

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه شهید باهنر کرمان
دانشکده فیزیک

پایان نامه تحصیلی برای دریافت درجه کارشناسی ارشد رشته فوتونیک

اثر تغییر پارامترهای فیزیکی فوتوآنها بر بازده سلول های خورشیدی
رنگدانه ای طبیعی (NDSSCs)

مؤلف:

مریم جعفری نارنجباغی

استاد راهنما:

دکتر حسن فاطمی امام غیث

بهمن ۱۳۹۳



دانشگاه شهید باهنر کرمان

این پایان نامه به عنوان یکی از شرایط دریافت درجه کارشناسی ارشد به

دانشکده فیزیک

دانشگاه شهید باهنر کرمان

تسلیم شده و هیچگونه مدرکی به عنوان فراغت از تحصیل دوره مزبور شناخته نمی شود.

دانشجو: مریم جعفری نارنجباغی

استاد راهنما: دکتر حسن فاطمی امام غیث

استاد مشاور:

دوره ۱: دکتر سید جلیل الدین فاطمی

دوره ۲: دکتر حسین روح الامینی نژاد

نماینده تحصیلات تکمیلی دانشکده در جلسه دفاع: حمید ارجمند کرمانی

معاون آموزشی و پژوهشی دانشکده:

حق چاپ محفوظ و مخصوص به دانشگاه شهید باهنر است.

تقدیم بہ

بہ ہمہ می کسانیکہ مرا باور داشتند...

تقدیر و تشکر

حمد و سپاس خدایی را به سکرانه عزیزانی که مرایاری نمودند صمیمانه، که به پشتوانه ایشان اکنون در اینجا ایستاده ام

استاد کرامت‌مردم جناب آقای دکتر حسن فاطمی امام غیث به پاس حمایت‌ها و راهنمایی‌های بی‌دریغشان

خانواده ام برای همیشه بودنشان

استاد بزرگوار، دکتر مصطفوی، دکتر شهیدی و دکتر احتشام زاده به خاطر مساعدت‌ها و مشاوره‌های

ارزشمندشان

و دوست بسیار ارجمند و عزیزم خانم صدیقه خیاط زاده

چکیده

در این پایان‌نامه به بررسی اثر تغییر پارامترهای فیزیکی فوتوآند بر بازده سلول‌های خورشیدی رنگدانه-ای طبیعی (NDSSC) پرداخته شده است. پارامترهای انتخاب شده، اندازه ی نانو ذرات اکسیدهای نیمه رسانای مورد استفاده در ساخت فوتوآند، دمای پخت فوتوآند، زمان پخت فوتوآند و ضخامت سطح فعال فوتوآند می‌باشند. فوتوآنها در دو سری ساخته شده‌اند. سری اول فوتوآندهایی که در ساخت آنها از TiO_2 استفاده شده است و سری دوم فوتوآندهایی که در ساخت آنها از ZnO استفاده شده است. برای آنالیز حاصل از منحنی مشخصه عملکرد سلول طیف‌سنجی امپدانس شیمیایی (EIS)، طیف‌سنجی بیناب جذبی، تصویر برداری توسط میکروسکوپ الکترون روبشی (SEM) انجام شده است. با بهینه کردن پارامترهای مورد بررسی بازده سلول‌های ساخته شده از فوتوآندهای TiO_2 ۱ درصد و بازده سلول‌های ساخته شده با فوتوآندهای ZnO ۱/۱ درصد افزایش یافته است.

کلمات کلیدی: سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای طبیعی، فوتوآند TiO_2 ، فوتوآند ZnO

صفحه	عنوان
۱	فصل اول : مقدمه
۲	۱-۱ انرژی خورشیدی
۴	۲-۱ سلول‌های خورشیدی
۵	۳-۱ ویژگی‌های فوتوولتاییک سلول‌های خورشیدی
۹	۴-۱ معرفی کارهای انجام شده در این پایان‌نامه
۱۰	فصل دوم : مروری بر سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای اجزاء و عملکرد
۱۱	۱-۲ سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای
۱۱	۲-۲ تاریخچه پیدایش سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای
۱۲	۳-۲ پیکربندی سلول‌های رنگدانه‌ای
۱۲	۲-۳-۱- الکتروود شفاف - الکتروود شفاف
۱۳	۲-۳-۲- الکتروود اکسید نیمه‌رسانا
۱۳	۲-۳-۳- رنگدانه‌های حساس به نور
۱۴	۲-۳-۴- الکتروولیت اکسایشی - کاهشی
۱۵	۲-۳-۵- الکتروود پیشخوان
۱۵	۲-۳-۶- مواد درزبندی یا ضد نشت
۱۵	۲-۴- عملکرد سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای

فصل سوم : فوتوآنود در سلول خورشیدی رنگدانه‌ای ۱۸

۱-۳ جایگاه فوتوآنود در *DSSC* ۱۹

۲-۳ فوتوآنود ۱۹

۳-۳ فرآیند جذب رنگ در فوتوآنود ۲۰

۴-۳ فرآیند انتقال بار از رنگدانه به فوتوآنود ۲۱

۵-۳ انتقال بار در فوتوآنود (از الکتروکسید نیمه رسانا به الکتروکد شفاف) ۲۱

۶-۳ مطالعات انجام شده برای بهینه‌سازی فوتوآنودها ۲۳

۱-۶-۳-۱ دستیابی به ساختارهای متنوع ۲۳

۲-۶-۳-۲ اصلاح با اکسیدهای فلزی ۲۴

۳-۶-۳-۳ مواد تبدیل نور ۲۵

۱-۳-۶-۳-۱ مواد تبدیل نور بالا ۲۵

۲-۳-۶-۳-۲ مواد تبدیل نور پایین ۲۵

فصل چهار : آشنایی با میکروسکوپ الکترون روبشی (*SEM*) ۲۷

۲-۴ مقدمه‌ای بر میکروسکوپ‌های الکترونی روبشی ۲۸

۳-۴ اجزای میکروسکوپ الکترونی روبشی ۲۹

۱-۳-۴-۱ تفنگ الکترونی ۳۰

۲-۳-۴-۲ لنزهای الکترومغناطیسی ۳۰

۳-۳-۴-۳ سیستم روبشگر ۳۱

۴-۳-۴-۴ آشکار سازها ۳۱

۵-۳-۴-۵ تصویرسازی ۳۱

۳۱.....	۶-۳-۴ سیستم خلاء
۳۲.....	۴-۴ آماده سازی نمونه‌های SEM
۳۲.....	۴-۴-۱ تمیز کردن
۳۲.....	۴-۴-۲ برقراری اتصال الکتریکی
۳۳.....	فصل پنجم: مروری بر طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS)
۳۴.....	۱-۵ طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS)
۴۰.....	فصل ششم: ساخت سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای
۴۱.....	۱-۶ ساخت قسمت‌های مختلف سلول
۴۱.....	۱-۱-۱ آماده سازی خمیر نیمه‌رسانا مورد استفاده در فتوآند سلول خورشیدی رنگدانه‌ای
۴۱.....	۱-۱-۱-۱ آماده سازی خمیر ZnO
۴۱.....	۱-۱-۱-۲ آماده سازی خمیر TiO ₂
۴۱.....	۱-۲-۱ ساخت فتوآند سلول خورشیدی رنگدانه‌ای
۴۳.....	۱-۳-۱ ساخت الکتروود پیشخوان (کاتد) سلول خورشیدی رنگدانه‌ای
۴۳.....	۱-۴-۱ ساخت محلول الکتروولیت مورد استفاده در سلول خورشیدی رنگدانه‌ای
۴۴.....	۱-۵-۱ ساخت محلول رنگدانه مورد استفاده در سلول خورشیدی رنگدانه‌ای
۴۴.....	۱-۲-۲ ساخت سلول خورشیدی رنگدانه‌ای
۴۶.....	فصل هفتم: نتایج تجربی حاصل از بررسی‌ها
۴۷.....	۱-۷ فتوآندهای TiO ₂ ساخته شده با اندازه متفاوت نانو ذرات
۴۷.....	۱-۱-۷ آنالیز عملکرد سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای با فتوآندهای نوع A و نوع B
۴۸.....	۱-۲-۷ آنالیز بیناب جذب فتوآندهای نوع A و نوع B

- ۲-۷ فوتوآندهای TiO_2 نوع A پخت شده در دماهای متفاوت ۴۹
- ۱-۲-۷- آنالیز عملکرد سلولهای خورشیدی رنگدانه‌های با فوتوآندهای TiO_2 نوع A پخت شده در دماهای متفاوت ۴۹
- ۲-۲-۷- آنالیز بیناب جذبی فوتوآندهای TiO_2 نوع A پخت شده در دماهای متفاوت ۵۰
- ۳-۲-۷- آنالیز تصاویر SEM فوتوآندهای TiO_2 نوع A پخت شده در دماهای متفاوت ۵۱
- ۱-۳-۲-۷- نتایج به دست آمده برای فوتوآند پخت شده در دمای ۴۵۰ درجه سلسیوس ۵۳
- ۲-۳-۲-۷- نتایج به دست آمده برای فوتوآند پخت شده در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس ۵۴
- ۳-۳-۲-۷- مقایسه توزیع اندازه ذرات برای فوتوآندهای TiO_2 نوع A پخت شده در دماهای متفاوت ۵۶
- ۴-۳-۲-۷- آنالیز طیف‌سنجی امپدانس شیمیایی (EIS) فوتوآندهای نوع A پخت شده در دمای متفاوت ۵۶
- ۳-۷ فوتوآندهای پخت شده TiO_2 نوع A با زمانهای متفاوت پخت ۵۸
- ۱-۳-۷- آنالیز عملکرد سلولهای خورشیدی رنگدانه‌های با فوتوآندهای TiO_2 نوع A پخت شده در مدت زمانهای پخت متفاوت ۵۸
- ۲-۳-۷- آنالیز بیناب جذبی فوتوآندهای TiO_2 نوع A پخت شده در مدت زمانهای پخت متفاوت ۵۹
- ۳-۳-۷- آنالیز تصاویر SEM فوتوآندهای TiO_2 نوع A پخت شده در مدت زمانهای متفاوت ۶۰
- ۱-۳-۳-۷- نتایج به دست آمده برای فوتوآند TiO_2 نوع A پخت شده به مدت زمان ۳۰ دقیقه ۶۳

- ۲-۳-۳-۷- نتایج به دست آمده برای فوتوآند TiO_2 نوع A پخت شده به مدت زمان ۴۰ دقیقه
۶۴.....
- ۳-۳-۳-۷- نتایج به دست آمده برای فوتوآند TiO_2 نوع A پخت شده به مدت زمان ۶۰ دقیقه
۶۶.....
- ۴-۳-۳-۷- مقایسه توزیع اندازه ذرات برای فوتوآندهای TiO_2 نوع A پخت شده در مدت
زمانهای متفاوت ۶۷.....
- ۴-۳-۷- آنالیز طیف سنجی امپدانس شیمیایی (EIS) فوتوآندهای نوع A پخت شده در دمای
متفاوت ۶۸.....
- ۴-۷- فوتوآندهای TiO_2 نوع A با ضخامت‌های متفاوت سطح فعال فوتوآند ۶۹.....
- ۱-۴-۷- آنالیز عملکرد سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای با فوتوآندهای TiO_2 نوع A با
ضخامت‌های متفاوت سطح فعال فوتوآند ۶۹.....
- ۲-۴-۷- آنالیز بیناب جذبی فوتوآندهای TiO_2 نوع A ضخامت‌های متفاوت سطح فعال فوتوآند ۷۰.....
- ۵-۷- فوتوآندهای ZnO پخت شده در دماهای متفاوت ۷۱.....
- ۱-۵-۷- آنالیز عملکرد سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای با فوتوآندهای ZnO پخت شده در
دماهای متفاوت ۷۱.....
- ۲-۵-۷- آنالیز بیناب جذبی فوتوآندهای ZnO پخت شده در دماهای متفاوت ۷۲.....
- ۳-۵-۷- آنالیز تصاویر SEM فوتوآندهای ZnO پخت شده در دماهای متفاوت ۷۳.....
- ۱-۳-۵-۷- نتایج به دست آمده برای فوتوآند ZnO پخت شده در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس
..... ۷۵.....
- ۲-۳-۵-۷- نتایج به دست آمده برای فوتوآند ZnO پخت شده در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس
..... ۷۶.....

- ۷-۵-۳- نتایج به دست آمده برای فوتوآند ZnO پخت شده در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس
۷۸.....
- ۷-۵-۴- مقایسه توزیع اندازه ذرات برای فوتوآندهای ZnO پخت شده در دماهای متفاوت
۷۹.....
- ۷-۶-۶- فوتوآندهای پخت شده ZnO با زمان‌های متفاوت پخت.....
۷۹.....
- ۷-۶-۱- آنالیز عملکرد سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای با فوتوآندهای ZnO پخت شده در
مدت زمان‌های پخت متفاوت
۸۰.....
- ۷-۶-۲- آنالیز بیناب جذبی فوتوآندهای ZnO پخت شده در مدت زمان‌های پخت متفاوت
۸۰.....
- ۷-۶-۳- آنالیز تصاویر SEM فوتوآندهای ZnO پخت شده در مدت زمان‌های متفاوت
۸۱.....
- ۷-۶-۳-۱- نتایج به دست آمده برای فوتوآند ZnO پخت شده به مدت زمان ۲۰ دقیقه
۸۴.....
- ۷-۶-۳-۲- نتایج به دست آمده برای فوتوآند ZnO پخت شده به مدت زمان ۳۰ دقیقه
۸۵.....
- ۷-۶-۳-۳- نتایج به دست آمده برای فوتوآند ZnO پخت شده به مدت زمان ۶۰ دقیقه
۸۷.....
- ۷-۶-۳-۴- مقایسه توزیع اندازه ذرات برای فوتوآندهای ZnO با زمان‌های پخت متفاوت
۸۸.....
- ۷-۷-۷- فوتوآندهای ZnO با ضخامت‌های متفاوت
۸۹.....
- ۷-۷-۱- آنالیز عملکرد سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای با فوتوآندهای ZnO با ضخامت‌های
متفاوت سطح فعال فوتوآند
۸۹.....
- ۷-۷-۲- آنالیز بیناب جذبی سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای با فوتوآندهای ZnO با ضخامت
های متفاوت
۹۰.....
- ۷-۷-۳- آنالیز طیف‌سنجی امپدانس شیمیایی (EIS) فوتوآندهای ZnO با ضخامت متفاوت
۹۰.....
- ۷-۸- نتیجه‌گیری
۹۲.....

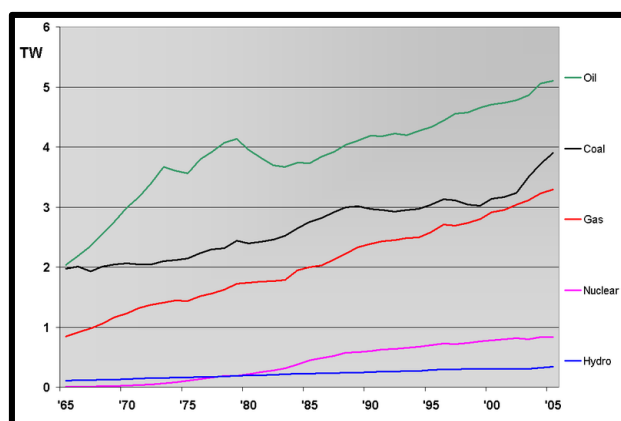
فصل اول

مقدمه

در این فصل، به عنوان مقدمه، به طور کوتاه به ضرورت استفاده از سلول‌های خورشیدی و معرفی سلول خورشیدی و مشخصات آن پرداخته شده است.

۱-۱ انرژی خورشیدی

امروزه از مهمترین چالش‌های پیش روی بشر نیاز به تامین انرژی است. عدم تطابق بین تقاضای انرژی و تامین انرژی از مسائل مهم روز و چالش برانگیز است. طبق آمار در سال ۲۰۰۴، در جهان حدود ۲۲۰ میلیون بشکه نفت در روز، در یک سال مورد استفاده قرار می‌گیرد. (تقریباً ۴۰۵ تراوات انرژی) [۱]. تامین انرژی از منابع گوناگونی انجام می‌گیرد که بخش عمده‌ای از آن را سوخت‌های فسیلی همچون نفت، زغال سنگ و گاز طبیعی تشکیل می‌دهند. پیش‌بینی شده است که نیاز به انرژی جهان با نرخ ۲٪ سالانه افزایش می‌یابد. در شکل (۱-۱) میزان مصرف از منابع گوناگون انرژی در بین سال‌های ۱۹۶۵ تا ۲۰۰۵ میلادی نشان داده شده است [۲].



شکل (۱-۱): میزان استفاده از منابع گوناگون انرژی از سال ۱۹۶۵ تا ۲۰۰۵ میلادی [۲].

انرژی تجدیدپذیر و پاک سوق پیدا کرده است. استفاده از انرژی‌هایی چون انرژی خورشیدی، انرژی باد، انرژی زیست توده و ... جدول (۱-۱) میزان انرژی ممکن، حاصل از منابع همچون خورشید، باد و زیست توده در یک سال و نیز مصرف عمده انرژی و انرژی الکتریکی در سال ۲۰۰۵ میلادی را نشان می‌دهد [۲].

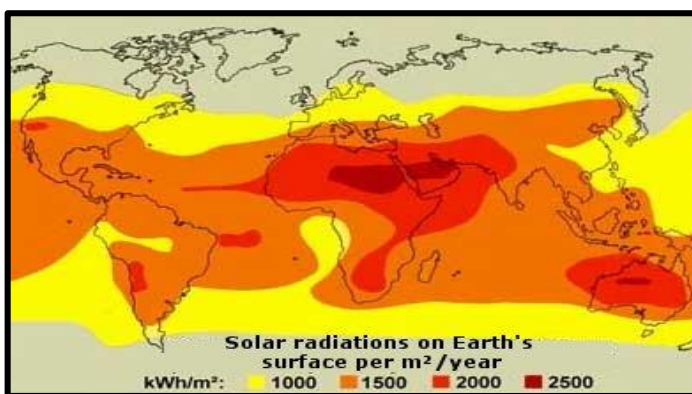
¹ Biomass

جدول ۱-۱ - میزان انرژی حاصل از منابع انرژی در یک سال و مصرف انرژی در سال ۲۰۰۵ [۲].

انرژی خورشیدی	۳۸۵۰۰۰۰ EJ*
انرژی باد	۲۲۵۰ EJ
انرژی زیست توده	۳۰۰۰ EJ
انرژی مصرفی در سال ۲۰۰۵ میلادی	۴۸۷ EJ
انرژی الکتریکی مصرفی در سال ۲۰۰۵ میلادی	۵۶۷ EJ

* (EJ برابر با 10^{18} ژول است).

آنچنان که داده های جدول ۱-۱ نشان می دهد، فقط استفاده از ۰/۰۱ انرژی خورشیدی برای تامین انرژی مصرف شده در سال ۲۰۰۵ میلادی کافی است. از بهترین این منابع خورشید است. استفاده از انرژی خورشیدی منجر به تولید گازهای گلخانه ای نمی شود. گازهای گلخانه ای علاوه آلودگی محیط زیست با جذب گستره ی طول موجی مادون قرمز سبب گرم شدن زمین می شوند. انرژی خورشیدی برخلاف انرژی هایی همچون باد و برق آبی، به آسانی در همه جا در دسترس است. شکل (۲-۱) میزان انرژی خورشیدی در جهان را نشان می دهد.



شکل (۲-۱): نقشه ناسا از پتانسیل انرژی خورشیدی جهان*

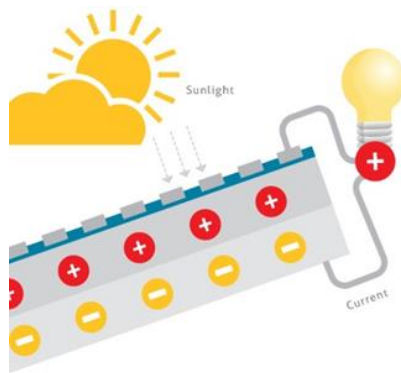
همانطور که در شکل دیده می شود، بسیاری از بخش های جهان می توانند از انرژی خورشیدی به عنوان منبع اولیه برای تولید انرژی استفاده کنند؛ به طور ویژه، کشورهایی که در نزدیک خط استوا

* <http://www.meteorologyclimate.com/climate-variation-factors.htm>

قرار دارند. در واقع خورشید یکی از منابع تامین انرژی رایگان، پاک، همیشگی، با امکان دستیابی آسان و عاری از اثرات مخرب زیست محیطی می باشد که از دیرباز به روش های گوناگون مورد استفاده بشر قرار گرفته است.

۲-۱ سلول های خورشیدی

یکی از راه های بهره وری از خورشید، این منبع انرژی عظیم، استفاده از سلول های خورشیدی است. سلول خورشیدی وسیله ای است که با بهره گیری از پدیده فوتولتاییک^۱، تبدیل انرژی خورشید به الکتریسیته بدون اتصال به منبع ولتاژ خارجی، انرژی خورشیدی را به انرژی الکتریکی تبدیل می کند. پدیده فوتولتاییک: آزادسازی الکترون بر اثر تابش نور بر ماده و تولید جریان الکتریکی را پدیده فوتولتاییک می گویند. شکل (۳-۱) این پدیده را نشان می دهد.



شکل (۳-۱): پدیده فوتولتاییک (آزادسازی الکترون بر اثر تابش نور بر ماده)*

پدیده فوتولتاییک فقط با برخی از طول موج ها ایجاد می شود. علت این است که فوتون ها باید یک حداقل انرژی برای برانگیختن الکترون های ماده را داشته باشند. این انرژی برابر با گاف انرژی^۲ بین باندها و یا ترازهای مولکولی ماده است. بخشی از فوتون ها که انرژی کافی برای برانگیختن الکترون در نیمه رسانا یا مولکول را نداشته باشند، توسط ماده ی فوتولتاییک جذب نمی شوند. از سویی

¹ Photovoltaic

² Band Gap

* <http://www.sunipod.com/blog/solar-photovoltaic-component-basics>

دیگر، اگر انرژی بیشتر از انرژی لازم برای برانگیختن الکترون باشد، انرژی اضافی هدر می‌رود. این دو پدیده سبب می‌شود که ۷۰٪ انرژی خورشید بدون مصرف باقی بماند*. از جمله کاربردهای سلول های خورشیدی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. تامین نیروی حرکتی ماهواره ها و سفینه های فضایی
۲. تامین انرژی لازم برای دستگاه هایی که نیاز به ولتاژهای کمی دارند. (مانند ماشین حساب و ساعت)
۳. تهیه ی برق شهر توسط نیروگاه های فتوولتاییک
۴. تامین نیروی لازم برای حرکت خودروها و قایق های کوچک
۵. درآبیاری و پمپاژ

۳-۱ ویژگی های فتوولتاییک سلول های خورشیدی

۱. جریان اتصال کوتاه^۱ I_{sc} :
میزان جریان اندازه گیری شده به ازای ولتاژ اعمال شده ی صفر می‌باشد. جریان اتصال کوتاه تابعی از شدت تابشی می‌باشد [۱].
۲. ولتاژ مدار باز^۲ V_{oc} :
میزان ولتاژ اندازه گیری شده به ازای جریان صفر می‌باشد [۱].
۳. بیشترین توان خروجی
تحت یک ولتاژ مشخص، توان خروجی یک سلول خورشیدی برابر است با حاصلضرب جریان در ولتاژ

$$P(V) = I \times V \quad (1-1)$$

¹ Short Circuit Current

² Open circuit Voltage

*<http://dc344.4shared.com/doc/ULh-YoeP/preview.html>

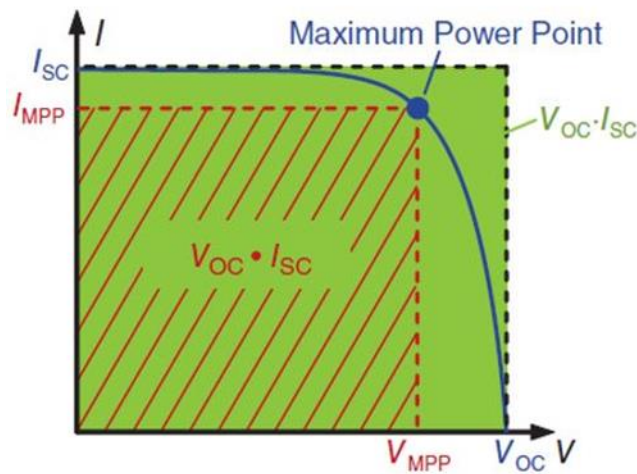
حاصلضرب I_{ppm} و V_{ppm} نشان دهنده ی بیشترین توان خروجی می باشد. این نقطه در جایی از منحنی جریان - ولتاژ قرار دارد که بزرگترین مستطیل زیر منحنی جریان - ولتاژ را تشکیل می دهد [۳].

۴. فاکتور پرکردن^۱ (FF)

برابر است با نسبت بیشینه توان به حاصلضرب جریان اتصال کوتاه و ولتاژ مدار باز

$$FF = \frac{I_{ppm} \times V_{ppm}}{I_{sc} \times V_{oc}} \quad (۲-۱)$$

این کمیت نشان دهنده ی انحراف نمودار جریان - ولتاژ از حالت مربعی خود است [۱]. با توجه به شکل (۴-۱) می توان آن را نسبت مساحت تیره به مساحت مستطیل روشن تعریف کرد.



شکل (۴-۱): نمودار جریان - ولتاژ یک سلول خورشیدی رنگدانه ای و ویژگی های فوتولتائیک آن*

۵. بازده توان تبدیل^۲ η

این کمیت نشان دهنده ی عملکرد یک سلول خورشیدی است و به صورت نسبت بیشینه توان خروجی از سلول خورشیدی به توان فرودی به سلول خورشیدی بیان می شود [۴].

¹ Filly Factor

² Efficiency

*K.Mertens:textbook-pv.org

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{in}} = \frac{I_{ppm} \times V_{ppm}}{P_{in}} = \frac{I_{sc} \times V_{oc} \times FF}{P_{in}} \quad (3-1)$$

۶. بازده تبدیل فوتون فرودی به جریان^۱ ($IPCE$)

این کمیت توسط اندازه گیری جریان حاصل از تابش فوتون و نیز شدت نور تابیده شده تعیین می شود و برابر است با نسبت الکترون های جمع آوری شده در الکتروود آند به تعداد فوتون های فرودی به سلول خورشیدی وقتی که سلول خورشیدی در حالت اتصال کوتاه قرار دارد.

$$IPCE(\lambda) = 1240 \times \frac{[I(\lambda) \times I_{dark}]}{\lambda \times P(\lambda)} \quad (4-1)$$

در این رابطه $I(\lambda)$ جریان اتصال کوتاه در شرایط تابشی فرودی در هر طول موج، I_{dark} جریان اتصال کوتاه اندازه گیری شده در شرایط تاریکی، $P(\lambda)$ توان طیف فرودی در هر طول موج است. λ برحسب میکرون، I و I_{dark} برحسب آمپر بیان می شوند.

$$IPCE = LHE \times \phi_{inj} \times \phi_{coll} \quad (5-1)$$

کمیت بازده تبدیل فوتون فرودی به جریان ($IPCE$)، بازده کوانتومی خارجی^۲ (EQE) نیز نامیده می شود [۵،۶].

در رابطه ۵-۱ LHE بازده برداشت نوری می باشد که به صورت نسبت تعداد فوتون های جذب شده توسط مولکول های رنگدانه به تعداد فوتون های تابیده شده به سلول خورشیدی بیان می شود و از رابطه زیر به دست می آید [۸-۶].

$$LHE = 1 - 10^{-\Gamma \sigma(\lambda)} \quad (6-1)$$

$\Gamma \rightarrow$ تعداد مول های رنگ در هر مربع (mol/cm^2)

$\sigma \rightarrow$ جذب سطح مقطع (cm^2/mol)

¹ Incident Photon to Current Efficiency

² External Quantum Efficiency

³ Light Harvesting Efficiency