

بررسی ساخت و خواص کامپوزیت‌های PZT-PVDF به روش ریخته‌گری نواری

رضا کاوه، محمد مسعود محبی، مریم کاری، سعید باغشاهی

گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

m.mohebi@eng.ikiu.ac.ir

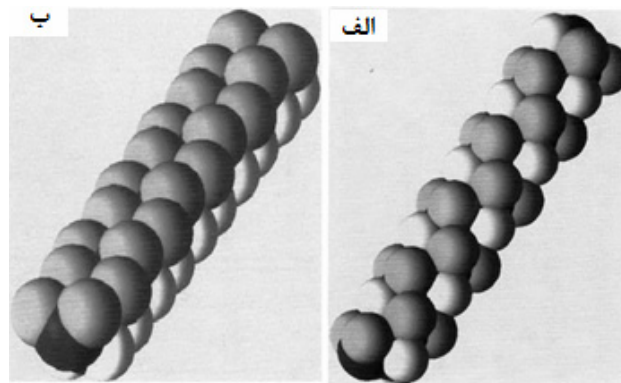
چکیده: در طراحی مبدل‌ها برای کاربردهایی که هر دو عملکرد محرک و سنسور را دارند، کامپوزیت‌های پیروزرامیک- پلیمر نقش کلیدی را بازی می‌کنند. در این پژوهش، با استفاده از روش ریخته‌گری نواری کامپوزیت‌های PZT-PVDF با الگوی اتصال ۳-۰- در کسرهای حجمی ۰/۷-۰/۱۵ PZT شکل داده شده و با دو سرعت خشک کردن خشک شدند. مشخصات نمونه‌ها با استفاده از SEM، d_{33} متر و امیدانس آنالایزر مطالعه شد. با افزایش ویسکوزیته دوغاب یا سوسپانسیون و استفاده از همزن مافوق صوت جهت پراکنده‌سازی ذرات PZT، کامپوزیتی بدون ته‌نشینی ذرات سرامیک به دست آمد. تصاویر SEM کامپوزیت خشک شده با سرعت زیاد، پراکنده‌گی یکنواخت ذرات PZT در زمینه PVDF و برای کامپوزیت خشک شده با سرعت کم، جدایش بافترا نشان داد. اندازه‌گیری‌های ضریب بار پیزوالکتریک نشان داد که افزایش درصد حجمی PZT و ایجاد جدایش بافت درون کامپوزیت هر دو منجر به افزایش مقدار d_{33} کامپوزیت می‌شود و بیشینه مقدار آن در کامپوزیت دارای جدایش بافت با کسر حجمی سرامیک ۰/۷ بدست آمد. اندازه‌گیری‌های ظرفیت خازنی نیز نشان داد که با افزایش کسر حجمی PZT ثابت دی‌الکتریک نسبی این کامپوزیت‌ها افزایش می‌یابد. بهینه مقدار ضریب ولتاژ پیزوالکتریک (g_{33}) در کسر حجمی سرامیک حدود ۰/۵۵ و بیشینه مقدار ضریب شایستگی (FOM_{33}) در محدوده اندازه‌گیری شده در کسر حجمی سرامیک ۰/۷ بدست آمد.

کلید واژه: پیزوالکتریسته، پیروزکامپوزیت ۳-۰، ریخته‌گری نواری، PZT، PVDF.

۱- مقدمه

محلول جامد تیتانات زیرکونات سرب (PZT) یک پیروزرامیک با ساختار پروسکایت می‌باشد. از میان ترکیبات PZT، آن‌هایی بهترین قطبش را دارند که حاوی هر دو ساختار رمبوهدرال و تتراگونال می‌باشند یا به عبارتی ترکیب آن‌ها در نزدیکی مرز فازی مورفوتروپیک (MPB) قرار می‌گیرد. زیرا اگر PZT تنها ساختار تتراگونال را داشته باشد در ۶ جهت و اگر تنها ساختار رمبوهدرال را داشته باشد در ۸ جهت می‌تواند قطبی شود ولی اگر در نزدیکی MPB باشد، هر دو ساختار را دارا خواهد بود و در نتیجه می‌تواند در ۱۴ جهت قطبش صورت گیرد. ثوابت دی‌الکتریک، پیزوالکتریک و ضریب کوپلینگ الکترومکانیکی همگی مقدار بیشینه را مطابق با ترکیب MPB نشان می‌دهند [۱]. علاوه بر این جهت افزایش خواصی همچون گذردهی، فاکتور کوپلینگ و مقاومت از افزودنی‌هایی مانند La^{2+} ، Nd^{2+} ، Nb^{5+} و Ta^{5+} استفاده می‌شود که به PZT بدست آمده اصطلاحاً soft-PZT گفته می‌شود [۳و۲]. با این حال سرامیک‌های پیزوالکتریک در کاربردهایی نظیر هیدروفون‌ها دارای عیوبی مانند چگالی زیاد، امیدانس آکوستیک زیاد، ضریب گذردهی نسبتاً زیاد، ضریب ولتاژ پیزوالکتریک کم و تردی زیاد هستند [۴].

پلیمرهای پیزوالکتریک فاقد ویژگی‌های نامطلوب ذکر شده برای سرامیک‌ها هستند. پلی‌وینیلیدن فلوراید (PVDF) یکی از محبوب‌ترین پلیمرهای پیزوالکتریک است. فرمول شیمیایی PVDF، $\text{CH}_2\text{-CF}_2$ است و چهار پلی‌مورف α ، β ، δ و γ دارد. معمولاً از سرمایش مذاب PVDF فاز α بدست می‌آید. در فاز α با توجه به اینکه گشتاورهای دوقطبی‌ها یکدیگر را خنثی می‌کنند، زنجیره‌های ملکولی آن غیرقطبی است (شکل الف-۱). از لحاظ پیزوالکتریسیته مطلوب‌ترین فاز PVDF، β می‌باشد که از عیب‌های درون زنجیره اتصال سربه سر $(\text{-CF}_2\text{-CF}_2\text{-})$ و اتصال دم به دم $(\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-})$ بوجود می‌آید (شکل ب-۱) [۵]. جهت افزایش میزان عیوب و داشتن مقدار بیشتری از فاز β درون سیستم، از روش‌هایی همچون اعمال میدان الکتریکی بزرگ، کشش و افزودنی‌هایی همچون تری‌فلوئور اتیلن و تشکیل کوپلیمرهای PVDF استفاده می‌شود [۷]. PVDF چگالی کم و قابلیت ارتجاعیت زیادی دارد و از طرفی با توجه به اینکه گذردهی دی‌الکتریک کمی دارد باعث می‌شود تا ضریب ولتاژ پیزوالکتریک بسیار زیادی داشته باشد. با این حال با توجه به اینکه PVDF نسبت به سرامیک‌ها کوپلینگ الکترومکانیکی و ضریب بار پیزوالکتریک کمی دارد، کاربردهای استفاده از آن محدود می‌شود [۸ و ۴].



شکل ۱- الگوی ساختار PVDF: الف) فاز α با زنجیره ملکولی غیرقطبی و ب) فاز β با زنجیره ملکولی قطبی [۵].

کامپوزیت‌های PZT-PVDF در مقایسه با مواد تک فاز خواص بهتری نشان می‌دهند. همانطور که در جدول ۱ نشان داده شده است، این کامپوزیت‌ها ضریب جفت‌شدگی^۱ زیاد، امپدانس کم و ثابت دی‌الکتریک متوسطی را همزمان با هم نشان می‌دهند. علاوه بر این قابلیت ارتجاعی متوسطی نیز دارند و می‌توان آن‌ها را به راحتی شکل داد [۴].

جدول ۱- مزایا (+) و معایب (-) سرامیک‌ها، پلیمرها و کامپوزیت‌های پیزوالکتریک.

پارامتر	سرامیک	پلیمر	کامپوزیت سرامیک- پلیمر
امپدانس آکوستیک	زیاد (-)	کم (+)	کم (+)
ضریب جفت‌شدگی	زیاد (-)	کم (-)	زیاد (+)
ثابت دی‌الکتریک	زیاد (-)	کم (+)	متوسط (+)
قابلیت ارتجاع	سفت (-)	قابل ارتجاع (+)	قابل ارتجاع (+)
قیمت	ارزان (+)	گران (-)	متوسط (+)

¹ Coupling factor

اگرچه سهولت شکل دادن کامپوزیت‌های ۳-۰ نسبت به کامپوزیت‌های دیگر بسیار مطلوب است، ولی رسیدن به پراکندگی کاملاً یکنواخت فازهای سرامیک و پلیمر کار مشکلی است. علاوه بر این حضور خلل و فرج درون کامپوزیت‌ها با کاهش استحکام شکست دی‌الکتریک کامپوزیت، بیشینه مقدار میدان پلاریزاسیون اعمالی را محدود می‌سازد [۴].

اخیراً محققین مختلفی بر روی انواع روش‌های شکل‌دادن همچون روش ریخته‌گری محلولی، پرس سرد، پرس گرم، آلیاژسازی مکانیکی و اکستروژن جهت ساخت کامپوزیت‌های ۳-۰ به مطالعه پرداخته‌اند، که هر یک از این روش‌ها ویژگی‌های منحصر به فرد خود را نشان می‌دهند. گرگوریو و همکارانش [۹] در مطالعه‌ای کامپوزیت‌های PZT-PVDF را به روش ریخته‌گری محلولی ساختند، ولی تنها خواص دی‌الکتریک آن‌ها را بررسی کردند.

ژانگ و همکارانش [۱۰] نیز جهت ساخت کامپوزیت‌های PZT-PVDF، ابتدا گرانول‌های PZT-PVDF را از روش ریخته‌گری محلولی به دست آوردند و سپس با استفاده از پرس سرد کامپوزیت‌های خود را شکل دادند و خواص دی‌الکتریک و پیزوالکتریک آن‌ها را مطالعه کردند. سان و همکارانش [۱۱] از خمیر PZT-PVDF استفاده کردند و کامپوزیت‌های خود را به روش اسکرین پرنٹینگ^۱ بر روی زیرلایه اکسید اینییدیوم-قلع شکل دادند و خواص پیزوالکتریک آن را بررسی کردند.

در مطالعه انجام شده توسط دس-گاپتا و همکارانش [۱۲]، خواص دی‌الکتریک و گرماالکتریک کامپوزیت‌های PZT-PVDF مورد بررسی قرار گرفته است.

ونکاتراگاوآراج و همکارانش [۱۳] دو روش ریخته‌گری محلولی و پرس گرم را جهت ساخت کامپوزیت‌های PZT-PVDF به کار برده‌اند و به بررسی خواص دی‌الکتریک و پیزوالکتریک آن‌ها پرداخته‌اند. آن‌ها بیان کردند که کامپوزیت بدست آمده از روش پرس گرم، چگالی، استحکام دی‌الکتریک، ثابت دی‌الکتریک و ضریب بار پیزوالکتریک بیشتر و ضریب ولتاژ پیزوالکتریک کمتری نسبت به کامپوزیت تهیه شده از روش ریخته‌گری محلولی دارد. آن‌ها d_{33} کامپوزیت حاوی ۵۰ درصد حجمی PZT شکل داده شده به روش ریخته‌گری محلولی و پرس گرم را به ترتیب $9/4 \text{ pC/N}$ و $13/8 \text{ pC/N}$ و g_{33} این کامپوزیت‌ها را به ترتیب $37/5 \text{ mVm/N}$ و $16/1 \text{ mVm/N}$ گزارش کردند.

سیما و همکارانش [۱۴] تنها کسانی بوده‌اند که با استفاده از روش ریخته‌گری نواری کامپوزیت‌های PZT-PVDF را ساخته‌اند که البته تنها خواص دی‌الکتریک را مطالعه کرده‌اند.

هدف از انجام این پژوهش ریخته‌گری نواری کامپوزیت‌های PZT-PVDF و بررسی تأثیر پراکندگی دانه‌های PZT و بدست آوردن روند تغییرات خواص دی‌الکتریکی و پیزوالکتریکی هنگام تغییر کسر حجمی PZT است.

۲- مراحل آزمایشگاهی

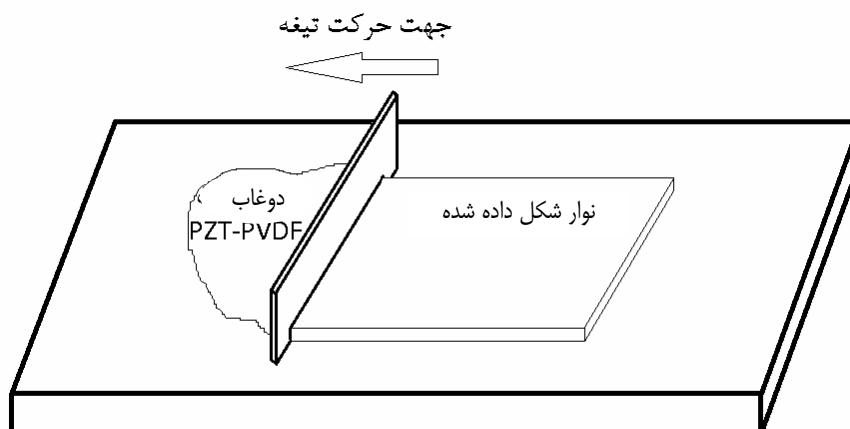
مواد اولیه‌ی به کار رفته در انجام این پژوهش عبارت از پودر PZT5-A (کد ۵۰۲ از شرکت الکتروسرامیک مورگان^۲) به عنوان فاز سرامیک، پلیمر PVDF (نوع ۱۰-۱۰ از شرکت سولف^۳) به عنوان فاز پلیمر و دی‌متیل‌فرم‌آمید DMF (کد ۳۹۵۲۴۶۳۴ از K

¹ Screen printing

² Morgan electroceramics

³ Solef

شرکت مرک^۱) به عنوان مایعی جهت ساخت دوغاب PZT و همچنین به عنوان حلال PVDF هستند. گرانول‌های PVDF درون DMF با نسبت ۰/۲ g/ml به وسیله همزن مغناطیسی در دمای °C ۷۵ حل شدند و محلولی عاری از حباب بدست آمد. در مرحله بعد پودر PZT پس از توزین به محلول PVDF-DMF اضافه شد و با استفاده از همزن مغناطیسی مخلوطی همگن بدست آمد. دوغاب به دست آمده بر روی سطح شیشه‌ای ریخته‌گری نواری شد و لایه‌ای به ضخامت ۱/۲mm به دست آمد (شکل ۲). در مرحله بعد به منظور خروج DMF از ترکیب، فیلم به دست آمده درون خشک‌کن با دمای °C ۱۰۰ قرار گرفت. به منظور بررسی تاثیر دمای خشک‌کن دوغاب PZT-PVDF مشابه با روش قبل ساخته شد و در دماهای ۱۱۰، ۱۲۰، ۱۳۰، ۱۴۰ و °C ۱۵۰ قرار گرفت تا دمای بهینه خشک‌کردن یافت شود.



شکل ۲- طرحواره ریخته‌گری نواری

همچنین به منظور بررسی تاثیر پراکنده‌سازی ذرات توسط همزن مافوق صوت، ویسکوزیته سوسپانسیون و سرعت خشک‌کن بر روی پراکنندگی ذرات PZT درون کامپوزیت، پودر PZT پس از توزین به وسیله همزن مافوق صوت (مدل ۱۰-۴۰۰۰۰۰۰ Misonix sonicator-S ساخت کشور آمریکا) با اعمال انرژی در مدت زمان ۱۰ دقیقه با نسبت ۰/۵ g/ml درون DMF پراکنده شد (نرخ اعمال انرژی ۱ kJ/min) و سرانجام سوسپانسیون PZT-DMF به محلول PVDF-DMF آماده شده از قبل اضافه شد و بر روی همزن مغناطیسی با دمای °C ۷۵ قرار گرفت تا با خروج بخشی از DMF ویسکوزیته آن افزایش یابد. سوسپانسیون حاصله از این روش مشابه حالت قبل بر روی سطحی شیشه‌ای ریخته شد و ضخامت هر یک از آن‌ها به ۱/۲mm رسانده شد. یک گروه از فیلم‌های بدست آمده از این روش درون خشک‌کن با سرعت خشک‌کشی ۶/۲ mg/cm²min و گروه دیگر درون خشک‌کن با سرعت خشک‌کشی ۹/۶ mg/cm²min به مدت ۲۰ دقیقه در دمای °C ۱۳۰ (بهینه دمای خشک‌کن یافته شده از بررسی دمای خشک‌کن در مرحله قبل است و اختلاف سرعت خشک‌کشی خشک‌کن‌ها ناشی از جریان هوای متفاوت درون آن‌ها است) قرار داده شد تا DMF درون فیلم خارج شود. کامپوزیت‌هایی با کسرهای حجمی مختلف سرامیک (۴۰، ۳۰، ۱۵، ۵۰، ۵۵، ۶۰، ۷۰) با سرعت‌های خشک‌کن زیاد و کم تهیه شد. تمامی فیلم‌های کامپوزیت به دست

^۱ Merck

آمده با استفاده از دستگاه پلاریزاسیون کرونا (ساخت شرکت Badi کشور ایران) تحت میدان 30 kV با فاصله سوزن تا فیلم 1cm به مدت 30 دقیقه در دمای 80°C و سپس 15 دقیقه در دمای محیط پلاریزه شدند (ضخامت تمامی نمونه‌های ساخته شده به یکدیگر نزدیک بوده و در نتیجه میدان اعمالی برای آن‌ها ثابت در نظر گرفته شده است و دیگر شرایط پلاریزاسیون از مطالعات انجام شده توسط علی سلیمی و همکارش [15] گرفته شده است).

پراکندگی پودر PZT درون کامپوزیت توسط میکروسکوپ نوری (ساخت شرکت Olympus کشور آمریکا) و میکروسکوپ الکترون روبشی (ساخت شرکت Tescan کشور چک) مطالعه شد. ضخامت نمونه‌ها با استفاده از میکرومتر و ضریب بار پیزوالکتریک نمونه‌ها با استفاده از دستگاه d₃₃ متر (مدل KFC-PM3500 ساخت کشور آمریکا) اندازه‌گیری شد. به‌منظور اندازه‌گیری ظرفیت خازنی، مساحت دایره‌ای به قطر 7 mm در دو طرف هر یک از فیلم‌های کامپوزیت با استفاده از خمیر نقره (ساخت شرکت Asahi کشور ژاپن) الکتروگذاری شد. ظرفیت خازنی کامپوزیت‌ها با استفاده از دستگاه امپدانس آنالایزر (مدل HP-4194A ساخت کشور آمریکا) در فرکانس 1 kHz اندازه‌گیری شد. با داشتن ظرفیت خازنی (C)، مساحت سطح الکتروگذاری شده (A) و فاصله بین الکترودها (t) می‌توان به‌وسیله معادله 1 مقدار گذردهی نسبی (ε_r) را به‌دست آورد.

$$\epsilon_r = \frac{Ct}{\epsilon_0 A} \quad (1)$$

که ε₀ گذردهی خلاء (8/85×10⁻¹²F/m) است.

با توجه به اینکه ضریب بار پیزوالکتریک (d) به‌واسطه‌ی ثابت گذردهی نسبی (ε_r) با ضریب ولتاژ پیزوالکتریک (g) متناسب است، با استفاده از معادله (2) ضریب ولتاژ پیزوالکتریک به‌دست می‌آید.

$$g_{33} = \frac{d_{33}}{\epsilon_r \epsilon_0} \quad (2)$$

همانطور که در معادله (3) آمده است، ضریب شایستگی در امتداد جهت پلاریزاسیون (FOM₃₃) با استفاد از ضریب بار پیزوالکتریک و ضریب ولتاژ پیزوالکتریک محاسبه می‌شود [16].

$$FOM_{33} = d_{33} \times g_{33} \quad (3)$$

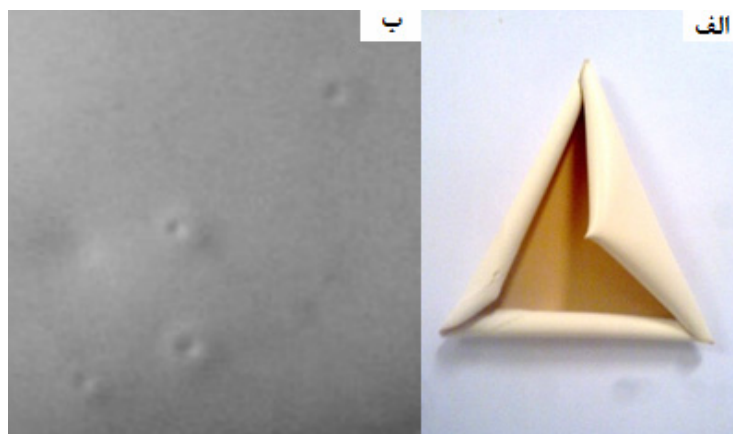
بررسی کمی فازی بر اساس تصاویر میکروسکوپی با استفاده از نرم‌افزار متریال پلاس (مدل 4/2 از شرکت دویت) صورت گرفت.

۳- نتایج و بحث

تصویر کامپوزیت تهیه شده از روش ریخته‌گری نواری با استفاده از مخلوط نمودن محلول PVDF و پودر PZT در شکل الف-3 نشان داده شده است. اختلاف رنگی که در سطح بالایی و سطح زیرین فیلم کامپوزیت دیده می‌شود به وضوح بیان‌گر ته‌نشینی نسبی ذرات PZT به دلیل اختلاف زیاد چگالی بین PZT و PVDF است (ρ_{PZT} = 7/5 g/cm³ و ρ_{PVDF} = 1/8 g/cm³). بررسی‌های میکروسکوپی نیز ته‌نشینی نسبی ذرات PZT را تایید نمود.

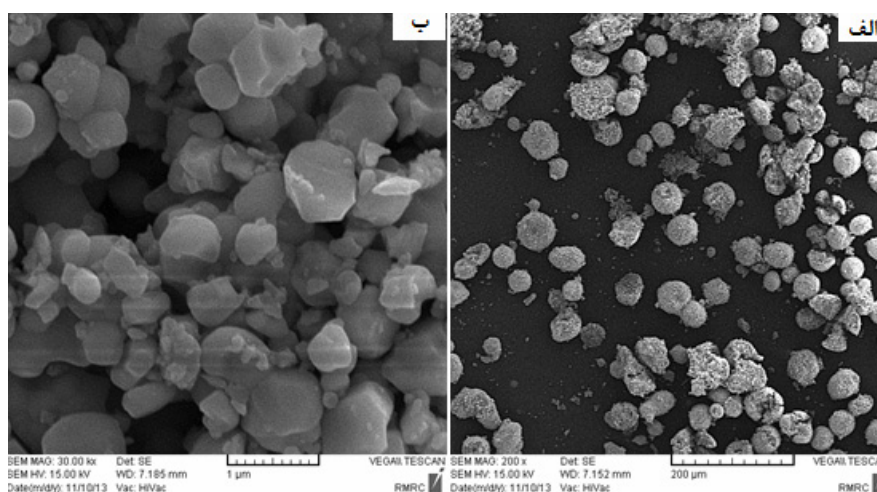
افزایش دمای خشک‌کن به‌منظور کاهش ته‌نشینی PZT منجر به کاهش نسبی مشکل ته‌نشینی شد. از طرفی افزایش دما به

بیش از 130°C منجر به جوشیدن DMF و ایجاد حباب‌هایی درون فیلم کامپوزیت شد (شکل ب-۳). این حباب‌ها باعث کاهش استحکام شکست دی‌الکتریک کامپوزیت شدند و در نتیجه بیشینه مقدار میدان پلاریزاسیون اعمالی را تا حدود 2 kV محدود ساختند. بنابراین دمای بهینه جهت خروج سریع DMF از ترکیب 130°C به دست آمد.



شکل ۳- کامپوزیت‌های شکل داده شده به روش ریخته‌گری نواری بدون استفاده از همزن مافوق صوت: الف) رسوب کرده در کامپوزیت خشک شده در دمای 100°C و ب) جوش‌های ایجاد شده در کامپوزیت خشک شده در دمای 140°C .

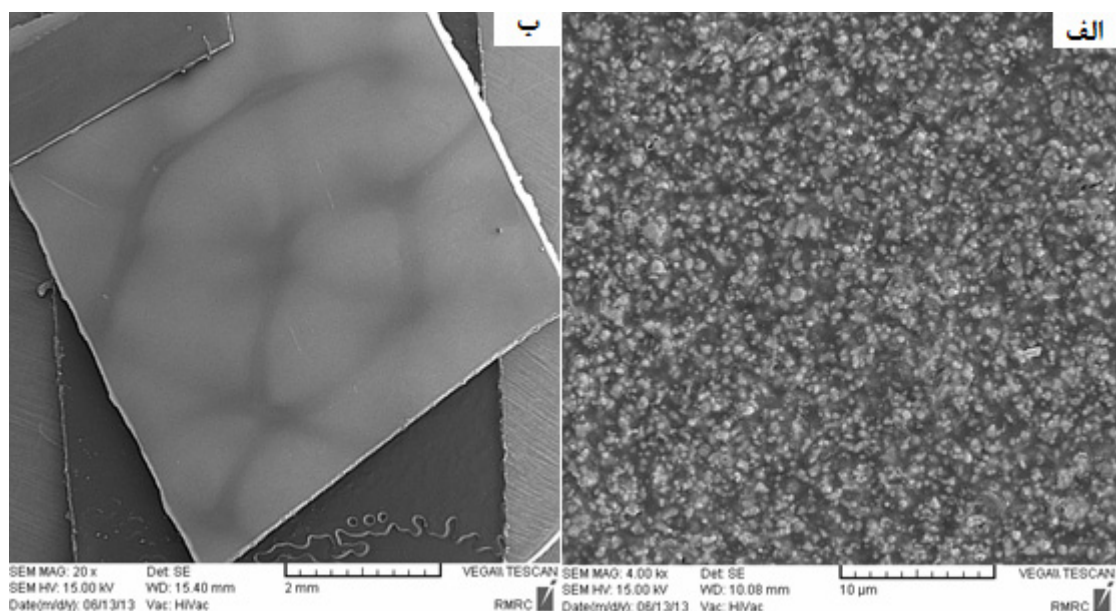
تصاویر گرفته شده از میکروسکوپ الکترون روبشی (SEM) پودر PZT قبل و بعد از پراکنده شدن توسط همزن مافوق صوت در شکل ۴ نشان داده شده است. همانطور که از این شکل دیده می‌شود اندازه متوسط گرانول‌های PZT (تهیه شده به روش خشک‌کن پاششی توسط تولیدکننده پودر) حدود $50\ \mu\text{m}$ و اندازه دانه‌ها بعد از پراکنده شدن توسط همزن مافوق صوت در محدوده $1-10\ \mu\text{m}$ است. از اندازه گرانول و دانه PZT در قبل و بعد از پراکنده شدن توسط همزن مافوق صوت می‌توان نتیجه گرفت که یکی از دلایل ته‌نشینی ذرات PZT در روش ریخته‌گری نواری در حالتی که از همزن مافوق صوت استفاده نشده است، وجود ذراتی با ابعاد نزدیک به اندازه گرانول‌های اولیه بوده که منجر به افزایش سرعت ته‌نشینی آن ذرات شده است.



شکل ۴- تصویر SEM پودر PZT:

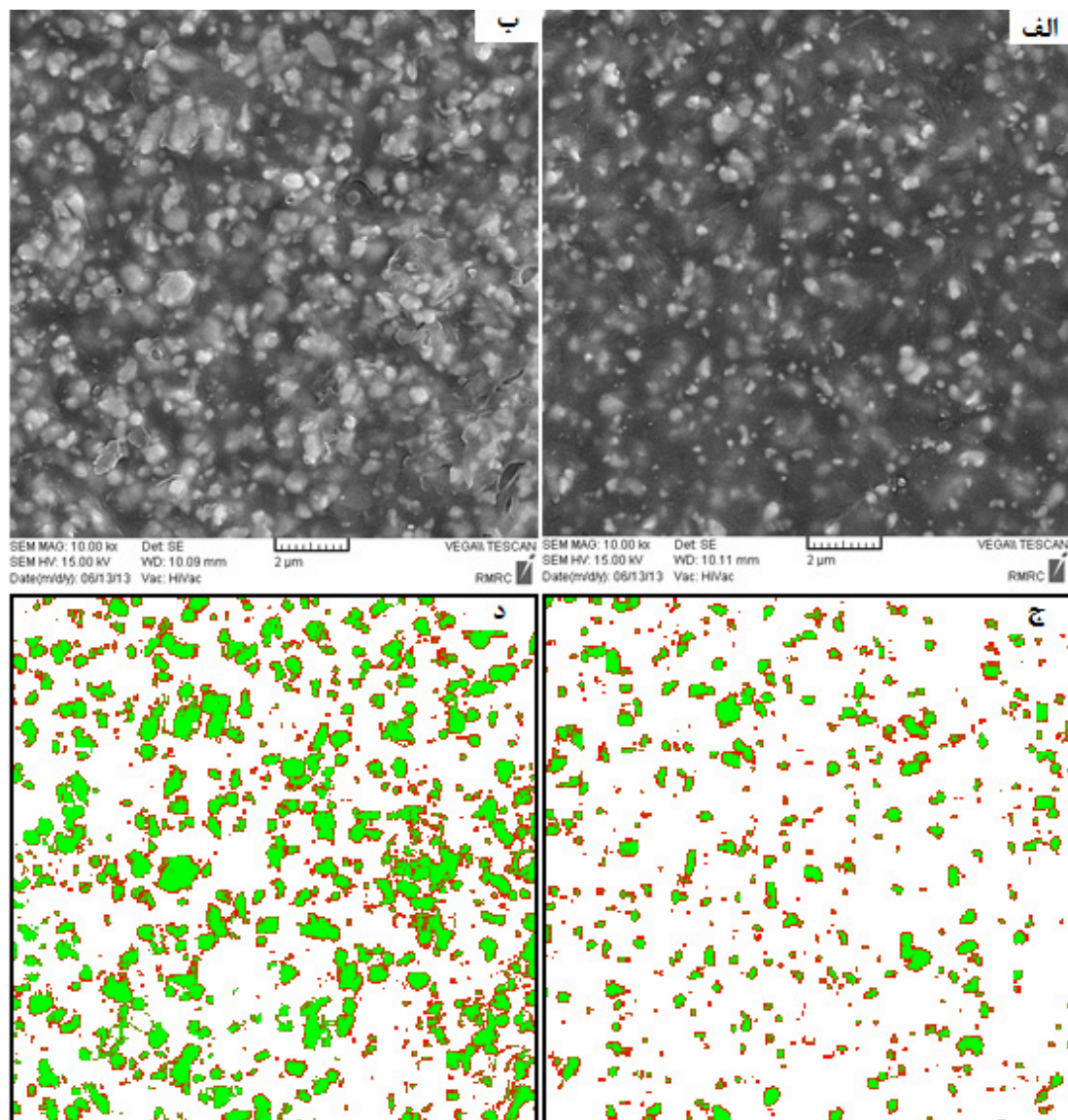
الف) گرانول‌ها قبل از پراکنده‌سازی توسط همزن مافوق صوت و ب) بعد از پراکنده‌سازی توسط همزن مافوق صوت.

شکل الف-۵ تصویر گرفته شده از میکروسکوپ نوری (OM) کامپوزیت حاوی ۵۰ درصد حجمی PZT را نشان می‌دهد که در فرایند آماده‌سازی آن از همزن مافوق صوت به منظور پراکنده‌سازی ذرات PZT، ویسکوز کردن سوسپانسیون به منظور جلوگیری از ته‌نشینی ذرات PZT و خشک‌کن با سرعت خشک‌کشی زیاد استفاده شده است. همانطور که از ریزساختار این کامپوزیت در شکل ب-۵ دیده می‌شود، استفاده از همزن مافوق صوت، تغلیظ سوسپانسیون و استفاده از دمای مناسب خشک‌کن مؤثر واقع شده است و PZT بطور کاملاً یکنواخت درون PVDF پراکنده شده و کامپوزیتی با بافت همگن بدست آمده است. در مقابل کامپوزیتی که با شرایطی مشابه در خشک‌کن با سرعت خشک‌کشی کم خشک شده است (شکل ج و د-۵) با توجه به وجود زمان کافی جهت پلیمریزاسیون، زنجیره‌های پلیمری زمان کافی برای مهاجرت و تجمع را داشته و بنابراین مناطق غنی از پلیمر و در نتیجه غنی از سرامیک تشکیل داده است، بنابراین جدایشی نسبی در بافت کامپوزیت ایجاد شده است. البته با توجه به ویسکوز بودن سوسپانسیون ته‌نشینی قابل توجهی رخ نداده است.



شکل ۵- الف) تصویر OM کامپوزیت همگن شکل‌داده شده در خشک‌کن با سرعت خشک‌کشی بالا، ب) تصویر SEM کامپوزیت همگن شکل‌داده شده در خشک‌کن با سرعت خشک‌کشی بالا، ج) تصویر OM کامپوزیت دارای جدایش بافت شکل‌داده شده در خشک‌کن با سرعت خشک‌کشی پایین و د) تصویر SEM کامپوزیت دارای جدایش بافت شکل‌داده شده در خشک‌کن با سرعت خشک‌کشی پایین (جدایش فازی در شکل ۶ مورد بررسی قرار گرفته است).

شکل ۶ تصاویر SEM مناطق غنی و فقیر از سرامیک در کامپوزیت حاوی جدایش نسبی سرامیک از پلیمر و طرحواره‌های این مناطق که با استفاده از نرم‌افزار متریال پلاس بدست آمده است را نشان می‌دهد. با استفاده از این نرم‌افزار رنگ زمینه هر دو تصویر قسمت‌های غنی و فقیر از PZT به یک میزان افزایش یافت و درصد نسبی فاز سرامیک (نواحی روشن) و فاز پلیمر (نواحی تیره) در هر یک از نواحی غنی و فقیر از PZT اندازه‌گیری شد. نتیجه بررسی‌های انجام شده با استفاده از این نرم‌افزار نشان داد که اختلاف درصد فاز سرامیک در دو ناحیه با مقدار فاز سرامیک کم و زیاد حدود ۱۳ درصد است.



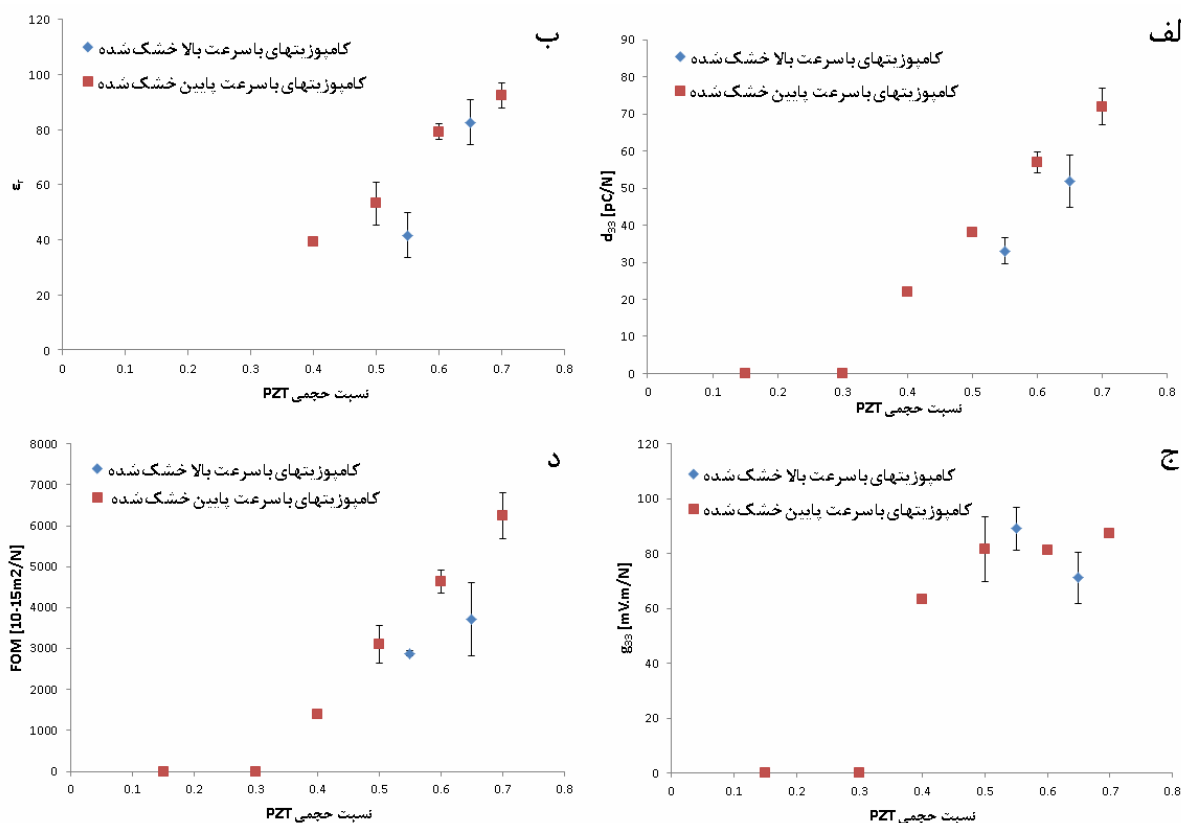
شکل ۶- تصاویر SEM مناطق غنی و فقیر از سرامیک در کامپوزیت حاوی جدایش نسبی سرامیک از پلیمر و طرحواره‌های این مناطق که با استفاده از نرم‌افزار متریال پلاس بدست آمده است: الف) تصویر SEM قسمت فقیر از سرامیک، ب) تصویر SEM قسمت غنی از سرامیک، ج) طرحواره قسمت فقیر از سرامیک و د) طرحواره قسمت غنی از سرامیک

با توجه به داده‌های نشان داده شده در شکل الف-۷ مشاهده می‌شود که ضریب بار پیزوالکتریک با افزایش کسر حجمی PZT به صورت خطی افزایش می‌یابد، بدیهی است که این افزایش را می‌توان به جایگزینی فازی با ضریب بار پیزوالکتریک زیاد (PZT) به جای فازی با ضریب بار پیزوالکتریک کم (PVDF) نسبت داد. آنچه که در اینجا بسیار جالب توجه به نظر می‌رسد آن است که کامپوزیت‌های تهیه شده با سرعت خشکایش کم نسبت به کامپوزیت‌های ساخته شده با سرعت خشکایش زیاد ضریب بار پیزوالکتریک بیشتری از خود نشان می‌دهند. اختلاف مقدار ضریب بار پیزوالکتریک بین این کامپوزیت‌ها را می‌توان نواحی غنی از PZT نسبت داد که به نشان دادن خواصی معادل با خواص کامپوزیتی همگن با کسر حجمی سرامیک زیادتر منجر شده است و این می‌تواند به برهم‌کنش ممان‌های دو قطبی الکتریکی مربوط باشد.

با توجه به داده‌های نشان داده شده در شکل ب-۷ دیده می‌شود که ثابت دی‌الکتریک با افزایش کسر حجمی PZT افزایش یافته است. PZT ثابت دی‌الکتریک زیادتری نسبت به PVDF دارد لذا با جایگزین شدن PZT به جای بخشی از PVDF ثابت دی‌الکتریک نسبی افزایش یافته است.

همانطور که در شکل‌های الف-۷ و ب-۷ دیده شد ضریب بار پیزوالکتریک و ثابت دی‌الکتریک نسبی با افزایش کسر حجمی PZT افزایش می‌یابند. با توجه به تأثیر معکوس هر یک از این پارامترها بر روی ضریب ولتاژ پیزوالکتریک و اینکه شیب افزایش ثابت دی‌الکتریک کامپوزیت‌های با سرعت خشک‌کشی زیاد از شیب افزایش ضریب بار پیزوالکتریک بیشتر بوده است، ضریب ولتاژ پیزوالکتریک آن‌ها روندی نزولی را نشان می‌دهد [۱۶] (شکل ج-۷). به‌طور کلی بیشینه مقدار ضریب ولتاژ پیزوالکتریک در محدوده ۵۵ تا ۶۰ درصد حجمی سرامیک حاصل شده است.

همانطور که در شکل د-۷ پیداست، ضریب شایستگی با افزایش کسر حجمی PZT افزایش یافته که به افزایش d_{33} و g_{33} در محدوده کسر حجمی آزمایش شده نسبت داد. همچنین مشاهده می‌شود که ضریب شایستگی برای کامپوزیت‌های با بافت جدایش یافته نسبت به کامپوزیت‌های همگن بیشتر است. این مساله مربوط به زیادتر بودن ضریب بار پیزوالکتریک و تقریباً همسان بودن ضریب ولتاژ پیزوالکتریک این کامپوزیت‌ها نسبت به کامپوزیت‌های همگن است.



شکل ۷- نمودار وابستگی خواص دی‌الکتریکی و پیزوالکتریکی به کسر حجمی سرامیک در کامپوزیت‌های PZT-PVDF: (الف) ضریب بار پیزوالکتریک، (ب) ثابت دی‌الکتریک نسبی، (ج) ضریب ولتاژ پیزوالکتریک و (د) ضریب شایستگی پیزوالکتریک

۴- نتیجه گیری

با استفاده از روش ریخته‌گری نواری کامپوزیت‌های PZT-PVDF با الگوی اتصال ۳-۰ با سرعت‌های خشک‌کشی زیاد و کم ساخته شد. مطالعات دی‌الکتریکی و پیزوالکتریکی انجام شده بر روی کامپوزیت‌های ساخته شده نشان داد که با افزایش کسر حجمی PZT ضریب بار پیزوالکتریک و ثابت دی‌الکتریک کامپوزیت افزایش می‌یابد. بررسی‌های انجام شده بر روی پراکندگی دانه‌های PZT درون فاز زمینه PVDF با استفاده از میکروسکوپ الکترونی نشان داد که در کامپوزیت‌های با سرعت خشک‌کشی زیاد همگنی کامل بدست آمده در حالی که در کامپوزیت‌های با سرعت خشک‌کشی کم جدایشی در بافت بوجود آمده است به طوری که مناطقی با اختلاف کسر حجمی PZT-پلیمر در ابعاد میلیمتری ایجاد شده است. این جدایش بافت ایجاد شده در اثر استفاده از خشک‌کن با سرعت خشک‌کشی کم موجب بهبود خواص پیزوالکتریک شده است که این به دلیل ایجاد یک ساختار حاوی مناطق غنی‌تر از سرامیک در لایه‌ی کامپوزیتی است.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از سازمان جهاد و خودکفایی ندسا و معاونت پژوهشی دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) به خاطر حمایت مالی براساس قراردادهای شماره ۲۵/۳۸۷۹/د و ۱/۷۲۵۵۰/د سپاس‌گزاری می‌کنند.

مراجع

- [1] R. E. Newnham, "Properties of materials: Anisotropy, Symmetry, Structure", Oxford University Press, 87-102 (2005).
- [2] K. M. Nair, A. S. Bhalla, T. K. Gupta, S. Hirano, B. V. Hiremath, J. H. Jean, R. Pohanka, "Dielectric materials and devices", The American Ceramic Society, 355-368 (2002).
- [3] K. Uchino, "Advanced piezoelectric materials: Science and technology", Woodhead, 34-38 (2010).
- [4] Safari, B. Jadidian, E. K. Akdogan, "Piezoelectric composites for transducer applications", *Comprehensive Composite Materials*, 5, 533-561 (2000).
- [5] H. S. Nalwa, "Ferroelectric Polymers: Chemistry, Physics, and Applications", Marcel Dekker, 183-200 (1995).
- [6] J. D. W. Madden, "Dielectric elastomers as electromechanical transducers", Oxford, 16-18 (2007).
- [7] E. Riande and R. Diaz-Calleja, "Electrical Properties of Polymers", Marcel Dekker, 523-528 (2004).

- [8] Safari, "development of piezoelectric composites for transducers", *Journal of Physics III*, 4, 1129-1149(1994).
- [9] R. Gregorio, M. Cestari and F. E. Bernardino, "Dielectric behavior of thin films of β -PVDF/PZT and β -PVDF/BaTiO₃ composites", *Journal of Materials Science*, 31, 2925-2930 (1996).
- [10] L. M. Zhang, Q. Shen and D. You, "Preparation and properties of 0-3 PZT/PVDF piezoelectric composite", *Key Engineering Materials*, 249, 129-132 (2003).
- [11] Y. H. Son, S. Y. Kweon, S. J. Kim, Y. M. Kim, T. W. Hong and Y. G. Lee, "Fabrication and electrical properties of PZT-PVDF 0-3 type composite film", *Integrated Ferroelectrics*, 88, 44-50 (2011).
- [12] D. K. Das-Gupta and M. J. Abdullah, "Electroactive properties of polymer-ceramic composites", *Ferroelectrics*, 87, 213-228 (2011).
- [13] E. Venkatragavaraj, B. Satish, P. R. Vinod and M. S. Vijaya, "Piezoelectric properties of ferroelectric PZT-polymer composites", *Journal of Physics D: Applied Physics*, 34, 487-492 (2001).
- [14] Seema, K. R. Dayas, J. M. Varghese, "PVDF-PZT-5H composites prepared by hot press and tape casting techniques", *Journal of Applied Polymer Science*, 106, 146-151 (2007).
- [15] ع. سلیمی و ع. ا. یوسفی، "پارامترهای موثر در پلاریزاسیون فیلم‌های پلیمری برای ساخت سنسورهای پیزوالکتریک"، هجدهمین کنفرانس بین‌المللی برق، تهران (۱۳۸۲).
- [16] J. Moulson and J. M. Herbert, "Electroceramics: materials, properties and application", Wiley, 344-354 (2003).