



# مقدار بهینه طول نانومیله‌های اکسید روی ساخته شده به روش سل-ژل و هیدروترمال مورد استفاده در سلول‌های خورشیدی فتوالکتروشیمیایی

امین جمشیدی<sup>۱</sup>، ارغوان کاظمی<sup>۲</sup>، روزبه سیاوش مؤخر<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد مهندسی مواد، گرایش شناسایی و انتخاب مواد مهندسی

<sup>۲</sup> دکتری تخصصی مواد پیشرفته، استادیار دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات و

فناوری، مدیر گروه مواد غیرفلزی و حفاظت

<sup>۳</sup> دکتری مهندسی مواد، استادیار سابق پژوهشگاه نیرو، پژوهشگر دانشکده مهندسی

پزشکی دانشگاه مک گیل کانادا



نویسنده مسئول و نویسنده اول:

مهندس امین جمشیدی

دکتر ارغوان کاظمی

دکتر روزبه سیاوش مؤخر

نوع مقاله: پژوهشی

صفحه‌های: ۴۲ تا ۴۹

شاپا چاپی: ۱۷۳۵-۳۳۵۱

شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۳۰۹۷

زبان نشریه: فارسی

دسترس پذیر در نشانی:

www.JICERS.ir

تاریخ دریافت:

۱۴۰۱/۰۸/۰۸

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۲/۰۱/۳۰

DOR: 20.1001.1.17353351.1401.18.0.8.4

**چکیده:** در این تحقیق، فرآیند رشد و مقدار بهینه طول نانومیله‌های اکسید روی به عنوان نیمه‌رسانای مورد استفاده در سلول‌های خورشیدی فتوالکتروشیمیایی به روش سل-ژل و هیدروترمال مورد بررسی قرار گرفته است. این نانوساختارها با داشتن شکاف انرژی مناسب، حین دریافت نور خورشید سبب انجام فرآیند جدایش آب به عناصر سازنده آن، هیدروژن و اکسیژن می‌شوند.

بیشترین مقدار رشد نانومیله‌ها با زیر لایه FTO و حلال آب دیونیزه، دمای رشد ۹۵ درجه سانتی‌گراد و زمان رشد ۳ ساعت محقق گردید که طول نانومیله‌های رشد یافته ۱۵۰۰ نانومتر بود و بیشترین نسبت طول به عرض  $L/W$  با مقدار ۱۵ برابر در این شرایط به دست آمد. در مرحله نهایی نیز آزمون‌های فتوالکتروشیمیایی و تاثیر طول نانومیله‌ها بر فرآیند جدایش آب مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمون‌های فتوالکتروشیمیایی نشان می‌دهد که مقداری بهینه برای طول نانومیله‌ها وجود دارد. بهترین نتایج فتوالکتروشیمیایی با نسبت طول به عرض  $L/W$  با مقدار حداکثر ۱۰ برابر و با طول نانومیله‌های حداکثر تا ۱۰۰۰ نانومتر که طی مدت ۲ ساعت و دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد رشد داده شد، به دست آمد.

کلمات کلیدی: نانومیله، اکسید روی، جدایش آب، سل-ژل، فتوالکتروشیمیایی، نیمه رسانا.

## ۱- مقدمه

بزرگ‌ترین چالش موجود در توسعه استفاده از انواع مختلف سلول‌های خورشیدی، مسئله ذخیره انرژی تولید شده و همچنین بازدهی نهایی سلول‌های خورشیدی است که به کاهش مسئله هزینه به زمان منجر می‌شود. در هر کدام از انواع مختلف سلول‌های خورشیدی، عوامل تاثیرگذار مختلفی بر بازده نهایی سلول خورشیدی تاثیرگذار خواهند بود. یافتن عوامل اثرگذار و همچنین مقادیر بهینه هر یک از این پارامترها می‌تواند در پیشبرد و فراگیر شدن این فناوری و گسترش استفاده از آن اثرگذار باشد. نانومیله‌های اکسید روی به عنوان یکی از مهم‌ترین نیمه رساناها در زمینه ساخت سلول‌های خورشیدی هستند. از کاربردهای این



نانوساختارها می‌توان به پوشش به عنوان سطح جلوگیری کننده از بازتاب در سلول‌های خورشیدی نسل اول و یا استفاده از نانو میله‌های اکسید روی به عنوان عامل جذب نور خورشید و استفاده از آن برای انجام فرآیند جدایش آب در سلول‌های خورشیدی فتوالکتروشیمیایی نام برد. نور خورشید انرژی کافی برای ایجاد جدایش بین اکسیژن و هیدروژن را دارد، اما با توجه به ماهیت شفاف آب، این فرآیند به طور خودکار رخ نمی‌دهد و نانومیله‌های اکسید روی در این زمینه کاربرد دارند [۱].

تولید هیدروژن از نور خورشید از طریق چهار روش انجام می‌گیرد که شامل فرآیندهای حرارتی، الکتریکی، بیولوژیکی و نوری است [۲].

به دلیل اینکه هیدروژن قابلیت تولید به طور مستقیم به روش جدایش از آب به وسیله نور خورشید را دارد، تجزیه آب به روش فتوالکتروشیمیایی (Photoelectrochemical (PEC)) یا Photocatalytic Water Splitting (PWS) بسیار مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. در همین رابطه، موادی که حساس به نور بوده و به عنوان جاذب انرژی خورشیدی عمل می‌کنند، برای استفاده به عنوان فتوالکترودهایی که وظیفه جذب نور و تجزیه آب و تبدیل انرژی خورشیدی به انرژی شیمیایی را با هدف تولید هیدروژن دارند کاربرد خواهند داشت [۳].

اکسیدهای فلزی نیمه رسانا به دلیل ویژگی‌های خاص از بهترین مواد مورد مطالعه برای استفاده در این فرآیند هستند [۴]. این ویژگی‌های عبارتند از:

- ۱\_ سهولت تولید (سنتز) نانوساختارهای صفر بعدی، یک بعدی و دو بعدی
  - ۲\_ شکاف انرژی مناسب و هماهنگ با پتانسیل کاهش و اکسایشی آب جهت تجزیه
  - ۳\_ مقاومت به تجزیه در محلول‌های آبی (برای کاربرد بلند مدت تجاری ضروری است).
  - ۴\_ قابلیت هدایت الکتریکی بالا
  - ۵\_ قابلیت تبلور بالا با کم‌ترین میزان عیوب
- از اکسیدهای فلزی نیمه‌رسانای معروف که در صنعت فتوولتائیک (PV) و فتوالکتروشیمیایی (PEC) کاربرد داشته و به طور گسترده مورد استفاده و مطالعه قرار گرفته‌اند می‌توان به اکسید روی (ZnO) و دی‌اکسید تیتانیوم (TiO<sub>2</sub>)، دی‌اکسید تیتانیوم آلیاژ شده با نیتروژن (TiO<sub>2</sub>:N) و تری‌اکسید تنگستن (WO<sub>3</sub>) اشاره کرد. مطالعات نشان می‌دهد که خواص حامل‌های شارژ نانوساختارهای اکسیدهای فلزی مثل نانوذرات و نانومیله‌ها در سلول‌های فتوالکتروشیمیایی از خواص لایه‌های نازک اکسید فلزی که به شیوه‌های سنتی اعمال می‌شد برترند. برای تولید هیدروژن به روش فتوالکتروشیمیایی، ویژگی‌هایی چون ساختار کریستالی، مورفولوژی، تخلخل و پارامترهای سطحی نقش مهم و تاثیرگذاری در بازده نهایی سلول فتوالکتروشیمیایی دارند [۳] و [۵].
- نتایج مطالعات سال‌های اخیر نشان داده است که مواد نانوساختار اکسید روی به عنوان یک نیمه‌رسانای پر کاربرد با خواص بسیار مطلوب، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. اکسید روی یک گاف نواری پهن و مستقیم (eV ۳/۳۷) و انرژی بستگی اکسایتونی بالا (در حدود ۶۰ meV) در دمای اتاق دارد که این خواص منحصر به فرد، نانوساختارهای اکسید روی را به عنوان یک کاندیدای مهم برای کاربردهای متنوعی چون حسگرهای گاز، الکترونیک، اپتیک، فوتونیک، تصفیه آب و از جمله در سلول‌های فتوالکتروشیمیایی معرفی می‌کند [۶] و [۷].

همچنین به علت حضور اکسیژن در ساختار اکسیدروی، تعداد بسیار زیادی جای خالی در سطح اکسیدروی وجود دارد که سبب تعامل زیاد بین مولکول‌های آب و اکسید روی برای مقاصد مربوطه می‌گردد [۸].

روش‌های متنوعی برای تولید نانوساختاری اکسید روی وجود دارد که بر پایه تولید در محلول و یا تولید از فاز گازی هستند. روش تولید از فاز محلول عمدتاً بر پایه حلال آب انجام می‌گیرد. در میان روشهای مرسوم برای تولید نانوساختارهای اکسیدروی، روش‌های تولید از فاز گازی و تولید از فاز آبی بسیار مورد توجه هستند. در این تحقیق ساخت نانومیله‌ها به روش سل-ژل و هیدروترمال به عنوان روش اصلی مدنظر قرار گرفت. این انتخاب به دلیل سرعت بالا در تولید و قابل کنترل بودن شرایط رشد و همچنین دمای پائین مورد نیاز برای رشد که در این روش پائین‌تر از دمای جوش آب است انتخاب گردید.

علت انتخاب اکسید روی ZnO به عنوان ماده نیمه رسانا برای فرآیند شکافت آب، پایداری، هدایت‌پذیری، غیرسمی بودن، انرژی

اکسیتونی بالا است. شایان ذکر است که تحرک الکترونی بسیار بالاتر از  $\text{TiO}_2$  نیز که به عنوان اولین ماده برای فرآیندهای فتوالکتروشیمیایی استفاده شده است، باعث شده که اکسید روی ماده نیمه‌رسانای بسیار مناسبی برای ساخت سلول‌های خورشیدی فتوالکتروشیمیایی باشد. به علاوه، مقادیر لبه‌های نوار ظرفیت و هدایت اکسید روی، نیازهای اساسی فرآیند شکافت آب را از نظر واکنش‌های اکسایش  $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2$  و کاهش  $\text{OH}^-/\text{O}_2$  فراهم می‌آورد [۹].

در این تحقیق، بررسی عوامل تاثیرگذار بر رشد نانومیله‌های اکسید روی و مقدار بهینه طول آن‌ها در سلول‌های خورشیدی فتوالکتروشیمیایی و نحوه اثرگذاری این پارامترها بر بازده نهایی این سلول‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- مواد و روش تحقیق

فرآیند کلی آزمایش‌ها برای به نتیجه رسیدن اهداف این پژوهش، شامل شش مرحله اصلی است. مرحله اول شامل تمیز کردن شیشه‌ها و زدودن آن‌ها از هر نوع آلودگی با استفاده از دستگاه اولتراسونیک بود. مرحله دوم تولید محلول سل برای هسته‌گذاری به روش غیردرجا جهت ایجاد بستر مناسب برای رشد نانومیله‌ها و مرحله سوم نیز هسته‌گذاری نمونه‌ها با این روش بود. مرحله چهارم و پنجم نیز به تهیه محلول رشد و رشد نانومیله‌ها در اتوکلاو اختصاص داشت. در مرحله نهایی آزمایش‌ها و سنجش‌های مربوط به اندازه‌گیری خواص نوری و الکتروشیمیایی مرتبط انجام گرفت. مواد اولیه مورد نیاز برای انجام آزمایش‌ها شامل استون صنعتی و آب دیونیزه  $\text{DI}^1$  برای مراحل شستشو و اتانول آمین<sup>۲</sup>، دی‌متوکسی اتانول<sup>۳</sup> و استات روی دوآبه<sup>۴</sup> برای تهیه محلول سل مورد نیاز برای مرحله هسته‌گذاری نمونه‌ها و همچنین متان آمین<sup>۵</sup> و نترات روی<sup>۴</sup> آبه<sup>۶</sup> برای تهیه محلول رشد است که شرح مواد و فرمول شیمیایی آن‌ها در جدول شماره ۱ آمده است.

جدول ۱: مواد شیمیایی مورد استفاده برای هسته‌گذاری و رشد

نام ماده	فرمول شیمیایی
اتانول آمین Ethanolamine	$\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$
دی متوکسی اتانول Ethylene glycol Monomethyl ether	$\text{CH}_3\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$
متان آمین Methenamine	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4$
استات روی دوآبه Zinc acetate dehydrate	$\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
نترات روی ۴ آبه Zinc nitrate tetrahydrate	$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$

تعداد ۳ نمونه از شیشه  $\text{FTO}^7$  با ابعاد  $۱/۵ \times ۳$  سانتی‌متر برای رشد نانومیله‌ها در نظر گرفته شد. پس از شستشوی زیرلایه‌ها، اولین مرحله در انجام این تحقیق تهیه محلول جهت لایه‌نشانی و هسته‌گذاری زیر لایه‌ها است. روش هسته‌گذاری با استفاده از دستگاه Spin-Coating یک روش لایه نشانی موثر برای نشان دادن لایه‌های یکنواخت بر روی سطوح است. در این روش نمونه‌ها با استفاده از نیروی گریز از مرکز، به صورت قطره‌ای لایه نشانی شده و در اثر این چرخش یک لایه بسیار نازک از ماده‌ی مورد نظر بر روی سطح زیرلایه نشاندن می‌شود. در مرحله هسته‌گذاری، مطابق با نتایج تحقیقات Guo و همکاران [۱۰] تهیه محلول به این صورت انجام شده است که استات روی دوآبه (زینک استات دی‌هیدرات)  $(\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$  در محلول حاوی

<sup>1</sup> Deionized water

<sup>2</sup> Ethanolamine

<sup>3</sup> Ethylene glycol Monomethyl ether

<sup>4</sup> Zinc acetate dehydrate

<sup>5</sup> Methenamine

<sup>6</sup> Zinc nitrate tetrahydrate

<sup>7</sup> Fluorine-doped Tin Oxide



اتانول آمین ( $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$ ) و دی‌متوکسی اتانول ( $\text{CH}_3\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$ ) حل می‌شود. غلظت استات روی  $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$  و اتانول آمین در محلول حاصل ۰/۷۵ مولار است. محلول مورد نظر برای مدت زمان ۳۰ دقیقه در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد هم‌زده (Agitate) می‌شود تا یکنواخت گردد. از این محلول برای پوشش‌دهی و هسته‌گذاری سطح شیشه‌های FTO استفاده می‌گردد. محلول پوشش‌دهی کلونی‌دهی به وسیله سمپلر (میکروبییت) با حجم ۲۰۰ میکرولیتر بر روی نمونه‌ها با قطع  $3 \times 1/5 \text{ cm}^2$  در دستگاه Spin-Coater در حین چرخش با سرعت ۴۰۰۰ rpm چکانده می‌شود. در مرحله بعد و برای رشد نانومیله‌ها با توجه به نمونه آزمایش‌های مشابه و مقرون به صرفه بودن مواد اولیه، از نیترات روی ۴ آبه (zinc nitrate Tetrahydrate) برای رشد نانومیله‌ها به جای نیترات روی استفاده گردید. برای تهیه محلول رشد با غلظت ۰/۱ مول بر لیتر در حجم ۴۰ میلی لیتر ابتدا مقدار ۱/۰۴ گرم نیترات روی ۴ آبه را به آب دیونیزه اضافه و به مدت ۱۰ دقیقه با دور ۵۰۰ rpm در دستگاه استیرر هم زده شد. سپس مقدار ۰/۵۶ گرم متان آمین اضافه شد که بلافاصله ژل تشکیل گردید که مجدداً به مدت ۵ دقیقه با دور ۵۰۰ rpm هم زده شد و سپس جهت انجام مراحل رشد نانومیله‌ها بر روی شیشه زیر لایه در داخل اتوکلاو قرار داده شد. در میان نمونه‌های رشد یافته، سه نمونه با کد F91، F92، و F93 برای انجام آزمون‌های بعدی انتخاب گردید که برای رشد نمونه‌ها در دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد و در زمان به ترتیب ۱ ساعت، ۲ ساعت و ۳ ساعت بود. مشخصات نمونه‌های مورد آزمایش در جدول شماره ۲ شرح داده شده است.

جدول ۲: کد و مشخصات نمونه‌های مورد آزمایش

کد نمونه	دما (°C)	زمان (H)
F91	۹۵	۱ ساعت
F92	۹۵	۲ ساعت
F93	۹۵	۳ ساعت

### ۳- انجام آزمون‌ها و سنجش‌های مربوطه

برای انجام آزمایش‌های شناسایی و سنجشی، نمونه‌های آماده‌سازی شده توسط آزمون پراش‌سنجی اشعه ایکس XRD جهت شناسایی نانوذرات سنتز شده، با استفاده از دستگاه PANalytical X'Pert PRO MPD با ولتاژ ۴۰ Kv و شدت جریان ۴۰ mA با استفاده از پرتو  $\text{CuK}\alpha$  مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین نمونه‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM بررسی شدند. برحسب نوع آزمون تصویرگیری از نمونه‌ها توسط آشکار سازهای BSE و SE در بزرگنمایی‌های مختلف توسط میکروسکوپ EFI ESEM QUANTA 200 انجام شد. همچنین برای سنجش میزان واکنش نمونه‌ها به نور، آزمون فتوالکتروشیمیایی PEC<sup>۱</sup> کروئومپرمتری<sup>۲</sup> در آزمایشگاه انرژی‌های پاک دانشگاه صنعتی شریف انجام گرفت. برای انجام این آزمایش، از لامپ زنون (Xe) مدل EX-4000P مجهز به فیلتر IR<sup>۳</sup> که مجهز به سیستم سه الکترودی Ag/AgCl و (Pt) بود استفاده گردید. توان خروجی این سیستم مشابه نور خورشید و به مقدار  $100 \text{ mW/cm}^2$  است. آزمون با اعمال پتانسیل ثابت ۰/۴۷ V به الکترودها در دو شرایط اعمال نور و بدون اعمال نور انجام گرفت. برای الکترولیت مورد نیاز برای انجام آزمون طیف‌سنج امپدانس الکتروشیمیایی، محلول ۰/۱ مولار سولفات سدیم  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  انتخاب گردید.

### ۴- نتایج

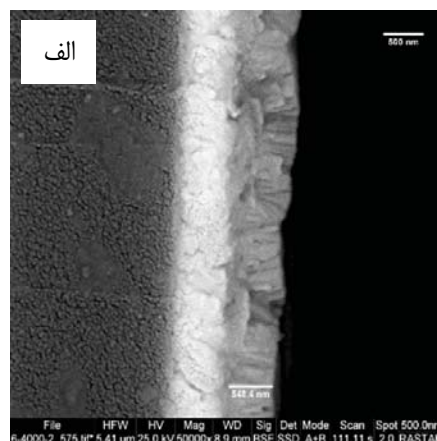
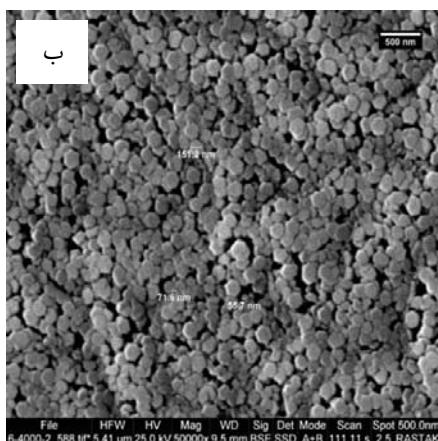
نتایج آزمون SEM نشان از رشد نانومیله‌های اکسیدروی با طول متفاوت بر سطح زیرلایه دارد. اولین نمونه مورد بررسی، نمونه شماره F91 بود. این نمونه جهت رشد نانومیله‌ها در اتوکلاو قرار گرفت و با زمان رشد یک ساعت و دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد در داخل آن حرارت‌دهی شد. مطابق شکل ۱، نانومیله‌های اکسیدروی با طول تقریبی ۵۰۰ nm در تصویر SEM نمای جانبی مشاهده می‌شود.

<sup>1</sup> Photoelectrochemical

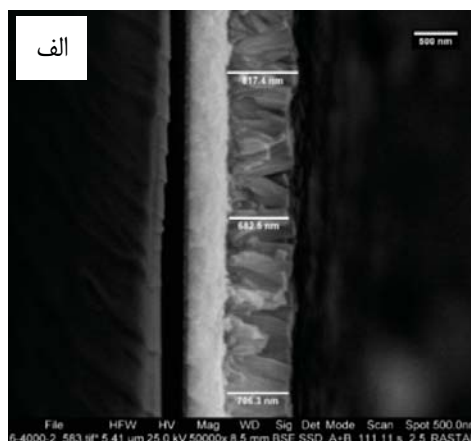
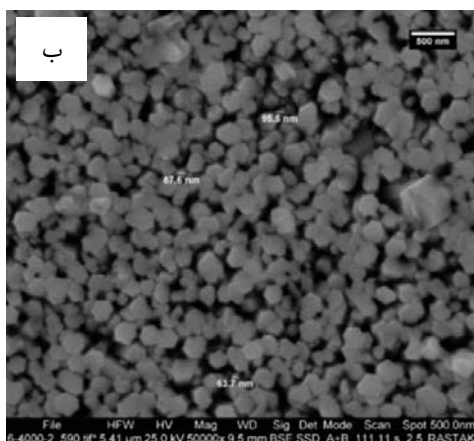
<sup>2</sup> Chrono Amperometry

<sup>3</sup> Infrared

همچنین در نمای از بالا در همین نمونه سطح مقطع نانوميله‌ها با ساختار شش ضلعي ورتزيت مشاهده مي‌شود. با ثابت نگاه داشتن دماي رشد، و افزايش زمان رشد به ۲ ساعت، طول نانوميله‌ها هم در نمونه شماره F92 افزايش يافت (شکل ۲) و ساختار منظم، متراکم و رشد يافته‌تری از نانوميله‌های اکسيد روی را در نمای از بالا نشان می‌دهد. بیش‌ترین طول نانوميله‌های اکسيد روی در نمونه شماره F93 (شکل ۳) مشاهده گردید که با افزايش زمان رشد به ۳ ساعت به مقدار تقریبی ۱۵۰۰ نانومتر افزايش يافته است. مطابق تصوير SEM از مقطع عرضی نمونه شماره F93 در شکل ۳، نانوميله‌های اکسيد روی به مقدار زيادی رشد کرده و از تراکم ساختاری و راستای مناسبی نیز برخوردارند. با توجه به مقادير به دست آمده در این نمونه، نسبت طول به عرض نانوميله‌ها نیز به طور میانگين در حدود ۱۵:۱ است.



شکل ۱: تصوير SEM از نمای جانبی (الف) و نمای از بالا (ب) از نمونه شماره F91



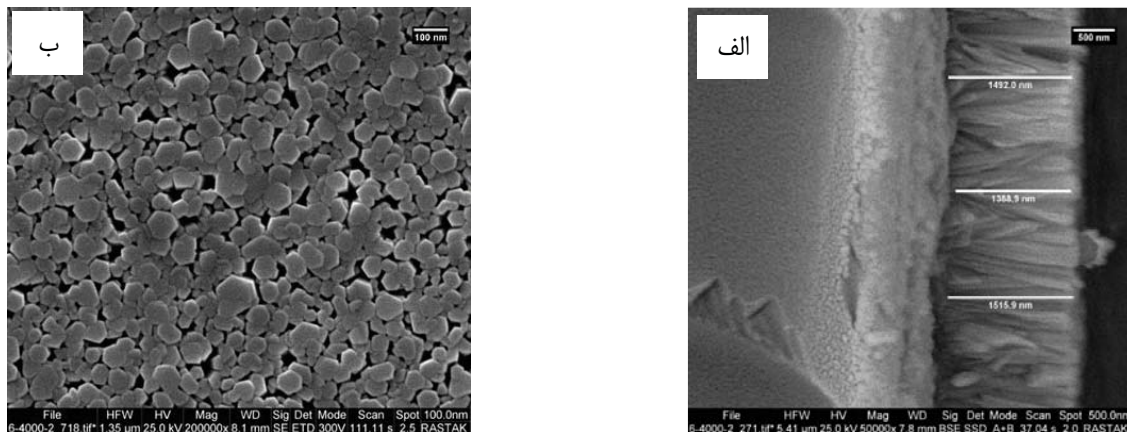
شکل ۲: تصوير SEM از نمای جانبی (الف) و نمای از بالا (ب) از نمونه شماره F92

نتايج نشان می‌دهد که با افزايش زمان رشد، طول نانوميله‌ها به طور معنادار افزايش يافته است که برای کاربردهای مورد استفاده در سلول‌های خورشیدی فتوالکتروشیمیایی مطلوب است. در شکل ۴ نتایج آزمون XRD مشاهده می‌شود که نتایج، با داده‌های کریستالوگرافی استاندارد الگوی مرجع JCPDS 01-070-2551 مطابقت دارد و نشان می‌دهد که ساختارهای رشد یافته نانوميله‌های اکسيد روی هستند. شایان ذکر است علت شناسایی ترکیبات  $\text{SnO}_2$  به دلیل حضور این ترکیب در ساختار شیشه FTO، به عنوان زیرلایه است. برای اندازه‌گیری میزان پاسخ نوری نانوميله‌های رشد یافته و همچنین ارزیابی پایداری نمونه‌ها، آزمون کروموفومتری به این شیوه انجام گرفت که در بازه‌های زمانی معین و با قطع و وصل شدن جریان، تغییر در پاسخ نوری نمونه ها اندازه‌گیری شد. جریان ایجاد شده نشان‌دهنده برانگیختگی الکترون‌ها در اثر تابش نور و جهش آنها از نوار ظرفیت به نوار هدایت

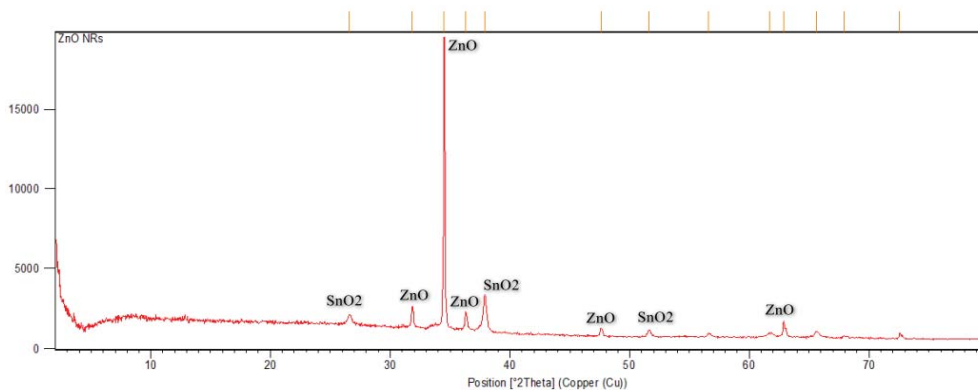




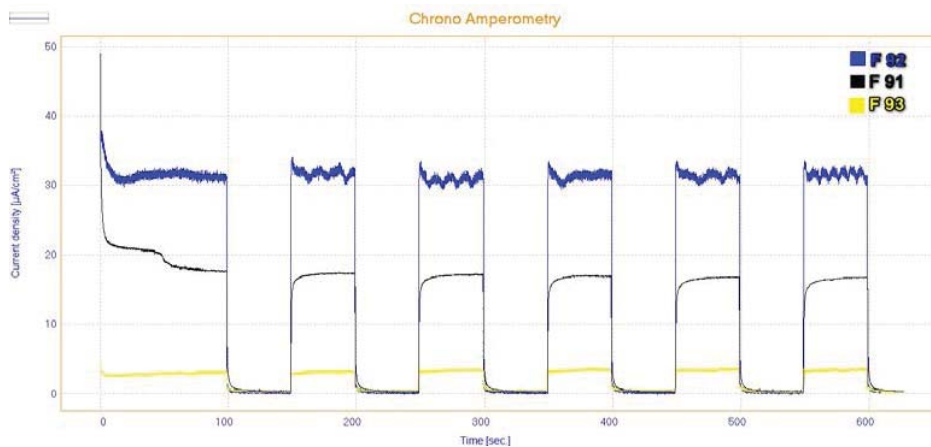
است. مطابق نمودار نمایش داده شده در شکل ۵، با قطع و وصل شدن جریان و نور تابانده شده به سطح نمونه‌ها، مقدار پاسخ نوری هر نمونه با توجه به طول نانومیله‌ها متفاوت است. در تمامی نمونه‌های مورد مطالعه، تغییر در چگالی جریان همزمان با تابیدن نور مشاهده می‌شود که موید پاسخ فتوالکتروشیمیایی در نانومیله‌های رشد یافته بر سطح نمونه‌ها است. همچنین مقادیر مثبت جریان تولید شده نیز حاکی از تشکیل نیمه رسانای نوع n است [۹].



شکل ۳: تصویر SEM نمای جانبی (الف) و نمای از بالا (ب) از نمونه شماره F93 و افزایش طول نانومیله‌ها با افزایش زمان رشد به ۳ ساعت



شکل ۴: نتایج آزمون XRD



شکل ۵: نمودار چگالی جریان بر حسب زمان با اعمال ولتاژ ۰/۴ ولت با الکتروود Ag/AgCl



## ۵- نتیجه‌گیری

نتایج آزمون کروئوآمپرمتری نشان می‌دهد که کم‌ترین چگالی جریان مربوط به نمونه شماره F93 است که بیش‌ترین طول نانومیلها را با طول میانگین ۱۵۰۰ nm دارد. بیش‌ترین مقدار چگالی جریان نیز مربوط به نمونه شماره F92 است که طول نانومیلها در آن حداکثر تا ۱۰۰۰ nm بود. با کمتر شدن طول نانومیلها در نمونه شماره F91، که طول نانومیلها در آن به طور میانگین ۵۰۰ nm بود، از مقدار چگالی جریان کاسته شده است. با توجه به کاربرد نانومیل‌های اکسیدروی به عنوان لایه جاذب نور، به نظر می‌رسد که طول ۵۰۰ nm نانومتری نانومیل‌های رشد یافته در نمونه F91 به اندازه کافی سبب جذب نور و تشکیل جفت الکترون-حفره نمی‌شود. اما با افزایش طول نانومیلها به مقادیر در حدود ۱۰۰۰ nm در نمونه F92 این فرآیند افزایش یافته و در ادامه با افزایش طول نانومیلها به ۱۵۰۰ nm نانومتر در نمونه شماره F93، به دلیل ایجاد موانع ساختاری بیش‌تر در مسیر نفوذ الکترون به الکتروود رسانا موجب باز ترکیب الکترون و در نهایت سبب کاهش چگالی جریان در این نمونه شده است. نتایج پژوهش‌های مشابه در مورد نانومیل‌های CuO هم تأییدکننده وجود یک مقدار بهینه برای طول نانومیلها است که با گذر از آن طول، میزان پاسخ فتوالکتروشیمیایی افت می‌کند [۱۱].

## مراجع

- [1]. Maeda, K. and K. Domen, Photocatalytic water splitting: recent progress and future challenges. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2010. 1(18): p. 2655-2661.
- [2]. Nowotny, J., C. C. Sorrell, L. R. Sheppard, and T. Bak. "Solar-hydrogen: environmentally safe fuel for the future." *International journal of hydrogen energy* 30, no. 5 (2005): 521-544.
- [3]. Jang, Jum Suk, Hyun Gyu Kim, and Jae Sung Lee. "Heterojunction semiconductors: A strategy to develop efficient photocatalytic materials for visible light water splitting." *Catalysis today* 185, no. 1 (2012): 270-277.
- [4]. Vayssieres, Lionel, ed. *On solar hydrogen and nanotechnology*. John Wiley & Sons, 2010.
- [5]. Wolcott, Abraham, Wilson A. Smith, Teyve R. Kuykendall, Yiping Zhao, and Jin Z. Zhang. "Photoelectrochemical study of nanostructured ZnO thin films for hydrogen generation from water splitting." *Advanced Functional Materials* 19, no. 12 (2009): 1849-1856.
- [6]. Baruah, Sunandan, and Joydeep Dutta. "Hydrothermal growth of ZnO nanostructures." *Science and technology of advanced materials* (2009).
- [7]. Dai, Kai, Guangping Zhu, Zhongliang Liu, Qingzhuang Liu, Zheng Chen, and Luhua Lu. "Facile preparation and growth mechanism of zinc oxide nanopencils." *Materials Letters* 67, no. 1 (2012): 193-195.
- [8]. Zhang, Hongyan, Shuguo Yu, Chu Chen, Jun Zhang, Jing Liu, and Peng Li. "Effects on structure, surface oxygen defects and humidity performance of Au modified ZnO via hydrothermal method." *Applied Surface Science* 486 (2019): 482-489.
- [9]. Bakhtiargonbadi, Fatemeh, Hamid Esfahani, Roozbeh Siavash Moakhar, and Fatemeh Dabir. "Fabrication of novel electrospun Al and Cu doped ZnO thin films and evaluation of photoelectrical and sunlight-driven photoelectrochemical properties." *Materials Chemistry and Physics* 252 (2020): 123270.
- [10]. Guo, Min, Peng Diao, Xindong Wang, and Shengmin Cai. "The effect of hydrothermal growth temperature on preparation and photoelectrochemical performance of ZnO nanorod array films." *Journal of Solid State Chemistry* 178, no. 10 (2005): 3210-3215.
- [11]. Masudy-Panah, Saeid, Roozbeh Siavash Moakhar, Chin Sheng Chua, Ajay Kushwaha, Ten It Wong, and Goutam Kumar Dalapati. "Rapid thermal annealing assisted stability and efficiency enhancement in a sputter deposited CuO photocathode." *RSC advances* 6, no. 35 (2016): 29383-29390.



# The Optimum Length of ZnO Nanorods Made by Sol-Gel and Hydrothermal Methods Used in Photoelectrochemical Solar Cells

Amin Jamshidi<sup>1</sup>, Argavan Kazemi<sup>2</sup>, Roozbeh Siavash Moakhar<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Master of Material Science

<sup>2</sup> Assistant professor

<sup>3</sup> PhD Researcher at McGill University

\* amin.jamshidi@srbiau.ac.ir

**Abstract:** In this research, the process of growth and the optimum length of ZnO nanorods has been studied as a subject of semiconductors, that are used in the photoelectrochemical solar cell made by Sol-Gel and Hydrothermal method.

These Nano structures, having suitable gap, cause the decomposition of water into its constructing elements, hydrogen and oxygen.

The most length of nanorods achieved by the FTO sublayer and deionized water solvent, at 95°C growth temperature, while 3 hours growing time, and on these conditions caused the length of nanorods to be 1500 nanometers, with the biggest length to width ratio 15.

Also, at the final stage, photoelectrochemical experiments and the effects of nanorods length to the decomposition of water was studied. The results of photoelectrochemical experiments showed the optimum quantity for nanorods.

The best result of photoelectrochemical has been reached to the maximum ratio of length to width 10, and the maximum length of nanorods 1000 nanometers that has been grown at the temperature of 95°C and during 2 hours.

**Keywords:** ZnO Nanorods, Photoelectrochemical solar Cell, Sol-Gel, Semiconductors, Water Splitting.