بهبود خواص الکتریکی برقگیرهای اکسید روی در اثر استفاده از پودرهای نانومتری

محمّد علی هوشیار فرد[۱]، حسن نوائی الوار[۲]، زیارتعلی نعمتی[۱]، محمّد علی فقیهی ثانی[۱]

[۱] دانشکدهٔ مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

[۲] دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

nemati@sharif.edu

چکیده: *با توجه به اثرات بسیار مفید کاهش اندازهٔ دانه‌ها بر خواص قرص‌های برقگیر که در تحقیقات گوناگون گزارش شده است، برقگیر اکسید روی از پودر نانومتری تهیه شده به روش آسیاب تولید شد. پودر مورد استفاده برای ساخت برقگیر توسط آسیاب گلوله‌ای با انرژی بالا (SPEX) در ابعاد نانومتری تولید و سپس توزیع اندازهٔ ذرات پودر توسط دستگاه زتاسایزر و مورفولوژی نانوپودرهای حاصل توسط میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) مورد بررسی قرار گرفت. آنالیز فازهای حاصل توسط XRD صورت گرفت و سرانجام نمونه‌های پرس شده به شکل قرص، در دماهای مختلف زینتر شدند و در نهایت منحنی ولتاژ- شدت جریان نمونه‌ها توسط دستگاه مولتی‌متر اندازه‌گیری شد.*

نتایج حاصل نشان می‌دهد که در برقگیر ساخته شده با استفاده از نانوپودر به روش فوق، ضریب غیرخطی(α) برابر ۶۰ و ولتاژ شکست برابر ۸۰۰۰ V/cm می‌باشد که این مقادیر در مقایسه با برقگیر ساخته شده از پودر میکرونی به روش مشابه، افزایش چشمگیری نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی: *برقگیر، واریستور، اکسید روی، نانومواد، آسیاب گلوله‌ای با انرژی بالا*

۱- مقدمه

برقگیرهای اکسید روی ابزار بسیار مناسبی برای محافظت از اجزاء الکترونیکی خصوصاً در برابر ولتاژهای گذرا می‌باشند. خاصیت محافظت کنندگی برقگیرها ناشی از رابطهٔ غیر خطی شدید بین ولتاژ و شدت جریان آن‌ها در محدودهٔ وسیعی از شدت جریان می‌باشد، که‌این امر کاملاً وابسته به مرز دانه‌های برقگیر می‌باشد. رابطهٔ بین ولتاژ و جریان برقگیر به صورت زیر بیان می‌شود :

$$J = C.V^{\alpha}$$

که دراین رابطه‌ها V ولتاژ، J چگالی جریان برحسب (A/m^2) یا (A/cm^2) و α ضریب غیرخطی برقگیر نامیده می‌شود که از مشخصه‌های اساسی برقگیر می‌باشد و بالاتر بودن هر چه بیشتر آن نشان دهندهٔ کیفیت برتر و کارایی بیشتر برقگیر می‌باشد.

برقگیر اکسید روی اصولاً از ترکیبی از اکسیدهای سرامیکی تشکیل شده‌است که رفتار الکتریکی آن، هم به ریزساختار و هم به جزئیات فرآیند ساخت ونیز پدیده‌هایی که در مرزدانه‌های اکسید روی رخ می‌دهد بستگی دارد. پایهٔ اصلی ترکیب برقگیر، اکسید روی با بیش از ۸۰٪ مولی می‌باشد. اکسید روی در برقگیرهای برپایهٔ این اکسید، یک نیمه‌هادی با مقاومت ویژهٔ الکتریکی کمتر از ۱Ω.cm در دمای اتاق می‌باشد. علاوه بر اکسید روی، ترکیب برقگیر شامل تعداد دیگری اکسیدهای فلزی می‌باشد. ترکیب مشهور برقگیرها که توسط Matsuoka معرفی شد حاوی ۹۷٪ مولی ZnO ، ۱٪ مولی Sb_2O_3 و ۰/۵٪ مولی از هر کدام از اکسیدهای Bi_2O_3 ، CoO ، MnO و Cr_2O_3 می‌باشد. مهمترین این اکسیدها Bi_2O_3 می‌باشد که تشکیل دهندهٔ فازهای مرزدانه‌ای برقگیر می‌باشد. در مورد نقش Bi_2O_3 بر فازهای مرزدانه‌ای و در نتیجه تأثیر آن بر خواص الکتریکی مهم برقگیر نظیر ضریب غیرخطی و ولتاژ شکست در مراجع مفصلاً توضیح داده شده است.[۴-۱]

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1384.1.3.1.4]

در مورد نقش سایر افزودنی‌های فوق نیز در مراجع بحث شده است.[۷-۵] علاوه بر افزودنی‌های فوق سایر افزودنی‌ها نظیر Pr_6O_{11} و اکسیدهای آهن و اکسیدهای Al و Ga و ... نیز به برگگیر اضافه می‌شوند. در مورد اثر افزودن Pr_6O_{11} در مراجع [۱۱-۸] مفصلاً توضیح داده شده است. گروه دیگر از ناخالصی‌ها باعث به وجود آمدن فازهای مرزدانه‌ای که شامل فازهای غنی از بیسموت فازهای اسپینل و پیرو کلر می‌باشند می‌گردند که مهمترین عضو این دسته Bi_2O_3 می‌باشد[۶،۱۲]. علاوه بر اینها به منظور کنترل زینترینگ ونیز کنترل اندازهٔ دانه‌های ZnO نیز افزودنی‌های مختلفی به برگگیر اضافه می‌شود نظیر Cr_2O_3 و TiO_2. [۵،۷]

در مورد ترکیب شیمیایی و فازهای موجود در ریزساختار و خصوصاً در مرزدانه‌ها مطالعات بسیاری انجام شده است که عمدتاً این فازها عبارتند از فازهای اسپینل به صورت $Zn_7Sb_2O_{12}$ و یا فاز اسپینل $Zn(Zn_{4/3}Sb_{2/3})O_4$ و فازهای پیروکلر با ترکیب $Bi_2(Zn_{4/3}Sb_{2/3})O_6$ یا $Bi_{1.4}Mn_{0.4}Zn_{0.7}Sb_{1.5}O_7$ و واکنشهای بسیاری نیز بین این فازها در دماهای مختلف در نظر گرفته می‌شود.[۱۲]

نشان داده شده است که هدایت الکتریکی برگگیر و ولتاژ شکست آن به شدت به ریزساختار وابسته است. تئوریهای زیادی در مورد مکانیزمهای هدایت داده شده است، براساس مطالب گفته شده در بالا نقش بسیار مهم اندازهٔ دانه و مرزدانه‌ها و هموژن بودن ریز ساختار در خواص الکتریکی برگگیر کاملاً مشخص است.[۱۲،۱۳] علاوه بر این استفاده از ذرات بسیار ریز هموژنیته را بالا می‌برد که خواص الکتریکی را بهبود می‌بخشد و همچنین با استفاده از ذرات بسیار ریز زینترپذیری بسیار بهبود می‌یابد.[۱۴]

هدف از انجام این پژوهش بررسی تأثیر استفاده از پودرهای نانومتری تولید شده به وسیلهٔ آسیاب گلوله‌ای با انرژی بالا (SPEX) بر روی خواص الکتریکی و ریزساختار برگگیر می‌باشد.

۲- روش انجام آزمایش‌ها

برای بررسی خواص برگگیر، نمونه‌های آزمایشگاهی با ترکیب شیمیایی مشهور Matsuoka آماده شدند. ترکیب مورد استفاده در جدول (۱) نشان داده شده است که بدین جهت این ترکیب مورد استفاده قرار گرفت تا بتوان نتایج به دست آمده را با تحقیقات بسیاری که بر روی این ترکیب صورت گرفته، مقایسه کرد و در نتیجه اثر اندازهٔ ذرات را که مد نظر است به تنهایی بررسی کرد.

جدول۱- ترکیب شیمیایی مورد استفاده در ساخت برگگیر

مواد اولیه	ZnO	Sb_2O_3	Bi_2O_3	MnO_2	Cr_2O_3	Co_3O_4
ترکیب شیمیایی بر حسب درصد مولی	۹۷	۱	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵

مواد اولیه همگی به صورت پودر با خلوص بالا (Merck,99.99%) تهیه و پس از مخلوطسازی اولیه در حالت خشک، توسط آسیاب دیسکی از جنس کاربید تنگستن در محیط اتانول به مدت یک ساعت آسیاب گردیدند.[۱،۱۴،۱۵]

توزیع اندازهٔ ذرات پس از این مدت آسیاب توسط دستگاه زتا سایزر تعیین شده است. قسمتی از پودر حاصل که در ابعاد میکرونی می‌باشد در ساخت برگگیر مورد استفاده قرار گرفت و قسمتی دیگر توسط آسیاب با انرژی بالا (SPEX) با محفظه و گلوله‌های از جنس کاربید تنگستن تحت شرایط مختلف (نسبت گلوله به پودر و زمان آسیاب) و در محیط الکل آسیاب گردید تا در نهایت، نانوپودر مناسب جهت ساخت برگگیر حاصل گردید. سپس توزیع اندازهٔ ذرات حاصل از آسیاب توسط دستگاه زتا سایزر تعیین گردید و نیز توسط میکروسکوپ الکترونی عبوری TEM عکسهایی از پودرها به منظور بررسی نانوپودرهای حاصل تهیه شد. سپس توسط XRD از پودرهای به دست آمده آنالیز فازی گرفته شد، که بدین منظور از دستگاه XRD (Philips Pw3710) با استفاده از پرتوی ($Cu\text{-}K\alpha_1$) حاصله از (۳۰ mA – ۴۰ KV) استفاده گردید. سپس

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1384.1.3.1.4]

پودرهای آسیاب شده به شکل دیسک به قطر ^{mm}۱۵ و به ضخامت ^{mm}۲ توسط پرس هیدرولیک پرس شدند. در فرآیند پرس کردن پودرها، فشار لازم برای پرس قرص با ضخامت هر چه کمتر با توجه به کارهای دیگران و نیز سعی وخطا برابر با مقدار MPa ۵۵۰ به دست آمد و نیز از پلی‌وینیل الکل به عنوان چسب استفاده شد.[۱۶،۱۷]

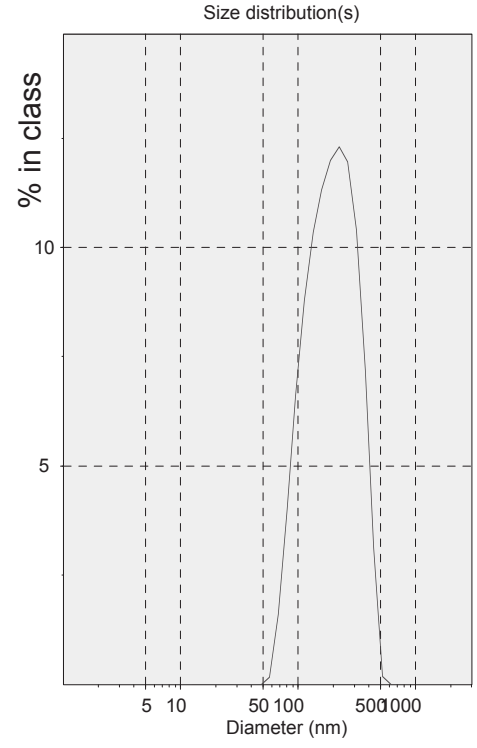
سپس قرص‌های به دست آمده طبق برنامهٔ پخت نشان داده شده در شکل (۷) زینتر شدند.[۱۶] به منظور به دست آوردن دمای بهینهٔ زینترینگ قرص‌های پرس شده، در دماهای ۱۰۵۰°C، ۱۱۰۰°C، ۱۱۵۰°Cو ۱۲۰۰°C و در اتمسفر هوا زینتر شدند. سپس دانسیتهٔ نمونه‌ها در دماهای فوق اندازه‌گیری شد و در نهایت دمای بهینهٔ زینترینگ با توجه به دانسیته بر حسب دمای زینترینگ تعیین شد. به منظوراندازه‌گیری خواص الکتریکی برقگیر، قرص‌های زینترشده الکترودگذاری شدند و الکترودهای از جنس مس توسط خمیر نقره به نمونه‌ها متصل گردیده، هریک در دمای $^{°C}$۵۵۰ به مدت ۳۰ دقیقه حرارت داده شدند تا اتصال به خوبی برقرار شود. به منظور رسم منحنی ولتاژ- شدت جریان به نمونه‌ها ولتاژهای مختلف اعمال شد و جریان عبوری توسط دستگاه مولتی‌متر (Keithley 237, Keithley) اندازه‌گیری شد. ولتاژ شکست (V_{BR}) با استفاده از منحنی I-V در دانسیتهٔ جریان ۰/۵ mA/cm^2 اندازه‌گیری گردید و همچنین ضریب غیر خطی (α) بر اساس رابطهٔ زیر که در آن V_1 و V_2 در دانسیتهٔ جریانهای ۱ و ۱۰ mA/cm^2 اندازه‌گیری شده‌اند، محاسبه گردید.[۱۸،۱۹،۲۰]

$$\alpha = \log(I_2/I_1)/\log(V_2/V_1)$$

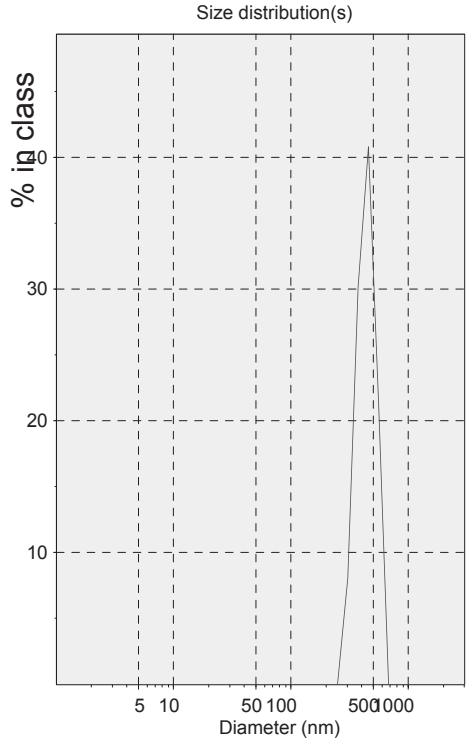
در نهایت از قرص‌های وریستور توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی(SEM) تصاویر گوناگونی تهیه گردید.

۳- بحث و بررسی نتایج

شکل ۱ توزیع اندازهٔ ذرات پودرآسیاب شده توسط آسیاب دیسکی به مدت ۶۰ دقیقه (نمونه‌های a) و شکل ۲ توزیع اندازهٔ ذرات پودرآسیاب شده توسط SPEX به مدت ۶۰ دقیقه و با نسبت گلوله به پودر ۴ (نمونه‌های b) را نشان می‌دهد.



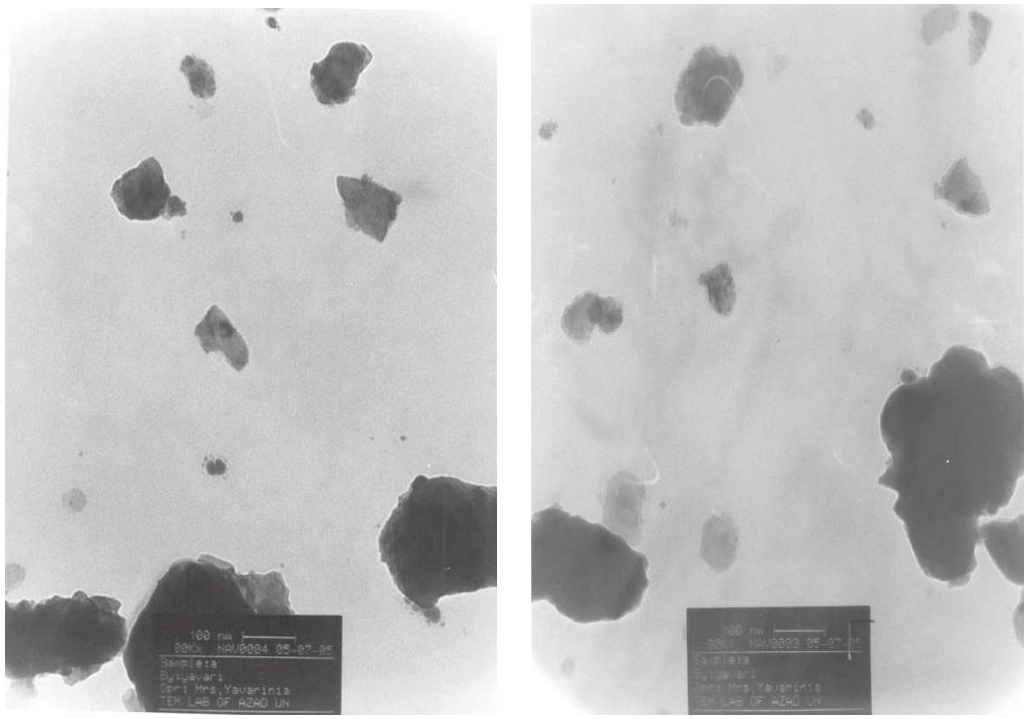
شکل۱–توزیع اندازه ذرات نمونهٔ a



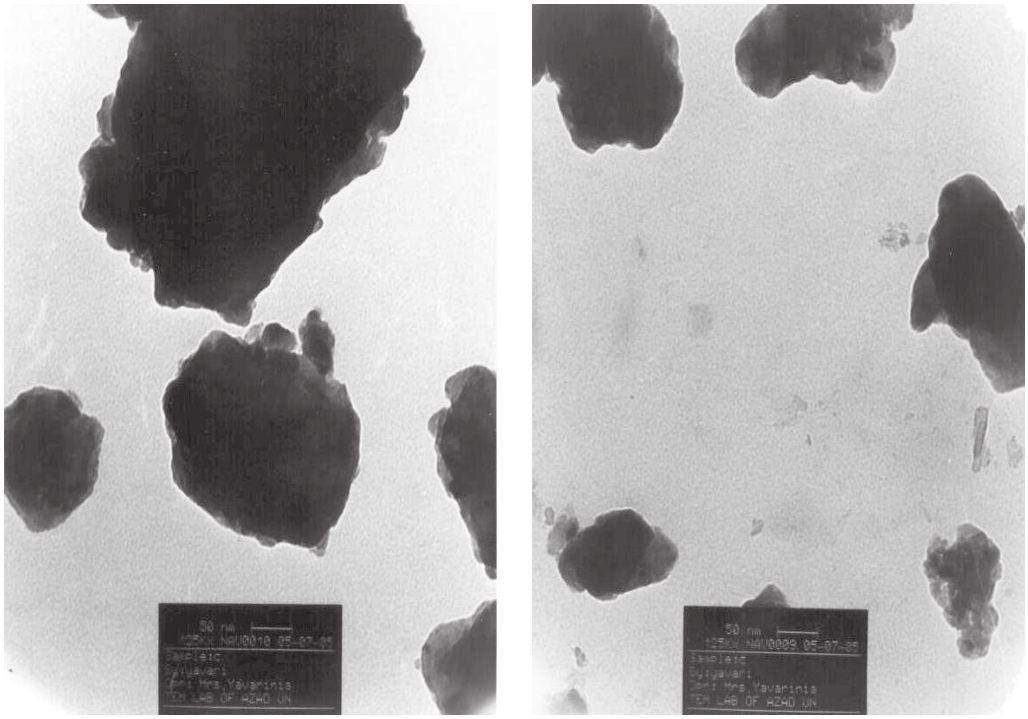
شکل۲– توزیع اندازه ذرات نمونهٔ b

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1384.1.3.1.4]



شکل۳- تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) نمونه a



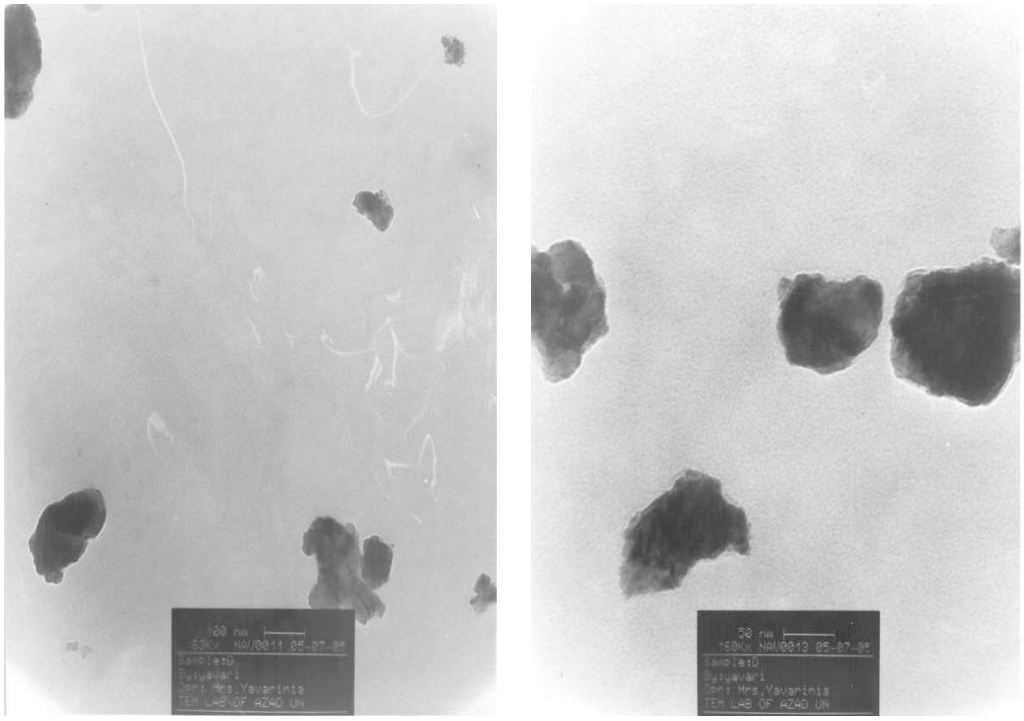
شکل٤- تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) نمونه b

مشاهده می‌شود که اندازهٔ ذرات پودرها پس از آسیاب با انرژی بالا به شدت کاهش یافته است، اما هنوز کاملاً به اندازهٔ نانومتری نرسیده است. با توجه به این مطلب مدت زمان آسیاب به ۸۰ دقیقه و نسبت گلوله به پودر به ۱۰ (نمونه‌های c)، افزایش داده شد و سپس همهٔ پودرها توسط میکروسکوپ الکترونی عبوری TEM مورد بررسی قرار گرفتند. شکلهای ۳، ۴ و ۵ عکسهای گرفته شده توسط میکروسکوپ الکترونی عبوری TEM از پودرها را نشان می‌دهد. چنانچه در این عکسها مشاهده می‌شود، پودرها نسبتاً آگلومره شده‌اند که این مساله بالا بودن نسبی اندازهٔ ذرات را در منحنی‌های توزیع اندازهٔ ذرات توجیه می‌کند. همچنین مشاهده

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-08]

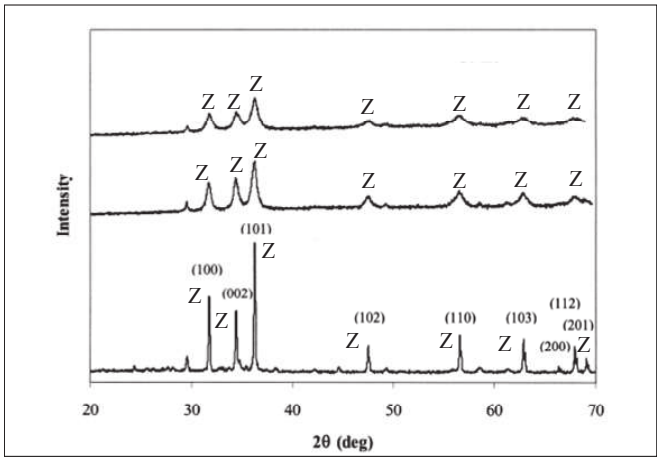
[DOR: 20.1001.1.17353351.1384.1.3.1.4]

می‌شود که پس از افزایش مدت زمان آسیاب به ۸۰ دقیقه و نسبت گلوله به پودر به ۱۰، تقریباً اکثر ذرات کوچکتر از ۱۰۰ نانومتر و بخش قابل توجهی از آنها کوچکتر از ۵۰ نانومتر شده‌اند. در شکل ۵ مشاهده می‌شود که پودرها به شدت آگلومره شده‌اند و میزان آگلومراسیون در این نمونه‌ها به شدت افزایش یافته است که این امر به دلیل فعال شدن سطح پودرها در اثر آسیاب با انرژی بالا می‌باشد.



شکل۵- تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) نمونه c

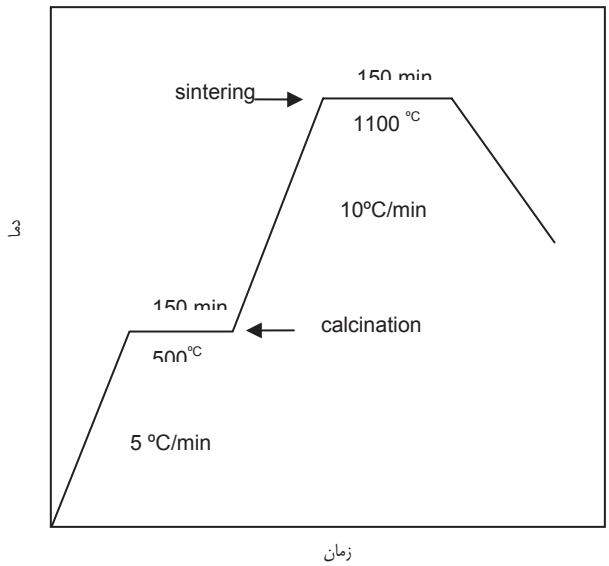
شکل (۶) آنالیز فازی XRD را برای پودرهای آسیاب شده توسط SPEX به مدت ۸۰ دقیقه و با نسبت گلوله به پودر ۱۰ ونیز به مدت ۶۰ دقیقه و با نسبت گلوله به پودر ۴ و همچنین پودرهایی که آسیاب با انرژی بالا نشده‌اند نشان می‌دهد. برای پودرهای SPEX نشده پیکهای مربوط به ZnO هگزاگونال در زوایای ۳۶/۲۵ ، ۳۱/۷۵ و ۳۴/۴۱ که به ترتیب مربوط به صفحات (۱۰۱) ، (۱۰۰) و (۰۰۲) می‌باشند کاملاً مشخص است و پیکهای مربوط به اکسیدهای افزودنی به علت مقدار کم آنها که زیر۱٪ مولی هستند قابل تشخیص نمی‌باشد.



شکل٦- نتایج آنالیز فازی XRD پودرهای آسیاب شده که پیکهای مربوط به ZnO هگزاگونال در شکل با نماد Z مشخص شده‌اند(با مقایسه با کارت شمارهٔ 0664-05) و پیکهای مربوط به اکسیدهای افزودنی به علت مقدار کم آنها که زیر ۱٪ مولی هستند قابل تشخیص نمی‌باشد.

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1384.1.3.1.4]



شکل۷- برنامهٔ پخت قرص‌های برقگیر

همچنین با توجه به نتایج حاصل از آنالیر فازی توسط XRD مشاهده می‌شود که دلیلی بر حضور تنگستن و یا کربن در پودرهای حاصل از آسیاب وجود ندارد لذا می‌توان چنین نتیجه گرفت کـه فرآینـد آسـیاب ناخالـصی قابل توجهی وارد ترکیب برقگیر نکرده است. برای پودرهای SPEX شده پهن شـدن شـدید پیکهـا مـشاهده می‌شود که این مساله به دلیل کاهش زیاد اندازهٔ کریستالیتها در اثر آسیاب مکانیکی با انرژی بـالا مـی‌باشـد، که این کاهش اندازهٔ ذرات با توجه به منحنی توزیع اندازهٔ ذرات پودرها (شکل‌هـای۱و۲) و عکـسهای گرفتـه شده توسط میکروسکوپ الکترونی عبوری TEM ، مشخص است. همان‌طور کـه در عکـسهای گرفتـه شـده توسط میکروسکوپ الکترونی عبوری TEM مشاهده می‌شود اندازهٔ ذرات پودر برای نمونـه‌هـای b و c یعنـی نمونه‌هایی که SPEX شده‌اند در ابعاد نانومتری می‌باشد که این امر با منحنی‌های توزیع انـدازهٔ ذرات حاصـل از دستگاه زتاسایزر هم‌خوانی کامل دارد.

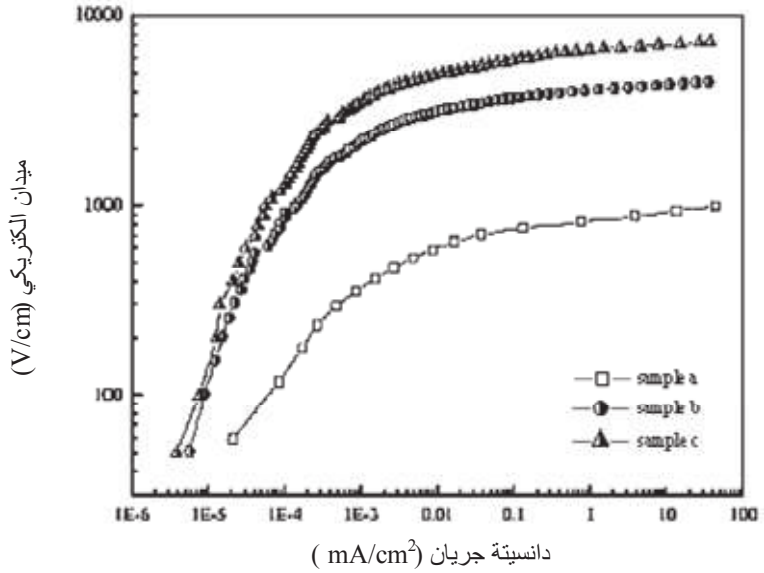
بیشترین مقدار دانسیتهٔ نسبی برای نمونه‌های ساخته شده از پودرهای با ابعاد میکرونی، در حدود ۹۴ الـی ۹۵ ٪ در دمای زینتر ۱۲۰۰°C و مدت زمان زینتر برابر ۱۵۰ دقیقه به دست آمده است، درحالی‌که مقـدار دانـسیتهٔ نسبی برای نمونه‌های ساخته شده از پودرهای نـانومتری، بـالاتر از ۹۸٪ مـی‌باشـد و دمـای زینترینـگ ایـن نمونه‌ها به۱۰۰۰°C کاهش یافته است. برای هر دو گروه نمونه‌های SPEX شده مشاهده شد که بـا افـزایش مدت زمان آسیاب، دانیستهٔ نمونهٔ زینتر شده افزایش پیدا کرد که این امر به احتمال بسیار زیاد به علت ریزتـر شدن کریستالیتهای مخلوط اکسیدی می‌باشد. پدیدهٔ دیگری که در حین زینترینگ نمونه‌هـا رخ داد، کـاهش دانسیتهٔ نمونه‌ها در مدت زمان زینتر بالاتر از ۱۵۰ دقیقـه و همـین‌طـور بـا افـزایش دمـای زینتـر بـه بـیش از۱۰۰۰°C برای نمونه‌های b و c بود که این امـر چنانکـه Asokan [۲۱] ونیـز Chen et al [۲۲] در مـورد آن بحث کرده‌اند، به دلیل درشت شدن ریزساختار و کاهش مقدار بعضی عناصر نظیر Bi مـی‌باشـد. مـسلماً ایـن افزایش دانسیته و در نتیجه کاهش تخلخل موجود در نمونه و همگن‌تر شدن ریزساختار نهایی کـه در نتیجـهٔ آسیاب مکانیکی با انرژی بالا رخ می‌دهد اثر بسیار مطلوبی بر کلیهٔ خواص الکتریکی برقگیـر خواهـد داشـت. همچنین کاهش دمای زینترینگ به مقدار ۲۰۰°C منجر به کاهش اندازهٔ نهایی دانه‌ها می‌شود، که این مـساله نیز به شدت باعث افزایش ضریب غیرخطی برقگیر (α) و نیز ولتاژ شکست (V_{BR})، چنانچه در نتایج حاصـل از اندازه‌گیری‌های الکتریکی مشخص است، خواهد شد.

شکل(۸) منحنی I-V را برای نمونه‌های a و b و c نشان می‌دهد کـه بـه منظـور مقایـسه کـردن، نتـایج بـه صورت میدان الکتریکی (V/cm) بر حسب دانسیتهٔ جریان (mA/cm^2) آورده شده اسـت. در جـدول(۲) مقـادیر

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1384.1.3.1.4]

ولتاژ شکست و ضریب غیرخطی برقگیر (α) که از منحنی I-V استخراج شده‌اند آورده شده است، مشاهده می‌شود که ولتاژ شکست برای نمونه‌های a و b و c به ترتیب برابر ۷۰۰ ، ۴۵۰۰ و ۸۰۰۰ (V/cm) می‌باشد، که این افزایش ولتاژ شکست در اثر آسیاب پر انرژی، به علت ریزشدن دانه‌ها [۲۳] می‌باشد.



شکل۸- منحنی I-V نمونه‌های زینتر شده

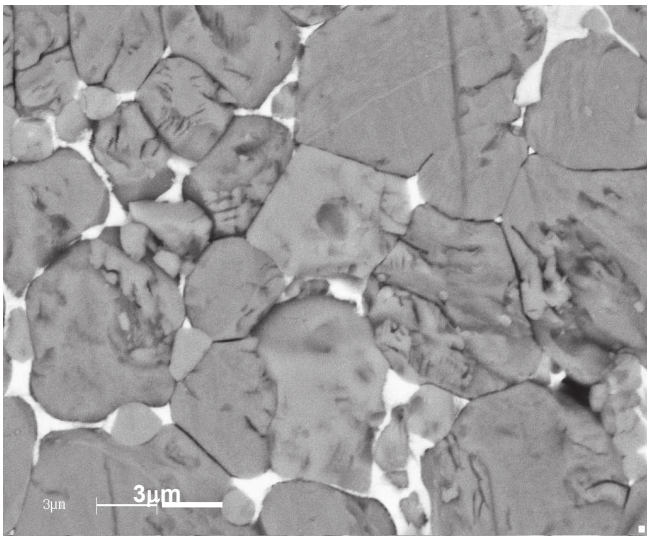
جدول۲- خواص الکتریکی نمونه‌های مختلف: نمونهٔ a:نمونهٔ ساخته شده از پودری که فقط آسیاب دیسکی شده است، نمونهٔ b:نمونهٔ ساخته شده از پودری که ۱ ساعت SPEX شده است، نمونهٔ c :نمونهٔ ساخته شده از پودری که ۸۰ دقیقه SPEX شده است.

نمونه/خواص	ضریب غیر خطی(α)	ولتاژ شکست(V_{BR})	دمای زینتر(°C)
نمونه a	۲۵	۷۰۰	۱۲۰۰
نمونه b	۴۵	۴۵۰۰	۱۰۰۰
نمونه c	۶۰	۸۰۰۰	۱۰۰۰

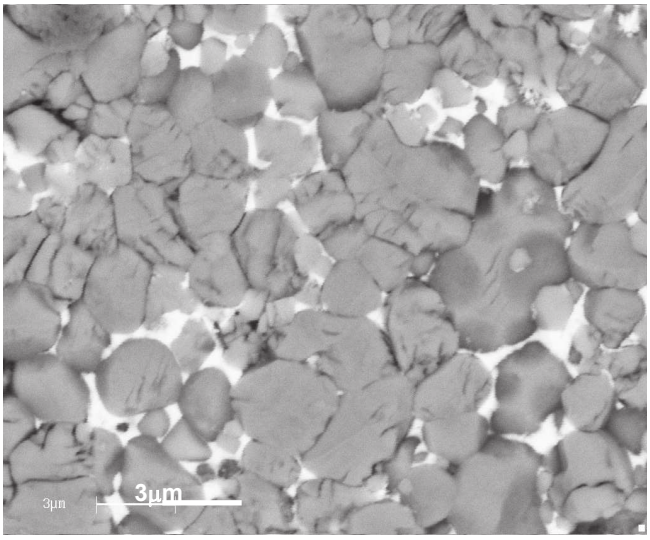
در جدول (۲) همچنین مشاهده می‌شود که مقادیر α برای نمونه‌های a و b و c به ترتیب ۲۵ ، ۴۵ و ۶۰ به دست آمده است و کم بودن مقدار α برای نمونهٔ a به دلیل رنج وسیع اندازهٔ دانه و کم بودن دانسیتهٔ پس از زینتر، در مقایسه با نمونه‌های b و c می‌باشد. همچنین برای هر گروه از نمونه‌ها مشاهده شد که با افزایش دما و یا زمان زینتر از مقادیر بهینهٔ ذکر شده در بالا، مقدار α کاهش قابل توجهی پیدا کرد که این امر به دلیل رشد افراطی اندازهٔ دانه می‌باشد[۲۴]. شکلهای ۹و۱۰و۱۱ تصاویر SEM تهیه شده از نمونه‌های نهایی را نشان می‌دهد. چنانچه مشاهده می‌شود اندازهٔ دانهٔ نهایی از نمونهٔ a تا c به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است که این امر کاملاً منطبق با نتایج به دست آمده از اندازه‌گیریهای الکتریکی می‌باشد و لذا می‌توان نتیجه گرفت که آسیاب مکانیکی با انرژی بالا علاوه بر ریزتر کردن اندازهٔ دانه نهایی، باعث می‌شود که همگی عناصر افزوده شده یکنواخت‌تر پراکنده شوند که این امر علاوه بر بهبود خواص الکتریکی، خود عاملی در جلوگیری از رشد بی‌رویهٔ دانه‌ها می‌باشد، زیرا عناصری که نقش کنترل اندازهٔ دانه را دارند بهتر می‌توانند در مرزدانه‌ها توزیع شوند و از حرکت آنها جلوگیری کنند.

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-08]

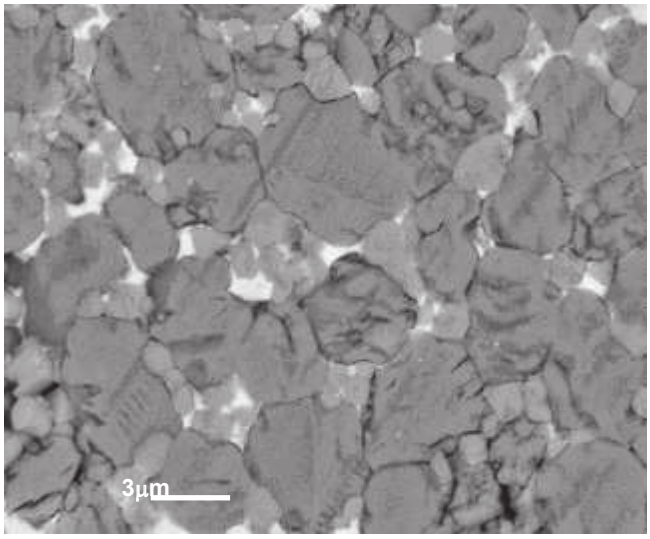
[DOR: 20.1001.1.17353351.1384.1.3.1.4]



شکل۹– تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نمونه a



شکل۱۰– تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری (SEM) نمونه b



شکل۱۱– تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری (SEM) نمونه c

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1384.1.3.1.4]

٤- نتیجه‌گیری

استفاده از نانوپودرهای تولید شده توسط آسیاب مکانیکی با انرژی بالا (SPEX)، در ساخت برقگیرهای بر پایهٔ اکسید روی سبب بهبود خواص الکتریکی برقگیر، نظیر ولتاژ شکست و ضریب غیر خطی (α) و نیز بهبود زینترپذیری و در نتیجه کاهش دمای زینترینگ برقگیر به میزان چشمگیری می‌شود، که این امر به دلیل کاهش اندازهٔ نهایی دانه‌ها در ریزساختار برقگیر و همچنین هموژینتهٔ بسیار خوب ریزساختار نهایی در اثر استفاده از نانوذرات در ساخت برقگیر می‌باشد.

مراجع

1. Matsuoka, M., Discovery of ZnO varistors and their progress for the two decades. Ceram. Trans., 1982, 3, 3-21.
2. Yet –ming, D.P.Birnie, W.D.Kingery (1997), Physical Ceramics, MIT Series Mat. Sci. & Eng., Wiley, New York.
3. Carlsson, J.M. et al., The effects of doping a grain boundary in ZnO with various concentrations of Bi. Surface Science 2003, 532-535, 351-358.
4. C.-H. Kim, J.-H. Kim, Microstructure and electrical properties of ZnO-ZrO_2-Bi_2O_3-M_3O_4 (M=Co, Mn). J. Eur. Ceram. Soc. Accepted 27 December 2003.
5. Bernik, S. et al., Influence of Bi_2O_3/TiO_2 , Sb_2O_3 , Cr_2O_3 doping on low-voltage varistor ceramics. J. Eur. Ceram. Soc. 1999, 19, 709-713.
6. Brankovic, Z. et al., Structural and electrical properties of ZnO varistors containing different spinel phases. Ceramic International 2001, 27, 115-122.
7. C. –H. Lu et al., Effects of additives and secondary phases on the sintering behavior of zinc oxide-based varistors. Materials Chemistry and Physics 2000, 62, 164-168.
8. C.-W. Nahm, H.-S. Kim, Effect of Pr_6O_{11}/CoO mole ratio on nonlinear properties and DC accelerated aging characteristics of ZnO-Pr_6O_{11}-CoO-Dy_2O_3-based varistors. Materials Letters 2002, 56, 379-385.
9. C.-W. Nahm, The electrical properties and d.c. degradation characteristics of Dy_2O_3 doped Pr_6O_{11}-based ZnO varistors. J. Eur. Ceram. Soc. 2001, 21,545-553.
10. C.-W. Nahm, Influence of praseodymium oxide/cobalt oxide ratio on microstructure and electrical properties of zinc oxide varistor ceramics. Materials Chemistry and Physics 2003, 80, 746-751.
11. S.-Y Chun, Mizutani, N., Mass transport via grain boundary in Pr-based ZnO varistors and related electrical effects. Materials Sci. & Eng. 2001, B 79, 1-5.
12. Hozer L. (1994), Semiconductor Ceramics Grain Boundary Effects, PWN Ltd., Poland.
13. Mahan, G.D., Levinson, M.L., Philipp, H.R., Theory of conduction in ZnO varistors. J. Appl. Phys. 50(4), April 1979.
14. Alamdari, H.D. et al., High Energy Ball milled Nanocrystalline ZnO varistors, Mater. Sci. Forum, 2000, 343, 908-917.
15. Matsuoka, M., Nonohmic properties of zinc oxide ceramics. Jpn. J. Appl. Phys., 1971, 10, 736-746.
16. U.S. Patent, No. 6,620,346.
17. C. Phui Fah, J. Wang, Effect of high-energy mechanical activation on the microstructure and electrical properties of ZnO-based varistors. Solid States Ionics 2000, 132, 107-117.
18. C.-W. Nahm et al./ Materials Chemistry and Physics 82 (2003) 157-164.
19. J. Wu. Et al./ Journal of the European Ceramic Society xxx (2004) xxx-xxx.
20. -C.-H. Kim, J.-H. Kim, Journal of the European Ceramic Society 24 (2004) 2537-2546.
21. T. Asokan, G.N.K. Iengar, G.R. Nagabhushana, Studies on microstructure and density of sintered ZnO-based nonlinear resistors, J. Mater Sci. 22 (1987) 2229.
22. C.S. Chen, C.T. Kuo, I.N. Lin, Electrical properties of ZnO varistors prepared by microwave sintering process, Jpn. J. Appl. Phys. 35 (1996) 4696.
23. G. Agarwal, R.F. Speyer, Effect of rate controlled sintering on microstructure and electrical properties of ZnO doped with bismuth and antimony oxides, J. Mater Res. 12 (1997) 2447.
24. X.Y. Kang, Y.Han, M.D. Tao, M.J. Tu, Analysis of ZnO varistors prepared from nanosize ZnO precursors, Mat. Res. Bull. 33 (1998) 1703.

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1384.1.3.1.4]