

رسالة محمد



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده فیزیک

رشته فیزیک گرایش نانو

پایان نامه کارشناسی ارشد

استفاده از مواد نانو ساختار ارزان قیمت برای بهینه سازی  
عملکرد سلول‌های خورشیدی

نگارنده: سمیرا گریوانی

استاد راهنما:

دکتر حمید هراتی زاده

شهریور ۱۳۹۵



تقدیم به پدر و مادر عزیزم :

خدای رابی شاکرم که از روی کرم پدر و مادری فداکار نصیحت ساخته تا در سیه درخت پر بار وجودشان بیایم و از ریشه آنها شاخ و برگ گیرم و از سیه وجودشان در راه کسب علم و دانش تلاش نمایم .

والدینی که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نشان دلیلی است بر بودنم چرا که این دو وجود پس از پروردگاریه هستی ام بوده اند و دستم را گرفتند و راه رفتن را در این وادی زندگی پر از فراز و نشیب آموختند.

آموزگاری که برایم زندگی؛ بودن و انسان بودن را معنا کردند.

حال این برگ سبزی است تخم درویش تقدیم آنان...

به پاس تعبیر عظیم و انسانی شان از کلمه ایثار و از خودگذشتگی...

به پاس عاطفه سمرشار و گرمای امید بخش وجودشان که در این سردترین روزگار ان بهترین پشتیبان است .

به پاس قلب های بزرگشان که فریاد رس است و سرگردانی و ترس در پناهنشان به شجاعت می کراند.

و به پاس محبت های بی دینشان که هرگز فروکش نمی کند.

این مجموعه را به پدر و مادر عزیزم تقدیم می کنم .

# تقدیر و شکر

پاس خدای راکه سخوران، در ستودن او بماند و شمارندگان، شمردن نعمت های او ندانند و کوشندگان، حق او را کزاردن توانند. و سلام و دور بر محمد و خاندان پاک او، طاهران معصوم، هم آنان که وجودمان و مدار وجودشان است؛ و نفرین پیوسته بر دشمنان ایشان تا روز تسخیر... بدون شک جایگاه و منزلت معلم، اجل از آن است که در مقام قدر دانی از زحمات بی شائبه ی او، بازبان قاصر و دست ناتوان، چیزی بنگاریم.

اما از آنجایی که تجلیل از معلم، پاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تاسین می کند و سلامت امانت های راکه به دستش سپرده اند، تضمین؛ بر حسب وظیفه و از باب "من لم یسکر المنعم من المخلوقین لم یسکر الله عزوجل":

بر خود لازم می دانم از زحمات جناب آقای دکتر حمید مرآت زاده استاد کرامت قدرم که در طول مسیر انجام پروژه همیشه همراه و کمک حال بنده

بوده اند شکر و قدر دانی بنمایم بی شک بدون راهبانی های ایشان انجام این پروژه امری بسیار سخت می بود. و برای ایشان از خداوند یگانه شادی و

موفقیت روز افزون آرزو مندم.

پنجین از اساتید محترم جناب آقای دکتر لطفی از دانشگاه گلستان و دکتر رحمانی که زحمت داوری پایان نامه را بر عهده داشتند سپاسگزارم.

پنجین از رانندگانی صبورانه میسرکار خانم دکتر عباسی در طول انجام پروژه بسیار تشکر می‌کنم.

از جناب آقای عسکری که در امور آزمایشگاه صمیمانه یاری و راهنمایی کرد بسیار سپاسگزارم و از خداوند یکتا برای ایشان سلامتی و خوشبختی

آرزو مندم.

و در انتها از تمام دوستان مهربانم سایه، مینو، الهه، حمیده، سمیرا و سپیده های عزیزم، که در طول انجام پروژه باهدلی و مهربانی و صبر در تلخ و شیرین

روزهای باهم زیستنمان، مشوق و هم زبان و یار من بودند، نهایت تشکر و قدردانی را دارم و برایشان از پروردگاران سلامتی و شادکامی خواستارم.

ممنونم و دوستانتان دارم

سمیرا کریمی (شهریور ۱۳۹۵)

## تعهد نامه

اینجانب سمیرا گریوانی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته نانو فیزیک دانشکده فیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه استفاده از مواد نانو ساختار ارزان قیمت برای بهینه سازی عملکرد سلول‌های خورشیدی تحت راهنمایی جناب آقای دکتر حمید هراتی زاده متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده ( یا بافتهای آنها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است ) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

## چکیده:

بشر به دلیل نیاز مبرم به جایگزینی انرژی ناشی از سوخت‌های فسیلی توسط انرژی‌های تجدید پذیر و نو مانند انرژی خورشیدی، به صورت گسترده‌ای در حوزه‌ی سلول‌ها و جمع‌کننده‌های خورشیدی در حال انجام پروژه‌های تحقیقاتی و صنعتی است. از پارامترهای تاثیرگذار در انتخاب سلول‌های خورشیدی، قیمت تمام شده و تکنولوژی ساخت سلول‌ها می باشد. که هدف کاهش قیمت تمام شده و سادگی تکنولوژی به کار رفته در فرآیند ساخت آنها است. به همین دلیل سلول‌های رنگدانه‌ای در سال‌های اخیر مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته است و محققین در تلاشند با استفاده از مواد ارزان قیمت‌تر و فرآیندهای ساده‌تر به تولید انبوه این سلول‌ها دست یابند. به عنوان مثال استفاده از رنگدانه‌های پلیمری اخیراً مورد توجه قرار گرفته است

در این پایان نامه، تلاش شده است تا به کمک فناوری نانو و با استفاده از نانو ساختارهای ارزان قیمت‌تر، در مقایسه با مواد موجود به کار رفته در سلول‌های رنگدانه‌ای، هزینه‌ی ساخت سلول کاهش یابد. براین اساس برای ساخت سلول‌های رنگدانه‌ای، از نانو میله‌های اکسید روی به عنوان فتوآند استفاده شد. اکسید روی نسبت به  $TiO_2$ ، ماده‌ی ارزانه‌تری است و با وجود ساختارهای مختلف آن که با روش‌های به نسبت راحت‌تری به دست می آیند؛ نسبت به  $TiO_2$ ، در دسترس تر است. همچنین به دلیل مشابهت گاف نواری و لبه نوار رسانش اکسید روی با فاز آناتاز  $TiO_2$  و بالاتر بودن تحرک پذیری ZnO نسبت به  $TiO_2$ ، انتقال سریع‌تر الکترون و کاهش بازترکیب زوج الکترون-حفره میسر شده است اما به دلیل پایداری شیمیایی نسبتاً ضعیف اکسید روی در محیط رنگدانه‌ای، مدت زمان حضور نانو ساختارهای اکسید روی در محیط رنگدانه، نسبت به  $TiO_2$ ، کاهش یافته است. تمام این ویژگی‌ها، باعث شده است تا نانو ساختارهای اکسید روی به عنوان یکی از گزینه‌های مناسب برای جایگزینی دی‌اکسید تیتانیوم، مورد توجه ویژه‌ی محققین سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای، قرار بگیرد. در این پایان نامه، بر روی مدت زمان پایداری فتوآند سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای ساخته شده



به روش ساده و به نسبت ارزان دکتر بلید، با نانو میله‌های اکسید روی در داخل محلول رنگدانه‌ی N719 و نیز تاثیر زمان بازپخت بر روی ساختار نانو میله‌های اکسید روی، مقایسه‌ای انجام شده است. در نهایت پارامترهای فتوولتائیک سلول‌های خورشیدی ساخته شده در حضور تابش مستقیم نور خورشید در شرایط مختلف آب و هوایی و ساعات مختلف روز در شهر شاهرود و همچنین در حضور شبیه‌ساز خورشیدی با طیف تابش خورشیدی AM1/5 G، اندازه‌گیری شد و منحنی جریان-ولتاژ آنها ترسیم شده است. بر این اساس سلول خورشیدی رنگدانه‌ای ساخته شده با نانو میله‌ی اکسید روی با دمای زینتر  $400^{\circ}\text{C}$  و مدت زمان ماندگاری ۶ ساعت در رنگ، بالاترین بازدهی به میزان ۰/۰۶۸٪، بعد از مدت زمان دوماه از زمان ساخت سلول را به خود اختصاص داده است.

همچنین بر روی کاهش مقاومت و افزایش شفافیت زیرلایه‌ی FTO، که به عنوان بستر در DSSC‌ها، استفاده می‌شود، مطالعاتی انجام شد. با ساخت تعدادی زیرلایه‌ی FTO، با پیش ماده‌های مختلف  $\text{SnCl}_4$  و  $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  و بررسی مقاومت و شفافیت آنها، بهترین نمونه برای استفاده در DSSC‌ها، مشخص گردید. با توجه به مشابهت بلورینگی هر دو نمونه، مقایسه‌ای بر روی میزان مقاومت و شفافیت نمونه‌ها انجام شد. زیرلایه‌ی ساخته شده با  $\text{SnCl}_4$ ، در مقایسه با نمونه‌ی  $\text{SnCl}_2$  دارای مقاومت الکتریکی به نسبت کمتری است، اما شفافیت نمونه‌ی  $\text{SnCl}_2$  بهتر بوده است. در مواردی که مقاومت پارامتر موثرتری نسبت به شفافیت می‌باشد،  $\text{SnCl}_4$ ، نمونه‌ی مناسبتری برای استفاده در DSSC‌ها است. و می‌توان از آن به عنوان زیرلایه‌ی سلول‌های خورشیدی استفاده کرد.

**کلمات کلیدی:** سلول خورشیدی رنگدانه‌ای، نانو ساختارها، نانومیله‌ی اکسید روی، FTO

## لیست مقالات مستخرج شده از پایان نامه

۱. گریوانی، سمیرا؛ هراتی زاده ، حمید؛ عباسی فیروزجاه، مرضیه، (۱۳۹۴). ” بررسی تاثیر پیش ماده های  $\text{SnCl}_4$  و  $\text{SnCl}_2$  در خواص اپتیکی و الکتریکی لایه‌ی نازک اکسید قلع برای استفاده در سلول‌های خورشیدی نانوساختار ” ، همایش ملی فیزیک و کاربردهای آن ، ۸ بهمن ماه ۱۳۹۴، دانشگاه ملایر، ملایر

## فهرست مطالب

### فصل اول: پدیده فتوولتائیک

صفحه	عنوان
۳.....	۱-۱ معرفی پدیده فتوولتائیک.....
۳.....	۲-۱ اهمیت پدیده فتوولتائیک.....
۳.....	۱-۲-۱ کاربردهای سلول خورشیدی.....
۴.....	۲-۲-۱ مشکلات و مزایای استفاده از انرژی خورشیدی.....
۷.....	۳-۱ تاریخچه پدیده فتوولتائیک.....
۹.....	۴-۱ مکانیزم تبدیل تابش خورشیدی به الکتریسیته.....
۱۰.....	۵-۱ انواع سلول های خورشیدی.....
۱۰.....	۱-۵-۱ نسل اول سلول های خورشیدی.....
۱۱.....	۲-۵-۱ نسل دوم سلول های خورشیدی.....
۱۲.....	۳-۵-۱ نسل سوم سلول های خورشیدی.....
۱۳.....	۴-۵-۱ محدودیت های نسل های مختلف سلول خورشیدی.....

جمع‌بندی ..... ۱۵

## فصل دوم: سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای (DSSC)

۱-۲ معرفی سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای ..... ۱۸

۱-۱-۲ تاریخچه‌ی سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای ..... ۱۸

۲-۲ اجزای مختلف سلول خورشیدی رنگدانه‌ای ..... ۱۹

۱-۱-۲ زیرلایه ..... ۱۹

۲-۲-۲ فوتوآند ..... ۱۹

۳-۲-۲ رنگدانه‌ها ..... ۱۹

۴-۲-۲ الکترولیت ..... ۲۰

۵-۲-۲ الکتروود شمارشگر ..... ۲۱

۶-۲-۲ بستن سلول ..... ۲۲

۳-۲ ساختار و اصول عملکرد سلول خورشیدی رنگدانه‌ای ..... ۲۲

۴-۲ سازوکار سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای ..... ۲۳

۵-۲ مشخصه‌یابی سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای به کمک آنالیز جریان - ولتاژ ..... ۲۶

۱-۵-۲ اندازه‌گیری بازده ..... ۲۷

۲-۵-۲ ضریب پرشدگی ..... ۲۸

۳-۵-۲ چگالی جریان مدار کوتاه ..... ۲۸

۲۹.....	۴-۵-۲ ولتاژ مدار باز
۲۹.....	۶-۲ روند تجاری سازی سلول های خورشیدی
۳۲.....	جمع بندی

## فصل سوم: مروری بر مقالات

۳۴.....	۱-۳ اکسید رسانای شفاف TCO
۳۵.....	۱-۱-۳ مروری بر مقالات اکسید رسانای شفاف آلییده شده با فلئورید FTO
	۱-۱-۳-۱ اثر آلیش فلئور بر روی خواص ساختاری، اپتیکی و الکتریکی از فیلم نازک $\text{SnCl}_2$
۳۵.....	تهیه شده به روش اسپری التراسونیک
۳۶.....	۲-۱-۳-۱ اثر غلظت $\text{SnCl}_4$ بر روی فیلم های نازک اکسید قلع آلییده با فلئورید
۳۸.....	۲-۳ مواد نانوساختار قابل استفاده به عنوان فتو آند
۳۸.....	۱-۲-۳ نانوساختار نیمه رسانای اکسید روی (ZnO)
۴۱.....	۳-۳ انواع نانو ساختارهای اکسید روی مورد استفاده در سلول های خورشیدی رنگدانه ای
۴۲.....	۱-۱-۳-۳ رشد نانومیله اکسید روی
۴۷.....	۲-۳-۳ نانو میله اکسید روی
۴۸.....	۱-۲-۳-۳ سنتز نانومیله اکسید روی
۵۰.....	۳-۳-۳ نانو لوله ی اکسید روی
۵۱.....	۴-۳-۳ نانو تیپ اکسید روی

- ۵۱-۳-۳ ..... ۵-۳-۳ نانو ساختارهای دیگر اکسید روی
- ۵۱-۳-۳ ..... ۱-۵-۳-۳ نانوصفحات اکسید روی
- ۵۲-۳-۳ ..... ۲-۵-۳-۳ نانو تسمه‌های اکسید روی
- ۵۲-۳-۳ ..... ۳-۵-۳-۳ نانو چهارپره‌های اکسید روی
- ۴-۳-۳ مروری بر مقالات سنتز و ساخت سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای براساس نانو میله‌های اکسید روی
- ۵۳-۳-۳ ..... ۱-۴-۳ رشد، ویژگی‌ها و سلول‌های خورشیدی حساس به رنگ با استفاده از نانو میله‌های اکسید روی رشد داده شده توسط فرایند محلول حرارتی دما پایین
- ۲-۴-۳ مقایسه‌ی رنگ‌های مصنوعی به عنوان رنگ حساس کننده برای سلول خورشیدی رنگدانه‌ای
- ۵۷-۳-۳ ..... ۵-۳-۳ برخی از روش‌های رشد نانوساختارهای دی‌اکسید تیتانیوم، اکسید روی
- ۶۰-۳-۳ ..... ۱-۵-۳ رشد نانو ساختارها از فاز بخار
- ۶۰-۳-۳ ..... ۱-۱-۵-۳ رشد از فاز بخار فیزیکی
- ۶۱-۳-۳ ..... ۲-۱-۵-۳ رشد از فاز بخار شیمیایی
- ۶۱-۳-۳ ..... ۳-۱-۵-۳ رسوب دهی از فاز بخار شیمیایی حرارتی
- ۶۲-۳-۳ ..... ۴-۱-۵-۳ رسوب دهی شیمیایی بخار آلی فلزی
- ۶۳-۳-۳ ..... ۲-۵-۳ رشد نانوساختارها به روش رسوب محلول
- ۶۳-۳-۳ ..... ۱-۲-۵-۳ فرآیند رشد هیدور ترمال

۶۴	.....زل- ۲-۲-۵-۳ روش سل
۶۵	..... روش‌های مشخصه یابی نانو ساختارها
۶۵	..... ۱-۶-۳ میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)
۶۷	..... ۲-۶-۳ طیف پراش پرتو ایکس (XRD)

## فصل چهارم: روش‌های انجام آزمایش (بحث و نتایج)

۷۰	..... مقدمه
۷۰	..... ۱-۴ ساخت و مشخصه‌یابی اکسید رسانای شفاف FTO
۷۰	..... ۱-۱-۴ روش ساخت FTO ها
۷۰	..... ۲-۱-۴ روش آماده سازی محلول اسپری
۷۱	..... ۱-۲-۱-۴ بررسی خواص الکتریکی نمونه‌های FTO ها
۷۳	..... ۲-۲-۱-۴ بررسی خواص اپتیکی
۷۵	..... ۳-۲-۱-۴ بررسی خواص ساختاری نمونه‌های FTO
۷۶	..... ۲-۴ سنتز نانو میله‌ی اکسید روی
۷۷	..... ۱-۲-۴ آنالیز پراش پرتو X (XRD) نانو پودر اکسید روی
۷۷	..... ۲-۲-۴ آنالیز میکروسکوپ الکترون روبشی FESEM نانو پودر اکسید روی
۷۸	..... ۳-۴ ساخت سلول خورشیدی رنگدانه‌ای با استفاده از پودر نانو میله اکسید روی
۷۸	..... ۱-۳-۴ ساخت خمیر از پودر نانو میله اکسید روی

- ۷۸..... ۱-۱-۳-۴ انواع پلی اتیلن گلیکول و تفاوت آنها با (PEG400)
- ۷۹..... ۲-۱-۳-۴ تهیه خمیر نانو میله اکسید روی با پلی اتیلن گلیکول (PEG400)
- ۸۱..... ۲-۳-۴ مراحل ساخت سلول خورشیدی رنگدانه ای به روش دکتر بلید
- ۸۱..... ۱-۲-۳-۴ آماده سازی آند
- ۸۳..... ۲-۲-۳-۴ آماده سازی کاتد
- ۸۴..... ۳-۲-۳-۴ بستن سلول
- ۸۵..... ۴-۴ ساخت سلول های خورشیدی رنگدانه ای
- ۸۵..... ۱-۴-۴ ساخت سلول خورشیدی رنگدانه ای بر مبنای نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم
- ۸۶..... ۲-۴-۴ ساخت سلول خورشیدی رنگدانه ای بر مبنای نانو میله های اکسید روی
- ۸۶..... ۲-۴-۴ ساخت سلول خورشیدی رنگدانه ای بر مبنای نانو میله های اکسید روی
- ۳-۴-۴ مشخصه یابی سلول های خورشیدی رنگدانه ای ساخته شده به روش دکتر بلید تحت تابش خورشید
- ۹۳.....
- ۴-۴-۴ نتایج حاصل از مشخصه یابی سلول های خورشیدی رنگدانه ای ساخته شده تحت تابش خورشید
- ۹۴.....
- ۵-۴ مشخصه یابی سلول های خورشیدی رنگدانه ای ساخته شده در حضور شبیه ساز خورشیدی
- ۱۰۱.....
- ۱-۵-۴ نتایج مشخصه یابی سلول های خورشیدی رنگدانه ای ساخته شده در حضور شبیه ساز خورشیدی
- ۱۰۱.....
- ۱۰۶..... نتیجه گیری



۱۰۸..... پیشنهادات جهت مطالعات و تحقیقات تکمیلی

۱۰۹..... منابع

## فهرست شکل ها

### فصل اول

- شکل ۱-۱ چند نمونه از کاربردهای سلول خورشیدی ..... ۴
- شکل ۱-۲ نمونه‌ای از نیروگاه‌های خورشیدی متمرکزکننده‌ی نور خورشید برای تبدیل به انرژی گرمایی ..... ۵
- شکل ۱-۳ پیش بینی میزان رشد سیستم‌های فتوولتائیک برحسب گیگاوات در ۱۰ سال آینده .... ۶
- شکل ۱-۴ نیمه رسانایی با پیوندگاه p-n، a: در حالت تعادل و b: تحت تابش خورشید ..... ۹
- شکل ۱-۵ طبقه‌بندی نسل‌های سلول خورشیدی ..... ۱۰
- شکل ۱-۶ الف: صفحات سلول‌های خورشیدی تک کریستالی و ب: صفحات سلول‌های خورشیدی پلی کریستالی ..... ۱۱
- شکل ۱-۷ سلول‌های خورشیدی نسل دوم: الف) سلول‌های خورشیدی سیلیکونی آمورف، ب) سلول‌های خورشیدی میکرو کریستالی، ج) سلول‌های خورشیدی کادمیوم تلوراید، د) سلول‌های خورشیدی CIGS ..... ۱۲

### فصل دوم

- شکل ۲-۱ ساختار شیمیایی رنگدانه‌های کمپلکس‌های روتنیوم ..... ۲۰
- شکل ۲-۲ طرحواره‌ای از یک سلول خورشیدی رنگدانه‌ای ..... ۲۳
- شکل ۲-۳ نمودار انرژی در یک DSSC و مسیرهای ممکن برای انتقال الکترون ..... ۲۵

شکل ۲-۴ شار فوتونی طیف AM1.5G در  $1000\text{W/m}^2$  ..... ۲۷

شکل ۲-۵ طرحواره‌ای از منحنی جریان - ولتاژ ..... ۲۸

## فصل سوم

شکل ۳-۱ اسپری التراسونیک ..... ۳۵

شکل ۳-۲ الگوی پراش پرتو X، ساختار کاستریت با (۲۰۰)، به عنوان جهت گیری ترجیحی برای

فیلم FTO ..... ۳۶

شکل ۳-۳ تصویر AFM فیلم‌های نازک اکسید رسانای شفاف  $\text{F: SnO}_2$  ..... ۳۷

شکل ۳-۴ تصویر SEM فیلم‌های نازک اکسید رسانای شفاف  $\text{F: SnO}_2$  ..... ۳۷

شکل ۳-۵ ساختار ورتزایت اکسید روی ..... ۴۰

شکل ۳-۶: تصویر SEM آرایه‌های نانو سیم رشد داده شده بر روی زیر لایه های FTO ..... ۴۳

شکل ۳-۷ تصویر SEM آرایه‌های اکسید روی از روش هیدروترمال در غیاب کاتالیزور ..... ۴۴

شکل ۳-۸: تصویر SEM نانو ذرات اکسید روی بر روی زیرلایه‌ی گرافن به روش CVD ..... ۴۵

شکل ۳-۹ cta (تصویر SEM، آرایه‌های نانوسیم روی اکسید) و d: تصویر TEM، آرایه‌های نانوسیم روی

اکسید رشد داده شده به روش هیدروترمال بروی فویل روی ..... ۴۶

شکل ۳-۱۰ تصویر SEM آرایه‌ی نانو میله‌ی اکسید روی بر روی FTO ..... ۴۹

شکل ۳-۱۱ الگوی XRD ی آرایه‌ی نانو میله‌ی اکسید روی بر روی FTO ..... ۴۹

شکل ۳-۱۲ تصویر SEM لایه‌های اکسید روی ..... ۵۳

شکل ۳-۱۳ تصویر FESEM، نانومیله‌های اکسید روی سنتز شده به روش محلول حرارتی دما پایین ۵۴

شکل ۳-۱۴ تصویر آنالیز XRD، آرایه‌های نانو میله اکسید روی رشد داده شده به روش رشد از محلول

آبی ..... ۵۵

شکل ۳-۱۵ منحنی جریان-ولتاژ آرایه‌های نانو میله اکسید روی رشد داده شده به روش رشد محلول

آبی ..... ۵۵

شکل ۳-۱۶ تصویر SEM سطح مقطع عرضی نانو میله‌های اکسید روی ..... ۵۶

شکل ۳-۱۷ تصویر طیف جذبی و عبوری آرایه‌های نانو میله رشد داده شده به روش رشد از محلول

آبی ..... ۵۶

شکل ۳-۱۸ تصویر SEM نانو پودر اکسید روی در مقیاس ۱۰۰ نانو متر ..... ۵۷

شکل ۳-۱۹ تصویر پراش پرتو X نانو پودر اکسید روی در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد ..... ۵۸

شکل ۳-۲۰ نمودار جریان-ولتاژ سلول‌های خورشیدی ساخته شده با رنگ‌های مختلف ..... ۵۸

شکل ۳-۲۱ تصویر SEM نانو پودر اکسید روی در مقیاس ۲۰ نانومتر ..... ۵۹

شکل ۳-۲۲ نحوه برخورد الکترون‌های دستگاه SEM با نمونه ..... ۶۶

شکل ۳-۲۳ شماتیک دستگاه SEM ..... ۶۷

شکل ۳-۲۴ شماتیک دستگاه XRD ..... ۶۸

## فصل چهارم

شکل ۴-۱ دستگاه اسپری پیرولیز مدل SCS-90 ..... ۷۱

- شکل ۲-۴ دستگاه (RM3-AR 4- Point Probe Jandel) ..... ۷۲
- شکل ۳-۴ منحنی طیف عبوری  $\text{SnCl}_2$  و  $\text{SnCl}_4$  ..... ۷۳
- شکل ۴-۴ تعیین گاف انرژی لایه‌های نازک FTO با  $\text{SnCl}_2$  و  $\text{SnCl}_4$  ..... ۷۴
- شکل ۵-۴ شبیه ساز خورشیدی NANOSAT ..... ۷۴
- شکل ۶-۴ طیف XRD نمونه  $\text{SnCl}_2$  a: ..... ۷۵
- شکل ۷-۴ طیف XRD نمونه  $\text{SnCl}_4$  b: ..... ۷۶
- شکل ۸-۴ دستگاه سانتریفیوژ مدل UNIVERSAL320 ..... ۷۶
- شکل ۹-۴ طیف پراش پرتوی X نانو پودر اکسید روی رشد داده شده به روش (LTS) ..... ۷۷
- شکل ۱۰-۴ تصویر FESEM نانو پودر اکسید روی در مقیاس ۲ میکرومتر ..... ۷۸
- شکل ۱۱-۴ تصویر FESEM نانو پودر اکسید روی در مقیاس ۲۰۰ nm ..... ۷۴
- شکل ۱۲-۴ تصویر SEM پودر نانو میله‌ی اکسید روی با اندازه‌ی تقریبی ذرات ۲۰۰-۸۰ nm ..... ۸۰
- شکل ۱۳-۴ تصویر بزرگنمایی شده‌ی SEM ، نانومیله‌ی اکسید روی ..... ۸۰
- شکل ۱۴-۴ خیسانیدن پودر نانومیله در داخل هاون ..... ۸۱
- شکل ۱۵-۴ خمیر نانو میله‌ی اکسید روی تهیه شده با PEG ..... ۸۱
- شکل ۱۶-۴ نحوه کشیدن خمیر لایه نشانی به روی زیر لایه FTO به روش دکتر بلید ..... ۸۲
- شکل ۱۷-۴ مراحل حرارت دهی زیرلایه‌ها درون کوره ..... ۸۳
- شکل ۱۸-۴ کوره جعبه‌ای مدل F11L 1500 ..... ۸۵

- شکل ۴-۱۹ مراحل حرارت دهی زیرلایه‌ها درون کوره با دمای  $500^{\circ}\text{C}$  ..... ۸۶
- شکل ۴-۲۰ نحوه کشیدن خمیر نانو میله اکسید روی به روی زیر لایه FTO ..... ۸۷
- شکل ۴-۲۱ شماتیک سلول خورشیدی رنگدانه‌ای نانو میله اکسید روی لایه نشانی شده به روش  
دکتر بلید..... ۸۸
- شکل ۴-۲۲ تصویر FESEM، فوتوآند سلول شماره‌ی ۶ در مقیاس ۲ میکرومتر ..... ۸۹
- شکل ۴-۲۳ تصویر سطح مقطع عرضی فوتوآند سلول شماره ۶ در مقیاس ۲ میکرومتر ..... ۹۰
- شکل ۴-۲۴ تصویر FESEM، فوتوآند سلول شماره‌ی ۶ در مقیاس ۲۰۰ نانومتر ..... ۹۰
- شکل ۴-۲۵ تصویر FESEM، فوتوآند سلول شماره‌ی ۶ در مقیاس ۵ نانومتر ..... ۹۱
- شکل ۴-۲۶ مراحل حرارت دهی زیرلایه‌ها درون کوره با دمای  $400^{\circ}\text{C}$  ..... ۹۲
- شکل ۴-۲۷ مراحل حرارت دهی زیرلایه‌ها درون کوره با دمای  $300^{\circ}\text{C}$  ..... ۹۳
- شکل ۴-۲۸ آنالیزور نور خورشید(SMA) مدل Prova 200 ..... ۹۴
- شکل ۴-۲۹ شبیه ساز خورشیدی مدل SIM-1000 ..... ۱۰۱
- شکل ۱-۳۰ منحنی جریان- ولتاژ نمونه‌ی شماره‌ی ۲ ..... ۱۰۲
- شکل ۱-۳۱ منحنی جریان- ولتاژ نمونه‌ی شماره‌ی ۳ ..... ۱۰۳
- شکل ۱-۳۲ منحنی جریان- ولتاژ نمونه‌ی شماره‌ی ۴ ..... ۱۰۳
- شکل ۱-۳۳ منحنی جریان- ولتاژ نمونه‌ی شماره‌ی ۶ ..... ۱۰۴
- شکل ۱-۳۴ منحنی جریان- ولتاژ نمونه‌ی شماره‌ی ۷ ..... ۱۰۴
- شکل ۱-۳۵ منحنی جریان- ولتاژ نمونه‌ی شماره‌ی ۹ ..... ۱۰۵

شکل ۱-۳۶ منحنی جریان-ولتاژ نمونه‌ی شماره‌ی ۱۰..... ۱۰۵

## فهرست جداول

### فصل سوم

- جدول ۱-۳ مقادیر میانگین ابعاد نانوسیم، نسبت تراکم آرایه‌های نانو سیم و ارزیابی آماری از تصاویر FESEM ..... ۴۳
- جدول ۲-۳ پارامترهای فتوولتائیک سلول خورشیدی رنگدانه‌ای ساخته شده با نانو میله‌های اکسید روی ..... ۵۶
- جدول ۳-۳ پارامترهای فتوولتائیک سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای با رنگ‌های مختلف ..... ۵۹
- جدول ۴-۳ پارامترهای فتوولتائیک سلول‌های ساخته شده در دماهای مختلف زینتر ..... ۵۹

### فصل چهارم

- جدول ۱-۴ شرایط دستگاه اسپری ..... ۷۰
- جدول ۲-۴ پارامترهای مقاومتی زیرلایه‌های FTO ..... ۷۲
- جدول ۳-۴ پارامترهای فتوولتائیک سلول‌های شماره‌ی ۱ و ۲ تحت تابش نور خورشید در شهر شاهرود ..... ۹۵
- جدول ۴-۴ پارامترهای فتوولتائیک سلول‌های شماره‌ی ۳، ۴، ۵ تحت تابش نور خورشید در شهر شاهرود ..... ۹۶
- جدول ۵-۴ پارامترهای فتوولتائیک سلول‌های شماره‌ی ۳، ۴، ۵ بعد از دو هفته تحت تابش نور خورشید در شهر شاهرود ..... ۹۸



جدول ۴-۶ پارامترهای فتوولتائیک سلول‌های شماره‌ی ۷،۶ و ۸ تحت تابش نور خورشید در شهر

شاهرود ..... ۹۹

جدول ۴-۷ پارامترهای فتوولتائیک سلول‌های شماره‌ی ۹، ۱۰ و ۱۱ تحت تابش نور خورشید در شهر

شاهرود ..... ۱۰۰

جدول ۴-۸ پارامترهای فتوولتائیک نمونه‌ی ۲ تحت تابش طیف AM1.5 ..... ۱۰۲

جدول ۴-۹ پارامترهای فتوولتائیک نمونه‌ی ۳ و ۴ تحت تابش طیف AM1.5 G ..... ۱۰۲

جدول ۴-۱۰ پارامترهای فتوولتائیک نمونه‌ی ۶ و ۷ تحت تابش طیف AM1.5 G ..... ۱۰۳

جدول ۴-۱۱ پارامترهای فتوولتائیک نمونه‌ی ۹ و ۱۰ تحت تابش طیف AM1.5 G ..... ۱۰۴



فصل اول:

پیدہ فتوالتائیک

## مقدمه:

خورشید نه تنها خود منبع عظیم انرژی است، بلکه سرآغاز حیات و منشأ تمام انرژی‌های دیگر است. طبق برآورد های علمی در حدود ۶۰۰۰ میلیون سال از تولد این گوی آتشین می گذرد و در هر ثانیه  $2/4$  میلیون تن از جرم خورشید به انرژی تبدیل می شود. با توجه به وزن خورشید که حدود ۳۳۳ هزار برابر وزن زمین است. این کره‌ی نورانی را می‌توان به عنوان منبع عظیم انرژی تا ۵ میلیارد سال آینده به حساب آورد. قطر خورشید  $10^6 \times 1/39$  کیلومتر است و حدود ۹۹٪ وزن خورشید را گازهای هیدروژن و هلیوم تشکیل داده اند، که حدود ۷۰٪ هیدروژن، ۲۹٪ هلیوم و یک درصد ما بقی، شامل ۶۳ عنصر دیگر که مهم ترین آن ها اکسیژن، کربن، نئون و نیتروژن است، تشکیل داده است. میزان دما در مرکز خورشید، حدود ۱۰ تا ۱۴ میلیون درجه‌ی سانتیگراد می باشد که از سطح آن با حرارتی نزدیک به ۵۶۰۰ درجه و به صورت امواج الکترومغناطیسی در فضا منتشر می شود. زمین در فاصله‌ی ۱۵۰ میلیون کیلومتری خورشید واقع است و ۸ دقیقه و ۱۸ ثانیه طول می کشد تا نور خورشید به زمین برسد. بنابراین سهم زمین در دریافت انرژی خورشید حدود  $\frac{1}{2 \times 10^9}$  از کل انرژی تابشی آن می باشد. سوخته‌های فسیلی ذخیره شده در اعماق زمین، انرژیهای باد و آبشار و امواج دریاها و بسیاری موارد دیگر از جمله نتایج همین مقدار اندک انرژی دریافتی زمین از خورشید می باشد [۱].

فتوولتائیک روشی ساده برای مهار کردن توان خورشیدی است. دستگاه‌های فتوولتائیک یا همان سلول‌های خورشیدی وسایلی هستند که انرژی تابشی خورشید را بدون صدا یا آلودگی و بدون بهره‌گیری از سازو کارهای متحرک، به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. در سلول‌های خورشیدی وقتی نور به سطح این وسایل که از قطعات نیمرسانا تشکیل شده اند، می‌تابد؛ باعث آزاد شدن بارهای الکتریکی در آنها شده و در نتیجه این بارها می‌توانند آزادانه در داخل این نیمه رساناها حرکت کرده و توسط الکترودهایی که در دو طرف سلول تعبیه شده است، جمع‌آوری و وارد مدار شوند.

## ۱-۱ معرفی پدیده فتوولتائیک

به پدیده‌ای که در اثر تابش مستقیم نور خورشید الکتریسته تولید کند، پدیده فتوولتائیک و به هر سیستمی که از این پدیده استفاده نماید، سیستم فتوولتائیک گویند. در این پدیده در اثر تابش نور خورشید و برخورد فوتونها به سطح صفحه‌هایی از جنس شبکه بلوری سیلیکون، جریان الکتریکی تولید می‌شود. جریان حاصل را می‌توان مستقیماً جهت استفاده در مصرف کننده و یا به طور غیرمستقیم آن را در باطری ذخیره و در ساعت‌هایی که تابش وجود ندارد مصرف نمود. سلول خورشیدی یا سلول فتوولتائیک در واقع وسیله‌ای الکترونیکی است که انرژی خورشید (یعنی انرژی تابشی رسیده از خورشید) را تحت فرآیندی به نام فتوولتائیک، به الکتریسته تبدیل می‌کند. در طول فرآیند فتوولتائیک، انرژی خورشیدی به صورت "مستقیم" به انرژی الکتریسته تبدیل می‌شود و معنای لغوی آن الکتریسته یا همان جریان الکتریکی ناشی از نور خورشید است.

## ۲-۱ اهمیت پدیده فتوولتائیک

### ۱-۲-۱ کاربردهای سلول‌های خورشیدی

سلول‌های خورشیدی برای کاربردهای مختلفی استفاده می‌شوند. سلول‌های خورشیدی کوچک در قطعات الکترونیکی با ابعاد کوچک مانند ماشین حساب ها، سنسورها و ساعت‌های خانگی مورد استفاده قرار می‌گیرند. ماژول‌های خورشیدی نیز در تجهیزات عظیم‌تری مثل ایستگاه‌های فضایی موجود در مدار زمین و یا ماشین‌های خورشیدی استفاده می‌شوند (شکل (۱-۱)). تجهیز نیروگاه‌های خورشیدی و تولید برق برای مناطقی که امکان برق رسانی به آن‌ها وجود ندارد و همچنین تأمین نیازهای الکتریکی منازل، طیف گسترده‌ی مصارف این قطعات را نشان می‌دهد [۲].



شکل ۱-۱: چند نمونه از کاربردهای سلول خورشیدی

## ۲-۲-۱ مزایای استفاده از انرژی خورشیدی

دو مشکل اصلی در استفاده از انرژی خورشیدی وجود دارد. مشکل اول این است که این انرژی از راه‌های مختلف و متغیر به زمین می‌رسد. در این بین امکان تغییر مقادیر آن در مکان‌ها و زمان‌های مختلف وجود دارد. برای مثال در یک نقطه از زمین، در هنگام شب، تابش خورشید متوقف می‌گردد. در زمستان نیز میزان تابش کمتر از تابستان است. همچنین میزان انرژی خورشیدی دریافتی توسط ساکنین زمین، بسته به عرض و طول جغرافیایی و همچنین ارتفاع از سطح زمین در هر منطقه متفاوت است. مشکل دوم این است که برای جمع‌آوری انرژی خورشیدی، نیاز به سطح زیادی داریم. در واقع، برخلاف سایر ادوات الکترونیکی مانند مدارهای مجتمع (IC) که هر روزه اندازه‌ی آن‌ها کوچک‌تر می‌شود، سلول‌های خورشیدی ادواتی وابسته به سطح هستند و هر چه سطح بزرگتری داشته باشند، انرژی بیشتری نیز تولید می‌کنند [۲].

الکتروسیسته می‌تواند به صورت مستقیم به وسیله ادوات فتوولتائیک از انرژی خورشیدی به دست آید. دلیل اینکه بر روی مستقیم بودن این تبدیل تأکید می‌کنیم، از این جهت است که انرژی الکتریکی را می‌توان با روش‌های غیر مستقیم نیز از خورشید به دست آورد. برای مثال، موتورهای بخاری وجود دارد که انرژی لازم برای گرم کردن یک مایع را توسط جمع‌کننده‌های نور خورشید

دریافت می کنند و آن را در یک محل مشخص متمرکز می نمایند. به این ترتیب مایع به بخار تبدیل شده و در نهایت در ژنراتور بخار، انرژی الکتریکی تولید می شود. نمونه‌ای از این دست نیروگاه‌ها را در شکل (۱-۲) نشان داده شده است.



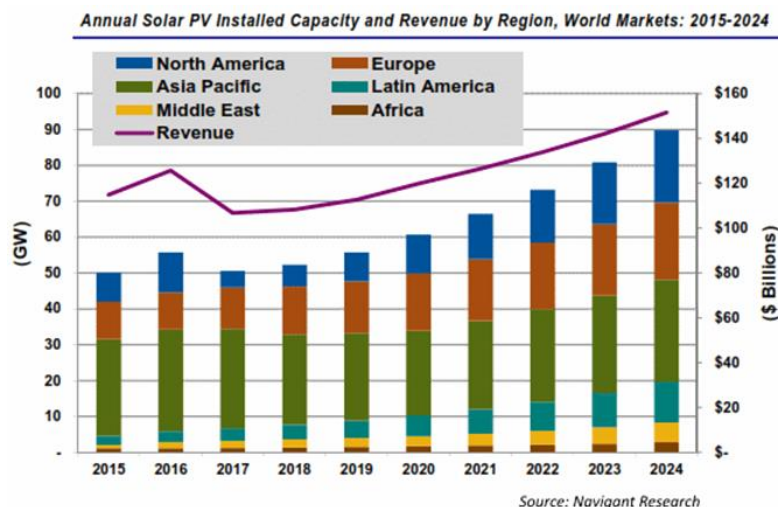
شکل ۱-۲: نمونه‌ای از نیروگاه‌های خورشیدی متمرکزکننده‌ی نور خورشید برای تبدیل به انرژی گرمایی

در مقایسه با سایر روش‌های تولید انرژی الکتریکی، سیستم‌های فتوولتائیک، الکتروسیته‌ی تمیز و در دسترس را بدون مصرف هر گونه سوخت فسیلی و بدون هرگونه حرکت مکانیکی تولید می کنند. این فرآیند به صورت خلاصه این‌گونه است که جذب انرژی موجود در نور خورشید توسط یک ماده نیمه رسانا منجر به تولید زوج الکترون-حفره شده و با حرکت این الکترون‌ها از کاتد به آند در یک مدار خارجی، جریان الکتریکی شکل می گیرد [۳].

باید از این نظر نیز به سلول‌های خورشیدی نگاه کرد که اثرات مخرب محیط زیستی سلول‌های خورشیدی در مقایسه با سایر منابع انرژی مانند سوخت فسیلی و انرژی هسته‌ای (که حقیقتاً امروزه آلودگی‌های زیستی این دو محیط جزو بزرگترین دغدغه‌های طرفداران محیط زیست است)، بسیار ناچیز است. در این سیستم‌ها، نه نیاز به آب برای خنک کردن سیستم است و نه محصولات جانبی در حین فرآیند تولید می شود. از طرف دیگر، یکی دیگر از مشکلات و دغدغه‌های اساسی دنیای امروز، پایان یافتن منابع سوخت فسیلی به عنوان مهمترین منبع فعلی انرژی دنیا است. پیش بینی‌ها به طور

متوسط چین می‌گویند که طی ۵۰ سال آینده منابع نفت و طی ۱۱۰ سال آینده منابع گاز به پایان خواهند رسید. از این رو، دسترسی به یک منبع پایان ناپذیر انرژی امری بسیار ضروری به نظر می‌رسد. انرژی خورشیدی، علاوه بر پایان ناپذیر بودن، منبعی است که انرژی بسیار عظیمی را در اختیار بشر می‌گذارد، همچنین در اکثر نقاط دنیا قابل دسترس است و انرژی پاک به شمار می‌رود. امروزه، تنها مشکلی که از توسعه گسترده‌ی این انرژی جلوگیری کرده است، هزینه تمام شده‌ی نسبتاً بالای آن است که امکان رقابت آن با سایر انرژی‌ها مانند هسته‌ای و فسیلی را هنوز ممکن نکرده است. تلاش‌های دانشمندان در راستای افزایش بازده و کاهش قیمت این سلول‌ها در کنار ابداع روش‌های آسان برای ساخت و تهیه این سلول‌ها در ابعاد بزرگ است. پیش‌بینی‌ها بیان می‌کنند که طی ۲۰ سال آینده، انرژی خورشیدی از نظر اقتصادی قابل رقابت با انرژی فسیلی خواهد شد. شکل (۱-۳) میزان رشد پدیده‌ی فتوولتائیک برحسب مگاوات را در ۱۰ سال آینده نشان می‌دهد.

در واقع، علاوه بر کاهش هزینه‌های سلول خورشیدی، انرژی فسیلی نیز روندی صعودی در قیمت‌ها داشته است. همین امر سبب شده است که دولت‌ها، برنامه‌ریزی‌های استراتژیکی را برای دسترسی به این منبع انرژی انجام دهند و گروه‌های زیادی را برای دسترسی به این هدف مأمور کرده‌اند.



شکل ۱-۳: پیش‌بینی میزان رشد سیستم‌های فتوولتائیک برحسب گیگاوات در ده سال آینده



## ۳-۱ تاریخچه‌ی پدیده‌ی فتو ولتائیک

کشف اثر فتوولتایی به سال ۱۸۳۹ برمی‌گردد، اما توسعه و کاربردی شدن آن به کندی صورت گرفته است. با پیشرفت مکانیک کوانتومی در اوایل قرن بیستم، توضیح پدیده‌های مربوط به تبدیل نور به الکتروسیسته، میسر گردید و اهمیت مواد نیمه‌رسانای تک بلور کشف و رفتار پیوند p-n توضیح داده شد. در سال ۱۹۵۴ چاپین<sup>۱</sup> و همکارانش در آزمایشگاه بل<sup>۲</sup> یک سلول خورشیدی سیلیکونی (با بازده ۶٪) اختراع کردند. در اواخر دهه ۱۹۵۰، سلول‌های خورشیدی برای تأمین نیروی الکتریکی سیستم‌های ماهواره‌ای استفاده شدند، زیرا این قطعات برای یک دوره طولانی نیاز به حفاظت و نگهداری نداشتند و بدون افت زیاد در بازده تبدیل، بسیار مفید بودند. در دهه ۱۹۷۰ دانشمندان دریافتند که استفاده از اثر فتوولتایی، می‌تواند پیشنهاد مناسبی در جهت تولید انرژی از منابع غیر فسیلی باشد. در قرن گذشته اقتصاد بر روی منابع مختلف انرژی از قبیل انرژی هسته‌ای، آب، باد، نفت و گاز تمرکز داشت. تولید انرژی الکتریکی با استفاده از زغال سنگ، گاز و نفت مقادیر زیادی آلودگی (دی‌اکسید کربن) منتشر می‌کند و از این رو مخاطرات سلامتی مطرح می‌شود. انرژی هسته‌ای بسیار گران و درگیر مسئله‌ی پرتودهی و پسماندهای خطرناک است. همه‌ی این منابع تولید انرژی الکتریکی، درگیر مسائل نگهداری، حمل و نقل و تحویل روزانه با وجود شرایط آب و هوایی نامساعد هستند. از سوی دیگر، انرژی خورشیدی، منبعی بدون آلودگی، و بی‌نیاز به دستگاه‌های کمکی برای حمل و نقل را فراهم می‌کند. با وجود این فوائد، سلول‌های خورشیدی تنها، ۰.۰۴٪ از الکتروسیسته شبکه جهانی را تولید می‌کنند، که دلیل آن هزینه‌ی بالای تولید این سلول‌ها است [۴].

در اینجا تاریخچه‌ی مختصری بر رویدادهای مرتبط با سلول‌های خورشیدی ارائه می‌کنیم [۵]:

۱. ۱۸۳۹ : الکساندر ادمونند بکرل؛ کشف اثر فتوولتایی در الکترودهای واقع در الکترولیت و تحت

تابش نور

<sup>۱</sup> Chapine

<sup>۲</sup> bells lab

۲. ۱۸۷۳ : اسمیت؛ مشاهده‌ی اثر فوتورسانایی در سلنیوم .
۳. ۱۸۷۷ : آدامز و دی ؛ اولین مقاله با نام «واکنش نور در سلنیوم»
۴. ۱۸۸۲ : چارلز فریتز؛ ساخت اولین سلول خورشیدی با بازدهی تقریبی ۱٪ از لایه‌ی سلنیومی با پوشش طلا .
۵. ۱۸۸۷: جیمز موزر<sup>۱</sup> ؛ ساخت اولین سلول فوتو الکتروشیمیایی .
۶. ۱۸۸۸ : ادوارد وستون<sup>۲</sup> ؛ اولین اختراع مرتبط با سلول خورشیدی .
۷. ۱۹۰۴ : ویلهلم هاواچز<sup>۳</sup> ؛ تولید اولین سلول خورشیدی پیوندگاهی از مس و اکسید مس .
۸. ۱۹۰۵: آلبرت انیشتین ؛ مقاله‌ی اثر فوتورسانایی بر اساس مبانی مکانیک کوانتومی.
۹. ۱۹۳۲: آدوبرت و استورا<sup>۴</sup> ؛ ابداع سلول خورشیدی متشکل از کادمیوم سلنید.
۱۰. ۱۹۵۰: مجموعه‌ی آزمایشگاهی بل ؛ ابداع فناوری استفاده از سلول‌های خورشیدی در کاربردهای فضایی.
۱۱. ۱۹۵۹: مجموعه‌ی آزمایشگاه‌های الکترونیک هافمن<sup>۵</sup>؛ تولید اولین سلول خورشیدی تجاری با بازده ۱۰٪ .
۱۲. ۱۹۶۳: شرکت شارپ؛ تولید اولین ماژول خورشیدی قابل استفاده‌ی متشکل از سلول‌های خورشیدی سلیکونی .

---

<sup>۱</sup> james Moser

<sup>۲</sup> Edward weston

<sup>۳</sup> willhelm Halwachz

<sup>۴</sup> Audobert and Stora

<sup>۵</sup> Haffman Electronics

۱۳. سویوز - یک<sup>۱</sup>: فرستادن اولین فضاپیمای تغذیه کننده از سلول های خورشیدی به فضا .

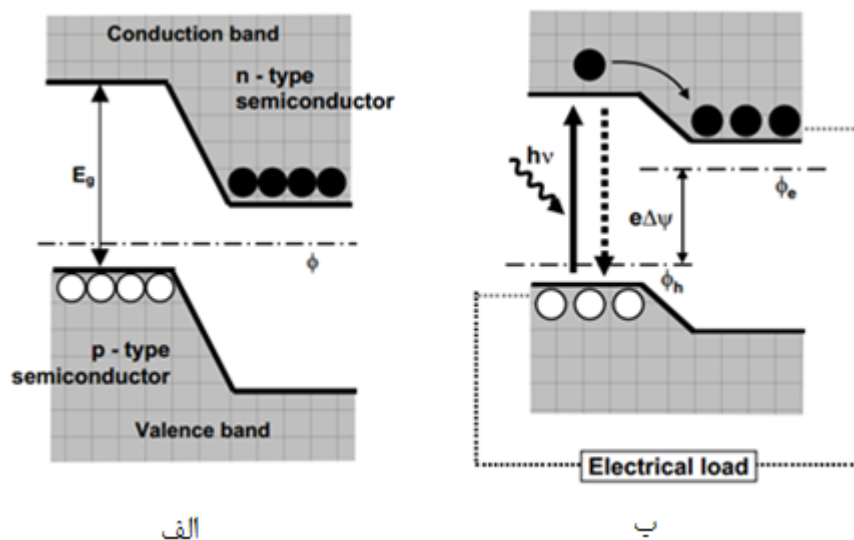
۱۴. ۱۹۹۷: گذشتن حجم تولید سلول های خورشیدی دنیا از مرز ۵۰۰ کلیووات.

۱۵. ۱۹۸۵: مرکز مهندسی فوتوولتایی<sup>۲</sup>؛ تولید سلول خورشیدی با بازده ۲۰٪.

۱۶. ۱۹۹۱: مایکل گرتزل؛ ابداع اولین سلول خورشیدی رنگدانه ای .

### ۴-۱ مکانیزم های تبدیل تابش خورشیدی به الکتریسیته

عملکرد یک سلول خورشیدی نیمه رسانا را می توان با مثالی از یک پیوندگاه p-n، تحت تابش خورشید نشان داد. پیوندگاه p-n<sup>۳</sup>، در محل اتصال دو نیمه رسانای نوع p و n ایجاد می شود. که به نیمه رسانایی اطلاق می شود که در آن، الکترون ها و حفره های اضافی، با افزودن ناخالصی ایجاد می گردند. در شکل ((۴-۱) الف)) ویژگی های اساسی پیوندگاه، در حضور یک میدان الکتریکی قوی، با شیب لبه های نوارسانش و ظرفیت در محل اتصال، نشان داده شده است.



شکل ۱-۴: نیمه رسانای با پیوندگاه p-n، الف) در حالت تعادل و ب) تحت تابش خورشید

<sup>۱</sup> soyuz1

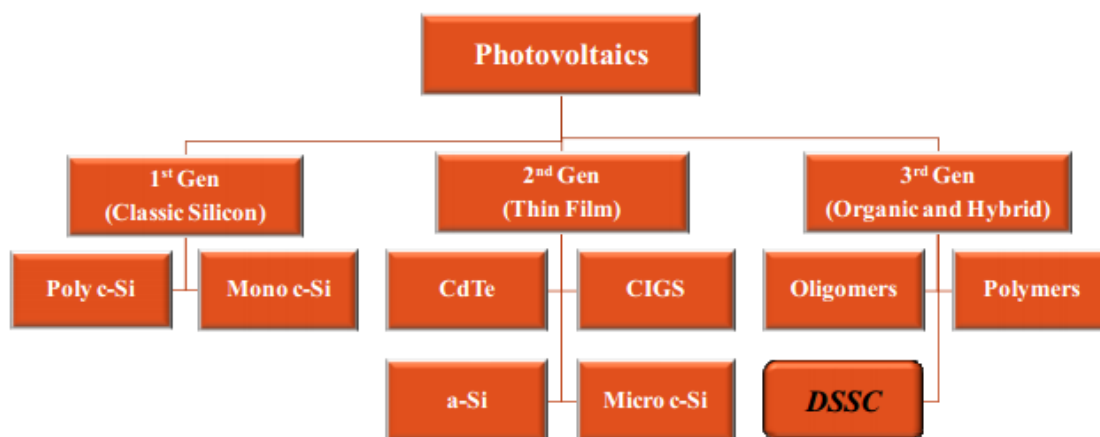
<sup>۲</sup> center of photovoltaic Engineering

<sup>۳</sup> p-n Junction

در حالت تعادل، پتانسیل‌های الکتروشیمیایی دو طرف پیوندگاه، معادل هستند و هیچ جریان الکتریکی خالصی وجود ندارد. تحت تابش، زوج‌های الکترون-حفره در داخل نیمه رسانا، تولید می‌شوند. پس از آن به وسیله‌ی میدان الکتریکی در محل پیوندگاه، جدا می‌گردند (شکل (۱-۴) (ب)). و به سمت جمع‌کننده‌های جریان می‌روند [۶].

## ۱-۵ انواع سلول‌های خورشیدی

در نمودار شکل (۱-۵)، به صورت شماتیک، طبقه‌بندی نسل‌های مختلف سلول‌های خورشیدی نشان داده شده‌اند.



شکل ۱-۵: طبقه‌بندی نسل‌های سلول‌های خورشیدی

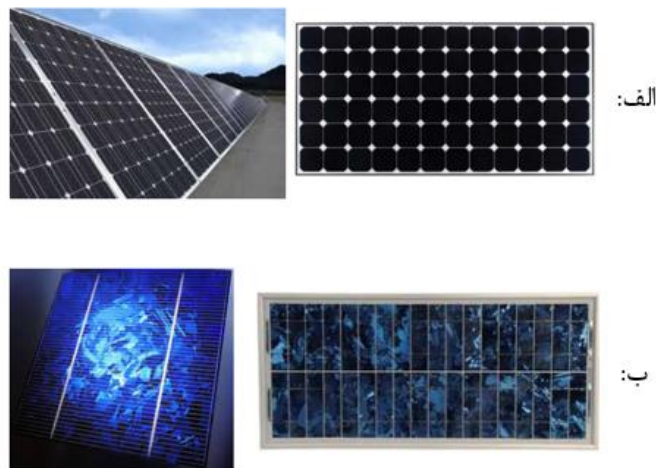
### ۱-۵-۱ نسل اول سلول‌های خورشیدی

به طور کلی سلول‌های خورشیدی نسل اول، شامل الف) سلول‌های خورشیدی تک کریستالی<sup>۱</sup> و ب) سلول‌های خورشیدی چند کریستالی<sup>۲</sup>، هستند. سلول‌های خورشیدی نسل اول، در شکل (۱-۶) (الف و ب)) نشان داده شده‌اند. که دارای قدیمی‌ترین و رایج‌ترین نوع تکنولوژی ساخت سلول‌های با بازدهی بالا هستند. سلول‌های خورشیدی نسل اول بر روی ویفرها ساخته شده‌اند. هر ویفر توان تولید ۲ تا ۳ وات را دارد. به منظور افزایش توان سلول‌ها، از ماژول‌های خورشیدی که شامل چندین سلول

<sup>۱</sup> single- crystal

<sup>۲</sup> poly crystalline

هستند، استفاده می‌شود. همانطور که در بالا ذکر شد، دو نوع از سلول‌های خورشیدی نسل اول وجود دارد که تفاوت آنها، در بلورینگی است. اگر تمام ویفر از یک بلور تشکیل شده باشد به آن سلول خورشیدی تک کریستالی گویند. اگر سلول شامل دانه‌های کریستالی باشد، به آن چند کریستالی می‌گویند که در آنها، مرز دانه‌ها به راحتی قابل مشاهده هستند. اگرچه بازدهی سلول‌های خورشیدی تک کریستالی بیشتر از سلول‌های چند کریستالی است، ولی ساخت سلول‌های چند کریستالی راحت‌تر و ارزان‌تر است که باعث شده سلول‌های چند کریستالی قابلیت رقابت با تک کریستالی‌ها را داشته باشند [۷].

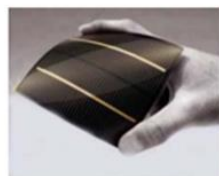
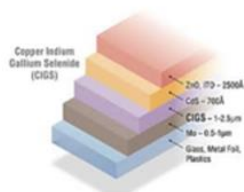
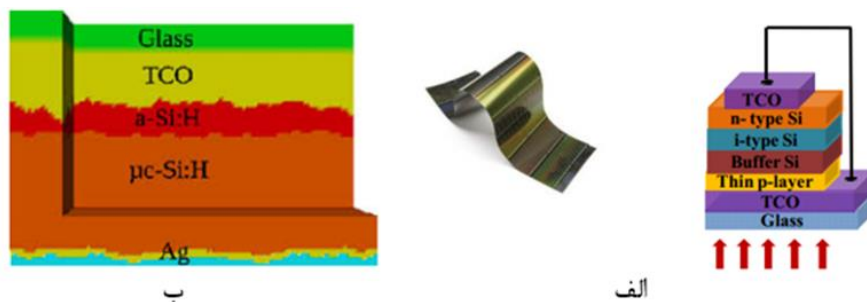


شکل ۱-۶: الف) صفحات سلول‌های خورشیدی تک کریستالی و  
ب) صفحات سلول‌های خورشیدی پلی کریستالی [۸]

### ۱-۵-۲ نسل دوم سلول‌های خورشیدی

نسل دوم سلول‌های خورشیدی بر روی الف) سلول‌های خورشیدی لایه‌ی نازک آمورف سیلیکونی (a-Si)، ب) سلول‌های خورشیدی چند کریستالی سیلیکونی (mc-Si)، ج) سلول‌های خورشیدی لایه‌ی نازک کادمیوم تلوراید (CdTe) و د) سلول‌های خورشیدی (CIS) و (CIGS)، متمرکز شده‌اند، شکل (۱-۷) الف تا د). در حالیکه بازده و قیمت سلول‌های خورشیدی نسل دوم پایین‌تر از سلول‌های خورشیدی نسل اول هستند. علاوه بر این، آنها شکل ظاهری زیباتری هم دارند. از آنجاییکه مشکلات فلزکاری برای ساخت سلول‌های خورشیدی لایه نازک، وجود ندارد؛ می‌توان آنها را برای کاربردهای

سطوح ساختمانی، ماشین ها و پنجره ها استفاده کرد. یکی از مزایای سلول های خورشیدی لایه ی نازک، اینست که می توان آنها را بر روی سطوح بزرگتر از  $6 \text{ m}^2$  نیز رشد داد. اما سلول های خورشیدی سیلیکونی، فقط در ابعاد ویفر ساخته می شوند.



د

ج

شکل ۱-۷: سلول های خورشیدی نسل دوم : الف) سلول های خورشیدی سیلیکونی آمورف (ب) سلول های خورشیدی میکرو کریستالی (ج) سلول های خورشیدی کادمیوم تلوراید. د) سلول های خورشیدی CIGS. [۸]

### ۱-۵-۳ نسل سوم سلول های خورشیدی

سلول های خورشیدی نسل سوم، شامل الف) سلول های خورشیدی نانو کریستالی، ب) سلول های خورشیدی با پایه ی پلیمری، ج) سلول های خورشیدی رنگدانه ای<sup>۱</sup> (DSSC)، د) سلول های خورشیدی متمرکز کننده<sup>۲</sup>، هستند.

تمام این فناوری ها، بسیار امیدوارکننده هستند؛ اما هنوز در زمینه ی تجاری سازی آنها پیشرفت زیادی حاصل نشده است. در بین سلول های خورشیدی نسل سوم،

<sup>۱</sup> Dye-sensitized solar cells

<sup>۲</sup> Concentrator solar cells

سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگ و سلول‌های متمرکزکننده بیشترین توسعه را دارند. اساس کار سلول‌های خورشیدی حساس به رنگ، بر پایه‌ی مولکول‌های رنگ، در بین دو الکتروود هستند. زوج الکترون-حفره در داخل رنگ، تولید شده و به وسیله‌ی نانو ذرات  $TiO_2$ ، منتقل می‌شوند. سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگ (DSSC)، اگرچه بازده تبدیل بسیار کمی دارند؛ اما در مقابل، هزینه‌ی ساخت به نسبت پایینی برای ساخت آنها لازم است. روش ساخت آنها نیز نسبت به تکنولوژی‌های دیگر، ساده‌تر است. سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای، تنوع رنگ به نسبت بیشتری هم دارند. سلول‌های خورشیدی متمرکزکننده، تکنولوژی امیدوارکننده‌ی دیگری در زمینه‌ی ساخت سلول‌های خورشیدی است. اصل اساسی در عملکرد سلول خورشیدی متمرکزکننده، بر روی تمرکز مقدار زیادی از انرژی خورشیدی تابشی به ناحیه‌ی کوچک فعال سلول فتوولتائیک است. همچنین در این سلول‌ها، مقدار مواد نیمه رسانای مورد استفاده در ساخت سلول، که ممکن است بسیار گران باشد، بسیار کاهش می‌یابد. در این سیستم، سیستم اپتیکی باید کاملاً یکپارچه باشد. سطوح انرژی در متمرکزکننده‌ها، از  $10 \text{ sun}$  تا هزاران  $\text{sun}^1$ ، متغیر است. بنابراین قیمت کل می‌تواند پایین‌تر از سیستم‌های معمولی باشد. همچنین، توسعه و گسترش سلول‌های خورشیدی متمرکزکننده در آینده‌ی نزدیک، بسیار امیدوارکننده است. [۷]

#### ۴-۵-۱ محدودیت‌های نسل‌های مختلف سلول خورشیدی

برای انرژی‌های تجدیدپذیری مثل انرژی خورشیدی، دوچالش در رقابت با سوخت‌های فسیلی، وجود دارد:

(۱) افزایش بازدهی تبدیل خورشیدی

(۲) کاهش قیمت تولید

به طور کلی، سلول‌های خورشیدی نسل اول بر پایه‌ی سلول‌های خورشیدی سیلیکونی (Si)،

<sup>۱</sup> شدت نور خورشیدی با تعداد  $\text{sun}$ ‌ها مشخص می‌شود، یک  $\text{sun}$  معادل با میزان شدت استاندارد نور خورشید در  $\text{AM1.5}$

هستند. گرچه این سلول‌ها، بازدهی بالایی دارند؛ اما با وجود دردسترس بودن سیلیکون، هزینه‌ی تولید بالای آن، باعث شده تا تکنولوژی ساخت آن پیچیده به نظر بیاید. علاوه بر این، فرایند ساخت و آماده سازی سلول‌های خورشیدی مبتنی بر سیلیکون، پیچیده است. مسائل مختلف دخیل در افزایش بازدهی سلول‌های خورشیدی، در اینجا ذکر شده است [۹]:

- انرژی فوتون‌های اصابت کننده به سلول‌های خورشیدی، کمتر از گاف نواری است. به طوری که نور نمی‌تواند به الکتروسیسته تبدیل شود و از بین می‌رود.
- انرژی فوتون‌های فرودی بیشتر از گاف نواری است و بنابراین این انرژی اضافی به صورت گرما از دست می‌رود.
- ترازهای فرمی سیلیکون نوع  $n$  و  $p$ ، همیشه در محدوده‌ی داخل گاف نواری سیلیکون هستند و بنابراین ولتاژ مدار باز، کوچکتر از گاف نواری است.

مزایای سلول‌های خورشیدی لایه‌ی نازک نسل دوم، در زیر آمده است:

- دارای ضریب جذب بالایی هستند.
- تحت شرایط خلاء و غیر خلاء نیز قادر به فعالیت هستند.
- قیمت پایینتری نسبت به سلول‌های خورشیدی سیلیکونی دارند.
- قیمت زیرلایه‌ی پایینتری دارند. (نوار مسی)

معایب سلول‌های خورشیدی نسل دوم :

- آلودگی‌های زیست محیطی در فرآیند ساخت ایجاد می‌شوند.
- مواد مورد استفاده به سختی یافت می‌شوند.

مزایای سلول‌های خورشیدی نسل سوم (پلیمری):

- مواد خام به راحتی یافت می‌شوند.



- فرآیند ساخت آنها، راحتتر از تکنولوژی ساخت سلول های دونسل دیگر است.

- قیمت تمام شده بسیار کم است.

معایب سلول های خورشیدی نسل سوم (آلی):

- الکترولیت مایع (دمای پایین).

- قیمت بالای رنگ بر پایه ی روتنیوم (Ru) و الکتروود (Pt).

### جمع بندی:

در سال های اخیر، تکنولوژی ساخت سلول های خورشیدی، رشد فوق العاده ای به عنوان منبع پایدار انرژی به دست آورده است. جدول زمانی سلول های خورشیدی در قرن نوزدهم آغاز می شود یعنی درست از زمانی که بشر دریافت که می توان از تابش مستقیم نور خورشید، الکتریسیته تولید کرد. در حال حاضر، سلول های خورشیدی کاربردهای زیادی پیدا کرده اند. از آنها می توان در شرایطی که برق شبکه ای در دسترس نیست استفاده کرد. در جهت توسعه ی انرژی های تجدیدپذیر، اختراع سلول های خورشیدی نقش مهمی ایفا کرده است. سلول های خورشیدی، برای ما راه ساده تری جهت استفاده از منبع عظیم انرژی تجدید پذیر فراهم کرده است. از ابتدای تاریخچه ی سلول های خورشیدی، به قابلیت اطمینان، دوام و قیمت آنها، به عنوان یک مسئله ی مهم بسیار توجه شده است. هم اکنون، بیشترین توجه محققان بر روی افزایش بازدهی سلول های خورشیدی، به همراه کاهش قیمت تمام شده با استفاده از مواد ارزان قیمت تر و تکنولوژی ساخت راحتتر است.



## فصل دوم:

# سلول های خورشیدی رنگدانه ای (DSSC)

## ۱-۲ معرفی سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای

### ۱-۱-۲ تاریخچه‌ی سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای

حساس‌کنندگی و تحریک فوتونی کروموفورها (به عنوان مثال رنگ)، عامل کلیدی برای بهره‌برداری از سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای است. روش رنگ حساس شده، اولین بار توسط وگل در برلین در سال ۱۸۷۳ کشف گردید. با این حال، ساز و کار دقیق آن تا زمانی که مطالعات فوتوالکتروشیمیایی الکترودهای تک کریستال حساس به رنگ در سال ۱۹۶۰ تا ۱۹۷۰ انجام نشده بود، قابل درک نبود. عملکرد DSSC ها، در ابتدا به دلیل جذب ضعیف نور توسط رنگدانه‌های یک لایه‌ای بر روی سطح نیمه‌رسانای تک لایه‌ای، بسیار ضعیف بودند (بازدهی ۱٪). با استفاده از پوشش دهی یک لایه‌ی ضخیم رنگ بر روی سطح نیمه هادی مسطح، بازدهی آنها اندکی اصلاح شد. با این حال، با توجه به پایین بودن جذب نور توسط مولکول‌های رنگ بیرونی، بازدهی تبدیل انرژی، هنوز به کمتر از ۲٪ محدود بود. تا اینکه در سال ۱۹۹۰ گراتزل<sup>۱</sup> و اورگان<sup>۲</sup> به موفقیت چشمگیری در این زمینه دست یافتند.

گراتزل یک دستگاه فوتو-الکتروشیمیایی با بازدهی بالای جذب نور، با استفاده از یک لایه‌ی نازک مزوپور دی‌اکسید تیتانیوم به (ضخامت ۱۰ میکرومتر)، که به روی اکسید رسانای شفاف به عنوان یک سطح جاذب خوب و لایه‌ی رنگ روتنیم به عنوان حساس‌کننده استفاده شده بود، تشریح کرد. پس از آن، پیشرفت‌های قابل توجهی در بازدهی DSSC، به دست آمده است. هم‌اکنون بیشترین بازدهی تبدیل برای DSSC ها، در محدوده‌ی ۱۲-۱۳٪، گزارش شده است [۱۰].

---

<sup>۱</sup> Michael Gratzel

<sup>۲</sup> Brian O Regan

## ۲-۲ اجزای مختلف سلول خورشیدی رنگدانه‌ای

### ۱-۲-۲ زیرلایه

شیشه یا پلاستیک پوشش داده شده با اکسید رسانای شفاف<sup>۱</sup> به عنوان زیرلایه در DSSC ها، استفاده می شود. پوشش اکسید قلع آرایش یافته با فلئور (FTO) بر روی شیشه، در بین هم نوعان خود مثل ITO و روی اکسید آلیبده کاربرد بیشتری دارد.

### ۲-۲-۲ فوتوآند

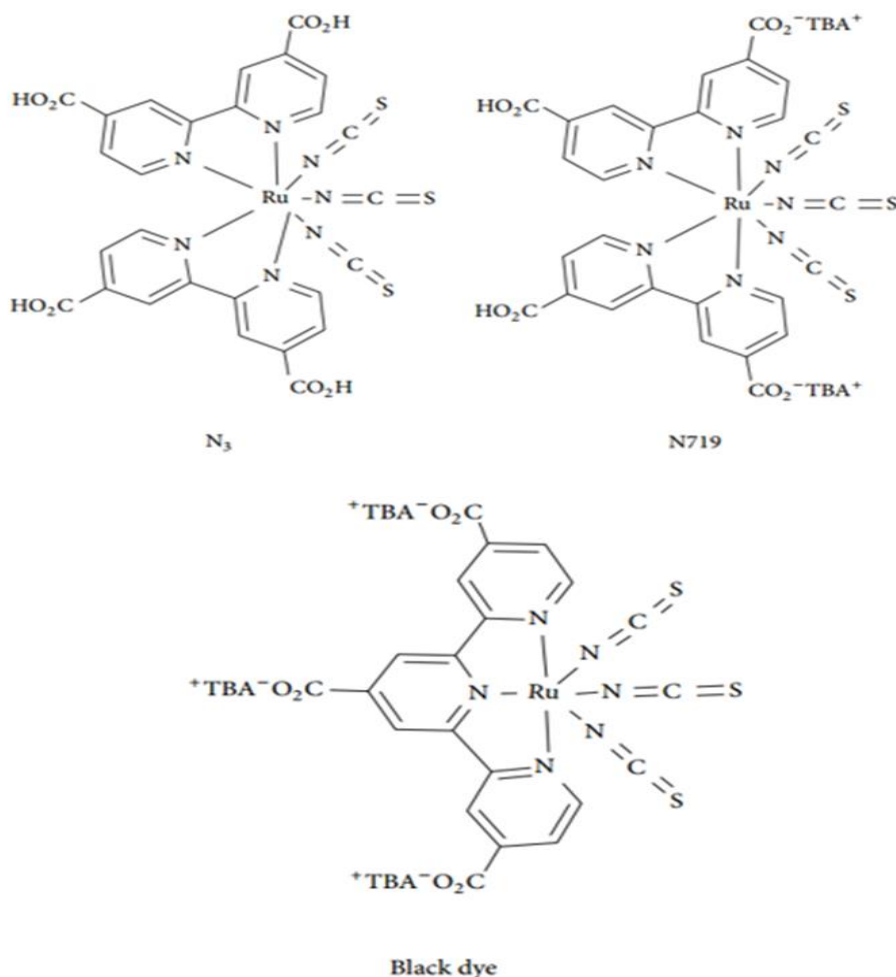
به طور کلی فوتوآندها، اکسیدهای نیمه رسانای فلزی با گاف نواری مشابه ( $SrTiO_3$  و  $TiO_2$ ،  $ZnO$ ،  $SnO_2$  و  $Nb_2O_5$ ) پوشش داده شده بروی بسترهای رسانای شفاف هستند. اکسید فلزی، کار جذب مولکول‌های رنگ، جمع‌آوری فوتو-الکترون‌های برانگیخته و همچنین رساندن فوتوالکترون‌ها از رنگ به زیرلایه‌های رسانا را به عهده دارد. گاف نواری، ترکیب، مورفولوژی و همچنین ضخامت لایه‌ی اکسید فلزی، ویژگی‌های جمع‌آوری بار، انتقال و به دام اندازی نور را تحت تاثیر قرار می‌دهد [۱۱].

### ۳-۲-۲ رنگدانه

در DSSC ها، رنگ به عنوان فوتو-حساس کننده به کار می رود که معمولاً بر روی سطح اکسید فلزی به صورت متصل کننده، عمل می کند. در حضور نور خورشید، مولکول‌های رنگ، فوتون را جذب و فوتو-الکترون برانگیخته را ایجاد می کند. فوتو-الکترون‌های برانگیخته، به نوار رسانش اکسیدهای نیمه رسانای فلزی تزریق می شوند. بسته به ترکیب رنگ‌ها، آن‌ها را می‌توان به دو دسته رنگ‌های آلی فلزی و آلی تقسیم بندی کرد. رنگ‌های آلی فلزی، حاوی یک فلز واسطه در ساختار خود هستند، در حالی که رنگ‌های آلی، از کروموفورهای آلی تشکیل شده اند. بازدهی این حساس کننده ها، به پایداری آنها بستگی دارد. همچنین جذب نور به وسیله‌ی مولکول‌های رنگ، به ویژگی‌های

<sup>۱</sup> Transparent Conducting Oxide

الکترون‌های آزاد شده و توانایی اتصال دهندگی با اکسیدهای فلزی بستگی دارد. هم‌اکنون، کارآمدترین DSSC‌ها، از حساس‌کننده‌های آلی فلزی مبتنی بر روتنیم (N3، N719، black dye، و غیره)، بازدهی تبدیل قابل توجه ۱۰-۱۱٪ تحت تابش جهانی AM 1.5، دارند [۱۲].



شکل ۱-۲: ساختار شیمیایی رنگدانه‌های بر پایه کمپلکس‌های روتنیم [۱۲]

## ۴-۲-۲ الکترولیت

در DSSC‌ها، الکترولیت نه تنها به عنوان واسطه‌ی رساننده‌ی الکترونی عمل می‌کند، بلکه عمل احیای رنگ اکسید شده را نیز به عهده دارد. بر اساس حالت فیزیکی آنها، الکترولیت‌ها را می‌توان به سه دسته الکترولیت مایع، شبه جامد و جامد تقسیم بندی کرد. با مراجعه به مقالات مشاهده می‌شود، که الکترولیت فاز مایع مثل (بیدید / تری یدید  $(I^-/I_3^-)$ ) به عنوان سیستم چند ریداکس، بیشترین

مورد مطالعه شده، برای کاربرد سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای را به خود اختصاص داده است. تا به امروز، کارآمدترین DSSC ها، با استفاده از جفت ریداکس  $I^-/I_3^-$  با حلال‌های آلی فرار ساخته شده اند. عملکرد امیدوار کننده‌ی  $I^-/I_3^-$ ، بر پایه‌ی الکترولیت‌های مایع وجود دارد. و این عملکرد خوب، عمدتاً به نفوذ کند آن به داخل فیلم‌های نیمه رسانای نانو متخلخل، باز تولید خیلی سریع رنگ و باز ترکیب نسبتاً پایین در طول وقوع واکنش‌های فوتو-شیمیایی در داخل سلول، نسبت داده می‌شود. با این حال، چند مشکل کوچک، اغلب انطباق پذیری آن برای استفاده در DSSC ها را محدود می‌کند. ید در برابر فلزاتی مانند مس و نقره، که معمولاً به عنوان جمع کننده برای DSSC ها، به کار می‌روند، بسیار خورنده است. فشار بخار نسبتاً بالای  $I^-/I_3^-$ ، مشکلاتی در سلول‌ها ایجاد می‌کند. بخشی از نور مرئی توسط یون  $I_3^-$  جذب شده و در نتیجه ممکن است بازدهی سلول کاهش یابد. به جز الکترولیت‌های بر پایه‌ی  $I^-/I_3^-$ ، چندین جفت ریداکس مثل  $Br^-/Br_3^-$ ،  $SeCN^-$  و  $SCN^-/(SCN)_2$ ، نیز در حیطه‌ی الکترولیت‌های مایع بررسی شده‌اند. به منظور کاهش تبخیر الکترولیت مایع، انواع الکترولیت شبه جامد و جامد برای کاربردهای DSSC، بررسی شده است [۱۳].

## ۵-۲-۲ الکتروود شمارشگر<sup>۱</sup>

معمولاً یک لایه‌ی نازک پلاتین (Pt)، به روی زیرلایه‌های اکسید رسانای شفاف، به عنوان الکتروود شمارشگر برای DSSC ها، استفاده می‌شوند. از آنجا که پلاتین بسیار گران است؛ محققان در حال پیدا کردن جایگزینی برای پلاتین هستند. به عنوان یک جایگزین مناسب، نانولوله‌ی کربنی (CNT) با تراکم بالا، به عنوان الکتروود شمارشگر برای کاربردهای DSSC استفاده شده‌اند. با توجه به این گزارش، بازدهی تبدیل نانو لوله‌ی کربنی به عنوان الکتروود شمارشگر، (با شفافیت بیش از ۷۰٪)، بازدهی بیش از ۸۰٪، بیشتر از الکتروود شمارنده‌ی متشکل از نانوذرات پلاتین را نشان می‌دهد [۱۴]. راماسامی و همکارانش، DSSC های مایع و شبه جامد بسیار کارآمد ساخته شده با استفاده از مزوپور های با تخلخل بالای کربن را گزارش کرده‌اند. آنها در کار خود، به DSSC هایی با استفاده از رنگ

<sup>۱</sup> Counter electrode

N719 به عنوان حساس کننده و فوتوآند تیتانیوم دی اکسید و با الکترودهای شمارشگر مایع و شبه جامد، به ترتیب به بازدهی تبدیل ۰.۸/۱۸ و ۰.۳/۶۱٪، دست یافتند. در مقایسه با الکتروده سنتی پلاتین، این الکتروده شمارشگر جدید، مزایای زیادی مثل آماده سازی ساده، کم هزینه، مقاومت کم، بازتاب بالا و همچنین بهبود بازدهی تبدیل از ۰.۳/۴۶٪ به ۰.۷/۰۷٪ دارد. اخیراً، استفاده از نانوذرات (CoS) کبالت سولفید، به عنوان مواد کم هزینه‌ی جایگزین پلاتین، به عنوان الکتروده شمارشگر برای استفاده در DSSC، گزارش شده است. هسو و همکارانش، به DSSC با بازدهی تبدیل امیدوار کننده‌ی ۰.۸/۱٪ نیز دست یافته اند. سطوح خارجی و فاکتور زبری CoS، آن را به جایگزین قابل قبولی برای DSSC های بر پایه‌ی پلاتین، تبدیل کرده است [۱۵].

## ۶-۲-۲ بستن سلول

برای سرهم کردن<sup>۱</sup> و آب بندی<sup>۲</sup> سلول به پلیمری با ضخامت بیشتر از فوتوالکتروده نیاز است. از آنجایی که الکترولیت‌ها اغلب خورنده هستند. این پلیمر، باید در مقابل الکترولیت مقاوم باشد تا از تبخیر آن بتواند جلوگیری کند.

## ۳-۲ ساختار و اصول عملکرد سلول خورشیدی رنگدانه‌ای

تمام دستگاه‌های فوتوولتائیک شامل دو مرحله‌ی مهم برای تبدیل نور خورشید به انرژی الکتریکی هستند: (۱) جذب نور با تحریک الکترون؛ (۲) جدایی حامل‌های بار. در DSSC ها، روش جذب نور تابیده و جدایش حامل ها، با سلول‌های خورشیدی کلاسیکی با پیوندگاه p-n، کاملاً متفاوت است. در سلول‌های خورشیدی کلاسیکی، هر دو فرآیند جذب نور و جدایی حامل بار، توسط خود مواد نیمه‌رسانا، انجام می شود. در سلول‌های خورشیدی با پیوندگاه p-n، جدایش بار بر پایه‌ی توسعه‌ی ناحیه‌ی تهی بر روی پیوندگاه p-n، انجام می شود. در مقابل در DSSC ها، نور جذب شده توسط

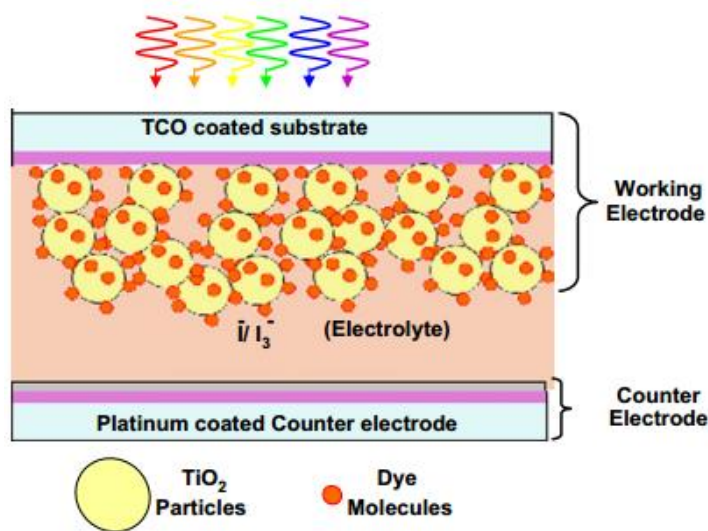
---

<sup>۱</sup> Assembly

<sup>۲</sup> sealing



مولکول‌های رنگ، به مواد نیمه رسانا (به عنوان مثال  $TiO_2$ ،  $ZnO$ ،  $SnO_2$  و غیره) متصل شده اند. جدایش بار در محل اتصال بین اکسید فلزی و رنگ اتفاق می افتد. سلول‌های خورشیدی بر پایه‌ی اتصال p-n، به عنوان دستگاه‌های حامل اقلیت شناخته شده اند، در حالیکه DSSC ها، دستگاه‌های حامل اکثریت نامیده می شوند. شکل (۲-۲) طرح‌واره‌ای از اجزای یک DSSC را نشان می دهد.



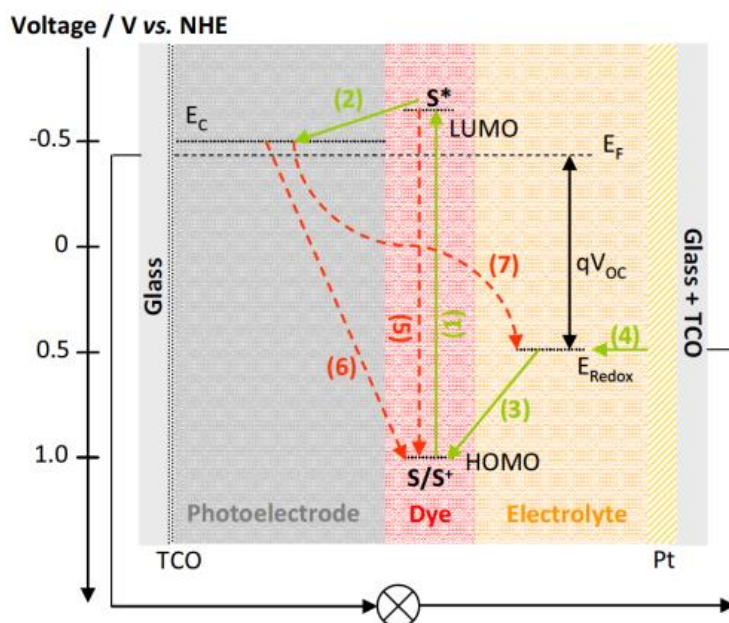
شکل ۲-۲: طرح‌واره‌ای از یک سلول خورشیدی رنگدانه‌ای

## ۴-۲ سازوکار سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای

شکل (۲-۳) سطوح انرژی، اجزا و مسیرهای ممکن برای تزریق و انتقال الکترون و فرایندهای اتلاف در یک DSSC را نشان می دهد. سلول‌های خورشیدی حساس به رنگ، دستگاه‌های فوتوالکتروشیمیایی هستند، که در آن‌ها چندین فرآیند انتقال الکترون، به صورت موازی و در رقابت با هم، به طور همزمان در حال اجرا می باشند. در مقایسه با سلول‌های خورشیدی نیمه رسانای با پیوندگاه p-n، که در آن جذب نور و انتقال بار، در همان ماده رخ می دهد. در DSSC ها، این اعمال به صورت مجزا انجام می شود. فوتون‌ها توسط مولکول‌های رنگ، جذب شده و بارها به داخل الکتروود  $TiO_2$  منتقل شده و همزمان در الکتروولیت جذب می شوند. یک لایه‌ی اکسید مزوپور متشکل از ذرات در اندازه‌ی نانومتر که تحت فرآیند بازپخت قرار گرفته است، اجازه‌ی انتقال الکترونی را می دهد. در سطح اکسید فلزی، یک لایه از مولکول‌های رنگ، کار جذب نور و انتقال آن به حالت برانگیخته

را به عهده دارند. در نتیجه، الکترون‌ها از نوار ظرفیت نیمه رسانا (VB) ، به نوار رسانش (CB)، تزریق می‌شوند. بعد از آن، اکسیتون‌ها تشکیل شده و سپس جدایی بار اتفاق می‌افتد. الکترون‌های آزاد در نوار رسانش، در سراسر نیمه‌رسانا، منتشر شده و در نهایت به سمت مدار خارجی جریان می‌یابند. هنگامی که الکترون‌ها به الکتروود شمارشگر (CE)، می‌رسند؛ در طول مسیر، آنها با الکترولیتی که فضای بین دو الکتروود را پر کرده است، واکنش می‌دهند. همچنین رنگ در حالت پایه، اکسید شده و پس از آن با احیای الکترون در داخل الکترولیت، در الکتروود شمارنده‌ی پلاتین با کاهش تری یدید، بازیابی می‌شود.

بنابراین واکنش ریداکس در داخل الکترولیت، اجازه می‌دهد تا انتقال بار الکتریکی بین دو الکتروود در DSC، انجام شود و چرخه کامل گردد. بازدهی تبدیل یک DSC، به شدت به سطوح انرژی الکترونی حالت برانگیخته (LUMO) و حالت پایه‌ی (HOMO) رنگ، مرتبط است. که خود آنها به سطح فرمی الکترونی نیمه رسانا و پتانسیل ریداکس الکترولیت بستگی دارند. تراز LUMO ی رنگ، باید دارای سطح انرژی بالاتر از CB اکسید فلزی داشته باشد و سطح انرژی تراز HOMO ی رنگ باید کمتر از پتانسیل ریداکس باشد. بنا به دلایل ذکر شده در بالا، حساس کننده ها، متناسب با شرایط بالا، طراحی و سنتز شده‌اند و باید با تراز انرژی نیمه رسانا و زوج ریداکس، مطابقت داشته باشند. خود سلول هم، قادر به تولید یک افت ولتاژ بین دو الکتروود، در مدار خارجی است. حداکثر ولتاژ فوتوالکتریک، که می‌توان در شرایط مدار باز به آن دست یافت، ولتاژ مدار باز نامیده می‌شود. و به عنوان اختلاف بین تراز انرژی فرمی  $TiO_2$  ( $E_f$ )، و پتانسیل ریداکس الکترولیت ( $E_{redox}$ )، تعریف شده است. سلول را می‌توان به عنوان یک "سیستم بسته" در نظر گرفت، زیرا در حین عملیات مونتاژ سلول، هیچ ماده‌ی شیمیایی، تولید و یا از بین نمی‌رود. با این حال، برخی از واکنش‌های ناخواسته، می‌توانند در بازدهی سلول، تاثیرگذار باشد. مهمترین مکانیسم‌های کاهش بازده به طور مستقیم با باز ترکیب رنگ برانگیخته و الکترون‌های تزریقی  $TiO_2$ ، رنگ اکسید شده و یا حفره‌های درون الکترولیت، مرتبط هستند [۱۶].



شکل ۲-۳: نمودار انرژی در یک DSSC و مسیرهای ممکن برای انتقال الکترون

۱. حساس کننده، بر روی سطح نیمه رسانا، جذب شده و با جذب نور فرودی خورشید، از حالت پایه ی (S) به حالت برانگیخته ( $S^*$ )، گذار می کند.



۲. الکترون های تحریک شده به نوار رسانش نیمه رسانا، تزریق شده و در نتیجه، حساس کننده اکسید می شود ( $S^+$ ).



۳. حساس کننده ی اکسید شده ( $S^+$ )، با پذیرش الکترون ها از یون یدید، احیا می شود.

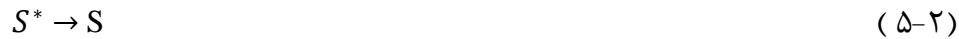


۴. همچنین الکتروود جمع کننده، توانایی تبدیل تری یدید به یدید در الکتروولیت را، داراست و با پخش یون های تری یدید به سمت الکتروود شمارشگر، به صورت یون یدید کاهش می یابد.



علاوه بر مسیر مستقیم انتقال الکترون و فرآیندهای انتقال یونی، چندین رقابت در طول مسیر، وجود دارد که باعث از دست رفتن الکترون‌ها در طول مسیر می‌شود [۱۷]:

۵. گذار رنگ برانگیخته به حالت پایه :



۶. باز ترکیب الکترون‌های تزریق شده با کاتیون‌های رنگ:

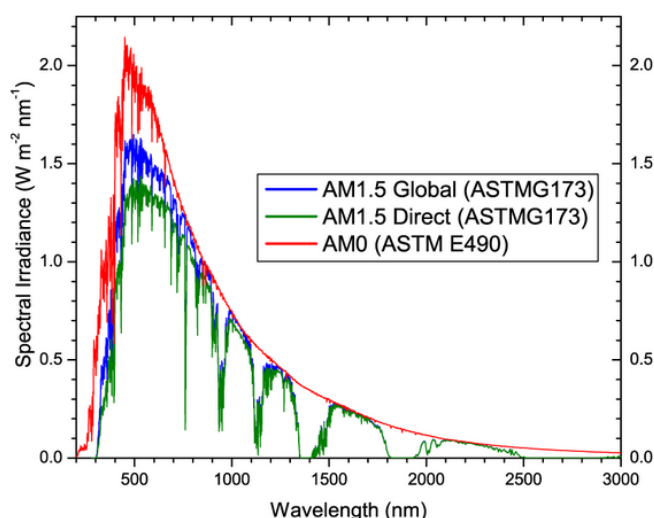


۷. باز ترکیب الکترون‌های تزریقی با جفت ریداکس تری یدید:



## ۵-۲ مشخصه‌یابی سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای به کمک آنالیز جریان-ولتاژ

آنالیز جریان-ولتاژ، مهمترین و ساده ترین آنالیزی است که در مورد سلول‌های خورشیدی، مورد بررسی قرار می‌گیرد. با تحلیل منحنی جریان - ولتاژ (I-V) سلول خورشیدی، مشخصه‌های فوتوولتاییک سلول، نظیر جریان مدار کوتاه  $I_{sc}$  (یا چگالی جریان مدار کوتاه  $J_{sc}$ )، ولتاژ مدار باز ( $V_{oc}$ )، بیشینه بازدهی ( $\eta$ ) و ضریب پرشدگی (FF) را می‌توان به دست آورد. برای آنکه بتوان سلول‌های ساخته شده در آزمایشگاه‌های مختلف در سراسر جهان را، با هم مقایسه کرد. نمودار I-V تحت مجموعه‌ای از شرایط استاندارد، اندازه‌گیری می‌شود. طیف تابش استاندارد، برای اندازه‌گیری بازده، AM1/5 است (شکل (۵-۲)). این طیف به گونه‌ای بهنجار شده است که مقدار انرژی تابشی رسیده از خورشید در واحد سطح در واحد زمان، برابر با  $1000W/m^2$  باشد [۱۸].



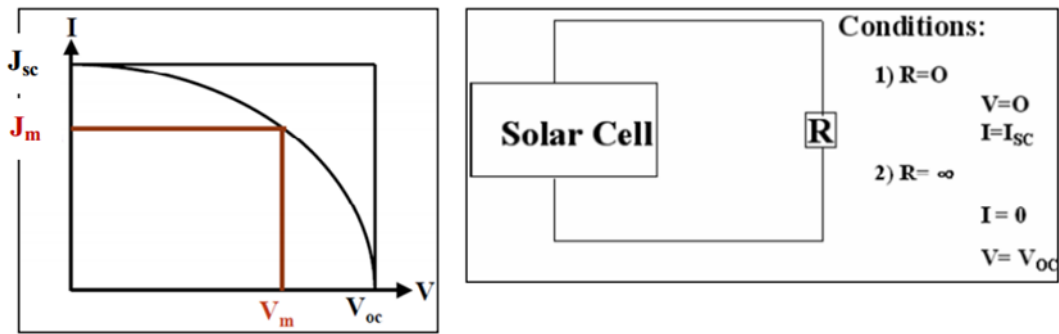
شکل ۲-۴: شار فوتونی طیف AM1.5G در  $1000\text{W/m}^2$

## ۲-۵-۱ اندازه گیری بازده

بازدهی تبدیل توان سلول خورشیدی ( $\eta$ ) با اندازه گیری جریان ولتاژ (نمودار I-V) تحت تابش، به دست می آید. که به عنوان نسبت ماکزیمم توان الکتریکی خروجی از سلول به توان تابشی نور ورودی از خورشید تعریف شده است. نقطه‌ی بیشترین توان، در واقع نقطه‌ای است که در آن توان الکتریکی خروجی سلول از بیشینه‌ی قدر مطلق حاصل ضرب  $|I \times V|$  به دست می آید.

$$\eta = \frac{|JV|_{max}}{P_{in}} = \frac{J_{sc}V_{oc}FF}{P_{in}} \quad (۸-۲)$$

در اینجا  $P_{in}$ ، توان ورودی از نور خورشید است. به طور کلی، بازده به صورت درصد بیان می شود. عملکرد سلول‌های خورشیدی، به طیف نور تابشی و شدت آن و همچنین درجه‌ی حرارت بستگی دارد. شرایط استاندارد بین‌المللی شناخته‌شده برای اندازه‌گیری بازدهی سلول‌های خورشیدی، تحت تابش خورشیدی AM ۱/۵ و در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد است [۱۹]. بنابراین، در این اندازه‌گیری، سلول تحت تابش مستقیم نور خورشید قرار گرفته می شود. در نهایت، ولتاژ الکتروود، از ولتاژ مدار باز تا صفر جاروب شده و مقدار جریان عبوری سلول در مقادیر مختلف ولتاژ اعمالی اندازه‌گیری می شود. در انتها اسکن ولتاژ و فوتوجریان تولید شده، ثبت می شود. یک سلول خورشیدی ممکن است تحت محدوده‌ی وسیعی از ولتاژها و جریان‌ها عمل نماید.



شکل ۲-۵: طرحواره‌ای از منحنی جریان - ولتاژ

### ۲-۵-۲ ضریب پرشدگی (ضریب عملکرد بهینه)

ضریب پرشدگی (FF)، یک اندازه‌گیری از حداکثر توان خروجی از یک سلول خورشیدی است. که به صورت نسبت بیشترین توان خروجی سلول، به حاصل ضرب ولتاژ مدار باز و جریان مدار کوتاه سلول خورشیدی تعریف می‌شود و توصیف کننده‌ی شکل منحنی جریان - ولتاژ می‌باشد و مشخص می‌کند که نمودار جریان - ولتاژ تا چه اندازه مربعی شکل است. در این رابطه،  $V_{oc}$  و  $J_{sc}$ ، ماکزیمم جریان و ولتاژ، در بیشینه‌ی توان فرودی هستند. برای سلول‌های خورشیدی، مقدار ضریب پرشدگی عددی بین ۰ و ۱ است و هر اندازه که مقدار بیشتری داشته باشد و به ۱ نزدیک تر باشد (حالت ایده‌آل) نشان دهنده‌ی عملکرد بهینه‌ی سلول خورشیدی است. مهمترین عاملی که بر میزان این ضریب تاثیر می‌گذارد، مقاومت سلول می‌باشد که با کاهش آن، این ضریب افزایش می‌یابد. [۲۰]

$$FF = \frac{(JV)_{max}}{J_{sc} \times V_{oc}} \quad (۹-۲)$$

### ۳-۵-۲ چگالی جریان مدار کوتاه

جریان مدار کوتاه ( $I_{sc}$ )، به جریانی اطلاق می‌شود که سلول به صورت اتصال کوتاه، یا به عبارتی زمانی که مقاومت صفر است، از خود نشان می‌دهد. و تا حد زیادی به الکترون‌های تولیدی توسط فوتون‌ها و نیز بازترکیب الکترون و حفره‌ها، در فصل مشترک سطوح بستگی دارند. چگالی جریان مدار کوتاه ( $J_{sc}$ )، به صورت نسبت جریان مدار کوتاه سلول به سطح مقطع موثر سلول تعریف می‌گردد.

در آن،  $A$  مساحت موثر سلول خورشیدی است. که به صورت تابعی از شدت تابش خورشیدی، ویژگی‌های اپتیکی و احتمال انتقال بار سلول است.

$$J_{sc} = I_{sc}/A \quad (۱۰-۲)$$

$J_{sc}$ ، توسط عوامل مختلفی چون توزیع شدت نور جذب شده در داخل سلول، انتقال حامل‌های بار و بازدهی جمع‌آوری حامل‌های بار تعیین می‌شود.

## ۴-۵-۲ ولتاژ مدار باز

ولتاژ مدار باز، حداکثر ولتاژ قابل حصول از یک سلول خورشیدی است و زمانی به دست می‌آید که مقاومت بی‌نهایت به دو سر آن متصل شده باشد. که به صورت تفاوت پتانسیل ریداکس الکترولیت و سطح فرمی الکترون‌ها در نیمه رساناها مثلاً  $TiO_2$ ، تعیین می‌شود.

## ۶-۲ روند تجاری‌سازی سلول‌های خورشیدی

هدف نهایی هر نوع فناوری سلول‌های خورشیدی آن است که قیمت راه‌اندازی آن به ازای هر وات انرژی تولیدی قابل مقایسه با فناوری‌های برپایه سوخت فسیلی و قابل رقابت با سایر فناوری‌های فوتوولتایی باشد. هزینه‌ی ساخت ماژول سلول خورشیدی سیلیکونی در حال کاهش است و از ۶ دلار به ازای هر وات در سال ۲۰۰۸ به ۱/۳۵ دلار به ازای هر وات در سال ۲۰۱۵ رسیده است. این در شرایطی است که بازدهی ماژول این نوع سلول خورشیدی از ۱۵٪ به ۲۰٪ و طول عمر کارکرد مفید آن‌ها به ۲۵ سال افزایش یافته است. در شرایط عادی منطقی به نظر می‌رسد که انتظار داشته باشیم قیمت ماژول سلول‌های خورشیدی سیلیکونی روند کاهشی داشته باشد و به قیمت تقریبی ۷/۰ وات به ازای هر دلار و بازدهی بین ۱۸ تا ۲۲٪ برسد. گام‌های بلندی در زمینه تجاری‌سازی فناوری سلول‌های خورشیدی لایه‌ی نازک برداشته شده و امروزه، بازدهی ماژول سلول‌های خورشیدی لایه‌ی نازک بر پایه‌ی کادمیوم تلوراید به ۵/۱۲ تا ۱۰٪ با هزینه‌ی ۷ دلار به ازای هر وات رسیده است. بر پایه‌ی

نقشه‌ی راه برای فناوری سلول‌های خورشیدی لایه‌ی نازک، انتظار می‌رود بازدهی ماژول به ۱۴٪ و هزینه‌ی ساخت به ۵ دلار به ازای هر وات برسد. ماژول سلول‌های خورشیدی بر پایه CuInGaSe امروزه به صورت تجاری موجود است و ماژول‌هایی با بازده بین ۱۲ تا ۱۵٪ و هزینه کمتر از ۵ دلار به ازای هر وات ساخته شده‌اند. سوالی که مطرح می‌شود آن است که در بازار سلول‌های فوتوولتایی سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای چگونه می‌تواند به لحاظ بازده، هزینه ساخت ماژول، پایداری بیش از ۲۰ سال، و نیز تقاضای بازار برای این نوع سلول و میزان در دسترس بودن مواد اولیه با سایر انواع سلول خورشیدی رقابت کند. حقیقت آن است که سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای می‌توانند از مواد قابل دسترس و غیرسمی ساخته شوند که این مساله می‌تواند از مزایای اصلی این نوع سلول نسبت به سلول‌های خورشیدی لایه‌ی نازک باشد [۲۱].

برای آنکه ماژول سلول خورشیدی رنگدانه‌ای با بازده ۱۰٪ تجاری شود باید هزینه‌ی ساختن آن‌ها بسیار ارزان قیمت باشد؛ این امر مستلزم آن است که حداقل یکی از زیرلایه‌های شیشه‌ای از ساختار کلی سلول حذف شود تا هزینه به مقدار متری ۲۰ دلار برسد. در طراحی و ساخت ماژول مساله هزینه و بازدهی باید هم‌زمان در نظر گرفته شوند. به عنوان مثال، نصب ماژول سلول خورشیدی با بازدهی ۱۰٪، در حقیقت به معنای ۳ دلار به ازای هر وات گران‌تر از یک ماژول ۱۵ درصدی است. بنابراین، قیمت ماژول ۱۰ درصدی باید در حدود ۲/۰ تا ۳/۰ دلار به ازای هر وات باشد تا بتواند با هزینه‌ی ساخت مترمربعی ۲۰ تا ۳۰ دلار قابل استفاده به‌عنوان یک تولیدکننده‌ی انرژی باشد. پرهزینه‌ترین بخش یک ماژول زیرلایه‌های آن است. در مقیاس گیگاواتی، شیشه‌ی آلائیده شده با فلورین (FTO) قیمتی بین ۸ تا ۱۲ دلار به ازای هر متر مربع دارد؛ این در حالی است که قیمت شیشه ساده بدون پوشش در حدود ۵ دلار به ازای هر وات است. در نتیجه، در ساخت سلول خورشیدی رنگدانه‌ای بر پایه‌ی ۲ زیرلایه شیشه‌ای، هزینه زیرلایه در حدود ۱۳ دلار در هر متر مربع خواهد بود. این به آن معناست که برای بقیه قسمت‌های سلول فقط می‌توان بین ۷ تا ۱۷ دلار در متر مربع هزینه کرد تا امکان تجاری‌سازی وجود داشته باشد. چالش اصلی همین مساله است. سلول‌های خورشیدی



رنگدانه‌ای بسیار ارزان قیمت را می‌توان بر پایه‌ی زیرلایه‌های فلزی مانند استیل، آلومینیوم، یا پلاستیک ساخت تا از هزینه‌ی شیشه کاسته شود. مساله اصلی در این جا آن است که الکترولیت یدی، خورنده آلومینیوم و استیل است. در نتیجه، تحقیقات به سمت رونشانی این زیرلایه‌ها با پوشش بدون ترک و نیز ساخت الکترولیت‌های غیرخورنده در حال انجام است. علاوه بر زیرلایه‌های فلزی، زیرلایه‌های پلاستیکی نیز به عنوان موادی ارزان قیمت مطرح هستند. مساله اصلی در مورد زیرلایه‌های پلاستیکی آن است که رطوبت به راحتی می‌تواند در آن‌ها نفوذ کند. تحقیقات برای ساخت زیرلایه‌هایی با نفوذ آب کمتر در حال انجام است. راهکار جالب دیگر آن است که سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای ساخته شود که در مقابل آب پایدار باشد. مساله دیگر این است: لایه‌نشانی لایه‌های اکسیدی رسانا بر روی پلاستیک عمدتاً گران‌تر، کدرتر، و با مقاومت الکتریکی بیشتر نسبت به زیرلایه‌های شیشه‌ای هستند، که همه‌ی این‌ها منجر به بازده کمتر آن‌ها می‌شود. بنابراین، چالش اصلی در این مرحله دستیابی به زیرلایه‌های شفاف رسانا با بازده قابل مقایسه با شیشه است [۲۲].

دستیابی به ماژول سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای با بازده ۱۴٪ مساله‌ی فوق‌ارزان بودن این سلول‌ها را حل می‌کند. این امر مستلزم دستیابی به بازده‌ی ۱۵٪ در مقیاس آزمایشگاهی است. نرخ کم‌افزایش در بازده‌ی سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای در ۱۰ سال اخیر به این دلیل است که بیشینه قابل دستیابی برای سیستم الکترولیت یدی و رنگدانه‌ی روتینیومی حدود ۱۳٪ است. کاهش پتانسیل اتلافی داخلی تا حدود ۵۰۰ mV با تطبیق بهتر سطوح انرژی در مرز رنگدانه-الکترولیت، بهره‌گیری از رنگدانه‌هایی با قدرت جذب بیشتر نور در فیلم‌های نازک‌تر، و ممانعت از اتلاف بازترکیب الکترون‌ها می‌تواند سبب دستیابی به بازده‌ی ۱۹٪ با رنگدانه‌ای با لبه‌ی جذب تا ۹۲۰ نانومتر شود. درنهایت، با وجود آن‌که تحقیقات ابتدایی در ارتقای فناوری‌های ماژول‌های سلول خورشیدی رنگدانه‌ای انجام شده است، فهم و مطالعه دقیق طول عمر سلول و سازوکارهای تخریب آن‌ها مستلزم مطالعات گسترده‌ی آتی در این زمینه است [۲۳].

## جمع بندی

اساس عملکرد سلول های خورشیدی حساس شده به رنگ (DSSC) ، بر پایه ی جذب نور توسط مولکول های رنگدانه و جدایش الکترون – حفره بر روی سطح یک نیم رسانای با گاف نواری پهن که با رنگدانه حساس شده است، قرار گرفته است. این سلول ها، از دو الکتروود کاتد و آند که فضای بین آنها با الکتروولیت پر شده است، تشکیل شده است. فوتوآند معمولاً از جنس نانوذرات  $TiO_2$  و  $ZnO$  و غیره... و الکتروود کاتد از جنس پلاتین است که بر روی شیشه های رسانای شفاف، که معمولاً از جنس (FTO) یا (ITO) هستند، نشانده می شوند. نور تابیده، توسط تک لایه ای از رنگدانه که به طور شیمیایی روی سطح فوتوالکتروود جذب سطحی شده است، جذب می شود. فوتوالکترون تولید شده در رنگدانه ، به نوار رسانش  $TiO_2$  منتقل شده و سپس در چرخه ، وارد مدار خارجی می شود. رنگدانه ی اکسید شده با گرفتن الکترون از الکتروولیت به حالت پایه ی خود باز می گردد. سرانجام با انتقال الکترون از مدار خارجی به الکتروولیت، الکتروولیت کاهش یافته و این چرخه با برخورد دوباره ی نور با رنگدانه ی جذب شده بر روی فوتوآند، تکرار می شود. بازدهی سلول های خورشیدی رنگدانه ای در حال حاضر به حدود ۱۱٪، رسیده است. محققین در تلاشند تا با استفاده از مواد ارزان قیمت تر، علاوه بر کاهش هزینه ی تمام شده ی این سلول ها، بازدهی تبدیل آنها را، با استفاده از نانو ساختارهای دیگری از مواد مورد استفاده ی گذشته به عنوان فوتوآند یا قسمت های دیگر سلول رنگدانه ای، افزایش دهند.

فصل سوم:

مروری بر مقالات

### ۳-۱ اکسید رسانای شفاف TCO

بستر رسانای شفاف، نقش مهمی در تعیین عملکرد سلول خورشیدی رنگدانه ای ایفا می کند. از آن به عنوان جمع کننده ی جریان و پشتیبانی از لایه های نیمه رسانا در DSSC، استفاده می شود. دو ویژگی آن بسیار مهم است: شفافیت نوری بالا، که اجازه می دهد تا نور خورشید به زیر ناحیه ی فعال مواد، بدون جذب طیف نوری ناخواسته خورشیدی منتقل شده و مقاومت الکتریکی پایین که فرایند انتقال الکترون را تسهیل می کند و از دست دادن انرژی را کاهش می دهد. اکسیدهای رسانای شفاف کنونی مورد استفاده در صنعت، اساساً نیمه رسانای نوع n هستند. [۲۴]

پوشش های رسانای شفاف برای کاربردهای فتوولتائیک، با استفاده از هردو مواد آلی و غیر آلی ساخته شده است. به طور کلی فیلم های غیر آلی، معمولاً از یک لایه ی اکسید رسانای شفاف (TCO)، در قالب اکسید قلع آلاینده با ایندیوم (ITO)، اکسید قلع آلاینده با فلئور (FTO) و اکسید روی آلاینده، ساخته شده است. فیلم های آلی نیز با استفاده از شبکه ی نانولوله های کربنی و گرافن، که به نسبت به نور مادون قرمز بسیار شفاف هستند، می تواند ساخته شوند. همچنین شبکه های پلیمری مانند پلی (۳،۴-اتیلن دیوکسی تیوفن) و مشتقات آنها توسعه یافته اند [۲۵]. کارآمدترین مواد TCO که به طور گسترده ای در سیستم های فتوولتائیک استفاده شده اند، شیشه ی پوشش داده شده ی ITO یا FTO است. با این حال، تنها نگرانی برای ITO کاهش هدایت آن در طول فرایند بازپخت در ساخت DSSC است. بنابراین FTO نسبت به مواد رسانای شفاف دیگر برای DSSC ها ترجیح داده می شود. فیلم TCO بر روی یک بستر از طریق روش های لایه نشانی مختلف، از جمله رسوب شیمیایی از فاز بخار (MOCVD)، اسپری پایرولیز، و لایه نشانی لیزر پالسی (PLD) است. با این حال کارآمدترین روش کندوپاش مگنترون فیلم است [۲۶].

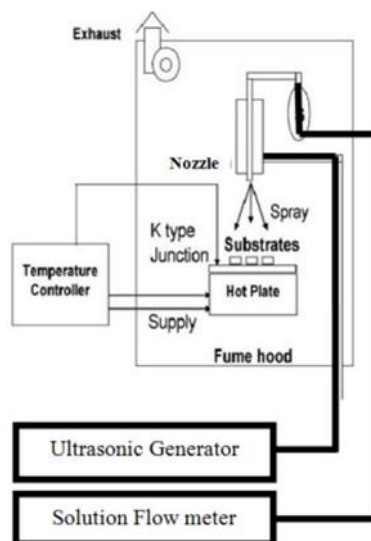
### ۱-۱-۳ مروری بر مقالات اکسید رسانی شفاف آلاینده شده با فلئورید FTO

#### ۱-۱-۱-۳ اثر آرایش فلئور بر روی خواص ساختاری، اپتیکی و الکتریکی از

#### فیلم نازک $\text{SnO}_2$ تهیه شده به روش اسپری التراسونیک

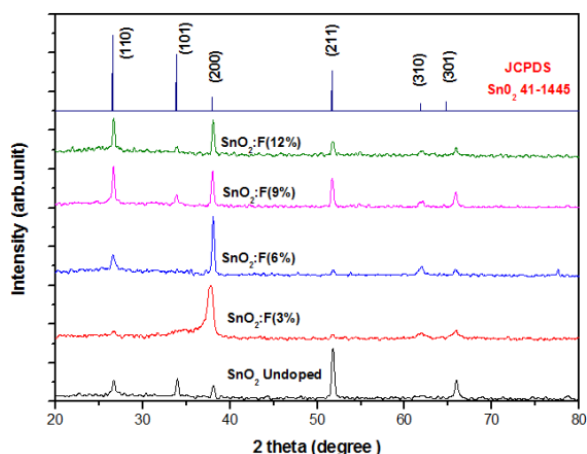
در این مقاله، فیلم‌های نازک اکسید قلع بدون آرایش و آلاینده با فلئور با استفاده از روش ارزان قیمت اسپری التراسونیک (شکل ۱-۳) توسط (آتمانه بنهائو<sup>۱</sup> و همکاران ۲۰۱۴) سنتز شدند؛ فیلم‌ها بر روی لایه‌های شیشه‌ای گرم در  $480^\circ\text{C}$  اسپری شدند. وابستگی خواص ساختاری، اپتیکی و الکتریکی فیلم  $\text{SnO}_2$  با توجه به غلظت فلئور بررسی شدند. مطالعات بر روی پراش اشعه ایکس، جذب نوری، پروب چهار نقطه و اثر هال در فیلم بدون آرایش و قلع اکسید آلاینده با فلئور (FTO) انجام شده است [۲۷].

برای آماده سازی محلول اسپری،  $(\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$  به عنوان پیش ماده برای قلع استفاده شده و از آب دوبار یونیزه و متانول با نسبت (۱:۱) به عنوان حلال و نیز اضافه کردن چند قطره HCl استفاده کردند. و با اضافه کردن مقادیر متفاوت  $\text{NH}_4\text{F}$ ، به غلظت‌های مختلف حجمی ۰ تا ۱۲٪ برای فلئور دست یافتند.



شکل ۱-۳: اسپری التراسونیک [۲۷]

<sup>۱</sup> Amane Benhauo



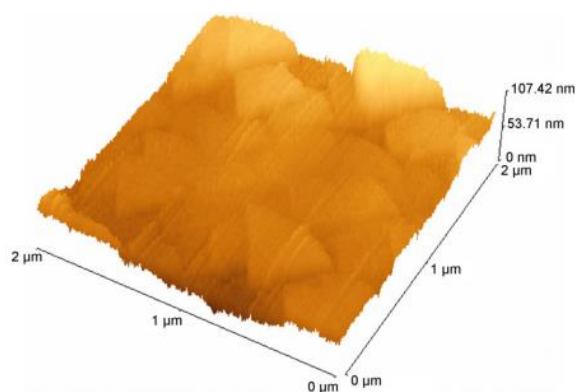
شکل ۳-۲: الگوی پراش پرتو X، ساختار کاستریت با (۲۰۰)، به عنوان جهت‌گیری ترجیحی برای فیلم FTO

شکل (۳-۲)، الگوی پراش پرتو X، در حضور ساختار کاستریت با (۲۰۰)، به عنوان جهت‌گیری ترجیحی برای فیلم FTO را نشان می‌دهد. اندازه‌ی دانه‌ها از  $10/3$  تا  $27/12$  نانومتر، برای غلظت‌های مختلف فلئوئور از ۰ تا ۱۲٪wt متفاوت هستند. برای همه‌ی فیلم‌ها، طیف عبور نوری  $T(\lambda)$  بیش از ۸۳/۹٪ در منطقه طیف نورمرئی مشاهده شده است. با مطالعه‌ی اپتیکی فیلم‌ها، ضخامت فیلم‌ها را از حدود ۷۰۰-۹۷۵ نانومتر و پهنای گاف نواری از  $3/651$  به  $3/902$  الکترون ولت متفاوت به دست آمده است. با بررسی رفتار الکتریکی دریافتند که فیلم دارای رسانش نوع n است و نوع آن به غلظت فلئوئور بستگی زیادی دارد. همچنین آنها با بررسی فیلم FTO اسپری شده، با آرایش ۶ درصد وزنی فلئوئور حداقل مقاومت سطحی  $1/47 \times 10^{-3} \Omega cm$  و حداقل مقاومت  $(R_{sc}) 21 \Omega/cm^2$  با تراکم حامل و تحرک الکترون به ترتیب  $2/04 \times 10^{19}$  و  $208/4 cm^2 V^{-1} s^{-1}$  به دست آوردند.

### ۳-۱-۱-۲ اثر غلظت $SnCl_4$ بر روی فیلم‌های نازک اکسید قلع آلاینده با فلئوئورید

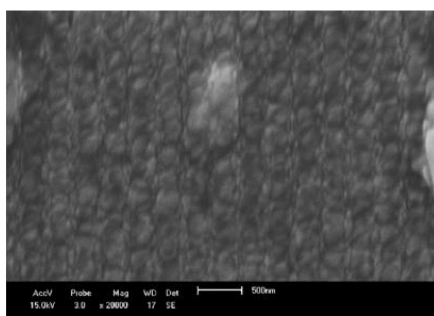
در این مقاله، فیلم‌های نازک اکسید رسانای شفاف  $SnO_2$ :F بر روی لایه‌های شیشه‌ای پیش‌گرم‌دیده، با روش اسپری پایرولیز با غلظت‌های متفاوت  $SnCl_4$  لایه‌نشانی شده است. با استفاده از محلول مناسب و با استفاده از هوا به عنوان گاز حامل، فیلمی با ضخامت تا  $1108$  نانومتر رشد داده شده است. جذب اپتیکی پراش پرتوی X، با روش وان در پاوو برای اندازه‌گیری مقاومت سطحی و اندازه‌گیری اثر هال در دمای اتاق و تعیین تراکم حامل و رسانایی استفاده شده است. فیلم‌های لایه

نشانی شده‌ی  $SnO_2$ ، با یک ساختار بلوری چهار وجهی با جهت گیری ترجیحی در امتداد جهت (۲۰۰) با ضریب بافت بالای ۶/۹۲ و با اندازه متوسط دانه‌ی ۴۸ نانومتر به دست آمده است. حداکثر مقدار ضریب شایستگی ( $61.8 \times 10^{-3}$ )، با شفافیت ۸۷٪ در ۵۵۰ نانومتر به دست آمده است. مورفولوژی سطح فیلم‌ها با تکنیک‌های SEM (شکل (۳-۳)) و AFM (شکل (۳-۴)) مورد مطالعه قرار گرفت [۲۸].



شکل ۳-۳: تصویر AFM فیلم‌های نازک اکسید رسانای شفاف  $SnO_2$ : F

تصاویر SEM، آرایش تناوبی مداوم از دانه‌های کوچکتر در بین دو دانه بزرگتر، با سطح حفره‌ی آزاد را نشان می‌دهد. فیلم‌های با شدت بالای آرایش، دارای هدایت الکتریکی از نوع n هستند.



شکل ۳-۴: تصویر SEM فیلم‌های نازک اکسید رسانای شفاف  $SnO_2$ : F

مقادیر بهینه شده‌ی بهترین نمونه، با مقاومت سطحی ( $R_s$ )، مقاومت ( $\rho$ ) و تحرک ( $\mu$ ) به ترتیب  $\Omega$

۳/۷۱ و  $3.7 \times 10^{-4} \Omega cm$  و  $5.81 cm^2 V^{-1} s^{-1}$  را به دست آورده اند.

### ۳-۲ مواد نانو ساختار قابل استفاده به عنوان فتو آند

اجزای سلول‌های خورشیدی حساس به رنگ از زمان اختراع آن، کمی تغییر کرده است. توسعه‌ی آنها از یک طرف به تنظیم بعضی از خواص اجزای اصلی، مانند مورفولوژی و خواص سطحی الکتروود نیمه رسانا و ترکیب شیمیایی الکتروولیت متمرکز شده است. از سوی دیگر مواد جایگزین و روش‌های جدید مانند الکتروولیت جامد و لایه‌های پلاستیکی کشف شده‌اند.

#### ۳-۲-۱ نانو ساختار نیمه رسانای اکسید روی (ZnO)

اکسید نیمه‌رسانا، پشتیبانی فیزیکی مولکول حساس کننده و الکترون رسانش در یک سلول خورشیدی حساس به رنگ را به عهده دارد. همانطور که قبلاً اشاره شد، ساختار مزوپور فیلم‌ها برای بارگذاری به روی رنگ، در نیمه رساناها بسیار مهم است. گاف نواری نیمه‌رسانای دی اکسید تیتانیوم تا بحال به طور گسترده، به عنوان ماده‌ی اصلی فوتوآند DSSC، مورد استفاده بوده است. دی اکسید تیتانیوم یک ماده‌ی بسیار راحت و روان، غیر سمی، ارزان و از نظر شیمیایی پایدار است و مناسب بودن آن برای سلول‌های خورشیدی حساس به رنگ به طور گسترده ثابت شده است. [۲۹]

طیف گسترده‌ای از اکسیدهای نیمه رسانا با گاف نواری متفاوت، نیز به عنوان ماده‌ی دارای پتانسیل بالقوه‌ی رساننده‌ی الکترون در DSSC ها، بررسی شده است. با این حال، تا به حال هیچ ماده‌ی نیمه رسانای دیگری، بازده‌ای قابل مقایسه با دی اکسید تیتانیوم نداشته است. با این وجود، هم اکنون برخی نیمه رساناها، با ویژگی‌های خاصی هستند که آنها را نامزد بسیار جذاب به عنوان جایگزینی برای دی اکسید تیتانیوم کرده است. بعضی از این مواد، مثل  $SnO_2$ ،  $In_2O_3$  و  $ZnO$ ، به طور گسترده‌ای به عنوان فتوالکتروود برای DSSC ها، استفاده شده‌اند. در بین این مواد، اکسید روی به دلیل موقعیت سطح انرژی مشابه با نوار رسانش دی اکسید تیتانیوم، توجه بیشتری را به خود جلب کرده است. با این حال، اکسید روی تحرک پذیری الکترون بسیار بالاتری از فاز آاناتاز دی اکسید تیتانیوم دارد، که از آن باید به نفع انتقال الکترون استفاده کرد [۳۰].

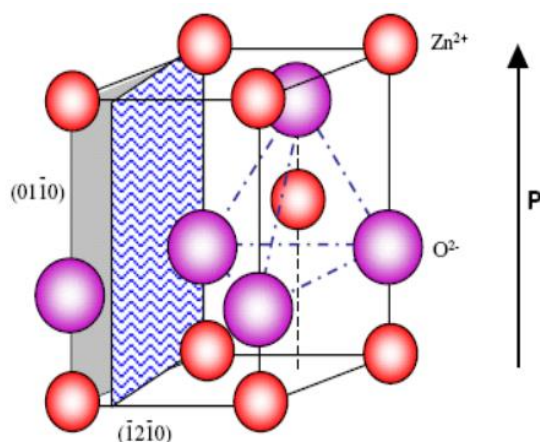


اکسید نیمه رسانا، پشتیبانی فیزیکی مولکول حساس کننده و الکترون رسانش در یک سلول خورشیدی حساس به رنگ را به عهده دارد. همانطور که قبلا اشاره شد، ساختار مزوپور فیلم‌ها برای بارگذاری به روی رنگ، در نیمه رساناها بسیار مهم است. گاف نواری نیمه رسانای دی اکسید تیتانیوم تا بحال به طور گسترده، به عنوان ماده‌ی اصلی فوتوآند DSSC، مورد استفاده بوده است. دی اکسید تیتانیوم یک ماده‌ی بسیار راحت و روان، غیر سمی، ارزان و از نظر شیمیایی پایدار است و مناسب بودن آن برای سلول‌های خورشیدی حساس به رنگ به طور گسترده ثابت شده است. [۲۹]

طیف گسترده‌ای از اکسیدهای نیمه رسانا با گاف نواری متفاوت، نیز به عنوان ماده‌ی دارای پتانسیل بالقوه‌ی رساننده‌ی الکترون در DSSC ها، بررسی شده است. با این حال، تا به حال هیچ ماده‌ی نیمه رسانای دیگری، بازده‌ای قابل مقایسه با دی اکسید تیتانیوم نداشته است. با این وجود، هم اکنون برخی نیمه رساناها، با ویژگی‌های خاصی هستند که آنها را نامزد بسیار جذاب به عنوان جایگزینی برای دی اکسید تیتانیوم کرده است. بعضی از این مواد، مثل  $SnO_2$ ،  $In_2O_3$  و  $ZnO$ ، به طور گسترده‌ای به عنوان فتوالکتروود برای DSSC ها، استفاده شده اند. در بین این مواد، اکسید روی به دلیل موقعیت سطح انرژی مشابه با نوار رسانش دی اکسید تیتانیوم، توجه بیشتری را به خود جلب کرده است. با این حال، اکسید روی تحرک پذیری الکترون بسیار بالاتری از فاز آاناتاز دی اکسید تیتانیوم دارد، که از آن باید به نفع انتقال الکترون استفاده کرد [۳۰].

از لحاظ تاریخی، اکسید روی یکی از اولین نیمه رساناهای مورد استفاده در سلول‌های خورشیدی حساس به رنگ بوده است. گاف نواری و انتقال لبه نوار رسانش اکسید روی، شبیه به فاز آاناتاز  $TiO_2$  است. کاربرد اکسید روی در DSSC ها، به طور چشمگیری در سال‌های اخیر افزایش یافته است. که آن را می‌توان به طور عمده به سهولت نسبی سنتز اکسید روی بلورین (در ساختار ورتزایت) با مورفولوژی‌های مختلف، مانند نانوذرات، نانوسیم، نانومیله، نانولوله ها، چهارپایه ها، نانو گل‌ها، نانوصفحات و نانوساختارهای شاخه‌ای نسبت داد [۳۱].

اکسید روی، یک نیمه رسانای با پهنای گاف نواری مستقیم با پتانسیل کاربردی بزرگ و متنوع است. و ساختار متنوعی همچون ورتزایت، زینک بلند، ساختار بلورسنگ نمکی را داراست. در شرایط محیطی، دارای فاز ترمودینامیکی پایدار ساختار شش ضلعی ورتزایت است که در آن هر آنیون توسط چهار کاتیون در گوشه‌های چهار ضلعی احاطه شده است و بالعکس (شکل ۳-۵). ساختار نسبتاً باز اکسید روی اجازه می‌دهد تا بسیاری از سایت‌ها، جای نقص ذاتی و ناخالصی بیرونی را بگیرند [۳۲].



شکل ۳-۵: ساختار ورتزایت اکسید روی

اکسید روی با یک ساختار ورتزایت، به طور طبیعی نیمه رسانای نوع n است. پایداری شیمیایی نسبتاً ضعیف اکسید روی، آن را تقریباً در آب نامحلول، اما محلول در اسید یا باز کرده است. و آن را به عنوان اکسید آمفوتریک در نظر گرفته‌اند که واکنش آن بستگی به pH محیط واکنش دارد.



تاکنون، بهترین نتیجه برای یک سلول خورشیدی رنگدانه‌ای اکسید روی توسط سایتو و فوجیها را بدست آمده است. در نهایت آنها به بازدهی ۶.۵۸% دست یافتند. این بازده، در حدود نیمی از حداکثر بازدهی به دست آمده برای  $\text{TiO}_2$  است. لایه‌ی مزوپور اکسید روی بر روی یک اکسید رسانای شفاف (TCO) که به صورت یک زیرلایه‌ی شیشه‌ای یا پلاستیکی است لایه نشانی می‌شود. TCO یک ماده

مهم است که نه تنها برای سلول‌های خورشیدی، بلکه برای برنامه‌های مختلفی، به ویژه در زمینه‌ی الکترونیک، به عنوان مثال صفحات نمایش مسطح، LED ها و دستگاه‌های موجبر به کار می‌رود. TCO یک نیمه رسانای نوع n با گاف نواری پهن، است که متشکل از تراکم بالایی از الکترون‌های آزاد است. یکی از رایج‌ترین آنها ایندیم قلع اکسید (ITO)، اکسید قلع آلیبده شده با فلئور (FTO) و اکسید روی آلیبده با آلومینیوم (AZO یا Al:ZnO) با هدایت الکتریکی خوب، شفافیت بالا و قیمت پایین مواد است. در مورد ITO، زمانی که در دمای بیش از ۳۰۰۰ درجه‌ی سانتیگراد قرار می‌گیرد، رسانش آن به طور چشمگیری کاهش می‌یابد. که به علت کاهش جای خالی اکسیژن در دمای بالا و در نتیجه کاهش حامل‌های الکتریکی است [۳۳].

اکسید روی با گاف نواری (۳/۲eV)، که این گاف نواری، آن را محدود به طول موج‌های کوتاه‌تر (طیف فرابنفش) کرده است. اما تنها حدود ۴٪ از طیف خورشیدی در محدوده‌ی فرابنفش می‌افتد. بنابراین باید عملکرد نیمه رسانای اکسید روی، در زیر نور خورشید بهبود یابد. استفاده از نیمه رسانای با گاف نواری کوچک به دلیل ناپایداری آنها متداول نیست. به منظور بهبود خواص اکسید روی به عنوان نیمه رسانا و فتوکاتالیست در زیر نور خورشید، به روی حساس کردن آن با اضافه کردن عناصر دیگر مطالعاتی انجام شده است. حساسیت ZnO با رنگ طبیعی، به دلیل بی‌خطری، ارزانی، همخوانی با محیط زیست، جایگزین بسیار مناسبی است. رنگ‌های با گاف نواری کوچک، طول موج نورد در ناحیه مرئی را جذب می‌کنند. با تولید الکترون حفره در مولکول رنگ، در نهایت با برانگیختگی، الکترون از HOMO ی رنگ به LUMO منتقل شده و انتقال بار از LUMO ی رنگ به نوار رسانش اکسید روی رخ می‌دهد [۳۴].

## ۳-۳ انواع نانو ساختارهای اکسید روی مورد استفاده در سلول‌های خورشیدی

### رنگدانه‌ای

نانوساختارهای اکسید روی در انواع مورفولوژی، از جمله نانوسیم‌ها، نانومیله‌ها،

نانو چهارپره‌ها، نانوتسمه‌ها، نانو گل‌ها، نانوذرات و غیره را می‌توان از سنتز با تکنیک‌های مختلف از جمله رشد از محلول، رسوب فاز بخار (سنتز هیدروترمال)، رسوب دهی شیمیایی بخار (CVD)، اپیتکسی فلزی فاز بخار، لایه نشانی الکترو شیمیایی، رسوب پالس لیزر (PLD)، اسپاترینگ، سنتز سل-ژل، اسپری پایرولیز و غیره به دست آورد. در این مطالعه به بررسی این نانوساختارها و تکنیک‌های رشد آنها می‌پردازیم.

### ۳-۱-۳-۳ رشد نانوسیم‌های اکسید روی

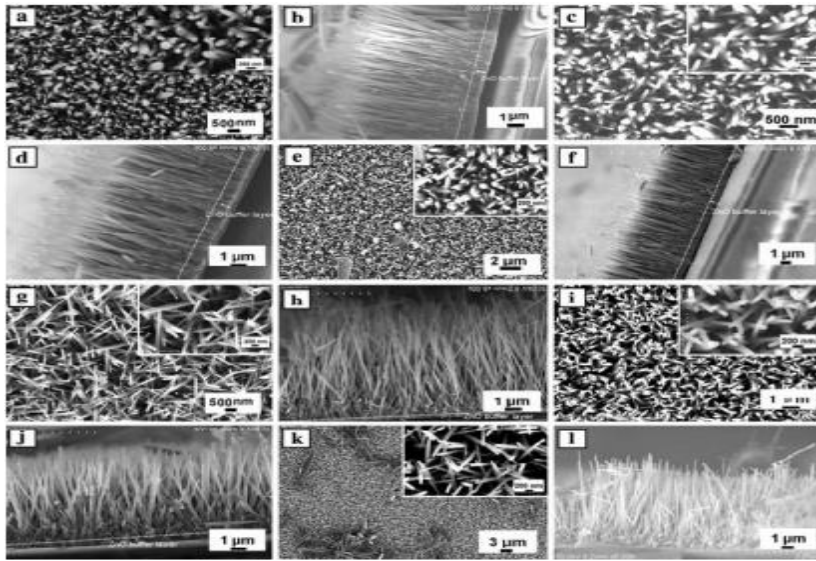
نانوسیم‌های اکسید روی با روش‌های مختلفی رشد داده شده‌اند که در اینجا به چند نمونه اشاره می‌نماییم:

ناکامورا<sup>۱</sup> (۲۰۰۶) [۳۵]، رشد نانوسیم از روش محلول بر روی زیرلایه‌ی سیلیکونی در دمای  $35^{\circ}\text{C}$  را گزارش کرده است. طول نانوسیم و میانگین رشد طول نانوسیم به عنوان تابعی از زمان توسط آنها اندازه‌گیری شدند. (یانگ و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۰۹) [۳۶] سنتز نانوسیم‌ها با نسبت ابعاد بالا و ضخامت‌های مختلف از لایه‌های بافر اکسید روی به روش لایه نشانی چرخشی، روش لایه نشانی غوطه‌وری و روش هیدروترمال را انجام داده‌اند. در این مطالعه، حامل‌های بازترکیب در سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای نانو سیم اکسید روی برای افزایش بازدهی آن در مقایسه با دی اکسید تیتانیوم به روش اسپاترینگ بررسی شدند. روش‌های مختلف آماده‌سازی بذر اکسید روی به شدت تحت تأثیر مورفولوژی و تراکم آرایه‌ی نانوسیم اکسید روی، منجر به عملکردهای مختلفی از DSSC‌ها، بر اساس فیلم نانوسیم اکسید روی، خواهد شد (دو و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۰۶) [۳۷]. (شکل (۳-۶)) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (FESEM) و سطح مقطع عرضی دو نمونه‌ی آماده شده با  $7/3$  میلی مول (PEI) به مدت ۳۰ ساعت بر روی زیرلایه‌ی اکسید قلع آلائیده شده با فلئور را نشان می‌دهد.

<sup>۱</sup> Nakamura

<sup>۲</sup> Yang *et al*

<sup>۳</sup> Du *et al*



شکل ۳-۶: تصویر SEM آرایه های نانو سیم رشد داده شده بر روی زیر لایه های FTO، با بذر های مختلف از a تا f به روش spin-coating، و از g تا k به روش dip-coating، c، a، e، g، k، I، e، g تصاویر از بالا هستند. و b، d، h، f، j، تصاویر مقطع عرضی هستند.

مقادیر میانگین ابعاد نانوسیم، نسبت تراکم آرایه های نانو سیم و ارزیابی آماری از تصاویر FESEM

برآورد شده و در جدول (۳-۱) خلاصه شده است.

جدول ۳-۱: مقادیر میانگین ابعاد نانوسیم، نسبت تراکم آرایه های نانو سیم و ارزیابی آماری از تصاویر FESEM

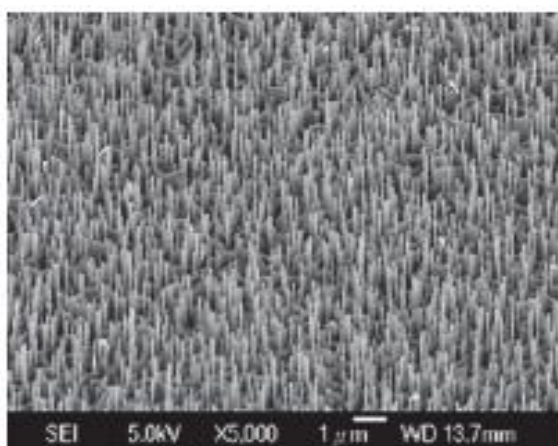
روش آماده سازی بذر ZnO (nm)	قطر (μm)	نسبت طول	نسبت طول به عرض نانو سیم ها	چگالی
روش Spin-coating				
نمونه A1	۲۰۰	۹/۵	۴۸	۱/۲
نمونه A2	۱۹۵	۹/۱	۴۷	۲/۲
نمونه A3	۲۱۰	۸/۲	۳۹	۲/۰
روش Dip-coating				
نمونه B1	۱۲۰	۹/۲	۷۹	۱/۵
نمونه B2	۱۵۰	۸/۲	۵۵	۱/۶
نمونه B3	۱۳۰	۹/۸	۷۵	۱/۲

چائو و همکاران<sup>۱</sup> (2010)، [۳۸] رشد نانوسیم های اکسید روی در کوره های رسوب شیمیایی فاز

بخار در حضور کاتالیزور طلا را گزارش کرده اند. (شکل (۳-۷))، تصویر مایل از میکروسکوپ الکترونی

<sup>۱</sup> Chao et al

روبشی (SEM) آرایه‌ی نانوسیم را در بستر یاقوت کبود نشان می‌دهد. این تصویر نشان داد که نانوسیم اکسید روی به صورت عمودی شکل گرفته است، طول نانوسیم در حدود ۱/۲ میلی‌متر است و قطر آن در محدوده ۷۰-۱۰۰ نانومتر است.

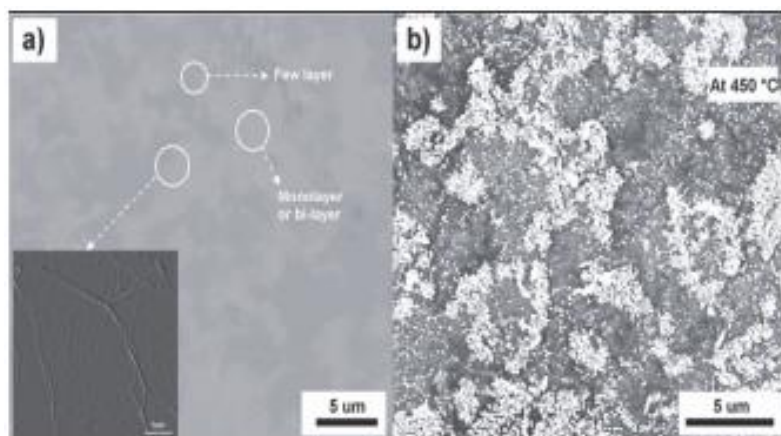


شکل ۳-۷: تصویر SEM آرایه‌های اکسید روی از روش هیدروترمال در غیاب کاتالیزور

سنتز و مشخصه‌یابی نانوساختارهای سه بعدی لایه‌های بزرگ گرافن، در مقایسه با لایه‌های گرافن و اکسید روی که در امتداد هم آمده‌اند، به روش رسوب شیمیایی از فاز بخار، توسط (لین و همکاران<sup>۱</sup>) گزارش شده است [۳۹]. بررسی تصاویر سه بعدی میکروسکوپ الکترونی نشان می‌دهد که مورفولوژی نانوساختارهای اکسید روی، به شدت وابسته به درجه‌ی حرارت رشد است. مورفولوژی لایه‌های بزرگ گرافن با دستگاه SEM اندازه‌گیری شد، در شکل ((۳-۸) (a))، مناطق تک و چند لایه نشان داده شده است. ساختار مرز لایه‌های گرافن رشد داده شده بر روی نانوساختارهای اکسید روی، به عنوان مناطق روشن نشان داده شده در شکل ((۳-۸) (b)) مشاهده می‌شود. نانوسیم‌های به دست آمده توسط رسوب از فاز بخار فیزیکی و شیمیایی، عموماً با کیفیت بلوری خوب و مهمتر از آن طول مناسب هستند (بیشتر آنها در مورفولوژی نانوتسمه هستند) (پنگ و همکاران<sup>۲</sup> 2011) [۴۰]

<sup>۱</sup> Lin *et al*

<sup>۲</sup> Peng *et al*



شکل ۳-۸: تصویر SEM لایه نشانی به روش CVD لایه‌ی گرافن به روی زیرلایه‌ی  $\text{SiO}_2$  b: تصویر SEM نانو ذرات اکسید روی بر روی زیرلایه‌ی گرافن به روش CVD

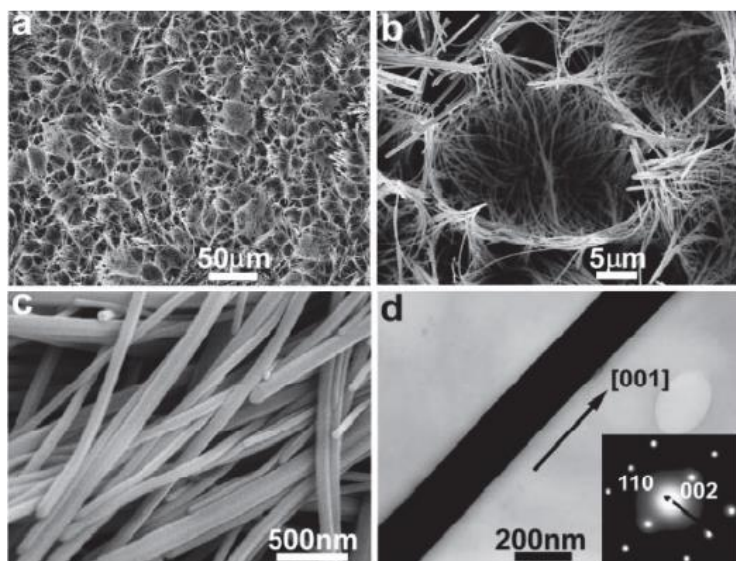
فنگ و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۰۶). نانوالیاف اکسید روی را به روش هیدرو ترمال بر روی یک آرایه‌ی متراکم و در یک بستر روی، در مخلوطی از محلول آمونیاک / الکل / آب سنتز کرده اند. قابل ذکر است، نانوالیاف اکسید روی به دست آمده با قطر (۳-۱۰ نانومتر) و با طول  $\sim 500$  نانومتر هستند. این اولین باری بوده است که نانوالیاف نازک اکسید روی از روش هیدروترمال در غیاب کاتالیزور و در دمای نسبتاً پایین به دست آمده است [۴۱]. اندازه‌گیری فتولومینسانس در دمای اتاق، شیفت آبی قابل توجهی، در نزدیکی لبه نوارگسیل در  $373$  نانومتر ( $3/32eV$ )، نشان داده است، که آن را به حد کوانتومی ناشی از کاهش اندازه‌ی نانو الیاف نازک اکسید روی، می‌توان نسبت داد. سپس آن‌ها در مقیاس بزرگ، به سنتز هیدروترمال نانوسیم‌های بسیار دراز اکسید روی و آرایه‌ی نانوتمسه با الگوی لانه زنبوری، با اکسیداسیون سطحی ساده از فویل روی در محلول‌های آبی  $\text{NaOH}$  و  $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$  در دمای  $150^\circ\text{C}$  دست یافتند (لو و همکاران<sup>۲</sup> ۲۰۰۶) [۴۲].

از این محلول، برای ساخت نانو ساختارهای اکسید روی یک بعدی با مورفولوژی و ریز الگوی کنترل شده استفاده کردند و نیز به راحتی می‌توان با تغییر مقیاس، آن را به نانوساختارهای یک بعدی اکسیدهای دیگر تعمیم داد. همانطور که در (شکل ۳-۸ (a)) نشان داده شده است، یک فیلم نازک در

<sup>۱</sup> Fang *et al*

<sup>۲</sup> Lu *et al*

مقیاس بزرگ، از آرایه‌ی نانوسیم اکسید روی بلند (۲۰-۵۰ میلی متر) با الگوی منحصر به فرد از ساختارهای لانه زنبوری، معمولا در محدوده‌ی ۱۰ تا ۳۰ میلی متر به روی فویل روی، که از غوطه‌وری آن در محلول آبی  $0.4\text{ M NaOH}$  و  $0.095\text{ M (NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$  در دمای  $150^\circ\text{C}$  به روش هیدروترمال، به مدت دو روز به دست آمده است. (شکل (۳-۸) (b))، تصویر بزرگنمایی شده‌ی ساختار لانه زنبوری را نشان می‌دهد که از دو طرف نانوسیم‌ها با هم برخورد دارند. قطر نانو سیم‌های بدست آمده در حدود ۶۰-۲۰۰ نانومتر اندازه‌گیری شده اند (شکل (۳-۸) (c)). و الگوی پراش الکترونی (ED) نانو سیم‌ها، نشان دهنده‌ی رشد نانو سیم‌ها حول محور c است (شکل (۳-۸) (d)) تصاویر مشابه رشد نانوسیم‌های به دست آمده در دمای اتاق توسط (پنگ و همکاران<sup>۱</sup> ۲۰۱۱) است.



شکل ۳-۹: (a) SEM تصویر، آرایه‌های نانوسیم روی اکسید) (b) و (c) تصاویر SEM و (d) تصویر TEM، آرایه‌های نانوسیم روی اکسید رشد داده شده به روش هیدروترمال بروی فویل روی به مدت ۲ روز در دمای  $150^\circ\text{C}$

جیسون و ایری<sup>۲</sup>، رشد آرایه متراکم از نانوسیم اکسید روی به طول ۸ میکرون و با قطر ۱۰۰ نانومتر به روش رسوب از حمام شیمیایی به منظور بررسی اثر مورفولوژی نیمه رسانا بر عملکرد DSSC، نشان

<sup>۱</sup> Peng et al

<sup>۲</sup> Jason and Eray



دادند. با افزایش طول نانوسیم، میزان بازدهی سلول خورشیدی تا نسبت ابعاد ۷۰ نانومتر افزایش می یابد. سلول های خورشیدی رنگدانه ای ساخته شده با نانوسیم، ولتاژ مدار باز بالاتری نسبت به سلول های نانوذرات اکسید روی، نشان می دهند که نشان دهنده ی بهبود انتقال الکترون است. سلول های ترکیبی نانوسیم و نانوذرات، به وسیله ی افزایش به دام اندازی نور، توسط جذب سطحی نور توسط نانوذرات و در نهایت حمل و نقل سریع تر الکترون در بین نانو سیم ها، باعث افزایش بازدهی سلول خورشیدی می شوند. حمل و نقل سریع تر بار، اجازه می دهد تا قدرت انتخاب بیشتری در انتخاب زوج های ریداکس و مواد حامل حفره داشته باشیم و به تبع آن سلول های خورشیدی رنگدانه ای کارآمد و قوی تری بسازیم [۴۳] (باکستر و آیدیل<sup>۱</sup> ۲۰۰۵).

### ۲-۳-۳ نانو میله اکسید روی

یکی از مهمترین عوامل محدود کننده در عملکرد سلول خورشیدی رنگدانه ای، انتقال الکترون است. الکترون در طول پیمایش خود به فتوالکتروود، برآورد شده است که از ۱۰۳-۱۰۶ نانوذره عبور می کند. [۴۴] (برایان و مایکل<sup>۲</sup> ۱۹۹۱). ساختار نامنظم فیلم نانوذرات، منجر به افزایش پراکندگی از الکترون های آزاد، باعث کاهش تحرک الکترون و در نتیجه باز ترکیب الکترون به خصوص در مرزدانه بین نانوذرات خواهد شد. (بنکشتاین و همکاران<sup>۳</sup> ۲۰۰۳) [۴۵]. جایگزینی فیلم نانوذرات با آرایه ای از نانومیله های تک کریستالی، با انتقال الکترون بهتر، افزایش بازدهی بالاتری را نشان می دهد. مسیر ارائه شده توسط این نانومیله ها، منجر به جمع آوری سریع حامل های تولید شده در سلول در طی مسیر مستقیم، از نقطه تولید حامل ها، به بستر زیرلایه ی رسانا می شود. این خود تا حد زیادی باعث کاهش تلفات باز ترکیب الکترونی، در فرایند انتقال الکترون در مرزدانه ها می شود. علاوه بر این، انتظار می رود انتقال الکترون در نانو میله ی کریستالی، چندین برابر سریعتر از نفوذ در بین یک شبکه ی

<sup>۱</sup> Baxter and Aydil

<sup>۲</sup> Brian and Michael

<sup>۳</sup> Benkstein *et al*

بلوری نامنظم و تصادفی باشد [۴۶] (مایکل ۲۰۰۰).

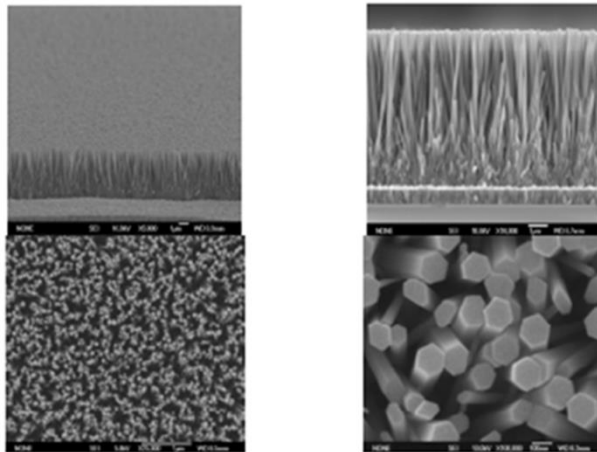
### ۱-۲-۳-۳ سنتز نانو میله اکسید روی

(پاچاری و سوسومو<sup>۲</sup>، ۲۰۰۶) آرایه‌ای از نانومیله‌های اکسید روی را به روش شیمیایی بر روی زیرلایه‌ی FTO سنتز کرده‌اند. این یک روش دو مرحله‌ای است که؛ محلول روی استات بر روی زیرلایه‌ها بوسیله‌ی روش لایه نشانی اسپینی ریخته می‌شود و پس از آن لایه‌ها خشک شده و جهت تشکیل بذر نانوبلورها بر روی زیرلایه، باز پخت می‌شوند. در مرحله دوم، آرایه‌ی عمودی نانو میله‌ی اکسید روی، به‌روی نانوبلورهای زیرلایه، با غوطه‌ور کردن بسترها، در پیش محلول حاوی  $Zn(NO_3)_2$  و  $NaOH$  ۰/۸M در  $110^\circ C$  با فواصل زمانی مختلف رشد داده می‌شوند [۴۷].

ساختار بلورین نمونه‌ها، توسط پراش پرتوی X (RIGAKURINT, XRD ۲۱۰۰) و ساختار مواد آماده شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM, JSM JEOL-۶۵۰۰ FE) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. سلول‌های خورشیدی حساس به رنگ برای اندازه‌گیری‌های فتوولتائیک با خیساندن الکتروکسید روی در محلول رنگ روتنیوم ۰/۳ mM (Solaronix, N719) در T- بوتانول / استونیتریل آماده شدند. این الکترودها با استونیتریل شسته شدند، سپس خشک شدند و بلافاصله برای اندازه‌گیری خواص فتوولتائیک استفاده شدند. الکترولیت از ۰/۶M دی‌متیل یدید پروپیل ایمیدازولیوم و لیتیوم یدید ۰/۱ M (LiI) و یدید  $I_2$  ۰/۰۵M، ۰/۵M، ۴- ترت بوتیل در استونیتریل تشکیل شده بود. (شکل ۳-۱۰)، تصویر SEM آرایه‌ی نانو میله‌ی اکسید روی بر روی FTO، و نیز سطح مقطع عرضی آرایه‌ی نانومیله‌های اکسید روی با این روش رشد را نشان می‌دهد [۴۸].

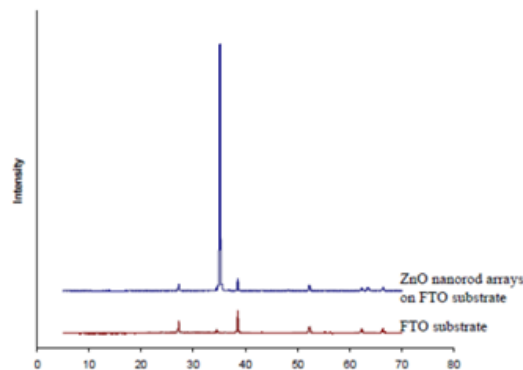
<sup>۱</sup> Michael

<sup>۲</sup> Patcharee and Susumu



شکل ۳-۱۰: تصاویر SEM نانومیله‌ی اکسید روی به روی زیرلایه‌ی FTO از جهات مختلف و با بزرگنمایی

الگوی XRD نمونه‌ها در (شکل ۳-۱۱)، نشان داده شده است. که نشان دهنده‌ی شدت پیک در جهت (۰۰۲) نانو ساختار ورتزایت اکسید روی است، که به طور قابل توجهی بزرگ است و قله‌های پراش دیگر کریستال ناپدید شده و یا بسیار ضعیف است. که نشان دهنده‌ی نانومیله‌های اکسید روی از طریق افزایش طول، در امتداد محور c عمود به بستر شکل گرفته اند.



شکل ۳-۱۱: الگوی XRD آرایه‌ی نانومیله‌ی اکسید روی بر روی زیرلایه‌ی FTO

اخیرا، بر روی رشد آرایه‌ی نانو میله‌ی اکسید روی، بر روی زیر لایه‌ی شیشه‌ای FTO، کارهایی انجام شده است. اما در این نوع ساختار به دلیل متفاوت بودن جنس مواد فتوالکتروود و لایه‌ی اکسید رسانای شفاف (TCO)، بین آنها عدم تجانس سطوح میانی وجود دارد. که باعث ایجاد منبعی برای

پراکندگی الکترون می‌شود. چن و همکاران<sup>۱</sup>، طراحی سلول خورشیدی رنگدانه‌ای جدیدی با رشد نانو میله‌های اکسید روی به روی یک فیلم اکسید روی به عنوان جایگزین لایه‌ی FTO، را بررسی کردند. ZnO، به دلیل گاف نواری ۳/۴eV، ماده‌ی خوبی برای TCO است. از این رو، در محدوده‌ی طیف مرئی، شفاف است. ساختار آنها توسط یک فرآیند دو مرحله‌ای رشد کرده بود. فیلم اکسید روی با آلایش گالیم، در ابتدا در یک بستر رشد داده شدند و پس از آن نانومیله‌های ZnO در بالای این فیلم رشد داده شدند. این ساختار باعث حذف ناهمگونی بین فیلم TCO و نانومیله‌ها می‌شود. بازدهی سلول خورشیدی ۰/۷۷٪ در سال ۲۰۱۱ به دست آمد. مشابه این کار، توسط (تابتیمت و همکاران)<sup>۲</sup> انجام شده است، که در آن اکسید روی آلاییده با ایندیم به عنوان یک بستر بذری، برای رشد نانومیله‌های ZnO مورد استفاده قرار گرفت [۴۹].

### ۳-۳-۳ نانولوله‌های اکسید روی

تفاوت نانولوله با نانو سیم در اینست که نانولوله‌ها معمولاً دارای یک ساختار با حفره‌ی توخالی هستند. آرایه‌ای از نانولوله‌ها، دارای تخلخل بالا است و ممکن است یک سطح بزرگتر از آن، به شکل نانوسیم درآید. سنتز آرایه‌های نانولوله‌ی اکسید روی را می‌توان با استفاده از روش اصلاح رشد آبی نانوسیم‌های اکسید روی در دماهای پایین به دست آورد. بازدهی تبدیل ۲/۳٪ برای DSSC‌های با آرایه‌های نانولوله‌ی اکسید روی، با قطر نانولوله‌ی در حدود ۵۰۰ nm و تراکم ۵/۴-۱۰۶ در سانتی متر مربع گزارش شده است. آرایه‌های نانو لوله‌ی اکسید روی را همچنین می‌توان توسط پوشش دهی غشای اکسید آلومینیوم آندی (AAO) از طریق رسوبدهی لایه‌ی اتمی (ALD) آماده کرد. با این حال، بازدهی تبدیل نسبتاً پایین ۱/۶٪، عمدتاً به دلیل زبری متوسط غشاء تجاری شده است [۵۰] (ژانگ و همکاران<sup>۳</sup> ۲۰۰۹).

<sup>۱</sup> Chen *et al*

<sup>۲</sup> Tubtimtae *et al*

<sup>۳</sup> Zhang *et al*

### ۴-۳-۳ نانو تیپ‌های اکسید روی

با استفاده از (MOCVD) روش رسوب شیمیایی فاز بخار فلزی آلی، آرایه ی نانو تیپ اکسید روی با طول‌های مختلف را می‌توان سنتز کرد. در مطالعات قبلی (چن و همکاران ۲۰۰۸)، به عملکرد سلول ساخته شده از این نانو تیپ‌ها پرداخته شده است. نتایج، موید این است که بازدهی سلول‌ها، با افزایش طول نانو تیپ اکسید روی، به وسیله‌ی افزایش مساحت فیلم فتوالکتروود، افزایش یافته است. آن‌ها بازدهی تبدیل ۰/۵۵٪، را برای نانو تیپ اکسید روی به طول ۳/۲ میلی متر، به دست آوردند. هم‌اکنون، بازدهی تبدیل انرژی خورشیدی نانو تیپ‌های اکسید روی، با اندازه‌ی ذرات مشابه با نانو ذرات تیتانیوم دی اکسید، تحت تابش نور خورشید بیشتر شده است که نشان دهنده‌ی انتقال الکترون بالاتر توسط نانوتیپ‌های اکسید روی است. که پایداری بیشتر سلول خورشیدی نانو تیپ در شدت‌های بیشتر را نشان می‌دهد. همچنین بر روی افزایش بازدهی تبدیل خورشیدی نانو تیپ اکسید روی با آرایه‌ی اکسید روی آلاییده با گالیم به عنوان لایه‌ی اکسید رسانای شفاف، نشان داده شده است که بازدهی تبدیل می‌تواند به ۰/۷۷٪ برسد [۵۰] (ژانگ و همکاران ۲۰۰۹).

### ۵-۳-۳ نانو ساختارهای دیگر اکسید روی

نانوساختارهای اکسید روی با مورفولوژی‌های دیگر، مانند نانوصفحات، نانوتسمه‌ها و نانوچهارپره‌ها، برای ساخت سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای به کار رفته‌اند و از سطح بزرگ آنها به منظور بهبود عملکرد سلول، بهره برداری شده است. با این حال در این نانوساختارها، سطح مقطع موثر سلول، تنها عامل موثر در تعیین بازدهی فتوولتائیک آنها، تعیین نشده است. در این سلول‌ها، عملکرد سلول به طور قابل توجهی به ساختار هندسی فیلم فتوالکتروود بستگی دارد که ویژگی‌هایی مثل انتقال الکترون و یا انتشار نور را تحت تاثیر قرار داده است. [۵۰] (ژانگ و همکاران، ۲۰۰۹).

### ۱-۵-۳-۳ نانوصفحات اکسید روی

نانوصفحات اکسید روی، ساختارهای شبه دو بعدی هستند که می‌توان آنها را به وسیله‌ی فرآیند

رشد هیدروترمال ساخت. (سلیمان و همکاران<sup>۱</sup> ۲۰۰۷) [۵۱]. فیلمی با نانو صفحات اکسید روی، با بازدهی نسبتاً کم ۱/۵۵٪، که احتمالاً به دلیل سطح داخلی ناکافی بوده است، (شکل (۳-۱۲) (a)) تهیه کرده‌اند. نانو صفحات کروی اکسید روی (شکل (۳-۱۲) (b))، که به روش هیدروترمال با استفاده از اسید اگزالیک به عنوان عامل پوششی تهیه شده، به علت افزایش قابل توجه سطح داخلی، به بازدهی تبدیل ۲/۶۱٪ (اختر و همکاران<sup>۲</sup> ۲۰۰۸) رسیده است [۵۲]. برای نانوصفات کروی، عملکرد سلول‌های خورشیدی با درجه‌ی بالایی از تبلور و در نتیجه‌ی مقاومت کم آنها، به انتقال الکترون، کمک خواهد کرد [۵۰] (ژانگ و همکاران ۲۰۰۹).

### ۳-۳-۵-۲ نانو تسمه‌های اکسید روی

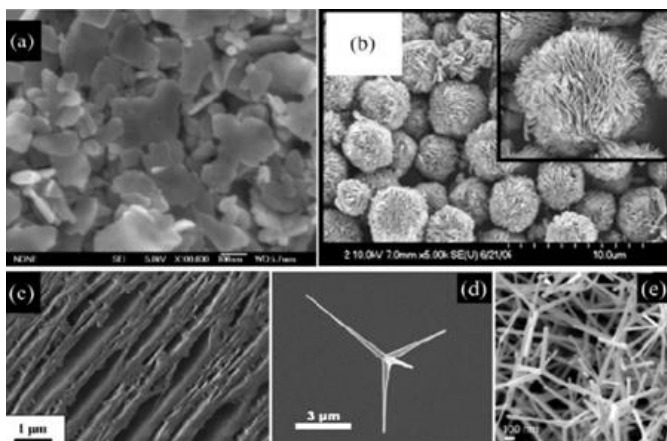
ژانگ و همکاران (۲۰۰۹) فیلم اکسید روی با آرایه‌ی نانو تسمه‌ای را از روش آبکاری برای کاربردهای سلول خورشیدی، آماده کردند. در ساخت این نانوتسمه‌ها، ستیل تریپلی اگسیتیلن به عنوان سورفاکتانت، به الکترولیت اضافه شد؛ (به عنوان عامل کاهش دهنده‌ی کشش سطحی مایعات). آرایه‌ی نانو تسمه‌ی اکسید روی، یک ساختار نواری بسیار متخلخل (شکل (۳-۱۲) (c)) با ضخامت ۵ نانومتر است و یک نمونه با ناحیه‌ی سطحی  $70 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ ، و بازدهی فتوولتائیک آنها، به حدود ۲/۶٪ رسیده است [۵۰].

### ۳-۳-۵-۳ نانو چهارپره‌های اکسید روی

اکسید روی چهارپره‌ای، با ساختار سه بعدی، از چهار بازو تشکیل شده که از یک هسته مشترک کشیده شده‌اند (شکل (۳-۱۲) (d)). طول بازوها، می‌تواند در گستره‌ای از ۱-۲۰ mm تنظیم شود، در حالی که قطر آن‌ها می‌تواند با تغییر درجه‌ی حرارت بستر و نیز تنظیم فشار جزئی اکسیژن در طول رسوب از فاز بخار، بین ۱۰۰ nm تا ۲ mm تنظیم شود.

<sup>۱</sup> Suliman et al

<sup>۲</sup> Akhtar et al



شکل ۳-۱۲: تصاویر SEM لایه‌های اکسید روی. a: نانوصفحات دیسپرس شده. b: نانوصفحات کروی شکل c: آرایه‌ی نانوتسمه‌ی اکسید روی e و d: آرایه‌های چهارپره‌ای اکسید روی

نانو چهارپره‌های متصل به هم را می‌توان برای تشکیل یک شبکه‌ی متخلخل با سطح ویژه‌ی بزرگ (شکل (۳-۱۲) (e)) تشکیل داد. فیلم‌های تشکیل شده با چهارپره‌های اکسید روی استفاده شده در سلول‌های رنگدانه‌ای، به بازدهی تبدیل ۱/۲-۳/۲۷٪ رسیده‌اند. سطح داخلی فیلم نانو چهارپره با ترکیب با نانوذرات ZnO، افزایش می‌یابد، که منجر به بهبود قابل توجهی در عملکرد سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای خواهد شد [۵۰] (ژانگ و همکاران ۲۰۰۹).

### ۴-۳ مروری بر مقالات سنتز و ساخت سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای

#### براساس نانو میله‌های اکسید روی

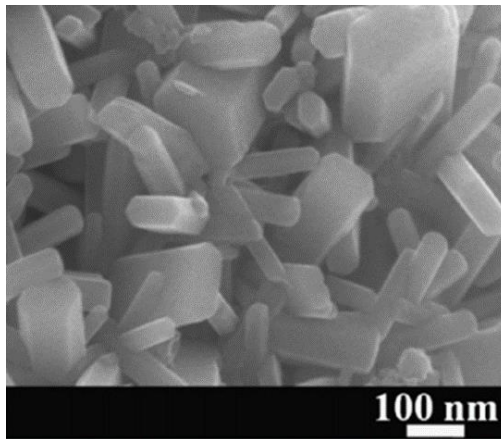
۳-۴-۱ رشد، ویژگی‌ها و سلول‌های خورشیدی حساس به رنگ با استفاده از نانومیله‌های اکسید روی رشد داده شده توسط فرایند محلول حرارتی دما پایین

در این مقاله، (الحجری و همکاران<sup>۱</sup> ۲۰۰۹)، نانومیله‌های کوچک اکسید روی با ساختار شش ضلعی، را از طریق فرایند محلول آبی در مقیاس بزرگ، با استفاده از نیترات روی به عنوان یک منبع یون روی در دمای پایین، تحت فرایند هم‌زدن رشد دادند. خواص نانومیله‌های شش ضلعی اکسید

<sup>۱</sup> Al-Hajry et al

روی از نظر ساختاری، خواص اپتیکی و فتوولتائیک خود بررسی شدند.

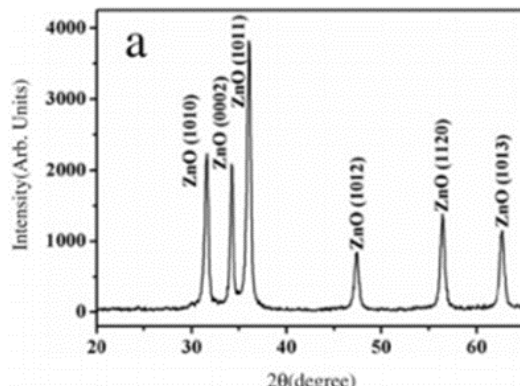
برای تهیهی محلول، جهت سنتز نانو میله‌ی اکسید روی،  $[Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O]$  (Aldrich) و  $NaOH$  (Aldrich) مورد استفاده قرار گرفتند. از حلال اتانول برای تهیه محلول استفاده شده است و سپس برای تهیهی نانو پودر به دست آمده، محلول را چند بار، با آب و اتانول به طور مجزا سانتریفیوژ کردند [۵۳].



شکل ۳-۱۳: تصویر FESEM ، نانو میله های اکسید روی سنتز شده به روش محلول حرارتی دما پایین

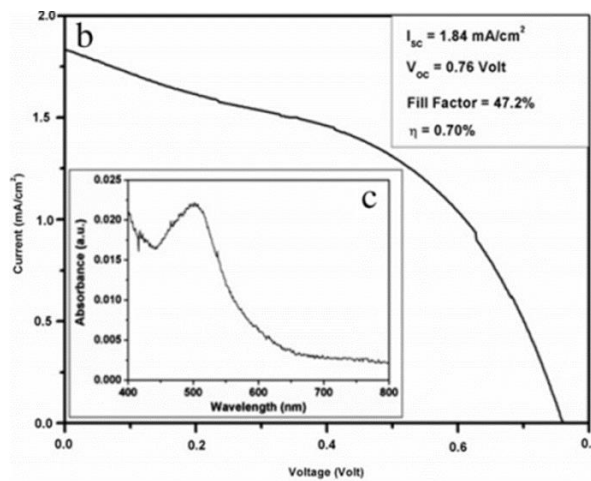
سپس برای تهیهی خمیر نانو پودر اکسید روی، برای لایه نشانی به روش دکتر بلید با استفاده از پلی اتیلن گلیکول به عنوان مادهی ایجاد کنندهی چسبندگی خمیر، خمیر را آماده کردند و سپس به روش دکتر بلید، سلول خورشیدی رنگدانه ای تهیه شده با خمیر نانو میله‌ی اکسید روی را بر روی زیرلایه ی FTO و با رنگدانه ی N719 به عنوان حساس کننده به مدت ۱۸ ساعت در دمای اتاق و الکتروود شمارشگر پلاتین آماده کردند.





شکل ۳-۱۴: تصویر آنالیز XRD، آرایه های نانو میله اکسید روی رشد داده شده به روش رشد از محلول آبی

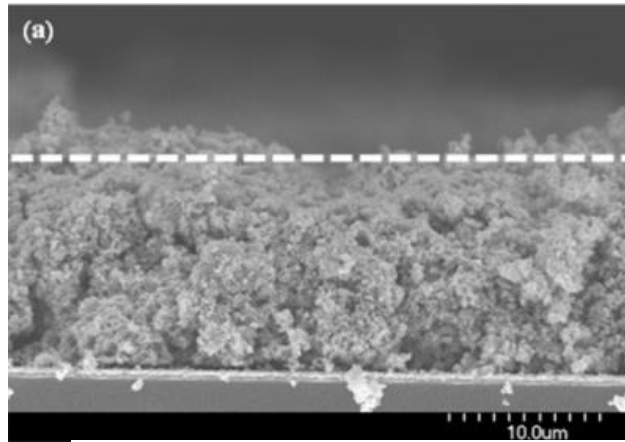
آن ها سلول نهایی را به ابعاد  $0.25\text{cm}^2 \times (0.5\text{cm} \times 0.5\text{cm})$  آماده کردند. آنالیز سلول های ساخته شده مثل منحنی جریان-ولتاژ (شکل ۳-۱۵) تحت تابش  $1000\text{W/m}^2$  و با الکتروود مرجع سیلیکونی به دست آمدند .



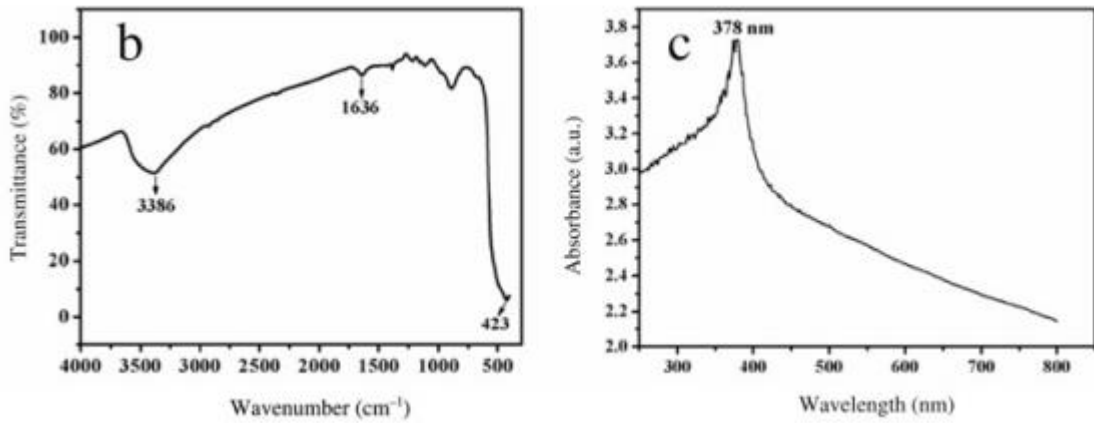
شکل ۳-۱۵: منحنی جریان-ولتاژ آرایه های نانومیله ی اکسید روی رشد به روش محلول آبی

همچنین آنالیز XRD و نیزطیف عبوری و جذبی هگزاگونال نانومیله های اکسید روی در شکل

( ۳-۱۷) نشان داده شده اند. و تصویر SEM آنها در ( شکل ۳-۱۶) نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۶: تصویر SEM سطح مقطع عرضی نانو میله های اکسید روی



شکل ۳-۱۷: طیف جذبی و عبوری آرایه های نانو میله ی رشد داده شده به روش رشد از محلول آبی

همچنین پارامترهای فتوولتائیک سلول، در جدول (۳-۲)، نشان داده شده اند.

جدول ۳-۲: پارامترهای فتوولتائیک سلول خورشیدی رنگدانه ای ساخته شده با نانومیله های اکسید روی

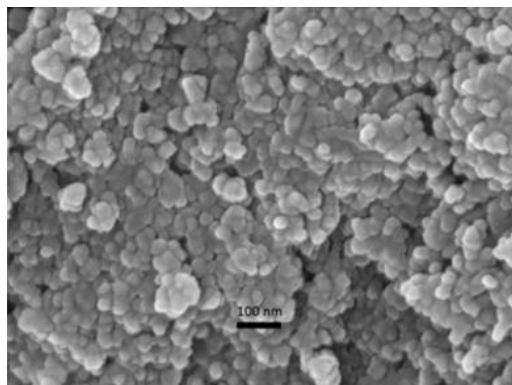
	جذب نور ( $\text{mol}/\text{cm}^2$ )	$V_{oc}$	$J_{sc}$ ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )	FF(%)	$\eta$ (%)
سلول نانو میله ی اکسیدروی	$1.67 \times 10^{-8}$	۰/۷۶	۱/۸۴	۴۷/۲	۰/۷۰

۲-۴-۳ مقایسه‌ی رنگ‌های مصنوعی به عنوان رنگ حساس کننده برای سلول

### خورشیدی رنگدانه‌ای

در این مقاله، (امال و همکاران<sup>۱</sup> ۲۰۱۵) در ابتدا پودر نانو میله‌ی اکسید روی را سنتز کردند و در نهایت سلول خورشیدی رنگدانه‌ای، ساخته شده و بین منحنی جریان-ولتاژ سلول‌های ساخته شده با ۸ رنگ مصنوعی به عنوان حساس کننده، مقایسه‌ای انجام دادند. در ابتدا برای سنتز نانو ذرات اکسید روی در pH ۱۲، ۲/۲ گرم زینک استات دی هیدرات را در ۵۰ ml متانول حل کردند و محلول ۰/۲ M، بعد از ۱۲ ساعت هم زدن مداوم آماده کردند. پودر نهایی، بعد از سانتریفیوژ و حذف یونهای ناخواسته، به وسیله‌ی شستشو با آب و اتانول و سپس خشک سازی، به دست آمده است. آنالیز پراش پرتو X، از زاویه ۱۰ تا ۱۰۰ درجه بررسی گردید و سپس اندازه‌ی ذرات پودر با استفاده از رابطه‌ی دبی شرر، تقریباً ۱۲ nm محاسبه گردید.

ثابت های شبکه، تقریباً  $[a = b = 3.253(0)^\circ \text{A}$  و  $c = 5.213(4)^\circ \text{A}$ ، به دست آمده اند. و در نهایت آنالیز طیف جذبی UV با رنگ های مختلف، بررسی و پیک های به دست آمده مقایسه شدند [۵۴].

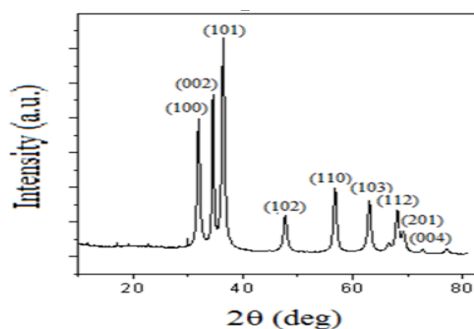


شکل ۳-۱۸: تصویر SEM نانو پودر اکسید روی در مقیاس ۱۰۰ nm در pH ۱۲

برای آماده سازی سلول خورشیدی رنگدانه‌ای، شیشه‌های اکسید رسانای شفاف FTO، بعد از

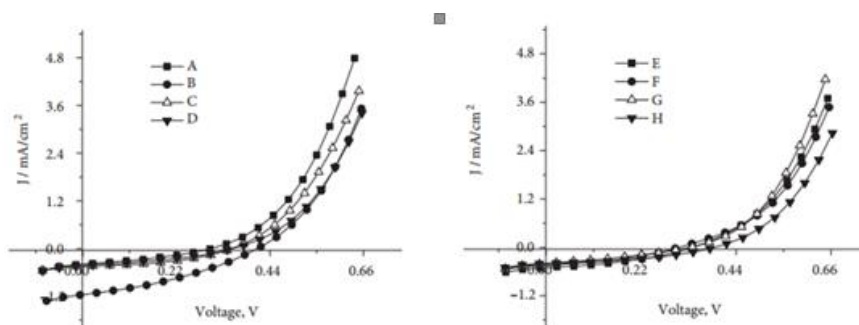
<sup>۱</sup> Emal et al

برش به ابعاد دلخواه و شستشو به مدت ۵ دقیقه در حمام التراسونیک با آب و اتانول و بعد از خشک سازی آماده شدند. در نهایت با تهیهی خمیر نانو پودر اکسید روی با استفاده از پلی اتیلن گلیکول، سلول خورشیدی با ناحیهی فعال  $0.25 \text{ cm}^2$ ، بر روی شیشهی FTO به روش دکتر بلید لایه نشانی شدند.



شکل ۳-۱۹: تصویر طیف پراش پرتو X نانو پودر اکسید روی در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد و در PH ۱۲

محلول‌های رنگ با اضافه کردن محلول  $0.000491 \text{ M}$  از رنگ به 20ml اتانول تهیه شدند. محلول‌های رنگ به مدت ۱ روز در دمای اتاق باقی ماندند. سپس دو الکتروود با الکترولیت یدید، با هم ساندویچ شدند. سلول حساس شده با رنگ eosin Y، بهترین عملکرد را در مقایسه با ۷ رنگ دیگر، از خود نشان دادند. ( $J_{sc} = 1.16 \text{ mA/cm}^2$ ,  $V_{oc} = 0.408 \text{ V}$ ,  $FF = 0.32$ , and  $\eta = 0.15$ ).



شکل ۳-۲۰: نمودار جریان-ولتاژ سلول‌های خورشیدی ساخته شده با رنگ‌های مختلف

پارامترهای فتوولتائیک سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای با رنگ‌های مختلف در جدول (۳-۳)، نشان داده شده‌اند.

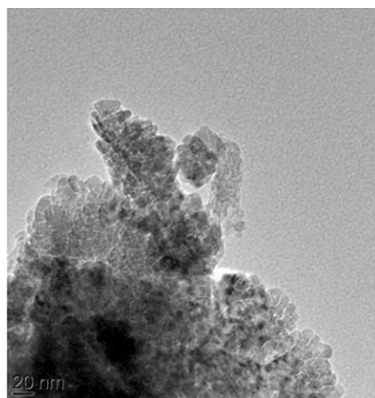
جدول ۳-۳: پارامترهای فتوولتائیک سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای با رنگ‌های مختلف

Chemical dye	$\lambda_{max}$ (nm)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (V)	$FF$ (%)	$\eta$ (%)
Eosin Y	522	1.16	0.408	32	0.15
Alcian blue	626, 672	0.37	0.300	34	0.038
Crystal violet	588	0.61	0.304	31	0.057
Carbol fuchsin	552	0.54	0.345	45	0.080
Fast green	619.8	0.47	0.341	30	0.047
Bromophenol	430	0.48	0.384	38	0.071
Methyl orange	362, 444	0.48	0.302	40	0.058
Aniline blue	624.8	0.48	0.343	42	0.071

در مرحله‌ی بعد، اثر دمای زینتر بر روی سلول ساخته شده از نانو میله‌ی اکسید روی به روش دکتر بلید، در دماهای °C (۲۵۰، ۵۰۰، ۴۵۰، ۴۰۰، ۳۵۰، ۳۰۰ و ۶۰۰) به مدت ۴۰ دقیقه بررسی شدند. از آنجاییکه، ZnO بین ۳۰۰ تا ۱۰۰۰°C، قابلیت بازپخت دارد. چون نقطه‌ی ذوب آن ۱۹۷۵°C است. همچنین برای حساس سازی از رنگ eosin Y، که بیشترین بازده را در مرحله‌ی قبل به خود اختصاص داده، استفاده شد. بررسی منحنی جریان-ولتاژ، نشان دهنده‌ی بیشترین بازده برای سلولی با دمای بازپخت ۴۵۰°C است. پارامترهای فتوولتائیک سلول‌های ساخته شده در دماهای مختلف زینتر در جدول ۳-۴ نشان داده شده است.

جدول ۳-۴: پارامترهای فتوولتائیک سلول‌های ساخته شده در دماهای مختلف بازپخت [۵۴]

Temperature (°C)	250	300	350	400	450	500	600
$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	0.46	0.62	1.14	0.56	1.33	0.60	0.74
$V_{oc}$ (V)	0.380	0.340	0.370	0.380	0.411	0.355	0.360



شکل ۳-۲۱: تصویر SEM نانو پودر اکسید روی در مقیاس ۲۰ nm در PH ۱۲ [۵۴]

### ۳-۵ برخی از روش‌های رشد نانو ساختارهای دی‌اکسید تیتانیوم ، اکسید روی

جهت رشد نانو ساختارهای اکسید روی و دی اکسید تیتانیوم، روش‌های لایه نشانی متفاوتی مانند رشد از فاز بخار شیمیایی (CVD)، رشد از فاز بخار فیزیکی (PVD) ، سل - ژل ، هیدروترمال و .. استفاده می شود . در ادامه به توضیح مختصر، راجع به برخی از روش‌های رشد نانو ساختارها می‌پردازیم .

#### ۳-۵-۱ رشد نانو ساختارها از فاز بخار

یکی از روش‌های شیمیایی رشد نانو ساختارها، رشد از فاز بخار است . که می‌توان به دو گروه رشد از فاز بخار فیزیکی و رشد از فاز بخار شیمیایی دسته بندی کرد . در فرآیندهای شیمیایی رشد از فاز بخار ، ترکیبات اکسیژن دار ، نیتروژن دار یا هالیدهای نیمرسانا تبخیر می شوند و در اثر واکنش شیمیایی در محیط گازی، منجر به تولید نانو ساختارها با مورفولوژی‌های مختلف می شوند ، اما در رشد از فاز بخار فیزیکی، اساس فرآیند رشد نانو ساختار، از روش فیزیکی می باشد و هیچ واکنش شیمیایی صورت نمی‌گیرد .

#### ۳-۵-۱-۱ رشد از فاز بخار فیزیکی

در این روش فلز یا آلیاژ در محفظه خلاء با فشار تقریباً ۱۰ تور به شیوه‌های مختلف تبخیر شده و به سمت زیرلایه حرکت می‌کند و در انتها بر روی آن متراکم می‌گردد. از ویژگی‌های مثبت این روش می‌توان به سرعت پوشش‌دهی بالای آن اشاره کرد. یکی از محدودیت‌های این روش عدم کاربرد آن برای مواد با نقطه ذوب بالا و همچنین سرامیک‌ها است. همچنین به دلیل استفاده از دمای پایین در مقایسه با سایر روش‌ها، انرژی جنبشی برای ایجاد چسبندگی مناسب بین زیرلایه و لایه نازک کافی نیست. در این روش ماده‌ی پوششی به روش‌های مختلفی مانند گرم کردن به روش مقاومتی، توسط پرتو الکترونی و یا گرم کردن قوسی و القایی افزایش دما پیدا می‌کند تا نهایتاً تبخیر گردد.

### ۲-۱-۵-۳ رشد از فاز بخار شیمیایی

رشد از فاز بخار شیمیایی یکی از روش‌های پرکاربرد برای رشد نانوساختارها، مخصوصاً نانوساختارهای تک بعدی به شمار می‌آید. در طول این فرآیند، مواد در حالت بخار از طریق تراکم و واکنش شیمیایی در محیط گازی، به حالت جامد برگشته و روی یک زیر لایه، لایه نشانی می‌شوند. به طور کلی فرایند رشد از فاز بخار شیمیایی در غالب‌های مختلف، انجام می‌شوند که این فرآیندها عموماً در تهیه بخار ماده‌ی اولیه و روش‌هایی که باعث می‌شود واکنش شیمیایی آغاز شوند متفاوت می‌باشند. در اینجا به توضیح مختصری در مورد برخی روش‌های رسوب دهی از فاز بخار شیمیایی می‌پردازیم.

### ۳-۱-۵-۳ رسوب دهی از فاز بخار شیمیایی حرارتی (Thermal CVD)

CVD شامل جریان گاز یا گازهای پیش ماده در یک محفظه است. در محفظه فوق یک یا چند سطح گرم که قرار است پوشش دهی شوند، وجود دارد. در این روش واکنش‌های شیمیایی بر روی (و یا در نزدیکی) سطوح داغ رخ می‌دهد. در نتیجه رسوب به صورت یک فیلم نازک بر روی سطح به وجود می‌آید. این فرآیند منجر به تولید مواد شیمیایی می‌شود. همچنین مواد زائد و محصولات جانبی نیز بوجود می‌آیند که از محفظه، همراه با گازهای پیش ماده که واکنش نداده اند خارج می‌شود. رسوب دهی به طور معمول در دماهای حدود ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد انجام می‌پذیرد. برخلاف رسوب دهی فیزیکی فاز بخار (PVD) که فرایندهایی مانند تبخیر، پراکنش و تصعید را شامل می‌شود، روش CVD دربرگیرنده تغییرات (واکنش‌های) شیمیایی در پیش ماده (یا بین پیش ماده‌ها) است. در این روش رشد، انتقال ماده‌ی اولیه به فاز گازی از طریق حرارت دهی مستقیم آن صورت می‌پذیرد، سپس این گاز با گاز فعال مورد نیاز واکنش داده تا محصول مورد نظر به دست آید [۵۵].

انتقال بخار ترکیبات به وجود آمده، توسط گازهای خنثی مانده آرگون و یا هلیوم انجام می‌شود. بخار ترکیبات اولیه در دمای کوره تجزیه شده و توسط واکنش با گاز فعال جوانه زنی شروع می‌شود.

هدایت جوانه‌ها توسط گاز حامل به سمت زیر لایه در قسمت سرد کوره باعث به وجود آمدن رسوب نانوساختار مورد نظر بر روی زیر لایه می‌شود. در این روش عوامل مختلفی نظیر نوع ماده‌ی اولیه ، نوع و شار گاز فعال ، دمای کوره، نسبت حجمی گاز واکنش‌گر به گاز خنثی ، فشار درون کوره ، نوع و دمای زیرلایه و غیره بر مشخصات و نوع ساختارهای ایجاد شده موثر می‌باشند .

### ۳-۵-۱-۴ رسوب دهی شیمیایی بخار آلی فلزی (MOCVD)

CVD روشی است که در آن به طور ساده جریان گازهای پیش ماده در یک محفظه از روی بستری که قرار است پوشش‌دهی شود، عبور می‌کند. در این روش واکنش‌های شیمیایی بر روی (و یا در نزدیکی) سطوح داغ رخ می‌دهد. در نتیجه رسوب لایه به صورت یک فیلم نازک بر روی سطح به وجود می‌آید. این فرآیند منجر به تولید مواد شیمیایی می‌شود. رسوب دهی شیمیایی بخار به صورت آلی-فلزی، یک فرآیند تخصصی و نسبتاً جدید از CVD می‌باشد. برای اولین بار در دهه ی ۱۹۶۰ از این روش برای رسوب دهی ایندیم فسفید (InP) و ایندیم آنتیمونید (InSb) استفاده شد. روش MOCVD عبارت از رشد لایه نازک از ترکیبات نیمه‌رسانا بر بستر است که براساس تخریب حرارتی همزمان مخلوطی از پیش ماده‌های آلی-فلزی اتفاق می‌افتد. به طور کلی نیمه رساناهای ترکیبی-III-V و II-VI با کیفیت بالای مورد استفاده برای تجهیزات اپتوالکترونیکی می‌توانند با این روش تهیه شوند. نیمه رساناهای ترکیبی گروه III-V به طور ویژه برای ساخت لیزرها، دیودهای منتشر کننده نور و آشکارسازهای نوری به کار می‌روند و نیمه رساناهای ترکیبی II-VI در آشکارسازهای مادون قرمز دور و تابش کننده‌های مرئی آبی رنگ کاربرد دارند. سرعت حرکت الکترون در این ترکیبات در مقایسه با هم‌تای سنتی خود یعنی Si بالاتر است و بر این مبنا تجهیزات الکترونیکی با فرکانس بالا قابلیت تولید خواهند داشت. همین امر است که منجر به ارتقای اهمیت روش MOCVD برای تشکیل لایه‌های همبافته از این نیمه رساناها می‌شود. لذا محصول این فرآیند معمولاً یک فیلم تک‌بلور است. در روش MOCVD ، معمولاً از یک هیدرید فلزمانند ،  $(AsH_3)$  و یک پیش ماده‌ی آلی فلزی (مثل



آلکیل فلز) استفاده می‌شود. ترکیبات آلی-فلزی ترکیباتی هستند که در آن‌ها اتم یک عنصر فلزی به یک یا چند اتم کربن یا یک گروه هیدروکربن آلی متصل است. بسیاری از عناصر مورد استفاده در MOCVD فلزات گروه‌های IIA، IIB، IIIB، IVB، VB و VIB هستند که غیر واسطه می‌باشند. در تعریف کلی، ترکیبات آلی-فلزی دارای پیوند کربن-فلز می‌باشند اما در کل بسیاری از ترکیبات مورد استفاده می‌توانند شامل پیوند های فلز-اکسیژن (M-O)، فلز-نیتروژن (M-N) و حتی هیدریدهای فلزی (M-H) نیز باشد. ترکیبات آلی-فلزی بوجود آمده از هالیدها و کربونیل‌ها، پیش‌ماده‌های هستند که برای رسوب‌دهی فلزات واسطه (گروه‌های VA، IVA، VA و VIA) و ترکیبات آنها به‌کار می‌روند. هرچند عبارت آلی-فلزی به‌طور کلی در فرآیند رسوب‌دهی شیمیایی بخار استفاده می‌شود، در آن از ترکیبات عناصری مانند سیلیکون، فسفر، آرسنیک، سلنیم و تلوریم (شبه فلزات و نافلزات) نیز استفاده می‌شود. به بیان دیگر می‌توان از این روش برای رسوب‌دهی ترکیبات غیر فلزی نیز بهره برد [۵۶].

### ۲-۵-۳ رشد نانو ساختارها به روش رسوب محلول

اولین و متداول‌ترین روش برای تولید نانوذرات از محلول‌های کلوییدی (بر پایه واکنش‌های شیمیایی بین اجزای محلول و قطع واکنش در زمان معین)، روش رسوب از محلول‌های کلوییدی می‌باشد. در این روش سیستم متفرق شده از حالت مایع کلوییدی با رسوب خوشه‌ها از ترکیبات غیر آلی از محلول‌های شیمیایی، به حالت جامد نانوبلوری تبدیل می‌شود. برتری اصلی فرآیندهای محلول، توانایی فشرده کردن نانوذرات (به خصوص با مولکول‌های آلی برای تهیه عاملیت نانوذرات) می‌باشد که با کنترل شکل و اندازه، پایداری این نانوذرات را بهبود می‌بخشد. از مهم‌ترین فرآیندهای محلول می‌توان به فرآیندهای هیدروترمال و سل-ژل اشاره کرد.

### ۱-۲-۵-۳ فرآیند رشد هیدروترمال

هیدروترمال به عنوان روشی بر پایه‌ی شکل‌گیری و رشد کریستال‌ها در اثر واکنش‌های شیمیایی

و تغییرات قابلیت انحلال مواد در یک محلول آبی تحت دما و فشار مناسب شناخته می‌شود. در گذشته سنتز هیدروترمال در دما و فشار بالا و بیشتر در حالت بحرانی صورت می‌گرفت، اما امروزه با شناخت حلال‌های مناسب برای هر واکنش و با کمک روش‌های جدید انرژی‌دهی به سیستم (مانند استفاده از امواج ماکرو و یا میدان‌های مغناطیسی) این روش در دما و فشارهای پایین‌تر نیز استفاده می‌شود.

به طور کلی، در این روش ابتدا واکنش‌دهنده‌ها در حلال مناسب حل می‌شوند. در صورت نیاز برای حل شدن یا توزیع بهتر پیش ماده‌ها در محلول، از امواج اولتراسونیک استفاده می‌شود. سپس محلول مواد اولیه درون اتوکلاو ریخته شده و اصطلاحاً مهر و موم می‌شود. سپس اتوکلاو حاوی محلول واکنش‌دهنده‌ها، تا دمای مناسب حرارت‌دهی می‌شود. در اثر این حرارت‌دهی فشار درون اتوکلاو بالا رفته و شرایط مناسب برای واکنش پیش‌ماده‌ها فراهم می‌شود. پس از گذشت زمان کافی برای انجام واکنش شیمیایی درون اتوکلاو، حرارت‌دهی متوقف شده، محصولات از درون آن بیرون آمده و در صورت نیاز برای خشک یا کلسینه شدن حرارت‌دهی می‌شوند. مزایای روش هیدروترمال بازدهی بالا، کنترل‌پذیری مطلوب، آسان بودن روش، تولید محصول با توزیع اندازه یکنواخت، مصرف انرژی کم‌تر، آسیب‌رسانی کم‌تر به محیط زیست است [۵۷].

### ۳-۲-۵-۲ روش سل-ژل

بطور کلی سل عبارت است از مخلوطی کلوئیدی که ذرات جامد آن بصورت معلق در مایع قرار دارند. کلوئید نیز مخلوطی است که ماده توزیع شده در آن بسیار کوچک (۱-۱۰۰ نانومتر) است. بین ذرات موجود در کلوئید نیروی ضعیف و کوتاه بردی وجود دارد که باعث حرکت براونی و تصادفی ذرات در محلول می‌شود. ژل، ساختار پیوسته‌ای از مولکول‌های بزرگ آلی-فلزی است که حالت الاستیک دارد. ژل یک حالت بین مایع و جامد است که شکل خود را حفظ می‌کند.

روش سل-ژل از دو مرحله هیدرولیز و متراکم سازی تشکیل شده است. مواد اولیه‌ای که در این

فرآیند استفاده می‌شوند، معمولاً آلیکوکسیدهای فلزات مورد نظر هستند. برای نمونه برای تولید آلومینا از آلیکوکسیدهای آلومینیوم ( $(OC_4H_9)_3Al$ ) به عنوان ماده‌ی اولیه استفاده می‌شود. آلیکوکسیدهای فلزی به راحتی با آب واکنش می‌دهند. از آنجا که یون هیدروکسیل به اتم فلز متصل می‌شود، واکنش مورد نظر هیدرولیز نامیده می‌شود. ممکن است واکنش هیدرولیز به طور کامل انجام نشود، به طوریکه فلز به صورت جزئی هیدرولیز شود. در این شرایط، دو مولکول هیدرولیز شده به صورت جزئی با هم ترکیب شده و آب و الکل تولید می‌شوند. پس از انجام مرحله هیدرولیز، در مرحله متراکم سازی این مولکول‌های شکل گرفته آلی-فلزی به مرور زمان بزرگ می‌شوند تا اینکه به حد ماکروسکوپی می‌رسند. این مولکول‌ها آنقدر بزرگ هستند که به صورت اسکلت جامد در داخل مایع درمی‌آیند. این ساختار پیوسته که حالت الاستیک دارد، به ژل مرسوم است [۵۸].

### ۳-۶ روش‌های مشخصه‌یابی نانو ساختارها

پس از مرحله رشد نانو ساختارها مهم ترین مرحله، مشخصه‌یابی ساختارهای رشد داده شده و بررسی خواص ساختاری، الکتریکی و اپتیکی ساختارها به منظور تعیین خواص بهینه برای بکارگیری در قطعات کاربردی است. در این بخش به بررسی چند نمونه از روش‌های مشخصه‌یابی می‌پردازیم.

#### ۳-۶-۱ میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

میکروسکوپ الکترونی روبشی که به آن Scanning Electron Microscope، یا به اختصار SEM گویند یکی از ابزارهای مورد استفاده در فناوری نانو است که با کمک بمباران الکترونی تصاویر اجسامی به کوچکی ۱۰ نانومتر را برای مطالعه تهیه می‌کند. ساخت SEM سبب شد تا محققان بتوانند نمونه‌های بزرگتر را به سادگی و با وضوح بیشتر مطالعه کنند. بمباران نمونه سبب می‌شود تا الکترون‌هایی از نمونه به سمت صفحه دارای بار مثبت رها شود که این الکترون‌ها در آنجا تبدیل به سیگنال می‌شوند. حرکت پرتو بر روی نمونه، مجموعه‌ای از سیگنال‌ها را فراهم می‌کند که بر این اساس میکروسکوپ می‌تواند تصویری از سطح نمونه را بر صفحه کامپیوتر نمایش دهد. SEM،

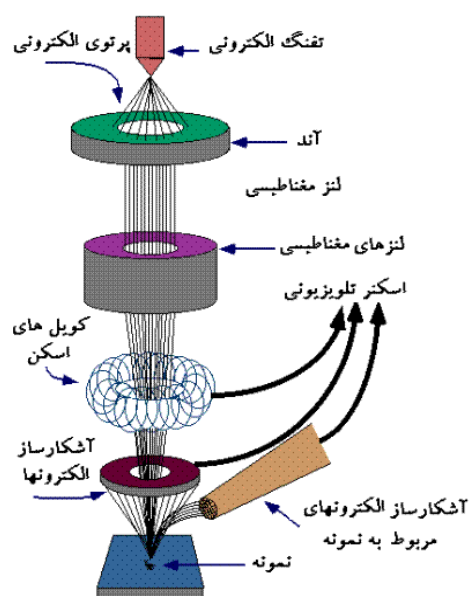
اطلاعات زیر را در خصوص نمونه در اختیار می‌گذارد [۵۹]:

- توپوگرافی نمونه: خصوصیات سطوح
  - مورفولوژی: شکل، اندازه و نحوه قرارگیری ذرات در سطح جسم
  - ترکیب: اجزایی که نمونه را می‌سازند.
- SEM، وسیله‌ای است که به کمک آن می‌توان تصویر بزرگتر از نمونه را با کمک الکترون‌ها (به جای نور) خلق کرد. پرتویی از الکترون‌ها با کمک تفنگ الکترونی میکروسکوپ تولید می‌شود. پرتوی الکترونی در خلاء به صورت عمودی از میکروسکوپ عبور می‌کند. سپس با عبور از میدان‌های الکترومغناطیسی و لنزهای ویژه به صورت متمرکز به نمونه تابانده می‌شوند. به محض برخورد پرتو با نمونه، الکترون‌ها و اشعه‌های ایکس از نمونه خارج می‌شوند.



شکل ۳-۲۲: نحوه ی برخورد الکترون‌های دستگاه SEM با نمونه

سپس آشکارسازهای پرتوهای ایکس، الکترون‌های اولیه و الکترون‌های ناشی از برخورد الکترون‌های اولیه با جسم را جمع‌آوری می‌کنند و آنها را به سیگنال تبدیل کرده و به صفحه نمایش (مانند صفحه تلویزیون) منتقل می‌کنند و به این طریق تصویر نهایی تهیه می‌شود [۶۰].



شکل ۳-۲۳: شماتیک دستگاه SEM

### ۲-۶-۳ طیف پراش پرتو ایکس (XRD)

روش پراش پرتوی ایکس برای درک ویژگی‌های ساختاری مواد، و دست یافتن به اطلاعاتی مثل فاز یا ساختار کریستالی، پارامترهای شبکه، اندازه بلوری، جهت گیری تک کریستال‌ها، جهت گیری ترجیحی پلی کریستال‌ها، نواقص و کرنش‌ها استفاده می‌شود. این روش برای انواع فیلم‌های نازک، حجمی و نانومواد قابل استفاده است. در مورد نانوساختارها، تغییر در پارامترهای شبکه اطلاعاتی در مورد میزان کرنش درون فیلم نانو ساختار، ارائه می‌دهد. در XRD، یک دسته پرتوی موازی تک رنگ از اشعه X، به نمونه تابیده می‌شود. با توجه به شکل (۳-۲۷)، برای مجموعه‌ای معین از صفحات شبکه، همراه با فاصله‌ی بین صفحه‌ای d شرایطی که پراش رخ خواهد داد با استفاده از قوانین براگ تعیین می‌شود:

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad (۱-۳)$$

در فرمول (۱-۳)،  $d_{hkl}$  فاصله‌ی بین صفحات موازی در راستای hkl،  $\lambda$  طول موج پرتو ایکس، n مرتبه‌ی پراش پرتوی X و  $\theta$  زاویه‌ی براگ است.

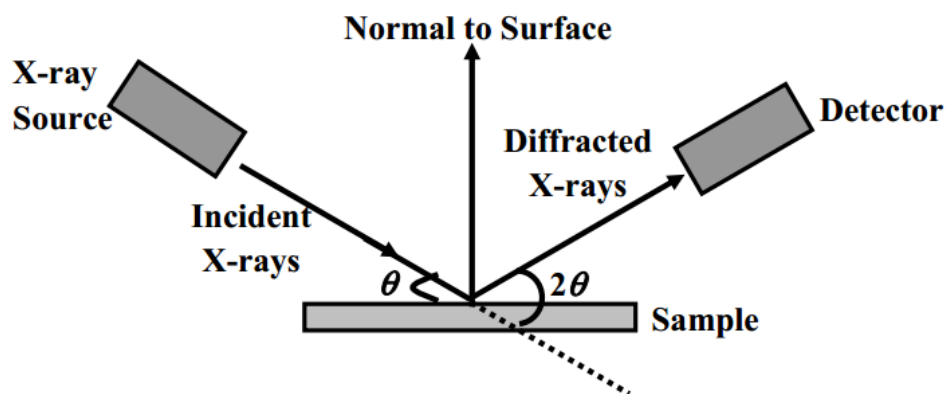
اکنون با معلوم شدن  $d$  و با استفاده از رابطه ی (۲-۳)، که برای ساختارهای شش گوشه است، می توان  $a$  و  $c$  ثابت های شبکه مورد نظر را یافت .

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{4}{3} \left[ \frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right] + \frac{l^2}{c^2} \quad (۲-۳)$$

علاوه بر این اگر اندازه ی نانوذرات در محدوده ی دانه های بلوری باشد می توان از رابطه ی شرر ، اندازه ی متوسط ذرات را نیز تخمین زد .

$$D = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (۳-۳)$$

که در رابطه ی فوق،  $\lambda$  طول موج پرتوی ایکس و  $\beta$ ، بزرگی تمام پهنا در نیمه ی بیشینه (FWHM) و  $\theta$  زاویه پراش براگ است . با توجه به معادله ی شرر با کاهش اندازه ی دانه ها، پهنای پیک افزایش می یابد [۶۱] .



شکل ۳-۲۴: شماتیک دستگاه XRD

فصل چهارم:

آزمایشات انجام شده (نتیج و بحث)

## مقدمه:

در این فصل، ابتدا به بررسی روش ساخت و مشخصه یابی لایه‌ی نازک اکسید رسانای شفاف FTO، که به روش اسپری پایرولیز سنتز شده اند می‌پردازیم. پس از آن به بررسی روش سنتز نانو پودر اکسید روی که به روش شیمیایی رشد از محلول در دمای پایین<sup>1</sup> (LTS)، سنتز شده اند، می‌پردازیم و روش ساخت خمیر نانو میله‌ی اکسید روی با پلیمر PEG(400)، را بررسی کرده و در نهایت به بررسی روش ساخت و مشخصه‌یابی سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای ساخته شده با استفاده از خمیر نانو میله‌ی اکسید روی و نانو پودر دی اکسید تیتانیوم به روش دکتر بلید، خواهیم پرداخت.

### ۱-۱-۴ ساخت و مشخصه‌یابی اکسید رسانای شفاف FTO

جدول ۱-۴: شرایط دستگاه اسپری

۲۰	حجم محلول اسپری (CC)
۲/۵	فشار گاز حامل (atm)
۵	آهنگ لایه نشانی (ml/min)
۳۵	ارتفاع نازل تا زیر لایه (cm)
۵۰۰	دمای زیر لایه (°C)

### ۲-۱-۴ روش آماده سازی محلول اسپری

نمونه‌ی a: جهت آماده سازی FTO از محلول آبی  $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  و  $\text{NH}_4\text{F}$  (۹۹.۹۹٪)، ابتدا مقدار کافی پودر  $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  در 20ml اتانول مرک و در دمای اتاق حل گردید. پس از حل شدن کامل پودر  $\text{SnCl}_2$ ، پودر  $\text{NH}_4\text{F}$  کم کم و به آرامی به محلول اضافه شد و در نهایت بعد از شفاف شدن محلول، از چند قطره HCl به عنوان پایدارکننده استفاده گردید. برای جلوگیری از وجود پودرهای ناخواسته درون محلول، چند ساعت محلول را به صورت ساکن گذاشته تا پودرهای حل نشده در

<sup>1</sup> low-temperature solution process



صورت وجود در داخل محلول ته نشین شود و بعد از این مدت ظرف محلول را عوض کرده تا محلول صاف و یکدستی داشته باشیم.

نمونه‌ی b: جهت آماده سازی FTO از  $\text{SnCl}_4$  و HF، محلول  $\text{SnCl}_4$  را در 20ml اتانول مرک حل کرده و برای مدت ۳ ساعت، تا زمانی که محلول شفاف‌ی به دست آید؛ توسط هیتر مگنت هم زده و سپس با اضافه کردن محلول (۴۵-۴۰٪) HF، محلول را به مدت ۱ ساعت دیگر هم زده تا زمانی که محلول کاملاً شفاف‌ی حاصل گردد. همچنین در شیوه‌ی تناوبی تمام ترکیبات را با هم اضافه کرده و برای مدت ۲ ساعت در یک حمام اولتراسونیک هم زده تا محلول کاملاً شفاف‌ی بدست آید.

در هر دو شیوه باید به مدت ۱۲-۲۴ ساعت، محلول هم زده شود تا برای اسپری آماده شود. هر دو محلول، تحت شرایط دستگاهی مندرج در جدول (۴-۱) و به طور جداگانه توسط دستگاه اسپری پایرولیز مدل SCS-90 شکل (۴-۱)، بر روی زیرلایه‌ی شیشه‌ای لایه نشانی شدند.

شفافیت نمونه‌ها توسط دستگاه UV-Visible (شیمادزو 1800 - UV) و رسانایی آنها توسط دستگاه چهار پروب (RM3-AR 4- Point Probe Jandel) اندازه گیری شد و پس از آن ضخامت نمونه‌ها با استفاده از طیف عبوری جهت تحلیل نتایج محاسبه شدند.



شکل ۴-۱: اسپری پایرولیز مدل SCS-90

#### ۱-۲-۱-۴ بررسی خواص الکتریکی نمونه های FTO

مقاومت سطحی نمونه های  $a: \text{SnCl}_2$  و  $b: \text{SnCl}_4$  توسط دستگاه چهار پروب اندازه گیری شد.



شکل ۲-۴: دستگاه چهار پروب مدل (RM3-AR 4- Point Probe Jandel)

$$R_s = 4.532(V/I)$$

معادله (۱-۴)

و سپس مقاومت حجمی لایه ها، محاسبه شدند؛ در معادله ی شماره ی ۲، ضخامت لایه بر حسب سانتی متر در (جدول ۲-۴) قرار داده شده است.

$$\rho = R_s \times t$$

معادله (۲-۴)

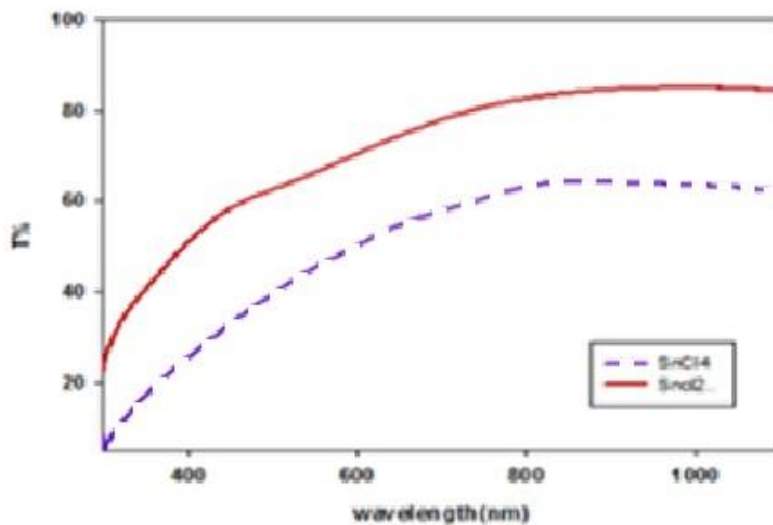
جدول ۲-۴ : پارامترهای مقاومتی زیرلایه های FTO

نمونه	$R_s (\Omega)$	$\rho (\times 10^{-4} \Omega \text{cm})$	t(nm)
A	۳۴/۷۴	۷/۸	۲۲۵
B	۷/۰۱	۲/۹	۴۱۵

کم بودن مقاومت در نمونه ی b ، نشانگر نظم بیشتر بلورکها نسبت به نمونه ی شماره a است و این را می توان در نتیجه ی افزایش اندازه ی ذرات دانست که منجر به کم شدن تعداد مرزخانه ها و در نتیجه کاهش پراکندگی آنها دانست و به تبع آن رسانایی افزایش پیدا کرده است.

#### ۲-۲-۱-۴ بررسی خواص اپتیکی

اندازه‌گیری طیف عبوری نمونه‌ی a :  $\text{SnCl}_2$  و b :  $\text{SnCl}_4$  نشان داد که نمونه‌ی a در ناحیه‌ی مرئی، کاملاً شفاف بوده و ماکزیمم عبور آن در طول موج ۶۹۵ نانومتر، تقریباً ۸۰٪ است و نیز ماکزیمم عبور نمونه‌ی b برای طول موج ۶۹۷ نانومتر و ۶۰٪ است. در طول موج ۵۵۰ نانومتر، طیف عبور نمونه‌ی a، ۶۷٪ و برای نمونه‌ی b شفافیت ۴۵٪ را نشان داده است.



شکل ۳-۴: منحنی طیف عبوری  $\text{SnCl}_2$  و  $\text{SnCl}_4$

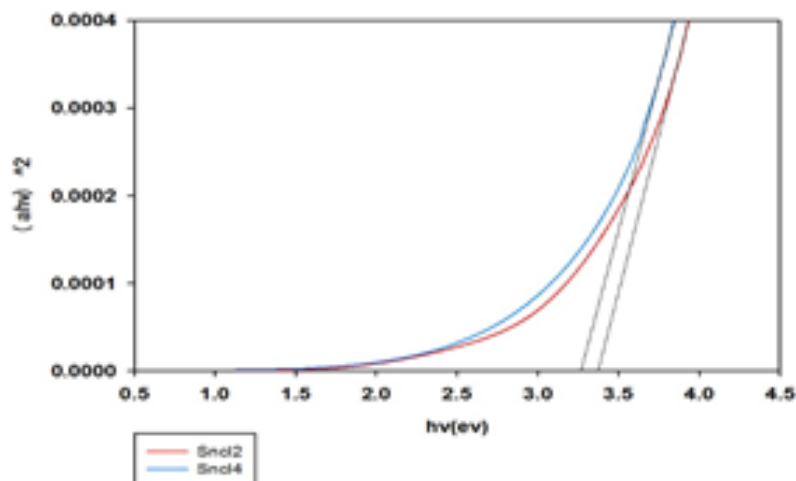
به منظور محاسبه‌ی گاف انرژی لایه‌های نازک از رابطه‌ی ضریب جذب بر حسب گاف انرژی از

معادله‌ی

$$\alpha h\nu = A (h\nu - E_g)^n \quad (3-4)$$

استفاده شد که در آن A مقداری ثابت،  $h\nu$  انرژی فوتون،  $E_g$  انرژی گاف نواری و n مقداری ثابت

بوده و که در اینجا گاف نواری FTOها، مستقیم و n مساوی 1/2 است.



شکل ۴-۴: تعیین گاف انرژی لایه‌های نازک  $FTO$  با  $SnCl_2$  و  $SnCl_4$

در شکل (۴-۴)، نمودار  $(\alpha hv)^2$  بر حسب  $hv$  رسم شده است. محل تقاطع امتداد قسمت خطی نمودار با محور انرژی، گاف انرژی را مشخص می‌کند. که برای  $SnCl_2$  حدوداً  $3/4\text{ eV}$  و برای  $SnCl_4$   $3/3\text{ eV}$  تعیین شد.

همچنین با استفاده از دستگاه شبیه ساز خورشیدی شکل (۴-۵)، در شرایط تابشی  $AM1/5$ ، درصد میانگین طیف عبوری نمونه‌ها را در شرایط شبیه سازی شده با طیف خورشید (تمام طول موج ها)، توسط لوکس متر اندازه‌گیری شد.



شکل ۴-۵: شبیه ساز خورشیدی نانو شات

NanoSAT-IIIS

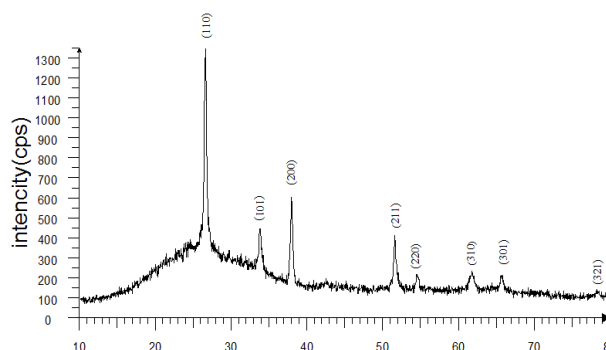
میانگین طیف عبوری نمونه‌ی  $\text{SnCl}_2$  ۷۸/۱۸٪ و برای  $\text{SnCl}_4$ ، ۷۰/۵۸٪ محاسبه شد. که نشان دهنده‌ی مناسب بودن نمونه‌ی  $\text{SnCl}_2$  از نظر شفافیت جهت استفاده در صفحه تماسی در مقابل نور خورشید است.

#### ۳-۲-۱-۴ بررسی خواص ساختاری نمونه های FTO :

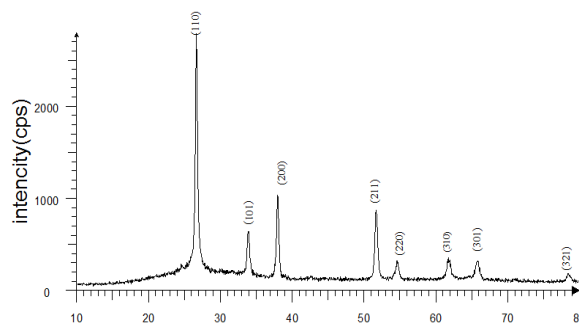
طرح‌های پراش اشعه X با استفاده از پرتو  $\text{CuK}\alpha$  با طول موج ۰/۱۵۴۰۶ نانومتر و زاویه‌ی  $2\theta$  در گستره‌ی ۱۰ تا ۸۰ درجه ثبت شد.

$$D = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (۴-۴)$$

که در آن  $\lambda$  طول موج پرتو X ایکس،  $\theta$  زاویه پراکندگی و  $\beta$  نیم پهنای ماکزیمم (FWHM) است محاسبه شد. مقایسه‌ی پهنای پیک‌های دو نمونه در شکل (۴-۶) و شکل (۴-۷)، نشان داد که هر دو نمونه در راستاهای (۱۰۱)، (۲۰۰)، (۲۱۱)، (۲۲۰)، (۳۱۰)، (۳۰۱) و (۳۲۱) دارای پیک هستند. هر دو نمونه در راستای (۱۱۰)، شدت بیشتری از خود نشان می‌دهند که با توجه به سایز بزرگتر دانه‌ها در راستای (۱۱۰) در  $\text{SnCl}_4$  (۲۳/۸۷ nm)، نسبت به  $\text{SnCl}_2$  (۲۱/۷۸ nm) با استفاده از رابطه‌ی دبای شرر معادله‌ی (۴-۴)، قابل توجیه است.



شکل ۴-۶: طیف XRD نمونه‌ی FTO ساخته شده با پیش ماده‌ی  $\text{SnCl}_2$  : a



شکل ۴-۷: طیف XRD نمونه‌ی FTO ساخته شده با پیش ماده‌ی  $\text{SnCl}_4$  : b

## ۲-۴ سنتز نانو میله‌ی اکسید روی

برای سنتز نانو میله‌های هگزاگونال اکسید روی، در ابتدا ۱/۵ گرم  $[\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}]$  (Aldrich) را در ۱۰۰ ml آب دیونیزه حل کرده و به مدت ۳۰ دقیقه هم زده شد. سپس ۱۰ ml  $\text{NaOH}$  (Aldrich) تحت شرایط هم زدن شدید بصورت قطره قطره اضافه گردید. همزمان محلول تحت دمای  $80^\circ\text{C}$ ، برای مدت زمان ۲-۴ ساعت قرار گرفت.



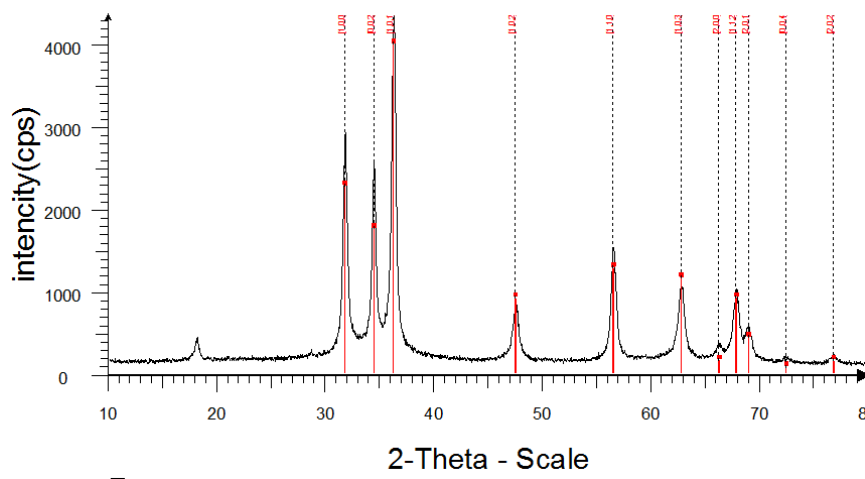
شکل ۴-۸: سانتریفیوژ مدل UNIVERSAL320

بعد از این مرحله یون‌های روی به سرعت رسوب کرده و در نهایت محلول تهیه شده را برای تهیه‌ی پودر نانو میله اکسید روی، ابتدا به وسیله‌ی دستگاه سانتریفیوژ مدل (UNIVERSAL320) شکل (۴-۸) برای ته نشینی کامل پودر نانو میله اکسید روی تحت چرخش ۳۰۰۰ دور بر دقیقه، محلول را سانتریفیوژ کرده و سپس برای حذف یون‌های ناخواسته ابتدا با آب دو بار یونیزه و در نهایت

با اتانول مرک نمونه‌ها شستشو داده شدند. و بعد از شستشوی نهایی با اتانول، لوله‌های آزمایش، جهت خشک‌سازی نهایی در هوای آزاد به مدت دو روز نگهداری شدند.

#### ۱-۲-۴ آنالیز پراش پرتو X (XRD) نانو پودر اکسید روی

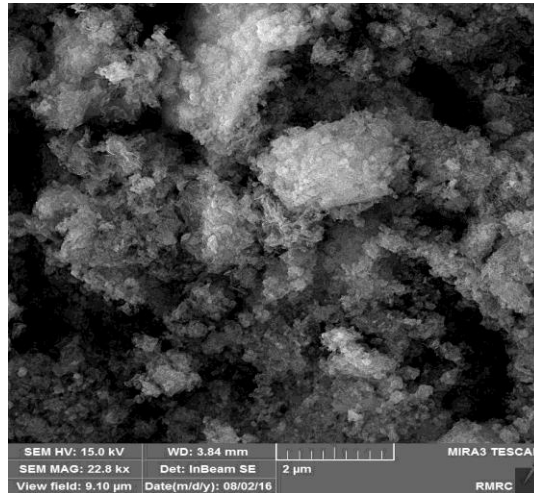
با بررسی طیف پراش پرتو X نانو پودر اکسید روی، مشاهده می‌شود که تمام پیک‌ها بصورت ساختار هگزاگونال تک کریستالی با ثابت‌های شبکه:  $a: 3/25^\circ A$  و  $c: 5/21^\circ A$ ، دارای پیک‌هایی به صورت (۲۰۰)، (۱۰۱)، (۱۰۰)، (۰۰۲)، (۱۰۲)، (۱۱۰) و (۱۰۳) بوده و ماکزیمم پیک در (۱۰۱) دیده می‌شود.



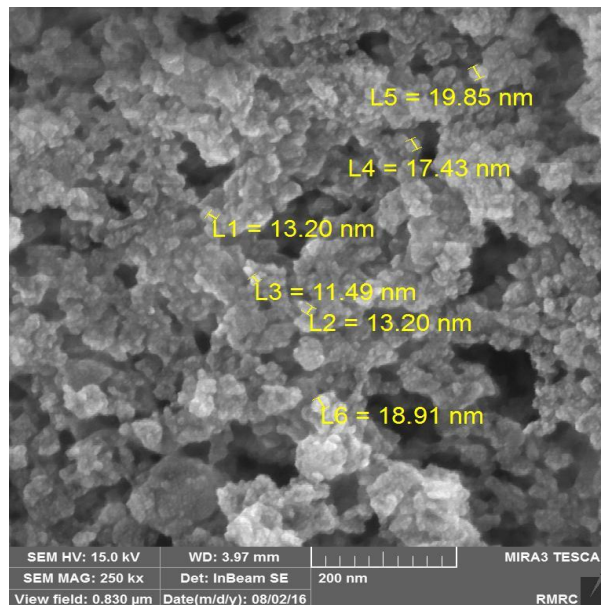
شکل ۴-۹: طیف پراش پرتوی X نانو پودر اکسید روی رشد داده شده به روش (LTS)

#### ۲-۲-۴ آنالیز میکروسکوپ الکترون روبشی FESEM نانو پودر اکسید روی

تصاویر میکروسکوپ الکترون روبشی FESEM نانو پودر اکسید روی، در شکل (۴-۱۰) و (۴-۱۱) در مقیاس ۲ میکرومتر و ۲۰۰nm نشان داده شده‌اند. تصاویر FESEM در مقیاس ۲۰۰nm، ذراتی به ابعاد تقریبی بین ۱۱ تا ۲۰ نانومتر را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۰: تصویر FESEM نانو پودر اکسید روی در مقیاس ۲ میکرومتر



شکل ۴-۱۱: تصویر FESEM نانو پودر اکسید روی در مقیاس ۲۰۰ nm

### ۴-۳ ساخت سلول خورشیدی رنگدانه‌ای با استفاده از پودر نانو میله اکسید

#### روی

#### ۴-۳-۱ ساخت خمیر از پودر نانو میله اکسید روی

#### ۴-۳-۱-۱ انواع پلی اتیلن گلیکول و تفاوت آن‌ها با (PEG400)

پلی اتیلن گلیکول‌ها (PEGs) پلیمرهای تراکمی اتیلن اکساید و آب با فرمول کلی OH

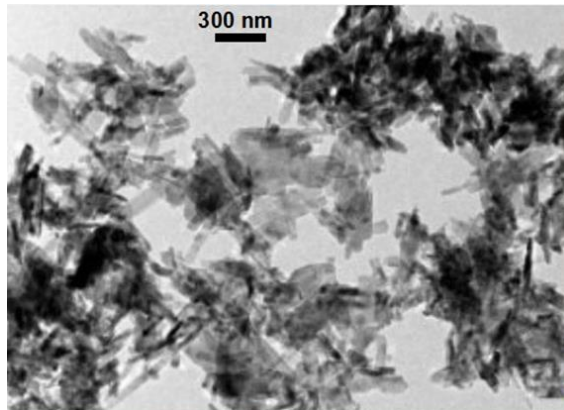


$H(OCH_2CH_2)_n$  می باشد. این پلیمرها مهمترین نوع تجاری پلی اتر ها هستند. ترکیبات با جرم مولکولی پایین (تا ۷۰۰) مایعات بی رنگ، بی بو، ویسکوز با نقطه ذوب حدود  $10^{\circ}C$  - (دی اتیلن گلیکول) بوده در حالیکه ترکیبات پلیمریزه شده با جرم مولکولی بیشتر از ۱۰۰۰ جامدات واکسی شکل با نقطه ذوب تا حدود  $67^{\circ}C$  (برای  $n=180$ ) می باشند. PEG های با جرم مولکولی متفاوت دارای خواص فیزیکی (به عنوان مثال ویسکوزیته) متفاوت بوده و کاربردهای متنوعی دارند، در حالیکه خواص شیمیایی آنها تقریباً شبیه است [۶۴].

عددی که اغلب اوقات در نام PEG ها وجود دارد، نشان دهنده‌ی متوسط جرم مولکولی آنها می باشد، به عنوان مثال PEG با  $n=9$  تقریباً دارای جرم مولکولی ۴۰۰ بوده و با PEG ۴۰۰ علامتگذاری می شود. اغلب پلی اتیلن گلیکول ها شامل مولکولهای با جرم مولکولی متنوع می باشند به عبارت دیگر پلی دیسپرس هستند. PEG ها در آب، متانول، بنزن و دی کلرومتان محلول و در دی اتیل اتر و هگزان نا محلولند. پلی اتیلن گلیکول ها غیرسمی، بی بو، خنثی، روان کننده، غیر فرار و غیر سوزاننده بوده و به طور گسترده در داروسازی به عنوان حلال، عامل پراکنده ساز، پایه پماد، شیاف و ... به کار می رود. همچنین به دلیل غیر سمی بودن و خاصیت چسبندگی آن برای ساخت خمیر لایه نشانی دکتر بلید نیز مورد توجه قرار گرفته است [۶۵].

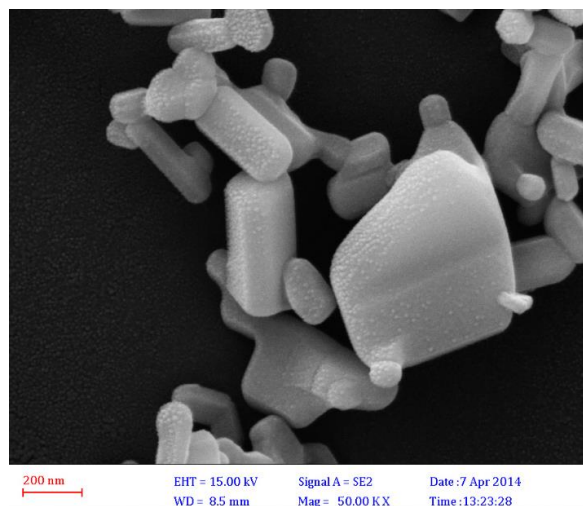
#### ۴-۱-۳-۲ تهیه خمیر نانو میله ی اکسید روی با پلی اتیلن گلیکول (PEG400)

در مقالات مختلف برای تهیه‌ی خمیر نانو پودر ZnO، از PEG با تراکم مولکولی متفاوت PEG(600) و PEG(4000) نیز استفاده شده است که در اینجا از ۴ گرم پودر نانو میله‌ی اکسید روی با اندازه‌ی تقریبی ۸۰-۲۰۰ nm، با خلوص ۹۹.۹٪ استفاده گردید. تصاویر SEM نانو میله‌های اکسید روی استفاده شده برای تهیه‌ی خمیر لایه نشانی، در شکل (۴-۱۲) و (۴-۱۳) نشان داده شده اند.

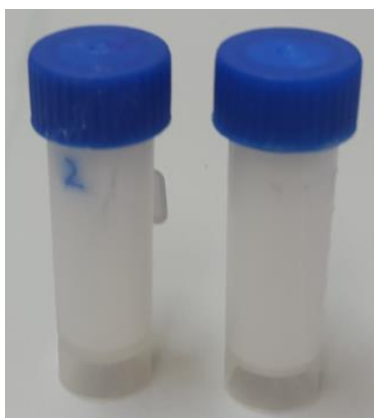


شکل ۴-۱۲: تصویر SEM پودر نانو میله ی اکسید روی با اندازه‌ی تقریبی ذرات ۸۰-۲۰۰ nm

با افزودن 1ml پلی اتیلن گلیکول (PEG(400) به عنوان عامل چسبندگی خمیر، ابتدا پودر نانو میله را درون هاون شکل (۴-۱۵) خیسانده شد و بعد از افزودن ۵ml اتانول برای ایجاد یکنواختی خمیر، به مدت ۲ روز بر روی هیتر مگنت به شدت هم زده شد و در نهایت خمیر آماده شده مطابق شکل (۴-۱۴) برای استفاده به روش دکتر بلید استفاده گردید.



شکل ۴-۱۳: تصویر بزرگنمایی شده ی SEM، نانومیله ی اکسید روی



شکل ۴-۱۴: خمیر نانو میله ی اکسید روی تهیه شده با PEG



شکل ۴-۱۵: خیسانیدن پودر نانومیله در داخل هاون

#### ۲-۳-۴ مراحل ساخت سلول خورشیدی رنگدانه‌ای به روش دکتر بلید

۱. آماده سازی آند

۲. آماده سازی کاتد

۳. بستن سلول خورشیدی (sealing)

۴-۳-۲-۱ آماده سازی آند

#### • برش FTO

برای ساخت سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای، معمولاً از زیرلایه های ITO و FTO استفاده می شود. که ما در اینجا از FTO به عنوان زیرلایه استفاده کرده ایم. در ابتدا زیرلایه های FTO، با سطح فعال  $0.25\text{cm}^2 (0.5\text{cm} \times 0.5\text{cm})$ ، به ابعاد دلخواه که معمولاً  $(1.5\text{cm} \times 1.5\text{cm})$  است برش زده شدند.

#### • شستشوی زیر لایه ی FTO

پس از برش زیرلایه ها، شستشوی زیرلایه ها در چهار مرحله ی زیر و با استفاده از حمام فراصوت از

سمت رسانا انجام شد:

۵ - دقیقه شست و شو با آب و صابون

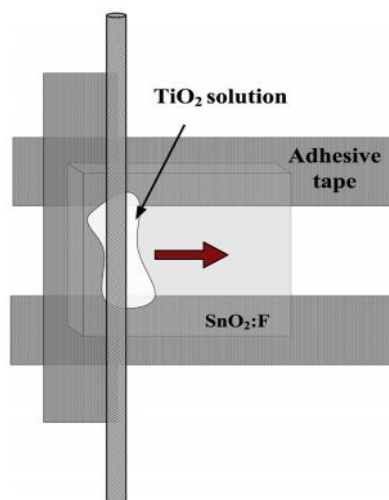
۵ - دقیقه شست و شو با اسید هیدرو کلریک ۰.۱ مولار در اتانول

۵ - دقیقه شست و شو در استون

۵ - دقیقه شست و شو در اتانول مطلق

بعد از اطمینان از تمیزی و نبود آلودگی بر روی سطح اکسید رسانای شفاف (FTO)، زیر لایه‌ها برای استفاده جهت لایه نشانی به روش دکتر بلید آماده هستند.

لایه را بر روی پلیتی قرار داده، سپس به کمک چسب اسکاج (به ضخامت ۵۰ میکرون)، لایه بر روی پلیت ثابت شده و سپس خمیر از یک طرف، بر روی سطح زیرلایه‌ی رسانا قرار داده شد. با استفاده از لام یا میله‌ی شیشه‌ای، خمیر بر روی سطح FTO پخش گردید (شکل ۴-۱۶).

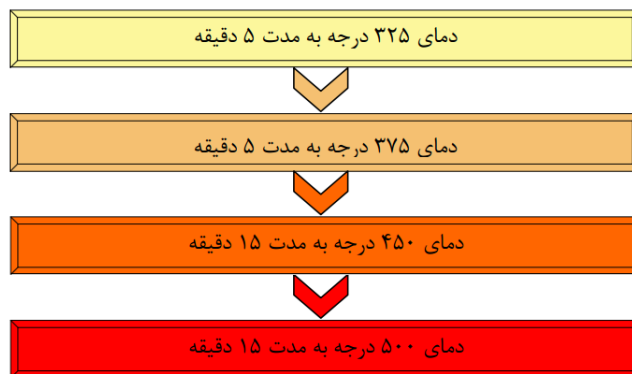


شکل ۴-۱۶: نحوه‌ی کشیدن خمیر لایه نشانی بروی زیر لایه‌ی FTO به روش دکتر بلید

لایه در دمای  $130^\circ\text{C}$ ، به مدت ۵ دقیقه خشک می شود. برای لایه نشانی های بعدی، زیرلایه باید

کاملاً سرد شود. پس از خشک سازی نهایی در دمای  $130^\circ\text{C}$  و قبل از شروع حرارت دهی، چسب

اسکاج باید از سطح جدا شود. به منظور حذف پلیمر اضافه شده به خمیر، باید مطابق با شکل (۴-۱۷) درون کوره حرارت دهی شود.



شکل ۴-۱۷: مراحل حرارت دهی داخل کوره

پس از پایان مراحل بالا، لایه باید به آرامی سرد شود زیرا تغییر دمای سریع میتواند باعث ترک خوردن و جداشدن لایه شود.

- **تراشیدن لایه**

بعد از اتمام زینتر، برای رسیدن به مساحت مورد نظر، با استفاده از یک لامل، اطراف لایه تراشیده می شود.

- **قرار دادن در رنگ**

نمونه در دمای  $80^{\circ}\text{C}$  در رنگ قرار می گیرد و به مدت ۶-۲۴ ساعت در دمای اتاق در محلول رنگ باقی می ماند.

#### ۴-۳-۲ آماده سازی کاتد

- **بریدن و سوراخ کردن FTO**

باید روی الکتروود مقابل یا کاتد یک سوراخ ایجاد شود که از آن برای ریختن الکتروولیت استفاده می شود.

- **شستن**

مراحل شستشوی کاتد، مانند آند است.

#### • لایه نشانی پلاتین

پس از اتمام مراحل شستشو، کاتد به مدت ۱۵ دقیقه در دمای  $500^{\circ}\text{C}$ ، حرارت داده می‌شود. سپس دما را به آرامی پایین آورده تا FTO ترک نخورد. هنگامی که FTO، کاملاً خنک شد، یک قطره از محلول پلاتین روی سطح آن ریخته می‌شود. وقتی پلاتین همه‌ی سطح را پوشاند، در دمای  $500^{\circ}\text{C}$ ، به مدت ۱۵ دقیقه حرارت داده می‌شود.

#### ۳-۲-۳-۴ بستن سلول

برای بستن سلول، جهت آب بندی سلول، ابتدا پلیمری به نام سرلین، به ابعادی کمتر از FTO بریده می‌شود و سپس یک مربع وسط آن خالی می‌گردد تا لایه ی  $TiO_2$ ، داخل آن قرار گیرد. آند را از رنگ بیرون آورده و مدتی در اتانول قرار داده می‌شود، تا رنگ اضافی آن شسته شود. کاتد را که حرارت داده شده و اکنون خنک شده است، از کوره خارج کرده و به ترتیب روی هم قرار می‌گیرند.

سپس بدون آن که آند و کاتد روی هم بلغزند، با استفاده از پلیمر بریده شده و با یک پنس فلزی کاتد و آند را محکم بسته و تحت فشار قرار می‌گیرند و در نهایت، داخل کوره با دمای  $130^{\circ}\text{C}$  به مدت ۵ دقیقه قرار می‌گیرند.

پس از اتصال آند و کاتد و خنک شدن آنها، الکترولیت را از روزنه‌های تعبیه شده بر روی کاتد (معمولاً به قطر  $0/5$  میلی‌متر) بر روی سوراخ ریخته و تحت فرایند خلا قرار داده تا الکترویت به خوبی تمام فضای سلول را پر کند و پوشش دهی خوبی از خود نشان دهد. بعد از این مرحله با قرار دادن یک قطعه لام شیشه‌ای بر روی سلول و بستن آن با پلیمر سرلین، و حرارت دهی نهایی سلول آماده می‌شود.

## ۴-۴ ساخت سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای

### ۴-۴-۱ ساخت سلول خورشیدی رنگدانه‌ای بر مبنای نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم

برای تهیه‌ی این نوع از سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای، از خمیر حاوی ذرات چند صد نانومتری  $\text{TiO}_2$  که در فاز آنا تا ز هستند و با قدرت پراکندگی زیاد نور مرئی قادرند نقش پس-پراکندگی را در سلول خورشیدی رنگدانه‌ای ایفا کنند، استفاده شد.

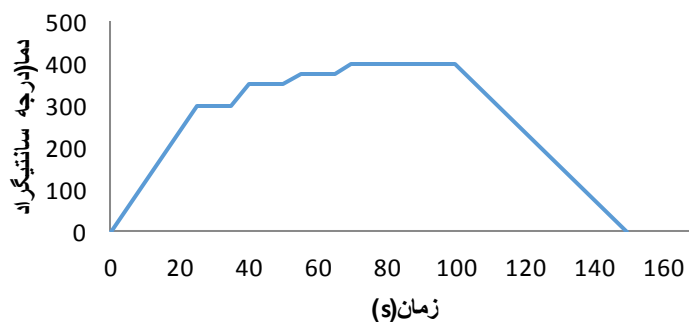
نمونه‌ی اول: ساخت سلول خورشیدی رنگدانه‌ای با استفاده از نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم، طبق مراحل ذکر شده در بخش قبل انجام گردید. بعد از تهیه‌ی محلول تترا کلرید تیتانیوم  $40 \text{ mM}$ ، جهت کم کردن جریان تاریک سلول و بهبود چسبندگی لایه‌ی دی اکسید تیتانیوم مزومتخلخل به زیر لایه، زیر لایه را در دمای  $65^\circ \text{C}$  درون محلول تتراکلرید تیتانیوم، به مدت ۳۰ دقیقه قرار داده شد. پس از خارج کردن زیر لایه از محلول تتراکلرید تیتانیوم، برای تهیه‌ی فتو الکتروود، مقداری از خمیر تهیه شده از نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم، برداشته و بر روی سطح زیر لایه کشیده شد. بعد از حرارت دهی لایه به مدت ۵ دقیقه در دمای  $130^\circ \text{C}$ ، پس از آن لایه تحت حرارت دهی تا دمای  $500^\circ \text{C}$  مطابق با شکل (۴-۱۹)، داخل کوره آذر شکل (۴-۱۸) قرار گرفت.



شکل ۴-۱۸: کوره‌ی جعبه‌ای مدل F11L 1500

با کاهش دمای لایه تا  $80^{\circ}\text{C}$ ، لایه را به ابعاد استاندارد توسط لامل تراشیده و به مدت ۱۸ ساعت در محلول رنگ NY۱۹، قرار داده شد. بعد از گذشت مدت زمان مورد نظر، لایه بوسیله اتانول شستشو داده شد. برای تهیه الکتروود مقابل از جنس نانو ذرات پلاتین، دقیقاً مانند مراحل تهیهی آند عمل کرده با این تفاوت که دیگر عملیات تتراکلرید انجام نمی‌شود. در مرحلهی نهایی، پس از تزریق الکتروولیت یدی سلول بسته شد.

نمونهی دوم: در نمونهی شماره دو الکتروود آند، بعد از تمیز سازی زیرلایهی FTO و اطمینان از عدم وجود آلودگی بر روی زیرلایه، خمیر تیتانیوم دی اکسید به روی زیرلایه، به روش دکتر بلید و با یک تیغه شیشه‌ای به آرامی کشیده شد. زیرلایه را برای مدت ۵ دقیقه، در دمای  $130^{\circ}\text{C}$ ، درون کوره قرار داده و بعد از رسیدن دمای زیرلایه به دمای  $80^{\circ}\text{C}$ ، لایه به ابعاد استاندارد توسط لامل تراشیده شد و به مدت ۱۸ ساعت در محلول رنگ NY۱۹، قرار داده شد. بعد از گذشت مدت زمان مورد نظر، لایه به وسیله اتانول شستشو داده شد.



شکل ۴-۱۹: مراحل حرارت دهی زیرلایه‌ها درون کوره با دمای  $500^{\circ}\text{C}$

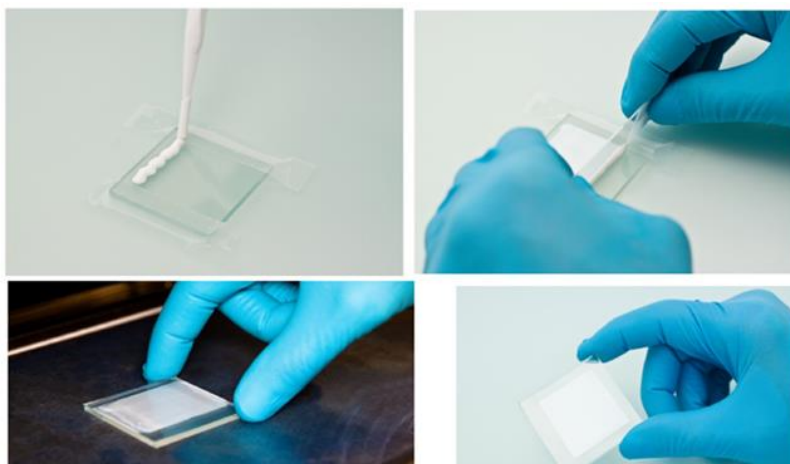
#### ۲-۴-۴ ساخت سلول خورشیدی رنگدانه‌ای بر مبنای نانو میله‌های اکسید روی

برای تهیهی این نوع سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای، با استفاده از خمیر نانو میله‌های اکسید روی تهیه شده با پلیمر PEG(400) در مراحل قبلی، سلول خورشیدی رنگدانه‌ای تهیه گردید.

نمونهی سوم: برای تهیهی سلول خورشیدی رنگدانه‌ای تهیه شده با نانو میله‌های اکسید روی، ابتدا



جهت آماده سازی فوتوآند روی اکسید، زیرلایه‌ی FTO، با شرایط ذکر شده در بالا به خوبی شستشو داده شد و بعد از خشک سازی اولیه، زیرلایه را بر روی پلیت به وسیله‌ی چسب اسکاچ محکم کرده و سپس به روش دکتر بلید و با تیغه‌ی شیشه‌ای، خمیر سفید رنگ نانو میله‌ی اکسید روی بر روی زیرلایه‌ی FTO به آرامی کشیده شد شکل (۴-۲۰).



شکل ۴-۲۰: نحوه‌ی کشیدن خمیر نانو میله‌ی اکسید روی به روی زیرلایه‌ی FTO

سپس زیرلایه به مدت ۵ دقیقه، جهت خشک سازی اولیه داخل کوره با دمای  $130^{\circ}\text{C}$  قرار داده شد. بعد از درآوردن از کوره و جداسازی چسب اسکاچ از روی زیر لایه‌ها، برای حرارت دهی نهایی، فتو الکتروود داخل کوره با دمای  $500^{\circ}\text{C}$  قرار داده شد. بعد از خنک سازی فتوآند تا دمای  $80^{\circ}\text{C}$ ، لایه را به ابعاد استاندارد تراشیده و سپس داخل رنگ N719، به مدت ۶ ساعت قرار داده شد. برای تهیه‌ی فتو الکتروود شمارشگر(کاتد)، با استفاده از خمیر نانو ذرات پلاتین به روش دکتر بلید و بعداز پاکسازی و خشک سازی طبق مراحل قبلی، خمیر بر روی زیرلایه کشیده و لایه نشانی انجام شد.

بعد از درآوردن فتو الکتروود از داخل کوره‌ی  $500^{\circ}\text{C}$ ، از سوراخ تعبیه شده بر روی کاتد، الکتروولیت تزریق شد. سلول را بوسیله‌ی قرار دادن آند و کاتد بر روی هم و استفاده از سرلین با ضخامت مناسب و دو الکتروود بر روی هم ساندویچ شدند. سلول بوسیله‌ی گیره به خوبی محکم شده و داخل کوره‌ی جعبه‌ای تحت دمای  $130^{\circ}\text{C}$ ، به مدت ۵ دقیقه قرار داده شد. سلول نهایی با قرار دادن سرلین باقیمانده بر روی پک قبلی و قرار دادن دوباره‌ی سلول داخل کوره، مطابق با شکل (۴-۲۱)، آب بندی

گردید.



شکل ۴-۲۱: شماتیک سلول خورشیدی رنگدانه ای نانو میله‌ی اکسید روی لایه نشانی شده به روش دکتر بلید

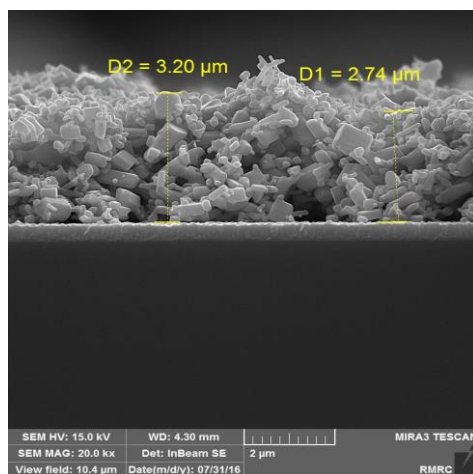
نمونه‌ی چهارم: برای ساخت سلول شماره ۴، ابتدا جهت آماده سازی آند، زیرلایه‌ی FTO، به خوبی شستشوداده شد و بعد از خشک سازی اولیه، زیرلایه را بر روی پلیت بوسیله‌ی چسب اسکاچ خوب محکم کرده و سپس به روش دکتر بلید، خمیر سفید رنگ نانو میله اکسید روی بر روی زیرلایه‌ی FTO به آرامی کشیده شد. سپس زیرلایه به مدت ۵ دقیقه برای خشک سازی اولیه داخل کوره با دمای  $130^{\circ}\text{C}$  قرار داده شد. بعد از درآوردن از کوره و جداسازی چسب اسکاچ از روی زیر لایه‌ها، برای حرارت دهی نهایی، فتو الکتروود در داخل کوره با دمای  $500^{\circ}\text{C}$  قرار داده شد. تفاوت این سلول با سلول شماره ۳، در مدت زمان ماندن داخل رنگ N719 می باشد که این بار سلول به مدت ۱۲ ساعت داخل رنگدانه قرار داده شد.

سلول را با ساندویچ سازی دو الکتروود بوسیله‌ی گیره محکم کرده و داخل کوره با دمای  $120^{\circ}\text{C}$  به مدت ۳ دقیقه قرار داده شد. سلول نهایی، با قرار دادن سرلین باقیمانده بر روی پک سلول قبلی و قرار دادن دوباره‌ی سلول در داخل کوره، آب بندی شد.

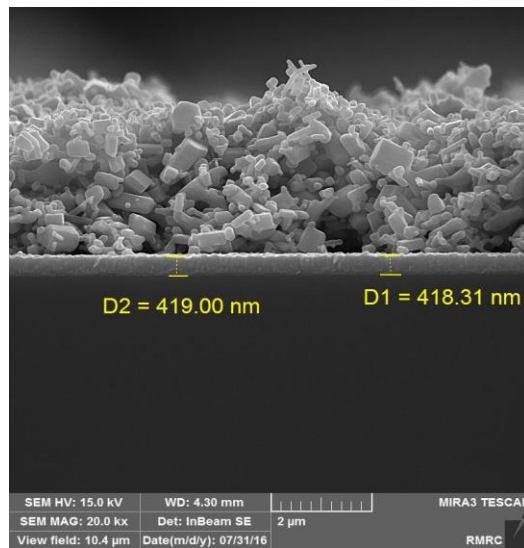
نمونه‌ی پنجم: برای ساخت نمونه‌ی شماره ۵، بعد از طی مراحل خشک سازی زیرلایه و لایه نشانی خمیر نانو میله‌ی اکسید روی با روش دکتر بلید و مشابه با سلول شماره ۳ و ۴ آماده کرده و تنها تفاوت این سلول با سلول ۳ و ۴، در مدت زمان ماندن لایه در داخل رنگ N719 می باشد که به

مدت ۱۸ ساعت قرار داده شد.

نمونه‌ی ششم: برای تهیه‌ی سلول خورشیدی رنگدانه‌ای شماره ۶، زیرلایه‌ی FTO، به خوبی شستشو داده و بعد از خشک‌سازی، زیرلایه را بر روی پلیت به وسیله‌ی چسب اسکاچ محکم کرده و سپس به روش دکتر بلید و با تیغه‌ی شیشه‌ای، خمیر نانو میله بر روی زیرلایه‌ی FTO به آرامی کشیده شد. سپس زیرلایه به مدت ۵ دقیقه برای خشک‌سازی اولیه، داخل کوره با دمای  $130^{\circ}\text{C}$  قرار داده شد. بعد از درآوردن از کوره و جداسازی چسب اسکاچ از زیر لایه، الکتروود نهایی داخل کوره با دمای  $400^{\circ}\text{C}$  قرار داده شد. بعد از خنک‌سازی فتو آند تا دمای  $80^{\circ}\text{C}$ ، لایه را به ابعاد استاندارد  $0.5\text{cm} \times 0.5\text{cm}$  تراشیده و سپس داخل رنگ N719، به مدت ۶ ساعت قرار داده شد. تصاویر FESEM سطح مقطع عرضی فتو آند سلول شماره‌ی ۶ که بیشترین بازده را به خود اختصاص داده است در مقیاس ۲ میکرومتر در شکل (۴-۲۲) و (۴-۲۳) نشان داده شده است. شکل (۴-۲۱)، نشان می‌دهد که ضخامت لایه‌ی FTO، لایه نشانی شده به روی زیرلایه‌ی FTO، بین ۲/۷۴ تا ۳/۲۰ میکرومتر است. همچنین در شکل (۴-۲۲)، ضخامت زیرلایه‌ی FTO، بین ۴۱۸ تا ۴۱۹ نانومتر تقریب زده شده است.

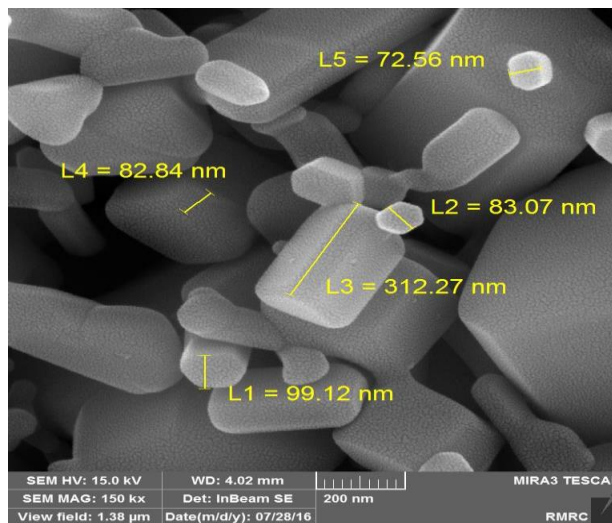


شکل ۴-۲۲: تصویر FESEM سطح مقطع عرضی سلول شماره‌ی ۶ در مقیاس ۲ میکرومتر

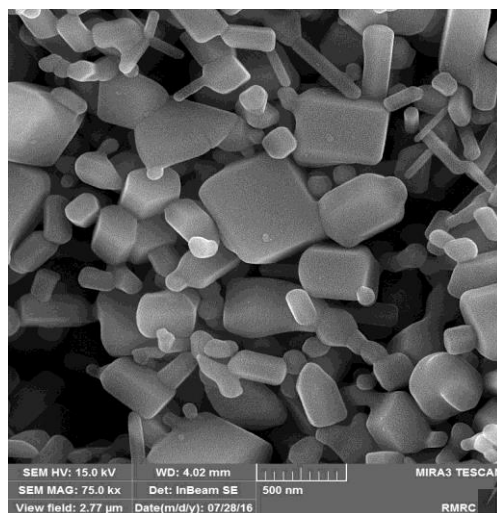


شکل ۴-۲۳: تصویر سطح مقطع عرضی نمونه‌ی شماره‌ی ۶ در مقیاس ۲ میکرومتر

همچنین تصویر FESEM ، فوتوآند سلول شماره‌ی ۶ در مقیاس ۲۰۰ و ۵۰۰ نانومتر در شکل (۴-۲۴) و (۴-۲۵) نشان داده شده‌اند. اندازه‌ی تقریبی نانو میله‌های اکسید روی، بین ۷۲ تا ۳۱۲ نانومتر است.



شکل ۴-۲۴: تصویر FESEM ، فوتوآند سلول شماره‌ی ۶ در مقیاس ۲۰۰ نانومتر



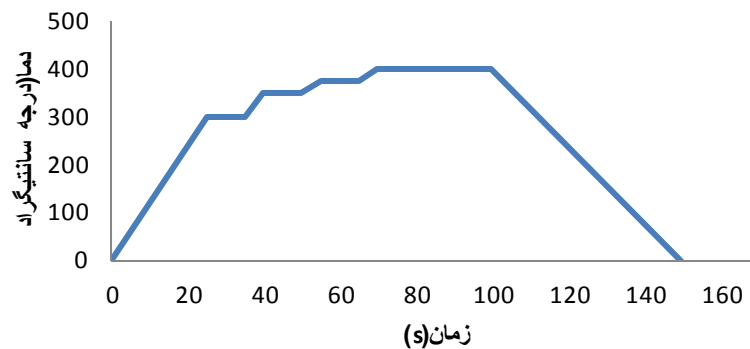
شکل ۴-۲۵ : تصویر FESEM ، فوتوآند سلول شماره ۶ در مقیاس ۵ نانومتر

برای تهیه‌ی الکترود شمارشگر(کاتد)، با استفاده از خمیر نانو ذرات پلاتین به روش دکتر بلید، خمیر بر روی زیرلایه کشیده و تحت دمای  $400^{\circ}\text{C}$  قرار گرفت. بعد از این مرحله، سلول نهایی با قرار دادن کاتد و آند بروی هم و محکم کردن آنها بوسیله‌ی گیره‌ی فلزی سلول بسته شد.

نمونه‌ی ۷: برای ساخت سلول شماره‌ی ۷، ابتدا برای آماده سازی آند، با برداشتن چند قطره از خمیر نانو میله‌ی اکسید روی، بر روی زیر لایه‌ی تمیز و خشک سازی شده‌ی FTO، ریخته و سپس با تیغه‌ی شیشه‌ای بر روی زیرلایه کشیده شد. برای مدت ۵ دقیقه داخل کوره با دمای  $130^{\circ}\text{C}$ ، قرار داده شد. بعد از بیرون آوردن از درون کوره و کندن چسب اسکاچ از روی FTO، برای بار دوم، در داخل کوره با دمای  $400^{\circ}\text{C}$  گذاشته شد. بعد از این مرحله، زیرلایه با رسیدن به دمای  $80^{\circ}\text{C}$ ، به ابعاد استاندارد تراشیده شد. قطعه‌ی نهایی در داخل رنگ N719، به مدت ۱۲ ساعت قرار داده شد.

برای آماده سازی کاتد، مانند نمونه های قبلی، چند قطره خمیر پلاتین، بر روی زیرلایه‌ی تمیز و خشک سازی شده‌ی FTO، ریخته و به روش دکتر بلید کشیده شد، در نهایت زیرلایه برای گذاشتن داخل کوره با دمای  $400^{\circ}\text{C}$ ، آماده گردید. بعد از درآوردن آند و کاتد از داخل کوره با دمای  $400^{\circ}\text{C}$ ، و قرار دادن آنها به روی هم و محکم کردن آنها بوسیله‌ی گیره و بستن سلول مانند نمونه های قبلی،

سلول بسته شد.



شکل ۴-۲۶: مراحل حرارت دهی زیرلایه ها درون کوره با دمای  $400^{\circ}\text{C}$

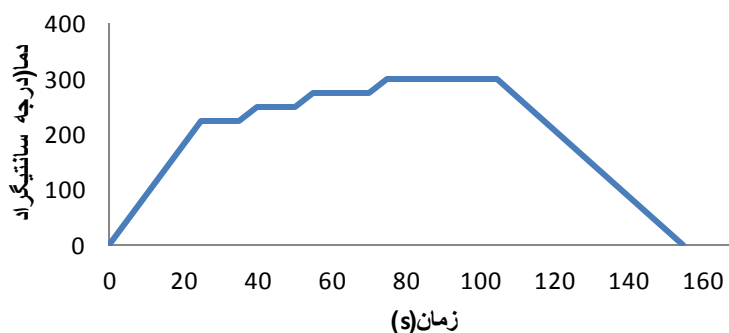
نمونه‌ی هشتم: نمونه‌ی هشتم، مانند نمونه‌ی ۶ و ۷، در دمای زینتر  $400^{\circ}\text{C}$ ، ساخته شد و تنها تفاوت آن با سلول ۶ و ۷، مدت زمان ماندگاری سلول در داخل رنگ N719 می باشد. این بار، سلول به مدت ۱۸ ساعت داخل رنگدانه باقی ماند.

نمونه‌ی نهم: برای ساخت نمونه‌ی نهم، ابتدا زیرلایه‌های FTO، به خوبی شسته و بعد از خشک سازی آنها در داخل کوره و بعد از اطمینان از تمیزی زیرلایه‌ها، با برداشتن مقداری از خمیر سفید رنگ نانومیله‌ی اکسید روی و کشیدن آن به روش دکتر بلید بر روی زیرلایه‌ی FTO، زیرلایه درون کوره با دمای  $130^{\circ}\text{C}$  قرار داده شد. بعد از در آوردن از داخل کوره، نمونه برای بازپخت نهایی داخل کوره با دمای  $300^{\circ}\text{C}$  مطابق با شکل (۴-۲۷)، گذاشته شد. بعد از در آوردن از داخل کوره به مدت ۶ ساعت، در داخل رنگ N719 قرار داده شد. کاتد نیز مطابق روش دکتر بلید و با کشیدن خمیر پلاتین به روی زیرلایه‌ی تمیز FTO، درون کوره با دمای  $300^{\circ}\text{C}$  گذاشته و آماده شد. بعد از آماده سازی آند و کاتد، با پلیمر سرلین ساندویچ سازی و به وسیله‌ی گیره‌ی فلزی به خوبی به روی هم محکم شده و در داخل کوره با دمای  $130^{\circ}\text{C}$  به مدت ۳ دقیقه قرار داده شد.

نمونه‌ی دهم: برای ساخت نمونه‌ی دهم، مشابه نمونه‌ی نهم، آند را با کشیدن خمیر نانو میله‌ی

اکسید روی به روی زیر لایه‌ی FTO، داخل کوره با دمای  $130^{\circ}\text{C}$  به مدت ۶ دقیقه قرار داده شد. بعد از درآوردن نمونه از داخل کوره، چسب اسکاچ از روی نمونه جدا شده و سپس داخل کوره با دمای  $300^{\circ}\text{C}$  گذاشته شد. بعد از سرد شدن لایه تا دمای  $80^{\circ}\text{C}$ ، لایه به ابعاد استاندارد تراشیده شد. سپس داخل رنگ N719 به مدت ۱۲ ساعت قرار داده شد. کاتد هم مانند نمونه ی نهم آماده شد. در نهایت با قرار دادن لایه‌ها بر روی هم، با پلیمر سرلین ساندویچ سازی شدند. آند و کاتد به خوبی با گیره‌ی فلزی به روی هم محکم شدند و داخل کوره با دمای  $130^{\circ}\text{C}$  به مدت ۳ دقیقه قرار داده شدند.

نمونه‌ی یازدهم: نمونه‌ی یازدهم نیز مشابه با سلول نه و ده آماده شد. با این تفاوت که آند نمونه‌ی یازدهم بعد از درآوردن از کوره با دمای  $300^{\circ}\text{C}$  و بریده شدن به ابعاد استاندارد، به مدت ۱۸ ساعت داخل رنگدانه N719، قرار داده شد.

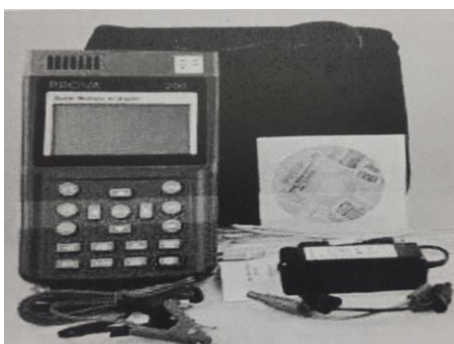


شکل ۴-۲۷: مراحل حرارت دهی زیرلایه‌ها درون کوره با دمای  $300^{\circ}\text{C}$

#### ۳-۴-۴ مشخصه یابی سلول‌های خورشیدی رنگدانه ای ساخته شده به روش دکتر بلید تحت تابش خورشید

پس از پایان مراحل ساخت سلول‌های خورشیدی رنگدانه ای ساخته شده به روش دکتر بلید، برای بررسی نحوه ی عملکرد سلول‌های ساخته شده و تعیین پارامترهای فتوولتائیک، نظیر جریان مدار کوتاه، ولتاژ مدار باز، ضریب پرشدگی و بازدهی، ابتدا سلول‌های رنگدانه‌ای تحت تابش نور

خورشید بررسی شدند. برای این کار از دستگاه آنالیزور نور خورشید (SMA) مدل Prova 200 شکل (۴-۲۸) استفاده شد. این دستگاه قابلیت اندازه‌گیری جریان از ۰/۱ تا ۶A و نیز ولتاژ تا ۶۰V را دارد. علاوه بر موارد مذکور توان ماکزیمم ، ولتاژ ماکزیمم ( مقدار ولتاژ اندازه گیری شده در توان ماکزیمم) و بیشینه‌ی ولتاژ (مقدار ولتاژ اندازه گیری شده در بیشینه‌ی توان) را به کمک دستگاه مورد نظر، می‌توان به دست آورد.



شکل ۴-۲۸: آنالیزور نور

خورشید (SMA) مدل Prova 200

ابتدا به کمک دستگاه Light Meter مدل LX-1108 میزان شدت تابش نور خورشید در ساعاتی از روز اندازه‌گیری و ثبت شد. سپس مقادیر به دست آمده را در دستگاه آنالیزور نور خورشید وارد کرده و بعد از این مرحله، باید بازه‌ی جریان آغازی و پایانی دستگاه و مساحت سطح فعال سلول مورد نظر را در دستگاه وارد کرد. در نهایت با اتصال سیم‌های دستگاه به سلول، دستگاه شروع به اسکن می‌کند. پس از پایان عملیات اسکن توسط دستگاه ، با اتصال دستگاه به کامپیوتر داده‌های به دست آمده از سلول ثبت می‌گردد.

۴-۴-۴ نتایج حاصل از مشخصه یابی سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای ساخته شده

#### تحت تابش خورشید

جدول (۴-۳) پارامترهای فتوولتاییک به دست آمده از سلول‌های شماره ی ۱ و ۲ تحت تابش نور خورشید در شهر شاهرود با موقعیت جغرافیایی  $54.94^{\circ}$  شرقی و  $36.39^{\circ}$  شمالی، میانگین دمای سالانه  $14^{\circ}C$  و وضعیت آب و هوایی کمی ابری در ۲ اردیبهشت ماه سال ۱۳۹۵ نشان می‌دهد.



جدول ۳-۴: پارامترهای فتوولتاییک سلول های شماره ی ۱ و ۲ تحت تابش نور خورشید در شهر شاهرود

شماره سلول	زمان اندازه گیری (ساعت)	شدت تابش نور خورشید ( $W/m^2$ )	$J_{sc}$ (mA)	$V_{oc}$ (V)	FF (%)	$\eta$ (%)
۱	۱۲	۱۲۵۰	۱۲/۲	۰/۷۳	۰/۴۷	۴/۲۵
	۱۴	۱۰۴۵	۱۳/۶	۰/۷۸	۰/۳۹	۴/۲۳
	۱۶	۹۰۰	۱۱/۹	۰/۶۶	۰/۴۴	۳/۵۲
	۱۸	۵۰۰	۹/۸	۰/۶۱	۰/۴۱	۲/۴۹
۲	۱۲	۱۲۵۰	۹/۱	۰/۶۱	۰/۶۹	۳/۸۷
	۱۴	۱۰۴۵	۷/۹	۰/۷۵	۰/۶	۳/۶۰
	۱۶	۹۰۰	۶/۲	۰/۶۶	۰/۵۹	۲/۴۴
	۱۸	۵۰۰	۵/۴	۰/۶	۰/۵۵	۱/۸

با توجه به داده‌های به دست آمده از جدول (۳-۴)، میزان شدت تابش خورشید در ساعت ۱۲ به بیشترین مقدار خود یعنی ۱۲۵۰ رسیده است و در ساعت های دیگر با تغییر شرایط جوی و ابری شدن آسمان و کم شدن شدت پرتوی نور فرودی میزان شدت نور تابشی کاهش یافته و در ساعت ۱۸ به کمترین مقدار خود یعنی  $500 W/m^2$  رسیده است. با بررسی داده های نمونه ی ۱ و ۲ به این نتیجه می‌رسیم که با استفاده از محلول تتراکلرید تیتانیوم به عنوان کم کننده‌ی جریان تاریک سلول دی اکسید تیتانیوم، می‌توان بازدهی سلول خورشیدی رنگدانه‌ای را به میزان قابل توجهی افزایش داد. جدول (۴-۴) داده‌های به دست آمده از سلول‌های شماره ۳، ۴، و ۵ را تحت تابش خورشید در شهر شاهرود و وضعیت آب و هوایی کاملاً آفتابی روز ۲۰ اردیبهشت سال ۱۳۹۵ را نشان می‌دهد

جدول ۴-۴ : پارامترهای فتوولتاییک سلول‌های شماره‌ی ۳،۴ و ۵ تحت تابش نور خورشید در شهر شاهرود

شماره سلول	زمان اندازه گیری (ساعت)	شدت تابش نور خورشید ( $W/m^2$ )	$J_{sc}$ (mA)	$V_{oc}$ (V)	FF (%)	$\eta$ (%)
۳	۱۲	۱۳۰۰	۲/۰۳	۰/۷۶	۰/۲۹	۰/۴۶
	۱۴	۱۱۰۰	۲/۰	۰/۶۱	۰/۵	۰/۶۲
	۱۶	۹۵۰	۱/۹	۰/۵۱	۰/۵۳	۰/۵۲
	۱۸	۷۰۰	۰/۸۶	۰/۶۸	۰/۴۳	۰/۲۵
۴	۱۲	۱۳۰۰	۲/۶	۰/۵۸	۰/۵۱	۰/۷۸
	۱۴	۱۱۰۰	۲/۹	۰/۷۵	۰/۲۶	۰/۵۶
	۱۶	۹۵۰	۲/۴	۰/۴۸	۰/۴	۰/۴۷
	۱۸	۷۰۰	۱/۶	۰/۷	۰/۲۱	۰/۲۴
۵	۱۲	۱۳۰۰	۲/۸	۰/۵	۰/۶۴	۰/۹
	۱۴	۱۱۰۰	۳/۰	۰/۷	۰/۳	۰/۶۴
	۱۶	۹۵۰	۱/۵	۰/۶۵	۰/۷۱	۰/۷
	۱۸	۷۰۰	۱/۸	۰/۶۵	۰/۳۸	۰/۴۵

بررسی داده‌های جدول (۴-۴) نشان می‌دهد که سلول شماره ۵ با بازده ۰/۹٪ بیشترین بازده سلول

خورشیدی را در شدت تابشی ۱۳۰۰، در ساعت ۱۲ را داراست.

برای بررسی تاثیر مدت زمان قرارگیری سلول‌های رنگدانه‌ای اکسید روی در داخل محلول

رنگدانه‌ای، با توجه به تحرک پذیری بالای آن نسبت به  $TiO_2$ ، سبب انتقال سریعتر الکترون‌های

برانگیخته از داخل رنگدانه به درون نانومیله‌ی اکسید روی شده است، اما به دلیل کم بودن پایداری

شیمیایی نانو میله‌ی اکسید روی و واکنش پذیری بالاتر اکسید روی در محیط اسیدی و بازی (محلول رنگدانه) فتوآند تا حدی خواص خود را از دست داده و تخریب می‌شود. با گذشت زمان بازدهی سلول کاهش می‌یابد. به همین دلیل سلول‌های رنگدانه‌ای، بعد از گذشت مدت زمان دو هفته، مورد بررسی کمیت‌های فتوولتائیک تحت تابش خورشید قرار گرفتند.

سلول‌های رنگدانه‌ای ۳،۴ و ۵ بعد از دو هفته در تاریخ ۴ خرداد ۱۳۹۵، مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج این بررسی در جدول شماره (۴-۵) قرار دارند. همانطور که از جدول (۴-۵) پیداست، با گذشت زمان بازدهی سلول‌های خورشیدی ۳، ۴ و ۵ کاهش یافته است. بیشترین بازده مربوط به سلول شماره‌ی ۴ با بازدهی ۰/۶۴٪، در ساعت ۱۲ و با شدت تابش خورشیدی  $1200 \text{ W/m}^2$  است. کمترین بازده سلول خورشیدی مربوط به سلول خورشیدی شماره ۵ با شدت تابش خورشیدی  $450 \text{ W/m}^2$ ، در ساعت ۱۸ و به میزان ۰/۱۲٪ است. که نشان دهنده‌ی اینست که هرچه آند بیشتر در داخل محلول رنگدانه بماند بعد از گذشت مدت زمان طولانی، بیشترین کاهش در بازده رخ خواهد داد. سلول شماره ۵، به دلیل بیشترین مدت ماندگاری در رنگ به مدت ۱۸ ساعت، در ابتدا و روز اول آماده سازی سلول بیشترین بازده را داراست. اما بعد از مدت زمان دو هفته، بازدهی آن نسبت به سایر سلول‌ها یعنی ۳ و ۴ بیشترین کاهش در میزان بازدهی سلول را پیدا کرده است. که به دلیل جذب بالای رنگ در سلول شماره‌ی ۵ می‌باشد.

برای بررسی نتایج پارامترهای فتوولتائیک سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای شماره‌ی ۶، ۷ و ۸ آنها را در یک روز نیمه ابری در ۱۰ خرداد ۱۳۹۵، در معرض تابش نور خورشید قرار داده و پارامترهای فتوولتائیک آنها نظیر جریان مدار کوتاه، ولتاژ مدار باز و ضریب پرشدگی و بازدهی خورشیدی محاسبه شده است. نتایج آن در جدول (۴-۶) خلاصه شده است.

جدول ۴-۵: پارامترهای فتوولتائیک سلول‌های شماره‌ی ۳،۴ و ۵ بعد از دو هفته تحت تابش نور خورشید در شهر شاهرود

شماره سلول	زمان اندازه گیری (ساعت)	شدت تابش نور خورشید ( $W/m^2$ )	$J_{sc}$ (mA)	$V_{oc}$ (V)	FF (%)	$\eta$ (%)
۳	۱۲	۱۲۰۰	۱/۸	۰/۵	۰/۳۸	۰/۳۵
	۱۴	۱۰۰۰	۱/۷	۰/۶۵	۰/۳۴	۰/۳۸
	۱۶	۷۰۰	۱/۵	۰/۳۹	۰/۳۹	۰/۲۳
	۱۸	۴۵۰	۰/۷	۰/۴۱	۰/۶۲	۰/۱۸
۴	۱۲	۱۲۰۰	۲/۵	۰/۳۸	۰/۶۷	۰/۶۴
	۱۴	۱۰۰۰	۲/۴	۰/۶۷	۰/۲۴	۰/۴
	۱۶	۷۰۰	۱/۲	۰/۴۷	۰/۳۳	۰/۱۹
	۱۸	۴۵۰	۱/۵	۰/۲۹	۰/۳۶	۰/۱۶
۵	۱۲	۱۲۰۰	۲/۲	۰/۳۲	۰/۵۱	۰/۳۶
	۱۴	۱۰۰۰	۱/۷	۰/۵	۰/۳	۰/۲۶
	۱۶	۷۰۰	۱/۳	۰/۴۲	۰/۳۸	۰/۲۱
	۱۸	۴۵۰	۰/۹	۰/۵۶	۰/۲۳	۰/۱۲

نتایج جدول (۴-۶)، نشان می‌دهد که سلول شماره ۷، در بین سلولهای ۷، ۸ و ۹، در ساعت ۱۲ با شدت تابش  $W/m^2$  ۱۳۰۰، بیشترین بازده معادل ۰/۹۷٪ دارد. همچنین شدت تابش خورشید در ساعت ۱۲ بیشترین مقدار خود را داراست. اما با تغییر میزان تابش در ساعات دیگر و با تغییرات شرایط آب و هوایی، میزان تابش در ساعت ۱۸ به کمترین میزان خود در بین ساعات ثبت شده را داراست.

جدول ۴-۶: پارامترهای فتوولتاییک سلول‌های شماره ی ۶، ۷ و ۸ تحت تابش نور خورشید در شهر شاهرود

شماره سلول	زمان اندازه گیری (ساعت)	شدت تابش نور خورشید ( $W/m^2$ )	$J_{sc}$ (mA)	$V_{oc}$ (V)	FF (%)	$\eta$ (%)
۶	۱۲	۱۳۰۰	۲/۳	۰/۶۳	۰/۶۶	۰/۹۶
	۱۴	۱۱۰۰	۲/۶	۰/۴۵	۰/۵۹	۰/۷
	۱۶	۹۶۰	۱/۴	۰/۴۷	۰/۶۳	۰/۴۲
	۱۸	۸۵۰	۰/۹	۰/۵۸	۰/۵۷	۰/۳
۷	۱۲	۱۳۰۰	۲/۴	۰/۶۴	۰/۶۳	۰/۹۷
	۱۴	۱۱۰۰	۲/۵	۰/۶۳	۰/۳۶	۰/۹۲
	۱۶	۹۶۰	۲/۶۱	۰/۴۱	۰/۵۳	۰/۵۷
	۱۸	۸۵۰	۱/۲	۰/۲۹	۰/۴	۰/۱۴
۸	۱۲	۱۳۰۰	۲/۶	۰/۵۴	۰/۴۵	۰/۶۴
	۱۴	۱۱۰۰	۲/۳۱	۰/۴۶	۰/۷۷	۰/۸۲
	۱۶	۹۶۰	۱/۹	۰/۵۱	۰/۵۵	۰/۵۴
	۱۸	۸۵۰	۱/۳	۰/۲۶	۰/۵	۰/۱۷

جدول (۴-۷) نیز داده‌های به دست آمده از سلول‌های شماره ی ۹، ۱۰ و ۱۱ را تحت شرایط تابش

خورشید در شهر شاهرود در یک روز آفتابی در ۸ تیر ۱۳۹۵، نشان می دهد.

جدول ۷-۴: پارامترهای فتوولتاییک سلول‌های شماره ۹، ۱۰ و ۱۱ تحت تابش نور خورشید در شهر شاهرود

شماره سلول	زمان اندازه گیری (ساعت)	شدت تابش نور خورشید ( $W/m^2$ )	$J_{sc}$ (mA)	$V_{oc}$ (V)	FF (%)	$\eta$ (%)
۹	۱۲	۱۳۵۰	۲/۰	۰/۶۵	۰/۵۷	۰/۶۵
	۱۴	۱۱۵۰	۱/۷	۰/۵۸	۰/۶۳	۰/۶۲
	۱۶	۸۰۰	۱/۱	۰/۴۷	۰/۶۱	۰/۶۱
	۱۸	۵۸۰	۰/۶۲	۰/۶۵	۰/۶۲	۰/۲۵
۱۰	۱۲	۱۳۵۰	۲/۱۱	۰/۶۵	۰/۶۱	۰/۸۵
	۱۴	۱۱۵۰	۱/۶۵	۰/۵۲	۰/۴۹	۰/۴۲
	۱۶	۸۰۰	۱/۳۴	۰/۷۴	۰/۳۶	۰/۳۶
	۱۸	۵۸۰	۱/۴	۰/۵۷	۰/۳۹	۰/۳۱
۱۱	۱۲	۱۳۵۰	۱/۸۴	۰/۶۲	۰/۵۶	۰/۶۴
	۱۴	۱۱۵۰	۱/۳۰	۰/۶۱	۰/۶۵	۰/۵۲
	۱۶	۸۰۰	۱/۵۶	۰/۵۱	۰/۵	۰/۴۱
	۱۸	۵۸۰	۰/۵۴	۰/۶۴	۰/۴	۰/۱۴

بررسی داده‌های جدول (۷-۴) نشان می‌دهد که سلول شماره ۱۰، دارای بیشترین بازدهی در

شدت تابشی ۱۳۵۰ به میزان ۰/۸۵٪ است.

با مقایسه‌ی تمامی سلول‌ها از ۱ تا ۱۱، به این نتیجه می‌رسیم که از بین آنها سلول شماره ۷، با

مدت زمان ماندگاری در رنگ ۱۲ ساعت و دمای زینترینگ  $400^{\circ}C$  بیشترین بازده را داراست. و

سلول‌های ساخته شده در دمای  $400^{\circ}C$  بیشترین بازدهی را در مقایسه با سلول‌های ساخته شده

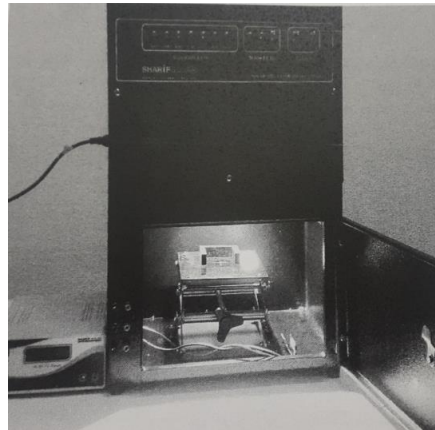
دارند. واز بین دماهای بازپخت استفاده شده یعنی ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ درجه‌ی سانتیگراد، بهترین

بازدهی در دمای  $400^{\circ}\text{C}$ ، به دست آمده است.

#### ۴-۵ مشخصه‌یابی سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای ساخته شده در حضور

##### شبیه ساز خورشیدی

در این مرحله، پس از تعیین پارامترهای فتوولتائیک نمونه‌ها، در برابر تابش مستقیم نور خورشید، با استفاده از دستگاه شبیه ساز خورشیدی با طیف تابشی شبیه سازی شده  $\text{AM1.5 G}$ ، مدل SIM-1000 شکل (۴-۲۹)، برای به دست آوردن پارامتر های فتوولتائیک سلول‌های رنگدانه‌ای (جریان مدار کوتاه، ولتاژ مدار باز، ضریب پرشدگی و بازده) استفاده شد.



شکل ۴-۲۹: شبیه ساز خورشیدی مدل SIM-1000

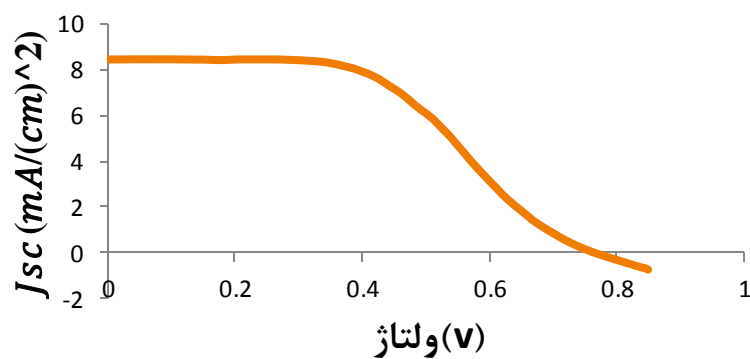
#### ۴-۵-۱ نتایج حاصل از مشخصه‌یابی سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای ساخته شده

##### در حضور شبیه ساز خورشیدی

سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای ساخته شده، تحت تابش طیف  $\text{AM1.5G}$  شبیه ساز خورشیدی قرار گرفته شد و داده‌های به دست آمده بر روی کامپیوتر ذخیره شدند. با استفاده از این داده‌ها، پارامترهای اصلی سلول‌های خورشیدی محاسبه شد. در انتها نیز منحنی‌های جریان-ولتاژ نمونه‌ها رسم شد. پارامترهای فتوولتائیک نمونه‌های ۲، ۴، ۳، ۷، ۱۰، ۹، ۶ به ترتیب از جدول (۴-۸) تا جدول (۴-۱۱) آورده شده‌اند. که با استفاده از رابطه‌ی (۲-۹) فصل ۲ قابل توجیه است. همچنین تصاویر منحنی‌های آنالیز جریان ولتاژ آنها در شکل‌های (۴-۳۰) تا (۴-۳۶) آورده شده‌اند.

جدول ۴-۸: نمودار جریان-ولتاژ نمونه‌ی ۲ تحت تابش طیف AM1.5 G شبیه ساز خورشیدی

شماره سلول	بازده کل $\eta$ (%)	ضریب پرشدگی $FF$ (%)	ولتاژ مدار باز $V_{oc}$	جریان اتصال کوتاه $J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )
۲	۳/۲۲	۰/۴۹	۰/۷۵	۸/۴

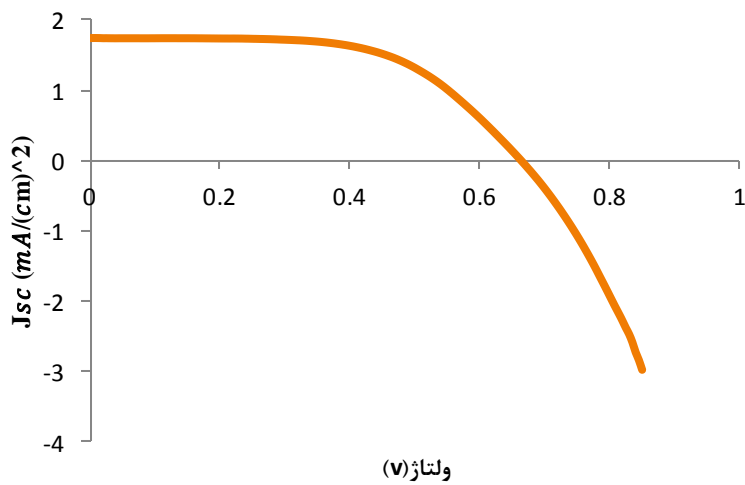


شکل ۴-۳۰: منحنی جریان-ولتاژ نمونه‌ی شماره ی ۲

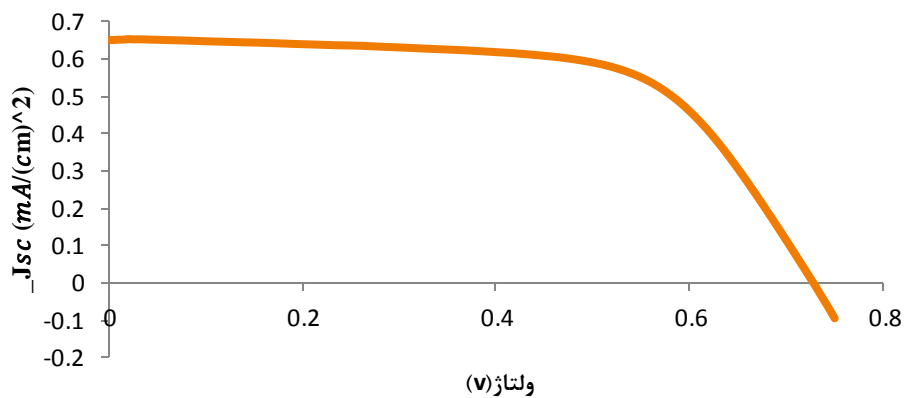
جدول ۴-۹: پارامترهای فتوولتاییک نمونه‌ی ۳ و ۴ تحت تابش طیف AM1.5 G شبیه ساز خورشیدی

شماره سلول	بازده کل $\eta$ (%)	ضریب پرشدگی $FF$ (%)	ولتاژ مدار باز $V_{oc}$	جریان اتصال کوتاه $J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )
۳	۰/۵۶	۰/۳۶	۰/۷۶	۲/۰۲
۴	۰/۳	۰/۶۳	۰/۷۳	۰/۶۵





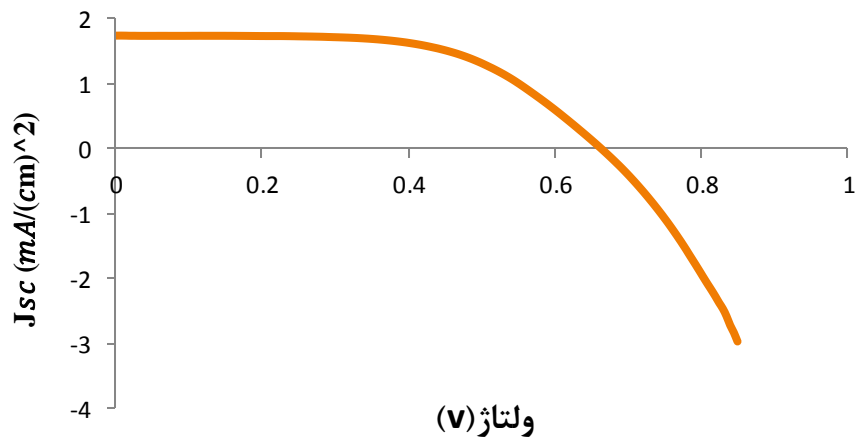
شکل ۳-۴: منحنی جریان-ولتاژ نمونه‌ی شماره‌ی ۳



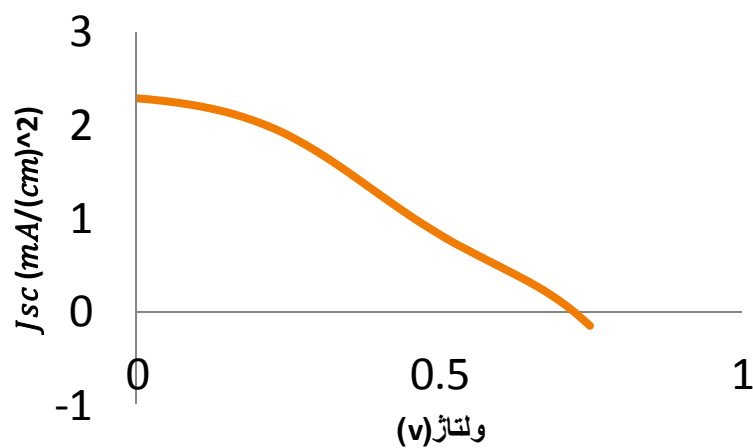
شکل ۴-۳۲: منحنی جریان-ولتاژ نمونه‌ی شماره‌ی ۴

جدول ۴-۱۰: پارامترهای فتوولتائیک سلول‌های خورشیدی ۶،۷ تحت تابش طیف AM1.5 G

شماره سلول	بازده کل $\eta$ (%)	ضریب پرشدگی $FF$ (%)	ولتاژ مدار باز $V_{oc}$	جریان اتصال کوتاه $J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )
۶	۰/۶۸	۰/۵۹	۰/۶۶	۱/۷۴
۷	۰/۵۲	۰/۳۱	۰/۷۲	۲/۲۸



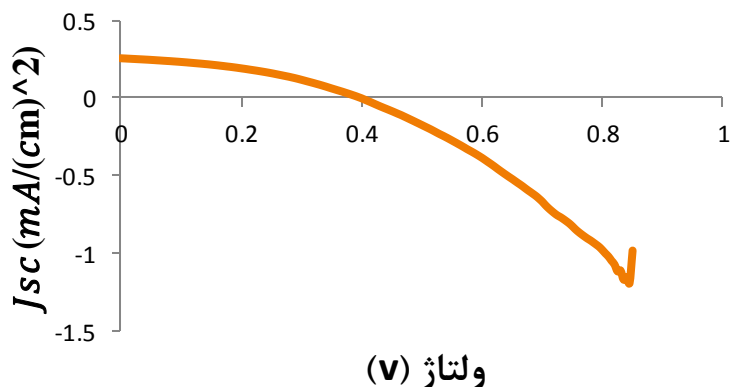
شکل ۳۳-۴: منحنی جریان-ولتاژ نمونه ۶



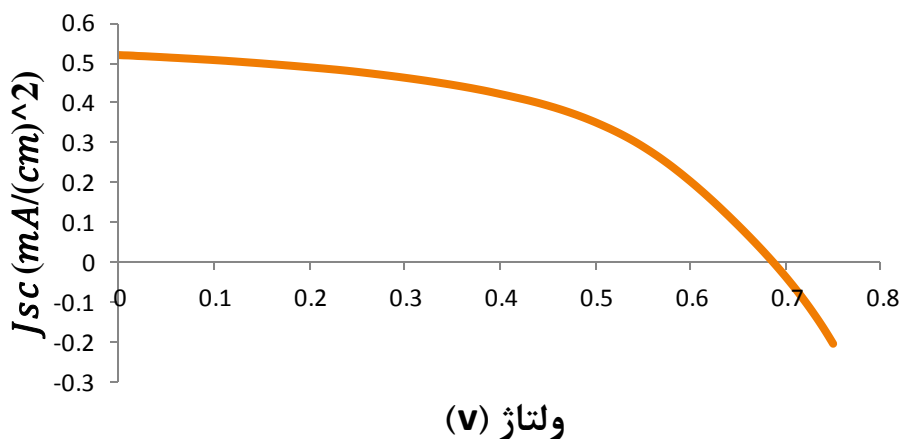
شکل ۳۴-۴: منحنی جریان-ولتاژ نمونه ۷

جدول ۴-۱۱: پارامترهای فتوولتائیک سلول‌های خورشیدی ۹،۱۰ تحت تابش طیف AM1.5 G

شماره سلول	بازده کل $\eta (\%)$	ضریب پرشدگی $FF (\%)$	ولتاژ مدار باز $V_{oc}$	جریان اتصال کوتاه $J_{sc} (mA/cm^2)$
۹	۰/۳۱	۰/۳۹	۰/۶۲	۱/۳
۱۰	۰/۱۷	۰/۴۹	۰/۶۹	۰/۵۲



شکل ۴-۳۵: منحنی جریان-ولتاژ نمونه‌ی شماره‌ی ۹



شکل ۴-۳۶: منحنی جریان-ولتاژ نمونه‌ی شماره‌ی ۱۰

همانطور که مشاهده می‌شود بعضی از نمونه‌ها بعد از مدت زمان دو ماه از زمان ساخت بنا به دلایلی از جمله عدم وجود آب‌بندی مناسب و از بین رفتن الکترولیت و یا تخریب فتوآند در محیط رنگدانه‌ای، از بین رفته‌اند. که در اینجا منحنی جریان-ولتاژ برخی از آنها رسم شده است. در بین نمونه‌های ساخته شده، منحنی جریان-ولتاژ نمونه‌ی شماره‌ی ۶، با بازدهی ۰/۶۸ و جریان اتصال کوتاه ۱/۷۴، بیشترین بازده را در دمای زینتر ۴۰۰ درجه‌ی سانتیگراد و مدت زمان ماندگاری در رنگ ۶ ساعت به خود اختصاص داده است.

با سنتز نانو پودر اکسید روی که به روش رشد از محلول در دمای پایین (LTS) ، آماده شدند. راهی برای کاهش هزینه‌های ساخت سلول خورشیدی رنگدانه‌ای ، با توجه به سادگی و ارزانی روش سنتز آن، پیدا شده است. در نهایت سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای(DSSC)، بر پایه‌ی فتو الکتروده‌های تک لایه‌ای دی اکسید تیتانیوم و نانو میله‌های اکسید روی به روش ساده و ارزان قیمت دکتر بلید ساخته شدند. همچنین خمیر نانومیله‌های اکسید روی با اندازه ذرات تقریبی ۸۰-۲۰۰ nm، با استفاده از پلی اتیلن گلیکول (PEG(400)، برای ساخت سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای به روش دکتر بلید، تهیه شدند و در ساخت سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای به کار برده شد که به دلیل ساخت این خمیر به میزان قابل توجهی از هزینه‌ی ساخت سلول خورشیدی رنگدانه‌ای کاهش یافت. به کمک دستگاه Solar Modul Analyzer، پارامترهای فتوولتائیک سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای نظیر جریان مدار کوتاه ، ولتاژ مدار باز، ضریب پرشدگی محاسبه و بازدهی نمونه‌های ساخته شده تحت تابش مستقیم خورشید در ساعات متفاوتی از روز و در شرایط متفاوت آب و هوایی در شهر شاهرود تعیین شدند. در مرحله‌ی بعدی پارامترهای مشخصه‌ی سلول‌های خورشیدی ساخته شده تحت تابش طیف AM1.5 شبیه ساز خورشیدی با هم مقایسه شدند و منحنی جریان ولتاژ سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای رسم شدند. نتایج مقایسه‌ی سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای ساخته شده و نیز FTO‌های ساخته شده به روش اسپری پایرولیز به صورت خلاصه در اینجا آمده است:

۱. نتایج حاصل نشان داده است که تحت شرایط تابش مستقیم خورشید، پارامترهای فتوولتائیک سلول‌های رنگدانه‌ای به شدت تابع عواملی همچون زمان انجام آزمایش ، طول و عرض جغرافیایی شهر مورد نظر، شرایط جوی و ... بوده است.
۲. می‌توان با شبیه سازی شرایط تاثیر گذار بر پارامترهای فتوولتائیک در شبیه سازهای

- خورشیدی و ایجاد شرایط مناسب آزمایشگاهی، تکرارپذیری آزمایش‌ها را امکان پذیر کرد.
۳. با بررسی نمونه‌های سلول خورشیدی ساخته شده، به این نتیجه می‌رسیم که بازدهی سلول‌های خورشیدی ساخته شده با  $TiO_2$  در حضور تتراکلرید تیتانیوم به عنوان کم‌کننده‌ی جریان تاریک سلول، بازدهی بیشتری نسبت به سلول معمولی  $TiO_2$  دارد.
۴. سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای نانو میله‌ی اکسید روی با توجه به گاف نواری مشابه  $TiO_2$ ، سلول‌های ارزانتر و به نسبت مناسبتری هستند. اما به دلیل ناپایداری این سلول‌ها در محیط اسیدی و بازی محلول رنگدانه، تاثیر این ناپایداری بر روی بازدهی آنها، بعد از مدت زمان دو هفته نشان داد که بازدهی آنها تحت تاثیر گذشت زمان کاهش می‌یابد. و این به دلیل تحلیل فتوآند نانو میله‌ی اکسید روی، در داخل محلول رنگدانه‌ی N719، بعد از گذشت این مدت زمان است.
۵. با مقایسه‌ی سلول‌های ساخته شده در دماهای زینتر  $300^\circ C$ ،  $400^\circ C$  و  $500^\circ C$ ، به این نتیجه رسیدیم که دمای زینتر  $400^\circ C$ ، مناسبترین دما برای ساخت سلول خورشیدی رنگدانه‌ای با نانومیله‌ی اکسید روی به عنوان فتو آند بوده و بیشترین بازده سلول خورشیدی به میزان  $0.68\%$  با مدت زمان ماندگاری ۶ ساعت در رنگ را داراست.
۶. با بررسی نمونه‌های FTO ساخته شده، نشان داده شد که هر دو نمونه  $SnCl_2$  و  $SnCl_4$ ، پیک‌های کریستالی مشابهی دارند اما بلورک‌ها در  $SnCl_4$ ، منظم‌تر بوده و بلورینگی در آن بیشتر است. از نظر طیف عبوری نمونه‌ها،  $SnCl_2$  شفافیت بهتری در مقابل نور خورشید از خود نشان دادند و می‌توان از آن در مواردی از ساخت سلول‌های خورشیدی که نیازمند شفافیت بالاتری است؛ استفاده کرد. اما در مقابل، نمونه‌ی  $SnCl_4$ ، مقاومت سطحی کمتری نسبت به  $SnCl_2$  از خود نشان می‌دهد و الکترون‌های بیشتری را منتقل می‌کند. در مواردی که مقاومت پایین، پارامتر موثرتری نسبت به شفافیت است، (FTO) مناسبتری است.

## پیشنهادات جهت مطالعات و تحقیقات تکمیلی

با توجه به مطالعات و کارهای آزمایشگاهی انجام شده در این پایان نامه، جهت ادامه‌ی تحقیقات و مطالعات تکمیلی در این زمینه که در این پایان نامه میسر نشد در این بخش به عنوان پیشنهادات ارائه می‌گردد.

۱. استفاده از سایر اکسیدهای فلزی و روش‌های لایه‌نشانی و سنتز آنها از جمله هیدرو ترمال

و اسپری پایرولیز و غیره جهت رشد نانوساختارهای متفاوت بر روی زیر لایه‌ی بستر

۲. استفاده از نانو ساختارهای دیگر اکسید روی مثل نانو سیم، نانو صفحه، نانو تسمه و غیره

به عنوان نانوپودر مورد استفاده برای ساخت خمیر لایه‌نشانی به روش دکتر بلید

۳. استفاده از سلول‌های دو یا چند لایه‌ای با نانو ساختارهای اکسید روی و تیتانیوم دی

اکسید و اکسید قلع

۴. ساخت زیرلایه‌های مختلف ITO و FTO با روش‌های دیگر و بررسی تاثیر آن بر روی

کاهش مقاومت و افزایش شفافیت آنها جهت استفاده در ساخت سلول‌های خورشیدی

رنگدانه‌ای

- [1] [http://suna.org.ir/suna\\_content/media](http://suna.org.ir/suna_content/media)
- [2] <http://edu.nano.ir>
- [3] Branker, K., Pathak, M.J.M. and Pearce, J.M. (2011) ‘A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, 4470–4482
- [4] Luque, A. (2011) ‘Will we exceed 50% efficiency in photovoltaics?’, *Journal of Applied Physics*, 110, 031301.
- [5] [http://en.wikipedia.org/wiki/Timeline\\_of\\_solar\\_cells](http://en.wikipedia.org/wiki/Timeline_of_solar_cells)
- [6] M.D. Archer and R. Hill (editors) (2000),” Clean electricity from photovoltaics”, *Imperial College Press*.
- [7] A review: “Solar cell current scenario and future trends by Recent Research in Science and Technology”( 2012), 4(8): 99-101, ISSN:2076-5061
- [8] <http://www.scientificamerican.com/article/solar-cells-provecleaner-way-to-produce>
- [9] <http://www.modernenviro.com/home-solar-energy-guide-part-3>
- [10] K. G. Reddy, T. G. Deepak, G. S. Anjusree, S. Thomas, S. Vadukumpully, K. R. V. Subramanian, S. V. Nair, A. S. Nair(2014), “On global energy scenario, dye-sensitized solar cells and the promise of nanotechnology”,*Chem. Phys.* 16 6838.
- [11] Gratzel M(2009);” Recent advances in sensitized mesoscopic solar cells”.  
*Accounts of Chemical Research* 42(11):1788–98.
- [12] J. Etula, (2012)”Comparison of three Finnish berries as sensitizers in a dyesensitized solar cell,” *European Journal for young scientists and Engineers*, vol.1, pp. 5-23,
- [13] Huang SY, Schlichthorl G, Nozik AJ, Gratzel M, Frank AJ(1997).” Charge recombination in dye-sensitized nanocrystalline TiO<sub>2</sub> solar cells”. *Journal of Physical Chemistry B*:101 (14):2576–82.
- [14] Nazeeruddin MK, Baranoff E, Grätzel M (2011). “Dye-sensitized solar cells: a brief overview”. *Solar Energy*; 85: 1172–8.
- [15] G. Khelashvili, S. Behrens, C. Weidenthaler et al (2006). “Catalytic platinum layers for dye solar cells: a comparative study,” *ThinSolid Films*, vol. 511-512, pp. 342–

348.

- [16] Hagfeldt A, Graetzel M. (1995) "Light-induced redox reactions in nanocrystalline systems." *Chemical Reviews* (United States);95:1.
- [17] L. Andrade, H. A. Ribeiro, and A. Mendes, (2011) "Dye-sensitized solar cells: an overview," in *Encyclopedia of Inorganic and Bioinorganic Chemistry*, pp. 1–20,
- [18] B. E. Hardin, H. J. Snaith and M. D. McGehee (2012). "The renaissance of dye-sensitized solar cells," *Nature photonics*, vol. 6, pp. 162-169,
- [19] M. Gratzel. (2004)" Conversion of sunlight to electric power by nanocrystalline dyesensitized solar cells," *Journal of Photochemistry and Photobiology: Chemistry*. vol. 164, no. 1-3, pp. 3-14,
- [20] Grätzel M (2003). "Dye-sensitized solar cells. Journal of Photochemistry and Photobiology" *Photochemistry Reviews*;4(2):145–53
- [21] T. Markvart (editor), (2000). *Solar Electricity (2nd edition)*, Wiley, Chichester
- [22] M.D. Archer and R. Hill (editors), (2000)" Clean electricity from photovoltaics", *Imperial College Press*
- [23] Toivola, M.; Miettunen, K.; Halme, J.; Lund, P., NSTI Nanotech - The Nanotechnology Conference and Trade Show, Boston, U.S.A, June 1-5., *Technical Proceedings of the CTSI Clean Technology and Sustainable Industries Conference and Trade Show*, pp. 96-99 (2008)
- [24] X. Zhi, G. Zhao, T. Zhu, Y. Li, (2008)" The morphological, optical and electrical properties of SnO<sub>2</sub>:F thin films prepared by spray pyrolysis", *Surf. Interface Anal.* 40 67–70.
- [25] R. Riveros, E. Romero, G. Gordillo (2006), "Synthesis and characterization of highly transparent and conductive SnO<sub>2</sub>:F and In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Sn thin films deposited by spray pyrolysis", *Braz. J. Phys.* 36 1042–1045.
- [26] E. Elangovan, M.P. Singh, K. Ramamathi(2004)," Studies on structural and electrical properties of spray deposited SnO<sub>2</sub>:F thin films as a function of film thickness", *Mater. Sci. Eng. B* 113 143–148.
- [27] F.A. Garcías, N. Budini, R.R. Koropecki, R.D(2013)." Structural mosaicity and electrical properties of pyrolytic SnO<sub>2</sub>:F thin films", *Thin Solid Films*
- [28] A.V. Moholkar, S.M. Pawar, K.Y. Rajpure, C.H. Bhosale *India*(2006)," Effect of concentration of SnCl<sub>4</sub> on sprayed fluorine doped tin oxide thin films", *Electrochemical Materials Laboratory, Department of Physics, Shivaji University, Kolhapur 416004*,



- [29] M. K. Nazeeruddin, A. Kay, I. Rodicio, R. Humphry-Baker, E. Muller, P. Liska, N. Vlachopoulos, and M. Gratzel. (1993) " *J. Am. Chem. Soc.*, 115:193.
- [30] A. Jana, P. P. Das, Shruti A. Agarkar, P. Sujatha Devi, (2014) " A Comparative Study on the Dye Sensitized Solar Cell Performance of Solution Processed ZnO", *Solar Energy*, 102, 143-151
- [31] B. Mishra, D. Khushalani, (2014) " Novel Precursors for Anatase Nanorods and their Application in DSSCs". *Materials Chemistry & Physics*.
- [32] Q. Q. Zhang, C.S. Dandeneau, X. Zhou, and G Cao (2009), "ZnO Nanostructures for Dye-Sensitized Solar Cells," *Adv. Mater.*, vol. 21, pp.4087–4108,
- [33] T. M. El-Agez, A. El Tayyan, Al-Kahlout, A. Taya S. Abdel-Latif(2012), " Dye-Sensitized Solar Cells Based on ZnO Films and Natural Dyes," *International Journal of Materials and Chemistry*". vol. 2, no. 3 pp. 105-110,
- [34] Q. Zhang, G. Cao, (2011) " Nanostructured photoelectrodes for dyesensitized solar cells," *Nano Today.*, vol. 6, pp. 91—109
- [35] Nakamura, Y, (2006) "Solution-growth of Zinc Oxide nanowires for dye-sensitized solar cells", *NNIN REU2006 Research Accomplishments*, 74.
- [36] Yang, W., Wan, F., Chen, S. and Jiang, C. "Hydrothermal growth and application of ZnO nanowire films with ZnO and TiO<sub>2</sub> buffer layers in dye-sensitized solar cells", *Nanoscale Res Lett.*, **4**, 1486-1492. (2009),
- [37] Du Pasquier, A., Chen, H.H. and Lu, Y.C. (2006), "Dye-sensitized solar cells using well-aligned Zinc Oxide nanotip arrays", *Appl. Phys. Lett.* **89**, 253513
- [38] Chao, H.Y., Cheng, J.H., Lu, J.Y., Chang, Y.H., Cheng, C.L. and Chen, Y.F. (2010) "Growth and characterization of type-II ZnO/ZnTe core-shell nanowire arrays for solar cell applications", *Superlattice and Microstructures*, **47(1)**, 160-164.
- [39] Lin, J., Penchev, M., Wang, G., Paul, R.K., Zhong, J., Jing, X., Ozkan, M. and Ozkan, C.S. (2010) "Heterogeneous graphene nanostructures: ZnO nanostructures grown on large-area graphene layers", *Small*, **6(21)**, 2448-2452.
- [40] Peng, Q. and Qin, Y, China. (2011). "ZnO nanowires and their application for solar cells", *Nanchang*, 330063.
- [41] Fang, Y., Pang, Q., Wen, X., Wang, J. and Yang, S. (2006), "Synthesis of ultrathin ZnO nanofibers aligned on a Zinc substrate", *Small*. **2(5)**, 612-615.
- [42] Law, M., Greene, L.E., Johnson, J.C., Saykally, R. and Yang, P. (2005), "Nanowire dyesensitized solar cells", *Nature Materials.*, **4(6)**, 455-459.

- [43] Jennings, J.R., Ghicov, A., Peter, L.M., Schmuki, P. and Walker, A.B. (2008), “Dye-sensitized solar cells based on oriented TiO<sub>2</sub> nanotube array: transport, trapping and transfer electrons”, *J. Am. Chem. Soc.* **130**, 13364.,
- [44] Brian, O.R. and Michael, G. (1991), “A low-cost, high-efficiency solar-cell based on dye sensitized colloidal TiO<sub>2</sub> films”, *Nature*, **353**, 737-740..
- [45] Benkstein, K.D., Kopidakis, N., Lagemaat, J.V. and Frank, A.J. (2003), “Influence of the percolation network geometry on electron transport in dye-sensitized titanium dioxide solar cells”, *J. of Physica Chem. B.*, **107**(31), 7759-7767.1
- [46] Michael, G. (2000), “Perspectives for dye-sensitized nanocrystalline solar cells”, *Progress in Photovoltaics Research and Applications*, **8**(1), 27-38.:
- [47] Tributsch, H. (1972), “Reaction of excited chlorophyll molecules at electrodes and in photosynthesis”, *Photochem. Photobiol.*, **16**, 261-269.
- [48] Tributsch, H. and Calvin, M. (1971), “Electrochemistry of excited molecules: photoelectrochemical reactions of chlorophylls”, *Photochem. Photobiol.* **14**, 95-112.
- [49] Tubtimtae, A. and Lee, M. (2012), “ZnO nanorods on undoped and indium-doped ZnO thin films as a TCO layer on nonconductive glass for dye-sensitized solar cells”, *Superlattices and Microstructures*, **52**(5). 987-996.
- [50] Zhang, Q., Dandeneau, C.S., Zhou, X. and Cao, G. (2009), “ZnO nanostructures for dye-sensitized solar cells”, *Adv. Mater.*, **21**, 4087-4108.
- [51] Suliman, A.E., Tang, Y.W. and Xu, L. (2007), “Preparation of ZnO nanoparticles and nanosheets and their application to dye-sensitized solar cells”, *Sol. Energ. Mat. Sc.*, **91**, 1658.
- [52] Akhtar, M.S., Khan, M.A., Jeon, M.S. and Yang, O.B. (2008), “Controlled synthesis of various ZnO nanostructured materials”, *Electrochim. Acta*, **53**, 7869.
- [53] A. Al-Hajry , Ahmad Umar , Y.B. Hahn , D.H. Kim.( 2009), “Growth, properties and dye-sensitized solar cells – applications of ZnO nanorods grown by low-temperature solution process “0749-6036
- [54] M. K. Patra, K. Manzoor, M. Manoth, V. S. Choudhry, S. R. Vadera, N. Kumar, (2008).” Optically transparent colloidal suspensions of single crystalline ZnO quantum dots prepared by simple wetchemistry,” *Journal of Optoelectronics and advanced materials*, vol. 10, no. 10, pp. 2588 – 2591
- [55] M. Gloeckler, I. Sankin, Z. Zhao (2013), *IEEE Journal of Photovoltaics*, **3** , 1389–1393.

- [56] H.S. Ullal, (2013) "*Polycrystalline Thin Film Solar Cell Technologies*". *National Renewable Energy Laboratory Colorado U.S.A.*
- [57] S. Gupta, (2006), *Understanding Of Nano Science And Technology*, Global Vision Publishing Ho.
- [58] R. Poa, C. Carboneraa, A. Bernardia, F. Tintib, N. Camaioni, *Solar Energy Materials an Solar Cells*, (2012),100, 97-114..d
- [59] G. Thomas, (1972) *Transmission Electron Microscopy of Metals*, John Wiley & Sons., New York, 274
- [60] X. Z. Li,(2004), *Ultramicroscopy*, 99, 257
- [61] I. Chung, B. Lee, J. He, R. P. H. Chang , M. G. Kanatzidis, *Nature* , (2012), 485, 486
- [62]A.V. Moholkar, S.M. Pawar, K.Y. Rajpure, S.N. Almari, P.S. Patil, C.H. Bhosale, (2008) Solvent-dependent growth of sprayed FTO thin films with mat-like morphology”, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 92 1439–1444.
- [63] X. Zhi, G. Zhao, T. Zhu, Y. Li, (2008), The morphological, optical and electrical properties of SnO<sub>2</sub>: F thin films prepared by spray pyrolysis, *Surf. Interface Anal.* 40.67–70.
- [64]<http://.dow.com/webapps/lit/litorder.asp>
- [65] <http://ncbi.nlm.nih.gov>

## **Abstract:**

In a wide range in solar cells and collectors, human being is in the process of doing industrial and exploratory projects, due to the imperious requirement to substitute the energy emitted from fossil fuels by renewal and new energies like solar energy. Fixed prices and the technology of establishing cells are effective parameters in selecting solar cells. That aims, therefore, to reduce the fixed price and simplicity of the applied technology in the process of establishing. Recently, thus, the pigmented cells have undergone considerable attention and the researchers are trying to obtain the mass-production of these cells by cheaper materials and simpler processes. Using polymeric pigments recently, for instance, has undergone considerable attention.

This thesis aimed to reduce the cost of these cells production by the help of Nano technology and more inexpensive structures, in comparison with the existing materials applied in pigmented cells. Accordingly, Zinc oxide nano rods were used to establish dye-sensitized solar cells as photo anode. Due to the existence of various structures which can get by relatively easier ways, Zinc Oxide are more available and cheaper than  $\text{TiO}_2$ . Moreover, more rapid transferring of electron and the reduction of recombination of pair electron-hole is possible due to the similarities of the band gap and the band edge of zinc oxide conduction with  $\text{TiO}_2$  Anatase phase and high sensitivity of ZnO to  $\text{TiO}_2$ , but the time presence of Nano structured zinc oxide was declined in pigments environment due to the Zinc Oxide relatively weak chemical stability in pigment environment than  $\text{TiO}_2$ . Nano structured zinc oxide were chosen as a proper alternatives, due to all these features, for substituting by Titanium dioxide, and they were lionized by the pigmented solar cells researchers.

This thesis has done a comparison between the photo anode stability duration of pigmented solar cells produced by Dr. Blade's relatively cheap and easy method, and zinc oxide rods in the N719 pigmented solution, and between the times effecting of re-sintering on Nano zinc oxide rods. Finally, photovoltaic parameters of established solar cells in the presence of direct sunlight under climate conditions and various times of the day in Shahrood were measured, also in the presence of solar simulator along 1.5 AM G solarization range, and their Current -voltage curve was delineated. Accordingly, established pigmented solar cell by Nano zinc oxide rods by sintering  $400^\circ\text{C}$  temperature and the 6 hours durability in dye, was allocated the highest efficiency of 0.68%, after 2 month of the cell production time.

Moreover, some studies were conducted on the resistance reduction and transparency amplification of FTO sub-layer which was used as a context in DSSC. By building several FTO sub-layers along various precursors such as  $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{SnCl}_4$  and checking their resistance and transparency, best module was determined to use in DSSC. A comparison was done on the amount of the modules resistance and transparency, according to the similarity of both modules crystallinity. Established sub-layers by  $\text{SnCl}_4$  have less electric resistance than  $\text{SnCl}_2$ , but the transparency of the  $\text{SnCl}_2$  module was better than.  $\text{SnCl}_4$  is the proper module, in cases where resistance is an effective parameter than transparency, for using in DSSC. And it can be used as sub-layers of solar cells.

Key words: Dye-sensitized solar cell, Nano- structures, Zinc oxide nano rods, FTO



**Shahrood University of Technology**

**Faculty of Physics**

**MSc Thesis in NanoPhysics**

**Low Cost Nano-Structured Materials for Optimization of Solar  
Using Cells Operations**

**By: Samira Gerivani**

**Supervisor:**

**Hamid Haratizadeh**

**September 2016**