أن العدد N من الجسيمات موجود في حاويات بأعداد شغل N_1 و N_2 و... و N_i و... وهكذا. تأمل الآن عدد الطرق التي يمكن من خلالها وضع الجسيمات N_1 في الحاوية 1. أولاً، اختر أحد الجسيمات N للموضع الأول في الحاوية 1؛ أي، طرق العدد N . بعد ذلك، اختر أحد الجسيمات $N - 1$ الباقية للموضع الثاني في الحاوية 1. يؤدي هذا إلى الطرق $N - 1$. وهناك أيضاً الطرق $N(N - 1)$. وبلاستمرار في هذه العملية، يكون العدد الإجمالي للطرق هو $(N - N_1 - 1)(N - 2) \dots (N - N_1 - 1)$. لكن سيكون وضع الجسيمات في الحاوية عشوائياً؛ لذا هناك تكرار نسبته $N_1!$ ضِعْف. وإجمالي طرق الوضع تكون:

$$W_1 = \frac{N(N - 1)(N - 2) \dots (N - N_1 - 1)}{N_1!} = \frac{N!}{(N - N_1)!N_1!}. \quad (D-5)$$

بالمثل، ينتج عدد طرق وضع الجسيمات $N - N_1$ المتبقية في الحاوية 2 عاملاً:

$$W_2 = \frac{(N - N_1)!}{(N - N_1 - N_2)!N_2!}. \quad (D-6)$$

بالمثل:

$$W_3 = \frac{(N - N_1 - N_2)!}{(N - N_1 - N_2 - N_3)!N_3!}. \quad (D-7)$$

بلاستمرار في العملية أكثر، نحصل في النهاية على:

$$W = W_1 W_2 \dots W_i \dots = \frac{N!}{\prod_i N_i!}. \quad (D-8)$$

والقصور الحراري سيكون:

$$S = k_B \ln W = k_B \left(\ln N! - \sum_i \ln N_i! \right). \quad (D-9)$$

وسيكون شرط التوازن الحراري:

$$\frac{\partial}{\partial N_i} \left[S + \alpha \left(N - \sum_i N_i \right) + \beta \left(E - \sum_i N_i E_i \right) \right] = 0. \quad (D-10)$$

والنتيجة:

$$k_B \ln N_i = -\alpha - \beta E_i, \quad (D-11)$$

ويمكن تفسير معنى معامل β اعتمادًا على مبادئ الديناميكا الحرارية. ولأن النظام له درجة حرارة وحجم ثابتان، فطبقًا للمعادلة 6-28، سيكون لدينا:

$$dE = T dS. \quad (D-12)$$

بالتعامل مع S و E باعتبارهما متغيرين، وبمقارنة المعادلة D-3 بالمعادلة D-12، سنجد بديهياً أن:

$$\beta = \frac{1}{T}. \quad (D-13)$$

يمكن تحديد الثابت α من خلال الشرط الذي يقول إن العدد الإجمالي للجسيمات هو N . ويمكن إعادة كتابة المعادلة D-11 كما يلي:

$$n_i = \frac{N}{Z} \exp \left(\frac{-E_i}{k_B T} \right), \quad (D-14)$$

بحيث إن Z ثابت يُحدد من خلال الشرط التالي:

$$\sum_i N_i = \sum_i \frac{N}{Z} \exp \left(\frac{-E_i}{k_B T} \right) = N, \quad (D-15)$$

بعبارة أخرى:

$$Z = \sum_i \exp \left(\frac{-E_i}{k_B T} \right). \quad (D-16)$$

بإدخال «احتمال» مستوى الطاقة ذي الترتيب i ، $p_i = N_i/N$ ، يمكن إعادة كتابة معادلة D-16 كما يلي:

$$p_i = \frac{1}{Z} \exp \left(\frac{-E_i}{k_B T} \right). \quad (D-17)$$

من الواضح أن مجموع كل الاحتمالات يساوي 1:

$$\sum_i p_i = 1. \quad (D-18)$$

(٢-٤) إحصاء فيرمي-ديراك

الإلكترونات فرميونات تتبع مبدأ الاستبعاد لباولي. فكل حالة يمكن أن تُشغل فقط بإلكترون واحد. وتُحقق الإلكترونات إحصاء فيرمي-ديراك. لكل قيمة طاقة، هناك حالات متعددة. على سبيل المثال، يمكن أن يكون لكل إلكترون حالتا لف لهما نفس مستوى الطاقة. دع «الانحلال»؛ أي، عدد الحالات في ظل طاقة E_i ، يكون g_i . ولا يجب أن يزيد عدد الإلكترونات الموجودة في مستوى الطاقة هذا، N_i ، عن g_i . ويكون عدد طرق الشغل المختلفة في حالات g_i هو:

$$W_i = \frac{g_i!}{(g_i - N_i)! N_i!}, \quad (D-19)$$

وهي معادلة تعد حالة خاصة من المعادلة D-5. وباتباع المعادلة D-3، نحصل على:

$$k_B [\ln (g_i - N_i) - \ln N_i] = \alpha + \beta E_i, \quad (D-20)$$

أو:

$$N_i = \frac{g_i}{\exp \left(\frac{\alpha + \beta E_i}{k_B} \right) + 1}. \quad (D-21)$$

باستخدام المعادلة D-13 وإدخال احتمال $p_i = N_i/g_i$ نحصل على:

$$p_i = \frac{1}{\exp\left(\frac{E_i - E_F}{k_B T}\right) + 1} \quad (D-22)$$

تُسمى المعادلة D-22 «دالة فيرمي». عند «مستوى فيرمي» E_F ، يكون الاحتمال $1/2$.
ظاهرياً:

$$\begin{aligned} p_i &\rightarrow 1, & E_i &\ll E_F; \\ p_i &\rightarrow 0, & E_i &\gg E_F. \end{aligned} \quad (D-23)$$

في درجة الحرارة المنخفضة حيث $k_B T \ll E_F$ ، يصبح إحصاء فيرمي-ديراك:

$$\begin{aligned} p_i &= 1, & E_i &< E_F; \\ p_i &= 0, & E_i &> E_F. \end{aligned} \quad (D-24)$$

في درجات الحرارة العالية، أو في مستويات الطاقة العالية $(E_i - E_F)/k_B T \gg 1$ ، يُختزل إحصاء فيرمي-ديراك لإحصاء ماكسويل-بولتزمان:

$$p_i \propto \exp\left(\frac{-E_i}{k_B T}\right). \quad (D-25)$$

(٥) ملحق هـ: الطيف الشمسي المرجعي لكتلة هواء 1.5

لتسهيل اختبار الخلايا الكهروضوئية الشمسية، طورت وعُرِّفَت الجمعية الأمريكية للاختبار والمواد، بالتعاون مع صناعة الخلايا الكهروضوئية ومعامل البحث والتطوير الحكومية، توزيعين قياسيين للإشعاع الساقط الطيفي الشمسي الأرضي: الإشعاع الساقط الطيفي الطبيعي المباشر القياسي والإشعاع الساقط الطيفي العالمي القياسي، مع دمجهما معاً في مستند واحد وهو ASTM G-173-03؛ ارجع إلى الفصل الخامس قسم (١-٢).
قُدِّمَت البيانات الأصلية على نطاق الطول الموجي. إن الجدول التالي معروض على نطاق طاقة الفوتون. يعرض العمود الأول طاقة الفوتون بالإلكترون فولت، في حين

فيزياء الطاقة الشمسية

يعرض العمود الثاني طيف الإشعاع الشمسي خارج الأرض، كتلة الهواء صفر. أما العمود الثالث، فيعرض طيف الإشعاع الشمسي الطبيعي المباشر، ويعرض العمود الرابع طيف الإشعاع الشمسي العالمي، بما في ذلك الإشعاع المشتت من السماء. كل بيانات الطيف معروضة بـ $\text{eV} \cdot (\text{W}/\text{m}^2)$.

جدول ه-1: الطيف الشمسي المرجعي لكتلة هواء 1.5 $(\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{eV})$.

الطاقة (eV)	كتلة هواء صفر	إشعاع مباشر	إشعاع عالمي
0.32	116	94	94
0.33	128	105	105
0.34	135	104	104
0.35	141	110	109
0.36	146	75	74
0.37	156	37	37
0.38	163	27	26
0.39	168	52	52
0.40	178	25	25
0.41	184	32	32
0.42	192	16	16
0.43	200	0	0
0.44	208	0	0
0.45	216	0	0
0.46	223	0	0
0.47	232	0	0
0.48	240	0	0
0.49	251	11	11
0.50	265	104	105
0.51	274	163	164
0.52	283	199	201

ملحق

الطاقة (eV)	كتلة هواء صفر	إشعاع مباشر	إشعاع عالمي
0.53	292	247	250
0.54	301	268	271
0.55	313	294	299
0.56	322	294	299
0.57	328	310	315
0.58	338	321	326
0.59	345	286	290
0.60	358	252	256
0.61	370	154	156
0.62	380	214	218
0.63	385	46	47
0.64	399	2	2
0.65	409	0	0
0.66	406	0	0
0.67	427	0	0
0.68	433	31	31
0.69	447	214	219
0.70	456	367	376
0.71	460	396	406
0.72	477	448	460
0.73	482	459	471
0.74	494	470	483
0.75	497	472	485
0.76	507	489	503
0.77	513	479	493
0.78	516	474	487
0.79	523	507	522

فيزياء الطاقة الشمسية

الطاقة (eV)	كتلة هواء صفر	إشعاع مباشر	إشعاع عالمي
0.80	528	505	520
0.81	529	472	486
0.82	530	392	404
0.83	533	212	218
0.84	535	147	151
0.85	536	116	119
0.86	538	52	53
0.87	541	20	21
0.88	544	1	1
0.89	547	0	0
0.90	547	0	0
0.91	549	4	4
0.92	551	204	211
0.93	553	327	340
0.94	558	429	447
0.95	564	494	516
0.96	562	528	552
0.97	575	488	510
0.98	573	516	540
0.99	574	547	573
1.00	576	545	571
1.01	579	522	547
1.02	577	487	510
1.03	579	485	508
1.04	577	461	483
1.05	582	467	489
1.06	577	398	418

ملاحق

الطاقة (eV)	كتلة هواء صفر	إشعاع مباشر	إشعاع عالمي
1.07	584	245	257
1.08	579	204	213
1.09	583	141	148
1.10	578	129	135
1.11	581	298	314
1.12	578	445	468
1.13	571	506	534
1.14	576	523	553
1.15	578	532	563
1.16	584	539	571
1.17	586	546	578
1.18	586	550	582
1.19	589	553	587
1.20	591	555	589
1.21	589	552	586
1.22	597	558	593
1.23	592	553	587
1.24	599	559	595
1.25	600	546	581
1.26	599	484	514
1.27	596	454	482
1.28	595	360	382
1.29	593	268	284
1.30	601	233	247
1.31	593	229	243
1.32	607	149	158
1.33	603	351	374

فيزياء الطاقة الشمسية

الطاقة (eV)	كتلة هواء صفر	إشعاع مباشر	إشعاع عالمي
1.34	596	471	503
1.35	602	408	435
1.36	599	422	450
1.37	596	430	460
1.38	598	471	504
1.39	596	545	585
1.40	591	544	584
1.41	590	544	584
1.42	591	544	586
1.43	579	532	572
1.44	596	544	586
1.45	554	504	543
1.46	589	534	577
1.47	593	530	573
1.48	589	507	548
1.49	590	471	508
1.50	586	453	488
1.51	587	439	474
1.52	594	481	521
1.53	587	521	566
1.54	585	514	558
1.55	584	514	557
1.56	581	509	555
1.57	592	525	572
1.58	586	526	572
1.59	587	526	572
1.60	583	519	567

ملاحق

إشعاع عالمي	إشعاع مباشر	كتلة هواء صفر	الطاقة (eV)
493	452	576	1.61
229	212	587	1.62
452	414	584	1.63
564	517	583	1.64
560	511	578	1.65
557	508	577	1.66
535	488	560	1.67
532	485	575	1.68
490	447	570	1.69
454	414	565	1.70
469	427	570	1.71
421	384	559	1.72
526	477	562	1.73
535	485	566	1.74
527	479	567	1.75
509	462	561	1.76
514	467	561	1.77
491	444	564	1.78
462	420	565	1.79
434	396	555	1.80
519	471	556	1.81
520	471	556	1.82
517	467	554	1.83
513	464	553	1.84
512	464	555	1.85
504	456	556	1.86
489	443	552	1.87

فيزياء الطاقة الشمسية

الطاقة (eV)	كتلة هواء صفر	إشعاع مباشر	إشعاع عالمي
467	519	422	1.88
465	519	420	1.89
477	538	432	1.90
471	536	425	1.91
486	542	439	1.92
474	533	430	1.93
475	539	430	1.94
467	535	422	1.95
446	526	403	1.96
446	537	403	1.97
442	519	401	1.98
450	528	406	1.99
448	521	404	2.00
439	511	396	2.01
443	519	400	2.02
441	518	397	2.03
440	522	396	2.04
430	513	386	2.05
427	510	383	2.06
422	513	379	2.07
413	511	373	2.08
411	507	369	2.09
386	481	347	2.10
420	504	376	2.11
424	509	380	2.12
411	499	369	2.13
398	492	356	2.14

ملحق

الطاقة (eV)	كتلة هواء صفر	إشعاع مباشر	إشعاع عالمي
2.15	487	351	393
2.16	496	358	400
2.17	473	342	383
2.18	484	354	396
2.19	466	342	383
2.20	468	343	385
2.21	458	336	377
2.22	458	337	379
2.23	466	342	385
2.24	460	337	381
2.25	455	333	376
2.26	448	326	368
2.27	451	328	371
2.28	443	322	365
2.29	415	302	342
2.30	434	316	358
2.31	447	323	366
2.32	415	299	339
2.33	443	318	361
2.34	433	310	354
2.35	392	282	320
2.36	429	309	351
2.37	409	295	335
2.38	394	283	323
2.39	356	254	291
2.40	403	288	330
2.41	392	279	320

فيزياء الطاقة الشمسية

الطاقة (eV)	كتلة هواء صفر	إشعاع مباشر	إشعاع عالمي
2.42	414	294	337
2.43	406	286	328
2.44	396	277	319
2.45	410	286	328
2.46	386	268	309
2.47	377	263	304
2.48	385	269	311
2.49	394	274	316
2.50	395	274	318
2.51	383	266	308
2.52	371	255	297
2.53	372	256	296
2.54	357	244	283
2.55	340	231	269
2.56	378	256	298
2.57	385	258	302
2.58	381	254	297
2.59	378	250	293
2.60	367	243	285
2.61	371	246	289
2.62	365	241	284
2.63	349	229	271
2.64	356	233	277
2.65	339	221	263
2.66	349	228	271
2.67	355	230	272
2.68	355	229	273

ملحق

الطاقة (eV)	كتلة هواء صفر	إشعاع مباشر	إشعاع عالمي
261	218	341	2.69
261	218	342	2.70
265	220	347	2.71
253	212	333	2.72
245	204	324	2.73
260	215	344	2.74
254	210	338	2.75
244	201	325	2.76
240	198	320	2.77
221	182	298	2.78
226	184	304	2.79
225	182	302	2.80
209	171	284	2.81
183	148	248	2.82
201	163	274	2.83
210	170	286	2.84
181	146	248	2.85
185	149	255	2.86
158	127	219	2.87
130	104	180	2.88
168	135	234	2.89
172	137	241	2.90
179	143	252	2.91
175	139	247	2.92
178	141	251	2.93
182	144	258	2.94
166	131	237	2.95

فيزياء الطاقة الشمسية

الطاقة (eV)	كتلة هواء صفر	إشعاع مباشر	إشعاع عالمي
2.96	238	130	166
2.97	248	135	172
2.98	249	135	173
2.99	236	127	163
3.00	244	130	168
3.01	234	123	159
3.02	208	109	142
3.03	236	123	160
3.04	217	112	146
3.05	221	114	148
3.06	229	117	153
3.07	227	115	151
3.08	235	119	157
3.09	226	113	150
3.10	213	106	140
3.11	161	79	106
3.12	94	46	61
3.13	156	75	101
3.14	114	54	73
3.15	98	46	63
3.16	160	75	102
3.17	157	73	100
3.18	139	64	88
3.19	121	56	77
3.20	124	56	78
3.21	121	54	75
3.22	114	51	71

ملاحق

الطاقة (eV)	كتلة هواء صفر	إشعاع مباشر	إشعاع عالمي
3.23	85	38	53
3.24	104	46	64
3.25	140	61	85
3.26	130	56	79
3.27	150	64	91
3.28	149	63	90
3.29	126	53	76
3.30	117	49	70
3.31	105	43	62
3.32	119	48	70
3.33	131	53	77
3.34	130	52	76
3.35	141	56	82
3.36	127	50	73
3.37	135	52	77
3.38	139	53	79
3.39	123	47	70
3.40	113	43	64
3.41	112	42	63
3.42	106	39	59
3.43	101	36	55
3.44	110	39	60
3.45	82	29	45
3.46	84	29	46
3.47	92	32	50
3.48	108	37	58
3.49	115	39	62

فيزياء الطاقة الشمسية

الطاقة (eV)	كتلة هواء صفر	إشعاع مباشر	إشعاع عالمي
3.50	111	37	59
3.51	95	32	50
3.52	99	32	52
3.53	105	34	55
3.54	95	30	49
3.55	90	28	46
3.56	90	28	46
3.57	93	29	47
3.58	92	28	46
3.59	82	25	41
3.60	87	26	43
3.61	98	29	48
3.62	95	28	47
3.63	90	26	44
3.64	98	27	46
3.65	90	25	43
3.66	86	23	41
3.67	77	20	35
3.68	75	20	34
3.69	84	22	39
3.70	90	23	41
3.71	85	21	36
3.72	86	21	38
3.73	88	21	38
3.74	87	20	36
3.75	94	22	39
3.76	91	21	38

ملحق

الطاقة (eV)	كتلة هواء صفر	إشعاع مباشر	إشعاع عالمي
3.77	81	18	32
3.78	84	17	31
3.79	86	18	34
3.80	81	16	30
3.81	70	13	23
3.82	64	12	23
3.83	56	10	19
3.84	59	10	18
3.85	60	10	19
3.86	65	11	20
3.87	64	9	16
3.88	59	8	16
3.89	57	7	14
3.90	65	8	14
3.91	56	7	13
3.92	47	5	9
3.93	52	5	10
3.94	55	5	9
3.95	57	4	8
3.96	54	4	8
3.97	55	3	7
3.98	58	3	6
3.99	50	2	5
4.00	39	1	3
4.01	46	1	3
4.02	49	1	2
4.03	47	1	2

فيزياء الطاقة الشمسية

الطاقة (eV)	كتلة هواء صفر	إشعاع مباشر	إشعاع عالمي
4.04	43	0	1
4.05	44	0	1
4.06	48	0	1
4.07	46	0	0
4.08	47	0	0
4.09	41	0	0
4.10	33	0	0
4.11	34	0	0
4.12	31	0	0
4.13	33	0	0
4.14	35	0	0
4.15	33	0	0
4.16	37	0	0
4.17	34	0	0
4.18	38	0	0
4.19	39	0	0
4.20	36	0	0
4.21	36	0	0
4.22	38	0	0
4.23	36	0	0
4.24	38	0	0
4.25	40	0	0
4.26	41	0	0
4.27	38	0	0
4.28	32	0	0
4.29	24	0	0
4.30	20	0	0

ملاحق

إشعاع عالمي	إشعاع مباشر	كتلة هواء صفر	الطاقة (eV)
0	0	22	4.31
0	0	23	4.32
0	0	15	4.33
0	0	10	4.34
0	0	13	4.35
0	0	19	4.36
0	0	20	4.37
0	0	20	4.38
0	0	17	4.39
0	0	13	4.40
0	0	9	4.41

قائمة الرموز

(١) الثوابت الأساسية

$2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$	سرعة الضوء في الفضاء الخالي	c
$6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$	ثابت بلانك	h
$1.055 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$	ثابت ديراك	$\hbar$
$1.38 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$	ثابت بولتزمان	k_B
$1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$	شحنة أولية	q
$5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$	ثابت ستيفان-بولتزمان	σ
$8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$	الثابت الكهربائي	ϵ_0
$4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$	الثابت المغناطيسي	μ_0
$9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$	كتلة الإلكترون	m_e
$8.31 \times 10^3 \text{ J kmole}^{-1} \text{ K}^{-1}$	ثابت الغاز	R

(٢) الفيزياء العامة

eV أو J	طاقة الفوتون	ϵ
V/m	شدة المجال الكهربائي	E
Tesla	شدة المجال المغناطيسي	B
$\text{V} \cdot \text{s/m}$	الجهد المتجهي	A
m^{-1}	معامل الامتصاص	α

فيزياء الطاقة الشمسية

لا بُعدي	الامتصاصية	$A(\lambda)$
لا بُعدي	الانعكاسية	$R(\lambda)$
لا بُعدي	النفذية	$T(\lambda)$

(٣) فيزياء أشباه الموصلات

كتلة فعالة	m^*
الجزء السفلي من نطاق التوصيل	E_C
الجزء العلوي من نطاق التكافؤ	E_V
فجوة طاقة	E_g
مستوى فيرمي أو طاقة فيرمي	E_F
معدل إعادة الاتحاد للثغرات والإلكترونات	α_r
حركة الإلكترونات	μ_n
حركة الثغرات	μ_p
كثافة الحالات الفعالة في نطاق التوصيل	N_C
كثافة الحالات الفعالة في نطاق التكافؤ	N_V
تركيز الذرات المستقبلية	N_A
تركيز الذرات المانحة	N_D
تركيز حامل الشحنة النقي	n_i
تركيز الإلكترونات في منطقة n	n_n
تركيز الإلكترونات في منطقة p	n_p
تركيز توازن الإلكترونات في منطقة p	n_{p0}
تركيز الثغرات في منطقة n	p_n
تركيز الثغرات في منطقة p	p_p
تركيز توازن الثغرات في منطقة n	p_{n0}
عمر الإلكترونات الزائدة في منطقة p	τ_n
عمر الثغرات الزائدة في منطقة n	τ_p
معامل انتشار الإلكترونات	D_n
معامل انتشار الثغرات	D_p

قائمة الرموز

طول انتشار الإلكترونات	L_n
طول انتشار الثغرات	L_p

(٤) الفلك

1366W/m^2	الثابت الشمسي	S
$1.50 \times 10^{11}\text{m}$	المسافة بين الشمس والأرض	$A_{\odot}$
$6.96 \times 10^8\text{m}$	نصف قطر الشمس	$r_{\odot}$
$3.84 \times 10^{26}\text{W}$	السطوع الشمسي	$L_{\odot}$
5800K	درجة الحرارة السطحية للشمس	$T_{\odot}$
6378m	نصف قطر الأرض	$r_{\oplus}$
إحداثي جغرافي	دائرة العرض	ϕ
إحداثي جغرافي	خط الطول	λ
يُسمى أيضًا بالعلو	الارتفاع	h
الاتجاه الأفقي	السمت	A
المسافة الزاوية لخط الاستواء	الميل	δ
بالراديان، باتجاه الغرب	الزاوية الساعية	ω
بالراديان، موجبة دائمًا	الزاوية الساعية عند غروب الشمس	ω_s
بالراديان، موجبة دائمًا	الزاوية الساعية عند الشرق-الغرب	ω_{ew}
الإحداثي السماوي المطلق	المطلع المستقيم	α
على المستوى البروجي	خط الطول البروجي المتوسط	l
على المستوى البروجي	خط الطول البروجي الحقيقي	θ
حاليًا يساوي تقريبًا 0.0167	انحراف المدار	e
حاليًا يساوي تقريبًا 23.44 درجة	الميلان البروجي	ε

(٥) الديناميكا الحرارية

درجة الحرارة	T
درجة حرارة الخزان البارد	T_L
درجة حرارة الخزان الساخن	T_H
الكفاءة	η

مراجع

- [1] Renewables Global Status Report 2007. *REN21 Publications*, 2007.
- [2] Mineral Commodity Summaries. *U.S. Geological Survey*, 195:95, 2009.
- [3] W. Adams. Cooking by Solar Heat. *Scientific American*, 1878:376, 1878.
- [4] E. A. Alsema, M. J. de Wild-Scholten, and V. M. Fthenakis. Environmental impacts of PV electricity generation—a critical comparison of energy supply options. *Proceedings of 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 50:97–147, 2006.
- [5] D. Banks. *An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling*. Blackwell Publishing, Oxford, UK, 2008.
- [6] A. J. Bard and M. A. Fox. Artificial photosynthesis solar splitting of water to hydrogen and oxygen. *Acc. Chem. Res.*, 28:141–145, 1995.
- [7] J. K. Beatty, C. C. Peterson, and A. Chaokin. *The Solar System*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1999.
- [8] H. A. Bethe. Energy Production in Stars. *Physical Review*, 55:434–456, 1939.
- [9] H. A. Bethe and C. L. Critchfield. The Formation of Deuterions by Proton Combination. *Physical Review*, 54:248–254, 1938.
- [10] S. Blanco. Solar parking lot with electric car charging stations opens in Tennessee. *AutoblogGreen*, Aug 23, 2011.

- [11] R. E. Blankenship. *Molecular Mechanisms of Photosynthesis*. Blackwell Science, Oxford, UK, 2002.
- [12] J. B. Bolton and D. O. Hall. Photochemical conversion and storage of solar energy. *Ann. Rev. Energy*, 4:353–401, 1979.
- [13] M. Born and E. Wolf. *Principles of Optics*. Seventh Edition, Cambridge University Press, Cambridge, 1999.
- [14] G. Boyle. *Renewable Energy*. Second Edition, Oxford University Press, Oxford, UK, 2004.
- [15] C. J. Brabec, N. S. Sariciftci, and J. C. Hummelen. Plastic solar cells. *Advanced Functional Materials*, 11:15–26, 2001.
- [16] J. Britt and O. Ferekides. Thin-film CdS/CdTe solar cell with 15.8% efficiency. *Applied Physics Letters*, 62:2851–2852, 1993.
- [17] K. Butti and J. Perlin. *A Golden Thread*. Marion Boyers, London Boston, 1980.
- [18] C. J. Chen. *Introduction to Scanning Tunneling Microscopy*. Oxford University Press, Oxford, UK, 2007.
- [19] K. L. Chopra, P. D. Paulson, and V. Dutta. Thin-film solar cells: an overview. *Progress in Photovoltaics*, 12:69–92, 2004.
- [20] C. Darwin. *On the Origin of Species*. Oxford University Press, Oxford, 1859.
- [21] K. S. Deffeyes. *Beyond Oil*. Hill and Wang, New York, 2005.
- [22] P. A. M. Dirac. The Quantum Theory of the Emission and Absorption of Radiation. *Proc. R. Soc. London*, A114: 243–265, 1927.
- [23] A. Duffie and W. A. Beckman. *Solar Energy Thermal Processes*. John Wiley and Sons, New York, 1974.
- [24] A. Duffie and W. A. Beckman. *Solar Engineering of Thermal Processes*. Third edition, John Wiley and Sons, Hoboken, NJ, 2006.
- [25] US DoE EERE. *National Algal Biofuels Technology Roadmap*. US Department of Energy, 2010.

- [26] A. Einstein. Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig? *Annalen der Physik*, 18:639–641, 1905.
- [27] A. Einstein. Über einen die Erzeugung und Verwandung des Lichts betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. *Annalen der Physik*, 17:132–148, 1905.
- [28] M. M. Farid, A. M. Khudhair, and S. A. K. Razack S. Al-Hallaj.
- [29] E. Fermi. *Nuclear Physics*. U. of Chicago Press, Chicago, 1950.
- [30] K. Garber. Steven Chu, Obama's Point Man on Energy, Says Conservation Is 'Sexy'. *U.S. News and World Report*, March 2009, 2009.
- [31] H. P. Garg, S. C. Mullik, and A. K. Bhargava. *Solar Thermal Energy Storage*. D. Reider Publishing Company, Dordricht, 1985.
- [32] M. Grätzel. Photoelectrochemical cells. *Nature*, 414: 338–344, 2001.
- [33] M. Grätzel. Dye-sensitized solar cells. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 4: 145–153, 2003.
- [34] M. A. Green. *Solar cells*. Prentice-Hal, Englewood Cliffs, NJ, 1982.
- [35] M. A. Green. Limits on the open-circuit voltage and efficiency of silicon solar cells imposed by intrinsic auger processes. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 31:671–678, 1996.
- [36] M. A. Green, J. Zhao, A. Wang, and S. R. Wenham. Progress and outlook for high-efficiency crystalline silicon solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 65: 9–16, 2001.
- [37] W. Heitler. *The Quantum Theory of Radiation*. Clarendon Press, Oxford, 1954.
- [38] P. Heremans, D. Cheyns, and B. P. Rand. Strategies for increasing the efficiency of heterojunction organic photovoltaic cells: Material selection and device architecture. *Accounts of Chemical research*, 42:1740–1747, 2009.

- [39] H. C. Hottel and A. Whillier. Evaluation of flat-plate solar collector performance. *Transcation of Conference on the Use of Solar Energy*, II: 74–104, 1958.
- [40] M. K. Hubbert. Nuclear Energy and the Fossil Fuels. *Shell Development Company Publications*, 95:1–40, 1956.
- [41] C. E. Kennedy. Reiew of mid- to high-temperature absorber materials. *National Renewable Energy Laboratory report*, 520:31267, 2002.
- [42] C. E. Kennedy and H. Price. Progress in development of high-temperature solar-selective coating. *Proceedings of ISEC 2005*, 520:36997, 2005.
- [43] R. R. King, D. C. Law, K. M. Edmondson, C. M. Fetzer, G. S. Kinsey, H. Yoon, R. A. Sherif, and N. H. Karam. 40% efficient metamorphic GaInP/GaInAs/Ge multijunction solar cells. *Appl. Phys. Lett.*, 90:183516, 2007.
- [44] S. A. Klein. Calculation of flat-plate collector loss coefficients. *Solar Energy*, 17:79–80, 1975.
- [45] S. A. Klein. Why wind power works for Denmark. *Proc. ICE Civil Engineering.*, 2005.
- [46] S. A. Klein, W. A. Beckman, and A. Duffie. A design procedure for solar heating systems. *Solar Energy*, 18:113–127, 1975.
- [47] M. M. Koltun. *Selective optical surfaces for solar energy converters*. Allerton Press, Inc. New York, 1981.
- [48] Sandia National Laboratory. Sandia, Stirling Energy Systems set new world record for solar-to-grid conversion efficiency. *News Release*, February 12, 2008.
- [49] A. D. Leite. *Energy in Brazil*. Earthscan, London, 2009.
- [50] P. Lenard. Über die lichtelektrische Wirkung. *Annalen der Physik*, 8:149–170, 1902.

- [51] D. Linden and T. B. Reddy. *Handbook of Batteries*. Third Edition, McGraw-Hill, New York, 2002.
- [52] B. Y. H. Liu and R. C. Jordan. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse, and total solar radiation. *Solar Energy*, 4(3): 1–19, 1960.
- [53] J. Lund, B. Sanner, L. Rybach, R. Curtis, and G. Hellstrom. Geothermal (ground-source) heat pumps: a world overview. *GHC Bullitin*, September: 31267, 2004.
- [54] P. J. Lunde. *Solar Thermal Engineering*. John Wiley and Sons, New York, 1980.
- [55] C. Lyell. *Elements of Geology*. C. H. Key & Co., Pittzburgh, 1839.
- [56] D. J. C. MacKay. *Sustainable Energy—Without Hot Air*. UIT, Cambridge, England, 2008.
- [57] H. A. Macleod. *Thin Film Optical Filters*. American Elsevier Publishing Company, Inc., New York, 2005.
- [58] J. C. Maxwell. *A Dynamic Theory of the Electromagnetic Field*. Reprinted by Wipf and Stock Publishers, 1996, 1864.
- [59] McKinsey & Company. China's Green Revolution. *McKinsey Global Energy and Materials*, July 2009:1–136.
- [60] McKinsey & Company. Unlocking Energy Efficiency in the U.S. Economy. *McKinsey Global Energy and Materials*, July 2009:1–144.
- [61] R. A. Millikan. A Direct Photoelectric Determination of Planck's h. *Physical Review*, 7:355–388, 1916.
- [62] R. A. Millikan and I. B. Cohen. *Autobiography of Robert A. Millikan*. Arno Press, New York, 1980.
- [63] D. Moché. *Astronomy*. 7th Ed, John Wiley and Sons, Hoboken, 2009.
- [64] B. O'Regan and M. Grätzel. A low-cost, high-efficiency solar cell based on dyesensitized colloidal TiO₂ films. *Nature*, 353:737–740, 1991.

- [65] J. I. Pankove. *Optical processes in semiconductors*. Cover Publications, Inc. New York, 1971.
- [66] J. P. Peixoto and A. H. Oort. *Physics of Climate*. Third Edition, John Wiley and Sons, New York, 1992.
- [67] J. Perlin. *From Space to Earth*. Aatec Publications, Ann Arbor, Michigan, 1999.
- [68] J. H. Phillips. *Guide to the Sun*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1992.
- [69] M. Powalla and D. Bonnet. Thin-film solar cells based on polycrystalline compound semiconductors CIS and CdTe. *Advances in Optoelectronics*, 2007:97545, 2007.
- [70] Jr. R. W. Bliss. The derivations of several plate efficiency factors in the design of flat-plate solar collectors. *Solar Energy*, 3:55–64, 1959.
- [71] J. Risen. U. S. Identifies Vast Riches of Minerals in Afghanistan. *New York Times*, June 13, 2010.
- [72] H. H. Rogner. *World Energy Assessment: Energy and the Challenge of Sustainability*. United Nations Development Programme, 2000.
- [73] M. Romero, R. Buck, and J. E. Pacheco. Water-in-glass evacuated tube solar water heaters. *Journal of Solar Energy Engineering*, 124:98–108, 2002.
- [74] J. J. Romm. *The Hype about Hydrogen: Fact and Fiction in the Race to Save the Climate*. Island Press, New York, 2005.
- [75] H. J. Sauer and R. H. Howell. *Heat Pump Systems*. John Wiley and Sons, New York, 1983.
- [76] J. L. Shay and S. Wagner. Efficient CuInSe₂/CdS solar cells. *App. Phys. Lett.*, 27:89–90, 2007.
- [77] W. Shockley and H. J. Queisser. Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells. *Journal of Applied Physics*, 32:510–519, 1961.

- [78] B. J. Stanbery. Copper indium selenides and related materials for photovoltaic devices. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 27:73–117, 2002.
- [79] M. Stix. *The Sun, an Introduction*. Second Edition, Springer, New York, 2002.
- [80] C. W. Tang. Two-layer organic photovoltaic cell. *Appl. Phys. Lett.*, 48:183–185, 2004.
- [81] W. Thompson. On the Age of Sun's Heat. *Macmillan's Magazine*, 5:388–393, 1862.
- [82] W. Thompson. Nineteenth Century Clouds over the Dynamical Theory of Heat and Light. *Royal Institution Proceedings*, 16:363–397, 1900.
- [83] T. Tiedje, E. Yablonovitch, G. D. Cody, and B. G. Brooks. Limiting efficiency of silicon solar cells. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 31:711–716, 1996.
- [84] D. Ugolini, J. Zachary, and J. Park. Options for hybrid solar and conventional fossil plants. *Bechtel Technology Journal*, 2:1–11, 2009.
- [85] P.-F. Verhulst. Notice sur la loi que la population poursuit dans son accroissement. *Correspondance mathematique et physique*, 10:113–121, 1838.
- [86] D. Voet and J. D. Voet. *Biochemistry*. John Wiley and Sons, Hoboken, NJ, 2004.
- [87] S. Wagner, L. J. Shay, P. Migliorato, and H. M. Kasper. CuInSe₂/CdS heterojunction photovoltaic detectors. *Applied Physics Letters*, 25: 434–435, 1974.
- [88] Renewable Energy World. Global concentrated solar power industry to reach 25 gw in 2020. *REW*, 2009.
- [89] Q. C. Zhang. Recent progress in high-temperature solar-selective coatings. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 62:63–74, 2000.

- [90] Q. C. Zhang, Y. Yin, and D. R. Mills. High-efficiency $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ cermet selective surfaces for high-temperature application. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 40:43–53, 1996.
- [91] J. Zhao, A. Wang, P. P. Altermatt, S. R. Wenham, and M. A. Green. 24% efficient perovskite silicon solar cell: Recent improvements in high-efficiency silicon solar cell research. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 41–42:87–99, 1996.

معرض الصور والأشكال

الإشعاع الشمسي

- شكل ١: الطيف الشمسي.
- شكل ٢: الحركة الظاهرية للشمس.
- شكل ٣: التشميس في العالم.
- شكل ٤: التشميس في الولايات المتحدة الأمريكية.
- شكل ٥: التشميس في أوروبا.

الخلايا الكهروضوئية الشمسية

- شكل ٦: خلايا شمسية مصنوعة من السيليكون البلوري ذات آلية تتبع أحادية المحور.
- شكل ٧: خلايا شمسية ذات أفلام رقيقة مصنوعة من سيلينيد جاليوم إنديوم النحاس.
- شكل ٨: كفاءة الخلايا الشمسية.

مشروعات الكهرباء الحرارية الشمسية

- شكل ٩: النظام الشمسي الطبقي المزود بمحرك ستيرلنج.
- شكل ١٠: تركيب مجمع شمسي ذي حوض قطع مكافئ.
- شكل ١١: مركبات ذات حوض قطع مكافئ في كرامر جنكشن، كاليفورنيا.

التطبيقات الحرارية الشمسية

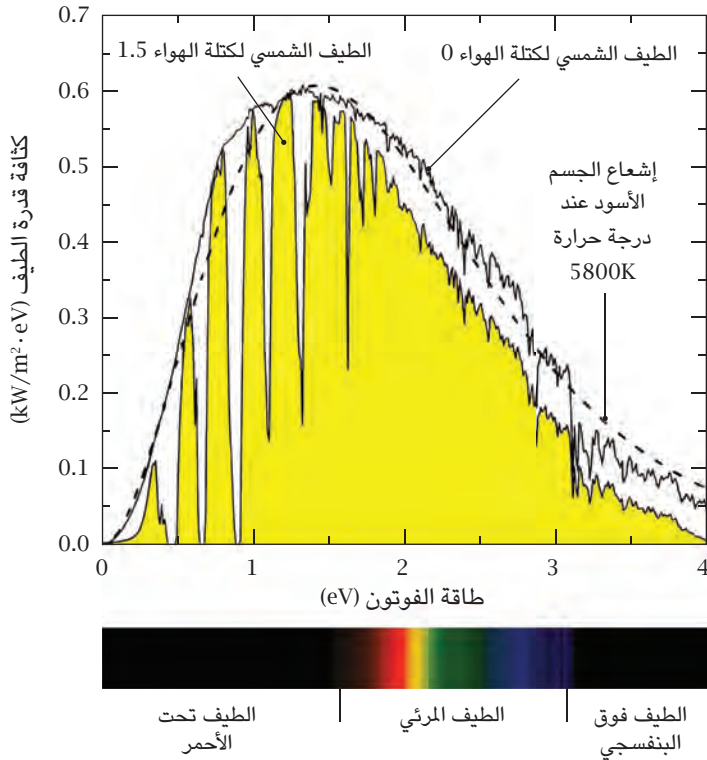
- شكل ١٢: أنواع مختلفة للمجمعات الحرارية الشمسية ذات الأنابيب المفرغة.
- شكل ١٣: مصنع أوتوماتيكي بالكامل لتصنيع الأنابيب المفرغة.
- شكل ١٤: سخانات ماء شمسية بعد 80 عامًا من العمل.

البناء والطاقة الشمسية

- شكل ١٥: مبنى مقام وفقًا لمقتضيات الطاقة الشمسية.
- شكل ١٦: منزل تجريبي مقام وفقًا لمقتضيات الطاقة الشمسية.

تكلفة الطاقة غير المتجددة

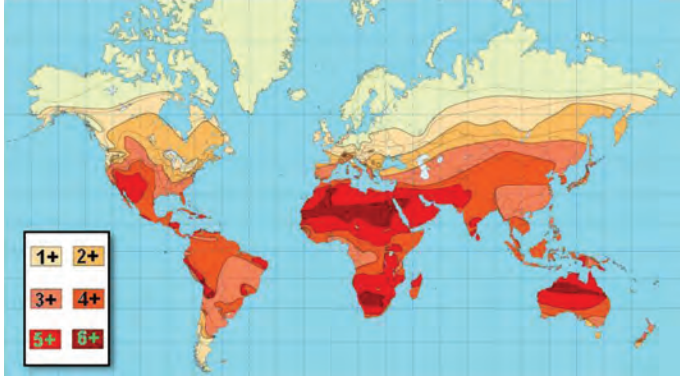
- شكل ١٧: انفجار منصة الحفر ديب ووتر هورايزن.
- شكل ١٨: تشرنوبل: بعد ربع قرن.



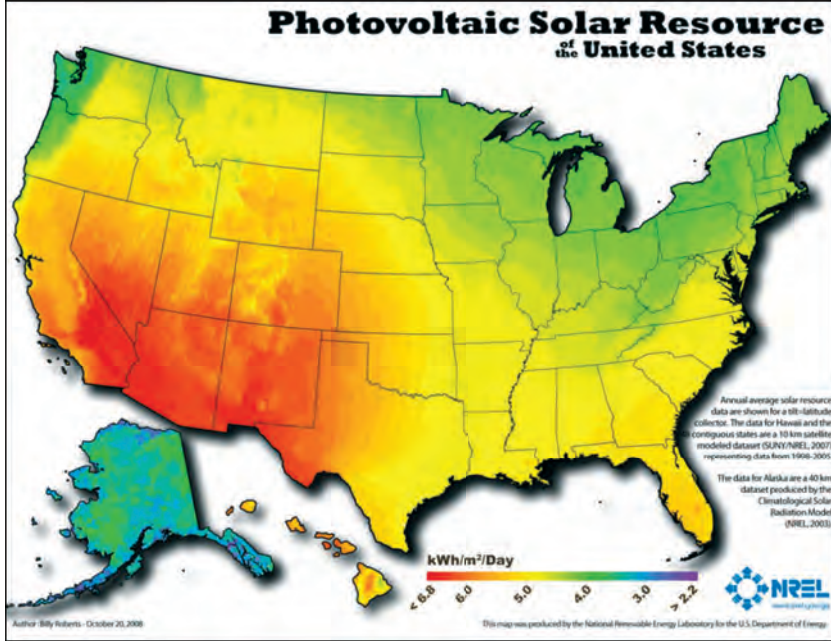
شكل ١: كثافة قدرة الطيف للإشعاع الشمسي: المنحنى العلوي: الطيف الشمسي خارج الغلاف الجوي مباشرة. يساوي إجمالي القدرة 1.366 kW/m^2 . المنحنى المعبأ باللون الأصفر: الطيف الشمسي المعياري على سطح الأرض، المُستخدَم لتقييم أداء الخلايا الشمسية. تعني كثافة الهواء 1.5 كثافة الهواء عند زاوية تصل إلى نحو 37 درجة من الخط الأفقي في يوم صافٍ. وإجمالي كثافة القدرة تساوي 1.0 kW/m^2 . انظر الفصل الخامس للحصول على التفاصيل. والمنحنى المتقطع يمثل طيف الإشعاع الشمسي في موقع الأرض باعتبار الشمس مشعاً أسود بدرجة حرارة 5800K. كما هو واضح، يتطابق الطيف الشمسي خارج الغلاف الجوي مباشرة، طيف كثافة الهواء صفر، مع طيف إشعاع الجسم الأسود عند درجة حرارة 5800K، الذي تخففه المسافة التي بين الشمس والأرض. وتظهر علاقة ذلك برؤية الإنسان للطيف اللوني في الشريط السفلي. كما هو واضح، نحو نصف قدرة الإشعاع الشمسي يوجد في النطاق المرئي. انظر الفصل الثاني والثالث والخامس. (مصدر بيانات الطيف الشمسي: الجمعية الأمريكية للاختبار والمواد.)



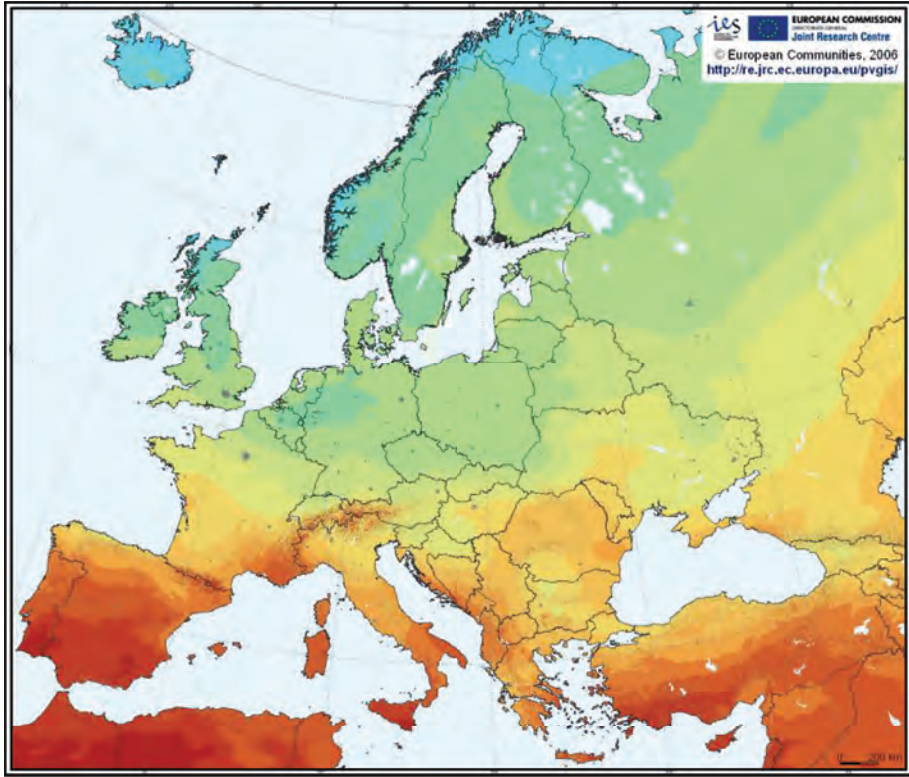
شكل ٢: الحركة الظاهرية للشمس: بتثبيت كاميرا باتجاه السماء الجنوبية (في نصف الكرة الشمالي)، وأخذ صورة واحدة في نفس الوقت كلَّ يومٍ لمدة عام، ثم تجميع صور الأيام المشمسة معًا، سيظهر نمط على شكل رقم 8، يُطلق عليه «مخطط الميل» أو «الأنالمة». وهو نتيجة مجمعة لمعادلة الوقت واختلاف الميل؛ ارجع إلى الفصل الرابع – قسم (٤). وملحق الصور الشكل ٢ جمعه الفلكي اليوناني أنتوني أيوماميتيس من 47 صورة فوتوغرافية لليوم الصافي مأخوذة في عام 2003 قرب معبد أبوللو، مدينة كورنث، اليونان. إن أبوللو هو إله الشمس في الأساطير الإغريقية، كما أنه إله النور والحقيقة والموسيقى والشعر والفنون. الصورة معروضة بإذن من أنتوني أيوماميتيس.



شكل ٣: خريطة التشميس الخاصة بالعالم. متوسط الإشعاع الشمسي اليومي على سطح قدره 1m^2 بـ kJ على مدار عام. كما هو واضح، مساحات كبيرة في شمال أفريقيا يوجد بها معدل التشميس الأعلى. المصدر: www.bpsolar.com.



شكل ٤: خريطة التشميس الخاصة بالولايات المتحدة الأمريكية: متوسط الإشعاع الشمسي اليومي على سطح قدره 1m^2 بـ kJ على مدار عام. كما هو واضح، مساحات كبيرة في الولايات الجنوبية الغربية يوجد بها معدل التشميس الأعلى. ويوجد بالمناطق المحيطة بالبحيرات الكبرى وولاية واشنطن تشميس ضعيف بسبب الغيوم. المصدر: المختبر الوطني للطاقة المتجددة.



متوسط التشميس السنوي (بالساعات) <600 800 1000 1200 1400 1600 1800 2000 2200>

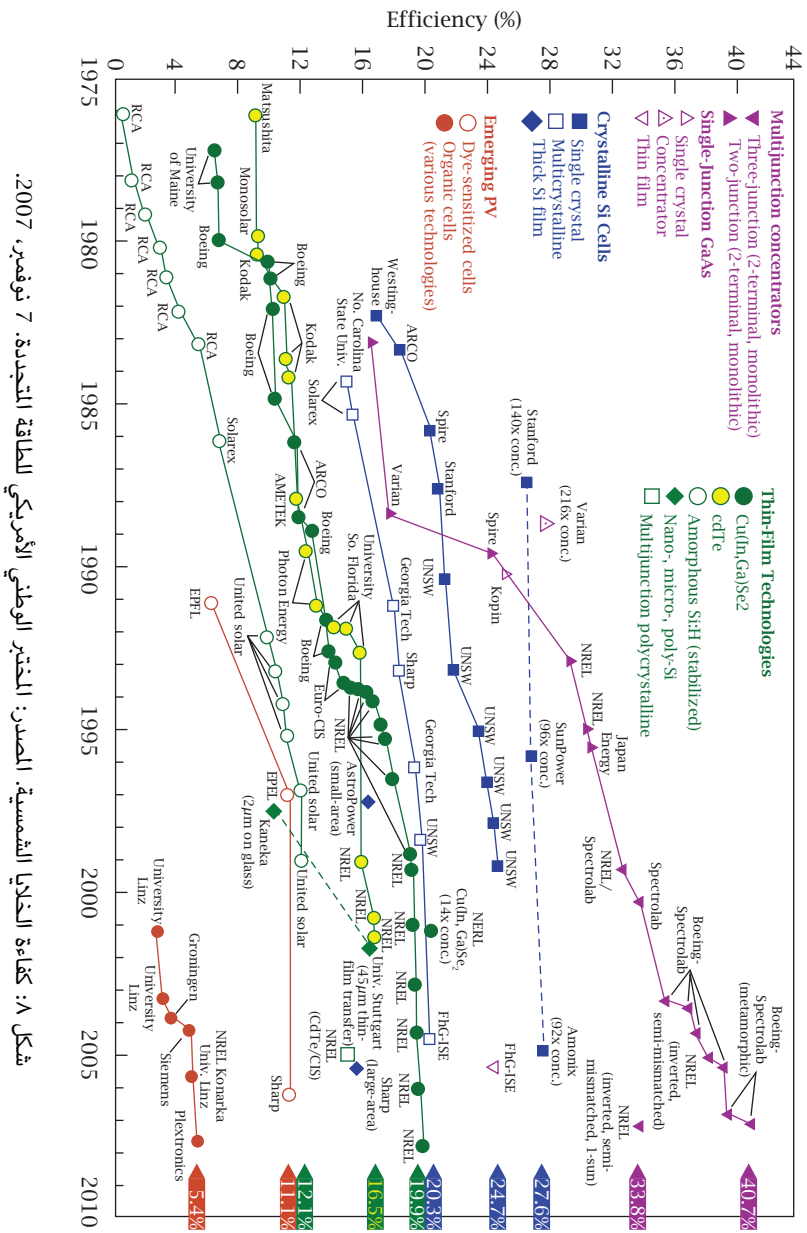
شكل ٥: خريطة التشميس الخاصة بأوروبا: الإشعاع الشمسي الإجمالي على سطح قدره $1m^2$ بـ kJ على مدار عام. لاحظ أن تعريف التشميس في هذه الخريطة مختلف عن الخريطين السابقتين. من الواضح أن معدل التشميس الإجمالي في سنة شمسية يساوي 365.25 مرة معدل التشميس اليومي المتوسط. كما هو واضح، معدل التشميس في الأجزاء الجنوبية من البرتغال وإسبانيا وإيطاليا هو الأعلى في أوروبا. ويكون التشميس في ألمانيا أضعف بكثير من تلك المناطق. ويكون معدل التشميس ضعيفاً جداً في الأجزاء الشمالية من النرويج وفنلندا. المصدر: مركز البحوث المشتركة التابع للمفوضية الأوروبية، 2006.



شكل ٦: خلايا شمسية مصنوعة من السيليكون البلوري ذات آلية تتبع أحادية المحور: محطة نيليس للطاقة الشمسية، الموجودة داخل قاعدة نيليس للقوات الجوية في مقاطعة كلارك، بنيفادا، سعتها 14MW تقريباً. ويمكن أن يزيد نظام تتبع شمسي أحادي المحور بسيط من قدرة الخرج بمقدار 60 بالمائة مقارنةً بنظام التوجيه الثابت القياسي؛ انظر الفصل الرابع - قسم (٣-٤). الصورة معروضة بإذن من القوات الجوية الأمريكية.



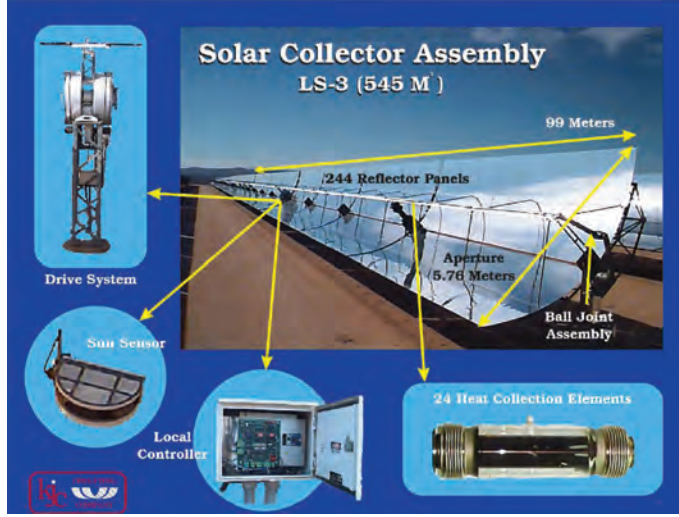
شكل ٧: حقل شمسي ذو سعة كبيرة مكون من خلايا شمسية ذات أفلام رقيقة مصنوعة من سيلينيد جاليوم إنديوم النحاس: تستخدم الخلايا الشمسية ذات الأفلام الرقيقة مواد شبه موصلة أرفع كثيراً من الخلايا الشمسية البلورية؛ ومن ثم يمكن أن تكون التكلفة لكل واط أقل بكثير. انظر الفصل التاسع - قسم (٦). يظهر هنا نظام ألواح شمسية مصنوعة من سيلينيد جاليوم إنديوم النحاس سعته 750KW. وهذا النظام موجود في توسان، أريزونا، ومن تصنيع شركة نانو سولر. الصورة معروضة بإذن من شركة نانو سولر المحدودة.



فيزياء الطاقة الشمسية



شكل ٩: النظام الشمسي الطبقي المزود بمحرك ستيرلنج: ضرب النظام الشمسي، المزود بمحرك ستيرلنج الذي طورته مختبرات سانديا الوطنية وشركة ستيرلنج لنظم الطاقة في فبراير عام 2008، رقمًا قياسيًّا بتحقيقه لأعلى كفاءة في تحويل الطاقة الشمسية إلى كهرباء موصلة بالشبكة وقدرها 31.25 بالمائة. ويولد الطبقة الشمسي الكهرباء بتركيز الإشعاع القادم من الشمس على جهاز استقبال ينقل الطاقة الحرارية إلى محرك ستيرلنج المملوء بالهيدروجين. ويعمل هذا المحرك على أفضل نحو في الطقس البارد ولكن المشمس. انظر الفصل الحادي عشر - قسم (٤). الصورة معروضة بإذن من مختبرات سانديا الوطنية.



شكل ١٠: تركيب مجمع شمسي ذي حوض قطع مكافئ: إن محور أحواض القطع المكافئ جنوبية-شمالية، وتحول آلية تتبع تلك الأحواض من الشرق للغرب يوميًا. ويُرَكِّز الإشعاع الشمسي على المجمعات الحرارية ذات الأنابيب المفرغة. وتُسخن المجمعات الزيت الاصطناعي لدرجة حرارة 400 درجة مئوية، مما يولد بخارًا فائق الحرارة لدفع التوربينات البخارية. وأعلى كفاءة سجلها هذا النظام هي 20 بالمائة. انظر الفصل الحادي عشر – قسم (٤).



شكل ١١: مركزات ذات حوض قطع مكافئ في كرامر جنكشن، كاليفورنيا: هذا النظام، الذي يُدعى «نظام توليد الكهرباء من الطاقة الشمسية» موجود في كرامر جنكشن بصحراء موهافي بكاليفورنيا، منذ عام 1984. وهو يُعد أكبر مولد للكهرباء من الشمس في العالم. وسعته الإجمالية 354MW. انظر الفصل الحادي عشر - قسم (٤).



شكل ١٢: أنواع مختلفة للمجمعات الحرارية الشمسية ذات الأنابيب المفرغة: حاليًا، تُعد المجمعات الحرارية الشمسية ذات الأنابيب المفرغة أكثر أنواع المجمعات الحرارية الشمسية استخدامًا. وهي تستخدم طلاءات انتقائية لتحقيق أقصى امتصاص لضوء الشمس، مع أقل فقد للحرارة عن طريق الإشعاع. ويُعد الفراغ بين الأنبوب الخارجي والعنصر المُسخن عازلًا حراريًا شبه مثالي. واعتمادًا على طريقة الانتقال الحراري المستخدمة، هناك عدة أنواع من هذه المجمعات. فتسمح المجمعات الحرارية المعتمدة على طريقة التدفق المباشر للماء بالتدفق عن طريق الحمل الحراري إلى الأنابيب. وتستخدم المجمعات الحرارية المعتمدة على طريقة الشعب الحراري آلية مبتكرة للتغير الطوري لنقل الحرارة بكفاءة عالية جدًا ومنعها من الرجوع ثانيةً إلى الأنبوب (تأثير الصمام الثنائي الحراري). انظر الفصل الحادي عشر – قسم (٢). تلك الصورة التقطها المؤلف وهي معروضة بإذن معهد أبحاث الطاقة الشمسية ببيكين.



شكل ١٣: مصنع أوتوماتيكي بالكامل لتصنيع الأنابيب المفرغة. الصورة العلوية: ماكينة تفريغ أوتوماتيكي. الصورة السفلية: خط نقل أوتوماتيكي. يُنتج هذا المصنع 20 مليون أنبوب مفرغ سنوياً. الصورتان معروضتان بإذن من مجموعة هيمن للطاقة الشمسية، ديزو، الصين.



شكل ١٤: سخانات ماء شمسية «داي أند نايت» مصنعة ومركبة في عشرينيات القرن العشرين في ميامي: يمكن أن تبقى سخانات الماء الشمسية (انظر الأقسام 1-5-1 و 11-2 و 11-3) لفترة طويلة جدًا. في عشرينيات القرن العشرين، رُكب نحو 40 ألف سخان من نوع «داي أند نايت» في فلوريدا. وبعد 80 عامًا من العمل في ظروف طقس شديدة، ما زال الآلاف منها يعمل على نحو جيد حتى اليوم. ويكمن السر في بساطة تصميمها والغياب الكامل للأجزاء المتحركة. هذه الصورة التقطها المؤلف في أغسطس عام 2010، ميامي.



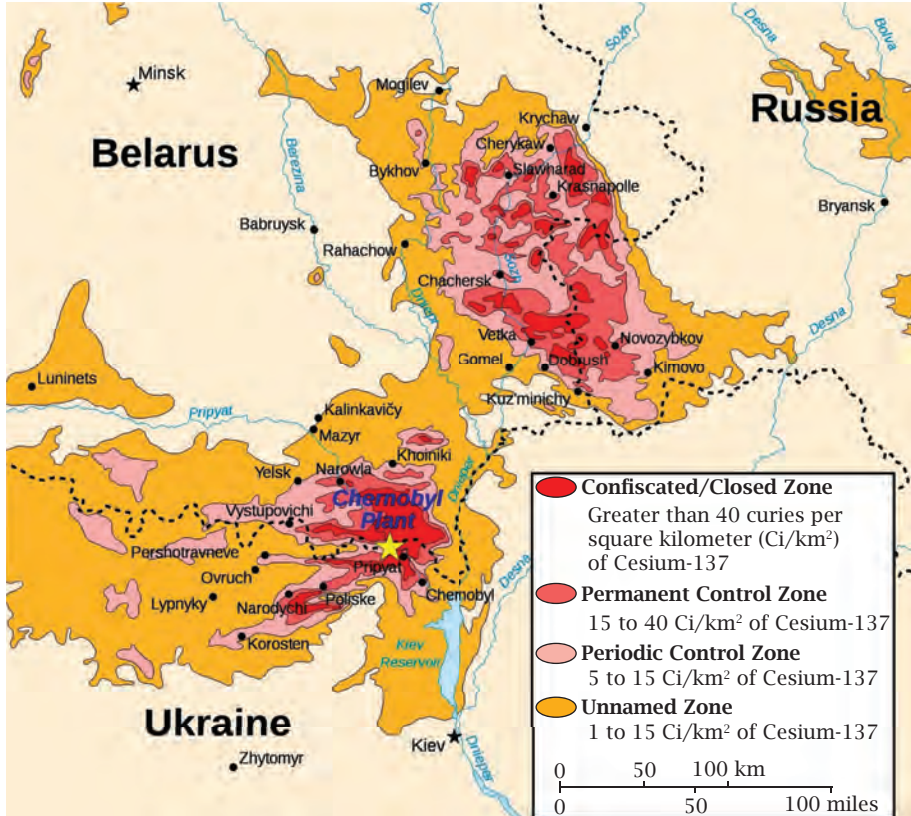
شكل ١٥: مبنى مقام وفقاً لمقتضيات الطاقة الشمسية: صُممت وبنت مجموعة هيمين للطاقة الشمسية هذا المبنى على مساحة 75000m^2 (800000ft^2) في ديزو، مقاطعة شاندونج، الصين، كمقر لمؤتمر المدينة الشمسية الدولية لعام 2010. وهو يحصل على أكثر من 60 بالمائة من طاقته من خلال الأجهزة الشمسية. الصورتان معروضتان بإذن من مجموعة هيمين للطاقة الشمسية، ديزو، الصين.



شكل ١٦: منزل تجريبي مقام وفقًا لمقتضيات الطاقة الشمسية: كما أكد ستيفين تشو، على نحو متكرر، أن تصميم المباني على نحو أفضل بحيث تستفيد من الطاقة الشمسية، مع بعض الاستثمار الإضافي، يمكنه تحقيق قدر هائل من التوفير في الطاقة. يظهر هنا منزل تجريبي لأسرة واحدة صممه المؤلف. إنه منزل متوسط الحجم على الطراز الاستعماري المشتغل على صالة كبيرة، وهو نمط بناء شائع في الولايات المتحدة. لكن التخطيط وتصميم السقف وأماكن النوافذ موضوعة بحيث تستفيد على نحو كبير من الطاقة الشمسية. ففي يوم مشمس في الشتاء، يدفئ ضوء الشمس الداخل عبر النوافذ الكبيرة المواجهة للجنوب كل الغرف التي غالبًا ما تكون مشغولة بحيث يجعل الثرموستات الخاص بالتدفئة بالغاز الطبيعي تقريبًا لا يعمل. وفي الصيف، تُغذي الألواح الشمسية الموجودة على السقف نظامين مركزيين لتكييف الهواء بالطاقة لتبريد المنزل بالكامل. وتقلل مروحة عليّة تعمل بالطاقة الشمسية (وهي موجودة بأعلى السقف، لكن لا تظهر هنا) أكثر حمل التبريد. كما أن الجدران معزولة جيدًا وكل النوافذ ثنائية اللوح ومحكمة السد ومملوءة بالآرجون. انظر الفصل الثالث عشر – قسم (٣). هذه الصورة التقطها المؤلف.



شكل ١٧: انفجار منصة الحفر ديب ووتر هورايزن: مع استنفاد حقول النفط الأرضية في الولايات المتحدة الأمريكية، يتجه استكشاف النفط إلى المياه العميقة. وتكلفة الحفر هناك تزيد على نحو هائل، كما أن التكلفة البيئية أكثر فداحة. وأحد الأمثلة على التكلفة الهندسية والبيئية هي تسرب النفط الذي حدث مؤخرًا في خليج المكسيك. ففي 20 أبريل من عام 2010، انفجرت منصة الحفر ديب ووتر هورايزن، الموجودة على بعد نحو 40 كيلومتر جنوب شرق ساحل ولاية لويزيانا في حقل النفط المحتمل مأكوندو، مما أسفر عن مقتل 11 عاملاً وجرح 17 آخرين. وتسبب الحادث في حرق وغرق المنصة. وتسرب ما يقرب من 4.9 ملايين برميل (780000m^3) من النفط الخام إلى ماء خليج المكسيك. وتُعد هذه الكارثة الآن أكبر كارثة بيئية في تاريخ الولايات المتحدة الأمريكية. وقد أضر تسرب النفط بشدة ببيئة خليج المكسيك وأثر على نحو كبير على الصيد والسياحة في الولايات الأمريكية المطلّة عليه. وقد كلف الحادث شركة بريتش بتروليوم ما يزيد عن 32 مليار دولار من أجل مواجهة التسرب. ولضمان سلامة استكشاف البترول في المياه العميقة، ستصبح التكلفة الهندسية عالية جدًا. هذه الصورة معروضة بإذن من حرس الشواطئ الأمريكي.



شكل ١٨: تشرنوبل: بعد ربع قرن. في 26 أبريل عام 1986، وبسبب عيوب تصميمية وأخطاء بشرية، انفجر المفاعل رقم 4 لمحطة تشرنوبل النووية الموجودة بالقرب من مدينة بريبيات، أوكرانيا، الاتحاد السوفيتي السابق. وانتشرت المادة المشعة عبر مساحة شاسعة من أوروبا. وبالقرب من المحطة، كان مستوى الإشعاع عاليًا جدًا لدرجة أنه كان يجب الهجر الكامل لمنطقة مساحتها 2800km² في بيلاروسيا وأوكرانيا وروسيا. وقد أضر الحادث بشدة الاقتصاد السوفيتي. وحتى وقت قريب، كان هذا الحادث هو الوحيد الذي في المستوى السابع (أي، حادث رئيسي) على المقياس الدولي للحوادث النووية، لكن في 11 مارس عام 2011، دمر تسونامي عدة مفاعلات نووية في محطة فوكوشيما دايتشي النووية في اليابان، مما أدى إلى تسرب كمية كبيرة من المواد المشعة. وفي 11 أبريل من العام نفسه، رفعت السلطات اليابانية مستوى الحادث للمستوى السابع، وتوقعت أن يقترب إجمالي الغبار الإشعاعي من ذلك الخاص بكارثة تشرنوبل أو حتى يزيد عنه. مصدر الخريطة: «كتاب حقائق العالم»، وكالة الاستخبارات الأمريكية.

