

## لایه‌نشانی، مشخصه‌یابی و بررسی خواص الکتریکی نوری لایه نازک نانو ساختار اکسید روی آلاییده شده با منیزیم تهیه شده به روش سل - ژل

ساهره تفاق<sup>۱</sup>، مجتبی گندم‌کار<sup>۲</sup>، علی حیدری مقدم<sup>۳\*</sup>  
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۲۸، ش ص: ۱۲۴-۱۰۷، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۱۰)

### چکیده

اکسید روی (ZnO) به عنوان ماده نیمه‌رسانا با شکاف نواری مستقیم و پهن، اهمیت زیادی در ساخت قطعات الکترونیکی مانند ترانزیستورهای اثرمیدانی و قطعات اپتوالکترونیکی نظیر دیودهای نورگسیل و همچنین آشکارسازی نوری دارد. در این پژوهش با استفاده از لایه‌نشانی به روش سل-ژل، پوشش‌های لایه نازک از اکسید روی آلاییده شده با درصدهای مختلف منیزیم (۰.۶٪، ۰.۸٪، ۱.۰٪) تولید شد. ایجاد لایه نازک به روش پوشش چرخشی بر زیرلایه سیلیکونی (Si/SiO<sub>2</sub>) و همچنین الکتروگذاری از جنس پلاتین بر روی زیرلایه صورت گرفت. به منظور سنتز ماده مذکور، لایه‌های آماده شده به مدت ۶ ساعت در دمای ۵۶۰ °C قرار گرفت. مشخصه‌یابی لایه‌های نازک با استفاده از پراش پرتو ایکس (XRD) و تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) انجام شد. نتایج حاصل از آنالیز تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان دهنده تشکیل نانو ساختار بهم چسبیده گل کلمی شکل است. در بررسی پراش پرتو ایکس نمونه‌ها، فازهای MgO، ZnO، Mg<sup>+2</sup> مشاهده شد. بررسی خواص الکتریکی-نوری نشان داد با افزایش شدت تابش نور، رسانایی الکتریکی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. همچنین با بررسی حساسیت نوری مشاهده شد که در حالت ۰.۶٪ منیزیم حساسیت نوری بیشتر است.

**واژه‌های کلیدی:** منیزیم، اکسید روی، سل - ژل، لایه نازک، خواص فتوالکتریکی.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی برق، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران.

۲- گروه الکترونیک، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی جندی‌شاپور، دزفول، ایران.

۳- گروه مهندسی مواد، مرکز تحقیقات مواد و انرژی، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران.

\*- نویسنده مسئول مقاله: alheidarym@yahoo.com

## پیشگفتار

امروزه استفاده از نانو ساختارها در کاربردهای الکترونیکی و اپتیکی به دلیل ویژگی‌های بی‌نظیرشان، مورد توجه محققین قرار گرفته است. افزایش نیاز به ساخت ساختارهای کاربردی کوچکتر محققین را به سمت مطالعه و تحقیق در مورد نانو ساختارها سوق داده است. نانو ساختارها از لحاظ میکروسکوپی و مورفولوژی ساختار نانو مقیاس دارند. نانو ساختار ZnO ماده‌ای سفید رنگ و دارای شکاف باند بزرگ به اندازه  $3/3\text{eV}$  و تحریک باند  $60\text{meV}$  است. نانو ساختارهای ZnO در طول سال‌های اخیر به خاطر خصوصیات قابل توجه آن برای کاربردهای الکتریکی و فتوالکتریکی مورد توجه قرار گرفته‌اند. کاربردهای متنوع اکسید روی مربوط به مقاوم بودن آن در مقابل میدان‌های شدید الکتریکی، خواص نیمه‌رسانایی و پیزوالکتریک، ظرفیت حرارتی بالا، خاصیت چسبندگی خوب، قدرت پوشش عالی، مقاومت کافی در مقابل پرتوهای ماورای بنفش، داشتن ثابت دی الکتریکی متوسط و ضریب شکست بالای آن است [۱-۵].

با استفاده از روش‌های لایه‌نشانی مختلف و در شرایط ویژه، می‌توان انواع ساختارهای نانوشانه‌ای، نانوحلقه‌ای، نانوفنری، و نانوسیم‌هایی از اکسید روی ایجاد کرد. این نانو ساختارها به دلیل داشتن خاصیت زیست‌سازگاری می‌توانند کاربردهای جدیدی در الکترونیک نوری و بیوالکتریک داشته باشند [۶-۸].

به روش‌های مختلفی مانند سل-ژل، هیدروترمال، رسوب‌دهی شیمیایی و غیره برای تهیه و سنتز نانو ساختارها وجود دارد. در بین این روش‌ها، روش سل-ژل نسبت به روش‌های دیگر مزایایی دارد از جمله: ارزان بودن، دمای پایین واکنش، لایه‌نشانی آسان و کنترل‌پذیری فرآیند. با این روش می‌توان نانو ذراتی با کیفیت بالا (تولید ذرات با اندازه یکسان) و با خلوص بالا تهیه کرد. این فرآیند شامل یک سری واکنش‌های شیمیایی برگشت‌ناپذیر است که در نهایت منجر به تولید محصول نهایی شده و در واقع این واکنش‌ها باعث تبدیل مولکول‌های همگن اولیه به عنوان سل به یک مولکول نامحدود، سنگین و سه‌بعدی پلیمری به عنوان ژل می‌شوند [۹-۱۰].

اکسیدروی لایه نازک اغلب یک نیمه‌رسانای نوع n است. تعداد حامل‌ها و در نتیجه رسانندگی ماده با تابش نور افزایش و مقاومت ویژه آن کاهش می‌یابد. افزودن آلاینده‌های مناسب می‌تواند باعث تغییر شکاف انرژی، تغییر اندازه ذرات در ساختار نهایی و همچنین تغییر ویژگی الکتریکی و نوری اکسید روی گردد. اندازه ذرات، نوع و میزان افزودنی‌ها نقش بسزایی در تغییر خواص اکسید روی دارند. آلایش اکسید روی با منیزیم (Mg) می‌تواند باعث بهبود خواص الکتریکی، نوری و الکترونیکی این ماده شود. به دلیل تشابه شعاع یونی Mg و ZnO پیوستگی یون‌های  $\text{Mg}^{2+}$  نسبت به شبکه اکسید روی به راحتی امکان‌پذیر است. این عامل باعث افزایش بلوری شدن می‌شود [۱۱-۱۴].

کای هوانگ و همکارانش در سال ۲۰۱۲ تحقیقاتی در زمینه فیلم‌های نازک ZnO:Mg سنتز شده به روش سل-ژل انجام دادند. آن‌ها با استفاده از پراش اشعه ایکس نشان دادند که فیلم نازک ZnO:Mg ۲٪ و ZnO:Mg ۴٪ به صورت پلی کریستال با ساختار هگزاگونال و جهت‌گیری متمایز روی محور C رشد کرده‌اند، در حالی که فیلم نازک ZnO:Mg ۸٪ جدا شده از MgO است، همچنین با افزایش غلظت Mg، زبری فیلم‌های نازک از ۷,۸۹ تا ۱۶,۹ نانومتر تغییر می‌کند [۱۵].

احمد الحمیدی و همکارانش در سال ۲۰۱۵ آزمایشی در زمینه فیلم‌های نازک اکسید روی آلاییده شده با منیزیم و آلومینیوم تولید شده به روش سل-ژل انجام داده‌اند. بررسی نتایج پراش اشعه ایکس، ساختار پلی کریستال هگزاگونال را نشان می‌دهد. با بررسی تصاویر SEM در سطح، مورفولوژی فیلم‌ها تحت تأثیر Mg:Al ضریب انحرافی نشان داده است. ترکیب Al می‌تواند کیفیت کریستالی فیلم‌های ZnO و نقص شبکه را تغییر دهد. همچنین ترکیب Mg کیفیت کریستالی لایه‌های اتمی را بهبود می‌بخشد و ترکیب هردوی آن‌ها برای بهتر کردن و بالا بردن کیفیت کریستال، خواص الکتریکی و نوری، شکاف نوری و مقاومت ظاهری فیلم‌های نازک ZnO:Mg:Al مفید می‌باشد [۱۶].

ماهروج و همکارانش در سال ۲۰۱۷ تحقیقاتی را در زمینه فیلم‌های نازک اکسید روی ZnO:Mg تولید شده به

یکنواختی حاصل گردد. در ادامه ۰/۱۵ گرم پلی وینیل الکل (PVA) را به آرامی و فاصله زمانی مناسب در ۱۰ میلی لیتر آب مقطر اضافه نموده تا پس از دو ساعت این ماده در آب کاملاً حل شود. سپس ۰/۱۵ گرم از این محلول به هر غلظت از محلول اکسید روی با منیزیم (۶٪، ۸٪ و ۱۰٪) اضافه شد. بعد از ۲ ساعت همزدن مخلوط توسط همزن مغناطیسی و با حفظ دمای  $60^{\circ}\text{C}$ ، ترکیب‌های سفید رنگ و چسبناکی به دست آمد. این محلول‌ها با استفاده از دستگاه پوشش چرخشی با سرعت  $3000\text{ rpm}$  بر روی بستر  $\text{Si/SiO}_2$  لایه نشانی شدند. در این روش حین چرخش زیرلایه، ۱۵ قطره از محلول با فاصله زمانی ۵ ثانیه بر روی زیرلایه چکانده شد. پس از آن زیرلایه در آون کاملاً خشک شده و این مراحل تا ۸ بار برای دستیابی به ضخامت کافی تکرار شد. نهایتاً بسترها به مدت ۶ ساعت تحت دمای  $560^{\circ}\text{C}$  درون کوره حرارت داده شدند تا ساختارهای بلوری تشکیل گردد. مراحل آماده سازی در فلوچارت شکل ۱ نشان داده شده است.

### تست الکتریکی

در اثر تابش نور به یک ماده نیمه‌رسانا پدیده‌ای رخ می‌دهد که به آن فوتورسانندگی گفته می‌شود که در آن یک ماده بر اثر جذب تابش الکترومغناطیسی مانند نور مرئی، نور فرابنفش و نور فروسرخ، معمولاً مقاومت الکتریکی کمتری از خود نمایش می‌دهد. انرژی فوتون‌های جذب شده توسط ماده قادر خواهد بود الکترون‌ها را از نوار ظرفیت به نوار رسانش برانگیخته و آزاد کند. در جای خالی الکترون‌ها در نوار ظرفیت نیز حامل‌های به نام حفره ایجاد می‌شود. در نتیجه با تابش نور، تعداد حامل‌های الکترون آزاد و حفره باردار در شبکه کریستال افزایش خواهد یافت و پیرو آن رسانندگی الکتریکی نیز افزایش می‌یابد. در این پژوهش، پدیده فتو-رسانندگی لایه نازک اکسید روی که با ناخالصی منیزیم بهبود یافته است بررسی شده است.

روش سل-ژل انجام داده‌اند. نتایج نشان داده است که با افزایش غلظت Mg رشد اندازه کریستال و اندازه ذرات و زبری سطح کاهش می‌یابد. تحلیل و بررسی خواص نوری نشان می‌دهد، که ضریب انتشار موج فرابنفش (UV) با افزایش غلظت Mg به طور قابل مشاهده‌ای افزایش می‌یابد [۱۷].

بررسی‌های جانت پریسکیلا و همکارانش در سال ۲۰۲۰ بر روی ساختار، مورفولوژی و خواص الکتریکی پوشش‌های نانوساختار ZnO آلاینده شده با Mg حاکی از آن است که با افزایش میزان Mg اندازه کریستالیت‌ها کاهش می‌یابد. آنها با مطالعات مختلف به این استنباط رسیدند که Mg در ساختار ZnO وارد شده و به صورت جانشینی در موقعیت اتمی Zn قرار می‌گیرد [۱۸].

هدف تحقیق حاضر مشخصه‌یابی و بررسی ویژگی‌های الکتریکی-نوری اکسید روی آلاینده شده با منیزیم به عنوان یک حسگر نوری است. تغییر رفتار الکتریکی-نوری لایه نازک ایجاد شده در حضور نور نیز مورد بررسی قرار گرفته است. برای بهبود عملکرد الکتریکی-نوری لایه اکسید روی، نانوساختارهایی با درصد وزنی ناخالصی مناسب سنتز شد.

### مواد و روش

#### سنتز نانوساختارها با آلاینده فلزی

در این تحقیق برای تهیه محلول‌های نمکی، ابتدا محلول ۷/۴۵ گرم اکسید روی در ۵۰ میلی‌لیتر الکل اتانول و ۶/۴ گرم نیترات منیزیم در ۵۰ میلی‌لیتر الکل اتانول به طور جداگانه آماده شد. سپس محلول‌ها، طبق نسبت‌های محاسبه شده برای نمونه‌های حاوی ۶٪، ۸٪ و ۱۰٪ منیزیم ترکیب می‌شوند. ترکیب‌های حاصله توسط همزن مغناطیسی و با حفظ دمای  $60^{\circ}\text{C}$  و سرعت چرخش  $500\text{ r/min}$  در مدت زمان دو ساعت هم زده شده تا



شکل ۱- فلوجارت انجام آزمایش

(فاصله ۵ سانتی‌متر) تحت تابش نور قرار می‌گیرند. افزایش فاصله منبع نور باعث کاهش شدت نور دریافت شده در سطح لایه شده و از این طریق اثر شدت نور در تغییر رسانایی الکتریکی لایه بررسی می‌شود.

در شکل ۲ شماتیک مدار اندازه‌گیری را مشاهده می‌کنید. در این مدار  $V_{in}$  ولتاژ ورودی از منبع تغذیه است که با تغییر آن جریان‌های مختلفی از لایه عبور داده می‌شود. ولتاژ ورودی بین مقاومت معادل لایه حسگر ( $R_s$ )

برای اتصال الکتریکی نمونه با پروپ‌ها و برقراری جریان الکتریکی، از چسب نقره (با مقاومت ۸۰ میلی اهم بر مربع) که به دلیل وجود ذرات نقره بسیار رسانا است و همچنین از سیم پلاتین با خلوص بالای ۹۹٪، ضخامت ۴۰ میکرون و رسانایی الکتریکی عالی استفاده شد. در ادامه برای اندازه‌گیری رفتار الکتریکی-نوری نمونه‌ها و حساسیت لایه نسبت به نور محیط از نور لامپ فلوروسنت (لامپ کم‌مصرف) استفاده شده و نمونه‌ها در دو حالت دور (فاصله ۱۰ سانتی‌متر) و حالت نزدیک

### مشخصه یابی

به منظور بررسی ساختارهای بدست آمده از نظر مورفولوژی و توزیع اندازه ذرات از میکروسوپ الکترونی روبشی (SEM-MIRA3 TSCAN) با ولتاژ 15kV استفاده شد. برای بررسی ساختارهای کریستالی و فازهای حاصله از دستگاه پراش اشعه ایکس (XRD- Philips) مجهز به تارگت مسی با طول موج  $\lambda = 0.154 \text{ nm}$  استفاده شد.

### نتایج و بحث

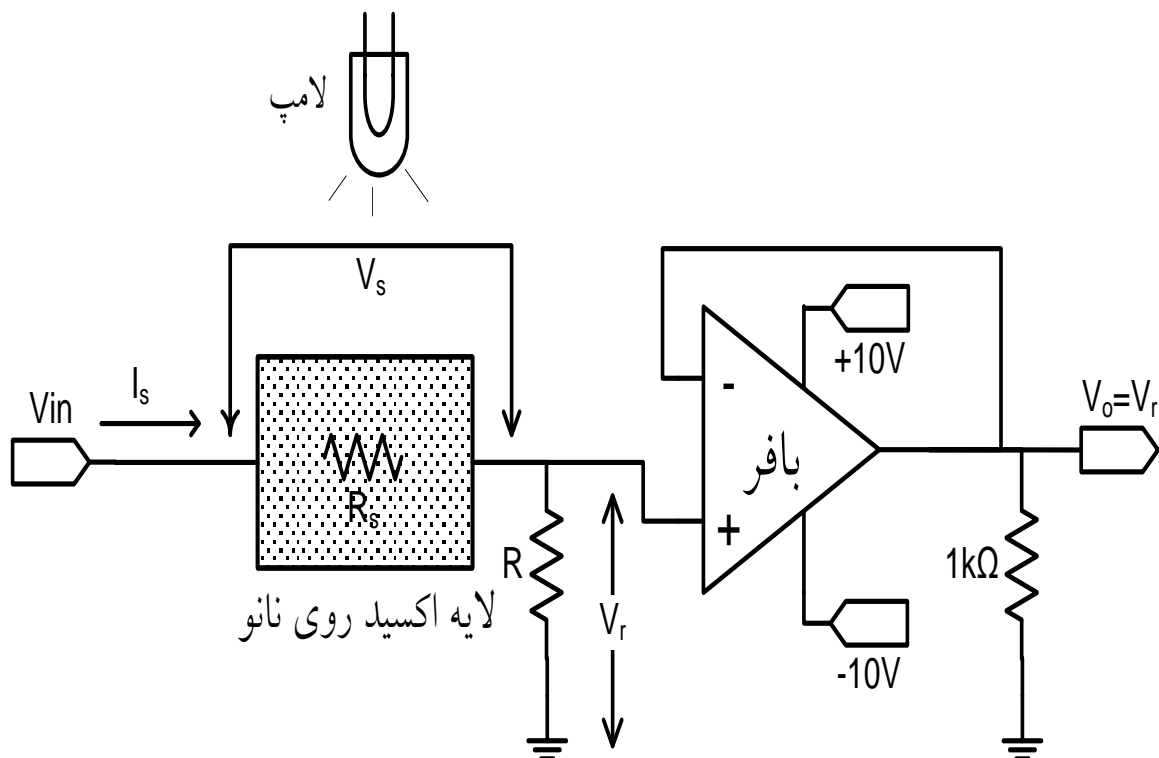
#### بررسی خواص الکتریکی و نوری لایه نازک

در این قسمت ویژگی‌های الکتریکی نمونه‌های پوشش داده شده با اکسید روی آلاییده با منیزیم در شدت نورهای مختلف به صورت منحنی مشخصه‌ی جریان-ولتاژ بررسی شده است. این نمودارها با تغییر ولتاژ ورودی 0 V تا +10 V تحت تابش نور در حالت دور 10 سانتی‌متر و حالت نزدیک 5 سانتی‌متر نشان رسم شده‌اند.

و مقاومت کنترلی R تقسیم می‌شود و بنابراین با استفاده از فرمول (۱)، مقاومت الکتریکی حسگر بر حسب  $V_{in}$ ، مقدار مقاومت R و ولتاژ دو سر این مقاومت یعنی  $V_r$  به دست خواهد آمد.

$$R_s = R_{in} \left( \frac{V_{in}}{V_r} - 1 \right) \quad (1)$$

مقدار R به صورت دلخواه انتخاب می‌شود ولی برای دقت بیشتر بهتر است در محدوده پیش‌بینی شده برای  $R_s$  باشد. در اندازه‌گیری ولتاژ  $V_r$ ، برای از بین بردن خطای ناشی از اثر بارگذاری مولتی‌متر لازم است از مدار بافر مانند مدار آپ‌امپ شکل ۲ استفاده شود. ولتاژ دو سر لایه حسگر با رابطه  $V_s = V_{in} - V_r$  محاسبه می‌شود و جریان عبوری از لایه به صورت  $I_s = V_s / R_s$  به دست می‌آید. در نهایت مشخصات الکترو-نوری لایه با رسم منحنی  $I_s$  بر حسب  $V_s$  تحلیل خواهد شد.

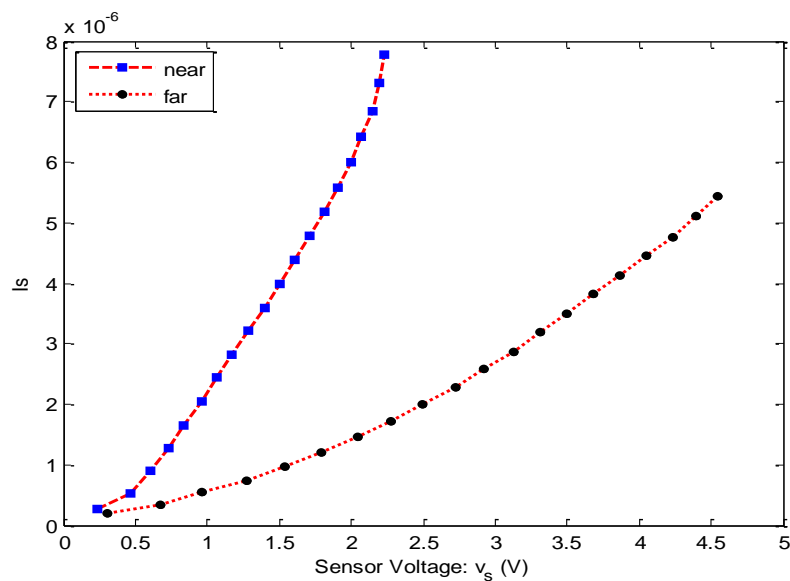


شکل ۲- شماتیک مدار اندازه‌گیری

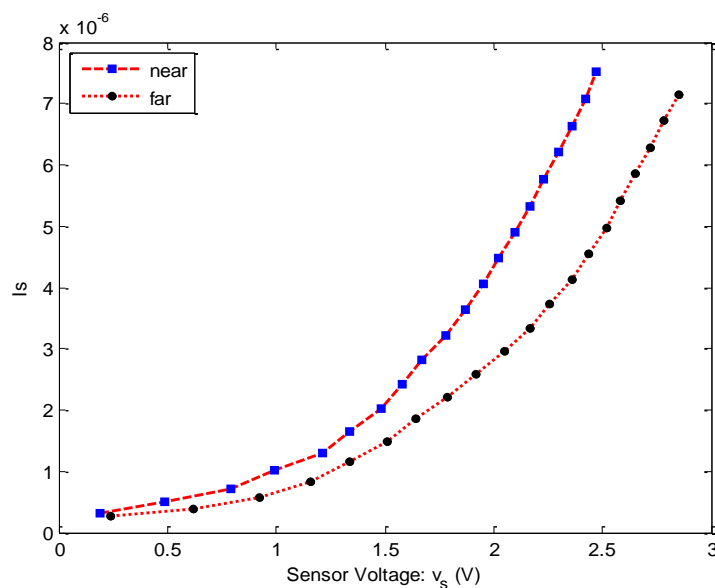
بودن اتصال بسیار کاهش یافته ولی کاملاً حذف نشده است.

همان‌گونه که در شکل‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌شود افزایش غلظت منیزیم بیش از مقدار بهینه نه تنها تغییری در میزان رسانایی ایجاد نمی‌کند بلکه سبب کاهش آن نیز می‌شود. علت آن شاید به دلیل تغییر اندازه دانه یا بوجود آمدن یون‌های ناخالصی ناخواسته باشد که مانند تله برای حرکت حامل‌ها ایجاد مزاحمت می‌کنند.

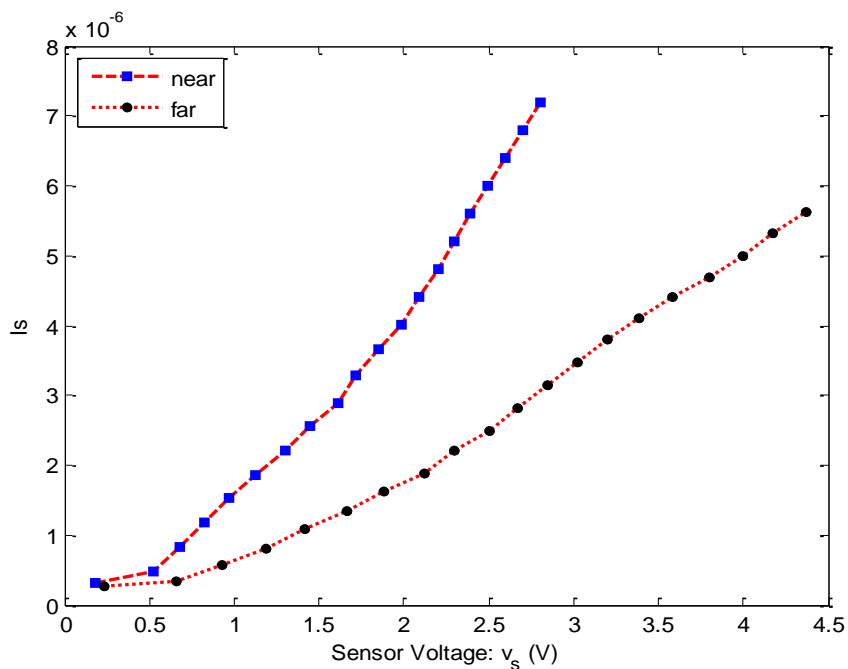
همان‌گونه که در شکل ۳ الی ۵ به ترتیب برای ۶٪ منیزیم، ۸٪ منیزیم و ۱۰٪ منیزیم مشاهده می‌شود، جریان الکتریکی با افزایش تابش نور افزایش و مقاومت نمونه کاهش یافته است. در شدت نور ثابت، رابطه ولتاژ-جریان لایه حسگر کاملاً خطی نیست و انحنای نمایی رو به بالا دارد. دلیل آن تشکیل اتصال غیر اهمی بین اکسید روی و فلز الکتروود است. اگرچه با انتخاب پلاتین (به جای سیم ارزان‌تر مس یا آلومینیم) به عنوان الکتروود غیر اهمی



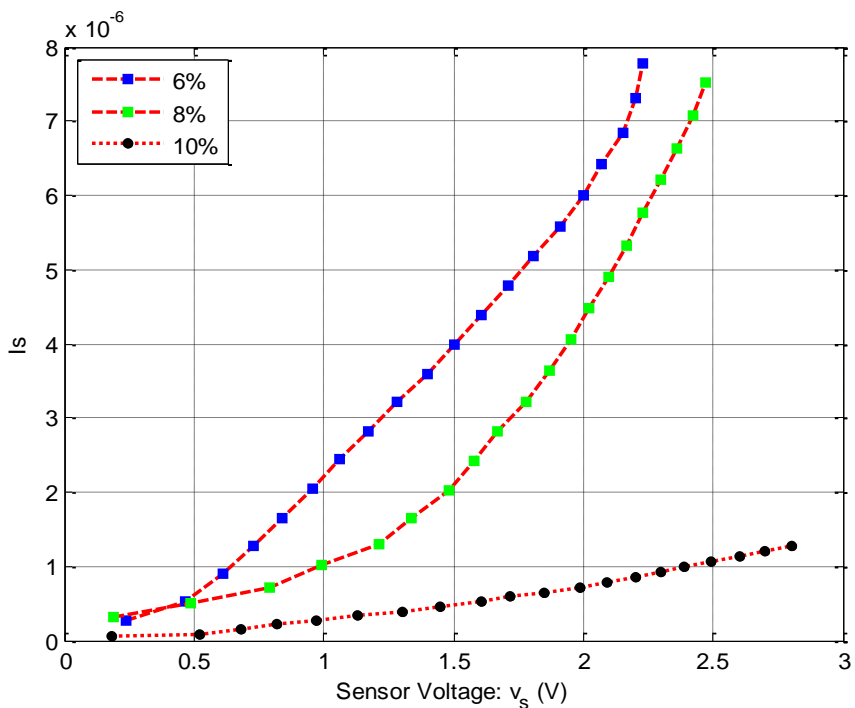
شکل ۳- منحنی مشخصه‌های ولتاژ-جریان در حضور نور در دو حالت دور و نزدیک برای نمونه ۶٪ منیزیم



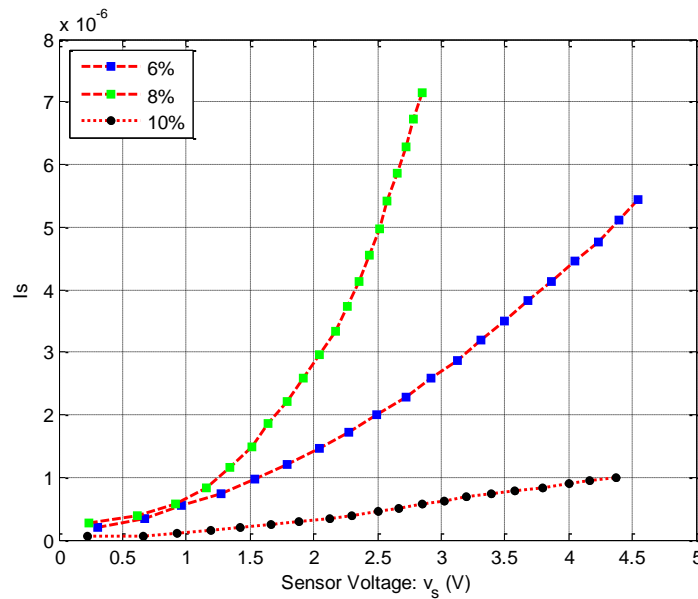
شکل ۴- منحنی مشخصه‌های ولتاژ-جریان در حضور نور در دو حالت دور و نزدیک برای نمونه ۸٪ منیزیم



شکل ۵- منحنی مشخصه‌های ولتاژ- جریان در حضور نور در دو حالت دور و نزدیک برای نمونه ۱۰٪ منیزیم



شکل ۶- منحنی مشخصه‌ی ولتاژ- جریان تحت تابش نور در حالت نزدیک، برای نمونه‌های حاوی ۶٪، ۸٪ و ۱۰٪ منیزیم



شکل ۷- منحنی مشخصه‌ی ولتاژ- جریان تحت تابش نور در حالت دور، برای نمونه‌های حاوی ۶٪ و ۸٪ و ۱۰٪ منیزیم

که در آن  $S$  ضریب حساسیت نوری،  $I_n$  شدت جریان به ازای نور نزدیک و  $I_f$  نیز شدت جریان به ازای نور دور می‌باشد.

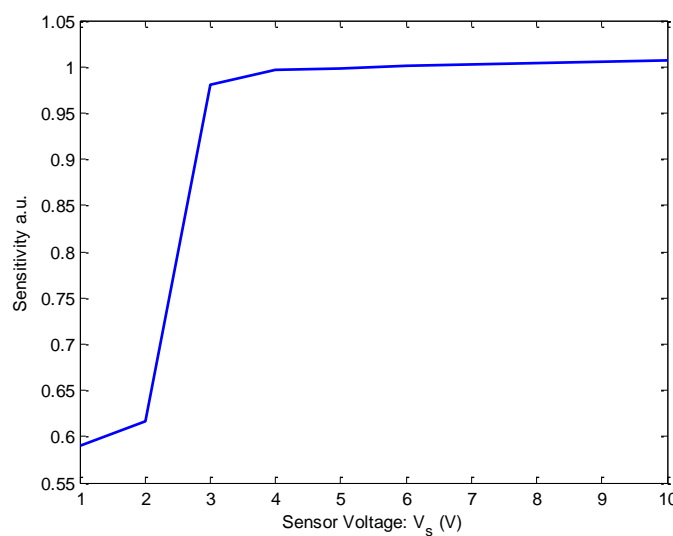
### بررسی حساسیت نوری لایه نازک

به منظور اندازه‌گیری حساسیت نوری نمونه‌ها از رابطه

(۲) استفاده شد:

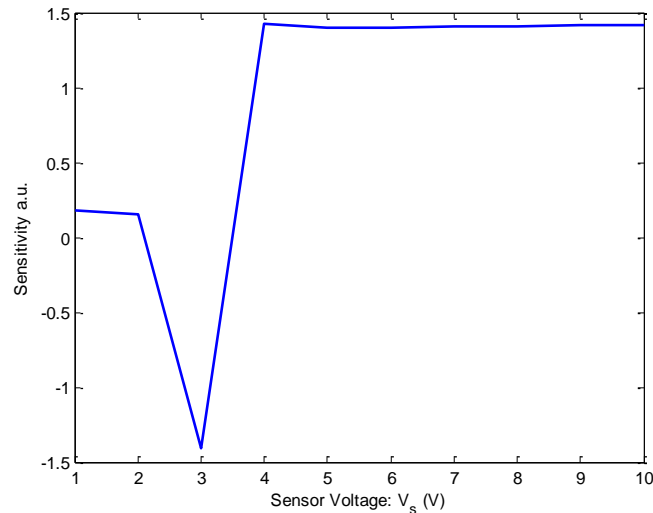
همان‌گونه که در شکل‌های ۸ تا ۱۰ مشاهده می‌شود، بیشترین حساسیت مربوط به نمونه‌ی ۶٪ منیزیم است. این امر حاکی از آن است که برای داشتن بیشترین حساسیت، غلظت ناخالصی بهینه‌ای وجود دارد و لزوماً با افزایش ناخالصی نباید انتظار افزایش حساسیت داشت.

$$S = \frac{I_n - I_f}{I_n + I_f} \quad (2)$$

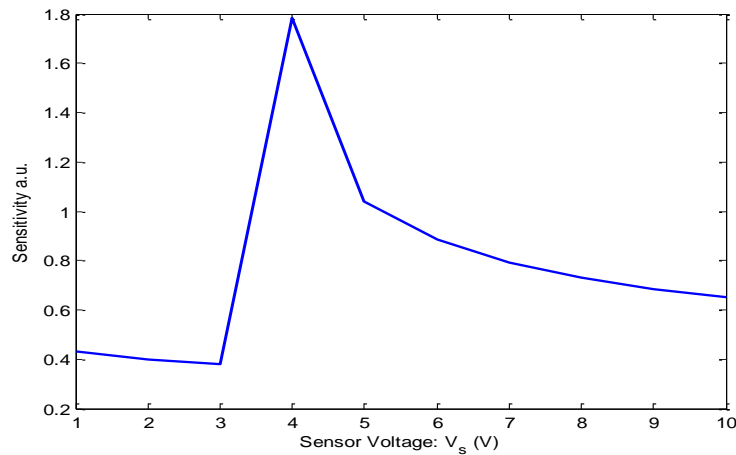


شکل ۸- منحنی مشخصه‌ی حساسیت تحت تابش نور نمونه ۶٪ منیزیم





شکل ۹- منحنی مشخصه‌ی حساسیت تحت تابش نور نمونه ۰.۸٪ منیزیم



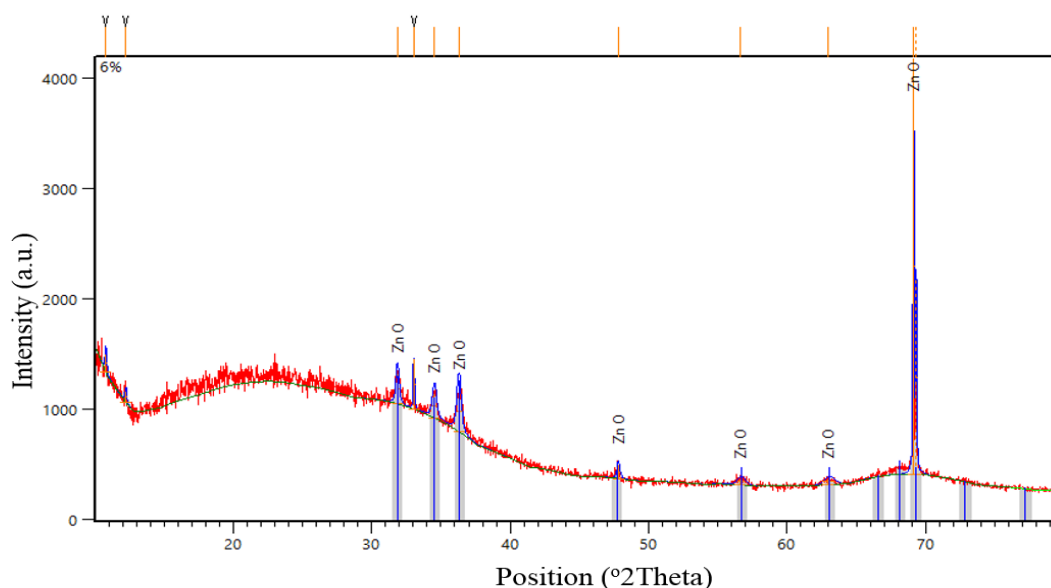
شکل ۱۰- منحنی مشخصه‌ی حساسیت تحت تابش نور نمونه ۱.۰٪ منیزیم

(نیترات منیزیم) به نمونه، شرایط تشکیل ترکیبات جدید را فراهم آورده است.

### بررسی ساختار لایه نازک با پراش اشعه ایکس

بررسی الگوی پراش نمونه ۰.۶٪ منیزیم پس از فرآیند عملیات حرارتی، وجود ساختار کریستالی ZnO با ساختار هگزاگونال و  $Mg^{+2}$  با ساختار هگزاگونال و تشکیل ترکیب فلزی منیزیم و اکسید روی را در ترکیب لایه نازک تولیدی نشان می‌دهد. در اینجا لازم به ذکر است که موقعیت پیک‌های پراش ترکیب  $Mg^{+2}$  و ZnO در  $2\theta=69.14^\circ$  با هم همپوشانی دارند. به همین دلیل تحلیل نسبی این ترکیب‌ها با مشکل مواجه است.

پس از تولید لایه‌های نازک، به منظور بررسی فازهای تشکیل شده در نمونه‌های حاوی ۰.۶٪، ۰.۸٪ و ۱.۰٪ منیزیم الگوی پراش اشعه ایکس نمونه‌ها تهیه و نتایج بدست آمده مورد بررسی قرار گرفت. به منظور تحلیل نتایج بدست آمده از نرم‌افزار X'Pert عملیات فازیابی و تحلیل الگوهای پراش اشعه X انجام و بررسی فازی صورت گرفت. بررسی نتایج XRD نمونه‌ها با افزودن آلایند منیزیم در شکل ۱۱ (الگوی پراش لایه نازک ZnO حاوی ۰.۶٪ آلایند منیزیم) عملیات حرارتی شده در دمای  $560^\circ C$  نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، افزودن ۰.۶٪ منیزیم



شکل ۱۱- الگوی پراش نمونه‌های لایه نازک با حضور ۶٪ منیزیم بازپخت شده در دمای بازپخت  $560^{\circ}\text{C}$

نمونه‌ها برخوردار است. دلیل این امر می‌تواند عدم تشکیل کامل فازهای کریستالی و در نتیجه کاهش شدت پیک بوده باشد. این احتمال وجود دارد که نرخ سرد کردن نمونه حاوی ۶٪ نسبت به نمونه‌های دیگر از سرعت بالاتری برخوردار بوده و البته این امکان نیز وجود دارد که به دلیل تغییرات مورفولوژیکی در نمونه‌های تولیدی با توجه به شکل ۱۳ (تصویر میکروسکوپ الکترونی ۶٪) در مقایسه با نمونه‌های ۸٪ و ۱۰٪ منیزیم شدت پیک کمتری داشته باشد [۱۹].

### بررسی ساختار لایه‌ها با SEM

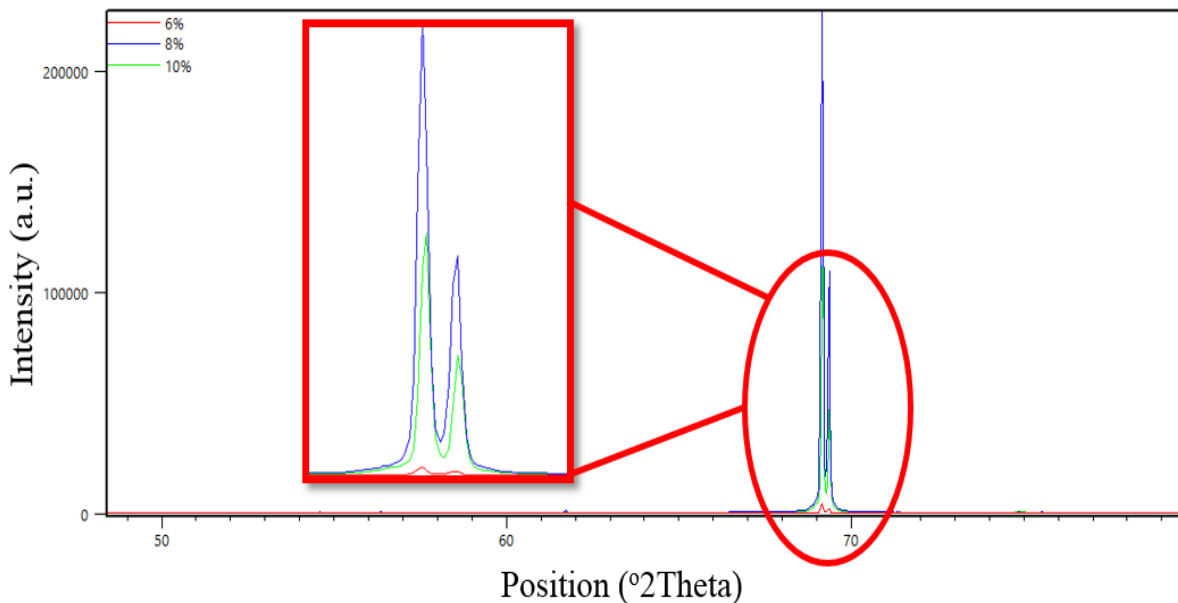
به منظور سنتز لایه‌های نازک اکسیدروی آلاینده شده با درصد‌های مختلف منیزیم از نیترات منیزیم، نیترات روی و پلی‌ونیل الکل استفاده شده است. تصاویر میکروسکوپ الکترونی لایه‌های مذکور بر روی بستر سیلیکونی نشان داده شده است. بررسی نتایج میکروسکوپی نمونه ۶٪ آلاینده با بزرگ‌نمایی‌های مختلف برای نمونه ۶٪ منیزیم در شکل ۱۳ مشخص شده است.

در شکل ۱۲ مقایسه الگوی‌های پراش اشعه X لایه نازک ZnO حاوی ۶٪، ۸٪ و ۱۰٪ آلاینده منیزیم عملیات حرارتی شده در دمای  $560^{\circ}\text{C}$  نشان داده شده است. همان‌گونه که در تصویر مشاهده شده است، بر خلاف نمونه حاوی ۶٪ منیزیم، با افزایش غلظت آلاینده Mg فازهای MgO تشکیل شده‌است. با توجه به موقعیت پیک‌های MgO، ZnO و Mg و نزدیکی موقعیت پیک‌ها به هم، احتمال دارد که ترکیبات مشابه در نمونه حاوی ۶٪ منیزیم نیز وجود داشته باشد.

در الگوی پراش لایه نازک ZnO حاوی ۱۰٪، فازهای MgO و ZnO با ساختار هگزاگونال تشکیل شده‌اند. بررسی پیک‌های بدست آمده در این نمونه نشان دهنده تشکیل ترکیبات مشابه با نمونه حاوی ۸٪ منیزیم بوده است. با توجه به شرایط یکسان تولیدی نمونه‌ها احتمال وجود ترکیب  $\text{Mg}^{+2}$  را در نمونه‌های ۸٪ و ۱۰٪ منیزیم را می‌توان محتمل دانست.

### مقایسه الگوهای XRD نمونه‌های تولیدی

همان‌گونه که در شکل ۱۲ مشخص است، نمونه حاوی ۶٪ آلاینده از شدت پیک بسیار کمتری نسبت به دیگر



شکل ۱۲- مقایسه الگوی پراش نمونه‌های لایه نازک با حضور ۶٪، ۸٪ و ۱۰٪ منیزیم بازپخت شده در دمای بازپخت  $560^{\circ}\text{C}$

مشاهده هستند. بهم چسبیدگی نانو ذرات در این نمونه می‌تواند ناشی از دمای عملیات حرارتی در دمای  $560^{\circ}\text{C}$  می‌باشد. در بزرگنمایی بالا در این نمونه، ناپیوستگی ریزساختار و تشکیل ساختارهای جزیره‌ای مشاهده شود.

در شکل ۱۵ ساختار میکروسکوپی نمونه‌ی با ۱۰٪ آلاینده نشان داده شده است. رشد نانو ساختارها در جهات مختلف منجر به تشکیل ساختارهای گل‌کلمی شکل در نمونه گردیده است. میانگین اندازه دانه‌ها حدود  $22\text{nm}$  تعیین شده است.

با مقایسه تصاویر میکروسکوپ الکترونی نمونه‌های اکسیدروی حاوی ۶٪، ۸٪، و ۱۰٪ منیزیم مشاهده می‌شود که افزایش درصد منیزیم ابتدا باعث کاهش اندازه ذرات تا  $15\text{nm}$  و سپس افزایش اندازه متوسط نانو ذرات تا  $22\text{nm}$  می‌شود. با این وجود با در نظر گرفتن مورفولوژی متفاوت نمونه ۶٪ منیزیم با نمونه‌های ۸٪ و ۱۰٪ و مقایسه این دو نمونه باهم می‌توان این احتمال را متصور شد که افزایش درصد منیزیم باعث افزایش اندازه متوسط دانه می‌گردد.

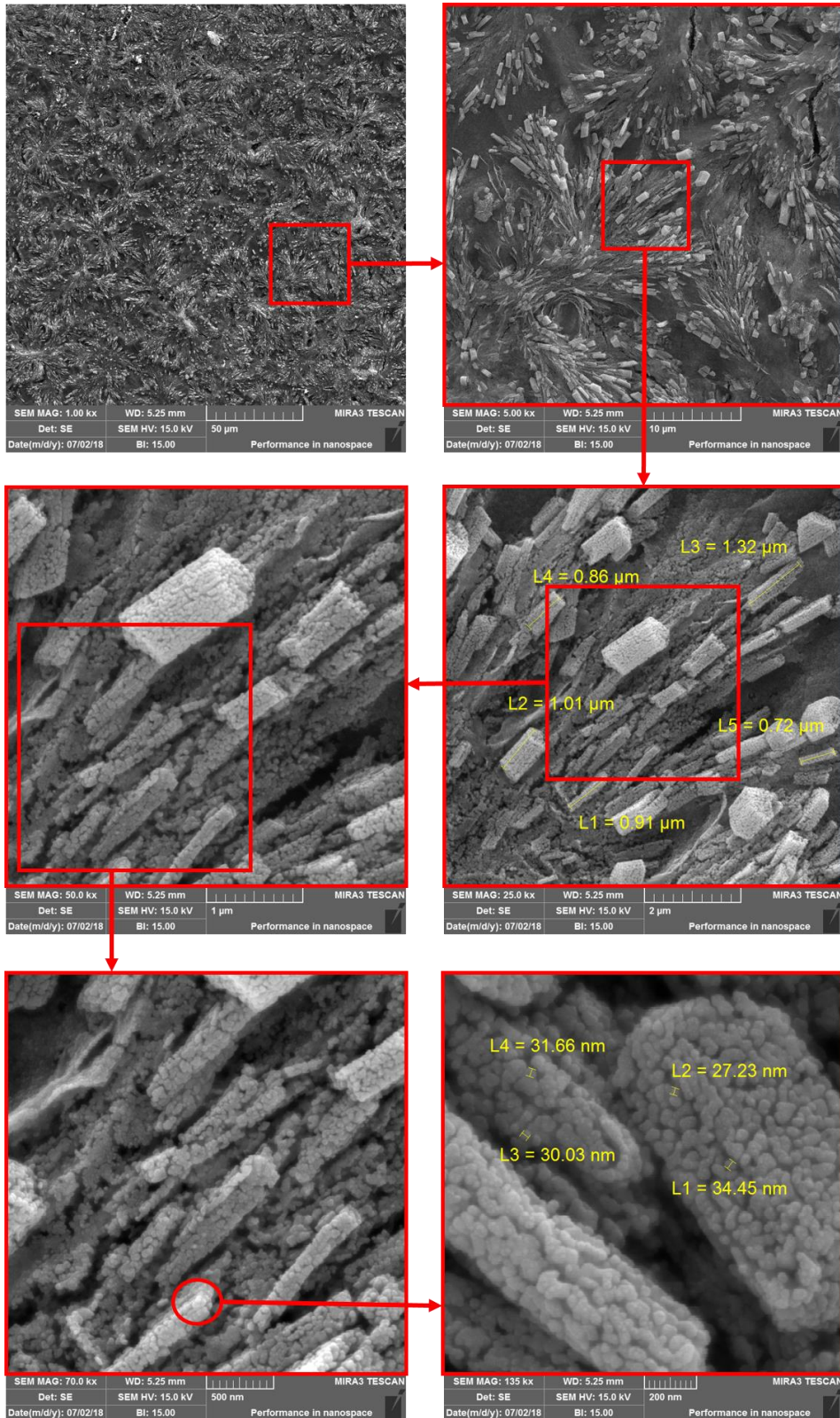
بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی از لایه‌ی تولیدی با ۶٪ منیزیم نشان دهنده‌ی تشکیل نانوساختار گل‌کلمی شکل می‌باشد. متوسط اندازه دانه‌های موجود  $30\text{nm}$  تخمین زده شده است. علاوه‌براین چسبیدن دانه‌های نانومتری منجر به تشکیل ساختارهای درشت مکعبی با اندازه طول ضلع حدود یک میکرومتر در جهات مختلف شده است. در نتیجه می‌توان برای این نمونه تشکیل دو مورفولوژی را متصور شد. علاوه بر این ترک‌هایی بر روی لایه مورد نظر تشکیل شده است. احتمال داده می‌شود ترک‌های ایجاد شده به دلیل کرنش ناهمگن زیر لایه سیلیکونی با لایه مورد نظر و همچنین شرایط سرد کردن ایجاد شده باشد. از طرفی به خاطر وجود ساختار گل‌کلمی شکل با سطح ویژه بالا، موجب افزایش حساسیت سنسور تولیدی می‌شود. بررسی‌های گریسیا و همکاران در سالهای ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ موبد این موضوع می‌باشد [۲۰-۲۱].

در شکل ۱۴ ساختار میکروسکوپی نمونه‌ی با ۸٪ آلاینده نشان داده شده است. مشابه آنچه در نمونه ۶٪ منیزیم مشاهده شد، ساختارهای گل‌کلمی نانو ساختار تشکیل شده‌اند. متوسط اندازه ذرات در این نمونه  $15\text{nm}$  می‌باشد. همانند نمونه قبلی ترک‌های سطحی نیز قابل

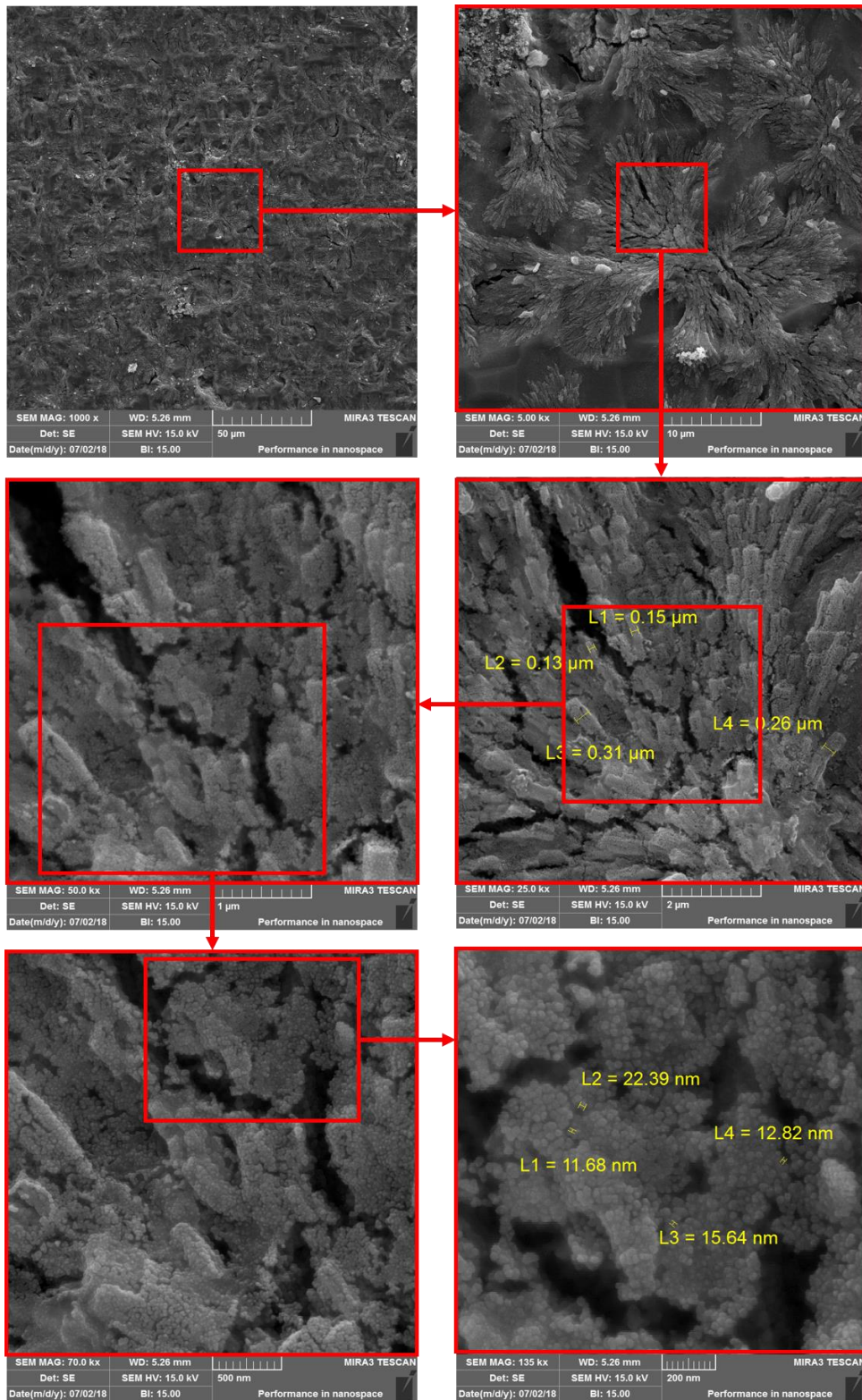
## نتیجه‌گیری

در این تحقیق سنتز و مشخصه‌یابی نمونه‌های لایه نازک اکسید روی آلاینده شده با منیزیم انجام شده و حساسیت الکتریکی-نوری این لایه‌ها به نور تابیده شده به آنها مورد مطالعه قرار گرفته است. با بررسی نتایج به دست آمده مشاهده شد، که هدایت الکتریکی نیمه‌هادی اکسید روی آلاینده شده با منیزیم با افزایش شدت نور افزایش می‌یابد. همچنین هدایت الکتریکی با افزایش منیزیم بیش از مقدار بهینه ۶٪ کاهش می‌یابد. با توجه به پراش اشعه ایکس نمونه ۶٪ منیزیم، و تشکیل فاز  $Mg^{+2}$ ، این نمونه نسبت به سایر نمونه‌ها مقاومت الکتریکی کمتری از خود نشان داده است. در بین نمونه‌های با اندازه

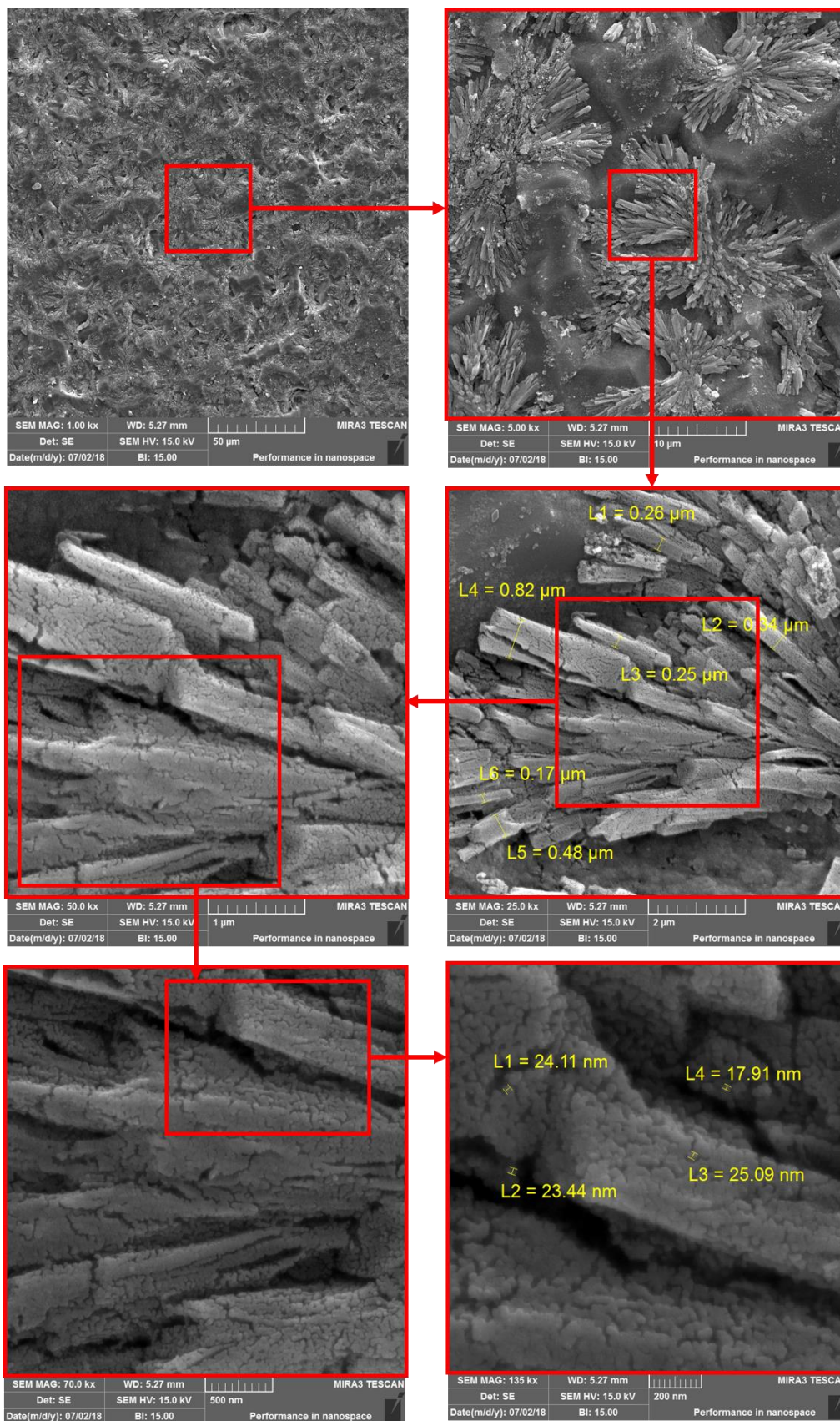
ذرات کوچکتر، نمونه ۸٪ به دلیل سطح ویژه بالاتر، می‌تواند حساسیت بیشتری نسبت به نمونه ۱۰٪ از خود نشان دهد. حساسیت در نمونه‌ی ۶٪ از دو نمونه دیگر بیشتر است و طبق آنالیز SEM افزایش درصد منیزیم ابتدا باعث کاهش اندازه ذرات تا ۱۵ نانومتر و سپس افزایش اندازه متوسط نانو ذرات تا ۲۲ نانومتر می‌شود با این وجود با در نظر گرفتن مورفولوژی متناوب نمونه ۶٪ منیزیم با نمونه‌های ۸٪ و ۱۰٪ و مقایسه این دو نمونه با هم می‌توان این احتمال را متصور شد که افزایش درصد منیزیم باعث افزایش اندازه متوسط دانه می‌شود. همچنین طبق آنالیز XRD نمونه‌ها تشکیل فازهای  $Mg^{+2}$ ، ZnO و MgO در نمونه‌های مختلف مشخص شده است.



شکل ۱۳- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه ۶٪ منیزیم.



شکل ۱۴- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه ۸٪ منیزیم



شکل ۱۵- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه ۱۰٪ منیزیم

**References:**

- [1] A. C. Mohan and B. Renjanadevi, "Effect of Zinc Oxide Nanoparticles on Mechanical Properties of Diglycidyl Ether of Bisphenol-A", *J. Material Sci. Eng.*, Vol. 5.291, pp. 1-5, 2016.
- [2] K. J. Klabunde and R. M. Richards, Eds, *Nanoscale Materials in Chemistry*, John Wiley & Sons, 2009.
- [3] M. A. Karimi, et al., "Synthesis and Characterization of Nanoparticles and Nanocomposite of ZnO and MgO by Sonochemical Method and Their Application for Zinc Polycarboxylate Dental Cement Preparation", *International Nano Letters*, Vol. 1, pp. 43-51, 2011.
- [4] Z. Chen, et al., "Synthesis of Magnesium Oxide Doped ZnO Nanostructures Using Electrochemical Deposition", *Int. J. Electrochem. Sci.*, Vol. 7, pp. 10620-10626, 2012.
- [۵] ب. کوزه گرکالجی، م. موسایی، "سنتز و بررسی خواص نوری و فتوکاتالیستی نانوذرات اکسید روی (ZnO) آلاییده شده با Si و Ti". فصلنامه علمی-پژوهشی مواد نوین، دوره ۸، شماره ۳۲، ص. ۷۱-۸۱، ۱۳۹۷.
- [6] A. Kołodziejczak-Radzimska and T. Jesionowski, "Zinc Oxide, from Synthesis to Application: a review", *Materials*, Vol. 7(4), pp. 2833-2881, 2014.
- [7] M. Jančíková, R. Janiš, J. Krejčí, I. Hauerlandová, "Zinc Oxide Nanoparticles in Cosmetic Products", *Advances in Environment, Biotechnology and Biomedicine*, 2010.
- [8] S. Baskoutas, "Special Issue: Zinc Oxide Nanostructures: Synthesis and Characterization", *Materials*, Vol. 11(873), 2018.
- [9] S. V. Bangale and S. R. Bamane, "Synthesis Characterization and Electrical Properties of Nanocrystalline Zn:MgO by Combustion Route", *Der Chemica Sinica*, Vol. 2(5), pp. 22-29, 2011.
- [10] M. Veith, et al., "Low Temperature Synthesis of Nanocrystalline Y3Al5O12 (YAG) and Ce-doped Y3Al5O12 via Different Sol-Gel Methods", *Journal of Materials Chemistry*, Vol. 9(12), pp. 3069-3079, 1999.
- [11] H. Schmidt, et al., "The Sol-Gel Process as a Basic Technology for Nanoparticle-Dispersed Inorganic-Organic Composites", *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, Vol. 19(1-3), pp. 39-51, 2000.
- [12] M. Shkir, M. Arif, V. Ganesh, M. A. Manthrammel, A. Singh, I. S. Yahia, S. R. Maidur, P. S. Patil, S. AlFaify, "Investigation on Structural, Linear, Nonlinear and Optical Limiting Properties of Sol-Gel Derived Nanocrystalline Mg Doped ZnO Thin Films for Optoelectronic Applications", *Journal of Molecular Structure*, 2018.
- [13] L. Zong, Linqi, et al., "Nanopurification of Silicon from 84% to 99.999% Purity with a Simple and Scalable Process", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 112(44), pp. 13473-13477, 2015.
- [14] G. M. Kale, et al., "Solid-State Electrochemical Sensor for Monitoring Mg in Al Refining Process", *ECS Transactions*, Vol. 1(13), pp. 1-11, 2006.
- [15] K. Huang, et al., "Preparation and Characterization of Mg-doped ZnO Thin Films by Sol-Gel Method", *Applied Surface Science*, Vol. 258(8), pp. 3710-



3713,

2012.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.005>,

[16] A. Elhamidi, et al., "Investigation of (Mg-Al) Co-doped Zinc Oxide Thin Films for Photovoltaic Harvesting Energy Devices", IEEE 3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), 2015.

[17] A. Mahroug, et al., "Studies on structural, surface morphological, optical, luminescence and Uv photodetection properties of sol-gel Mg-doped ZnO thin films." Surface Review and Letters 26.03 (2019): 1850167.

[18] S. J. Priscilla, R. Daniel, Y. Dhakshayani, et al., "Effect of Magnesium Dopant on the Structural, Morphological and Electrical Properties of ZnO Nanoparticles by Sol-Gel Method", Proceedings of Materials Today, 2020.

[19] M. Inoue and I. Hirasawa, "The Relationship between Crystal Morphology and XRD Peak Intensity on CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O", Journal of Crystal Growth, Vol. 380, pp. 169-175, 2013.

[20] R. Pena-Garcia, Y. Guerra, R. Milani, D. M. Oliveira, F. R. de Souza, E. Padron-Hernandez, "Influence of Ni and Sr on the Structural, Morphological and Optical Properties of ZnO Synthesized by Sol Gel" Optical Materials, Vol. 98, p. 109427, 2019.

[21] R. Pena-Garcia, Y. Guerra, R. Milani, D. M. Oliveira, F.R. de Souza, E. Padron-Hernandez. "Study on Structural and Optical Properties of Mn-doped ZnO Thin Films by Sol-Gel Method", Optical Materials, Vol. 98, p. 109657, 2020.

