النماذج الحسابية للنظم الحرارية الشمسية

تأليف

أ. د. مصطفى محمد السيد

أ. د. تدري أحمد فتحي

د. إبراهيم السعيد مجاهد

كلية الهندسة – جامعة الملك عبدالعزيز

جدة – المملكة العربية السعودية

مركز النشر العلمي

جامعة الملك عبد العزيز

ص.ب ١٥٤٠ - جدة ٢١٤٤١

المملكة العربية السعودية

© جامعة الملك عبد العزيز ١٤١٥هـ (١٩٩٤م)

جميع حقوق الطبع محفوظة . غير مسموح بطبع أي جزء من أجزاء هذا الكتاب ، أو خزنه في أي نظام لخزن المعلومات واسترجاعها ، أو نقله على أية هيئة أو بأية وسيلة ، سواء كانت إلكترونية ، أو شرائط ممغنطة ، أم ميكانيكية ، أو استنساخاً ، أم تسجيلاً ، أم غيرها إلا بإذن كتابي من صاحب حق الطبع .

الطبعة الأولى : ١٤١٥هـ (١٩٩٤م)

فهرسة مكتبة الملك فهد الوطنية

السيد ، مصطفى محمد

النماذج الحسابية للنظم الحرارية الشمسية / مصطفى محمد السيد ، قدري أحمد فتحي ، إبراهيم السعيد مجاهد .

. . . ص ، . . سم

ردمك ٩ - ٠١٧ - ٠٦ - ٩٩٦٠

١ - الطاقة الشمسية ٢ - الخلايا الشمسية .

أ - فتحي ، قدري أحمد (م. مشارك) ب - مجاهد ، إبراهيم السعيد (م. مشارك) ج - العنوان .

ديوي ٦٢١,٤٧ ١٤ / ٢٠٦٧

رقم الإيداع : ١٤ / ٢٠٦٧

ردمك : ٩ - ٠١٧ - ٠٦ - ٩٩٦٠

مطابع جامعة الملك عبد العزيز

تقديم

نظرًا للتطور السريع في الحاسبات الآلية ، اعتمد تصميم العديد من النظم الهندسية المختلفة على هذه الحاسبات . ولقد ساعد هذا الاتجاه الجديد لتصميم هذه النظم إلى تحسين التصميمات الهندسية واقتصادياتها وأصبح من الممكن الأخذ في الاعتبار للعديد من المتغيرات والتفاصيل الدقيقة التي لولا وجود الحاسب الآلي لما أمكن أخذها في الاعتبار دون جهد جهيد ووقت طويل لإجراء الحسابات اللازمة للتصميم . ومما يزيد الأمر صعوبة عند تصميم النظم الشمسية أنها نظم غير مستقرة وتعتمد هذه النظم على الطاقة الشمسية التي تتغير مع الزمن بطبيعتها. ولاستخدام الحاسبات الآلية لتصميم هذه النظم يتطلب الأمر – كما هو الحال لباقي النظم الهندسية الأخرى – إعداد نماذج حسابية لها ، وتُسْتَخدم هذه النماذج في برامج تُعَدّ خصيصًا للحاسب الآلي بغرض تصميم هذه النظم . ويهدف الكتاب الحالي إلى تقديم النماذج الحسابية للنظم الحرارية الشمسية التي تُسْتَخدم لتصميم هذه النظم والتنبؤ بأدائها .

يتكون الكتاب من أربعة عشر فصلاً بالإضافة إلى خمسة ملاحق . تشمل الفصول :الثاني والثالث والرابع ، أساسيات الطاقة الشمسية وانتقال الحرارة ، ويشمل الفصلان : الخامس والسادس المجمعات الشمسية ، أما الفصل السابع فيختص بطرق تخزين الطاقة الشمسية . وتهتم الفصول : من ثمانية إلى أربعة عشر بالتطبيقات الحرارية الهامة للطاقة الشمسية ، فيعطي الفصلان الثامن والتاسع نظم تسخين الماء والتدفئة الشمسية ، ويعالج الفصل العاشر التبريد الشمسي بطرق غير ميكانيكية ، أما الفصل الحادي عشر فيعرض توليد القدرة الميكانيكية أو الكهربائية

بالطاقة الشمسية ، وتُعْرَض مواضيع إعذاب المياه بالطاقة الشمسية ، والبرك الشمسية ، وتجفيف المحاصيل الزراعية بالطاقة الشمسية على التوالي بالفصول من الثاني عشر إلى الرابع عشر .

يبدأ الكتاب في الفصل الأول بعرض تاريخي مختصر لاستخدامات الطاقة الشمسية وأهم مصادر الطاقة التقليدية المستخدمة في العالم حاليًا ، ثم يقدم باقي الفصل التطبيقات الحرارية الشمسية المختلفة بطريقة مبسطة بغرض تقديم القارئ غير المتخصص إلى هذه التطبيقات قبل التعرض لها بالتفصيل في فصول لاحقة .

تُعْرَض أساسيات الطاقة الشمسية في الفصل الثاني ، فيقدم هذا الفصل تعريفات ومعادلات حساب الزوايا الشمسية والنماذج الحسابية المختلفة التي يمكن استخدامها لحساب الإشعاع الشمسي على سطح أفقي خارج الغلاف الجوي ، وعلى سطح الأرض بفرض جو صحو قياسي . ويعرض الفصل بعد ذلك النماذج الحسابية المستنبطة من علاقات عملية لحساب الإشعاع المباشر (الحزمي) والمنتشر على سطح أفقي سواء لحظيًا أو يوميًا أو المتوسط الشهري اللحظي أو اليومي . وينتهي هذا الفصل بعرض سريع لطريقة حساب الإشعاع الشمسي الساقط على سطح مائل . استئنافًا للأساسيات ، يعرض الفصل الثالث عمليات انتقال الحرارة التي تستخدم عادة في تصميم النظم الحرارية الشمسية ، يبدأ الفصل الثالث بعرض انتقال الحرارة بالتوصيل ، ثم بالحمل ، فبالإشعاع . يفرد الفصل بعد ذلك جزءً خاصًا لانتقال الحرارة في الأسطح الممتدة (الزعانف) والعلاقات المعملية للحمل الحراري والتي قد تستخدم في تصميم النظم موضوع الكتاب الحالي . يختص الجزء الباقي من هذا الفصل بعرض العلاقات الهامة الخاصة بالإشعاع بتفصيل أكبر نسبيًا من الجزء المخصص لعرض انتقال الحرارة بالتوصيل والحمل ، وذلك حيث أن الطاقة الشمسية تنقل في الأساس بالإشعاع ، مما يستلزم فهمًا أعمق لهذ الموضوع . يختتم الفصل الرابع عرض الأساسيات بتقديم الخواص الإشعاعية للأسطح المنفذة والأسطح الماصة . ويقدم هذا الفصل – مبتدأ من المبادئ الأولية – كيفية حساب الخواص الإشعاعية للأسطح والمواد ثم للألواح المنفذة ، وأخيرًا للألواح المنفذة المستخدمة كغطاء لسطح ماص . بالإضافة إلى العلاقات الرياضية الخاصة

بحساب هذه الخواص الإشعاعية في الحالات المختلفة ، يضم الفصل أيضًا عدة خرائط لتعيين هذه الخواص مباشرة دون الحاجة إلى استخدام العلاقات الرياضية ، مما يوفر الوقت اللازم للحسابات .

تُقَسَّم مجمعات الطاقة الشمسية إلى نوعين أساسين هما مجمعات الصفائح المستوية للتجميع عند درجة حرارة منخفضة ، والمركزات للتجميع عند درجات حرارة متوسطة ومرتفعة ، في الفصل الخامس تُقَدَّم نظرية تصميم مجمعات الصفائح المستوية وكيفية حساب معامل الفقد الحراري الكلي من المجمع إلى الجو المحيط والامتصاصية المكافئة لسطح المجمع الماص وغطائه المنفذ . يعرض هذا الفصل أيضًا العديد من التعريفات الخاصة بهذا النوع من المجمعات ومتغيرات التصميم التي تؤثر بطريقة مباشرة أو غير مباشرة في أداء هذه المجمعات وكيفية حساب كفاءتها . يعرض الفصل السادس المركزات الشمسية ، فيقدم الفصل أولاً حساب نسبة التركيز النظرية ونسبة التركيز الفعلية . بعد ذلك يقدم الفصل التحليل الحراري للمركزات ، ثم عرض لطريقة ضبط زاوية ميل المركزات التي تضبط زاوية ميلها كل عدة أيام ، وينتهي الفصل بعرض للأنواع المختلفة من المركزات .

يستعرض الفصل السابع الطرق المختلفة لتخزين الطاقة الشمسية وخصائص التخزين وكفاءته . وفي كل طريقة من هذه الطرق ، يضم الفصل النماذج الحسابية والعلاقات الرياضية اللازمة لتصميم نظام التخزين . ومن الطرق التي يضمها الفصل: التخزين في السوائل ، والتخزين في المواد الصلبة ، والتخزين بتحويل حالة المادة (تخزين الحرارة الكامنة) ، وطرق التخزين الكيماوي مثل التفاعلات العكسية والمراكم وطاقة الهيدروجين ، وطرق التخزين الميكانيكي .

يقدم الكتاب تصميم نظم سخانات الماء الشمسية ونظم التدفئة الشمسية في الفصلين الثامن والتاسع على التوالى . ويستخدم الكتاب طريقة خارطة f الشائعة الاستخدام لتصميم هذه النظم . ويضم هذان الفصلان أهم النظم المستخدمة لهذه التطبيقات وكيفية تصميمهم مع عرض لأهم المتغيرات التي تؤثر في تصميم وأداء هذه النظم . ويشمل الفصلان الثامن والتاسع أيضًا كيفية حساب الحمل الحراري لسخانات الماء ولتدفئة المباني .

يقدم الفصل العاشر نظم التبريد الشمسي غير الميكانيكي ويقصد بها هنا

استخدام دائرة التبريد بالامتصاص سواء بالتشغيل المستمر أو المتقطع ، وباستخدام طريقة التجفيف والترطيب . يبدأ الفصل بعرض لأساسيات دورة التبريد بالامتصاص باستخدام محلول الماء وبروميد الليثيوم أو محلول الماء والأمونيا ، ثم يتبع ذلك تحليل الدورة ومعادلات وخرائط خواص محلولي الماء وبروميد الليثيوم ، والأمونيا والماء . يعرض الفصل بعدئذ نظم التشغيل الشمسي لدورة التبريد بالامتصاص والمؤشرات التي تستخدم لتقييم أداء هذه النظم ، ثم يقدم الفصل النماذج الحسابية لهذه النظم وكيفية استخدامها في التصميم . يضم الفصل فيما بعد عرضًا للنظم الشمسية لدورة التبريد المتقطع بالامتصاص . ثم ينتهي الفصل بوصف وتحليل النظم الشمسية للتبريد وتكييف الهواء بالتجفيف والترطيب ، وطرق تصميمها .

ومن التطبيقات الهامة التي يضمها الكتاب توليد القدرة باستخدام الطاقة الشمسية والتي خُصِّصَ لها الفصل الحادي عشر . ويشمل هذا الفصل عرضًا موجزًا لدورات الديناميكا الحرارية المستخدمة لتوليد القدرة بالطاقة الشمسية . يُقَدِّمُ الفصل بعد ذلك النماذج الجرارية لتصميم النظم الشمسية لتوليد القدرة . يُخَصَّصُ النصف الثاني من الفصل لتوليد القدرة من الأبراج المركزية وهي أهم التطبيقات الواعدة لهذا الغرض . وفي هذا الجزء يقدم الفصل تصميم حقل المرايا العاكسة وحساب زوايا ميلها واتجاهها عند أي لحظة زمنية ، وكذا حساب حجم المستقبل وأهم أنواعه .

يُقدِّم الكتاب موضوع إعذاب المياه بالطاقة الشمسية بإسهاب في الفصل الثاني عشر ، وهو أحد التطبيقات المنخفضة التكاليف وسهلة التطبيق التي تحتاج إلى تقنية منخفضة نسبيًا وتصلح للاستخدام في منطقتنا العربية ، خاصة بغرض الزراعة . يُقَدِّم هذا الفصل عرضًا لطرق بناء المقطر الشمسي الصندوقي والمواد التي تدخل في بنائه . يلي ذلك عرضًا للتحليل الحراري للمقطر والمتغيرات التي تؤثر في تصميم المقطر وأدائه ثم التنبؤ بأداء المقطر عند ظروف تشغيل مختلفة مع تقديم برنامج حاسب آلي لهذا الغرض . يقدم الفصل بعدئذ عرضًا لأهم التصميمات المختلفة للمقطر الصندوقي . يقدم الفصل أيضًا التحليل الحراري والنماذج الحسابية للمقطر الانتشاري الأحادي التأثير والمتعدد التأثيرات ، ثم تقييم أداء هذه المقطرات ومقارنة بين هذه المقطرات والمقطرات الصندوقية .

وتأتي النماذج الحسابية لتصميم البرك الشمسية في الفصل الثالث عشر . في هذا الفصل تُعْرَض شروط اتزان طبقة اللاحمل وخطوات ملء البرك الشمسية وكيفية صيانة تدرج الملوحة بالبرك الشمسية . يضم الفصل بعد ذلك عدة نماذج حسابية لتصميم البرك الشمسية المستقرة أو غير المستقرة مع الزمن . يعرض الفصل أيضًا أهم العوامل التي تؤثر على أداء البرك الشمسية وكيفية التنبؤ بأداء هذه البرك عند ظروف تشغيل مختلفة ومتنوعة .

ويختص الفصل الأخير من الكتاب بتجفيف المنتجات الزراعية بالطاقة الشمسية . ونظرًا لأهمية هذا الموضوع وإمكانية استخدامه بسهولة وتقنية بسيطة وانخفاض التكلفة فإنه يمكن الاستفادة منه في الكثير من البلدان العربية لتوفير الطاقة التقليدية لأغراض صناعية أخرى . ويقدم الفصل هذا الموضوع بالتفصيل الكافي لمساعدة القارئ في إعداد ما يحتاجه من تصميمات ودراسات أولية ، دون الحاجة إلى الرجوع إلى مراجع أخرى إضافية . يبدأ الفصل بعرض لخواص الهواء الرطب وعملية انتقال الكتلة بالانتشار فقط أو بالانتشار والحمل بدون أو مع انتقال الحرارة . يستعرض الفصل بعد ذلك محتوى الرطوبة بالمنتجات الزراعية المختلفة والخواص الحرارية لهذه المواد . ثم يقدم الفصل شرحًا مبسطًا – دون الإخلال بالمبادئ الأساسية – ميكانيكا التجفيف وأهم نظم التجفيف الشائع استخدامها . ينتهي هذا الفصل بتقديم النماذج الحسابية اللازمة لتصميم هذه النظم .

تم في هذا الكتاب الاستفادة بجزء من المادة العلمية لبعض الفصول التي أعدت باللغة الإنجليزية ضمن كتاب آخر يشترك فيه المؤلف الرئيسي ، وعنوانه :

Design of Solar Thermal Systems

by : Moustafa M. Elsayed, Ibrahim S. Taha, and Jafar A. Sabbagh

والكتاب تم نشره بمركز النشر العلمي – جامعة الملك عبدالعزيز . وقد روعي عند الاستفادة بالمادة العلمية لبعض فصول الكتاب السابق هنا تنقيحها وإضافة الجديد في هذا الموضوع . وفي بعض الأحيان تم حذف أجزاء بأكملها وإضافة أجزاء أخرى، والمواضيع المشتركة في بعض الأجزاء بين الكتابين هي المواضيع الموجودة في الفصول : الثاني ، والرابع ، والعاشر ، والحادي عشر ، والثاني عشر . ولقد تم

تدريس معظم فصول الكتاب لطلاب قسم الهندسة الميكانيكية مرحلة البكالوريوس في عدة فصول دراسية .

ويشمل الكتاب الحالي العديد من الأمثلة المحلولة التي تساعد على عمق الفهم والتمرين. ولقد رُوعِيَ عند وضع هذه الأمثلة السهولة والتبسيط ما أمكن لتحقيق الغرض منها . كما يشمل الكتاب الحالي أيضًا مسائل لتدريب القارئ في نهاية كل فصل من فصول الكتاب . ويمكن استخدام الكتاب كمرجع دراسي لمقررين أو ثلاثة لمادة الطاقة الشمسية لطلاب السنة النهائية بقسم الميكانيكا بكليات الهندسة ، وطلاب الدراسات العليا . كما يمكن الاستعانة ببعض أجزاء الكتاب ضمن أي مقرر لتحويل الطاقة أو بدائل الطاقة لمستوى طلاب البكالوريوس أو الدراسات العليا . ويُسْتَخْدَم الكتاب أيضًا كمرجع للمهندسين الميكانيكيين العاملين في مجال النظم الحرارية الشمسية حيث يستفاد من الكتاب في أغراض تصميم هذه النظم أو التنبؤ بأدائها عند ظروف تشغيل مختلفة عن ظروف التصميم ، أو صيانة هذه النظم بعد فهم نظرية عملها .

أُعِدَ الكتاب الحالي باستخدام النظام الدولي للوحدات ، وهو نظام الوحدات التي تحاول جميع الدول استخدامه حاليًا في العلوم الهندسية . واستخدم المؤلفون الرموز اللاتينية واليونانية المتفق عليها دوليًا للدلالة على المتغيرات المختلفة وذلك بغرض ربط القارئ بالأصول العلمية المعدة باللغة الإنجليزية أصلاً ، دون جهد من جهة القارئ في هذه الناحية . ولقد قام المؤلفون بتجميع المادة العلمية من العديد من الكتب التي أعدت في هذا الموضوع باللغة الإنجليزية بالإضافة إلى العديد من المقالات العلمية المتخصصة المنشورة في أمهات المجلات العلمية الخاصة بالطاقة الشمسية ، كما هو موضح في قائمة المراجع بنهاية كل فصل من فصول الكتاب .

ويقدم المؤلفون شكرهم للعديد ممن كان لهم الفضل – بعد الله جل شأنه – في المساعدة على اتمام هذا الكتاب . ويخص المؤلفون بالذكر مركز التعريب التقني بكلية الهندسة بجامعة الملك عبدالعزيز الذي قدم الدعم المادي والأدبي لإتمام هذا الكتاب . كما يشكر المؤلفون المهندس / شكري جلال لإعداده رسومات الكتاب والمهندس / ناهل أحمد عبدالعزيز لنسخ متن الكتاب .

وإننا إذ نقدم هذ الجهد المتواضع قربى إلى الله عز وجل ، نسأله سبحانه أن ينفع به طلاب ومهندسي تطبيقات الطاقة الشمسية ، آملين أن يحقق الكتاب الغرض الذي أعد من أجله ، ألا وهو مرضاة الله .

المؤلفون

مصطفى محمد السيد

قدري أحمد فتحي

إبراهيم السعيد مجاهد

جدة : ديسمبر ١٩٨٩

المحتويات

الفصل الأول ، الطاقة الشمسية وتطبيقاتها الحرارية

١.١ نبذة تاريخية عن الطاقة الشمسية ١

١.٢ مصادر الطاقة التقليدية ٢

١.٣ التطبيقات الحرارية للطاقة الشمسية ٣

١.٣.١ تسخين الماء بالطاقة الشمسية ٣

١.٣.٢ تدفئة المباني بالطاقة الشمسية ٦

١.٣.٣ التسخين الشمسي لحمامات السباحة ٧

١.٣.٤ تنقية المياه الملحة ٨

١.٣.٥ النظم الشمسية لتوليد القدرة الكهربائية ١٠

١.٣.٦ التبريد الشمسي ١٢

١.٣.٧ التجفيف الشمسي ١٥

١.٣.٨ البرك الشمسية ١٧

١.٣.٩ أبراج الاستقبال المركزية ١٨

مراجع الفصل الأول ٢١

الفصل الثاني ، الإشعاع الشمسي

٢.١ مقدمة ٢٣

٢.٢ الزوايا الشمسية ٢٣

٢.٢.١ زوايا الموقع ٢٥

٢.٢.٢ زوايا الوقت ٢٥
٢.٢.٣ زوايا الشمس ٣٠
٢.٢.٤ زوايا السطح المستقبل ٣٢
٢.٢.٥ زاوية سقوط الأشعة الشمسية ٣٢
٢.٣ الإشعاع الشمسي خارج الأرض ٣٦
٢.٣.١ الثابت الشمسي ٣٦
٢.٣.٢ الطيف الشمسي ٣٧
٢.٣.٣ الإشعاعية الشمسية خارج الأرض على سطح أفقي ٣٨
٢.٤ تضعيف الغلاف الجوي للإشعاع الشمسي ٤٠
٢.٥ قياسات الإشعاع الشمسي ٤١
٢.٥.١ أجهزة قياس الإشعاع الشمسي ٤١
٢.٥.٢ أجهزة قياس سطوع الشمس ٤٤
٢.٦ تقدير الإشعاع الشمسي الذي يستقبله سطح أفقي ٤٥
٢.٦.١ نماذج السماء الصحو ٤٥
٢.٦.٢ نماذج تعتمد على القياسات الشمسية المحلية ٥٠
٢.٦.٢.١ نماذج لحساب الإشعاع الساعي ٥١
٢.٦.٢.٢ نماذج لحساب الإشعاع اليومي ٥٦
٢.٦.٢.٣ نماذج لحساب المتوسط الشهري للإشعاع اليومي ٥٩
٢.٧ تقدير الإشعاع الشمسي على سطح مائل ٦١
مفتاح رموز الفصل الثاني ٦٨
تمارين الفصل الثاني ٦٩
مراجع الفصل الثاني ٧٢

الفصل الثالث . أسس انتقال الحرارة

٣.١ مقدمة ٧٥
٣.٢ انتقال الحرارة بالتوصيل ٧٦

٣.٢.١ قانون فوريه للتوصيل الحراري ٧٦
٣.٢.٢ التوصيل الحراري المستقر في حائط مستو ٧٦
٣.٢.٣ الحوائط المركبة ٧٧
٣.٢.٤ مقاومة التماس ٨١
٣.٣ انتقال الحرارة بالحمل ٨٢
٣.٤ انتقال الحرارة بالإشعاع ٨٥
٣.٥ انتقال الحرارة في الأسطح الممتدة (الزعانف) ٨٨
٣.٦ العلاقات المعملية للحمل الحراري ٩٤
٣.٦.١ علاقات الحمل القسري ٩٤
٣.٦.٢ علاقات الحمل الحر ٩٧
٣.٧ بعض العلاقات الهامة لانتقال الحرارة بالإشعاع ١٠١
٣.٧.١ الإشعاع الصادر من الأجسام المختلفة ١٠١
٣.٧.٢ استقبال الأجسام للإشعاع ١٠٦
٣.٧.٣ قانون كيرشوف ١٠٦
٣.٧.٤ الأسطح الانتقائية ١٠٨
٣.٧.٥ معامل الشكل ١١٠
٣.٧.٦ إيجاد معامل الشكل باستخدام طريقة الخيوط المتقاطعة ١١٧
٣.٧.٧ تبادل الإشعاع بين الأجسام السوداء ١١٨
٣.٧.٨ تبادل الإشعاع بين الأجسام الرمادية المعتمة ١٢٣
مفتاح رموز الفصل الثالث ١٣٠
تمارين الفصل الثالث ١٣٢
مراجع الفصل الثالث ١٣٤

الفصل الرابع ، الخواص الإشعاعية للأسطح والألواح

٤.١ مقدمة ١٣٥
٤.٢ الخواص الإشعاعية للأسطح والمواد ١٣٦

٤.٣ الخواص الإشعاعية المؤثرة للوح منفذ ١٣٩
٤.٤ الخواص الإشعاعية المؤثرة لمجموعة ألواح منفذة ١٤٣
٤.٥ الخواص الإشعاعية لسطح معتم ١٤٨
٤.٦ الخواص الإشعاعية المؤثرة لسطح معتم مغطى بمجموعة ألواح منفذة ١٤٩
٤.٧ زاوية السقوط المؤثرة للإشعاع المنتشر ١٥٣
٤.٨ الأسطح الانتقائية ١٥٥
٤.٨.١ السطح المنفذ الانتقائي ١٥٦
٤.٨.٢ السطح المعتم الإنتقائي ١٥٨
٤.٩ الأسطح العاكسة ١٦٤
٤.١٠ الكفاءة الضوئية لمجمعات السطح المستوى ١٦٥
مفتاح رموز الفصل الرابع ١٦٧
تمارين الفصل الرابع ١٦٩
مراجع الفصل الرابع ١٧٠

الفصل الخامس : مجمعات السطح المستوى

٥.١ مقدمة ١٧١
٥.٢ معاملات الفقد الحراري من المجمع ١٧٣
٥.٢.١ المعامل الخلفي لانتقال الحرارة ١٧٤
٥.٢.٢ المعامل الجانبي لانتقال الحرارة ١٧٦
٥.٢.٣ المعامل العلوي لانتقال الحرارة ١٧٨
٥.٢.٤ المعامل الكلي للفقد الحراري ١٨٦
٥.٣ كفاءة السطح الماص ١٨٩
٥.٣.١ كفاءة الزعنفة ١٩٠
٥.٣.٢ معامل الكفاءة للسطح الماص ١٩٤
٥.٤ معامل نقل الحرارة ١٩٧
٥.٥ درجة الحرارة المتوسطة للسطح الماص ٢٠١

٥.٦ كفاءة المجمع ٢٠٣
٥.٧ اختبار المجمعات الشمسية ٢٠٦
٥.٧.١ اختبارات الأداء الحراري ٢٠٦
٥.٧.٢ اختبارات التحمل ٢٠٧
مفتاح رموز الفصل الخامس ٢٠٨
تمارين الفصل الخامس ٢٠٩
مراجع الفصل الخامس ٢١٢

الفصل السادس : مجمعات التركيز الشمسي

٦.١ مقدمة ٢١٥
٦.٢ التركيز ٢١٥
٦.٣ الأداء الحراري لمجمعات التركيز الشمسي ٢١٨
٦.٤ المركزات الخطية ٢٢١
٦.٤.١ الخواص البصرية للمركزات الخطية ٢٢١
٦.٤.٢ ضبط المجمع لتتبع حركة الشمس ٢٢٧
٦.٥ مجمعات عدسات فرينل ٢٣٦
٦.٥.١ الوضع شرق – غرب ٢٣٨
٦.٥.٢ الوضع شمال – جنوب ٢٣٨
٦.٦ مجمعات القطع المكافئ الأخدودية ٢٣٨
٦.٦.١ الوضع شرق – غرب ٢٣٩
٦.٦.٢ الوضع شمال – جنوب ٢٤٠
٦.٧ مجمعات المرايا المجزأة ٢٤٣
٦.٨ المجمعات الطبقية ٢٤٥
٦.٩ منظومات المستقبل المركزي ٢٤٥
مفتاح رموز الفصل السادس ٢٤٧
تمارين الفصل السادس ٢٤٨
مراجع الفصل السادس ٢٥٠

الفصل السابع ، تخزين الطاقة الشمسية

٧.١ مقدمة ٢٥٣
٧.٢ تخزين الطاقة في أنظمة الطاقة الشمسية ٢٥٣
٧.٢.١ طرق التخزين ٢٥٣
٧.٢.٢ خصائص التخزين ٢٥٤
٧.٢.٣ كفاءة التخزين ٢٥٦
٧.٣ التخزين الحراري للطاقة الشمسية ٢٥٧
٧.٣.١ التخزين في السوائل ٢٥٧
٧.٣.٢ التخزين في المواد الصلبة ٢٦٢
٧.٣.٣ التخزين بتحويل حالة المادة ٢٦٩
٧.٤ طرق التخزين الكيماوية ٢٧٢
٧.٤.١ التفاعلات العكسية ٢٧٢
٧.٤.٢ التخزين في المراكم ٢٧٣
٧.٤.٣ طاقة هيدوجين الماء ٢٧٣
٧.٥ طرق التخزين الميكانيكية ٢٧٧
مفتاح رموز الفصل السابع ٢٨٠
تمارين الفصل السابع ٢٨١
مراجع الفصل السابع ٢٨٤

الفصل الثامن ، سخانات الماء الشمسية

٨.١ مقدمة ٢٨٥
٨.٢ طريقة خارطة $-f$ ٢٨٦
٨.٣ نظرية أداء المجمعات المستوية ٢٨٧
٨.٤ قياس أداء المجمعات المستوية ٢٩٠
٨.٥ تصحيح F_R نتيجة وجود المبادل الحراري ٢٩٢
٨.٦ حساب الإشعاع على سطح مائل ٢٩٤
٨.٧ حساب المتوسط الشهري لقيمة $(\tau\alpha)$ ٣٠٣

٨.٨ الحمل الحراري المطلوب لتسخين المياه ٣١٣
٨.٩ الأداء طويل المدى للمجمعات المستوية ٣١٦
٨.٩.١ تعديل المتغير X في حالة نظم تسخين المياه ٣١٨
٨.٩.٢ تأثير تغير معدل سريان مائع التجميع على أداء
النظم الشمسية لتسخين المياه ٣٢٠
٨.٩.٣ تأثير التغير في حجم خزان الطاقة ٣٢٣
مفتاح رموز الفصل الثامن ٣٢٥
تمارين الفصل الثامن ٣٢٧
مراجع الفصل الثامن ٣٢٩

الفصل التاسع : التدفئة باستخدام الطاقة الشمسية

٩.١ مقدمة ٣٣١
٩.٢ ظروف تصميم نظم التدفئة ٣٣٢
٩.٢.١ الظروف الداخلية ٣٣٢
٩.٢.٢ الظروف الخارجية ٣٣٣
٩.٣ حمل التسخين للتدفئة ٣٣٣
٩.٣.١ الفقدالحراري ٣٣٤
٩.٣.٢ الحرارة المتولدة ٣٣٧
٩.٤ درجة حرارة نقطة الاتزان ٣٣٩
٩.٥ حساب حمل التدفئة باستعمال طريقة الدرجة – يوم ٣٤٣
٩.٦ نظم التدفئة الشمسية ٣٥٠
٩.٦.١ نظم السوائل ٣٥١
٩.٦.٢ نظم الهواء ٣٥٤
٩.٧ تقويم أداء نظم التدفئة الشمسية باستخدام طريقة خارطة – f ٣٥٧
٩.٧.١ نظم السوائل ٣٥٧
٩.٧.٢ نظم الهواء ٣٦٣
مفتاح رموز الفصل التاسع ٣٧١

تمارين الفصل التاسع ٣٧٣
مراجع الفصل التاسع ٣٧٦

الفصل العاشر : نظم التبريد الشمسي غير الميكانيكي

١٠.١ مقدمة ٣٧٧
١٠.٢ الدورة الأساسية للتبريد بالامتصاص ٣٧٨
١٠.٣ الشروط الواجب توافرها في المحلول الثنائي للعمل بدورة التبريد بالامتصاص ٣٨١
١٠.٤ دورة التبريد بالامتصاص باستخدام محلول بروميد الليثيوم والماء ٣٨١
١٠.٥ دورة التبريد بالامتصاص باستخدام محلول الأمونيا والماء ٣٩٢
١٠.٦ تأثير عوامل التشغيل المختلفة على أداء دورة التبريد بالامتصاص باستخدام محلول بروميد الليثيوم والماء ٤٠٤
١٠.٧ الحد الأعلى والحد الأدنى لقيمة معامل الأداء للدورة اللاانعكاسية للتبريد بالامتصاص ٤٠٩
١٠.٨ اختيار المحلول الثنائي المناسب للتشغيل الشمسي لدورة التبريد بالامتصاص ٤١١
١٠.٩ نظم التشغيل الشمسي لدورة التبريد بالامتصاص ٤١٤
١٠.١٠ تقويم نظم التشغيل الشمسي لدورة التبريد بالامتصاص ٤٢٢
١٠.١٠.١ النسبة الحرارية للنظام ٤٢٢
١٠.١٠.٢ المساحة النوعية للمجمع الشمسي ٤٢٣
١٠.١١ استخدام دورتين متتاليتين للتبريد بالامتصاص ٤٢٤
١٠.١٢ دورة التبريد بالامتصاص ذات المرحلتين ٤٢٧
١٠.١٣ تصميم دورات التبريد بالامتصاص للتشغيل الشمسي ٤٣١
١٠.١٤ التشغيل الشمسي لدورة التبريد المتقطع بالامتصاص ٤٣٩
١٠.١٤.١ وصف الدورة ٤٣٩
١٠.١٤.٢ التحليل الحراري للدورة ٤٤٢

١٠.١٤.٣ التشغيل الشمسي للدورة ٤٥٠

١٠.١٥ التشغيل الشمسي للتبريد وتكييف الهواء بالتجفيف والترطيب ٤٥١

١٠.١٥.١ وصف النظام ٤٥١

١٠.١٥.٢ التحليل الحراري للمجفف ٤٥٣

١٠.١٥.٣ بعض المعادلات المساعدة ٤٥٦

مفتاح رموز الفصل العاشر ٤٥٨

تمارين الفصل العاشر ٤٥٩

مراجع الفصل العاشر ٤٦١

الفصل الحادي عشر : توليد القدرة باستخدام الطاقة الشمسية

١١.١ مقدمة ٤٦٥

١١.٢ الدورات الديناميكية الحرارية المستخدمة في النظم الشمسية لتوليد القدرة ٤٦٦

١١.٢.١ دورة رانكن المثالية ٤٦٧

١١.٢.٢ دورة رانكن المطورة ٤٦٨

١١.٢.٣ دورة برايتون المثالية ٤٧٢

١١.٢.٤ دورة سترلنج ٤٧٣

١١.٣ دورة رانكن الشمسية ٤٧٨

١١.٣.١ اختيار مائع التشغيل ٤٧٩

١١.٣.٢ النموذج الحسابي لدورة رانكن الشمسية ٤٨٠

١١.٤ الدورات الأخرى المستخدمة لتوليد القدرة باستخدام الطاقة الشمسية ٤٨٧

١١.٤.١ تخزين الطاقة الشمسية ٤٨٧

١١.٤.٢ استعمال الدورات المختلطة ٤٨٩

١١.٤.٣ استخدام دورة برايتون ٤٩٠

١١.٥ استخدام أبراج الاستقبال المركزية ٤٩١

١١.٥.١ تركيب المرايا ٤٩٤

١١.٥.٢ زوايا ميل المرايا ٥٠٤
١١.٥.٣ حساب حجم المستقبل ٥٠٧
١١.٥.٤ أنواع المستقبلات ٥١٣
١١.٥.٥ أبراج الاستقبال المركزية المستعملة ٥١٣
مفتاح رموز الفصل الحادي عشر ٥١٣
تمارين الفصل الحادي عشر ٥١٦
مراجع الفصل الحادي عشر ٥١٨

الفصل الثاني عشر : إعذاب المياه بالطاقة الشمسية

١٢.١ مقدمة ٥٢١
١٢.٢ نبذة عن المقطرات الشمسية الصندوقية وطرق بنائها ٥٢٣
١٢.٣ إنتاجية المقطر الشمسي الصندوقي ٥٢٦
١٢.٤ التحليل الحراري للمقطر الصندوقي ٥٢٨
١٢.٤.١ المعادلات الحاكمة لأداء المقطر الصندوقي ٥٢٨
١٢.٤.٢ حساب معادلات انتقال الحرارة بين سطح الماء والغطاء ٥٣٠
١٢.٤.٣ حساب معدلات الحرارة المفقودة من الغطاء إلى الجو المحيط ٥٣٢
١٢.٤.٤ حساب معدلات الحرارة المفقودة من جسم المقطر والمضافة إلى التغذية ٥٣٣
١٢.٤.٥ كفاءة المقطر الصندوقي ٥٣٤
١٢.٤.٦ أداء المقطر الصندوقي المثالي ٥٣٥
١٢.٥ التنبؤ بأداء المقطر الصندوقي الشمسي ٥٣٩
١٢.٦ استخدام الحاسب الآلي للتنبؤ بأداء المقطر الصندوقي ٥٤٢
١٢.٧ استخدام خريطة مورس وريد للتنبؤ بأداء المقطر الصندوقي ٥٤٣
١٢.٨ تأثير العوامل المختلفة على أداء المقطرات الشمسية الصندوقية ٥٥٠

١٢.٩ بعض التصميمات المختلفة للمقطرات الشمسية ٥٥٢
١٢.٩.١ المقطر ثنائي القاعدة ٥٥٢
١٢.٩.٢ المقطر الصندوقي المدرج ٥٥٢
١٢.٩.٣ مقطر فتيل التجميع والتبخير ٥٥٣
١٢.٩.٤ المقطر التعاقبي ٥٥٦
١٢.٩.٥ المقطر الصندوقي ذو الغطاء المبرد ٥٥٦
١٢.٩.٦ المقطر المائل ثنائي التأثير ٥٥٨
١٢.١٠ مقدمة عن انتشار الكتلة ٥٥٩
١٢.١١ التحليل الحراري للمقطر الانتشاري ٥٦٢
١٢.١٢ المقطرات الانتشارية متعددة التأثيرات ٥٦٩
١٢.١٣ التحليل الحراري للمقطر الإنتشاري متعدد التأثيرات ٥٧١
١٢.١٤ أداء المقطر الإنتشاري متعدد التأثيرات ٥٧٤
١٢.١٥ مقارنة أداء المقطر الصندوقي بأداء المقطر الإنتشاري أحادي التأثير ٥٧٦
مفتاح رموز الفصل الثاني عشر ٥٨٤
تمارين الفصل الثاني عشر ٥٨٦
مراجع الفصل الثاني عشر ٥٩٠

الفصل الثالث عشر . البرك الشمسية

١٣.١ مقدمة ٥٩٣
١٣.٢ اتزان طبقة اللاحمل ٥٩٥
١٣.٣ ملء البرك الشمسية ٦٠٢
١٣.٤ صيانة تدرج الملوحة في البرك الشمسية ٦٠٤
١٣.٥ النموذج الرياضي الذي يحكم تدرج الملوحة ٦٠٩
١٣.٦ النموذج الرياضي الذي يحكم انتقال الحرارة في البرك الشمسية ٦١٢
١٣.٦.١ الافتراضات التي بني عليها النموذج الرياضي ٦١٤

١٣.٦.٢ حساب الإشعاع الشمسي الواصل إلى الطبقات المختلفة من البركة ٦١٥
١٣.٦.٣ خواص الماء الملح والتربة ٦١٧
١٣.٦.٤ النموذج الرياضي لانتقال الحرارة المستقر في بركة شمسية ٦١٨
١٣.٦.٥ نتائج النموذج المستقر لانتقال الحرارة في البرك الشمسية ٦٢١
١٣.٦.٦ النموذج الرياضي غير المستقر وحله ٦٢٧
١٣.٧ استخلاص الحرارة من البرك الشمسية ٦٢٩
١٣.٨ تثبيط الحمل في الطبقة السطحية ٦٣٢
مفتاح رموز الفصل الثالث عشر ٦٣٥
تمارين الفصل الثالث عشر ٦٣٧
مراجع الفصل الثالث عشر ٦٣٧

الفصل الرابع عشر، تجفيف المنتجات الزراعية

١٤.١ مقدمة ٦٣٩
١٤.٢ خواص الهواء الرطب ٦٤٠
١٤.٣ انتقال الكتلة بالانتشار ٦٤٦
١٤.٣.١ قانون فيك ومعادلة الاستمرار ٦٤٦
١٤.٣.٢ انتشار الكتلة في جسم مستو ٦٤٨
١٤.٣.٣ انتشار الكتلة في جسم أسطواني ٦٥٢
١٤.٣.٤ انتشار الكتلة في جسم كروي ٦٥٥
١٤.٤ انتقال بخار الماء من سطح التجفيف إلى سريان من الهواء ٦٥٧
١٤.٥ معامل انتقال الكتلة لبخار الماء في الهواء ٦٦١
١٤.٦ التناظر بين انتقال الكتلة وانتقال الحرارة ٦٦٤
١٤.٧ انتقال الكتلة مع انتقال الحرارة ٦٧٠
١٤.٨ محتوى الرطوبة في المواد الرطبة ٦٧٣

١٤.٨.١ تعريف محتوى الرطوبة ٦٧٣
١٤.٨.٢ طرق قياس محتوى الرطوبة لجسم رطب ٦٧٤
١٤.٨.٣ محتوى الرطوبة التعادلي ٦٧٥
١٤.٩ خواص المواد الرطبة ٦٨١
١٤.١٠ ميكانيكا التجفيف ٦٩٠
١٤.١١ حساب زمن التجفيف ومعدل تغير محتوى الرطوبة المتوسط مع الزمن ٦٩٤
١٤.١١.١ نموذج الطبقة الرقيقة ٦٩٦
١٤.١١.٢ نموذج الفرشة العميقة ٦٩٩
١٤.١٢ انخفاض الضغط لسريان الهواء خلال فرشة من المحاصيل الزراعية ٧٠٥
١٤.١٣ المتغيرات التي تؤثر في زمن وعملية التجفيف ٧٠٦
١٤.١٤ نظم التجفيف ٧٠٩
١٤.١٥ النماذج الحسابية لنظم التجفيف ٧١٢
١٤.١٥.١ مجفف الفرشة العميقة ٧١٣
١٤.١٥.٢ مجفف السريان المواز ٧١٦
١٤.١٥.٣ مجفف السريان المعاكس ٧١٧
مفتاح رموز الفصل الرابع عشر ٧١٨
تمارين الفصل الرابع عشر ٧٢١
مراجع الفصل الرابع عشر ٧٢٣

الملاحـــق

ملحق أ : دوال إشعاع الجسم الأسود ٧٢٧
ملحق ب : موقع ودرجات حرارة الجو الخارجي لبعض المدن العربية والعالمية ٧٢٩
ملحق جـ : خواص الهواء والماء ٧٣٧
ملحق د : بعض الدوال الرياضية ٧٤٥

ملحق هـ : أسماء بعض المنتجات الزراعية باللغة الإنجليزية ،
ومحتوى الرطوبة التعادلي لبعض المحاصيل الزراعية ٧٥١
ملحق و : المصطلحات التقنية ٧٥٩
أ. ترتيب أبجدي عربي ٧٦٠
ب. ترتيب أبجدي إنجليزي ٧٦٩