

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



سامانه‌های تقطیر خورشیدی پیشرفته

اصول، مدل‌سازی حرارتی و کاربردهای آن

جی، ان تایواری - لودیپ ساهوتا

ترجمه:

دکتر مهدی هدایتی‌زاده

استادیار دانشکده کشاورزی دانشگاه بیرجند

سرشناسه:	تیواری، جی. ان، ۱۹۱۵ - م.	Tiwari, G. N.
عنوان و نام پدیدآور:	سامانه‌های تقطیر خورشیدی پیشرفته: اصول، مدل‌سازی حرارتی و کاربردهای آن/ جی.ان. تایواری، لودیپ ساهوتا؛ ترجمه مهدی هدایتی زاده؛ ویراستار علمی اسمعیل محمودی؛ ویراستار ادبی لیلا بخت‌آور.	
مشخصات نشر:	مشهد: دانشگاه فردوسی مشهد، انتشارات، ۱۴۰۲.	
مشخصات ظاهری:	۵۰۴ ص.: مصور، جدول، نمودار.	
فروست:	انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد؛ ۹۰۲.	
شابک:		ISBN: 978-964-386-597-9
وضعیت فهرست‌نویسی:	فیپا.	
یادداشت:	عنوان اصلی:	Advanced Solar-Distillation Systems : Basic Principles, Thermal Modeling, and Its Application,c2017
یادداشت:	کتابنامه. نمایه.	
عنوان دیگر:	اصول، مدل‌سازی حرارتی و کاربردهای آن.	
موضوع:	سیستم‌های انرژی مهندسی حرارت گرما -- انتقال جرم (فیزیک) -- انتقال انرژی‌های پایان‌ناپذیر ترمودینامیک آب، منابع	Energy systems Heat engineering Heat -- Transmission Mass transfer Renewable energy sources Thermodynamics Water-supply Sahota, Lovedeep
شناسه افزوده:	ساهوتا، لودیپ	
شناسه افزوده:	هدایتی‌زاده، مهدی، ۱۳۶۲ - ، مترجم	
شناسه افزوده:	محمودی، اسمعیل، ۱۳۶۲ - ، ویراستار	
شناسه افزوده:	دانشگاه فردوسی مشهد، انتشارات.	
رده‌بندی کنگره:	۶۲۱/۰۴۲	
رده‌بندی دیوینی:	TJ۸۰۸	
شماره کتابشناسی ملی:	۹۴۴۵۶۹۹	

سامانه‌های تقطیر خورشیدی پیشرفته؛ اصول، مدل‌سازی حرارتی و کاربردهای آن

پدیدآورندگان: جی، ان تایواری؛ لودیپ ساهوتا
ترجمه: دکتر مهدی هدایتی‌زاده
ویراستار علمی: دکتر اسمعیل محمودی
ویراستار ادبی: لیلا بخت‌آور
مشخصات: وزیری، ۲۰۰ نسخه، چاپ اول، زمستان ۱۴۰۲
چاپ و صحافی: چاپخانه دقت
بها: ۳/۳۰۰/۰۰۰ ریال
حق چاپ برای انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد محفوظ است.

مراکز پخش:

فروشگاه و نمایشگاه کتاب پردیس: مشهد، میدان آزادی، دانشگاه فردوسی مشهد، جنب سلف یاس
تلفن: ۳۸۸۳۳۷۲۷ - ۳۸۸۰۲۶۶۶ (۰۵۱)
مؤسسه کتابیران: تهران، میدان انقلاب، خیابان کارگر جنوبی، بین روانمهر و وحید نظری، بن‌بست
گشتاسب، پلاک ۸ تلفن: ۶۶۴۸۴۷۱۵ (۰۲۱)
مؤسسه دانشیران: تهران، خیابان انقلاب، خیابان منیری جاوید (اردیبهشت) نبش خیابان نظری، شماره ۱۴۲
تلفکس: ۶۶۴۰۰۲۲۰ - ۶۶۴۰۰۱۴۴ (۰۲۱)

<http://press.um.ac.ir>

Email: press@um.ac.ir



تقدیم به همسر عزیزم
و فرزندان مهربانم

press.um.ac.ir

فهرست مطالب

پیشگفتار نویسندگان.....	۱۳
پیشگفتار مترجم.....	۱۷
درباره نویسندگان.....	۱۹
مقادیر تقریبی برخی از ثابت‌های به کاررفته در سامانه‌های انرژی خورشیدی.....	۲۱
فصل ۱. کلیات.....	۲۳
۱-۱ پیشینه و اهمیت آب شرب.....	۲۳
۲-۱ کیفیت آب شرب.....	۲۴
۳-۱ افزایش تقاضا برای آب آشامیدنی.....	۲۵
۴-۱ کمبود آب شرب.....	۲۶
۱-۴-۱ بحران جهانی آب شرب.....	۲۷
۵-۱ آلودگی جهانی آب.....	۳۰
۶-۱ عوامل آلودگی آب و تأثیرات آن بر سلامتی بشر.....	۳۳
۷-۱ نمک‌زدایی و ضرورت آن.....	۴۱
۱-۷-۱ آب شور.....	۴۲
۲-۷-۱ نمک‌زدایی.....	۴۲
۳-۷-۱ برخی از واقعیت‌های مربوط به نمک‌زدایی در سطح دنیا.....	۴۵
۸-۱ فناوری‌های نمک‌زدایی.....	۴۶
۱-۸-۱ فناوری‌های غشایی.....	۴۶
۲-۸-۱ فناوری‌های حرارتی.....	۵۱
۳-۸-۱ فناوری‌های جایگزین.....	۵۴
۹-۱ فناوری‌های ساده.....	۵۹
۱۰-۱ مبانی سامانه تقطیر خورشیدی.....	۶۴
۱-۱۰-۱ مشکلات مربوط به نصب سامانه‌های تقطیر خورشیدی در مقیاس بزرگ.....	۶۷
۲-۱۰-۱ محدودیت‌های استفاده از سامانه تقطیر خورشیدی.....	۶۷
۳-۱۰-۱ پرکردن و نگهداری از سامانه‌های تقطیر خورشیدی.....	۶۸
۴-۱۰-۱ خلوص و کیفیت آب حاصل از سامانه‌های تقطیر خورشیدی.....	۶۸
۵-۱۰-۱ سلامت آب شرب برای نوشیدن.....	۶۹

۶۹	۶-۱۰-۱ تعیین انرژی موردنیاز برای تقطیر
۷۰	۷-۱۰-۱ مزایا و معایب اصلی تقطیر خورشیدی
۷۰	۸-۱۰-۱ استفاده از آب شرب
۷۱	۹-۱۰-۱ عوامل تأثیرگذار بر تقطیر خورشیدی
۷۱	۱۱-۱ عبارات مربوط به تقطیر
۷۲	۱۲-۱ پیشینه تاریخی [۱۴، ۲۹-۳۴]
۷۸	۱-۱۲-۱ ایستگاه‌های تقطیر خورشیدی
۸۵	۲-۱۲-۱ ایستگاه نمک‌زدایی چندفیله‌ای [۵۵، ۵۶]
۸۶	مسئله‌ها و پرسش‌های تشریحی
۸۷	پرسش‌های چندگزینه‌ای
۹۰	منابع

۹۳	فصل ۲. تابش خورشیدی و انتقال حرارت
۹۳	۱-۲ مقدمه
۹۴	۲-۲ تابش خورشیدی
۹۸	۳-۲ تابش خورشیدی روی سطح شیب‌دار
۹۹	۱-۳-۲ روش اول
۱۰۰	۲-۳-۲ روش دوم
۱۰۲	۴-۲ انتقال حرارت
۱۰۳	۱-۴-۲ رسانش
۱۰۴	۲-۴-۲ همرفت
۱۲۲	۳-۴-۲ تابش
۱۲۵	۴-۴-۲ تبخیر
۱۳۲	۵-۲ انتقال حرارت کل
۱۳۴	۶-۲ رابطه دانکل
۱۳۷	۷-۲ مدل جدید
۱۴۴	۸-۲ بازده حرارتی
۱۴۴	۱-۸-۲ بازده آبی
۱۴۵	۲-۸-۲ بازده حرارتی کل
۱۴۶	مسئله‌ها و پرسش‌های تشریحی
۱۵۰	پاسخ‌ها
۱۵۰	منابع

فصل ۳. تاریخچه سامانه‌های تقطیر خورشیدی غیرفعال	۱۵۳
۱-۳ مقدمه	۱۵۳
۲-۳ سامانه‌های تقطیر خورشیدی متداول	۱۵۴
۳-۳ سامانه تقطیر خورشیدی نامتقارن با دو اثر	۱۵۴
۴-۳ سامانه تقطیر خورشیدی نیمه کروی	۱۵۶
۵-۳ سامانه تقطیر خورشیدی کروی	۱۵۷
۶-۳ سامانه تقطیر خورشیدی هرمی با قاعده مثلثی	۱۵۹
۷-۳ سامانه تقطیر خورشیدی دوشیب با دو تشتک	۱۶۰
۸-۳ سامانه تقطیر خورشیدی ۷ شکل	۱۶۱
۹-۳ سامانه تقطیر خورشیدی مخروطی	۱۶۳
۱۰-۳ سامانه تقطیر خورشیدی نوع فنیله‌دار	۱۶۵
۱-۱۰-۳ سامانه تقطیر خورشیدی چندفنیله‌ای (متداول)	۱۶۵
۲-۱۰-۳ سامانه تقطیر خورشیدی فنیله‌ای مقعر	۱۶۶
۳-۱۰-۳ سامانه تقطیر خورشیدی شیب‌دار از نوع فنیله‌ای	۱۶۷
۴-۱۰-۳ سامانه تقطیر خورشیدی فنیله‌ای شیب‌دار با بازتابنده صفحه تخت تحتانی	۱۶۸
۱۱-۳ سامانه تقطیر خورشیدی پله‌ای	۱۷۰
۱-۱۱-۳ سامانه تقطیر خورشیدی با تشتک پله‌ای	۱۷۰
۲-۱۱-۳ سامانه تقطیر خورشیدی پله‌ای اصلاح شده	۱۷۲
۳-۱۱-۳ سامانه تقطیر خورشیدی پله‌ای با بازتابنده‌های بیرونی و داخلی	۱۷۲
۱۲-۳ سامانه تقطیر خورشیدی با استفاده از ماده تغییر فاز دهنده (پی‌سی‌ام)	۱۷۴
۱-۱۲-۳ سامانه تقطیر خورشیدی تک‌شیب متداول با ماده تغییر فاز دهنده	۱۷۵
۲-۱۲-۳ سامانه تقطیر خورشیدی آبشاری به همراه سامانه ذخیره انرژی حرارتی گرمای نهان	۱۷۵
۳-۱۲-۳ سامانه تقطیر خورشیدی مجهز به متمرکز کننده با ماده تغییر فاز دهنده	۱۷۸
۱۳-۳ سامانه تقطیر خورشیدی لوله‌ای	۱۸۰
۱۴-۳ سامانه تقطیر خورشیدی شبکه‌ای از نوع لوله‌ای برای فناوری بیابان	۱۸۱
۱۵-۳ سامانه تقطیر خورشیدی سهموی مستقل با تمرکز نقطه‌ای	۱۸۲
۱۶-۳ سامانه تقطیر خورشیدی تک‌شیب مجهز به کندانسور	۱۸۴
۱۷-۳ سامانه تقطیر خورشیدی تک با نانو سیال‌ها	۱۸۵
مسئله‌ها و پرسش‌های تشریحی	۱۸۶
پرسش‌های چند گزینه‌ای	۱۸۷
پاسخ‌ها	۱۸۹
منابع	۱۸۹

فصل ۴. گردآورنده‌های خورشیدی.....	۱۹۱
۱-۴ مقدمه	۱۹۱
۲-۴ دسته‌بندی گردآورنده‌های خورشیدی	۱۹۲
۳-۴ گردآورنده صفحه تخت حرارتی - فتولتائیک (PVT-FPC)	۱۹۴
۱-۳-۴ انواع گردآورنده‌های صفحه تخت حرارتی - فتولتائیک (PVT-FPC)	۱۹۶
۲-۳-۴ ترکیب گردآورنده صفحه تخت با فتولتائیک	۱۹۷
۳-۳-۴ شیب بهینه گردآورنده صفحه تخت	۱۹۷
۴-۳-۴ اثر گردو غبار روی یک گردآورنده صفحه تخت	۱۹۸
۵-۳-۴ تعداد N گردآورنده صفحه تخت حرارتی - فتولتائیک (N-PVT-FPC)	۱۹۸
۶-۳-۴ متمرکز کننده جفت سهموی حرارتی - فتولتائیک (PVT-CPC)	۲۲۱
۷-۳-۴ گردآورنده لوله خلاء	۲۳۷
مسائل و سؤالات تشریحی	۲۴۷
سؤالات چند گزینه‌ای	۲۴۸
پاسخ‌ها	۲۵۱
منابع	۲۵۲

فصل ۵. مدل سازی حرارتی سامانه‌های تقطیر خورشیدی فعال.....	۲۵۳
۱-۵ مقدمه	۲۵۳
۲-۵ ترکیب سامانه تقطیر خورشیدی با N عدد گردآورنده صفحه تخت حرارتی - فتولتائیک	۲۵۴
۳-۵ سامانه تقطیر خورشیدی ترکیبی با N عدد گردآورنده لوله خلاء	۲۶۲
۴-۵ سامانه تقطیر خورشیدی ترکیبی با N عدد گردآورنده متمرکز کننده جفت سهموی حرارتی - فتولتائیک	۲۶۵
۵-۵ سامانه تقطیر خورشیدی با جاذب وارونه ترکیبی با سیکل خنک کاری	۲۷۱
۶-۵ سامانه تقطیر خورشیدی نفوذی چنداثره ترکیب یافته با گردآورنده لوله خلاء و لوله حرارتی	۲۷۳
۷-۵ سامانه تقطیر خورشیدی فعال چنداثره: تأثیر تعداد مرحله ها	۲۷۵
۸-۵ سامانه تقطیر خورشیدی ترکیبی با برکه خورشیدی	۲۷۵
۱-۸-۵ سامانه تقطیر خورشیدی ترکیبی با یک برکه خورشیدی کم عمق	۲۷۷
۲-۸-۵ سامانه تقطیر خورشیدی پرده دار ترکیبی با برکه خورشیدی کوچک پرده دار	۲۷۸
۹-۵ معادلات مشخصه حاکم بر سامانه تقطیر خورشیدی دوشیبه ترکیبی با گردآورنده‌های صفحه تختی که بخش هایی از آن‌ها به وسیله ماژول فتولتائیک پوشانده شده	۲۷۹
۱-۹-۵ سامانه تقطیر خورشیدی دوشیبه فعال که بدون مبدل حرارتی ماریچ حلزونی کار می کند	۲۷۹
۲-۹-۵ سامانه تقطیر خورشیدی دوشیبه فعال که با مبدل حرارتی ماریچ حلزونی کار می کند	۲۸۵
مسائل و سؤالات تشریحی	۲۹۰

۲۹۲	سؤالات چندگزینه‌ای
۲۹۵	پاسخ‌ها
۲۹۵	منابع
۲۹۷	فصل ۶. مطالعه پارامتری سامانه تقطیر خورشیدی و کاربردهایش
۲۹۷	۱-۶ مقدمه
۲۹۸	۲-۶ تأثیر ضریب جذب تشعشع
۲۹۸	۱-۲-۶ اثر استفاده از رنگ
۳۰۰	۲-۲-۶ تأثیر شوره موجود در کف تشعشع
۳۰۱	۳-۲-۶ تأثیر جلبک‌زنی
۳۰۱	۴-۲-۶ تأثیر زغال
۳۰۲	۳-۶ تأثیر شرایط آب‌وهوایی
۳۰۲	۱-۳-۶ سرعت باد
۳۰۴	۲-۳-۶ تابش خورشیدی
۳۰۵	۳-۳-۶ دمای آسمان و هوا
۳۰۷	۴-۳-۶ شیب پوشش شیشه‌ای و نقش عایق کف
۳۱۰	۴-۶ تأثیر عمق آب
۳۱۰	۱-۴-۶ سامانه تقطیر خورشیدی غیرفعال
۳۱۴	۲-۴-۶ سامانه تقطیر خورشیدی فعال
۳۱۴	۵-۶ سایر روش‌ها برای بهبود عملکرد سامانه تقطیر خورشیدی
۳۱۶	۶-۶ کاربردهای تقطیر خورشیدی
۳۱۶	۱-۶-۶ تولید آب شرب
۳۱۸	۲-۶-۶ تولید گلاب
۳۲۰	۳-۶-۶ گلخانه و سامانه تقطیر خورشیدی
۳۲۴	۴-۶-۶ تقطیر گلخانه‌ای آب دریا
۳۲۵	۵-۶-۶ گلخانه بیابانی
۳۲۶	مسائل و سؤالات تشریحی
۳۲۷	سؤالات چندگزینه‌ای
۳۲۹	پاسخ‌ها
۳۲۹	منابع

فصل ۷. تحلیل انرژی و انرژی سامانه‌های تقطیر خورشیدی ۳۳۱

۳۳۱	۱-۷ مقدمه
۳۳۲	۲-۷ تحلیل انرژی و انرژی سامانه تقطیر خورشیدی متداول
۳۳۲	۱-۲-۷ سامانه تقطیر خورشیدی تک‌شیب متداول
۳۳۶	۲-۲-۷ سامانه تقطیر خورشیدی دوشیب متداول
۳۴۵	۳-۷ تحلیل انرژی و انرژی یک سامانه تقطیر خورشیدی فعال
	۱-۳-۷ استفاده از N عدد گردآورنده صفحه تخت درحالی که قسمتی از هر یک از آنها به وسیله
۳۴۵	ماژول فتوولتائیک پوشانده شده است
	۲-۳-۷ ترکیب با N عدد گردآورنده متمرکزکننده جفت‌سهمی که بخشی از هر یک به وسیله
۳۵۵	ماژول فتوولتائیک پوشانده شده است (N-PVT-CPC)
۳۵۸	۳-۳-۷ ترکیب با N عدد گردآورنده لوله‌خلاء (N-ETC)
۳۶۲	مسائل و سؤالات تشریحی
۳۶۳	سؤالات چهارگزینه‌ای
۳۶۴	پاسخ‌ها
۳۶۴	منابع

فصل ۸. ماتریس‌های انرژی برای سامانه‌های تقطیر خورشیدی ۳۶۷

۳۶۷	۱-۸ مقدمه
۳۶۸	۲-۸ تحلیل انرژی نهفته
۳۶۹	۱-۲-۸ چگالی (دانسیته) انرژی
۳۷۰	۳-۸ ماتریس‌های انرژی
۳۷۲	۱-۳-۸ دوره بازگشت انرژی
۳۷۲	۲-۳-۸ ضریب تولید انرژی
۳۷۳	۳-۳-۸ بازده تبدیل چرخه عمر
۳۷۳	۴-۸ انرژی نهفته و (انرژی) خروجی سالیانه فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر
۳۷۳	۱-۴-۸ سامانه‌های تقطیر خورشیدی غیرفعال
۳۷۴	۲-۴-۸ سامانه تقطیر خورشیدی فعال
۳۸۱	۳-۴-۸ سامانه تقطیر خورشیدی فاع ترکیبی با فتوولتائیک
۳۸۴	۵-۸ کاهش دی‌اکسیدکربن
۳۸۵	۱-۵-۸ اعتبار کربن
۳۸۶	۲-۵-۸ فرمول‌بندی
۳۸۷	۶-۸ مطالعه موردی: تحلیل انرژی سامانه‌های تقطیر خورشیدی

۳۸۷	۱-۶-۸ سامانه تقطیر خورشیدی غیرفعال
	۲-۶-۸ سامانه تقطیر خورشیدی فعال ترکیبی با N عدد گردآورنده متمرکز کننده جفت سهموی که بخشی
۳۹۰	از هر یک از آن‌ها به وسیله مازول فتوولتائیک پوشانده شده است
۳۹۰	مسائل و پرسش‌های تشریحی
۳۹۱	سؤالات چندگزینه‌ای
۳۹۳	پاسخ‌ها
۳۹۳	منابع

فصل ۹. تحلیل اگزرژی-اقتصادی سامانه‌های تقطیر خورشیدی

۳۹۵	۱-۹ مقدمه
۳۹۶	۲-۹ مدل‌سازی: معادلات پایه‌ای
۳۹۶	۱-۲-۹ معادله کلی (عمومی) تعادل (GBC)
۳۹۶	۲-۲-۹ معادلات تعادل ترمودینامیکی (TBC)
۳۹۷	۳-۲-۹ معادلات تعادل اقتصادی (EBC)
۳۹۸	۳-۹ عبارات مهم
۳۹۹	۴-۹ نسبت نرخ تلفات ترمودینامیکی به هزینه سرمایه
۴۰۰	۵-۹ تحلیل اگزرژی-اقتصادی سامانه‌های تقطیر خورشیدی
	۱-۵-۹ تحلیل اگزرژی-اقتصادی یک سامانه تقطیر خورشیدی تک‌شبه غیرفعال و یک سامانه تقطیر
۴۰۰	خورشیدی دوشبه غیرفعال
	۲-۵-۹ تحلیل اگزرژی-اقتصادی یک سامانه تقطیر خورشیدی فعال ترکیبی با گردآورنده صفحه تختی
۴۰۱	که بخشی از آن به وسیله مازول فتوولتائیک پوشانده شده است
۴۰۳	۶-۹ تحلیل اگزرژی-اقتصادی یک گردآورنده هواگرم کن ترکیبی با مازول فتوولتائیک (PVT): مطالعه موردی
۴۰۶	مسائل و سؤالات تشریحی
۴۰۶	سؤالات چندگزینه‌ای
۴۰۷	پاسخ‌ها
۴۰۷	منابع

فصل ۱۰. تحلیل اقتصادی سامانه‌های تقطیر خورشیدی

۴۰۹	۱-۱۰ مقدمه
۴۱۰	۲-۱۰ اصطلاحات مهم
۴۱۰	۱-۲-۱۰ ضریب برگشت سرمایه (CRF)
۴۱۸	۲-۲-۱۰ هزینه یکنواخت سالیانه

۴۲۰	۱۰-۲-۳ فاکتور وجوه استهلاکی
۴۲۲	۱۰-۳ تحلیل هزینه - فایده
۴۲۷	۱۰-۴ نمودار جریان نقدینگی
۴۳۰	۱۰-۵ مقایسه هزینه با دوره‌های یکسان
۴۳۱	۱۰-۶ مقایسه هزینه با دوره‌های غیریکسان
۴۳۲	۱۰-۶-۱ روش ارزش فعلی منفرد (اولین روش)
۴۳۳	۱۰-۶-۲ روش هزینه سالیانه (روش دوم)
۴۳۳	۱۰-۶-۳ روش هزینه سرمایه‌گذاری شده (روش سوم)
۴۳۵	۱۰-۷ ارزش فعلی خالص
۴۳۸	۱۰-۸ ارزیابی امکان‌سنجی اقتصادی سامانه تقطیر خورشیدی
۴۳۹	۱۰-۸-۱ هزینه به ازای هر لیتر آب شیرین
۴۳۹	۱۰-۸-۲ هزینه سرمایه‌گذاری برای سامانه تقطیر خورشیدی (Ps)
۴۴۰	۱۰-۸-۳ نرخ بهره (i، %)
۴۴۱	۱۰-۸-۴ عمر سامانه تقطیر خورشیدی (n)
۴۴۱	۱۰-۸-۵ هزینه نگهداری (Ms، %)
۴۴۱	۱۰-۸-۶ ارزش اسقاطی (Ss)
۴۴۲	۱۰-۹ دوره برگشت سرمایه (np)
۴۴۲	۱۰-۹-۱ آشنایی با روش دوره برگشت سرمایه ساده
۴۴۵	مسائل و سؤالات تشریحی
۴۴۶	سؤالات چهارگزینه‌ای
۴۴۸	منابع
۴۴۹	ضمایم
۴۸۴	واژه‌نامه
۴۹۷	منابع
۴۹۹	نمایه

پیشگفتار نویسندگان

نور خورشید و استفاده از آن

یکی از بزرگ‌ترین مشکلاتی که بشر در قرن بیست و یکم با آن مواجه است، کمبود آب شرب است. دلیل اصلی این معضل بزرگ و تهدیدکننده، محدودیت منابع آبی طبیعی روی کره زمین است. با گذشت زمان، نرخ استفاده از آب شرب، به شکل فزاینده‌ای افزایش یافته و تقریباً طی قرن گذشته، چهار برابر شده است؛ لذا باید به دنبال راه‌حل‌هایی (جایگزین‌هایی) باشیم تا بر مشکلات حاصل از کم‌آبی فائق آمده و بتوانیم منابع آبی طبیعی محدودی را که روی کره زمین به‌جای مانده است، حفظ کنیم.

در این عالم، خورشید تنها منبع لایزال و بی‌انتهای انرژی است. بدون نور خورشید، زندگی روی کره زمین میسر نخواهد بود. تابش الکترومغناطیسی به شکل نور خورشید، با عبور از جو، به زمین می‌رسد. نور خورشید شامل تابش ماوراءبنفش، مرئی و مادون قرمز است. از نظر آماری، سالیانه $10^9 \times 6$ ژول انرژی خورشیدی در هر مترمربع، به سطح زمین می‌رسد (بر مبنای ۶ ساعت روز آفتابی در هر روز) که مقدار انرژی هنگفتی به حساب می‌آید. اگر سقف خانه‌ای را ۱۰ مترمربع در نظر بگیریم، انرژی جمع‌آوری‌شده، بیش از ۳ برابر انرژی مصرفی یک خانه معمولی در یک روز است. این‌ها دلایلی هستند که سبب‌شده انرژی خورشیدی، توجه زیادی را به خود جلب کند. برای استفاده کارآمد از این انرژی، ضروری است که اصول انرژی خورشیدی، شامل تابش خورشیدی و انتقال حرارت را درک کنیم.

هدف

انتظار می‌رود وجود آب شرب پاک، بزرگ‌ترین چالشی باشد که بشر در دهه‌های پیش‌رو با آن مواجه شود؛ بنابراین برای اینکه بتوان شکاف مابین تقاضا و عرضه آب شرب پاک را با استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر به حداقل رساند، توجه و تأکید اصلی کتابمان بر سامانه‌های تقطیر خورشیدی واقع شده است. با توجه به تجربیات آموزشی و پژوهشی حاصل از مطالعه روی این موضوع، در طی سالیان متمادی، بر آن شدیم تا کتابی را با مضمون تقطیر خورشیدی به رشته تحریر درآوریم که دربرگیرنده مفاهیم زیادی از قبیل: مبانی تابش خورشیدی، مانند: انتقال حرارت و جرم و همچنین انواع سامانه‌های تقطیر خورشیدی شامل سامانه‌های تقطیر خورشیدی مجتمع با گردآورنده‌های صفحه تخت حرارتی - (PVT-FPC)، گردآورنده‌های لوله‌خلاء (ETC) و متمرکزکننده جفت‌سهموی حرارتی - فتوولتائیک (PVT-CPC) است. امکان استفاده از هر یک از این سامانه‌ها بستگی به درآمد حاصل، هزینه و انرژی تولیدی آن در طول عمر دستگاه دارد؛ لذا برای بررسی و امکان‌سنجی استفاده از یک سامانه تقطیر خورشیدی، تحلیل انرژی و انرژی، مطالعه پارامتریک این سامانه‌ها، ماتریس‌های

انرژی، تحلیل اقتصادی و اگزبرژواقتصادی سامانه‌های تقطیر خورشیدی باید به شکلی جامع مورد واکاوی و بررسی قرار گیرند.

هدف اصلی از نگارش این کتاب، تهیه منبعی مناسب برای تدریس این موضوع به دانشجویان مهندسی و علوم و همچنین فراهم آوردن مرجعی برای متخصصان این حوزه کاری است. برای درک هرچه بهتر موضوع، مثال‌هایی در طی هر فصل و نیز مسائلی در پایان آن، گردآوری و ارائه شده است.

فصل اول (معرفی کلی) مشتمل بر موضوعاتی مبنی بر تقاضای روبه‌رشد، منابع و موجودیت آب شرب است. در این فصل، همچنین به موضوعاتی در ارتباط با انواع آلودگی‌های آب و اثراتشان بر سلامتی انسان پرداخته شده است. درک پیشینه تاریخی تقطیر خورشیدی و انواع فناوری‌های نمک‌زدایی بسیار مهم و حیاتی است. به همین سبب، در این فصل به برخی فناوری‌های ساده و پیشرفته برای تولید آب شرب از آب شور یا آب آلوده پرداخته شده است.

در فصل دوم (تابش خورشیدی و انتقال حرارت)، به اصول تابش خورشیدی شامل زوایای خورشیدی و تابش خورشیدی روی سطوح افقی و شیب‌دار پرداخته شده است. در بخش مربوط به انتقال حرارت و انتقال جرم، انواع مکانیزم‌های انتقال حرارت و انتقال جرم در طی فرایند تقطیر خورشیدی بررسی شده‌اند. در این فصل، همچنین، انواع مختلف بازده‌های حرارتی مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند.

در فصل سوم (تاریخچه سامانه‌های تقطیر خورشیدی) به تاریخچه انواع مختلف سامانه‌های تقطیر خورشیدی پرداخته شده است. در این فصل، به توصیف تغییراتی که در طراحی این سامانه‌های خورشیدی، در دوره‌های اخیر داده شده نیز پرداخته شده است. انواع مختلف سامانه‌های تقطیر خورشیدی از نوع فیلده‌دار و نیز تغییراتی که در طراحی سامانه‌های تقطیر خورشیدی تک‌شبه داده شده است، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در برخی از سامانه‌های تقطیر خورشیدی جدید که از فناوری‌های به‌روز استفاده کرده‌اند، اثرات گوناگون استفاده از مواد تغییر فاز دهنده (PCM)، خلأ و مواد نانو توضیح داده شده‌اند.

در فصل چهارم (گردآورنده‌های خورشیدی)، به بررسی انواع گردآورنده‌های خورشیدی که قابلیت یکپارچه‌شدن با سامانه‌های تقطیر خورشیدی را دارند، پرداخته شده است. هدف استفاده از این گردآورنده‌ها، بهینه‌نمودن و ارتقاء عملکرد سامانه‌های تقطیر خورشیدی غیرفعال/متداول است. لازمه این کار، درک اصول مربوط به گردآورنده‌های خورشیدی است که در این فصل مورد بررسی قرار گرفته‌اند. انواع حالت‌های استفاده از گردآورنده‌های خورشیدی - از قبیل حالت‌هایی که در آن قسمتی از گردآورنده‌ها یا تمام سطح گردآورنده (مترجم: به‌وسیله ماژول فتوولتائیک) پوشانده شده و نیز حالت کاری طبیعی (مترجم: ترموسیفونی) یا اجباری - بررسی شده‌اند. به‌منظور فهم سامانه تقطیر خورشیدی فعال، نگاهی به گردآورنده‌های حرارتی خورشیدی متداول ترکیب‌یافته با ماژول‌های فتوولتائیک (PV)، یعنی گردآورنده‌های خورشیدی حرارتی - فتوولتائیک (PVT)، انداخته شده است. اثر بازتابنده‌ها بر عملکرد سامانه تقطیر خورشیدی نیز به‌صورت مختصر، در این فصل بررسی شده است.

در فصل پنجم (مدل سازی حرارتی سامانه های تقطیر خورشیدی فعال)، به بررسی مدل سازی ریاضی سامانه های تقطیر خورشیدی فعال پرداخته شده است که شامل: سامانه تقطیر خورشیدی ترکیبی با گردآورنده صفحه تخت حرارتی - فتوولتائیک (PVT-FPC)، ترکیبی با گردآورنده لوله خلاء (ETC) و نیز متمرکز کننده جفت سهموی حرارتی - فتوولتائیک (PVT-CPC) است. به منظور مقایسه عملکرد انواع مختلف سامانه های تقطیر خورشیدی، معادلات مشخصه به عنوان معیار و ابزار اصلی به حساب می آیند؛ بنابراین، بخش پایانی این فصل، به معرفی معادلات مشخصه انواع مختلف سامانه های تقطیر خورشیدی فعال و غیر فعال پرداخته است.

در فصل ششم (مطالعه پارامتریک تقطیر خورشیدی و کاربردهایش) به بررسی اثر پارامترهای مختلف آب و هوایی و نیز طراحی (از قبیل: عمق آب، قابلیت جذب تشعشع، سرعت باد، اثر رنگ، قابلیت عبور نور از پوشش شیشه ای، ضخامت عایق و ...) بر عملکرد سامانه های تقطیر خورشیدی فعال و غیر فعال پرداخته شده است. در این فصل، دیدی به خواننده کتاب داده می شود تا بتواند با انتخاب مقادیر مناسب برای انواع پارامترها، عملکرد سامانه تقطیر خورشیدی را بهینه کند.

فصل هفتم (تحلیل انرژی و اگزرژی تقطیر خورشیدی) به تحلیل انرژی و اگزرژی سامانه تقطیر خورشیدی فعال و غیر فعال متمرکز شده است. علاوه بر تحلیل انرژی و اگزرژی سامانه تقطیر خورشیدی متداول، به تحلیل انرژی و اگزرژی سامانه تقطیر خورشیدی ترکیبی با گردآورنده صفحه تخت حرارتی - فتوولتائیک (PVT-FPC)، ترکیبی با گردآورنده لوله خلاء (ETC) و متمرکز کننده جفت سهموی حرارتی - فتوولتائیک (PVT-CPC) نیز پرداخته شده است. نتایج هم به تفصیل بررسی شده اند.

فصل هشتم (ماتریس های انرژی سامانه های تقطیر خورشیدی) به بررسی انرژی های نهفته انواع سامانه های تقطیر خورشیدی فعال و غیر فعال پرداخته است. ماتریس های انرژی مانند: دوره برگشت انرژی (EPBT)، ضریب تولید انرژی (EPF) و بازده تبدیل چرخه عمر (LCCE) مورد بررسی قرار گرفته اند. در این فصل همچنین به اثر مثبت زیست محیطی سامانه های تقطیر خورشیدی (به عنوان یک منبع انرژی تجدید پذیر) پرداخته شده است.

در فصل نهم (تحلیل اگزرژی - اقتصادی سامانه های تقطیر خورشیدی)، معادلات اساسی شامل: معادله تعادل کلی، معادلات تعادل ترمودینامیکی و معادلات تعادل اقتصادی معرفی شده اند. عبارات ضروری - از قبیل: «انرژی اتلافی»، «نرخ تلفات اگزرژی»، «هزینه سرمایه ای تجهیزات» و «نسبت نرخ اتلافات ترمودینامیکی به هزینه سرمایه» مورد بررسی قرار گرفته اند. تحلیل اگزرژی - اقتصادی سامانه تقطیر خورشیدی مجهز به گردآورنده صفحه تخت حرارتی - فتوولتائیک (PVT-FPC) که بخشی از آن پوشانده شده بود، به عنوان یک نمونه، بحث شده است که دربرگیرنده نمونه تجربی و مدل سازی حرارتی این سامانه هیبریدی (ترکیبی) است. در انتهای این فصل، نتایج آورده شده اند.

فصل پایانی (تحلیل اقتصادی سامانه های تقطیر خورشیدی)، به عبارات فنی مهمی در ارتباط با توجیه پذیری اقتصادی سامانه های تقطیر خورشیدی پرداخته است که شامل: ضریب برگشت سرمایه (CRF)، هزینه سالیانه یکنواخت (UNACOST)، فاکتور وجوه استهلاکی (SFF) و نسبت سود به هزینه می شود. در این فصل همچنین

به نمودار جریان نقدینگی و مقایسه هزینه پرداخته شده است. چهار روش مهم (روش ارزش فعلی منفرد، روش هزینه سالیانه، روش هزینه سرمایه‌گذاری شده و روش مقایسه هزینه برای دوره‌های نابرابر) به تفصیل بحث و بررسی شده‌اند.

در طول این کتاب، از واحدهای SI استفاده شده است. در انتهای کتاب نیز، ضمیمه‌ها گنجانده شده‌اند.

دهلی نو، هند

جی، ان تایواری و لودیپ ساهوتا

پیشگفتار مترجم

خداوند عزیز و مهربان را شکر گزارم که این وقت و توان را به بنده عنایت فرمود تا بتوانم ترجمه این کتاب را به خوانندگان و علاقه‌مندان حوزه تقطیر خورشیدی و نمک‌زدایی، تقدیم نمایم.

هدف اصلی بنده از ترجمه کتاب حاضر این بوده است، تا به دنبال پژوهش‌هایی که در زمینه سامانه‌های تقطیر خورشیدی انجام داده‌ام، بتوانم با انتخاب کتابی نسبتاً جامع و ارائه ترجمه‌ای درخور توان خود، گام کوچکی در زمینه آشنایی هرچه بیشتر دانشجویان و محققان علاقه‌مند به این حوزه کاری و پژوهشی بردارم. این کتاب مشتمل بر ۱۰ فصل بوده و در آن، سامانه‌های تقطیر خورشیدی از دیدگاه‌های مختلفی مانند: طراحی، انرژی، انرژی و نیز اقتصادی مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند. به همین دلیل، می‌توان آن را کتاب نسبتاً کاملی در این حوزه قلمداد کرد.

لازم به ذکر است، علی‌رغم وقت و دقت فراوانی که صرف ترجمه این کتاب شده است، مطمئناً ترجمه پیش‌رو، عاری از اشکالات علمی و ادبی نخواهد بود؛ لذا از شما خواننده محترم خواهشمند است نظرات و پیشنهادهای گران‌بهای خود را از طریق آدرس پست الکترونیکی که در ادامه تقدیم حضور می‌شود، به بنده منتقل کنید تا بتوانم، ان‌شالله، در ویرایش‌های بعدی اعمال نمایم.

همچنین بر خود لازم می‌دانم از مدیریت محترم و کارشناسان زحمت‌کش و دلسوز حوزه نشر آثار علمی دانشگاه فردوسی مشهد و همچنین از ارزیابان محترم، ویراستاران علمی و ادبی بزرگوار که وقت زیادی صرف بهبود ترجمه ارائه‌شده کرده‌اند، بی‌نهایت سپاسگزاری نمایم.

با آرزوی سلامتی و شادی

مهدی هدایتی‌زاده

mhedayatizadeh@birjand.ac.ir

mhedayatizadeh@gmail.com

press.um.ac.ir

درباره نویسندگان



پروفسور دکتر جی، ان تایواری در بالایا^۱ واقع در هند، چشم به جهان گشود. وی تحصیلات عالی خود را در دانشگاه هندو باناراس^۲ گذراند و مدرک خود را از این دانشگاه اخذ کرد. پروفسور تایواری از سال ۱۹۷۷، در مرکز مطالعات انرژی، در مؤسسه فناوری دهلی هند، مشغول به کار است. زمینه‌های تحقیقاتی موردعلاقه وی در حوزه انرژی‌های تجدیدپذیر بوده که دربرگیرنده انرژی خورشیدی است. ایشان استاد راهنمای ۸۰ دانشجوی دکتری بوده و ۶۰۰ مقاله پژوهشی در مجلات معتبر به چاپ رسانده است. آقای دکتر تایواری ۲۲ کتاب به رشته تحریر درآورده که به وسیله ناشران داخلی و خارجی به چاپ رسیده است. وی در سال ۱۹۸۲ موفق به دریافت جایزه هاریوم آشران

پریت^۳ شد و در سال ۲۰۰۷ جایزه ویگیان راتنا^۴ را از سوی شورای علوم و فناوری دریافت کرد. وی همچنین در سال ۱۹۹۷ فرصت مطالعاتی خود را در اروپا سپری کرد و در سال ۱۹۹۳ نیز فرصتی را در دانشگاه آلستر^۵ (انگلستان) پشت سر گذاشت. علاوه بر این، در گذشته نیز وی نامزد دریافت جایزه بین‌المللی IDEA شده است. ایشان مسئول توسعه پارک انرژی خورشیدی در مؤسسه فناوری دهلی هند نیز می‌باشد. دکتر تایواری، به‌منظور ایراد سخنرانی، دبیر کنفرانس‌های بین‌المللی، به‌عنوان متخصص حوزه انرژی‌های تجدیدپذیر و نیز به‌منظور ارائه مقالات خود، به کشورهای زیادی مانند: ایتالیا، کانادا، آمریکا، بریتانیا، استرالیا، سوئد، آلمان، یونان، فرانسه و ... سفر کرده است. وی در سال‌های گذشته و در قالب همکار، پروژه‌های فراوانی را که از سوی دولت هند مورد حمایت مالی قرار گرفته بودند، با موفقیت به انجام رسانده است. آقای دکتر تایواری به‌عنوان کمک سردبیر مجله «انرژی خورشیدی» در حوزه تقطیر خورشیدی و از سال ۲۰۰۷ به‌عنوان مدیر نشریه بین‌المللی «تحقیقات انرژی» مشغول به کار است. وی همچنین سردبیر مجله «اصول کاربردهای انرژی تجدیدپذیر» و داور بسیاری از مجله‌های بین‌المللی است. او همچنین دبیر دو همایش بین‌المللی، سولاریس^۶ ۲۰۰۷ و سولاریس ۲۰۱۲، در

1. Ballia.
2. Banaras Hindu University (BHU).
3. Hariom Ashram Perit S. S. Bhatnagar.
4. Vigyan Ratna.
5. University of Ulster.
6. SOLARIS.

مؤسسه فناوری دهلی هند در شهر دهلی و در دانشگاه هندو باناراس در شهر واراناسی بوده است. علاوه بر این، وی مدیر راه‌اندازی «انجمن تحقیقات انرژی بگ»^۱ به آدرس اینترنتی www.bers.in بوده که مسئولیت آموزش مسائل مرتبط با انرژی را در مناطق روستایی به عهده دارد.



آقای لودیپ ساهوتا در ۱۱ نوامبر سال ۱۹۸۸ در جینگر کالان، داسویا، هوشیارپور (پانجوب) هند متولد شد. وی در سال ۲۰۰۸، مدرک کارشناسی خود را در رشته فیزیک از دانشگاه گرو ناناک دو^۲ در شهر آمريتسار^۳ (پانجوب) دریافت کرد؛ همچنین در سال ۲۰۱۰، مدرک کارشناسی ارشد خود را در رشته فیزیک از مؤسسه فناوری دهلی هند، واقع در دهلی اخذ کرد. در طی دوره کارشناسی ارشد، وی در ارتباط با تزویج ابزارهای موجبر^۴ کار کرد و معادلات مد کوپل (جفت‌شده)^۵ را با استفاده از نرم‌افزار متلب حل کرد تا تبادل توان مابین تزویجگرهای جهت‌دار مخروطی و صفحه‌ای^۶ را تحلیل کند. عنوان پایان‌نامه کارشناسی ارشد وی، «مدلسازی عددی و تحلیل ابزارهای

موجبر» در فبرهای نوری بوده است. وی در سال ۲۰۰۵، آزمون ورودی به دانشگاه‌های دولتی و در سال ۲۰۰۸، آزمون ورودی به دوره کارشناسی ارشد را با موفقیت پشت سر گذاشت. او همچنین در سال ۲۰۱۲، آزمون استعداد تحصیلی در مهندسی^۷ را با موفقیت سپری کرد و در ژوئن سال ۲۰۱۴ و با هدف تدریس در دانشگاه، آزمون UGC NET^۸ را با موفقیت پشت سر نهاد. وی مابین ژوئن ۲۰۱۰ تا ژوئن ۲۰۱۲، در مؤسسه فناوری و مدیریت شیودان سینگ (SSITM) به عنوان استادیار مشغول به کار شد و دروسی مانند فیزیک پایه مهندسی، لیزر و تئوری الکترومغناطیس را در مقطع تحصیلات تکمیلی تدریس کرد. در حال حاضر، وی در حال سپری کردن مقطع دکتری خود تحت راهنمایی پروفیسور جی، ان تایواری در مرکز مطالعات انرژی، در مؤسسه فناوری دهلی هند است. وی تاکنون موفق با چاپ ۸ مقاله در مجلات معتبر شده است. آقای لودیپ ساهوتا همچنین در سال ۲۰۰۷، در کنفرانس بین‌المللی «سامانه‌های انرژی» که به همّت مؤسسه الزویر لندن ترتیب داده شده بود، شرکت کرد. زمینه‌های تحقیقاتی وی: تقطیر خورشیدی (مدلسازی و کار تجربی)، گردآورنده‌های حرارتی خورشیدی، فتوولتائیک‌ها، انتقال جرم و حرارت، اگزورژی، تثبیت دی‌اکسید کربن و تحلیل‌های اگزورژی - اقتصادی هستند.

1. Bag Energy Research Society.
2. Guru Nanak Dev University.
3. Amritsar.
4. coupling of waveguide devices.
5. coupled-mode equations.
6. planar and tapered directional couplers.
7. graduate Aptitude Test in Engineering.
8. University Grant Commission-National Eligibility Test.

مقادیر تقریبی برخی از ثابت‌های به کاررفته در سامانه‌های انرژی خورشیدی

ردیف	ثابت‌ها	مقدار واقعی	مقدار تقریبی
۱	قطر خورشید	1.39×10^9 m	1.5×10^9 m
۲	فاصله خورشید از زمین	1.5×10^{11} m	150×10^9 m
۳	دمای خورشید به عنوان جسم سیاه	5777 K	6000 K
۴	دمای هسته مرکزی (خورشید)	$8 - 40 \times 10^6$ K	$9 - 30 \times 10^6$ K
۵	انرژی تولیدی در هسته مرکزی (خورشید)	90%	90%
۶	قطر زمین	13000 km	1.5×10^7 m
۷	ثابت خورشیدی	1367 W/m^2	1500 W/m^2
۸	تابش با طول موج کوتاه	$0.23 - 2.6 \mu\text{m}$	$0.3 - 3.0 \mu\text{m}$
۹	دمای متوسط زمین	298 K	300 K
۱۰	ثابت استفان - بولتزمن	$5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$	$60 \times 10^{-9} \text{ W/m}^2\text{K}^4$
۱۱	قانون جابه جایی وین (λT)	$2897.6 \mu\text{m K}$	$3000 \mu\text{m K}$
۱۲	تابش با طول موج بلند از زمین	$10 \mu\text{m}$	$9 \mu\text{m}$
۱۳	طول موج تابش ساطع شده از سوی زمین	$0 - 30 \mu\text{m}$	$0 - 30 \mu\text{m}$
۱۴	ساعت تابش خورشید در استوا	12 h	12 h
۱۵	ساعت تابش خورشید در قطب شمال	24 h	24 h
۱۶	زاویه شیب بهینه برای (دریافت) بیشینه تابش	$\phi \pm 15$	$\phi \pm 15$
۱۷	ضریب انتقال همرفتی هوا	$2.8 + 3V$	$3(1 + V)$
۱۸	دمای آسمان (T_{sky})	$(T_a - 12)^\circ\text{C}$	$(T_a - 12)^\circ\text{C}$
۱۹	تابش تبدیلی با طول موج بلند بین زمین و هوا	60 W/m^2	60 W/m^2
۲۰	مرتبه ضریب انتقال حرارت تابشی	$6 \text{ W/m}^2 \text{ K}$	$6 \text{ W/m}^2 \text{ K}$
۲۱	ضریب انتقال حرارت تابشی و همرفتی برای هوا	$5.7 + 3.8V \text{ W/m}^2 \text{ K}$	$3(2 + V) \text{ W/m}^2 \text{ K}$
۲۲	مرتبه ضریب انتقال همرفتی بین یک صفحه داغ و آب		$90 - 300 \text{ W/m}^2 \text{ K}$
۲۳	ضریب انتقال حرارت کل برای یک گردآورنده صفحه تخت با یک شیشه	$6 \text{ W/m}^2 \text{ K}$	
۲۴	ضریب بازده گردآورنده صفحه تخت (F')		0.9
۲۵	ضخامت عایق	0.10 m	0.09 m
۲۶	بازده پره (فین) (F)		0.9
۲۷	ضریب دبی جرمی		< 0.9
۲۸	ضریب عبور نور از شیشه معمولی		0.9
۲۹	شدت تابش آستانه		> 300 W/m^2
۳۰	گردآورنده‌های صفحه تخت با اتصال سری		≤ 3
۳۱	رسانش حرارتی ماده عایق	$0.03 - 0.04 \text{ W/m K}$	0.03 W/m K
۳۲	ماکزیمم دمای یک گردآورنده متمرکزکننده		3000 °C

۳۳	بازده ایدئال بازده خورشیدی	60%	60%
۳۴	عمق بهینه آب داخل تشتک	0.03 m	0.02 – 0.03 m
۳۵	تأثیر پارامتر آب‌وهوا بر میزان آب شیرین تولیدی به‌وسیله سامانه تقطیر خورشیدی	9 – 12%	
۳۶	ضریب گسیل سطح	0.9	0.9
۳۷	عمق بهینه آب در یک آب‌گرم‌کن ترکیب‌یافته (یکجا) با مخزن	0.09 m	0.10 m
۳۸	دمای بهینه برای تخمیر اسلاری ^۱ به‌منظور تولید بیوگاز	27 °C	25 – 27 °C
۳۹	مدت زمان پخت از طریق یک خوراک‌پز خورشیدی	3 h	2 – 3 h
۴۰	گرمای نهان تبخیر	3.0×10^6 J/kg	2.3×10^6 J/kg
۴۱	فاصله باند برای سیلیکون	1.12 eV	1.16 eV
۴۲	ثابت بولتزمن (k)	12×10^{-24} J/K	1.38×10^{-23} J/K
۴۳	غلظت ناخالصی گروه پنجم	10^{15} cm ³	10^{15} cm ³
۴۴	دانشیه مؤثر حالت‌ها در باند رسانش	28×10^{18} cm ³	2.82×10^{19} cm ³
۴۵	جریان اشباع در بایاس معکوس	10^{-8} A	10^{-8} A
۴۶	ضخامت نیمه‌هادی نوع n در یک سلول خورشیدی	0.3 μm	0.2 μm
۴۷	ضخامت نیمه‌هادی نوع p در یک سلول خورشیدی	0.6 μm	0.5 μm
۴۸	طول مسیر انتشار (نفوذ)	60 – 90 μm	50 – 100 μm
۴۹	اتصال نزدیک یک نیمه‌هادی نوع n در سیلیکون	0.15 μm	0.15 μm
۵۰	شدت تابش خورشیدی در داخل جو	≈ 900 W/m ²	
۵۱	بازده یک سلول خورشیدی در شرایط استاندارد	15%	15%
۵۲	بازده یک ماژول فتوولتائیک با سلول خورشیدی سیلیکونی	12%	12%
۵۳	شرایط آزمایشی استاندارد	900 W/m ² , 24 °C	1000 W/m ² , 25 °C
۵۴	گرمای ویژه آب	4200 J/kg K	4190 J/kg K
۵۵	گرمای ویژه هوا	1000 J/kg K	1000 J/kg K
۵۶	چگالی هوا	1.2 kg/m ³	1.2 kg/m ³
۵۷	ضریب جذب یک صفحه لخت	≈ 0.3	
۵۸	ضریب جذب یک صفحه مشکی	> 0.9	
۵۹	ارزش حرارتی زغال سنگ	30000 kJ/kg	29000 kJ/kg
۶۰	ارزش حرارتی بیوگاز	21000 kJ/kg	20000 kJ/kg
۶۱	ارزش حرارتی چوب/کاه	15000 kJ/kg	15000 kJ/kg
۶۲	ارزش حرارتی بنزین/نفت سفید	42000 kJ/kg	42000 kJ/kg
۶۳	ارزش حرارتی متان	51000 kJ/kg	50000 kJ/kg
۶۴	محتوای انرژی در ناحیه مادون قرمز	51%	51.02%
۶۵	محتوای انرژی در ناحیه مرئی	36%	36.76%
۶۶	محتوای انرژی در ناحیه ماوراءبنفش	12%	12.22%

1. slurry.