

مقاله پژوهشی

DOR: 20.1001.1.24767131.1400.7.2.11.4

درصد همانندی: ۰٪

آنالیز مشخصات ارتعاشی پیزوکامپوزیت بر پایه PMN-PT

بنت الهدی امانت^{۱*}، مهدی خلیل آزاد^۲

amanat@pnu.ac.ir

^{۱*} نویسنده مسئول، گروه فیزیک، دانشگاه پیام نور، تهران

m.khalilazad@mut.ac.ir

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد، مجتمع دانشگاهی هوادریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۱۵

چکیده:

در این مقاله ویژگی‌های پیزوکامپوزیت‌های ۱-۳ بر پایه تک کریستال‌های رلاکسور PMN-PT، با درصدهای مختلف PT مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور پارامترهای ضریب جفت‌شدگی الکترومکانیکی، سرعت طولی و امپدانس مشخصه آکوستیکی به کمک مدل پارامترهای مؤثر محاسبه و مورد مطالعه قرار گرفت. مشاهده شد تغییر درصد PT، تأثیر قابل توجهی بر کمیت‌های یادشده دارد. به‌عنوان مثال با تغییر درصد PT می‌توان ضریب جفت‌شدگی الکترومکانیکی را به بیش از ۹۰ درصد افزایش داد. علاوه بر این، با استفاده از مقدار مناسب کسر حجمی تک‌بلورها می‌توان سرعت طولی و امپدانس مشخصه آکوستیکی را به میزان زیادی کاهش داد، طوری که نشان داده شد با استفاده از تک کریستال PT ۰/۳۳-PMN در کسر حجمی ۰/۴ می‌توان به سرعت طولی ۳۳۰۰ m/s و امپدانس مشخصه آکوستیکی ۱/۳ MRayl دست پیدا کرد، درحالی‌که ضریب جفت‌شدگی نزدیک به ۹۰ درصد می‌رسد. با توجه به نتایج به‌دست آمده دیده شد که تغییرات پارامترهای عملکردی پیزوکامپوزیت ۱-۳ بر پایه تک کریستال‌های PMN-PT نسبت به درصد PT به‌صورت خطی نبوده و لزوماً با کاهش یا افزایش درصد PT مقادیر ضریب جفت‌شدگی الکترومکانیکی، سرعت طولی و امپدانس مشخصه آکوستیکی کاهش یا افزایش پیدا نمی‌کند؛ باید با بررسی درصدهای مختلف PT نقطه بهینه را با توجه به کاربرد مورد نظر به شکل مناسب پیدا کرد.

واژه‌های کلیدی: پیزوکامپوزیت؛ ضریب جفت‌شدگی الکترومکانیکی؛ پیزوالکتریک؛ PMN-PT

۱. مقدمه

خاصیت پیزوالکتریک در بسیاری از مواد موجود در طبیعت وجود دارد، اما نخستین بار با کشف این خاصیت در کوارتز این مواد به شکل رسمی و کلاسیک امروزی شناخته شدند و در ساخت تجهیزات مختلف استفاده شدند. کریستال‌های کوارتز علی‌رغم برخی خواص بسیار خوب خود، ضرایب و ثابت‌های پیزوالکتریکی پایینی دارند و در زمینه ساخت و رشد بلور آن نیز مشکلاتی هست [۱]. در سال ۱۹۵۴ با کشف و معرفی مواد پیزوسرامیک مانند PZT تحولی بزرگ در این زمینه رخ داد. ضرایب پیزوالکتریک این مواد بسیار بهتر از کریستال‌های طبیعی مانند کوارتز بود. مواد پیزوسرامیک بسیار سخت و شکننده بودند، و در حالت گیرندگی حساسیت پایینی داشتند [۲-۳]. بنابراین تحقیقات برای ساخت و کشف مواد با انعطاف‌پذیری و حساسیت بالاتر انجام شد، در نتیجه آن مواد پیزوالکتریک پلیمری کشف شد. نخستین بار در سال ۱۹۶۹ کاوایی خواص پیزوالکتریک پلیمرهایی مانند PVDF را کشف کرد. این مواد برخلاف پیزوسرامیک‌ها نرم و انعطاف‌پذیر هستند [۴] و امپدانس مشخصه پایینی دارند. در نتیجه در حالت گیرندگی عملکرد مناسبی از خود نشان می‌دهند، اما به دلیل این ساختار نرم به عنوان محرک عملکرد مناسبی ندارند. برای رسیدن به موادی که هم به عنوان محرک و هم به عنوان گیرنده حساسیت خوبی داشته باشند، در سال ۱۹۷۸، نیونهام ایده کامپوزیت پیزوالکتریکی یا همان پیزوکامپوزیت‌ها را بر پایه سرامیک‌های PZT معرفی کرد. این مواد مزایای مواد پیزوسرامیکی و پلیمرهای پیزوالکتریک را هم‌زمان داشتند [۵]. بعضی از خواص این پیزوکامپوزیت مانند امپدانس‌های صوتی پایین‌تر، (از ۵ MRayl تا ۲۷ MRayl) ضرایب جفت‌شدگی بالا (اغلب ۰/۶۱ تا ۰/۷۵) و پهنای باند بالا باعث شده که این مواد کاربرد فراوانی در مبدل‌های اولتراسوند فرکانس بالا، تصویربرداری پزشکی و سیستم‌های سونار داشته باشند. با استفاده از مفهوم اتصال که نیونهام مطرح

کرد، این مواد به ۱۰ نوع پیزوکامپوزیت طبقه‌بندی می‌شوند [۵]. انواع این پیزوکامپوزیت‌ها شامل ۰-۰، ۰-۱، ۰-۲، ۰-۳، ۱-۱، ۱-۲، ۱-۳، ۲-۲، ۲-۳، یا ۳-۳ است. یک پیزوکامپوزیت متشکل از سرامیک PZT و یک پلیمر خاص، خواص بهتری در مقایسه با پیزوالکتریک تک فاز از خود نشان می‌دهد.

در سال‌های اخیر تحقیقات نشان داده کریستال‌های فروالکتریک مبتنی بر تک کریستال‌های رلاکسور سرب نیوبات منیزیم-تیتانات سرب (PMN-PT) و سرب نیوبات سرب-تیتانات روی (PZN-PT) خواص پیزوالکتریک و ضریب جفت‌شدگی الکترومکانیکی فوق‌العاده بالاتری نسبت به مواد پیزوسرامیک دارند [۶]. تک کریستال‌های PMN-PT تنوع گسترده‌ای در قابلیت‌های پیزوالکتریک و خواص الکترومکانیکی را از طریق جهت‌گیری بلوری، نسبت ترکیب PMN و PT و جهت برش کریستال ارائه می‌دهند. بسته به نسبت ترکیب مواد سازنده و جهت برش در ارتباط با رشد بلوری، PMN-PT می‌تواند رفتارهای بسیار متفاوتی از خود نشان دهد و قادر است انواع مختلفی از جابه‌جایی مانند خمشی، طولی یا برشی را ایجاد کند که هر کدام کاربردهای مفید خود را دارند [۷]. تک کریستال‌های PMN-PT به دلیل یکپارچگی، ضریب جفت‌شدگی الکترومکانیکی بالا، پهنای باند زیاد و پاسخ فرکانسی مناسب در پروژه‌های کاربردی پتانسیل بالاتری نسبت به سایر مواد پیزوالکتریک دارند [۸]. امپدانس صوتی نسبتاً بالای تک کریستال‌های PMN-PT مشکل عدم تطابق امپدانس صوتی با محیط که اغلب شامل بافت انسانی و آب است، را به وجود می‌آورد. یک راه‌غلبه بر این مشکل ساخت مواد پیزوکامپوزیت بر پایه تک کریستال‌های PMN-PT با استفاده از یک ماتریس پلیمری مناسب می‌باشد. این پیزوکامپوزیت‌ها با هدف به دست آوردن ترکیبی از خواص پیزوالکتریک و مکانیکی تولید می‌شوند که در کاربردهای مبدل الکترومکانیکی مفید باشند. پیزوکامپوزیت ۱-۳ بر پایه PMN-PT عالی در مقایسه با تک کریستال‌های PMN-PT و PZT معمولی خواص

همان‌طور که در مقدمه گفته شد، مواد PMN-PT، موادی با ویژگی‌های پیزوالکتریک منحصر به فرد هستند. برخلاف مواد معمولی پیزوالکتریک که ساختار پیزوسرامیکی دانه‌ای دارند، مواد PMN-PT ساختار تک‌بلوری دارند. این بدان معناست که کاستی‌ها و محدودیت ساختار دانه‌ای در این مواد وجود ندارد؛ بنابراین PMN-PT را می‌توان به میزان دقیق‌تری ماشین‌کاری کرد. هر دو اکسید تشکیل‌دهنده PMN-PT بر رفتار این کریستال تأثیرگذار هستند؛ بنابراین با تغییر نسبت PMN و PT، می‌توان خواص ترکیب را تنظیم کرد. خواص پیزوالکتریک ناشی از نسبت PMN به PT متفاوت با قدرت پیوندهای بین رادیکال‌ها ارتباط دارد. این دو جزء ساختارهای متقاطع در سطح اتمی دارند.

روابط حاکم بر خواص مکانیکی و الکتریکی یک محیط پیزوالکتریک به شکل زیر است:

$$\begin{cases} T = c^E S - e^t E \\ D = e S + \epsilon^E E \end{cases} \quad (1)$$

که در آن T ، S ، D و E به ترتیب تانسور تنش مکانیکی، تانسور کرنش مکانیکی، بردار جابه‌جایی الکتریکی و بردار میدان الکتریکی هستند. همچنین c^E تانسور سفتی الاستیک در میدان الکتریکی ثابت، e ضریب پیزوالکتریک و ϵ^E تانسور گذردهی در کرنش ثابت است. در رابطه بالا t نشان‌دهنده ترانزاد ماتریس است. بر این اساس کمیت‌های ضرایب جفت‌شدگی الکترومکانیکی و سرعت طولی در مد ضخامت و امپدانس مشخصه به ترتیب به شکل زیر محاسبه می‌شوند:

$$k_t^2 = \frac{h_{33}^2}{\beta_{33}^S c_{33}^D} \quad (2)$$

$$C_t = \sqrt{\frac{c_{33}^D}{\rho}} \quad (3)$$

$$Z = \rho \times C_t \quad (4)$$

دارند [۹]. میله‌های PMN-PT که در یک پلیمر با چگالی کم تعبیه شده‌اند، به‌عنوان یکی از امیدوارکننده‌ترین فناوری مبدل‌های امروزی، امپدانس صوتی را پایین می‌آورند و ضریب اتصال الکترومکانیکی را بسیار بالا می‌برند.

در سال‌های اخیر تکنیک‌های مختلفی برای افزایش پهنای باند عملیاتی مبدل‌های پیزو کامپوزیت‌های ۱-۳ توسعه یافته است. به‌طور خلاصه، روش‌های رایج برای دستیابی به این هدف شامل بهبود خواص مواد پیزوالکتریک، بهبود تطبیق امپدانس مبدل با محیط و بهینه‌سازی ساختار پیزو کامپوزیت می‌شود. برای افزایش خواص مواد پیزوالکتریک، یا مادا و همکارانش [۱۰] روشی برای طراحی یک مبدل فراصوت باند پهن با دادن یک گرادیان دما به صفحه پیزوالکتریک در جهت ضخامت آن از طریق یک روش تخلیه قطبی مبتنی بر دمای کنترل شده پیشنهاد کردند. وونگ و همکاران [۱۱] یک مبدل اولتراسوند آرایه فازی فرکانس بالا با مواد تک کریستالی PMN-PT طراحی کردند که در مقایسه با سایر طرح‌های پیزو سرامیک، این ماده تک کریستالی پهنای باند عملکرد گسترده‌تری را نشان داد. لی و همکاران [۱۲] گزارش دادند که مبدل آرایه فازی ۳/۲ مگاهرتز با فرکانس پایین ساخته‌شده با استفاده از تک کریستال PMN-PT عملکرد بهتری نسبت به ترانسدیوسر با سایر مواد پیزوالکتریک مانند PZT رایج در صنعت دارد.

در این مقاله، اثر نسبت PT در فاز پیزوالکتریک بر ویژگی‌های پیزو کامپوزیت‌های ۱-۳ بر پایه تک‌بلورهای PMN-PT بررسی می‌کنیم. برای این منظور از روش تحلیلی پارامتر مؤثر که به وسیله آلد [13] برای پیزو کامپوزیت ۱-۳ ارائه شد، استفاده می‌کنیم و پارامترهای ضریب جفت‌شدگی، سرعت طولی و امپدانس مشخصه پیزو کامپوزیت ۱-۳ بر پایه PMN-PT برای کسرهای حجمی مختلف PT را بررسی می‌کنیم.

۲. مشخصات و روابط حاکم بر پیزو کامپوزیت ۱-۳ بر پایه PMN-PT

$$\bar{\epsilon}_{33}^S = v\epsilon_{33}^S + \frac{2v\bar{v}(e_{31})^2}{v(c_{11} + c_{12}) + \bar{v}(c_{11}^E + c_{12}^E)} + \bar{v}\epsilon_{11} \quad (11)$$

$$\bar{\rho} = v\rho^c + \bar{v}\rho^p \quad (12)$$

$$\bar{v} = 1 - v \quad (13)$$

که در آن ρ^c و ρ^p به ترتیب چگالی فاز فعال یا همان پیزوالکتریکی و چگالی فاز غیرفعال یا پلیمری پیزوکامپوزیت و v نیز کسر حجمی فاز فعال در پیزوکامپوزیت است. کسر حجمی پیزوسرامیک یا کسر پرکننده پیزوسرامیک به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\text{حجم پیزوسرامیک} = \frac{\text{حجم کل پیزوکامپوزیت}}{\text{کسر حجمی پیزوسرامیک}}$$

پارامترهای ضرایب جفت‌شدگی الکترومکانیکی، سرعت طولی و امپدانس مشخصه به کمک پارامترهای مؤثر به‌دست‌آمده بالا برای یک پیزوکامپوزیت ۱-۳ با جایگزینی در رابطه ۲، ۳ و ۴ محاسبه می‌شوند.

۳. شبیه‌سازی و استخراج پارامترهای عملکردی

در این بخش پارامترهای ضریب جفت‌شدگی، امپدانس مشخصه و سرعت طولی را برای سه نمونه تک کریستال PMN-PT با درصدهای مختلف PT با استفاده از مشخصات ارائه‌شده در جدول ۱ برحسب درصدهای حجمی مختلف این تک کریستال‌ها محاسبه می‌شود. در جدول یک مشخصات سه نمونه PMN-PT که در این پژوهش بررسی شده است، آورده شده است. همچنین در این تحقیق از پلیمر Spurr که یک پلیمر پرکاربرد و در دسترس است، به عنوان فاز غیرفعال استفاده شده است که مشخصات آن در جدول ۲ بیان شده است.

بر اساس استانداردهای بین‌المللی، پارامترهای $h_{33}, \beta_{33}^S, c_{33}^D$ موجود در روابط بالا بر اساس پارامترهای معادله ۱ به شکل زیر به دست می‌آید.

$$c_{33}^D = c_{33}^E + \frac{(e_{33})^2}{\epsilon_{33}^S} \quad (5)$$

$$h_{33} = \frac{e_{33}}{\epsilon_{33}^S} \quad (6)$$

$$\beta_{33}^S = \frac{1}{\epsilon_{33}^S} \quad (7)$$

در روش پارامتر مؤثر آلد [۱۳] پیزوکامپوزیت ۱-۳ به عنوان یک محیط پیزوالکتریک همگن مؤثر در نظر گرفته می‌شود و پارامترهای مربوط به نوسانات در مد ضخامت بر اساس پارامترهای فاز پیزوالکتریک و فاز پلیمر استخراج می‌شود. این مدل زمانی معتبر است که مقیاس فضایی جانبی فاز پیزوالکتریک در مقایسه با طول موج به اندازه کافی ریز باشد که کامپوزیت را بتوان به عنوان یک محیط همگن در نظر گرفت. در ادامه برای توصیف مد ضخامت در این پیزوکامپوزیت ها، روابط سازنده مؤثر را برای این محیط همگن برحسب کسر حجمی و خواص پیزوسرامیک و پلیمر تشکیل دهنده به شکل رابطه ۸ محاسبه می‌شود.

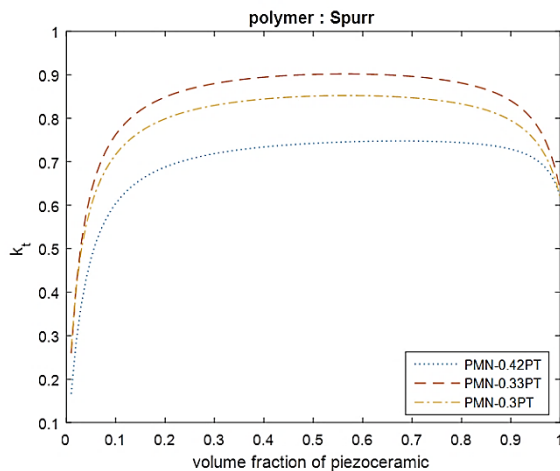
$$\begin{cases} T_3 = \bar{c}_{33}^E S_3 - \bar{e}_{33} E_3 \\ D_3 = \bar{e}_{33} S_3 + \bar{\epsilon}_{33}^S E_3 \end{cases} \quad (8)$$

که در آن مقادیر $\bar{c}_{33}^E, \bar{e}_{33}, \bar{\epsilon}_{33}^S$ ضرایب پیزوالکتریک مؤثر پیزوکامپوزیت ۱-۳ می‌باشد. این پارامترها برحسب پارامترهای فاز پلیمر و پیزوالکتریک تشکیل دهنده پیزوکامپوزیت ۱-۳ و کسر حجمی آن‌ها به شکل زیر محاسبه می‌شوند:

$$\bar{c}_{33}^E = v c_{33}^E - \frac{2\bar{v}v(c_{13}^E - c_{12})^2}{v(c_{11} + c_{12}) + \bar{v}(c_{11}^E + c_{12}^E)} + \bar{v}c_{11} \quad (9)$$

$$\bar{e}_{33} = v e_{33} - \frac{2\bar{v}v e_{31}(c_{13}^E - c_{12})}{v(c_{11} + c_{12}) + \bar{v}(c_{11}^E + c_{12}^E)} \quad (10)$$

می‌شود. در مجموع در هر سه منحنی شکل ۱ مشاهده می‌شود که مقدار ضریب جفت‌شدگی به‌جز در ابتدا و انتهای نمودار تقریباً ثابت و کمتر از مقدار ضریب k_{33} هر تک کریستال است. با نزدیک شدن به انتهای بالا، فشار جانبی وارد شده بر میله‌ها توسط پلیمر باعث کاهش شدید k_t ، به مقدار ثابت ضریب جفت‌شدگی برای یک تک کریستال خالص می‌شود. برای کسرهای حجمی کوچک، مقدار زیادی پلیمر اطراف میله‌های نازک را سفت می‌کند که این امر باعث کاهش k_t می‌شود. برای کسرهای حجمی میانی پیزوسرامیک، مقدار k_t به دلیل خاصیت الاستیکی و فشار جانبی ناشی از پلیمر، زیر مقدار k_{33} تک کریستال، باقی می‌ماند.



شکل ۱. ضریب جفت‌شدگی الکترومکانیکی پیزوکامپوزیت ۱-۳ برای سه PMN-PT با درصد‌های مختلف PT در مد ضخامت

با مقایسه نمودار تغییرات ضریب جفت‌شدگی پیزوکامپوزیت ۱-۳ بر پایه تک کریستال‌های PMN-0.3PT, PMN-0.33PT و PMN-0.42PT مشاهده می‌شود که در بین این کریستال‌ها، کریستال PMN-0.33PT ضریب جفت‌شدگی الکترومکانیکی مطلوب‌تری دارد. این مسئله بیانگر این مطلب است که لزوماً کاهش یا افزایش درصد PT موجب کاهش یا افزایش مقدار ضریب جفت‌شدگی الکترومکانیکی نمی‌شود، زیرا که PMN-0.33PT در صد PT بیشتر از PMN-0.3PT و درصد PT کمتر از PMN-0.42PT دارد، اما ضریب

در شکل‌های ۱ تا ۳ به ترتیب ضریب جفت‌شدگی، سرعت طولی و امیدانس مشخصه پیزوکامپوزیت ۱-۳ بر پایه سه نمونه تک کریستال PMN-PT با درصد‌های متفاوت PT برابر با ۳۳، ۳۰ و ۴۲ در بستر پلیمر Spurr نمایش داده شده است.

جدول ۱: مشخصات مواد PMN-PT مورد استفاده در پیزوکامپوزیت

[۱۴] ۱-۳

PMN-PT	PMN-0.42PT	PMN-0.33PT	PMN-0.3PT
C_{11}^E (N/m ²) GPa	۱۷۵/۱	۱۱۵	۱۱۷
C_{12}^E (N/m ²) GPa	۸۵/۱	۱۰۳	۱۰۳
C_{13}^E (N/m ²) GPa	۸۳	۱۰۲	۱۰۱
C_{33}^E (N/m ²) GPa	۱۰۵	۱۰۳	۱۰۸
e_{31} (C/m ²)	-۲/۱	-۲/۹	-۲/۴
e_{33} (C/m ²)	۱۲/۲	۲۰/۳	۲۷/۱
$\epsilon_{33}^S / \epsilon_0$	۲۵۹	۶۸۰	۱۲۴۲
ρ (kg/m ³)	۸۰۴۰	۸۰۶۰	۸۱۰۰
k_{33}	۰/۷۸	۰/۹۴	۰/۹۲
k_t	۰/۶۲	۰/۶۴	۰/۶۲

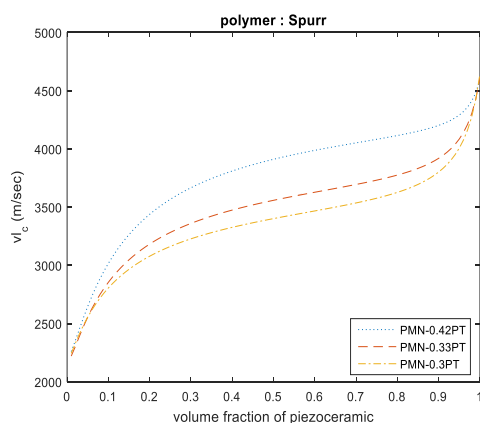
جدول ۲. مشخصات پلیمر Spurr استفاده شده در فاز غیرفعال [۱۳]

Polymer	C_{11} (N/m ²) (GPa)	C_{12} (N/m ²) (GPa)	$\epsilon_{11} / \epsilon_0$	ρ (kg/m ³)
Spurr	۵/۳	۳/۱	۱۰	۱۱۰۰

همان‌طور که در شکل ۱ دیده می‌شود با افزایش کسر حجمی فاز فعال پیزوکامپوزیت (محور افقی) از ۰ تا ۰/۱ میزان ضریب جفت‌شدگی با شیب بسیار زیادی افزایش می‌یابد و در محدوده ۰/۲ تا حدود ۰/۸ اندازه ضریب جفت‌شدگی الکترومکانیکی در بیشینه مقدار خود تقریباً ثابت و بدون تغییر باقی می‌ماند. سپس از حدود ۰/۸ مقدار این ضریب شروع به کاهش می‌کند، به طوری که در کسر حجمی ۱ این مقدار برابر ضریب جفت‌شدگی یک کریستال PMN-PT خالص

بسته به کسر حجمی فاز فعال آن‌ها، باعث کاهش سرعت طولی آن‌ها از حدود ۴۶۰۰ متر بر ثانیه تا حدود ۲۳۰۰ متر بر ثانیه می‌شود؛ به طوری که این تغییرات در کسر حجمی ۰ تا حدود ۰/۲ و در بازه حدود ۰/۹ تا ۱ زیاد است و در کسر حجمی ۰/۲ تا ۰/۹ سرعت طولی دارای تغییرات اندک بوده و سرعت طولی با شیبی ملایم تغییر می‌کند. این کاهش سرعت طولی با کاهش کسر حجمی فاز فعال در واقع ناشی از افزایش حجم پلیمر در پیزو کامپوزیت است. از آنجاکه در پلیمرها مقدار c_{11}^E به میزان قابل توجهی از پیزوسرامیک‌ها و تک کریستال‌ها کمتر است، پس در نتیجه کاهش کسر حجمی فاز فعال و افزایش کسر حجمی فاز غیرفعال یا همان پلیمر، به کاهش سرعت طولی منجر می‌شود.

همچنین با توجه به شکل ۲ مشاهده می‌شود کمترین سرعت طولی ابتدا مربوط به PMN-0.33PT سپس PMN-0.33PT و در نهایت مربوط به PMN-0.42PT است. با توجه به رابطه (۳) مشاهده می‌شود که سرعت طولی با چگالی رابطه عکس دارد که این مسئله باعث می‌شود انتظار داشته باشیم پیزو کامپوزیت بر پایه تک کریستال با چگالی پایین‌تر سرعت طولی بیشتر و تک کریستال با چگالی بالاتر سرعت طولی کمتری داشته باشد که این مسئله با توجه به جدول ۱ و شکل ۲ به خوبی مشاهده می‌شود.



شکل ۲. سرعت طولی در پیزو کامپوزیت ۱-۳ برای سه PMN-PT با

درصدهای مختلف PT در مد ضخامتی

جفت‌شدگی الکترومکانیکی بیشتری نسبت به هر دو آن‌ها دارد و تغییرات ضریب جفت‌شدگی الکترومکانیکی نسبت به درصد PT تقریباً به شکل نمودارهای نقاط اکسترممی دارد. با مقایسه نتایج حاصل از شکل ۱ و مشخصات مواد PMN-PT در جدول ۱ مشاهده می‌شود که مقدار ضریب k_t تک کریستال PMN-0.33PT بالاتر از دو کریستال دیگر است که بیشتر بودن مقدار ضریب جفت‌شدگی پیزو کامپوزیت ۱-۳ بر پایه تک کریستال PMN-0.33PT را می‌توان به این مسئله نسبت داد. به عبارت دیگر با توجه به اینکه ضریب جفت‌شدگی یا همان k_t تک کریستال PMN-0.33PT از دو تک کریستال دیگر بالاتر است، انتظار می‌رفت که این تک کریستال در ساختار پیزو کامپوزیت ۱-۳ نیز بتواند به ضریب جفت‌شدگی بالاتری نسبت به دو تک کریستال دیگر، در بستر یک پلیمر مشترک منجر شود. پس از شبیه‌سازی این مسئله به خوبی در شکل ۱ دیده می‌شود.

در شکل ۲ سرعت طولی برای کسرهای حجمی مختلف پیزو کامپوزیت ۱-۳ بر پایه تک کریستال‌های PMN-0.3PT، PMN-0.33PT و PMN-0.42PT نشان داده شده است. به طور کلی در این نمودار برای هر سه حالت تغییرات سرعت بر حسب کسر حجمی رفتار مشابهی را نشان می‌دهد؛ به طوری که با افزایش کسر حجمی و در نتیجه افزایش اثر سفت‌کننده ناشی از افزودن سرامیک بیشتر باعث افزایش سرعت طولی می‌شود.

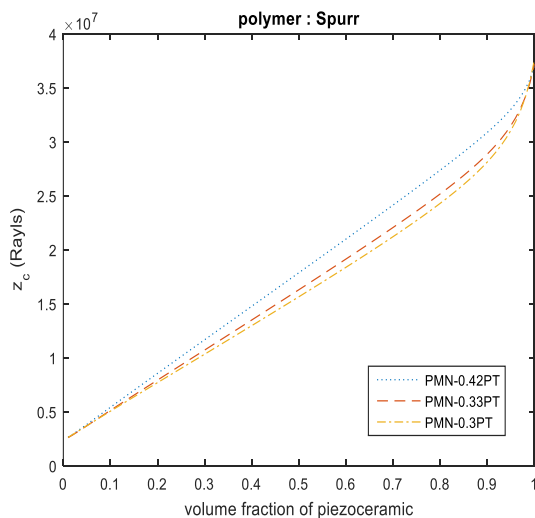
علاوه بر این شکل برخلاف نمودار قبل دیده می‌شود که کاهش درصد PT باعث کاهش سرعت طولی می‌شود، به طوری که مقدار سرعت طولی در پیزو کامپوزیت ۱-۳ بر پایه تک کریستال PMN-0.33PT کمتر از پیزو کامپوزیت ۱-۳ بر پایه تک کریستال PMN-0.42PT بوده و سرعت طولی در پیزو کامپوزیت ۱-۳ بر پایه PMN-0.3PT نیز کمتر از سرعت طولی در پیزو کامپوزیت ۱-۳ بر پایه PMN-0.33PT است.

همچنین در مجموع مشاهده می‌شود که تغییر کسر حجمی کریستال‌ها در ساختار پیزو کامپوزیت ۱-۳ در مد ضخامتی،

امپدانس مشخصه مربوط به پیزو کامپوزیت ۱-۳ بر پایه تک کریستال PMN-0.33PT است. در نهایت نیز همان‌طور که با توجه به سرعت طولی در شکل ۲ انتظار می‌رفت بیشترین امپدانس مشخصه مربوط به پیزو کامپوزیت ۱-۳ بر پایه تک کریستال PMN-0.42PT است.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله به کمک مدل پارامترهای مؤثر، ضرایب مؤثر پیزوالکتریکی پیزو کامپوزیت ۱-۳ بر پایه تک کریستال‌های PMN-PT با درصد‌های مختلف PT محاسبه شد و به کمک آن‌ها تغییرات ضریب جفت‌شدگی الکترومکانیکی، سرعت طولی و امپدانس مشخصه آکوستیکی بر حسب تغییرات کسر حجمی به دست آمد.



شکل ۳. امپدانس مشخصه در پیزو کامپوزیت ۱-۳ برای سه PMN-PT با درصد‌های مختلف PT در مد ضخامت

مشاهده شد که استفاده از این تک کریستال‌ها در پیزو کامپوزیت‌های ۱-۳ ضریب جفت‌شدگی الکترومکانیکی را تا حدود ۰/۹ افزایش می‌دهد که بیشینه مقدار در بین مواد پیزوالکتریک است. همچنین مشاهده شد که بیشترین مقدار ضریب جفت‌شدگی الکترومکانیکی برای پیزو کامپوزیت PMN-0.33PT در بازه ۰/۱ تا ۰/۹ کسر حجمی حاصل می‌شود. در خصوص سرعت طولی و امپدانس مشخصه نیز

از آنجا که سرعت طولی رابطه‌ای مستقیم با امپدانس مشخصه دارد، پس کاهش سرعت طولی می‌تواند باعث کاهش امپدانس مشخصه نیز شود که امری مطلوب محسوب می‌شود؛ زیرا با توجه به بالا بودن امپدانس مشخصه تک کریستال‌ها و پیزوسرامیک‌ها نسبت به آب و بافت بدن کاهش امپدانس مشخصه آکوستیکی در پیزو کامپوزیت‌ها باعث نزدیک شدن این پارامتر به امپدانس مشخصه آکوستیکی آب و بافت بدن می‌شود که این خود باعث انتقال بهتر انرژی صوتی از پیزو کامپوزیت به محیط آب می‌شود (بازتاب ناشی از تغییر محیط در مرزها کاهش می‌یابد).

شکل ۴، امپدانس مشخصه را برای پیزو کامپوزیت ۱-۳ بر پایه کریستال‌های PMN-0.3PT، PMN-0.33PT و PMN-0.42PT را نمایش می‌دهد. به طور کلی امپدانس آکوستیکی اساساً با تغییر کسر حجمی به صورت خطی تغییر می‌کند؛ مانند نمودار سرعت طولی مشاهده می‌شود که در هر سه ترکیب گفته شده با کاهش کسر حجمی فاز فعال امپدانس مشخصه آکوستیکی کاهش می‌یابد طوری که مقدار امپدانس از 37 MRayl در کسر حجمی ۱ (در کسر حجمی ۱ ما دیگر پیزو کامپوزیت نداریم، بلکه تک کریستال خالص داریم) تا 4 MRayl در کسر حجمی ۰/۱ کاهش می‌یابد.

شکل ۳ نشان می‌دهد که کاهش کسر حجمی کریستال در ساختار پیزو کامپوزیت ۱-۳ باعث کاهش قابل توجه امپدانس مشخصه برای هر سه نوع کریستال شده است. این مسئله از آنجا ناشی می‌شود که امپدانس مشخصه آکوستیکی رابطه‌ای خطی با سرعت طولی و چگالی دارد و هم سرعت طولی و هم چگالی با کاهش کسر حجمی فاز فعال که در اینجا تک کریستال PMN-PT است کاهش می‌یابد. مانند نمودار قبل در کمترین درصد PT، امپدانس مشخصه کمترین مقدار را در یک کسر حجمی ثابت اختیار می‌کند و روند سرعت طولی را دنبال می‌کند؛ بنابراین با توجه به نمودار سرعت طولی در شکل ۲ انتظار داریم که مقدار امپدانس مشخصه آکوستیکی پیزو کامپوزیت ۱-۳ بر پایه تک کریستال PMN-0.3PT کمترین مقدار را داشته باشد که این امر در شکل ۳ مشاهده می‌شود. پس از آن کمترین

- [9] Zhu K, Ma J, Liu Y, Shen B, Huo D, Yang Y, et al. Increasing Performances of 1-3 Piezocomposite Ultrasonic Transducer by Alternating Current Poling Method. *Micromachines*. 2022 Oct;13(10):1715.
- [10] Yamada K, Yamazaki D, Nakamura K. Broadband ultrasound transducers using a plate with a graded piezoelectric constant formed by an internal temperature gradient. In: 2000 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings An International Symposium. 2000. p. 1017-20 vol.2.
- [11] Wong CM, Chen Y, Luo H, Dai J, Lam KH, Chan HL wa. Development of a 20-MHz wide-bandwidth PMN-PT single crystal phased-array ultrasound transducer. *Ultrasonics*. 2017 Jan 1;73:181-6.
- [12] Li H, Li YC, Zhou D, Peng J, Luo HS, Dai JY. Application of PMNPT single crystal in a 3.2 MHz phased-array ultrasonic medical imaging transducer. In: 2007 Sixteenth IEEE International Symposium on the Applications of Ferroelectrics. 2007. p. 572-4.
- [13] Smith WA, Auld BA. Modeling 1-3 composite piezoelectrics: thickness-mode oscillations. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 1991 Jan;38(1):40-7.
- [14] Cao H, Schmidt VH, Zhang R, Cao W, Luo H. Elastic, piezoelectric, and dielectric properties of $0.58\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-0.42\text{PbTiO}_3$ single crystal. *Journal of Applied Physics*. 2004 Jul;96(1):549-54.
- نشان داده شد که بسته به تغییرات در صد PT مقادیر سرعت طولی و امیدانس مشخصه نیز دستخوش تغییرات می شود که در این بین در تمام بازه کسر حجمی PMN-0.30PT کمترین و PMN-0.42PT بیشترین مقدار سرعت طولی و امیدانس مشخصه را دارند.

سپاسگزاری

این مطالعه با حمایت دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی علوم و فناوری هوادریا انجام شده است. از پشتیبانی های صورت گرفته کمال تقدیر و تشکر را داریم.

مراجع

- [1] Ballato A. Basic Material Quartz and Related Innovations. In: Heywang W, Lubitz K, Wersing W, editors. *Piezoelectricity: Evolution and Future of a Technology*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2008.
- [2] Panda PK, Sahoo B. PZT to Lead Free Piezo Ceramics: A Review. *Ferroelectrics*. 2015 Jan 2;474(1):128-43.
- [3] Jain A, K. J. P, Sharma AKr, Jain A, P.n R. Dielectric and piezoelectric properties of PVDF/PZT composites: A review. *Polymer Engineering & Science*. 2015;55(7):1589-616.
- [4] Ueberschlag P. PVDF piezoelectric polymer. *Sensor Review*. 2001 Jun 1;21:118-26.
- [5] Wang H, Li Y, Hui H, Rong T. Analysis of electromechanical characteristics of the 1-3-2 piezoelectric composite and 1-3-2 modified structural material. *Ceramics International*. 2022 Aug 1;48(15): 22323-22334.
- [6] Xu TB. Review on PMN-PT Relaxor Piezoelectric Single Crystal materials for cryogenic actuators. In: *AIAA SCITECH 2022 Forum*. 2022. p. 2240.
- [7] Baasandorj L, Chen Z. Recent Developments on Relaxor-PbTiO₃ Ferroelectric Crystals. *Crystals*. 2022 Jan;12(1):56.
- [8] Lv J, Xie X, Zhu X, Li Z, Han Z, Cui Y, et al. Cold ablated high frequency PMN-PT/Epoxy 1-3 composite transducer. *Applied Acoustics*. 2022 Jan 1;188:108540.

پی نوشت

1. Actuator
2. PMN-PT ($\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-\text{PbTiO}_3$) Relaxor Single
3. Crystal