UPPSALA
UNIVERSITET

نظرية الإشعاع الشمسي

د/ خلف الله عمر قاسم

أستاذ مساعد بقسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة جنوب الوادي، قنا، جمهورية مصر العربية
أستاذ مشارك بقسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة الجوف، سكاكا، المملكة العربية السعودية

ترجمة:

Solar Radiation Theory
Joakim Widén and Joakim Munkhammar
Department of Civil and Industrial
Engineering
Uppsala University

Solar Radiation Theory, Uppsala University 2021.

Translation to Arabic by Dr. Khalafallah Omar Kassem 2021.

Copyright © Joakim Widén, Joakim Munkhammar, Khalafallah Omar Kassem 2021.

ISBN 978-91-506-2878-4

DOI 10.33063/diva-440408

URN <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:uu:diva-440408>

صورة الغلاف: الصفحة الأولى ل Opticae Thesaurus من عام 1572، والتي تُظهر السفن التي تم إحراقها بالنار بمساعدة المرايا المكافئة، وهو تطبيق مبكر للإشعاع الشمسي تنسبه الأسطورة إلى عالم الفلك والرياضيات اليوناني أرشميدس. تُظهر الصورة أيضاً ظواهر بصرية أخرى مثل قوس قزح والصور المشوهة بسبب الانكسار في الماء. (صورة من Wikimedia Commons, public domain)

راجع ونسق الترجمة د/ محمود شبير، جامعة أوبسالا، السويد.

المحتويات

7	تمهيد
9	1 المقدمة
11	2 إشعاع الجسم الأسود والشمس
11	2.1 مصدر الطاقة الشمسية
12	2.2 قانون بلانك للإشعاع
15	2.3 الثابت الشمسي
16	2.4 تصنيف الإشعاع
19	3 الإشعاع الشمسي المتاح على الأرض
19	3.1 التوهين الجوي
20	3.2 الكتلة الهوائية
21	3.3 مكونات الإشعاع الشمسي
23	3.4 التغيرات الزمنية والجغرافية في توافر الطاقة الشمسية
26	3.5 توازن طاقة الأرض
29	4 قياس كمية الطاقة الشمسية المتاحة على الأسطح المستوية
30	4.1 بيانات الإشعاع الشمسي المقاسة
32	4.2 التوقيت الشمسي

33	زوايا الشمس	4.3
35	الإشعاع خارج الغلاف الجوي	4.4
36	الإشعاع المباشر على الأسطح المائية	4.5
37	الإشعاع المشتت على الأسطح المائية	4.6
38	الإشعاع المنعكس من سطح الأرض	4.7
39	نموذج كامل للإشعاع على المستوى المائل	4.8
39	بعض الملاحظات حول ضبط اتجاه السطح	4.9

5 تدريبات 41

47	اشتقاق زوايا سقوط الإشعاع المباشر	أ
47	زاوية الذروة للشعاع الساقط	أ.1
49	زاوية السقوط على مستوى اختياري الاتجاه	أ.2

قائمة الرموز

الرمز	الوصف	القيمة	الوحدة
a	معامل أنجستروم الأول	--	--
A_i	مؤشر تبين الخواص	--	--
b	معامل أنجستروم الثاني	--	--
c	سرعة الضوء في الفراغ	2.998×10^8	ms^{-1}
d	اليوم في السنة	--	--
f_{view}	معامل الرؤية	--	--
G_0, G_{0n}	الإشعاع خارج الغلاف الجوي، عموديا وعلى مستوى أفقي	--	Wm^{-2}
G_b	الإشعاع الكلي للجسم الأسود	--	Wm^{-2}
$G_{b\lambda}$	توزيع الطول الموجي لإشعاع الجسم الأسود	--	$\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$
G_c	إشعاع السماء الصافية	--	Wm^{-2}
G_{sc}	الثابت الشمسي	1367	Wm^{-2}
h	ثابت بلانك	6.626×10^{-34}	Js
H	التشيع الكلي الشهري	--	kWhm^{-2}
H_c	التشيع الكلي الشهري للسماء الصافية	--	kWhm^{-2}
I_0	الإشعاع خارج الغلاف الجوي	--	Wm^{-2}
I_T, I	على مستوى أفقي خلال فترة زمنية الإشعاع الكلي على مستويات	--	Wm^{-2}
I_{bT}, I_b	أفقية ومائلة خلال فترة زمنية الإشعاع المباشر على أسطح أفقية ومائلة خلال فترة زمنية	--	Wm^{-2}

الرمز	الوصف	القيمة	الوحدة
I_{dT}, I_d	الإشعاع المشتت على أسطح أفقية ومائلة خلال فترة زمنية	--	Wm^{-2}
I_{gT}	الإشعاع المنعكس عن الأرض على مستوى مائل خلال فترة زمنية	--	Wm^{-2}
k	ثابت بولتزمان	1.380×10^{-23}	JK^{-1}
L_{loc}	خط الطول المحلي	--	°
L_{st}	خط الطول القياسي	--	°
m	الكتلة الهوائية	--	--
n	معامل الانكسار	--	--
R_b	عامل هندسي	--	--
S	جزء ساعات سطوع الشمس	--	--
t_s	التوقيت الشمسي	--	min
t_{st}	وقت الساعة القياسي	--	min
T	درجة الحرارة	--	K
β	زاوية الميل	--	°
δ	الميل الزاوي	--	°
γ	زاوية الرؤية (الاتجاه)	--	°
κ	مؤشر السماء الصافية	--	--
λ	الطول الموجي للإشعاع الكهرومغناطيسي	--	μm
ω	الزاوية الساعية	--	°
ϕ	خط العرض	--	°
$\Phi_{b\lambda}$	توزيع الطول الموجي للفوتونات	--	$s^{-1}m^{-2}\mu m^{-1}$
ρ_g	البيدو سطح الأرض	--	--
σ	ثابت ستيفان-بولتزمان	5.670×10^{-8}	$Wm^{-2}K^{-4}$
θ	زاوية السقوط على مستوى مائل	--	°
θ_z	زاوية الذروة	--	°

تمهيد

إن ارتباط موارد الطاقة الشمسية بالزمان والمكان يعد أحد التحديات في هندسة الطاقة الشمسية. كما تتمثل إحدى المهام الهندسية الكبرى في تصميم أنظمة طاقة شمسية قادرة على تجميع أكبر قدر ممكن من الإشعاع الشمسي في ظل هذه القيود. لذلك يقدم هذا الكتاب الخصائص الأساسية للإشعاع الشمسي المطلوبة لفهم كيفية تحويل الموارد الشمسية إلى حرارة مفيدة وطاقة كهربائية، وماهية تلك القيود. ويوضح الكتاب أيضاً كيفية نمذجة الإشعاع الشمسي على الأسطح المستوية رياضياً. يفيد هذا عند ضبط اتجاه الأسطح المجمعة والتنبؤ بأداء تصميمات مختلفة للنظام. يعتمد الكتاب على ملاحظات المحاضرات من مقررات الهندسة الشمسية في جامعة أوبسالا، والتي تم تحريرها بعناية لتناسب جمهوراً أوسع من العلماء والمهندسين. يتمتع المؤلفان معاً بأكثر من عقدين من الخبرة في التدريس والبحث والتطوير في مجال نمذجة الإشعاع الشمسي. يقدم الفصل الأول خلفية تاريخية قصيرة لاستخدام الإشعاع الشمسي. يستعرض الفصل الثاني أهم مفاهيم إشعاع الجسم الأسود والإشعاع الكهرومغناطيسي. يقدم الفصل 3 نظرة عامة على مدى توفر الموارد الشمسية على الأرض. يقدم الفصل 4 الإطار الرياضي لنمذجة توافر الطاقة الشمسية على الأسطح المستوية الموجهة بشكل اختياري، بناءً على القياسات في المستوى الأفقي. تم تضمين أسئلة المراجعة حول المحتوى وكذلك التمارين في الفصل 5. بالإضافة إلى ذلك، يُقدم في الملحق اشتقاق زوايا سقوط الإشعاع المباشر (لم يتم شرحه بشكل عام في المراجع المتاحة).

Uppsala, April 2019

Joakim Widén and Joakim Munkhammar

فصل 1

المقدمة

لقد لعبت الشمس دوراً هاماً في الثقافات البشرية عبر التاريخ. حيث تقدم المصادر الأثرية وكذلك السجلات الفلكية المبكرة في حضارات بلاد ما بين النهرين لمحات من عبادة الشمس في مجتمعات ما قبل التاريخ. إن وفرة طاقة الشمس واستمرارها عبر المواسم قد رسم بشكل طبيعي حدود الحياة البشرية والازدهار والنمو المجتمعي، متحكمة بذلك في دورة الفصول وعجلة السنة في المجتمعات الزراعية. ومع ذلك، فإن الاستخدام المباشر للإشعاع الشمسي لأغراض محددة مثل التدفئة وتوفير الطاقة، كان ظهوره متأخراً نسبياً في التاريخ. كان الإغريق على دراية بالظواهر البصرية المختلفة، ويقال أن أرشميدس قد استخدم مرايا على شكل قطع مكافئ، ربما دروع برونزية أو نحاسية مصقولة للغاية، لاشعال النار في سفن العدو الروماني خارج سيراكيوز Syracuse عام 212 قبل الميلاد،¹ لكن الاستخدام التطبيقي الأكثر للطاقة الشمسية جاء مع الثورة العلمية [ص. 386، 1].

بدءاً من القرن السابع عشر، تم إجراء محاولات ليس فقط لتركيز ضوء الشمس ولكن أيضاً لجعله يؤدي أعمالاً ميكانيكية. في بداية القرن، قام الفيزيائي الفرنسي سالومون دي كو Salomon de Caus ببناء النموذج الأول لمحرك بخاري يعمل بالطاقة الشمسية باستخدام عدسات مركزة. ومع ذلك، تم وصف هذه الأجهزة بشكل أكثر دقة على أنها ألعاب من كونها آلات للاستخدام. في عام 1861، تمكن أوغسطين موشو Augustin Mouchot، مدرس رياضيات فرنسي، من إنتاج ما يكفي من البخار لقيادة محرك صغير. بعد سنوات من البحث والتطوير نجح في إنتاج محرك كبير بما يكفي لتشغيل مطبعة، الذي قدم للعالم في المعرض العالمي في باريس عام 1878. على الرغم من

¹ في القرن الثامن عشر، حاول عالم الطبيعة الفرنسي جورج بوفون إعادة بناء أسطورة أرشميدس، ويبدو أنه تمكن من إشعال النار في منزل قديم باستخدام حوالي 150 مرآة على مسافة 60 متراً. تم إجراء عمليات إعادة للتجربة أكثر حداثة في كل من عامي 1992 و 2005، وخلصنا إلى أن فعالية تكتيك المرأة كانت ستكون طفيفة من حيث القوة البشرية وإلحاق الضرر [1].

استغرق مائة عام أخرى لاستخدام الطاقة الشمسية على نطاق واسع، فإن تكنولوجيا إنتاج الأعمال الميكانيكية بمساعدة الشمس كانت متواجدة [ص. 389, 1].

لقد كانت تقنيات توليد الطاقة الكهروشمسية أيضاً متواجدة، بإضافة مولد لمحرك موشو Mouchot. في الواقع، تم إنشاء أول محطة للطاقة الشمسية في مصر عام 1912. ولكن بعد الحرب العالمية الأولى، وفر النفط والفحم وسائل أكثر تنافسية لإنتاج الطاقة الكهربائية. بدلاً من ذلك، كانت هناك تقنية مختلفة تماماً لاستخدام الإشعاع الشمسي على نطاق واسع. بعد فترة وجيزة من اختراع الخلايا الشمسية السيليكونية في مختبرات بل Bell في الولايات المتحدة، تم إنتاج الألواح الكهروضوئية التجارية الأولى (PV)، المسماة "البطاريات الشمسية"، في الخمسينات [ص. 392-394, 1]. وسرعان ما وجدت الأجهزة استخدامها في منتجات مختلفة، تتراوح من حاسبات الجيب إلى الأقمار الصناعية، ولكن بعد إدخال أنظمة الدعم الضخمة في ألمانيا واليابان في التسعينيات، بدأ استخدام الأنظمة الكهروضوئية المركبة على أسطح المنازل والمتصلة بشبكة الكهرباء على نطاق واسع. توسعت الأسواق، وانخفضت الأسعار تدريجياً وبدأت الطاقة الشمسية تشق طريقها إلى أنظمة الطاقة.

بالنسبة لجميع هذه الأجهزة التي تعمل بالطاقة الشمسية، تحدد خصائص الإشعاع الشمسي القيود التشغيلية. في الفصول التالية، سنقدم لك فهماً للنظرية الأساسية للإشعاع الشمسي وكيفية استخدامها لقياس الطاقة الشمسية على أي جهاز، سواء كانت مرآة برونزية مصقولة أو محطة طاقة شمسية كبيرة.

فصل 2

إشعاع الجسم الأسود والشمس

يستعرض هذا الفصل أسس الإشعاع الكهرومغناطيسي وإشعاع الجسم الأسود المطلوبة لفهم طبيعة الشمس والإشعاع الشمسي الذي يصل إلى الأرض. كما يتم تحديد بعض المفاهيم الهامة والمفيدة في التطبيقات العملية للإشعاع الشمسي.

2.1 مصدر الطاقة الشمسية

الشمس، أقرب نجم لدينا، هي جسم كروي ذاتي الجاذبية يتكون بشكل أساسي من الهيدروجين. يقع في مركز النظام الشمسي، على مسافة متوسطة حوالي 1.5×10^{11} متراً من الأرض. في النواة الداخلية للشمس، تخلق قوة الجاذبية ضغطاً يولد اندماجاً نووياً يحول الهيدروجين إلى هيليوم. في هذه العملية يتم تحويل جزء من الكتلة إلى كمية وفيرة من الإشعاع الكهرومغناطيسي، الذي يجعل الشمس المصدر الدائم للطاقة الإشعاعية في النظام الشمسي. للشمس بنية فيزيائية معقدة وتتكون من عدة مناطق، من النواة الداخلية الكثيفة إلى طبقة الغلاف الجوي الخارجي إلى الهالة. كل من الهالة والقلب ساخنان للغاية، في حدود $10^6 - 10^7$ كلفن، بينما تكون المناطق المتوسطة التي تنقل الطاقة وتبعثها كإشعاع صادراً أكثر برودة (على الرغم من كونها ساخنة بالمعايير الأرضية).

يتم نقل الطاقة من تفاعلات الاندماج داخل الشمس من خلال توالي عمليات الحمل الحراري والإشعاع والامتصاص والانبعاث وإعادة الإشعاع إلى ما يعادل سطح الشمس، وهو الغلاف الضوئي أو الفوتوسفير، الذي يمتص ويشع طيفاً مستمراً من الإشعاع. الغلاف الضوئي هو مصدر معظم الإشعاع المرئي الذي يصل إلى الأرض. له درجة حرارة سطحية، أو، بشكل أكثر دقة،

درجة حرارة جسم أسود فعالة تبلغ 5777 كلفن (وهي درجة حرارة الجسم الأسود الذي يشع نفس القدر من الطاقة مثل الشمس). على الرغم من أنها تتكون من عدة طبقات امتصاص وانبعاث ولها تدرج كبير في درجة الحرارة عبر نصف قطرها، تشبه الشمس إلى حد كبير الجسم الأسود المثالي. وسيتم استكشاف خصائصها في الجزء التالي.

2.2 قانون بلانك للإشعاع

من أجل فهم خصائص الإشعاع الشمسي الذي يصل إلى الأرض، من المفيد مراجعة بعض مفاهيم الإشعاع الكهرومغناطيسي وخصائص الأجسام السوداء. يمكن اعتبار الإشعاع الكهرومغناطيسي كموجة تتميز بطول موجي λ . ينتقل كل الإشعاع الكهرومغناطيسي بسرعة الضوء $c = 2.998 \times 10^8$ (m/s) في الفراغ (أو c/n في مادة لها معامل انكسار n) وله تردد ν حيث $c = \lambda\nu$. باستخدام ميكانيكا الكم، يمكن كذلك اعتبار الإشعاع الكهرومغناطيسي سيل من الفوتونات، حيث تعتمد طاقة كل فوتون على التردد. في الإشعاع الكهرومغناطيسي يمتلك الفوتون ذو الطول الموجي المحدد λ طاقة

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.1)$$

حيث أن h هو ثابت بلانك (6.626×10^{-34} Js). يتم توزيع الإشعاع المنبعث من جسم ساخن مثل الشمس، أو ما يشبهها، على نطاق من الأطوال الموجية، وبالتالي، يتكون من تدفق من الفوتونات ذات محتوى طاقة مختلف. يعتمد كل من توزيع الطاقة المشعة على الأطوال الموجية وإجمالي الطاقة على درجة حرارة الجسم. يمكن تقريب ذلك بجسم أسود، وهو حالة مثالية لجسم ما في توازن ديناميكي حراري، حيث يكون الجسم ممتصاً وباعثاً للإشعاع بشكل مثالي. أي أنه يمتص كل الإشعاع الساقط عليه ويصدر أكبر قدر ممكن من الإشعاع. استناداً إلى ميكانيكا الكم والديناميكا الحرارية، يمكن وصف الجسم الأسود بواسطة قانون بلانك للإشعاع، حيث يُعطي توزيع الطول الموجي للإشعاع المنبعث من جسم أسود له درجة حرارة T بواسطة

$$G_{b\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)} \quad (2.2)$$

حيث أن k هو ثابت بولتزمان ($1.380 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$). غالباً ما تعطى $G_{b\lambda}$ بوحدة $\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$. ويمكننا كذلك التعبير عن هذا التوزيع بدلالة تدفق الفوتونات بقسمة الطاقة المنبعثة عند كل طول موجي على طاقة الفوتون المقابلة

$$\Phi_{b\lambda} = \frac{\lambda}{hc} G_{b\lambda} \quad (2.3)$$

بوحدة $\text{s}^{-1}\text{m}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$. بتفاضل التوزيع في المعادلة 2.2 بالنسبة إلى الطول الموجي والمساواة بالصفر، يمكن تحديد الطول الموجي المقابل لقمة التوزيع. العلاقة بين هذا الطول الموجي ودرجة حرارة الجسم الأسود هي

$$\lambda_{\max} T = 2897.8 \mu\text{mK} \quad (2.4)$$

والذي يعرف بقانون وين للإزاحة *Wien's displacement law* وينص على أن الطول الموجي المقابل للقمة يتناسب عكسياً مع درجة الحرارة. ويمكن الحصول على علاقة أخرى مفيدة عن طريق تكامل قانون بلانك على كل الأطوال الموجية، وهي قانون ستيفان-بولتزمان. تعبر تلك العلاقة عن الطاقة الكلية المنبعثة من الجسم الأسود:

$$G_b = \int_0^{\infty} G_{b\lambda} d\lambda = \sigma T^4 \quad (2.5)$$

حيث أن σ هي ثابت ستيفان-بولتزمان ($5.670 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$)، ويكون G_b بوحدة Wm^{-2} . لاحظ أن هذه هي الوحدة المستخدمة غالباً للإشعاع الشمسي الساقط. تخبرنا المعادلتان الأخيرتان أمراً أساسياً ومألوفاً عن الأجسام الساخنة: يبين قانون ستيفان-بولتزمان أن الطاقة الكلية المنبعثة تزداد مع درجة حرارة الجسم ويبين قانون وين للإزاحة أن الطول الموجي المقابل للقمة يقل مع زيادة درجة الحرارة، والذي، على سبيل المثال، يجعل المعادن تتوهج بشكل أكثر سطوعاً كلما ارتفعت درجة حرارتها. تتضح هاتين الخاصيتين لإشعاع الجسم الأسود في الشكلين 2.1 أ و 2.1 ب. حيث يوضح الشكلان التوزيع الطيفي للإشعاع الحراري من جسم أسود حرارته 6000 K (درجة حرارة سطح الشمس تقريباً). بافتراض أن الشمس هي جسم أسود حقيقي فإن هذا هو ما نتوقع أن يبدو عليه توزيع الإشعاع. كذلك توضح الأشكال منحنيات إشعاع الجسم الأسود عند درجات حرارة أقل. يبين شكل 2.1 ب (لاحظ التدرج على محور y) بوضوح الفرق بين إشعاع جسم أسود عند درجة حرارة 6000 K وآخر عند 400 K (127°C)، والتي تكون قريبة من درجات الحرارة التي نواجهها في بيئتنا اليومية.

شكل 2.1: توزيعات الطول الموجي للإشعاع الكهرومغناطيسي من أجسام سوداء عند درجات حرارة مختلفة. حددت من المعادلة 2.2، لاحظ التدرج اللوغارتمي للمحور الرأسي في (ب).

2.3 الثابت الشمسي

دعونا ننتقل الآن إلى الإشعاع الشمسي الفعلي الذي يصل إلى الغلاف الجوي للأرض. ما مقدار الإشعاع الموجود وكيف يتم توزيعه على الأطوال الموجية؟ في البداية، نلاحظ أن مستويات الإشعاع الشمسي في النظام الشمسي تقل مع مربع المسافة إلى الشمس. للتحقق من ذلك، افترض أن نصف قطر الشمس هو r وأن درجة حرارة سطحها هو T . وبالتالي تكون مساحة سطح الشمس $4\pi r^2$ ويكون التدفق الإشعاعي الكلي من الشمس، باستخدام معادلة ستيفان-بولتزمان، $\sigma T^4 \times 4\pi r^2$. الآن، سوف يستقبل سطح كرة تخيلية أكبر لها نصف قطر l وتوجد الشمس في مركزها نفس القدر من الإشعاع، لكن على مساحة أكبر $4\pi l^2$. وبالتالي يكون تدفق الطاقة لوحدة المساحات على مسافة l من الشمس هو

$$G_l = \frac{\sigma T^4 \times 4\pi r^2}{4\pi l^2} = \sigma T^4 \left(\frac{r}{l}\right)^2. \quad (2.6)$$

إذا استخدمت درجة حرارة الجسم الأسود للشمس (5777 K)، نصف قطر الشمس (6.957×10^8 m)، والمسافة بين الشمس والأرض (1.495×10^{11} m)، فسوف تحصل على متوسط التدفق الإشعاعي خارج الغلاف الجوي، لوحدة المساحات المواجهة للشمس: 1367 W/m^2 . سوف يرمز إليها G_{sc} ويسمى بالثابت الشمسي، أو إشعاع الكتلة الهوائية الصفرية (AM0). لم يتم قياس G_{sc} عملياً بهذه الطريقة لكن بالعكس، فقد تم استنتاج درجة حرارة سطح الشمس بقياسات G_{sc} على الأرض باستخدام حل المعادلة 2.6 لجسم أسود حرارته T . تحسن تقدير G_{sc} تدريجياً بقياسات الإشعاع خارج الغلاف الجوي باستخدام الطائرات والبالونات والمركبات الفضائية. القيمة 1367 W/m^2 تم تبنيها من قبل المركز العالمي للإشعاع (WRC)، وتستخدم غالباً في مراجع الهندسة الشمسية [2]. من خلال القياسات، من الممكن أيضاً تحديد التوزيع الطيفي لإشعاع AM0. يوضح شكل 2.2 منحني WRC القياسي للتوزيع الطيفي، تم الحصول عليه من قياسات على ارتفاعات عالية وفضائية. يتبع التوزيع الطيفي لإشعاع AM0 عن كثب شكل منحني إشعاع الجسم الأسود الذي تم الحصول عليه باستخدام قانون بلانك بالقرب من درجة حرارة سطح الشمس (راجع الشكل 2.1). ترجع الاختلافات في التوزيعات الطيفية إلى الامتصاص في الأجزاء العلوية الباردة للهالة الشمسية.

بسبب مدار الأرض حول الشمس في قطع ناقص فإن الإشعاع الشمسي الحقيقي عند توقيت معين (الإشعاع خارج الغلاف الجوي) سوف يختلف عن G_{sc} . على مدار العام، فإنه يتغير من 1412 W/m^2 في مطلع العام إلى 1322 W/m^2 في بداية يوليو: بتغير مقداره 3.3% عن القيمة

شكل 2.2: منحني WRC القياسي للتوزيع الطيفي لإشعاع AM0. تم الحصول على البيانات من المعمل الوطني للطاقة المتجددة NREL, USA [3].

المتوسطة. يمكن التعبير عن ذلك رياضيا كالتالي

$$G_{0n} = G_{sc} \left(1 + 0.033 \times \cos \left(360 \frac{d}{365} \right) \right) \quad (2.7)$$

حيث أن d هو رقم اليوم في السنة، ويشير الرمز 0 المنخفض إلى الكتلة الهوائية الصفرية (AM0)، ويشير الرمز n إلى أن الإشعاع على مستوى عمودي على المحور الواصل بين الشمس والأرض.

2.4 تصنيف الإشعاع

طبقا للخواص ومجالات التطبيق، يتم تصنيف الإشعاع الكهرومغناطيسي إلى نطاقات حسب الطول الموجي. يوضح شكل 2.3 بعض التصنيفات المألوفة في المجالات ذات الصلة بالأغراض الهندسية للشمس. فمعظم الإشعاع الشمسي يقع تقريبا في مدى الأطوال الموجية $0.3-3 \mu m$ ليغطي أجزاء من مناطق الأشعة فوق البنفسجية (UV) والأشعة تحت الحمراء (IR). أبسط تصنيف للأطوال الموجية ذات الأهمية في الهندسة الشمسية هو تقسيم طيف الإشعاع الشمسي والأشعة تحت الحمراء إلى إشعاع قصير الموجة وإشعاع طويل الموجة. الموجات القصيرة هي مثل الإشعاع الشمسي، والموجات

الطويلة هي أي شيء له أطوال موجية أطول. لغرض المجمعات الشمسية، من المهم معرفة حقيقة أن الإشعاع الشمسي الساقط في نطاق الموجة القصيرة والإشعاع المنبعث من المجمعات الشمسية في نطاق الموجات الطويلة لا يتداخلان بدرجة مؤثرة. هذا مفيد لأنه يجعل من الإمكان تصميم مواد وأجهزة لها خصائص مختلفة لأشعة الشمس القصيرة والأشعة طويلة الموجة.

شكل 2.3: بعض نطاقات الأطوال الموجية في طيف الإشعاع الكهرومغناطيسي.

فصل 3

الإشعاع الشمسي المتاح على الأرض

يتأثر الإشعاع الشمسي خارج الغلاف الجوي بعدة طرق أثناء عبوره الغلاف الجوي. يراجع هذا الجزء تلك الطرق ويصف خواص الإشعاع الشمسي المتاح عند سطح الأرض. يتم أيضاً تضمين مناقشة قصيرة حول توازن الإشعاع والطاقة في الأرض.

3.1 التوهين الجوي

عند عبوره الغلاف الجوي، يعاني الإشعاع الشمسي الساقط عمودياً نوعين من التوهين - attenuation (أو الإضعاف): التشتت والامتصاص. يحدث التشتت عندما يتفاعل الإشعاع مع جزيئات الهواء والماء والمعلقات في الغلاف الجوي. تتوقف درجة التشتت على علاقة الطول الموجي للإشعاع بحجم الجزيئات وتركيز الجزيئات في الغلاف الجوي والكتلة الكلية للهواء التي يجب على الإشعاع عبورها. العملية الأهم هي تشتت رايلي Rayleigh scattering وفيها يشتت الضوء بواسطة جزيئات الهواء. يكون هذا النوع من التشتت أكثر فعالية في الأطوال الموجية الأقصر في النهاية الزرقاء للطيف، وبصورة أساسية تلك التي أقصر من $0.6 \mu\text{m}$. تفسر عملية التشتت هذه اللون الأزرق للسماء خلال النهار واللون الأصفر للشمس واحمرار السماء ليلاً. يحدث هذا بسبب تشتت معظم الأشعة التي تصل إلى الأرض من اتجاهات أخرى غير المباشرة من الشمس بواسطة تشتت رايلي. لاحظ أن كمية معتبرة من الضوء المشتت يتم توجيهها للخلف إلى الفضاء. يحدث امتصاص أشعة الشمس في مدى الأشعة فوق البنفسجية بسبب الأوزون وفي مدى الأشعة تحت الحمراء بسبب الماء وثنائي أكسيد الكربون. ففي عملية الامتصاص، يتحول الإشعاع الشمسي إلى حرارة، يتم انبعائها

بواسطة الجزيئات في صورة أشعة طويلة الموجة.

تأثير تشتت رايلي كبير فعلا ويتوقف على الطول الموجي، كما هو موضح في شكل 3.1.

شكل 3.1: علاقة الطيف عند AM1.5 بالطيف عند AM0 وتوزيع إشعاع جسم أسود عند 6000 K كما في المعادلة 2.6. انخفاض كثافة الذروة، عند 500 nm تقريباً، ناتج عن تشتت رايلي. الانخفاضات الأخرى ناتجة عن الامتصاص بواسطة الأكسجين (O_2) والأوزون (O_3) والماء (H_2O) وثنائي أكسيد الكربون (CO_2). طيف AM1.5 تم تحديده بواسطة NREL, USA [3].

3.2 الكتلة الهوائية

يعتمد توهين الإشعاع الشمسي على المدى الذي يقطعه الشعاع في الغلاف الجوي. كلما زاد طول المسار، زاد عدد الجزيئات التي يتفاعل معها الشعاع. يتغير ذلك على مدار العام وعلى مدار اليوم. يحدث المسار الأطول في أواخر النهار، حيث تكون الشمس قريبة من الأفق. يوصف طول المسار بالكتلة الهوائية air mass. تعرف الكتلة الهوائية بأنها النسبة بين كتلة الهواء الجوي الذي يعبر خلاله الشعاع من الموضع الحالي للشمس في السماء، إلى الكتلة التي يعبر خلالها إذا كانت الشمس في أوجها (مباشرة فوق الرأس). على سبيل المثال، عند كتلة هوائية 2، يكون طول المسار عبر الغلاف الجوي ضعف طوله لو أن الشمس مباشرة فوق الرأس. فإذا كانت زاوية الذروة zenith angle،

أي الزاوية من الاتجاه الرأسي إلى الشمس، يرمز لها بالرمز θ_z ، فإنه يمكن حساب الكتلة الهوائية بصورة تقريبية

$$m = \frac{1}{\cos \theta_z} \quad (3.1)$$

لقيم $\theta_z < 70^\circ$. كما هو مبين في شكل 3.2. للزوايا الأكبر يصبح انحناء الأرض مؤثراً. يكون الخطأ حوالي 10% عندما تكون $\theta_z = 85^\circ$. توجد مناقشة دقيقة للكتلة الهوائية في [4].

شكل 3.2: طول المسار في الغلاف الجوي D للإشعاع الشمسي عند زاوية الذروة θ_z .

بسبب تغير العوامل الجوية مع الوقت، من المفيد وجود طيف قياسي للإشعاع الشمسي على سطح الأرض لتطوير واختبار الأجهزة الشمسية. الطيف القياسي المقبول هو الطيف عند $m = 1.5$ طيف AM1.5 وهو المقابل لزاوية ذروة 48.2° . يوضح شكل 3.1 ما يسمى بطيف AM1.5 ويقارنه بطيف WRC خارج الغلاف الجوي وطيف جسم أسود حرارته 6000 K.

3.3 مكونات الإشعاع الشمسي

بسبب التشتت، يتكون الإشعاع على سطح الأرض من مكونين. جزء من الإشعاع القادم يظل كإشعاع مباشر، بينما يتم تشتت الباقي في الغلاف الجوي فينعكس للخلف عائداً للفضاء أو يصل إلى الأرض كإشعاع مشتت. بعكس الإشعاع المباشر، الذي له اتجاه محدد جيداً، ينشأ الإشعاع المشتت من كل القبة السماوية. على الرغم من أن الإشعاع المشتت يكون أكثر كثافة بالقرب من الشمس، إلا أن التقريب الجيد هو افتراض أنه متجانس الخواص، أي، موزع بشكل موحد في جميع الاتجاهات.

تعتمد خواص الإشعاع المباشر والمشتت بقوة على العوامل الجوية. في الطقس المشمس ذى السماء الصافية، حوالي 10-20% من الإشعاع يكون مشتت. في الطقس الغائم مع ندرة ظهور الشمس يكون معظم الإشعاع الساقط مشتتاً. يوضح شكل 3.3 هذه الخواص في يومين في بلدة نورشوبينغ Norrköping، السويد ($59^{\circ}35'31''$ N $17^{\circ}11'8''$ E). عبر العام، يمكن أن يكون الجزء المشتت الكلي مؤثراً. على سبيل المثال، في نورشوبينغ، بين 1983 و 1998 كان الجزء المشتت من الإشعاع الكلي 51% في المتوسط. بالمقارنة، في إحدى أكثر المواقع السويدية سطوعاً للشمس، فيسبي Visby ($57^{\circ}38'5''$ N $18^{\circ}17'57''$ E)، كان لايزال الجزء المشتت 47% لنفس الأعوام [6].

شكل 3.3: الإشعاع الكلي والمشتت على المستوى الأفقي في نورشوبينغ، السويد، في يومين صيفيين في 2008، يوما صافيا (اليسار) مع قليل من السحب المتحركة بعد الظهيرة ويوما غائماً تماماً (اليمن). في اليوم الصاف كانت نسبة الجزء المشتت 14.2% في اليوم الغائم تماماً كانت 99.7%. لاحظ هنا أن التوقيت هو UTC، أي التوقيت السويدي القياسي مطروحاً منه ساعة (مطروحاً منه ساعتان باعتبار التوقيت الصيفي).

بالإضافة إلى ذلك، للإشعاع المشتت طيف مختلف عن الإشعاع المباشر. الجزء الأكثر تردداً من الطيف يكون أعلى نسبة لأن تشتت رايلي يؤثر بدرجة أكبر في الأطوال الموجية الأقصر. مع ذلك، ولمعظم التطبيقات العملية يمكن اعتبار أن التوزيع الطيفي هو نفسه للإشعاع المباشر.

يجب الأخذ في الاعتبار مكون إشعاعي ثالث في تطبيقات الإشعاع الشمسي وهو الإشعاع المنعكس إلى السطح المائل من سطح الأرض ومن أجسام أخرى محيطة. وهو يتوقف على الانعكاسية لسطح الأرض (ما يسمى بالأليدو).

3.4 التغيرات الزمنية والجغرافية في توافر الطاقة الشمسية

تقلب الطاقة الشمسية أمر أساسي للحياة على الأرض كما نعرفها. نظراً لمحور الأرض المائل فيما يتعلق بمدارها حول الشمس، يختلف توافر الطاقة الشمسية على مدار العام، مما يؤدي إلى ظهور الفصول. لأن الأرض تدور حول محورها، فلدينا ليال ونهار. يوضح شكل 3.4 ميل الأرض بالنسبة إلى الشمس عند ثلاث توقيتات محددة. في الانقلاب الصيفي (the summer solstice)، يتم إمالة نصف الكرة الشمالي بدرجة قصوى نحو الشمس ويكون به أطول يوم في السنة، في الانقلاب الشتوي (the winter solstice)، يتم إمالة نصف الكرة الشمالي بدرجة قصوى بعيداً عن الشمس ويكون به أقصر يوم في السنة. في منتصف المسافة بين الانقلابين يوجد الاعتدالين (the equinoxes)، حيث تسقط أشعة الشمس عمودياً على خط الاستواء ويستقبل كل من نصف الكرة الشمالي والجنوبي كميات متساوية من الإشعاع.

يوضح شكل 3.4 الحركة اليومية للشمس عبر السماء لخط عرض 60° N ، ماراً بالقرب من نورشوينغ بالسويد، في نفس الأيام في الانقلاب الصيفي، تصل الشمس إلى أعلى مستوياتها في السماء وفي الانقلاب الشتوي إلى أدنى مستوى. لاحظ أيضاً أنه في الاعتدالين تشرق الشمس تماماً في الشرق وتغرب تماماً في الغرب ($\pm 90^\circ$). خلال النصف الصيفي للعام تشرق الشمس شمال الشرق (في نصف الكرة الشمالي) وتغرب شمال الغرب (إذا لم تكن على الدائرة القطبية الشمالية حيث لا تغيب الشمس في بعض الأحيان)، وخلال الشتاء تشرق وتغرب جنوب الشرق والغرب. يؤثر كل من مدة سطوع الشمس وارتفاعها (ارتفاع أعلى يعني انخفاض الكثافة الهوائية) مباشرة في أقصى قيمة متاحة من الطاقة الشمسية كل يوم. هذه التغيرات الفصلية واليومية محددة تماماً وتمثل جزءاً من الإطار الرياضي المبين في الفصل 4.

وبغض النظر عن هذه الاختلافات، هناك أيضاً تلك التي تسببها حركات السحب وتفاوت العكارة (الشفافية) في الغلاف الجوي. تغير الإشعاع على المدى القصير التي تسببها السحب المتحركة يمكن أن تكون كبيرة بالنسبة لموقع ممثل بنقطة (انظر الشكل 3.3)، ولكن على مساحة أكبر أو مجموعة من الأسطح الموزعة، يتم تنعيم الاختلافات لأن جميع المواقع ليست مغطاة بالسحب في نفس الوقت. الأيام الخالية من السحب وكذلك الأيام المغطاة بالكامل بالسحب لا تظهر بها اختلافات قصيرة المدى. عبر العام كله، تميل هذه الاختلافات العشوائية إلى التساوي، لكن اعتماداً على الموقع، قد تكون هناك اختلافات أكثر تناسقاً في السحب بحيث تؤثر سلباً على مواسم أو أجزاء معينة من اليوم.

شكل 3.4: التغيرات الفصلية واليومية لميل الأرض بالنسبة إلى الشمس وتأثيرها على ارتفاع واتجاه الشمس. في (أ) تم توضيح ميل الأرض بالنسبة لاتجاه سقوط الإشعاع الشمسي في الانقلاب الصيفي والاعتدالين والانقلاب الشتوي. وقد تم توضيح الانحراف المقابل (الزاوية ما بين موضع الشمس و مستوى خط الاستواء). في (ب) تم توضيح مسار الشمس عند خط عرض 60° N . زاوية ارتفاع الشمس هي $90^\circ - \theta_z$.

يمكن قياس تقلب الإشعاع الشمسي على سطح الأرض بسبب السحب بسهولة أكبر إذا تم استخدام إشعاع السماء الصافية لمعايرته. يسمى ذلك بمؤشر السماء الصافية clear-sky index ويعرف كالتالي:

$$\kappa \equiv \frac{G}{G_c} \quad (3.2)$$

حيث أن G هو الإشعاع الكلي الأفقي global horizontal irradiance و G_c هو إشعاع السماء الصافية clear-sky irradiance خلال فترة زمنية معينة. يوضح شكل 3.5 مدرجاً تكرارياً histogram يمثل مؤشر السماء الصافية مستخدماً إشعاع شمسي لحظي (1 ثانية) تقريباً من شبكات بيرانوميتر pyranometer على جزيرة أواهو، هاواي Oahu, Hawaii [5]، والبيانات المحسوبة هي لإشعاع السماء الصافية (لزوايا ارتفاع الشمس الأكبر من 20 درجة لتجنب تأثيرات ارتفاع الشمس المنخفض). يختلف توزيع مؤشر السماء الصافية باختلاف المواقع، لكن عادة ما يكون له ذروتان واضحتان، واحدة حول $\kappa = 1$ ، والتي تقابل السماء الصافية، وأخرى حول $\kappa = 0.5$ ، والتي تقابل عادة السماء الملبدة بالغيوم. قيم κ الأعلى من 1 مقابلة لمستويات إشعاع أعلى من مستويات إشعاع السماء الصافية، ويحدث هذا عندما ينعكس إشعاع الشمس على السحب. هذا التأثير يسمى تعزيز السحب cloud enhancement، والذي يمكن كذلك مشاهدته في شكل 3.3 حيث توجد ذروة عالية تتجاوز نمط السماء الصافية المعتاد في اليوم الصافي بشكل أساسي عندما تمر السحب.

على الرغم من أن الإشعاع الشمسي يتغير بمرور الوقت والموقع، إلا أن هناك خصائص يتم الحفاظ عليها لكل موقع بمرور الوقت عندما يتم حساب متوسط الإشعاع خلال فترة زمنية معينة. ومن الأمثلة على ذلك معادلة أنجستروم Ångström equation [ص. 64، 2]:

$$\frac{H}{H_c} = a + bS. \quad (3.3)$$

حيث تربط هذه العلاقة التشعيع الكلي H خلال فترة زمنية كبيرة (شهرية عادة)، مع التشعيع الكلي للسماء الصافية H_c ، والجزء S وهو نسبة عدد ساعات سطوع الشمس إلى العدد المحتمل لساعات سطوع الشمس. في هذه المعادلة تعرف a و b بالثوابت المحلية ويمكن تعيينها بقياس H وحساب H_c وعمل توفيق خطي مع S . في استكهولم Stockholm، السويد $59^\circ 19' 46''$ N ($18^\circ 4' 7''$ E)، تم تحديد الثوابت بواسطة أنجستروم $a = 0.235$ و $b = 0.765$ [7]. سميت المعادلة باسم عالم الأرصاد أندش أنجستروم Anders Ångström (1888-1981)، لا ينبغي

شكل 3.5: مُدرَج تكراري لمؤشر السماء الصافية القريب من المحظي، تم تحديده من بيانات 401 يوما لإشعاع كلي على المستوى الأفقي لكل ثانية أواهو، هاواي 2010 و 2011 [5].

الخلط بينه وبين جده أندش يونس أنجستروم Anders Jonas Ångström (1814-1874) الفيزيائي والباحث في الطيف الشمسي [9].

تجعل تحركات الشمس عبر السماء جنبا إلى جنب مع المناخ المحلي وظروف الطقس والتضاريس المورد الشمسي يتغير جغرافياً. فهناك تباين ثابت مع خط العرض، مع توفر طاقة أقل في الشمال وأكثر في الجنوب، ولكن توجد أيضاً الاختلافات المستقلة عن خطوط العرض بسبب الطقس والتضاريس. بشكل عام، يتوفر المزيد من الطاقة الشمسية في المناطق الساحلية وأقل في المناطق الجبلية.

3.5 توازن طاقة الأرض

يعتبر الإشعاع الشمسي أهم مصدر للطاقة على كوكب الأرض. وتشمل المصادر الأخرى الطاقة الحرارية الأرضية وطاقة المد الناتجة عن جاذبية القمر، لكن، بالمقارنة، تدفق الطاقة الشمسية مرتفع للغاية. حوالي 130000 Gtoe (toe هو طن نفطي مكافئ) بينما تعادل المساهمة من الطاقة الحرارية الأرضية من الوشاح الأرضي 19 Gtoe ومن طاقة المد والجزر 2 Gtoe [8].

يوجد توازن طاقة معقد بين الإشعاع الوارد والصادر على الأرض. حيث ينعكس ما يقرب من ثلث الطاقة الشمسية الساقطة إلى الفضاء، في حين يتم امتصاص الباقي في الغلاف الجوي، والمحيطات والمواد العضوية وغير العضوية على الأرض. تعمل الطاقة الشمسية الممتصة على دفع عمليات الأرصاد الجوية والهيدرولوجية مثل الرياح والأمواج وذوبان الجليد، وتغذي عملية التمثيل الضوئي في المحيط الحيوي. ويتم الحفاظ على إجمالي توازن الإشعاع من خلال إشعاع الموجات الطويلة المنبعثة من سطح الأرض. يترك جزء من هذا الإشعاع الأرض بينما يُعاد جزء كبير منها إلى الأرض. يتم الحفاظ على هذه الدورة من الإشعاع السطحي والإشعاع الخلفي بواسطة الغلاف الجوي عن طريق الغازات الدفيئة. تم تلخيص مخطط مبسط لهذا التوازن المعقد في الشكل 3.6.

يؤثر التخميد الجوي عن طريق الامتصاص على كل من الإشعاع الشمسي الذي يصل إلى الأرض والانبعاثات الحرارية من الأرض. يمكن نفاذ معظم الطاقة الشمسية إلى مستوى الأرض، بسبب فجوة في امتصاصية الجو، باستثناء الأشعة فوق البنفسجية والأشعة تحت الحمراء من الطيف الشمسي، واللذان تعاقا بقوة (راجع الشكل 3.2). يمتص الغلاف الجوي الإشعاع الحراري، باستثناء نطاق $8-13 \mu\text{m}$. يسمى هذا بالنافذة الجوية atmospheric window (راجع الشكل 3.6)، وهي الوسيلة الرئيسية لفقدان الطاقة المكتسبة من سطح الأرض. يحدث الامتصاص في هذا الجزء من الطيف أساساً بواسطة CO_2 و H_2O . ونتيجة لذلك، تتسبب زيادة تركيزات الغازات الدفيئة في الغلاف الجوي في تضيق النافذة الجوية، وهي القضية الرئيسية للاحتباس الحراري. النقطة الرئيسية، في هذا السرد المختصر، هي أن الإشعاع المحيط واستجابة الأنظمة الطبيعية له انتقائية طيفية، وهو أمر بالغ الأهمية وأساسي للحياة على الأرض، ولكنه أيضاً شيء يمكن استخدامه في هندسة الأجهزة الشمسية. يمكن العثور على مناقشة أكثر شمولاً في [12].

شكل 3.6: اتزان الإشعاع والطاقة للأرض. بالاعتماد على المصدر [11].

فصل 4

قياس كمية الطاقة الشمسية المتاحة على الأسطح المستوية

عادة ما يكون لأنظمة الطاقة الشمسية سطح استقبال يجمع الإشعاع الشمسي، على سبيل المثال، سلسلة PV أو مُجمِّع شمسي. من أجل تحديد الاتجاه الأمثل لهذا السطح، يجب أن نكون قادرين على حساب مقدار الطاقة الشمسية التي تجمعها الأسطح ذات الاتجاهات المختلفة. يعتبر هذا معقد لأن الشمس تتحرك عبر السماء ونادراً ما تواجه سطحاً ثابتاً مباشرةً، ولأن مكونات الإشعاع المختلفة (المباشر والمشتت والمنعكس على الأرض) تصل إلى السطح من زوايا مختلفة. كذلك تجعل الظروف المناخية المتباينة توفر هذه المكونات المختلفة يتغير من وقت لآخر. لإجراء حسابات موثوق بها، يجب أن نكون قادرين على تحويل بيانات الإشعاع الشمسي على المستوى الأفقي المتاحة على مدار الساعة إلى إشعاع على سطح مستوي مائل.

الهدف من الأقسام التالية هو توفير إطار رياضي لتحويل الإشعاع الشمسي المقاس على المستوى الأفقي إلى إشعاع على سطح مستوي مائل. غالباً ما تستخدم هذه المجموعة من المعادلات في البرامج الاحترافية لمحاكاة وضبط أنظمة الطاقة الشمسية الحرارية أو الضوئية بناءً على الإشعاع الأفقي المقاس. كما أنه مفيد جداً لفهم العوامل المهمة التي تؤثر على تجميع الطاقة الشمسية على السطح. هذه وغيرها من صيغ الإشعاع والنماذج الرياضية تمت مناقشتها بمزيد من العمق في [2].

4.1 بيانات الإشعاع الشمسي المقاسة

يبدأ تحديد الإشعاع الشمسي على الأسطح المائلة عادةً من القياسات في المستوى الأفقي. يقاس الإشعاع الشمسي عموماً بواسطة فئتين رئيسيتين من الأدوات: أجهزة البيرهليومتريات (pyrheliometers) وأجهزة البيرانومتريات. يقيس البيرهليومتر الإشعاع الشمسي العمودي القادم مباشرة من الشمس وجزء صغير من الإشعاع القادم من السماء حول الشمس. يدخل ضوء الشمس في هذا الجهاز عادةً من خلال نافذة إلى ازدواج حراري (جهاز يحول الحرارة إلى كهرباء). يمكن تسجيل الإشارة الكهربائية التي يتم إنشاؤها وتحويلها إلى W/m^2 . تعمل نافذة البيرهليومتر كمرشح يسمح بمرور ضوء الشمس فقط في النطاق $0.3-3 \mu m$.

يقيس البيرانومتر الإشعاع الكلي للشمس القادم من القبة السماوية (مشتت بالإضافة إلى مباشر)، عادةً على المستوى الأفقي. يعني هذا أن الجهاز يجب أن يعطي استجابة غير متحيزة للإشعاع من جميع الاتجاهات. ويتكون من مستشعر حراري موجه أفقياً وقبة زجاجية تحد من نطاق الطول الموجي، كما هو الحال في البيرهليومتر. تحافظ القبة الزجاجية على الرؤية 180° وتحمي المستشعر الحراري من الحمل الحراري للهواء. يوضح الشكل 4.1 الرسوم التوضيحية التخطيطية لقياس البيرهليومتر ومقياس البيرانومتر.

شكل 4.1: رسم تخطيطي للبيرانومتر (أ) والبيرهليومتر (ب)، بناءً على [9] و [10].

بينما تقيس البيرهليومتريات الإشعاع الساقط المباشر العمودي فقط، فإن الإشعاع الكلي أو المشتت

يمكن أن يقاس بالبيرونومتريات. لقياس الإشعاع المشتت، يتم إرفاق حلقة التظليل بمقياس البيرونومتر لمنع الإشعاع المباشر. ثم يتم استخدام معامل تصحيح للتعويض عن فقدان الرؤية. يمكن قياس الإشعاع المباشر على سطح أفقي بطريقة غير مباشرة باستخدام جهازين من البيرونومتريات، يقيس أحدهما الإشعاع المشتت، ويقيس الآخر الإشعاع الكلي، ثم نحصل عليه بطرح الإشعاع المشتت من الإشعاع الكلي.

في ما يلي، سوف نتعامل مع متوسط التدفق الإشعاعي خلال فترة زمنية معينة، عادة ساعة واحدة، وهي الكيفية التي تتوفر بها البيانات المقاسة في المراصد الجوية. يعني هذا أن الإشعاع المتاح يتم تكامله مع الوقت والأطوال الموجية. سوف نشير إلى الإشعاع المتكامل والمتوسط بالحرف I :

$$I = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} G(t) dt. \quad (4.1)$$

يتوفر الإشعاع المقاس في سلسلة زمنية، ويتم تطبيق جميع المعادلات أدناه خطوة واحدة في كل مرة. يشير الوقت t دائماً إلى منتصف الفترة الزمنية المراقبة:

$$t = \frac{t_1 + t_2}{2}. \quad (4.2)$$

لنفترض أن لدينا مركبتى إشعاع مباشر ومشتت I_b و I_d على المستوى الأفقي. نريد أن نحصل منهما على مركبات الإشعاع المباشر والمشتت والمنعكس (من الأرض) I_{bT} و I_{dT} و I_{gT} على سطح مستوى مائل. بالتعبير عنه بالإشعاع الكلي global radiation، نريد التحرك من إشعاع على المستوى الأفقي:

$$I = I_b + I_d \quad (4.3)$$

إلى إشعاع على المستوى المائل:

$$I_T = I_{bT} + I_{dT} + I_{gT}. \quad (4.4)$$

تتمثل الإستراتيجية الأساسية في العثور على زوايا سقوط الإشعاع على الأسطح الأفقية والمائلة، التي تستخدم لمعايرة الإشعاع المباشر، وعامل الرؤيا للمستوى المائل، الذي يحدد الإشعاع المتجانس الساقط على المستوى المائل.

4.2 التوقيت الشمسي

في جميع المعادلات التالية نستخدم التوقيت الشمسي، والذي يختلف عن وقت الساعة القياسي. في الواقع، الشمس حارس سيئ للوقت، على الأقل عندما تكون الدقة مطلوبة في غضون ساعة. وذلك لأن الحركة الظاهرية للشمس عبر السماء ليست منتظمة. بدلاً من ذلك، ونظراً لأن مدار الأرض بيضاوي الشكل وتميل الأرض على المدار، يبدو أن الشمس تسرع وتبطئ على مدار العام، في بعض الأحيان تكون متقدمة على الساعة التقليدية، وأحياناً متأخرة، حتى 16 دقيقة. يمكن تصحيح ذلك بعامل يسمى معادلة الوقت. علاوة على ذلك، يتم ضبط وقت الساعة القياسي بشكل موحد لكل منطقة زمنية. تختلف هذه المناطق في العرض، ولكن أوسعها يمكن أن تستغرق الشمس عدة ساعات لعبورها، مما يعطي اختلافات كبيرة بين التوقيت القياسي والشمسي للمواقع البعيدة عن خطوط الطول القياسية. لتصحيح كل هذا، فإن التوقيت الشمسي بالدقائق،

$$t_s = t_{st} - 4(L_{st} - L_{loc}) + E(d), \quad (4.5)$$

حيث أن t_{st} هو التوقيت القياسي بالدقائق بعد منتصف الليل، L_{st} هو خط الطول القياسي و L_{loc} هو خط الطول للموقع. يعكس الحد الثاني حقيقة أن الشمس تتجاوز 1° من خط الطول في أربع دقائق. يجب أن نكون حذرين مع الإشارة أمام هذا الحد، حيث أنها سالبة هنا لأن خطوط الطول تحسب شرقاً بإشارة موجبة. $E(d)$ هي معادلة الوقت لليوم d من السنة، تعطى في صيغة تجريبية من [4]:

$$E(d) = 229.18(0.000075 + 0.001868 \cos B - 0.032077 \sin B - 0.014615 \cos 2B - 0.04089 \sin 2B) \quad (4.6)$$

حيث أن

$$B = (d - 1) \frac{360}{365}. \quad (4.7)$$

لاحظ أن التوقيت الصيفي يسبب اختلافاً آخر لمدة ساعة واحدة بين توقيت الساعة القياسي والتوقيت الشمسي الذي يجب تصحيحه.

4.3 زوايا الشمس

من أجل إجراء تحويلات بين المستويات الأفقية والمائلة، من الضروري معرفة العلاقات الهندسية بين تلك المستويات وبين المستويات والشمس في أي لحظة من الزمن. يتم استخدام مجموعة من الزوايا، الموضحة أدناه والموضحة في الشكل 4.2، لتحديد هذه العلاقات. أولاً، لدينا الزوايا الثابتة لتحديد اتجاه وموقع المستوى المائل:

- β ، ميل المستوى بالنسبة إلى الأفقي، $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$

- γ ، زاوية السم (الاتجاه) للمستوى المائل، صفرًا في اتجاه الجنوب، موجبة في اتجاه الغرب، $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$

- ϕ ، خط العرض للموقع، موجب شمالاً، $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$

ثانياً، لدينا زاويتان متغيرتان مع الزمن تحددان موقع الشمس بالنسبة إلى الكرة السماوية¹ والأرض:

- δ ، انحدار الشمس، الوضع "العمودي" للشمس على الكرة السماوية، مقاسة بالدرجات أعلى أو أسفل خط الاستواء السماوي، موجب للشمال $-23.45^\circ \leq \delta \leq 23.45^\circ$

- ω ، الزاوية الساعية، الإزاحة الزاوية للشمس بالنسبة إلى خط الطول المحلي، صفر عند الظهر، موجبة بعد الظهر، $-180^\circ \leq \omega \leq 180^\circ$

يصنع الانحدار دورة كاملة في عام واحد، وبالتالي يمكن حسابه بدقة معقولة كدالة في ترتيب اليوم في السنة d :

$$\delta = 23.45 \sin \left(360 \frac{284 + d}{365} \right). \quad (4.8)$$

يتم تحديد زاوية الساعة، وهي مقياس الوقت في المعادلات، من الوقت في اليوم. تصنع دورة كاملة خلال 24 ساعة. بما أن الشمس تتحرك 15° في اتجاه الغرب كل ساعة بسبب دوران الأرض حول محورها الخاص والزاوية الساعية صفر عندما تكون الشمس وقت الظهيرة، فإن الزاوية الساعية هي:

$$\omega = 15 \left(\frac{t_s}{60} - 12 \right), \quad (4.9)$$

¹ الكرة السماوية هي كرة خيالية تحيط بالأرض، تُسقط عليها جميع الأجرام السماوية. عندما تتحرك الأرض حول الشمس، فإنها تنظر إلى الشمس على خلفية الفضاء المحيط بها. من وجهة نظر الراصد على الأرض، تعبر الشمس باستمرار الكرة السماوية، وتشكل مساراً كاملاً عبرها في عام واحد. هذا المسار يسمى مسير الشمس. خط الاستواء السماوي هو إسقاط خط الاستواء الأرضي على الكرة السماوية.

شكل 4.2: زوايا الشمس المستخدمة في الحسابات. في (أ) تم توضيح الزوايا المستخدمة في تحديد موقع واتجاه المستوى المائل. وهي ميل المستوى β وزاوية الاتجاه γ وخط العرض ϕ . كما تم توضيح خط الطول L_{loc} وزاوية الذروة θ_z . في (ب) تم توضيح زوايا تحديد موضع الشمس بالنسبة للأرض والكرة السماوية: زاوية الانحدار δ والزاوية الساعية ω .

حيث أن t_s هو التوقيت الشمسي خلال اليوم مقدر بالدقائق.

من تلك الزوايا، يمكن أن نحسب:

• θ ، زاوية السقوط، الزاوية بين العمودي على سطح المستوى المائل والشعاع المباشر الساقط على هذا المستوى، $-180^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$.

ترتبط زاوية السقوط بجميع الزوايا الأخرى وفقاً للمعادلة التالية:

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \sin \phi \cos \beta \\ & - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma \\ & + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega. \end{aligned} \quad (4.10)$$

للمستوى الأفقي، يكون ميل المستوى $\beta = 0$ ، وبذلك تبسط العلاقة السابقة. تصبح زاوية السقوط θ_z ، زاوية الذروة، والتي تعرضنا لها في مناقشة الكلفة الهوائية، في الصورة

$$\cos \theta_z = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta. \quad (4.11)$$

لاشتقاق هذه المعادلات لكل من θ و θ_z ، انظر الملحق أ.

4.4 الإشعاع خارج الغلاف الجوي

بالنسبة للعديد من حسابات الإشعاع، من المفيد معرفة الإشعاع خارج الغلاف الجوي على المستوى الأفقي. لقد رأينا بالفعل أنه يمكن التعبير عن الإشعاع خارج الغلاف الجوي الساقط عمودياً من خلال المعادلة 2.7. للحصول على الإشعاع على المستوى الأفقي، اضربه ببساطة في جيب تمام زاوية الذروة:

$$G_0 = G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360d}{365} \right) \cos \theta_z. \quad (4.12)$$

يوضح الشكل 4.3 تفسير سبب توفير هذا الوزن للإشعاع على المستوى الأفقي. للحصول على متوسط الإشعاع خارج الغلاف الجوي خلال فترة زمنية كاملة، يجب علينا أن نكمل بين بداية ونهاية تلك الفترة الزمنية. ومع ذلك، كتقريب جيد سوف نفترض

$$I_0 \approx G_0, \quad (4.13)$$

مما يعني أننا نختار القيمة اللحظية لمنتصف الفاصل الزمني.

شكل 4.3: التحويل بين الإشعاع خارج الغلاف الجوي الساقط عمودياً والإشعاع خارج الغلاف الجوي الساقط على المستوى الأفقي. في المثلث ABC، الذي يحدده المستوى العمودي على الإشعاع والمستوى الأفقي ومسار الإشعاع، يكون طول الضلع الجانبي AC أقصر من الجانب AB بمعامل $\cos \theta_z$. ينطبق هذا أيضاً على أجزاء من جوانب المثلث المحددة بأشعة متوازية من الضوء (كما هو موضح في الأقسام ذات الأطوال l و $l \cos \theta_z$). ونتيجة لذلك، فإن نفس كمية الإشعاع الساقط على وحدة المساحات من المستوى العمودي سوف تصل إلى مساحة $1/\cos \theta_z$ على المستوى الأفقي. مما يعني أن الإشعاع على المستوى الأفقي أقل كثافة بمعامل قدره $\cos \theta_z$. لاحظ أن هذه العلاقة تنطبق على كل الأشعة المباشرة وكل المستويات.

4.5 الإشعاع المباشر على الأسطح المائلة

عند تحويل إشعاع مباشر بين مستويات نستخدم العامل الهندسي R_b ، الذي يعرف بأنه نسبة الإشعاع المباشر على المستوى المائل إلى الإشعاع المباشر على المستوى الأفقي:

$$R_b = \frac{I_{bT}}{I_b}. \quad (4.14)$$

باتباع نفس المنطق كما في الشكل 4.3، نجد أنه إذا كان I_{bn} يشير إلى الإشعاع المباشر على مستوى عمودي على الإشعاع الساقط، فإن $I_{bT} = I_{bn} \cos \theta$ و $I_b = I_{bn} \cos \theta_z$ ، وبالتالي،

$$R_b = \frac{I_{bn} \cos \theta}{I_{bn} \cos \theta_z} = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z}. \quad (4.15)$$

يمكننا لذلك أن نعبر عن الإشعاع المباشر على السطح المائل كالتالي

$$I_{bT} = R_b I_b \quad (4.16)$$

يتم استخدام قيمة R_b التي تم تحديدها عند نقطة المنتصف للفواصل الزمني كممثل للفواصل الزمني بأكمله. كما هو مذكور في [2] غالباً ما يكون هذا الإجراء جيداً بما يكفي للقيم الساعية. يتم التحويل فقط عندما تكون الشمس أعلى الأفق. وهكذا، تحدد قيمة R_b على النحو الوارد أعلاه عندما يكون كل من $\cos \theta > 0$ و $\cos \theta_z > 0$ وتكون صفراً خلاف ذلك. شيء واحد يجب توخي الحذر بشأنه هو خطر الحصول على قيم غير ممثلة لـ R_b على فترات تتضمن شروق الشمس وغروبها، عندما تكون $\cos \theta_z$ قريبة من الصفر، مما قد يسبب قيم إشعاعية صباحية أو مساءية غير واقعية.

4.6 الإشعاع المشتت على الأسطح المائلة

الآن بما أننا نستطيع التعامل مع الإشعاع المباشر، نحتاج إلى تقدير مماثل للإشعاع المشتت المتناثر. إذا افترضنا أن الإشعاع المشتت من السماء متجانس تماماً، فإن تقدير هذا العامل يكون:

$$f_{view,sky} = \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad (4.17)$$

وهو عامل رؤية السماء للسطح ويصف مقدار رؤية السماء بالنسبة للسطح. من السهل أن نرى أن هذا التعبير منطقي، بملاحظة، على سبيل المثال، أن $f_{view,sky} = 1$ عندما يكون السطح أفقي، و $f_{view,sky} = \frac{1}{2}$ عندما يكون مائلاً بزاوية 90° و $f_{view,sky} = 0$ عندما يكون مواجهاً للأرض. بالمثل، عامل الرؤية للإشعاع المتجانس من الأرض يمكن حسابه كالتالي:

$$f_{view,ground} = \frac{1 - \cos \beta}{2}. \quad (4.18)$$

عادة ما تعتبر مركبة الإشعاع المشتت مكونة من ثلاثة أجزاء: مشتت متجانس isotropic diffuse ومشتت حول الشمس circumstellar diffuse وإشراق الأفق horizon brightening - التي تختلف في مواقعها في السماء. الجزء المشتت المتجانس موحد من كل اتجاه، ويتركز الجزء المشتت حول الشمس حول موضع الشمس في السماء، ويتركز إشراق الأفق بالقرب من الأفق. تمت صياغة نماذج مختلفة لوصف الإشعاع المشتت على المستوى المائل. في هذا الكتاب، تم اختيار ما يسمى بنموذج هاي وديفيز Hay and Davies. إلى جانب معالجة جزء من الإشعاع المشتت على

أنه متجانس، فإنه يمثل أيضاً نموذجاً للإشعاع القادم من حول الشمس. كما هو موضح في [13]، يعمل نموذج هاي وديفيز بشكل مماثل للنماذج الأخرى الأكثر تعقيداً. في نموذج هاي وديفيز، يتم التعبير عن الإشعاع المشتت على السطح المائل كالتالي

$$I_{dT} = I_d \left[(1 - A_i) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + A_i R_b \right] \quad (4.19)$$

حيث يتم تعريف مؤشر التباين anisotropy index، A_i ، بأنه النسبة بين الإشعاع الساقط المباشر I_b والإشعاع خارج الغلاف الجوي I_0 الساقط على المستوى الأفقي:

$$A_i = \frac{I_b}{I_0} \quad (4.20)$$

وبالتالي، بما أن I_0 هو الإشعاع الساقط الذي سيكون ممكناً نظرياً إذا لم يكن هناك غلاف جوي، فإن A_i هو جزء الإشعاع الذي يتم الاحتفاظ به كإشعاع مباشر بعد مروره عبر الغلاف الجوي. في حالة كون السماء صافية، يقترب I_b من I_0 ، مما يجعل A_i قريباً من 1، ويعالج الإشعاع المشتت بنفس الطريقة التي يعالج بها الإشعاع المباشر:

$$I_{dT} \approx I_d R_b. \quad (4.21)$$

عندما لا يكون هناك إشعاع مباشر، يكون A_i صفراً، ويعتبر الإشعاع المشتت متجانساً:

$$I_{dT} = I_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \quad (4.22)$$

حيث يتم تعديل I_d فقط من خلال معامل رؤية السماء.

4.7 الإشعاع المنعكس من سطح الأرض

المكون الثالث والأخير من إجمالي الإشعاع على المستوى المائل هو الإشعاع المنعكس من الأرض. في الواقع، تعكس العديد من الأشياء، مثل المباني والمواد الأرضية المختلفة والأشجار وما إلى ذلك، الإشعاع الساقط إلى السطح المائل. توجد طريقة مبسطة، ولكن قياسية؛ وهي اقتراف أن الإشعاع منعكس من مصدر مركب واحد، أرض أفقية، تعكس بشكل مشتت. عندئذ يعتمد الإشعاع

المنعكس على السطح المائل فقط على انعكاس الأرض وعامل رؤية السطح المائل للأرض:

$$I_{gT} = I\rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (4.23)$$

حيث أن ρ_g هي انعكاسية الأرض و $I = I_b + I_d$ هو الإشعاع الكلي على المستوى الأفقي. تتوقف انعكاسية الأرض ρ_g على المناطق المحيطة. في خطوط العرض العالية، يحدث اختلاف موسمي في انعكاسية الأرض على الأرجح بسبب التغطية الثلجية في الشتاء.

4.8 نموذج كامل للإشعاع على المستوى المائل

النموذج الكامل للإشعاع الكلي على سطح مائل هو:

$$I_T = I_{bT} + I_{dT} + I_{gT}. \quad (4.24)$$

باستخدام الصيغ لكل مكون من المعادلات 4.16 و 4.22 و 4.23 يكون النموذج الكامل:

$$I_T = I_b R_b + I_d \left[(1 - A_i) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + A_i R_b \right] + (I_b + I_d) \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right). \quad (4.25)$$

4.9 بعض الملاحظات حول ضبط اتجاه السطح

يمكن وضع بعض القواعد العامة حول كيفية إمالة السطح لزيادة تجميع الإشعاع الشمسي خلال فترة زمنية معينة. يمكن العثور على مزيد من التفاصيل، على سبيل المثال، في [14]. بشكل عام، يجب توجيه السطح بحيث تكون زاوية السقوط θ قريبة من الصفر قدر الإمكان، كلما كان ذلك ممكناً. نظام التتبع ذو المحورين فقط يمكنه الاحتفاظ بزاوية السقوط عند الصفر في جميع الأوقات. بالنسبة لسطح ثابت، يتعين علينا العثور على اتجاه شبه مثالي في معظم الأحوال ولكنه جيد قدر الإمكان عبر فترة زمنية طويلة.

يجب اختيار زاوية الاتجاه γ بحيث يواجه السطح الشمس عندما تكون في أعلى نقطة في السماء. في النصف الشمالي من الكرة الأرضية، يجب توجيه السطح جنوباً وفي النصف الجنوبي من الكرة

الأرضية شمالاً. تشمل الاستثناءات إذا كان هناك شيء ما يحجب الشمس (إذا كان هناك تظليل في الشرق، يجب أن يكون السطح موجهًا غربًا والعكس صحيح)، إذا كانت هناك ظروف مناخية منتظمة تفضل شمس الصباح أو المساء أو إذا كانت الطاقة الناتجة يجب أن تتطابق مع بعض المتطلبات المحددة مع قِمِّ استهلاك الكهرباء في الصباح أو المساء (والذي ينطبق بشكل أساسي مع أنظمة الطاقة الشمسية الغير مرتبطة بشبكة الكهرباء).

يعتمد ميل السطح β على الفصل الذي تم ضبط المجمع من أجله. المجمع الصيفي يفضل زوايا إمالة أقل من المجمع السنوي ويتطلب المجمع في الشتاء إمالة أعلى. للمواقع الموجودة حتى 30° من خط الاستواء، يكون المجموع السنوي للطاقة نموذجياً عندما يضبط الميل تقريباً مساوياً لخط العرض. في خطوط العرض الأعلى تكون زوايا الإمالة المنخفضة أكثر ملائمة في الصيف لأن الطاقة المتوفرة في الصيف أكثر من تلك المتوفرة عند خطوط العرض المنخفضة. الألبيدو المرتفع يفضل أيضاً زوايا الإمالة العالية لأنه أفضل مع عامل رؤية أعلى على الأرض.

فصل 5

تدريبات

تأكد من فهمك

تغطي هذه الأسئلة أهم المفاهيم. توجد جميع الإجابات في الأقسام أعلاه.

1. صف، نوعياً، كيف يتغير الإشعاع المنبعث من الجسم الأسود عندما ترتفع درجة حرارته. كيف يتأثر إجمالي الإشعاع وتوزيع الطول الموجي؟
2. اشرح كيف يمكن تحديد درجة حرارة سطح الشمس عن طريق قياس تدفق الإشعاع الشمسي خارج الغلاف الجوي للأرض.
3. ما هو الثابت الشمسي ولماذا يختلف على مدار السنة؟
4. ما هي نطاقات الطول الموجي التي عادةً ما ينقسم إليها الإشعاع الكهرومغناطيسي؟ ما أهمية نطاقات الطول الموجي هذه بالنسبة للهندسة الشمسية؟
5. كيف تختلف أطوال الموجية للإشعاع خارج الغلاف الجوي والإشعاع على سطح الأرض؟ ما هو تفسير هذه الاختلافات؟
6. ما هي الكتلة الهوائية وكيف يمكن تقريبها؟
7. ما هو طيف AM1.5؟ لماذا يعتبر مفيد في هندسة الطاقة الشمسية؟
8. اشرح الفرق بين الإشعاع المشتت والإشعاع المباشر. لماذا يصل الإشعاع الشمسي إلى سطح الأرض بهذين الشكلين؟

9. ما هي الكميات التي تربط بها معادلة أنجستروم؟
10. ما هي الانقلابات الصيفية والشتوية والاعتدالين؟ كيف ترتبط بانحراف الشمس؟
11. صف، بالنسبة لخطوط العرض بين المناطق الاستوائية والدوائر القطبية، كيف يتغير المسار الظاهري للشمس عبر السماء بين الانقلاب الشتوي والصيفي؟
12. اقترح إعدادا لأجهزة القياس لرصد الإشعاع المباشر والإشعاع المشتت على المستوى الأفقي.
13. ما هي طرق اختلاف التوقيت الشمسي عن توقيت الساعة المحلي؟
14. ما هو الفرق بين زاوية السقوط وزاوية الذروة؟ لماذا تكون هاتان مفيدتين عند تحديد الإشعاع المباشر الساقط على سطح؟
15. اشرح تفصيليا ما هو عامل الرؤية لسطح.
16. صف بشكل تفصيلي كيف يتم التعامل مع الإشعاع المشتت في نموذج هاي وديفيز عندما تكون:

(أ) حالة الطقس صافية.

(ب) السماء ملبدة بالغيوم تماماً.

مسائل

1. قارن بين جسمين أسودين، أحدهما بدرجة حرارة 500 K والآخر بدرجة حرارة 3000 K.
(أ) كيف يختلفان من حيث طول الموجة عند الذروة؟
(ب) ما مقدار الإشعاع الكلي المنبعث من كل منهما؟
2. مفهوم مستقبلي يعرف باسم كرة دايسون Dyson sphere يتصور أن الشمس بأكملها مغطاة بألواح كهروضوئية، إذا تم وضع مثل هذه البنية الضخمة للألواح حول الشمس، وتغطيتها بالكامل، فإذا سيكون إجمالي إنتاج الطاقة، بالنظر إلى كفاءة لوحة كهروضوئية 15%؟
3. ماذا سيكون الثابت الشمسي في كوكب المريخ إذا علمت أنه 1367 W/m^2 في الأرض؟
تبلغ المسافة المتوسطة بين الشمس والمريخ 227.9 مليون كيلومتر؟

4. أي زاوية ذروة وزاوية ارتفاع للشمس تتوافقا مع AM1.5؟
5. ما هو الفرق في التوقيت الشمسي (مقرباً إلى دقائق كاملة) بين المدينتين السويديتين جوتنبرج Göteborg (57.70° N, 12.00° E) ولوليو Luleå (65.55° N, 22.13° E)؟
6. أوجد صيغة مبسطة لزاوية سقوط شعاع مباشر على مستوى له زاوية اتجاه 0° ومائل بزاوية 90°. يجب أن يعتمد التعبير فقط على زاوية الانحراف وخط العرض وزاوية الساعة.
7. قام ثلاثة جيران في جراستورب Grästorps، بالسويد (58.33° N, 12.67° E)، بتركيب مصفوفات PV على منازلهم. يتم تركيب هذه المصفوفات مباشرة على:
 - (أ) سقف أفقي.
 - (ب) جدار رأسي مواجه للجنوب.
 - (ج) سقف مواجه للغرب، مائل بزاوية 30°.
 في 23 يوليو في الساعة 30:15 (وقت الساعة القياسي مع تحول ساعة الصيف)، يتجادل الجيران حول أي المصفوفات تواجه الشمس بشكل أقرب للمباشر في هذا الوقت (أي، لأي مصفوفة تكون زاوية سقوط الإشعاع المباشر أصغر). أيهم؟ (بعض المساعدة: 23 يوليو هو اليوم 204 من السنة ومعادلة الوقت في ذلك اليوم -6.47 دقيقة).
8. بالنسبة للعديد من التطبيقات العملية التي تعتمد على الطاقة الشمسية، غالباً ما يكون من المفيد معرفة متى تشرق الشمس وتغرب.
 - (أ) استنتج التعبيرات لزاوية ساعة غروب الشمس وشروق الشمس للمستوى الأفقي، ما قيمة زاوية الساعة التي تكون فيها الشمس على وجه التحديد على حافة سطح ذي اتجاه أفقي؟ (تلميح: ستكون العبارات متناظرة ولا تختلف إلا في العلامة).
 - (ب) استخدم هذه التعبيرات لتحديد وقت الساعة القياسي الذي تشرق فيه الشمس وتغرب في جراستورب، السويد في نفس التاريخ كما في المسألة السابقة.
9. إذا كنت تعرف زاوية الذروة عند الظهر الشمسي، فكيف يمكنك توجيه السطح لمواجهة الشمس مباشرة في هذا الوقت بالذات؟
10. خذ في الاعتبار مرة أخرى المصفوفتين المائلتين في المسألة 6.
 - (أ) ما هي العوامل الهندسية الخاصة بالإشعاع المباشر في الساعة 15:30 يوم 23 يوليو؟

(ب) افترض أن مساحة كل مصفوفة تبلغ 10 m^2 . ما مقدار الإشعاع المباشر الذي تستقبله هذه المصفوفات إذا كان الإشعاع المباشر على المستوى الأفقي 500 W/m^2 في هذا الوقت؟

11. اعثر على تعبير مبسط لزاوية الذروة عند الظهر الشمسي في يوم الاعتدال الربيعي أو الخريفي.

12. في يوم الربيع (الذي يصادف أن يكون يوم الاعتدال الربيعي)، اجتمعت مجموعة من طلاب الهندسة في نزهة في الظهيرة الشمسية في اسلوف Eslöv، السويد (55.83° N , 13.30° E). أحضر أحدهم موقداً كهربائياً مصنوعاً في المنزل مزوداً بمصفوفة كهروضوئية، لكن الآخرين غير متأكدين مما إذا كان سيتمكن من جمع ما يكفي من الطاقة الشمسية. في الظهيرة الشمسية في هذا اليوم، يستقبل المستوى الأفقي 621 W/m^2 من الإشعاع الكلي، منها 236 W/m^2 إشعاع مشتمت.

(أ) تقرر أن المصفوفة الكهروضوئية موجهة لجمع أكبر قدر ممكن من الإشعاع المباشر عند الظهيرة الشمسية. ما مقدار زوايا الميل والاتجاه التي يجب اختيارها؟

(ب) بافتراض أن الأرض لها البidou بنسبة 20%، ما هو مقدار الإشعاع المشتمت والمباشر والإشعاع المنعكس عن الأرض الذي تجمعه المصفوفة عند هذا الاتجاه؟ استخدم نموذج هاي وديفيز للإشعاع المشتمت. الإشعاع خارج الغلاف الجوي الساقط عمودياً في هذا اليوم هو 1376 W/m^2 .

إجابات على المسائل

1. (أ) $5.8 \mu\text{m}$ و $0.97 \mu\text{m}$ ، على التوالي. (ب) 3.5 kW/m^2 و 4.6 MW/m^2 .

2. 15% من إجمالي الطاقة الإشعاعية للشمس، أو $5.79 \times 10^{25} \text{ W}$. لاحظ أيضاً أن هذا لا يعتمد على نصف قطر كرة دايسون.

3. 588.2 W/m^2 .

4. زاوية الذروة 48.2° ، وزاوية ارتفاع الشمس 41.8° .

5. 41 min.

6. $\cos \theta_z = -\sin \delta \cos \phi + \cos \delta \sin \phi \cos \omega$.

7. الإشعاع العمودي على هذه المصفوفات الثلاثة له زوايا سقوط (أ) 45.4° ، (ب) 60.8° ، (ج) 58.8° . المصفوفة (أ) تفوز.

8. (أ) زاوية ساعة غروب الشمس: $\omega = \arccos(-\tan \phi \tan \delta)$ ، زاوية ساعة شروق الشمس: $\omega = -\arccos(-\tan \phi \tan \delta)$. (ب) تشرق الشمس الساعة 03:51 وتغرب الساعة 20:40 و 04:51 مع تغير ساعة الصيف). لاحظ أن هذه النتيجة قد تختلف بعدة دقائق من حسابات أكثر تفصيلاً لشرق الشمس وغروبها تأخذ في الاعتبار القطر الزاوي للشمس وتستخدم تعبيرات أخرى أكثر دقة للانحراف ومعادلة الوقت.

9. $\beta = \theta_z$ ، $\gamma = 0$.

10. (أ) 0.695 و 0.738، على التوالي. (ب) 3.48 kW و 3.69 kW لكل مصفوفة.

11. $\theta_z = \phi$.

12. (أ) $\beta = 55.83^\circ$ ، $\gamma = 0$. (ب) $G_{dT} = 302 \text{ W/m}^2$ ، $G_{bT} = 685 \text{ W/m}^2$ ، $G_{gT} = 27.2 \text{ W/m}^2$.

الملحق أ

اشتقاق زوايا سقوط الإشعاع المباشر

1.أ زاوية الذروة للشعاع الساقط

زاوية الذروة θ_z هي الزاوية ما بين العمودي على المستوى الأفقي عند الموقع المعطى، والشعاع المباشر الساقط. تم توضيح المكونات الهندسية المشاركة في إيجاد تعبير لـ θ_z في الشكل 1.أ. يوضح الشكل المستوى الأفقي المحلي في موقع اختياري على الأرض. تم تحديد المستوى بانحرافه على مستوى خط الاستواء السماوي، وهو مسقط خط الاستواء الأرضي على الكرة السماوية. الزاوية بين مستوى خط الاستواء والمتجه العمودي على المستوي المحلي (v) يساوي خط عرض الموقع ϕ .

على مدار اليوم، تدور الأرض بالنسبة إلى الكرة السماوية، حيث تدور دورة كاملة في اليوم. يشار إلى هذه الحركة بزاوية الساعة ω ، وهي الزاوية بين موضع خط الطول المحلي الحالي للأرض L_{loc} (كما هو مُسَقَط على مستوى خط الاستواء) وموضع خط الطول عند الظهر الشمسي (خط الطول الذي يرى الواقف فيه الشمس عند الظهيرة)، L_{noon} . يتم تحديد موضع الشمس على الكرة السماوية من خلال الانحدار δ ، وهو الإزاحة الزاوية للشمس من المستوى الاستوائي. يمكن الآن العثور على زاوية السقوط θ_z كزاوية بين المتجه u ، البادئ من مركز الكرة السماوية إلى موضع الشمس، والمتجه العمودي v على المستوى الأفقي. الاختيار المناسب لنظام الإحداثيات هو أن يكون المحور x مشيراً في اتجاه L_{loc} ، المحور y متعامداً مع x في مستوى خط الاستواء، و z عمودياً على مستوى خط الاستواء. وهذا يجعل من الممكن تحديد مركبات المتجهات u و v مباشرة من الزوايا في الشكل 1.أ. نظراً لأن v يقع حسب التعريف في المستوى xz ، فإن مركباته تُعطى بالزاوية ϕ فقط

شكل 1.1: الخطوط العريضة للعلاقات الهندسية بين الشمس والكرة السماوية والمستوى الأفقي للأرض عند موقع محدد.

على النحو التالي:

$$\mathbf{v} = (\cos \phi, 0, \sin \phi)^T. \quad (أ.1)$$

المتجه $\mathbf{u}$ مزاح عن المستوى xz بالزاوية ω ، وبالزاوية δ عن المستوى xy ، فنحصل على مركبات المتجهة كالتالي:

$$\mathbf{u} = (\cos \omega, \sin \omega, \tan \delta)^T, \quad (أ.2)$$

والذي يمكن تحويله إلى متجه الوحدة بالضرب في $\cos \delta$:

$$\mathbf{u} = (\cos \delta \cos \omega, \cos \delta \sin \omega, \sin \delta)^T, \quad (أ.3)$$

الآن، نظراً لأن كل من $\mathbf{u}$ و $\mathbf{v}$ يعتبر متجه وحدة، يتم إعطاء جيب الزاوية للزاوية θ_z بينهما من خلال الضرب القياسي:

$$\cos \theta_z = \mathbf{u} \bullet \mathbf{v} = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta. \quad (أ.4)$$

2.أ زاوية السقوط على مستوى اختياري الاتجاه

زاوية سقوط إشعاع مباشر على مستوى مائل اختياريًا أكثر صعوبة في الحصول عليها. يوضح الشكل 2.أ كيفية وضع سطح مائل على المستوى الأفقي للأرض. يتم تحديد اتجاه المستوى المائل بزاوية السم (الاتجاه) γ وزاوية الميل β ، المحددتان بالنسبة إلى خط الطول المحلي والعمودي على المستوى الأفقي، على التوالي. ما نريد الآن العثور عليه هي الزاوية θ بين متجه الشمس u والمتجه العمودي w على المستوى المائل.

شكل 2.أ: العلاقات الهندسية بين المستوى الأفقي و سطح موجه اختياريًا.

كما يوضح الشكل 2.أ، يمكن إيجاد w بدوران v أولاً حول المحور y بالزاوية β ، ثم تدوير هذا المتجه حول الاتجاه الأصلي لـ v بالزاوية γ . الخطوة الأولى، لجعل هذا الدوران مناسباً، هي تغيير أساس نظام الإحداثيات بحيث يشير x في اتجاه v مع الحفاظ على نفس الاتجاه y يعني هذا أن المتجهات الأساسية الجديدة هي:

$$i = v = (\cos \phi, 0, \sin \phi)^T$$

$$j = (0, 1, 0)^T$$

$$k = v \times j = (-\sin \phi, 0, \cos \phi)^T$$

مصفوفة التحويل لهذه العملية هي

$$A = (i \ j \ k)^{-1} = \begin{pmatrix} \cos \phi & 0 & \sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \phi & 0 & \cos \phi \end{pmatrix}$$

أي الدوران حول محور y بزاوية خط العرض. بتطبيق هذا التحويل على متجه الشمس u نحصل على:

$$u' = Au = \begin{pmatrix} \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta \\ \cos \delta \sin \omega \\ -\sin \phi \cos \delta \cos \omega + \cos \phi \sin \delta \end{pmatrix}$$

حيث أن المتجه العمودي على المستوى الأفقي يساوى المتجه الجديد للأساس i بالتالي يكون لدينا $v' = (1, 0, 0)$

الآن، لإيجاد العمودي على المستوى المائل، w' ندير v' بزاوية مقدارها β حول محور y ، ثم بعد ذلك بزاوية قدرها γ حول محور الجديد:

$$w' = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix} v' = \begin{pmatrix} \cos \beta \\ \sin \gamma \sin \beta \\ -\cos \gamma \sin \beta \end{pmatrix}$$

كما بالسابق، يمكننا الآن إيجاد جيب تمام الزاوية θ كحاصل الضرب القياسي بين u' و w' :

$$\begin{aligned} \cos \theta = u' \bullet w' &= \sin \delta \sin \phi \cos \beta \\ &\quad - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma \\ &\quad + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega \\ &\quad + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega \\ &\quad + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned}$$

المصادر

- [1] R. Cohen (2010), Chasing The Sun: The Epic Story of the Star That Gives Us Life, London, GB: Simon & Schuster.
- [2] J.A. Duffie, W.A. Beckman (2006), Solar Engineering of Thermal Processes, Hoboken, NJ: Wiley.
- [3] Solar Spectra, NREL: <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/> (2019-04-14).
- [4] M. Iqbal (1983), Introduction to Solar Radiation, Toronto: Academic Press.
- [5] M. Sengupta, A. Andreas (2010), Oahu Solar Measurement Grid (1-Year Archive): 1-Second Solar Irradiance; Oahu, Hawaii (Data), NREL Report No. DA-5500-56506. “<http://dx.doi.org/10.5439/1052451>”
- [6] T. Persson (2000), Measurements of Solar Radiation in Sweden 1983-1998, RMK No. 89, Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI), Sweden.
- [7] A. Ångström (1928), Recording solar radiation, messages from the Swedish meteorological and hydrological institute, 4:3.
- [8] B. Sorensen (2004), Renewable Energy: Its Physics, Engineering, Use, Environmental Impacts, Economy and Planning Aspects, Amsterdam: Elsevier Academic Press.
- [9] O. Beckman (1997), Ångström: Father and Son, Acta Universitatis Upsaliensis C. Organisation och Historia 60, Uppsala University.

-
- [10] M. Paulescu, E. Paulescu, P. Gravila, V. Badescu (2013), Chapter 2, Weather Modeling and Forecasting of PV Systems Operation, Springer.
 - [11] J.T. Kiehl, K.E. Trenberth (1997), Earth's Annual Global Mean Energy Budget, Bulletin of the American Meteorological Society 78: 197-208.
 - [12] G.B. Smith, C.G. Granqvist (2011), Green Nanotechnology: Solutions for Sustainability and Energy in the Built Environment, Boca Raton, FL: CRC Press.
 - [13] D.T. Reindl, W.A. Beckman, J.A. Duffie (1990), Evaluation of hourly tilted surface radiation models, Solar Energy 45: 9-17.
 - [14] B. Perers (1999), The Solar Resource in Cold Climates, in: M. Ross, J. Royer (Eds.), Photovoltaics in Cold Climates, London: James & James.

UPPSALA
UNIVERSITET

Joakim Widén: أستاذ في قسم العلوم الهندسية بجامعة أوبسالا، السويد، ورئيس قسم الهندسة المدنية. مجال خبرته الرئيسي هو النمذجة الزمانية المكانية للإشعاع الشمسي وتطبيقه في تشغيل نظام الطاقة ونمذجة المباني الحضرية.

Joakim Munkhammar: أستاذ مشارك في قسم العلوم الهندسية بجامعة أوبسالا. يركز بحثه بشكل أساسي على نمذجة تقلب الإشعاع الشمسي والتنبؤ به، بالإضافة إلى التطبيقات في أنظمة الطاقة مثل شحن المركبات الكهربائية.

السيرة الذاتية للمترجم

خلف الله عمر قاسم: أستاذ مساعد في قسم الفيزياء، كلية العلوم بجامعة جنوب الوادي بمصر. يركز بحثه الأساسي على تأثير الغلاف الجوي على تقلب الإشعاع الشمسي والاستفادة به في أنظمة الطاقة الشمسية، بالإضافة إلى تلوث الغلاف الجوي.