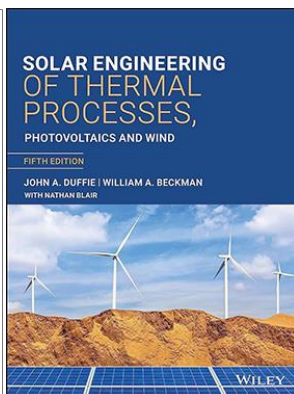
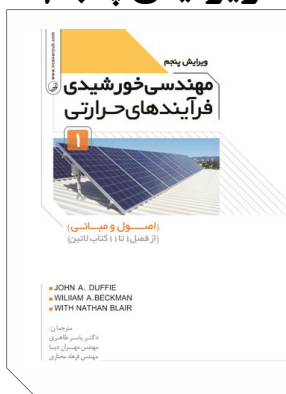




مهندسی خورشیدی فرآیندهای حرارتی (۱)

اصول و مبانی
(از فصل ۱ تا ۱۱ کتاب لاتین)

ویرایش پنجم



- JOHN A. DUFFIE
- WILLIAM A. BECKMAN
- WITH NATHAN BLAIR

مترجمان:

دکتر یاسر طاهری

(دکتری مهندسی مکانیک-تبدیل انرژی)

مهندس مهراں دیبا

مهندس فرهاد مختاری



دافی، جان ا، ۱۹۲۵ - م. Duffie, John A.
 مهندسی خورشیدی فرآیندهای حرارتی ۱ (اصول و مبانی از فصل ۱ تا ۱۱ کتاب لاتین)
 ویراست ۲
 تهران: نوآور.
 ۴۵۰ ص.
 ۹۷۸-۶۰۰-۱۶۸-۲۳۵-۳
 فیبا
 فهرست نویسی کامل این اثر در نشانی: <http://opac.nlai.ir> قابل دسترسی است
 کتاب حاضر ترجمه فصول ۱ تا ۱۱ از ویرایش پنجم کتاب " processes thermal Solar engineering of " است.
 بکمن، ویلیام ا، ۱۹۳۵ - م.
 Beckman, William A.
 WITH NATHAN BLAIR
 طاهری، یاسر، ۱۳۶۳ - مترجم
 دیبا، مهران، ۱۳۶۴ - مترجم
 مختاری، فرهاد، ۱۳۶۵ - مترجم
 ۲۸۵۲۴۷۰ شماره کتابشناسی ملی:

سرشناسه:
 عنوان و نام پدیدآور:
 وضعیت ویراست:
 مشخصات نشر:
 مشخصات ظاهری:
 شابک:
 وضعیت فهرست نویسی:
 یادداشت:
 یادداشت:
 شناسه افزوده:
 شناسه افزوده:
 شناسه افزوده:
 شناسه افزوده:
 شناسه افزوده:
 شناسه افزوده:
 شماره کتابشناسی ملی:

مهندسی خورشیدی فرآیندهای حرارتی (۱)

مترجمان: دکتر یاسر طاهری - مهندس مهران دیبا
 مهندس فرهاد مختاری
 ناشر: نوآور
 شمارگان: ۱۰۰۰ نسخه
 شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۱۶۸-۲۳۵-۳



نشر نوآور

مرکز پخش:

نوآور، تهران، خیابان انقلاب، خیابان فخررازی، خیابان شهدای
 ژاندارمری نرسیده به خیابان دانشگاه ساختمان ایرانیان، پلاک ۵۸
 طبقه اول، واحد ۳ تلفن: ۹۲-۶۶۴۸۴۱۹۱, www.noavarpub.com

کلیه حقوق چاپ و نشر این کتاب مطابق با قانون حقوق مؤلفان و
 مصنفان مصوب سال ۱۳۴۸ برای ناشر محفوظ و منحصراً متعلق به نشر
 نوآور می باشد. لذا هر گونه استفاده از کل یا قسمتی از این کتاب (از قبیل
 هر نوع چاپ، فتوکپی، اسکن، عکس برداری، نشر الکترونیکی، هر نوع
 انتشار به صورت اینترنتی، سی دی، دی وی دی، فیلم فایل صوتی یا
 تصویری و غیره) بدون اجازه کتبی از نشر نوآور ممنوع بوده و شرعاً حرام
 است و متخلفین تحت پیگرد قانونی قرار می گیرند.

فهرست مطالب

اصول..... ۱۰

فصل اول / تابش خورشیدی..... ۱۱

۱-۱- خورشید ۱۱

۱-۲- ثابت خورشیدی ۱۳

۱-۳- توزیع طیفی تابش در بیرون از جو زمین ۱۴

۱-۴- تغییر تابش خارج از جو زمین ۱۶

۱-۵- تعاریف ۱۷

۱-۶- جهت تابش مستقیم ۲۰

۱-۷- زوایای ردیابی سطوح ۲۷

۱-۸- نسبت تابش مستقیم بر روی سطح شیبدار به تابش مستقیم بر روی سطح افقی ۳۰

۱-۹- سایه ۳۶

۱-۱۰- تابش خارج از جو زمین بر روی یک سطح افقی ۴۳

۱-۱۱- خلاصه مطالب ۴۶

فصل دوم / تابش خورشیدی قابل دریافت ۴۹

۲-۱- تعاریف ۴۹

۲-۲- گرماسنج‌ها و مقیاس‌های گرماسنجی ۵۰

۲-۳- پیرانومترها ۵۴

۲-۴- اندازه‌گیری مدت زمان تابش خورشید ۵۹

۲-۵- داده‌های تابش خورشیدی ۶۰

۲-۶- تضعیف اتمسفری تابش خورشیدی ۶۳

۲-۷- تخمین تابش خورشیدی متوسط ۷۱

۲-۸- تخمین تابش آسمان صاف ۷۴

۲-۹- توزیع ساعت‌ها و روزهای صاف و ابری ۷۷

۲-۱۰- مؤلفه مستقیم و پراکنده تابش ساعتی ۸۰

۲-۱۱- مؤلفه‌های مستقیم و پراکنده تابش روزانه ۸۳

۲-۱۲- مؤلفه‌های مستقیم و پراکنده تابش ماهیانه ۸۴

۲-۱۳- تخمین تابش ساعتی از داده‌های روزانه ۸۶

۲-۱۴- تابش بر روی سطوح شیبدار ۸۹

- ۹۴..... ۱۵-۲- تابش بر روی سطوح شیبدار: آسمان ایزوتروپیک
- ۹۵..... ۱۶-۲- تابش بر روی سطوح شیبدار: آسمان غیرایزوتروپیک
- ۱۰۰..... ۱۷-۲- تقویت تابش
- ۱۰۴..... ۱۸-۲- تابش مستقیم بر روی سطوح متحرک
- ۱۰۵..... ۱۹-۲- تابش متوسط بر روی سطوح شیبدار: آسمان ایزوتروپیک
- ۱۰۹..... ۲۰-۲- تابش متوسط بر روی سطوح شیبدار: روش KT
- ۱۱۳..... ۲۱-۲- اثرات جهت‌گیری سطح دریافت‌کننده بر \bar{H}_T
- ۱۱۵..... ۲۲-۲- قابلیت بهره‌برداری
- ۱۱۹..... ۲۳-۲- قابلیت بهره‌برداری کلی
- ۱۲۶..... ۲۴-۲- قابلیت بهره‌برداری روزانه
- ۱۳۲..... ۲۵-۲- خلاصه مطالب

فصل سوم / عناوین برگزیده از انتقال حرارت ۱۳۵.....

- ۱۳۵..... ۱-۳- طیف الکترومغناطیسی
- ۱۳۶..... ۲-۳- تابش فوتونی
- ۱۳۶..... ۳-۳- جسم سیاه: جاذب و منتشرکننده‌ی کامل
- ۱۳۷..... ۴-۳- قانون پلانک و قانون جابجایی وین
- ۱۳۸..... ۵-۳- معادله‌ی استفان - بولتزمن
- ۱۳۹..... ۶-۳- جدول‌های تابشی
- ۱۴۱..... ۷-۳- شدت تابش و شار
- ۱۴۳..... ۸-۳- تبادل تابش مادون قرمز بین سطوح خاکستری
- ۱۴۴..... ۹-۳- تابش آسمان
- ۱۴۵..... ۱۰-۳- ضریب انتقال حرارت تابشی
- ۱۴۵..... ۱۱-۳- همرفت آزاد بین صفحات موازی تخت و بین سیلندرها هم‌مرکز
- ۱۵۰..... ۱۲-۳- توقف همرفت
- ۱۵۳..... ۱۳-۳- محفظه‌های موج‌دار V شکل
- ۱۵۴..... ۱۴-۳- روابط انتقال حرارت برای جریان داخلی
- ۱۵۸..... ۱۵-۳- ضرایب همرفت باد
- ۱۶۰..... ۱۶-۳- انتقال حرارت و افت فشار در بسترهای آکنده و صفحات سوراخ‌دار
- ۱۶۲..... ۱۷-۳- محاسبات ضریب کارایی - NTU برای مبدل‌های حرارتی
- ۱۶۴..... ۱۸-۳- خلاصه مطالب

فصل چهارم / مشخصه‌های تابشی مواد تیره ۱۶۶.....

۱۶۷	۱-۴- ضریب جذب و ضریب انتشار.....
۱۶۸	۲-۴- قانون کیرشهف.....
۱۶۹	۳-۴- ضریب بازتاب سطوح.....
۱۷۳	۴-۴- روابط بین ضریب جذب، ضریب انتشار، و ضریب بازتاب.....
۱۷۴	۵-۴- ضریب انتشار و ضریب جذب پهن باند.....
۱۷۵	۶-۴- محاسبات ضریب انتشار و ضریب جذب.....
۱۷۸	۷-۴- اندازه‌گیری خصوصیات تابشی سطح.....
۱۷۹	۸-۴- سطوح انتخابی.....
۱۸۴	۹-۴- سازوکار انتخاب.....
۱۸۸	۱۰-۴- خصوصیات بهینه.....
۱۸۹	۱۱-۴- وابستگی زاویه‌ای ضریب جذب خورشیدی.....
۱۸۹	۱۲-۴- ضریب جذب گیرنده‌های محفظه.....
۱۹۰	۱۳-۴- سطوح بازتابنده آینه‌ای.....
۱۹۲	۱۴-۴- تحلیل انتقال حرارت تابشی پیشرفته.....
۱۹۳	۱۵-۴- خلاصه مطالب.....

فصل پنجم / عبور تابش از طریق قاب شیشه‌ای: تابش جذب‌شده..... ۱۹۵

۱۹۵	۱-۵- بازتاب تابش.....
۱۹۸	۲-۵- جذب قاب شیشه‌ای.....
۱۹۹	۳-۵- خصوصیات نوری سیستم‌های پوشش.....
۲۰۳	۴-۵- ضریب عبور برای تابش پراکنده.....
۲۰۴	۵-۵- حاصلضرب ضریب عبور- ضریب جذب.....
۲۰۵	۶-۵- وابستگی زاویه‌ای ($\tau\alpha$).....
۲۰۶	۷-۵- وابستگی طیفی ضریب عبور.....
۲۰۹	۸-۵- اثرات لایه‌های سطح بر روی ضریب عبور.....
۲۱۰	۹-۵- تابش خورشیدی جذب شده.....
۲۱۳	۱۰-۵- متوسط ماهیانه تابش جذب شده.....
۲۱۸	۱۱-۵- ضریب جذب فضاها.....
۲۲۰	۱۲-۵- ضریب جذب سلول‌های فتوولتاییک.....
۲۲۳	۱۳-۵- خلاصه مطالب.....

فصل ششم / کلکتورهای صفحه تخت..... ۲۲۵

۲۲۶	۱-۶- تشریح کلکتورهای صفحه تخت.....
-----	------------------------------------

۲۲۶	۲-۶- معادلات اساسی موازنه انرژی صفحه تخت
۲۲۷	۳-۶- توزیع دمایی در کلکتورهای صفحه تخت
۲۲۹	۴-۶- ضریب اتلاف حرارتی کلی کلکتور
۲۴۰	۵-۶- توزیع دما بین لوله‌ها و ضریب بازدهی کلکتور
۲۴۶	۶-۶- توزیع دمایی در جهت جریان
۲۴۷	۷-۶- ضریب تفکیک حرارتی و ضریب جریان کلکتور
۲۵۰	۸-۶- سطح تابش بحرانی
۲۵۱	۹-۶- دماهای متوسط سیال و صفحه
۲۵۲	۱۰-۶- حاصلضرب ضریب عبور- ضریب جذب مؤثر
۲۵۵	۱۱-۶- اثرات گرد و خاک و سایه
۲۵۶	۱۲-۶- اثرات ظرفیت گرمایی در کلکتورهای صفحه تخت
۲۵۸	۱۳-۶- هندسه‌های صفحه مایع گرمکن
۲۶۳	۱۴-۶- هوا گرمکن‌ها
۲۶۹	۱۵-۶- اندازه‌گیری کارایی کلکتور
۲۷۰	۱۶-۶- تعیین مشخصه‌های کلکتور
۲۷۱	۱۷-۶- آزمایشات کلکتور: راندمان، اصلاح‌کننده زاویه برخورد، و ثابت زمانی
۲۸۰	۱۸-۶- داده‌های آزمایش
۲۸۳	۱۹-۶- تبدیل داده‌های آزمایش حرارتی
۲۸۶	۲۰-۶- اصلاحات نرخ جریان نسبت به $FR(\tau\alpha)_n$ و $F_R U_L$
۲۸۸	۲۱-۶- توزیع جریان در کلکتورها
۲۹۰	۲۲-۶- کارایی کلکتور در محل
۲۹۰	۲۳-۶- ملاحظات عملی برای کلکتورهای صفحه تخت
۲۹۴	۲۴-۶- قرار دادن همه آن‌ها کنار هم
۲۹۹	۲۵-۶- خلاصه مطالب

فصل هفتم / کلکتورهای متمرکز

۳۰۱	۱-۷- پیکربندی‌های کلکتور
۳۰۴	۲-۷- نسبت تمرکز
۳۰۶	۳-۷- کارایی حرارتی کلکتورهای متمرکز
۳۱۱	۴-۷- کارایی نوری کلکتورهای متمرکز
۳۱۳	۵-۷- چیدمان‌های جاذب استوانه‌ای
۳۱۵	۶-۷- مشخصه‌های نوری متمرکزکننده‌های بدون تصویر
۳۲۲	۷-۷- جهت‌گیری و انرژی جذب شده برای کلکتورهای CPC

۳۲۶	۸-۷- کارایی کلکتورهای CPC
۳۲۷	۹-۷- متمرکزکننده‌های تصویری خطی: هندسه
۳۳۱	۱۰-۷- تصاویر ایجاد شده توسط متمرکزکننده‌های خطی کامل
۳۳۵	۱۱-۷- تصاویری از متمرکزکننده‌های خطی غیرکامل
۳۳۷	۱۲-۷- روش‌های ردیابی پرتو برای ارزیابی متمرکزکننده‌ها
۳۳۸	۱۳-۷- اصلاح‌کننده‌های زاویه برخورد و موازنه انرژی
۳۴۳	۱۴-۷- متمرکزکننده‌های سهموی شکل
۳۴۴	۱۵-۷- کلکتورهای با دریافت‌کننده مرکزی
۳۴۵	۱۶-۷- ملاحظات عملی
۳۴۷	۱۷-۷- خلاصه مطالب

فصل هشتم / ذخیره‌سازی انرژی

۳۴۸	۱-۸- بارهای فرآیند و خروجی‌های کلکتور خورشیدی
۳۴۹	۲-۸- ذخیره‌سازی انرژی در سیستم‌های حرارتی خورشیدی
۳۵۰	۳-۸- ذخیره‌سازی آب
۳۵۱	۴-۸- طبقه‌بندی در مخازن ذخیره‌سازی
۳۵۴	۵-۸- ذخیره‌سازی با بستر متراکم
۳۶۰	۶-۸- دیوارهای ذخیره‌سازی
۳۶۷	۷-۸- ذخیره‌سازی فصلی
۳۶۹	۸-۸- ذخیره‌سازی انرژی تغییر فاز
۳۷۱	۹-۸- ذخیره‌سازی انرژی شیمیایی
۳۷۶	۱۰-۸- ذخیره‌سازی باتری
۳۷۷	۱۱-۸- ذخیره‌سازی برق آبی و هوای فشرده
۳۸۱	۱۲-۸- خلاصه مطالب

فصل نهم / بارهای فرآیند خورشیدی

۳۸۶	۱-۹- نمونه‌هایی از بارهای وابسته به زمان
۳۸۷	۲-۹- بارهای آبگرم
۳۸۸	۳-۹- بارهای گرمایشی فضا، روزها- درجه و دمای تعادل
۳۸۹	۴-۹- ضرایب اتلاف ساختمان
۳۹۲	۵-۹- ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی ساختمان
۳۹۴	۶-۹- بارهای سرمایشی
۳۹۴	۷-۹- بارهای گرمایشی استخر

۳۹۷..... ۸-۹- خلاصه مطالب

فصل دهم / محاسبات حرارتی سیستم..... ۳۹۹

- ۴۰۰..... ۱-۱۰- مدل‌های مولفه
- ۴۰۱..... ۲-۱۰- ضریب مبدل حرارتی کلکتور
- ۴۰۳..... ۳-۱۰- ضرایب اتلاف داکت و لوله
- ۴۰۵..... ۴-۱۰- کنترل‌ها
- ۴۰۷..... ۵-۱۰- چیدمان‌های کلکتور: اتصالات سری
- ۴۰۹..... ۶-۱۰- کارایی کلکتورهای سایه‌دار شده بصورت جزئی
- ۴۱۱..... ۷-۱۰- چیدمان‌های سری با بخش‌های دارای جهت‌گیرهای مختلف
- ۴۱۳..... ۸-۱۰- استفاده از معادلات تصحیح شده کلکتور
- ۴۱۶..... ۹-۱۰- مدل‌های سیستم
- ۴۱۸..... ۱۰-۱۰- کسر خورشیدی و کسر صرفه‌جویی خورشیدی
- ۴۱۹..... ۱۱-۱۰- خلاصه مطالب

فصل یازدهم / علم اقتصاد فرآیند خورشیدی..... ۴۲۲

- ۴۲۳..... ۱-۱۱- هزینه‌های سیستم‌های فرآیند خورشیدی
- ۴۲۶..... ۲-۱۱- متغیرهای طراحی
- ۴۲۷..... ۳-۱۱- شاخص‌های مزیت اقتصادی
- ۴۳۰..... ۴-۱۱- کاهش قیمت و تورم
- ۴۳۲..... ۵-۱۱- ضریب ارزش فعلی
- ۴۳۴..... ۶-۱۱- روش صرفه‌جویی چرخه عمر
- ۴۳۸..... ۷-۱۱- ارزیابی سایر شاخص‌های اقتصادی
- ۴۴۱..... ۸-۱۱- روش P_1, P_2
- ۴۴۶..... ۹-۱۱- عدم قطعیت‌ها در تحلیل‌های اقتصادی
- ۴۴۸..... ۱۰-۱۱- تحلیل اقتصادی با استفاده از کسر صرفه‌جویی خورشیدی
- ۴۴۸..... ۱۱-۱۱- خلاصه مطالب

نشر نوآور ضمن ارج نهادن و قدردانی از اعتماد شما به کتاب‌های این انتشارات، به استحضارتان می‌رساند که همکاران این انتشارات، اعم از مؤلفان و مترجمان و کارگروه‌های مختلف آماده‌سازی و نشر کتاب، تمامی سعی و همت خود را برای ارائه کتابی درخور و شایسته شما فرهیخته گرامی به کار بسته‌اند و تلاش کرده‌اند که اثری را ارائه نمایند که از حداقل‌های استاندارد یک کتاب خوب، هم از نظر محتوایی و غنای علمی و فرهنگی و هم از نظر کیفیت شکلی و ساختاری آن، برخوردار باشد.

با این وجود، علی‌رغم تمامی تلاش‌های این انتشارات برای ارائه اثری با کمترین اشکال، باز هم احتمال بروز ایراد و اشکال در کار وجود دارد و هیچ اثری را نمی‌توان الزاماً مبراً از نقص و اشکال دانست. از سوی دیگر، این انتشارت بنابه تعهدات حرفه‌ای و اخلاقی خود و نیز بنابه اعتقاد راسخ به حقوق مسلم خوانندگان گرامی، سعی دارد از هر طریق ممکن، به‌ویژه از طریق فراخوان به خوانندگان گرامی، از هرگونه اشکال احتمالی کتاب‌های منتشره خود آگاه شده و آن‌ها را در چاپ‌ها و ویرایش‌های بعدی آن‌ها رفع نماید.

لذا در این راستا، از شما فرهیخته گرامی تقاضا داریم در صورتی که حین مطالعه کتاب، با غلط‌های محتوایی و املائی برخورد نمودید، لطفاً این موارد را در کتاب و یا برگه جداگانه‌ای یادداشت نمایید و به صورت عکس، به همراه ذکر نام و شماره تماس خود، از طریق منوی بالای سایت نوآور، قسمت پشتیبانی (تیکت) و یا اسکن کردن بارکد زیر به واحد علمی ارسال نمایید، تا این موارد بررسی شده و در چاپ‌ها و ویرایش‌های بعدی کتاب، اعمال و اصلاح گردد و باعث هرچه پربارتر شدن محتوای کتاب و ارتقاء سطح کیفی، شکلی و ساختاری آن گردد.

نشر نوآور، ضمن ابراز امتنان از این عمل متعهدانه و مسئولانه شما خواننده فرهیخته و گرانقدر، به منظور تقدیر و تشکر از این همدلی و همکاری علمی و فرهنگی، پس از بررسی کارشناسان نوآور، در صورتی که اصلاحات درست و بجا باشد، متناسب با میزان موارد ارسال شده، به رسم ادب و قدرشناسی، کد تخفیفی جهت خرید کتاب‌های نشر نوآور به شما ارائه می‌شود. همچنین نشر نوآور و پدیدآورندگان کتاب، از هرگونه پیشنهادهای، نظرات، انتقادات و راه‌کارهای شما عزیزان در راستای بهبود کتاب، و هرچه بهتر شدن سطح کیفی و علمی آن صمیمانه و مشتاقانه استقبال می‌نمایند.

در همین راستا از طریق پشتیبانی سایت (تیکت) با ما در ارتباط باشید.



نشر نوآور

تلفن: ۰۲-۶۶۴۸۴۱۹۱

www.noavarpub.com

info@noavarpub.com

@Noavarpub_com



صفحه رسمی انتشارات نوآور در اینستاگرام

اصول

در بخش اول با نظریه‌های اصولی و مراحل انجام محاسبات سروکار داریم، که بایستی به منظور درک چگونگی عملکرد فرآیندهای خورشیدی و پیش‌بینی کارایی آن‌ها دریافت شوند. پنج بخش اول مبنایی برای مطالب فصل شش می‌باشند. در فصل شش معادلاتی را برای یک کلکتور ارائه می‌دهیم که خروجی مفید را بصورت عبارات مرتبط با تابش خورشیدی و تلفات بیان می‌کند. یک موازنه انرژی ارائه می‌شود که بطور کلی انرژی مفید دریافتی را بصورت اختلاف (مثبت) بین انرژی خورشیدی جذب شده و تلفات حرارتی بیان می‌کند.

فصل اول مربوط به ماهیت تابش منتشر شده توسط خورشید و برخورد آن به جو زمین است. این فصل شامل بررسی‌های هندسی یعنی جهتی که از آن تابش مستقیم خورشیدی دریافت می‌شود و زاویه‌ی برخورد آن بر روی سطوح مختلف و مقدار تابش دریافتی در محدوده‌های زمانی مختلف می‌باشد. فصل بعدی اثرات جو بر روی تابش خورشیدی، داده‌های تابشی موجود، و چگونگی پردازش این داده‌ها و تبدیل آن‌ها به اطلاعاتی که نهایتاً خواستار آن می‌باشیم و تابش برخوردی بر روی سطوح با جهت‌گیری‌های مختلف را در برمی‌گیرد.

فصل سوم به مجموعه‌ای از مسائل انتقال حرارت ناشی از فرآیندهای انرژی خورشیدی اشاره دارد که به عنوان بخشی از مبنای تحلیل کلکتورها، واحدهای ذخیره و دیگر اجزا می‌باشند. دو فصل بعدی مربوط به فعل و انفعالات تابش و مواد مات و شفاف است که شامل انتشار، جذب، انعکاس و عبور تابش خورشیدی و تابش موج بلند می‌باشد. این ۵ فصل ابتدایی به فصل ۶ منجر می‌شود، که بحث کلی و تحلیل کارایی کلکتورهای صفحه تخت در این فصل بیان می‌گردد. در فصل ۷ کلکتورهای متمرکز و در فصل ۸ ذخیره‌ی انرژی در محیط‌های مختلف بررسی می‌شوند. فصل ۹ بحث مختصری است از بارهای تحمیلی بر روی فرآیندهای خورشیدی و انواع اطلاعاتی که برای تحلیل فرآیند بایستی شناخته شوند.

در فصل ۱۰ مباحث مربوط به مؤلفه‌های منحصربه‌فرد باهم ارائه می‌شوند تا چگونگی کارکرد سیستم‌های فرآیند خورشیدی و طریقه‌ی تعیین کارایی طولانی‌مدت آن‌ها از طریق شبیه‌سازی را نشان دهند. هدف، توانایی در پیش‌بینی کارایی سیستم است، این نقطه‌ای است که در آن از مؤلفه‌ها به سمت سیستم پیش می‌رویم و می‌بینیم که چگونه رفتار سیستم گذرا را می‌توان محاسبه نمود.

آخرین فصل بخش اول در مورد مسائل اقتصادی مربوط به فرآیندهای خورشیدی است. این بخش شامل روشی است برای ترکیب تعداد زیادی از پارامترهای اقتصادی به صورت دو پارامتر که می‌توانند در بهینه‌سازی طراحی حرارتی و ارزیابی اثرات عدم قطعیت در یک تحلیل اقتصادی به کار گرفته شوند.

فصل اول

تابش خورشیدی

ساختار و مشخصه‌های مربوط به خورشید، تعیین‌کننده‌ی ماهیت انرژی است که به فضا می‌تاباند. اولین موضوع اصلی در این فصل به مشخصه‌های این انرژی در خارج از جو زمین، شدت آن و توزیع طیفی آن مربوط می‌شود. در ابتدا با تابشی در محدوده طول موج ۰/۲۵ تا ۳ میکرومتر برخورد می‌کنیم، بخشی از تابش الکترومغناطیس که بیشتر انرژی تابش شده توسط خورشید را دربر می‌گیرد.

دومین موضوع اصلی در این فصل هندسه خورشیدی است، یعنی موقعیت خورشید در آسمان، جهتی که در آن جهت تابش مستقیم بر روی سطوحی با جهات مختلف برخورد می‌کند و سایه. موضوع سوم، مسئله‌ی تابش خارج از جو زمین روی سطوح افقی است، که نشان‌دهنده‌ی حد بالای تئوری تابش خورشیدی موجود در سطح زمین است.

درک ماهیت تابش خارج از جو زمین، اثرات جهت‌گیری یک سطح دریافت‌کننده، و تابش تئوری احتمالی در سطح زمین، در درک و به‌کارگیری داده‌های تابش خورشیدی دارای اهمیت می‌باشند، که موضوع فصل ۲ می‌باشد.

۱-۱- خورشید

خورشید کره‌ای از ماده‌ی گازی به شدت داغ با قطر 1.39×10^9 متر است و بطور متوسط از زمین 1.5×10^{11} متر فاصله دارد. همانطور که از زمین دیده می‌شود، خورشید هر ۴ هفته یکبار حول محورش دوران می‌کند. هرچند مثل یک جسم جامد دوران نمی‌کند؛ هر دوران استوا در حدود ۲۷ روز و نواحی قطبی در حدود ۳۰ روز طول می‌کشد.

خورشید دارای یک دمای مؤثر جسم سیاه به مقدار ۵۷۷۷ کلوین می‌باشد.^۱ دما در نواحی داخلی مرکزی به طور مختلف از 8×10^6 تا 40×10^6 کلوین و چگالی در حدود ۱۰۰ برابر آب تخمین زده

۱. دمای مؤثر جسم سیاه در ۵۷۷۷K دمایی می‌باشد که در آن جسم سیاه مقدار انرژی برابر با انرژی خورشید ساطع می‌کند. دماهای مؤثر دیگر نیز می‌توانند تعریف شوند، بعنوان مثال دمایی مطابق با دمای جسم سیاه که ارائه دهنده طول موجی مشابه حداکثر تابش با تابش خورشیدی است (در حدود ۶۳۰۰K)

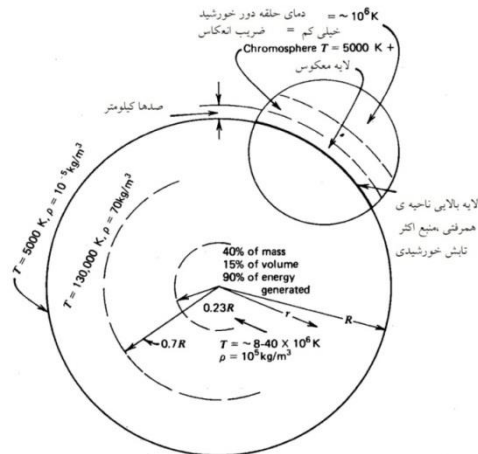
می‌شود. خورشید در واقع یک راکتور هم‌جوش پیوسته است که گازهای تشکیل دهنده آن به عنوان "ظرف حاوی" از طریق نیروهای گرانشی حفظ می‌شوند. چندین فعل و انفعال هم‌جوش برای تأمین انرژی تابیده شده توسط خورشید پیشنهاد شده است. یکی از آن‌ها که به عنوان مهمترین فعل و انفعال در نظر گرفته می‌شود، فرآیندی است که در آن هیدروژن (یعنی ۴ پروتون) ترکیب می‌شود تا هلیوم را شکل دهند (یعنی یک هسته‌ی هلیوم)؛ جرم هسته‌ی هلیوم کمتر از جرم هسته‌ی ۴ پروتون است، جرم در خلال فعل و انفعال از بین رفته و به انرژی تبدیل می‌شود.

انرژی تولیدی در بخش داخلی کره‌ی خورشیدی در دمای چند میلیون درجه، بایستی به سطح منتقل و سپس به داخل فضا تابش شود. توالی فرآیندهای تابشی و همرفتی با انتشار، جذب و تابش مجدد متوالی رخ می‌دهد؛ تابش در هسته‌ی خورشید در بخش‌های اشعه‌ی x و گامای طیف است، با افزایش طول موج‌های تابش زمانیکه دما در فواصل شعاعی بزرگتر کاهش می‌یابد.

یک ساختار شماتیکی از خورشید در شکل ۱،۱،۱ نشان داده شده است. تخمین زده می‌شود که ۹۰٪ انرژی، در ناحیه‌ی ۰ تا ۰/۲۳R تولید می‌گردد (R شعاع خورشید است)، که شامل ۴۰٪ جرم خورشید می‌باشد. در فاصله‌ی ۰/۷R از مرکز، دما تا حدود ۱۳۰۰۰۰ کلوین و چگالی تا ۷۰ kg/m³ افت می‌کند؛ در اینجا فرآیندهای همرفت دارای اهمیت می‌شوند، و ناحیه‌ی مربوط به ۰/۷ تا ۱/۰R به عنوان ناحیه‌ی همرفتی شناخته می‌شود. در داخل این ناحیه، دما تا حدود ۵۰۰۰ کلوین و چگالی تا حدود ۱۰^{-۵} kg/m³ افت می‌کند.

به نظر می‌رسد که سطح خورشید از دانه‌هایی تشکیل شده است (سلول‌های همرفتی نامنظم)، که ابعادی از ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰ کیلومتر دارند و عمر هر سلول چند دقیقه است. سایر مشخصه‌های سطح خورشید، نواحی تیره‌ی کوچکی هستند که روزنه نامیده می‌شوند، که از نظر اندازه هم‌مرتبه‌ی سلول‌های همرفت می‌باشند، و نواحی تیره‌ی بزرگتر که لکه‌ی روی خورشید نامیده می‌شوند، اندازه‌ای متغیر دارند. لایه‌ی خارجی ناحیه‌ی همرفت، فوتوسفر (photosphere) نامیده می‌شود. اگرچه این لایه چگالی کمی دارد، اما لبه فوتوسفر به وضوح مشخص است (در حدود ۱۰^{-۴} که هوا در سطح دریا است). زمانی که گازهای تشکیل دهنده‌ی این قسمت شدیداً یونیزه شده و قادر به جذب و انتشار طیف پیوسته‌ای از تابش باشند، این ناحیه اساساً مات است. فوتوسفر، منبع اکثر تابش خورشیدی است.

در خارج از قسمت فوتوسفر، جو خورشیدی کم و بیش شفاف وجود دارد، که در مدت خورشید گرفتگی کامل یا توسط ابزارهایی که قرص خورشید را پنهان می‌کنند، قابل رویت است. در بالای قسمت فوتوسفر، لایه‌ای از گازهای خنک‌تر در عمق چند صد کیلومتری وجود دارد که لایه‌ی معکوس نامیده می‌شود. در خارج از آن لایه‌ای با نام کروموسفر (chromosphere) وجود دارد که عمقش ۱۰۰۰۰ کیلومتر است. این یک لایه‌ی گازی با دمایی بالاتر از دمای ناحیه‌ی فوتوسفر است، اما چگالی پایین‌تری دارد. لایه‌ی بیرونی‌تر هاله نام دارد، ناحیه‌ای با چگالی بسیار کم و دمای خیلی بالا (۱۰^۶ کلوین). برای اطلاعات بیشتر در مورد ساختار خورشید، نوشته‌های Thomas (۱۹۵۸) و Robinson (۱۹۶۶) را مشاهده نمایید.



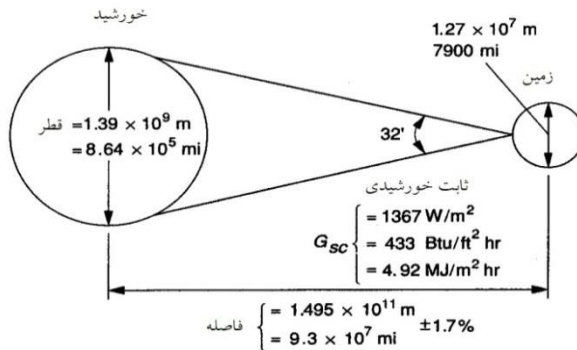
شکل ۱،۱،۱ ساختار خورشید.

این تصویر ساده‌شده از خورشید، ساختار فیزیکی آن، تغییرات دما و چگالی آن به عنوان مبنایی برای درک این مطلب است که خورشید در واقع، به عنوان تابنده‌ی جسم سیاه در دمای ثابت، عمل نمی‌کند. بلکه تابش خورشیدی منتشر شده، نتیجه‌ی ترکیبی از لایه‌های متعددی است که تابش با طول موج‌های مختلف را منتشر و جذب می‌کنند. تابش خورشیدی حاصل در خارج از جو زمین و توزیع طیفی آن، در حال حاضر توسط روش‌های مختلف در چندین آزمایش اندازه‌گیری شده است؛ در دو بخش زیر به این نتایج اشاره شده است.

۱-۲- ثابت خورشیدی

شکل ۱،۲،۱ به طور شماتیکی نشان دهنده‌ی هندسه‌ی مربوط به رابطه‌ی خورشید - زمین است. گریز از مرکز مدار زمین به اندازه‌ای است که فاصله‌ی بین زمین و خورشید $1/7\%$ تغییر می‌کند. در فاصله‌ی یک واحد نجومی، 1.496×10^{11} متر متوسط فاصله‌ی زمین و خورشید، خورشید به زاویه‌ی $32'$ می‌رسد. تابش منتشر شده توسط خورشید و رابطه‌ی فضایی آن با زمین، منجر به یک شدت تقریباً ثابتی از تابش خورشیدی در خارج از جو زمین می‌گردد. ثابت خورشیدی، G_{sc} ، انرژی دریافتی از خورشید به ازای واحد زمان در یک واحد سطح عمود بر جهت انتشار تابش در فاصله‌ی متوسط زمین و خورشید در خارج از جو می‌باشد.

قبل از راکت‌ها و سفینه‌ها، تخمین‌های ثابت خورشیدی بایستی از اندازه‌گیری‌های زمینی تابش خورشیدی بعد از انتقال تابش از طریق جو صورت می‌گرفت، بنابراین تابش خورشیدی تا حدی توسط اتمسفر جذب و پراکنده می‌شود. برون‌یابی از اندازه‌گیری‌های زمینی صورت گرفته از کوه‌های مرتفع، بر مبنای تخمین‌های انتقال اتمسفر در بخش‌های مختلفی از طیف خورشیدی می‌باشد. مطالعات اولیه در این مورد، توسط C.G. Abbot و همکارانش در مؤسسه‌ی Smithsonian انجام گرفته است. این مطالعات و اندازه‌گیری‌های بعدی از راکت‌ها توسط Johnson (۱۹۵۴) خلاصه شده است؛ مقدار ثابت خورشیدی پیشنهادی Abbot، توسط Johnson، به مقدار 1395 W/m^2 بازنگری شد.



شکل ۱.۲.۱ روابط خورشید-زمین.

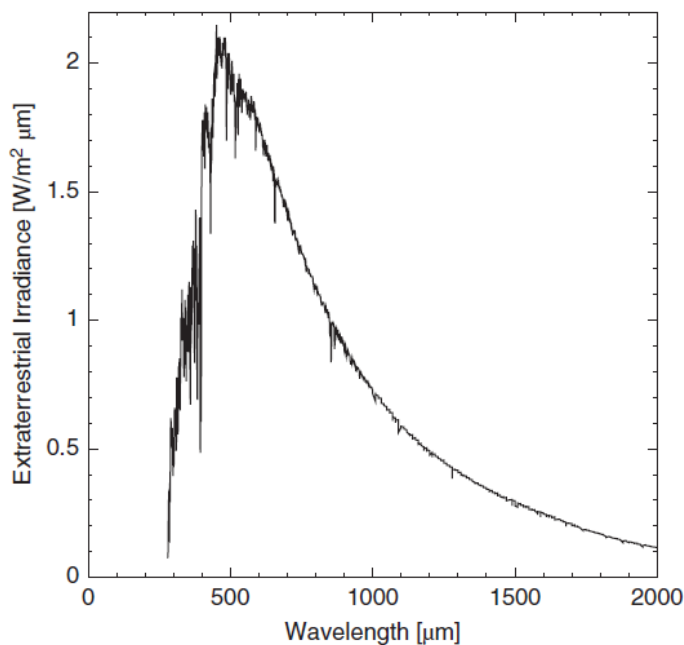
با در دسترس بودن هواپیما، بالن‌ها، و سفینه با ارتفاع بسیار بالا، اندازه‌گیری‌های مستقیم از تابش خورشیدی در خارج از اکثر یا تمامی جو زمین میسر گردید. این اندازه‌گیری‌ها توسط ابزارهای مختلفی در ۹ برنامه‌ی آزمایشگاهی جدا از هم صورت گرفت. نتیجه‌ی به دست آمده برای ثابت خورشیدی G_{sc} با خطای تخمینی $\pm 1/5\%$ به مقدار 1353 W/m^2 منجر شد. برای بحث در مورد این نتایج آزمایشگاهی، نوشته‌های Thekaekara (۱۹۷۶) یا Thekaekara و Drummand (۱۹۷۱) را مشاهده نمایید. این مقدار استاندارد توسط NASA (۱۹۷۱) و انجمن تست و مواد آمریکا (۲۰۰۶) پذیرفته شده است. داده‌های بر مبنای مقدار 1353 W/m^2 ، مجدداً توسط Forhlich (۱۹۷۷) مورد آزمایش قرار گرفته و بر اساس مقایسه‌ی ابزارها با رادیومترهای مطلق، به یک مقیاس گرماسنجی جدید^۱ کاهش یافته است. داده‌های به دست آمده از سفینه‌های Nimbus و Mariner نیز در تحلیل به کار گرفته شدند، و از سال ۱۹۷۸، Forhlich مقدار جدید 1373 W/m^2 را برای ثابت خورشیدی با خطای احتمالی ۱ تا ۲ درصد پیشنهاد نمود. این مقدار، $1/5\%$ بیشتر از مقدار اولیه و $1/2\%$ بیشتر از بهترین ثابت خورشیدی موجود می‌باشد که از طریق انتگرال‌گیری اندازه‌گیری‌های طیفی به دست آمده است. اندازه‌گیری‌های اضافی سفینه که توسط Hickey و همکارانش (۱۹۸۲) صورت گرفته است، مقدار 1373 W/m^2 و همکارانش (۱۹۸۱) مقدار 1368 W/m^2 را برای ثابت خورشیدی گزارش نمودند. اندازه‌گیری‌های گزارش شده از سه پرواز موشکی توسط Duncan و همکارانش (۱۹۸۲)، مقدار 1367 ، 1372 و 1374 W/m^2 را برای ثابت خورشیدی پیشنهاد نمودند. مرکز تابش جهانی (WRC) مقدار 1367 W/m^2 را برای این ثابت با عدم قطعیتی از مرتبه $1/1\%$ برگزید. همانطور که در فصل ۲ مشاهده خواهد شد، عدم قطعیت در اکثر اندازه‌گیری‌های تابش خورشیدی زمینی، از نظر مرتبه نسبت به G_{sc} بزرگتر است. در این کتاب مقدار G_{sc} ، 1367 W/m^2 (Gueymard (۲۰۱۸) $433 \text{ Btu/ft}^2\text{h}$ یا $4.92 \text{ MJ/m}^2\text{h}$) مورد استفاده قرار می‌گیرد. (۲۰۱۸) ۴۲ سال داده‌ها و تحلیل‌ها را مورد بررسی قرار داد و مقدار $1366/1 \text{ W/m}^2$ را پیشنهاد نمود، که در حدود $0/4\%$ کمتر از مقدار مورد استفاده در اینجا است. این تفاوت تاثیر قابل توجهی بر نتایج نخواهد داشت.

۱-۳- توزیع طیفی تابش در بیرون از جو زمین

علاوه بر دانستن انرژی کل در طیف خورشیدی (یعنی ثابت خورشیدی)، دانستن توزیع طیفی تابش در

۱. مقیاس‌های گرماسنجی در بخش ۲.۲ بحث شده است.

بیرون از جو زمین مفید است، یعنی تابشی که در غیاب جو دریافت می‌شود. در این رابطه یک منحنی استاندارد درخشندگی طیفی بر مبنای اندازه‌گیری‌های ارتفاع بالا و تبیین شده است. استاندارد SMART در شکل ۱،۳،۱ نشان داده شده است. جدول ۱،۳،۱ اطلاعات مشابه با طیف SMART را به صورت عددی ارائه می‌دهد. انرژی متوسط $G_{sc,\lambda}$ (با واحد $W/m^2\mu m$) روی پهنای باند کوچک در مرکز طول موج λ در ستون دوم ارائه شده است. کسر $f_{0,\lambda}$ از انرژی کل در طیفی بین طول موج صفر و λ در ستون سوم آمده است. جدول به صورت دو بخش است، اولی با بازه‌های زمانی منظم از طول موج و دومی به صورت کسرهای زوج $f_{0,\lambda}$ می‌باشند. این جدول به صورت فشرده ارائه و جداول دقیق‌تر در جاهای دیگری در دسترس می‌باشند (Iqbal ۱۹۸۳ و Gueymard ۲۰۱۸ را مشاهده نمایید).



شکل ۱،۳،۱ درخشندگی طیفی خارج از جو زمین در فاصله متوسط زمین - خورشید.

مثال ۱،۳،۱: کسر تابش خورشیدی در خارج از جو زمین و نیز مقدار آن تابش را در بخشی‌هایی از طیف ماوراء بنفش ($\lambda < 0.38\mu m$)، مرئی ($0.38\mu m < \lambda < 0.78\mu m$) و مادون قرمز ($\lambda > 0.78\mu m$) محاسبه نمایید.

راه‌حل: از جدول ۱،۳،۱، کسرهای $f_{0,\lambda}$ مربوط به طول موج‌های 0.38 و 0.78 میکرومتر، 0.064 و 0.547 است. بنابراین کسر ماوراء بنفش 0.064 ، کسر در محدوده‌ی مرئی $0.430 = 0.547 - 0.064$ ، و در مادون قرمز $0.453 = 1 - 0.547$ می‌باشد. با اعمال این کسرها به ثابت خورشیدی با مقدار $1367 W/m^2$ و جدول‌بندی نتایج داریم:

$0.78 - \infty$	$0.38 - 0.78$	$0 - 0.38$	محدوده طول موج (μm)
0.453	0.483	0.064	کسر در محدوده مورد نظر
619	660	87	انرژی در محدوده مورد نظر (W/m^2)