

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی شیمی
گرایش پیشرفته

عنوان پایان نامه

افزایش راندمان کاری سلول‌های خورشیدی با استفاده از نانوسیال

استاد راهنما:

دکتر مسعود رحیمی

نگارش:

نوشین کرمی

دی ۱۳۹۲

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و
نوآوری های ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه
متعلق به دانشگاه رازی است.

تشکر و قدردانی:

بر خود واجب بدانم از تمام عزیزان که طی این دوره یار و یارگر اینجانب بوده‌اند تشکر و قدردانی نمایم:

استاد راهنما/گرامی جناب آقای دکتر مسعود رحیمی که شاگرد اینجانب مایه افتخار بنده است و کمک‌ها و راهنمایی‌ها/بهر

دریغ اینجانب موجب دلگرمی بنده برآید تلاش در برطرف نمودن مشکلات عمده این پروژه بوده است

همکاران عزیزم در آزمایشگاه و سایر دوستان که همواره اینجانب تضرع‌ها/کار را به مذاق آکنده شیرین می‌سازد.

تقریب بن:

پدرم، چشمه جوشان عطی ...

مادرم، وسعت دریای گذشت ...

و خواهران عزیزم که همواره دلموز و پستیبانم بوده اند

در این تحقیق در راستای ارزیابی و بهبود عملکرد سلول فتوولتائیک^۱ دو هندسه‌ی متفاوت از ماکروکانال‌ها با طرح مستقیم و حلزونی و یک میکروکانال که به پشت سلول فتوولتائیک متصل شده‌اند، بصورت مجزا بکار گرفته شدند. به منظور بررسی اثر سیال خنک‌کننده بر عملکرد سلول فتوولتائیک آب و سه غلظت متفاوت نانوسیال (۰/۰۱، ۰/۱ و ۰/۵ درصد وزنی برای ماکروکانال‌ها و ۰/۰۱، ۰/۱ و ۰/۳ درصد وزنی برای میکروکانال) بر پایه آب و نانو ذره بوهمیت^۲ با فرمول شیمیایی AIOOH مورد استفاده قرار گرفته شد. مشاهده شد که در میکروکانال، نانوسیال با غلظت ۰/۰۱ درصد وزنی و در ماکروکانال‌ها غلظت ۰/۱ درصد وزنی بهترین عملکرد خنک‌سازی را دارد. در نتیجه می‌توان گفت که علاوه بر غلظت نانوذرات، هندسه کانال نیز بر عملکرد آن‌ها در زمینه انتقال حرارت موثر بود. با مقایسه عملکرد دو ماکروکانال برای غلظت‌های متفاوت نانوسیال تحت دبی‌های متفاوت نتایج بهتری برای ماکروکانال حلزونی به دلیل خصوصیات هندسی آن بدست آمد. نتایج بدست آمده از مقایسه‌ی ماکروکانال مستقیم و میکروکانال نیز نشان داد که در اکثر دبی‌های برای غلظت‌های یکسان نانوسیال، میکروکانال توان حذف گرمای بیشتری را دارد. لازم به ذکر است که حداکثر افزایش عملکرد با میکروکانال مستقیم ۳۵/۰۳، با ماکروکانال حلزونی ۳۷/۶۷ و با میکروکانال ۲۷/۱۵٪ مشاهده شد.

واژه‌های کلیدی: خنک‌سازی، سلول فتوولتائیک، میکرو و ماکروکانال، نانوسیال، نانوذره بوهمیت

¹ Photovoltaic

² Boehmite

فهرست مطالب

عنوان صفحه

فصل اول: مقدمه‌ایی بر فتوولتائیک‌ها

- ۱-۱- مقدمه ۲
- ۲-۱- بررسی وضعیت جهانی فن آوری فتوولتائیک خورشیدی ۳
- ۳-۱- مواد مورد استفاده در سلول‌های خورشیدی ۴
- ۴-۱- فن آوری فتوولتائیک خورشیدی ۵
- ۵-۱- منحنی‌های عملکرد سلول‌های فتوولتائیک ۶
- ۶-۱- عملکرد الکتریکی سلول‌های فتوولتائیک ۸
- ۷-۱- عوامل موثر در عملکرد الکتریکی سلول‌های فتوولتائیک ۹
- ۱-۷-۱- طیف تشعشع دریافتی ۹
- ۲-۷-۱- دمای عملکرد سلول ۱۱
- ۸-۱- خنک‌سازی فتوولتائیک ۱۳
- ۱-۸-۱- خنک‌سازی منفعل ۱۳
- ۲-۸-۱- خنک‌سازی پویا ۱۴
- ۹-۱- استفاده از سیستم ترکیبی فتوولتائیک/حرارتی ۱۷
- ۱۰-۱- شبیه‌سازهای خورشیدی ۱۸
- ۱-۱۰-۱- دسته‌بندی شبیه‌سازهای خورشیدی ۱۹
- ۱۱-۱- مقدمه‌ایی بر پیدایش نانوسیال در انرژی خورشیدی ۲۲
- ۱۲-۱- نانوسیال ۲۳
- ۱-۱۲-۱- روش‌های تولید نانوسیال ۲۳
- ۲-۱۲-۱- مکانیزم انتقال حرارت در نانوسیال ۲۴
- ۳-۱۲-۱- بوهمیت ۲۵

فصل دوم: مروری بر مطالعات انجام گرفته

- ۱-۲- مقدمه ۲۸
- ۲-۲- روش‌های بهبود عملکرد سلول‌های فتوولتائیک ۲۸
- ۱-۲-۲- خنک‌سازی فتوولتائیک به روش منفعل ۲۸
- ۲-۲-۲- خنک‌سازی فتوولتائیک به روش غوطه‌وری در مایع ۳۲
- ۳-۲-۲- خنک‌سازی فتوولتائیک به روش برخورد جت سیال ۳۴
- ۴-۲-۲- خنک‌سازی فتوولتائیک به روش میکروکانال ۳۵
- ۵-۲-۲- استفاده از سیستم ترکیبی فتوولتائیک/حرارتی ۳۸

- ۳-۲- پیشینه استفاده از میکرو کانال برای بهبود انتقال حرارت ۴۴
- ۴-۲- کاربرد نانوسیال‌ها در خنک‌سازی فتوولتائیک ۴۹
- ۵-۲- نتیجه‌گیری ۵۷

فصل سوم: آزمایش‌ها

- ۳-۱- مقدمه ۵۹
- ۳-۲- مواد ۵۹
- ۳-۳- تجهیزات بکار گرفته شده ۵۹
- ۳-۳-۲- شبیه‌سازهای خورشیدی ۶۰
- ۳-۳-۳- سلول فتوولتائیک و کانال‌ها ۶۱
- ۳-۳-۴- تجهیزات اندازه‌گیری ۶۹
- ۳-۳-۵- نحوه‌ی تهیه نانوسیال و سیستم پمپاژ آن ۷۱
- ۳-۴- روش آزمایش ۷۲
- ۳-۴-۱- شروع آزمایش و تنظیم دبی ۷۲
- ۳-۴-۲- روشن نمودن لامپها و ادامه آزمایش ۷۳
- ۳-۴-۳- ثبت عملکرد فتوولتائیک و پایان آزمایش ۷۳
- ۳-۵- آزمایش‌های انجام شده ۷۴

فصل چهارم: تحلیل نتایج

- ۴-۱- مقدمه ۷۶
- ۴-۲- ماکرو کانال با طرح مستقیم ۷۶
- ۴-۲-۱- رژیم جریان در ماکرو کانال مستقیم ۷۶
- ۴-۲-۲- عملکرد دمایی فتوولتائیک با ماکرو کانال مستقیم ۷۸
- ۴-۲-۳- عملکرد الکتریکی فتوولتائیک با ماکرو کانال مستقیم ۸۱
- ۴-۲-۴- ارزیابی اقتصادی ماکرو کانال مستقیم ۸۲
- ۴-۳- ماکرو کانال با طرح حلزونی ۸۴
- ۴-۳-۱- رژیم جریان در ماکرو کانال حلزونی ۸۴
- ۴-۳-۲- عملکرد دمایی فتوولتائیک با ماکرو کانال حلزونی ۸۵
- ۴-۳-۳- عملکرد الکتریکی فتوولتائیک با ماکرو کانال حلزونی ۸۷
- ۴-۳-۴- ارزیابی اقتصادی ماکرو کانال حلزونی ۸۸
- ۴-۴- مقایسه عملکرد ماکرو کانال‌ها ۸۹
- ۴-۵- میکرو کانال ۹۲
- ۴-۵-۱- عملکرد دمایی فتوولتائیک با میکرو کانال ۹۳
- ۴-۵-۲- عملکرد الکتریکی فتوولتائیک با میکرو کانال ۹۷

- ۹۹ ۳-۵-۴- کاهش فشار و رژیم جریان در میکروکانال
- ۱۰۰ ۴-۵-۴- ارزیابی اقتصادی میکروکانال
- ۱۰۱ ۶-۴- مقایسه‌ی میکروکانال و ماکروکانال مستقیم

فصل پنجم: جمع‌بندی و پیشنهادها

- ۱۰۶ ۱-۵- مقدمه
- ۱۰۶ ۲-۵- جمع‌بندی
- ۱۰۷ ۳-۵- پیشنهادها

۱۰۸

منابع

فهرست شکل‌ها

شکل
صفحه

- شکل (۱-۱) تولید فتوولتائیک از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ ۴
- شکل (۲-۱) نمودار مواد فتوولتائیک ۵
- شکل (۳-۱) منحنی عملکرد جریان بر حسب ولتاژ یک سلول فتوولتائیک ۶
- شکل (۴-۱) منحنی عملکرد جریان بر حسب ولتاژ یک سلول فتوولتائیک ۷
- شکل (۵-۱) منحنی‌های عملکرد یک سلول فتوولتائیک ۸
- شکل (۶-۱) حساسیت نسبی سلول‌های مختلف سیلیکونی ۹
- شکل (۷-۱) نور خورشید در نقطه ورود به جو ۱۰
- شکل (۸-۱) نمودار تغییرات ولتاژ مدار باز بر حسب دمای عملکرد سلول ۱۲
- شکل (۹-۱) نمودار تغییرات ضریب پرشدگی بر حسب دمای عملکرد سلول ۱۲
- شکل (۱۰-۱) پره‌های متصل به یک فتوولتائیک ۱۴
- شکل (۱۱-۱) لوله حرارتی پره‌دار متصل به فتوولتائیک ۱۴
- شکل (۱۲-۱) خنک‌سازی با استفاده از برخورد جت سیال ۱۶
- شکل (۱۳-۱) نمونه‌هایی از انواع فتوولتائیک دمایی سیال آب ۱۷
- شکل (۱۴-۱) نمونه‌هایی از انواع فتوولتائیک دمایی سیال هوا ۱۸
- شکل (۱۵-۱) نمایی کلی از یک شبیه‌ساز خورشیدی ۱۹
- شکل (۱۶-۱) ساختار بوهمیت ۲۶
- شکل (۱-۲) پره‌های متصل به یک فتوولتائیک ۲۹
- شکل (۲-۲) لوله حرارتی پره‌دار متصل به یک فتوولتائیک ۲۹
- شکل (۳-۲) شماتیک سیستم خنک‌سازی بر مبنای لوله حرارتی پیشنهاد شده توسط اکبرزاده و همکارانش ۳۰
- شکل (۴-۲) دو تصویر مختلف از سیستم خنک‌سازی اندرسن و همکارانش ۳۱
- شکل (۵-۲) ساختار پره استفاده شده توسط آقای هیانگ‌دو و همکارانش ۳۲
- شکل (۶-۲) هندسه فتوولتائیک همراه با متمرکزکننده استفاده شده در مدل‌سازی CFD توسط هان ۳۳
- شکل (۷-۲) نمایی از سلول خورشیدی غوطه‌ور در گلیسرین ۳۳
- شکل (۸-۲) سیستم ترکیبی میکروکانال و برخورد جت سیال توسط بارو و همکارانش ۳۴
- شکل (۹-۲) تاثیر سیستم خنک‌سازی هیبریدی بر دما و توان الکتریکی فتوولتائیک همراه با متمرکزکننده ۳۵
- شکل (۱۰-۲) انباره حرارتی مبتنی بر میکروکانال‌های چندراه‌های طراحی شده توسط کرمانی ۳۶

- شکل (۱۱-۲) میکرو کانال پیشنهادی توسط آگراوال و همکارانش..... ۳۷
- شکل (۱۲-۲) چیدمانهای میکرو کانالهای بررسی شده توسط راموس آوارادو..... ۳۸
- شکل (۱۳-۲) کلکتورهای بررسی شده توسط هگازی..... ۳۹
- شکل (۱۴-۲) نمایی از کلکتور فتوولتائیک دمایی خورشیدی دو مسیره با سیال هوا و CPC و پره..... ۴۰
- شکل (۱۵-۲) تجهیزات آزمایشگاهی بکار گرفته شده توسط هی و همکارانش..... ۴۱
- شکل (۱۶-۲) طرح کلکتور جاذب با جریان پیچشی..... ۴۲
- شکل (۱۷-۲) نمایی از کلکتور تک مسیره با تونل مستطیلی..... ۴۲
- شکل (۱۸-۲) عملکرد الکتریکی به صورت تابعی از دمای سلول ارئه شده توسط تئو..... ۴۳
- شکل (۱۹-۲) نمایی از مدل لوله های موازی..... ۴۳
- شکل (۲۰-۲) نمایی از مدل لوله مارپیچی..... ۴۳
- شکل (۲۱-۲) تمایی از مدل دو صفحه موازی..... ۴۴
- شکل (۲۲-۲) تغییرات عملکرد کلکتورها در طول روز..... ۴۴
- شکل (۲۳-۲) نمای میکرو کانالهای مستقیم (a) با یک مسیر جریان، (b) با قابلیت تقسیم جریان..... ۴۶
- شکل (۲۴-۲) نمایی از انواع چندراهه های ورودی / خروجی مورد استفاده در مرجع..... ۴۷
- شکل (۲۵-۲) (a) شماتیک میکرو کانالها، (b) نمایی از دو میکرو کانال موجی بررسی شده توسط محمد..... ۴۸
- شکل (۲۶-۲) تغییرات مقاومت حرارتی کل بر حسب (a) نسبت کاهش عرض، (b) نسبت کاهش ارتفاع در توان ۰/۵ وات..... ۴۹
- شکل (۲۷-۲) نمایی از میکرو کلکتور دمایی خورشیدی بکار گرفته شده توسط اوتانیکار..... ۵۰
- شکل (۲۸-۲) نمودار تغییرات عملکرد حالت پایدار میکرو کلکتور دمایی خورشیدی بکار گرفته شده توسط اوتانیکار..... ۵۱
- شکل (۲۹-۲) عملکرد کلکتور بصورت تابعی از قطر نانوذرات نقره (مربعات خواص حجم توده، دایره ها خواص وابسته به اندازه و نسبت حجمی)..... ۵۱
- شکل (۳۰-۲) نمایی از کلکتور متمرکز کننده ی سهموی خورشیدی بر اساس نانوسیال (NCPSC)..... ۵۲
- شکل (۳۱-۲) مقایسه عملکرد دمایی بصورت تابعی از دمای میانگین سیال بالای محیط برای NCPSC با کلکتور خورشیدی معمولی..... ۵۳
- شکل (۳۲-۲) نمایی از سیستم آزمایشگاهی بکار گرفته شده توسط یوسفی..... ۵۴
- شکل (۳۳-۲) عملکرد کلکتور خورشیدی با نانوسیال اکسید آلومینیوم بدون ماده فعال سطحی و آب..... ۵۴
- شکل (۳۴-۲) تاثیر درصد حجمی بر روی عدد ناسلت برای خنک سازی سلول خورشیدی..... ۵۵
- شکل (۱-۳) نمایی از طرز اتصال لامپ و ایگناتور و ترانسفورماتور..... ۶۱

- شکل (۲-۳) بخش‌های مختلف فتوولتائیک و کانال..... ۶۲
- شکل (۳-۳) نحوه اتصال مدول‌های فتوولتائیک در سلول خورشیدی..... ۶۲
- شکل (۴-۳) شماتیک سه بعدی کانال مستقیم ترسیم شده با نرم‌افزار اتو کد..... ۶۵
- شکل (۵-۳) نمایی از شکل واقعی کانال مستقیم..... ۶۵
- شکل (۶-۳) نمای واقعی از کانال ساخته شده..... ۶۶
- شکل (۷-۳) شماتیک سه بعدی کانال حلزونی ترسیم شده با نرم‌افزار اتو کد..... ۶۷
- شکل (۸-۳) مدل سه بعدی از میکروکانال..... ۶۸
- شکل (۹-۳) عکس واقعی از میکروکانال..... ۶۹
- شکل (۱۰-۳) ترمومتر استفاده شده جهت ذخیره اطلاعات دما..... ۷۰
- شکل (۱۱-۳) محل نصب ترموکوپلها بر روی سطح فتوولتائیک..... ۷۰
- شکل (۱۲-۳) نمونه‌ای از روند تغییرات دمای سطح فتوولتائیک در یکی آزمایش‌های انجام شده..... ۷۳
- شکل (۱-۴) نمودار تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب عدد رینولدز در ماکروکانال مستقیم..... ۷۸
- شکل (۲-۴) تغییرات دمای میانگین سطح فتوولتائیک بر حسب دبی در ماکروکانال مستقیم..... ۷۹
- شکل (۳-۴) اختلاف دمای ورودی و خروجی سیال خنک‌کننده در ماکروکانال مستقیم..... ۸۱
- شکل (۴-۴) نمودار ضریب انرژی بر حسب رینولدز برای سیال خنک‌کننده در ماکروکانال مستقیم..... ۸۳
- شکل (۵-۴) نمودار تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب عدد رینولدز در ماکروکانال حلزونی..... ۸۵
- شکل (۶-۴) تغییرات دمای میانگین سطح فتوولتائیک بر حسب دبی در ماکروکانال حلزونی..... ۸۶
- شکل (۷-۴) اختلاف دمای ورودی و خروجی سیال خنک‌کننده در ماکروکانال حلزونی..... ۸۷
- شکل (۸-۴) نمودار ضریب انرژی بر حسب رینولدز برای سیال خنک‌کننده در ماکروکانال حلزونی..... ۸۹
- شکل (۹-۴) درصد افزایش توان الکتریکی در دبی‌های مختلف در ماکروکانال مستقیم و حلزونی برای:
 الف) آب، ب) نانوسیال ۰/۰۱ درصد وزنی، ج) نانوسیال ۰/۱ درصد وزنی، د) نانوسیال ۰/۵ درصد وزنی..... ۹۰
- شکل (۱۰-۴) میزان کاهش دمای میانگین سطح در دبی‌های مختلف در ماکروکانال مستقیم و حلزونی: الف)
 آب، ب) نانوسیال ۰/۰۱ درصد وزنی، ج) نانوسیال ۰/۱ درصد وزنی، د) نانوسیال ۰/۵ درصد وزنی..... ۹۱
- شکل (۱۱-۴) تغییرات دمای سیال خروجی بر حسب زمان برای دبی ۴۰ ml/min برای میکروکانال..... ۹۴
- شکل (۱۲-۴) تغییرات دمای سیال خروجی بر حسب زمان برای دبی ۸۰ ml/min برای میکروکانال..... ۹۴
- شکل (۱۳-۴) تغییرات دمای سیال خروجی بر حسب زمان برای دبی ۱۵۰ ml/min برای میکروکانال..... ۹۵
- شکل (۱۴-۴) تغییرات دمای سیال خروجی بر حسب زمان برای دبی ۲۰۰ ml/min برای میکروکانال..... ۹۵
- شکل (۱۵-۴) تغییرات دمای سیال خروجی بر حسب زمان برای دبی ۳۰۰ ml/min برای میکروکانال..... ۹۶
- شکل (۱۶-۴) تغییرات دمای میانگین سطح فتوولتائیک بر حسب دبی برای میکروکانال..... ۹۷

- شکل (۴-۱۷) نمودار توان بر حسب ولتاژ در دبی‌های مختلف و بدون خنک‌سازی برای سیال آب برای میکروکانال..... ۹۸
- شکل (۴-۱۸) نمودار تغییرات کاهش فشار بر حسب دبی در میکروکانال..... ۱۰۰
- شکل (۴-۱۹) نمودار ضریب انرژی بر حسب رینولدز برای سیال خنک‌کننده در میکروکانال..... ۱۰۱
- شکل (۴-۲۰) مقایسه میانگین دمای سطح فتوولتائیک برای میکرو و ماکروکانال مستقیم: الف) آب، ب) نانوسیال ۰/۰۱ درصد وزنی، ج) نانوسیال ۰/۱ درصد وزنی..... ۱۰۲
- شکل (۴-۲۱) مقایسه ضریب انرژی برای میکرو و ماکروکانال مستقیم: الف) آب، ب) نانوسیال ۰/۰۱ درصد وزنی، ج) نانوسیال ۰/۱ درصد وزنی..... ۱۰۳

فهرست جدول‌ها

جدول
صفحه

جدول (۱-۱) مقادیر متداول ضریب β	۱۲
جدول (۲-۱) خواص نوری و فیزیکی مایعات مختلف.....	۱۵
جدول (۳-۱) درصد طول موج‌های مختلف در استاندارد ASTM E927.....	۲۰
جدول (۴-۱) دسته‌بندی شبیه‌سازهای خورشیدی بر مبنای استاندارد ASTM E927.....	۲۰
جدول (۵-۱) مقایسه انواع لامپ‌های مورد استفاده در شبیه‌سازهای خورشیدی.....	۲۲
جدول (۱-۲) خلاصه‌ایی از کارهای پیشین در زمینه کاربرد نانوسیال‌ها در کلکتورهای خورشیدی.....	۵۶
جدول (۱-۳) خواص نانوذرات بوهمیت استفاده شده در این تحقیق جهت تهیه نانوسیال.....	۶۰
جدول (۲-۳) مشخصات سلول فتوولتائیک.....	۶۳
جدول (۳-۳) مشخصات هندسی کانال مستقیم.....	۶۴
جدول (۴-۳) مشخصات کانال حلزونی.....	۶۶
جدول (۵-۳) مشخصات میکروکانال.....	۶۸
جدول (۶-۳) مشخصات ترمومتر مورد استفاده.....	۷۰
جدول (۷-۳) مشخصات حس‌گر اندازه‌گیری فشار.....	۷۱
جدول (۸-۳) مشخصات پمپ.....	۷۲
جدول (۱-۴) مقادیر عدد رینولدز و ضریب اصطکاک محاسبه شده در ماکروکانال مستقیم.....	۷۷
جدول (۲-۴) مقادیر اختلاف دمای ورودی و خروجی سیال خنک‌کننده در ماکروکانال مستقیم.....	۸۰
جدول (۳-۴) درصد افزایش توان الکتریکی در دبی‌های متفاوت نانوسیال و آب برای ماکروکانال مستقیم.....	۸۲
جدول (۴-۴) مقادیر ضریب انرژی در دبی‌های مختلف برای سیال خنک‌کننده در ماکروکانال مستقیم.....	۸۳
جدول (۵-۴) مقادیر عدد رینولدز و ضریب اصطکاک محاسبه شده برای ماکروکانال حلزونی.....	۸۴
جدول (۶-۴) مقادیر اختلاف دمای ورودی و خروجی سیال خنک‌کننده در ماکروکانال حلزونی.....	۸۶
جدول (۷-۴) درصد افزایش توان الکتریکی در دبی‌های مختلف نانوسیال و آب در ماکروکانال حلزونی.....	۸۸
جدول (۸-۴) مقادیر ضریب انرژی در دبی‌های مختلف برای سیال خنک‌کننده در ماکروکانال حلزونی.....	۸۸
جدول (۹-۴) ضریب عملکرد توان هیدرولیکی برای سیال خنک‌کننده در دبی‌های مختلف.....	۹۲
جدول (۱۰-۴) درصد افزایش توان الکتریکی در دبی‌های متفاوت نانوسیال و آب برای میکروکانال.....	۹۸
جدول (۱۱-۴) مقادیر عدد رینولدز و ضریب اصطکاک محاسبه شده برای میکروکانال.....	۹۹
جدول (۱۲-۴) مقادیر ضریب انرژی در دبی‌های مختلف برای سیال خنک‌کننده در میکروکانال.....	۱۰۰

فصل اول

مقدمه‌ای بر فتوولتائیک‌ها

۱-۱- مقدمه

به دلیل توسعه سریع و رشد روزافزون جمعیت مصرف انرژی به میزان شگرفی در حال افزایش است. در حال حاضر، سوخت‌های فسیلی مانند ذغال سنگ، نفت و گاز نقش راهبردی را در برخورد با تقاضای انرژی ایفا می‌کنند. همچنین آلودگی زیست محیطی نیز امروزه به دلیل استفاده عظیم از سوخت‌های فسیلی به مشکل جدی تبدیل شده است. به منظور کاهش آلودگی و حفاظت از محیط زیست، فن‌آوری انرژی‌های تجدیدپذیر، ظرفیت بسیار خوبی برای مواجهه با تقاضای جهانی انرژی را دارد. در میان منابع انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی خورشیدی یکی از منابع قابل اعتماد در بسیاری از کشورها می‌باشد و دولت‌ها نیز شرایط ساخت واحدهای انرژی بر پایه انرژی خورشیدی را فراهم کرده‌اند. به منظور تبدیل انرژی خورشیدی به صورت‌هایی از انرژی که مورد نیاز انسان‌هاست چندین راه ترمودینامیکی وجود دارد. بطور کلی گرما، انرژی سینتیکی، الکتریکی و شیمیایی می‌توانند از طریق تبدیل انرژی خورشیدی فراهم شوند [۱].

فتولتائیک تبدیل مستقیم تابش به انرژی الکتریکی است. سیستم‌های فتولتائیک شامل سلول‌هایی است که پرتوهای خورشیدی را به الکتریسیته تبدیل می‌کنند. داخل هر سلول، لایه‌هایی از مواد نیمه هادی وجود دارند. فرود آمدن پرتو بر روی سلول، میدان الکتریکی را مابین لایه‌ها به وجود می‌آورد که باعث ایجاد جریان الکتریکی می‌شود. شدت پرتو، میزان انرژی الکتریکی هر سلول را تعیین می‌کند. براساس مطالعات انجام شده بر روی نیمه هادی‌ها (III-V, II-VI) بر پایه انرژی خورشیدی از سال ۱۹۶۰ و در آن زمان، فن‌آوری جدید برای سلول‌های خورشیدی^۱ سیلیکون پلی کریستال (PC-Si) و فیلم نازک^۲ به منظور کاهش هزینه مواد اولیه، ورودی انرژی کمتر و افزایش ظرفیت تولید تأسیس شده‌اند [۱]. در حال حاضر فتولتائیک یک انرژی تکامل یافته از نظر فنی و تجاری می‌باشد که قادر به تولید و تأمین الکتریسیته کوتاه و یا متوسط مدت با استفاده از انرژی خورشیدی می‌باشد. با این وجود، در حال حاضر نصب فتولتائیک هنوز کم می‌باشد و تنها ۰/۱٪ از کل الکتریسیته تولیدی جهانی را فراهم می‌کند اما در میان برخی از گزارش‌ها اشاره شده که نصب فتولتائیک‌ها با میانگین سرعت ۴۰٪ سالیانه در حال رشد است. هزینه فن‌آوری فتولتائیک، به میزان ۱/۳ آن در سال ۲۰۱۲ نسبت به سال ۲۰۰۷ کاهش یافته است. همچنین با پیشرفت‌های مستمر فنی و تحقیقات روی افزایش عملکرد فتولتائیک، این فن‌آوری شیوه رشد سریع خود را ادامه خواهد داد و

¹ Solar cell

² Thin Film

سرانجام به یکی از تأمین کنندگان مهم انرژی در جهان تبدیل می‌شود [۲].

۱-۲- بررسی وضعیت جهانی فن‌آوری فتوولتائیک خورشیدی

داده‌های تولید جهانی برای سلول خورشیدی در سال ۲۰۱۰ بین ۱۸۰ و ۲۷۰ GW متغیر است. از سال ۲۰۰۰، تولید کلی فتوولتائیک تقریباً با مقدار دو برابر با نرخ رشد سالیانه، بین ۴۰ تا ۹۰٪ افزایش یافته است. در سال ۲۰۱۱ قیمت سیستم الکتریسته فتوولتائیک به میزان ۴۰٪ نسبت به سال ۲۰۰۸ کاهش یافت. پیش‌بینی شده است مصرف جهانی الکتریسته تا سال ۲۰۳۰ به میزان ۲/۴٪ بر سال افزایش خواهد یافت. همچنین به دلیل توسعه فن‌آوری مواد فتوولتائیک استفاده جهانی از انرژی خورشید به طور سریع در حال افزایش است. مواد مونوکریستالی^۱ و سیلیکون^۲ ۸۰٪ میزان فروش فتوولتائیک را پوشش می‌دهند. علاوه بر آنها، فن‌آوری‌های جدید مانند سلول‌های خورشیدی پلیمری-آلی^۳ و هیبریدی هنوز در مرحله مطالعاتی هستند [۲].

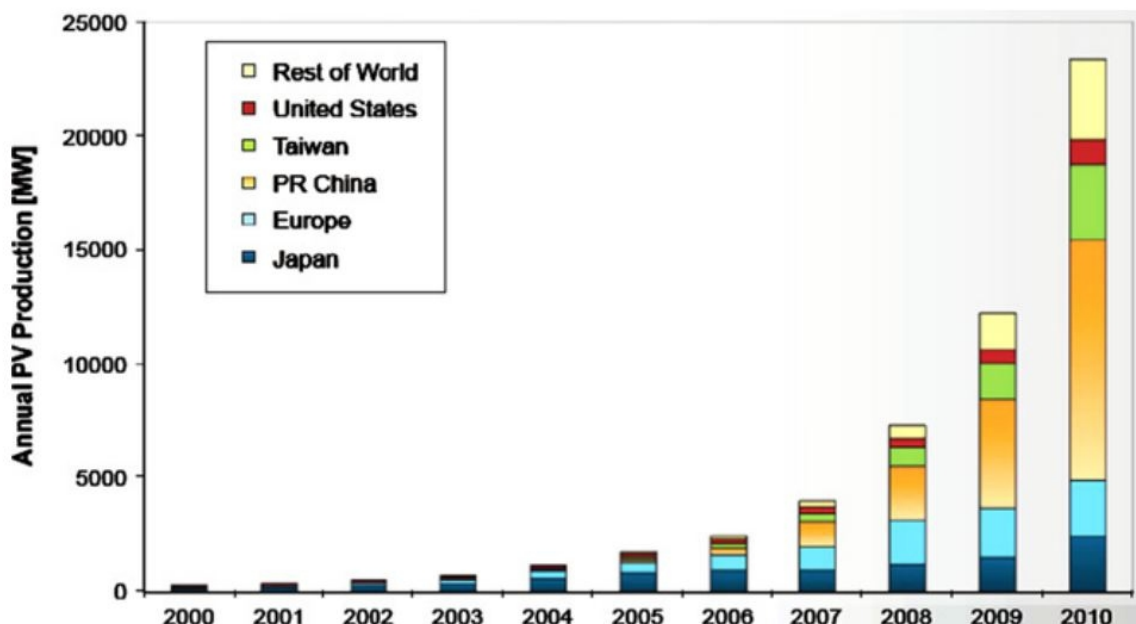
تولید فتوولتائیک از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ توسط کشورهای مانند آمریکا، ژاپن، اروپا و دیگر کشورهای عضو اتحادیه اروپا^۴ گزارش شده که در شکل (۱-۱) ارائه شده است. کشور چین از پیشگامان در تولید سلول خورشیدی می‌باشد. با این وجود کشورهای اروپایی از پیشگامان نصب و تأسیسات فتوولتائیک با توان خروجی ۳۹ GW تا پایان سال ۲۰۱۱ می‌باشند. در ضمن در کشورهای در حال توسعه در آسیا و ناحیه اقیانوسیه مثل هند و مالزی و تایوان و کره و تایلند و دیگر کشورها هم پیشرفت‌های خوبی در نصب فتوولتائیک مشاهده شده است و دلیل آن نیز حمایت‌های همه جانبه دولت‌ها و فراهم آوردن هر گونه منابع مالی برای طرح‌های مربوط به انرژی‌های تجدیدپذیر می‌باشد [۲].

¹ Monocrystalline

² Silicon

³ Polymer/Organic

⁴ JRC



شکل (۱-۱) تولید فتوولتائیک از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ [۲].

۱-۳- مواد مورد استفاده در سلول‌های خورشیدی

مواد مورد استفاده در تولید سلول‌های خورشیدی در شکل (۱-۲) ارائه شده است. سیلیکون به دلیل عملکرد بالا یکی از پیشگامان فن آوری در ساخت سلول‌های خورشیدی می‌باشد. با وجود این، به دلیل قیمت بالای آن بیشتر محققین در جستجوی یافتن راهی برای کاهش قیمت مواد در تولید سلول‌های خورشیدی بوده و تا به امروز (سال ۲۰۱۳) فن آوری فیلم نازک می‌تواند بعنوان جایگزین مناسبی در نظر گرفته شود [۳]. دلایل پایین بودن قیمت فن آوری فیلم نازک، استفاده کمتر مواد و نازک‌تر بودن لایه‌ها در مقایسه با سلول‌های خورشیدی مونو و پلی کریستالی^۱ می‌باشد که منجر به کاهش هزینه تولید می‌شود. با وجود این، عملکرد این فن آوری بر پایه سلول خورشیدی هنوز کم می‌باشد. سه دسته از موادی که توجه زیادی را به سمت خود جلب کرده‌اند در زیر مجموعه فن آوری فیلم نازک، سیلیکون‌های آمورف^۲، کادمیم تلوراید^۳ / کادمیم سولفید^۴، و مس ایندیوم گالیم سلنید^۵ / مس ایندیوم سلنید^۶ می‌باشند. اما محققین به طور مستمر تلاش‌های خود در راستای بهبود عملکرد ادامه می‌دهند. با وجود این، تمامی این مواد اثرات نامطلوب زیست محیطی از خود برجای می‌گذارند [۴]. راه‌حل دیگری که برای فن آوری فیلم نازک توسط محققین

^۱ Monocrystalline and Polycrystalline

^۲ Amorphous

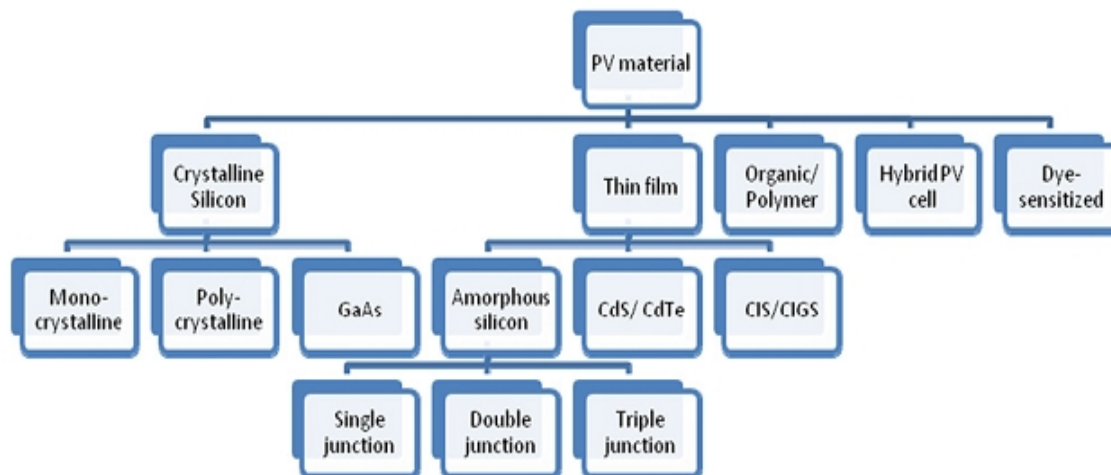
^۳ Cadmium Telluride (CdTe)

^۴ Cadmium Sulphide (CdS)

^۵ Copper indium gallium selenide

^۶ Copper indium selenide

بکار گرفته شده است استفاده از پلیمرها یا مواد آلی بعنوان مواد سلول‌های خورشیدی می‌باشد. مواد پلیمر مزایای بسیاری از جمله قیمت پایین، وزن سبک و سازگاری با محیط زیست را دارا می‌باشند. تنها مشکل آن‌ها داشتن عملکرد بسیار پایین در مقایسه با دیگر مواد، می‌باشد [۵]. از بین تمامی مواد موجود در سلول خورشیدی، سلول‌های خورشیدی سیلیکونی دارای بالاترین عملکرد در مقایسه با سایرین می‌باشند. علاوه بر این، منابع سیلیکونی دومین مواد خامی هستند که بر روی زمین یافت می‌شوند بنابراین به آسانی قابل دسترس می‌باشند [۲].



شکل (۲-۱) نمودار مواد فتوولتائیک [۳].

۱-۴- فن آوری فتوولتائیک خورشیدی

فتوولتائیک‌ها شامل فن آوری‌هایی برای تبدیل پرتوهای خورشید به طور مستقیم به انرژی الکتریکی می‌باشند. عبارت photo به معنی نور و voltaic به معنی الکتریسته می‌باشد. یک سلول فتوولتائیک که به عنوان سلول خورشیدی نیز شناخته شده می‌باشد یک دستگاه نیمه هادی است که وقتی پرتوها بر روی آن سقوط می‌کنند منجر به تولید الکتریسته می‌شود. زمانی که پرتو خورشید به فتوولتائیک برخورد می‌کند فوتون‌های^۱ جذب شده در پرتو خورشید، الکترون‌ها را از اتم‌های سلول به بیرون می‌راند. الکترون‌های آزاد مابین سلول حرکت می‌کنند و باعث پرکردن حفره‌هایی که در سلول ایجاد شده می‌شوند و این حرکت و جابه‌جایی الکترون و حفره‌هاست که سبب تولید الکتریسته می‌شود. همین فرآیند فیزیکی که در سلول فتوولتائیک پرتو خورشید را به الکتریسته تبدیل می‌کند به عنوان اثر فتوولتائیک شناخته شده است. خوشبختانه منبع انرژی که از خورشید به زمین می‌رسد تقریباً 3×10^{24} ژول (J) در هر سال است که حدود ۱۰۰۰۰ بار بزرگتر از مصرف جمعیت امروز جهان می‌باشد. عبارت دیگر، پوشش دهی حدود ۰/۱٪ از سطح

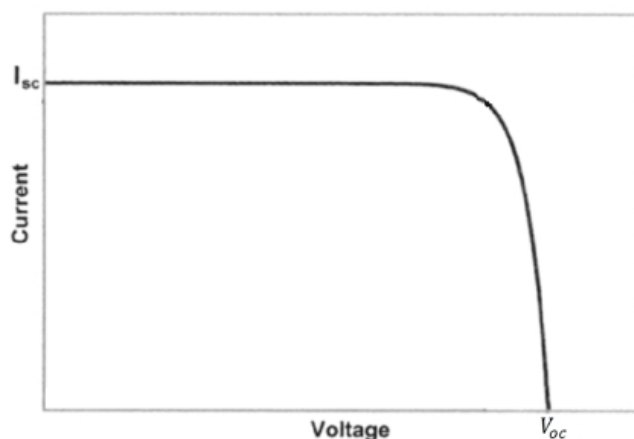
¹ Photon

زمین با سلول‌های خورشیدی با عملکرد ۱۰٪ می‌تواند نیاز حال حاضر ما را تعیین کند [۶]. با پیشرفت برنامه‌های فضایی سلول‌های فتوولتائیک ساخته شده از سیلیکون‌های نیمه هادی به زودی به منبع اصلی انرژی استفاده شده برای ماهواره‌ها تبدیل می‌شود. عملکرد تبدیل انرژی خورشیدی فتوولتائیک به طور معمول بین ۱۵-۲۶٪ می‌باشد [۷]. با این وجود، هزینه بالای تولید این سلول‌های سیلیکونی مانع استفاده گسترده از آنها شده است. از دیگر معایب این سلول‌های سیلیکونی سمی بودن موادی است که در تولید آنها به کار برده می‌شود، که همین جنبه تحقیقات را به سمت یافتن جایگزین‌های سازگار با محیط زیست و ارزان قیمت‌تر برای سلول‌های خورشیدی سوق می‌دهد [۶].

در ادامه به بررسی چگونگی عملکرد سلول‌های فتوولتائیک و تعریف کمیت‌های مربوطه جهت ارزیابی عملکرد آنها پرداخته می‌شود.

۱-۵- منحنی‌های عملکرد سلول‌های فتوولتائیک

منحنی عملکرد سلول‌های فتوولتائیک در یک دما و تشعشع ثابت به دو شکل جریان برحسب ولتاژ و توان برحسب ولتاژ بیان می‌شود. شکل (۱-۳) منحنی جریان-ولتاژ را نشان می‌دهد [۸]:



شکل (۱-۳) منحنی عملکرد جریان برحسب ولتاژ یک سلول فتوولتائیک [۸].

برای بدست آوردن سائز تحلیلی منحنی فوق مدل‌های مختلفی ارائه گردیده است که از این مدل‌ها می‌توان به مدل تک دیود^۲ توسط شاکلی^۳ و مدل دو دیود اشاره نمود [۸]. در منحنی شکل (۱-۳)، دو کمیت I_{sc} و V_{oc} وجود دارد که I_{sc} شدت جریان مدار کوتاه^۴ بوده و مربوط به زمانست که اختلاف پتانسیل بین کاتد^۵

¹ Performance Curves

² Single Diode

³ Shockley

⁴ Short Circuit Current

⁵ Cathode