



## شبیه‌سازی الکترومکانیکی و تحلیل نانوژنراتور کانتیلور تک‌لایه پیزوالکتریک پروسکایت با الکتروگذارای اینتردیجیتال در کاربرد برداشت انرژی ارتعاشی

حافظ نیکبخت کشکولی<sup>۱</sup>، عباس اسدی<sup>۲</sup> و پرویز بروجردیان<sup>۱</sup>

۱. مجتمع علوم کاربردی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ایران

۲. مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ایران

پست الکترونیکی: assadi@mut-es.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۱/۲۴؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۹/۱۱/۱۹)

### چکیده

در این مقاله، نانوژنراتور کانتیلور تک‌لایه پیزوالکتریک با توانایی تولید ولتاژ خروجی بالا در پاسخ به ارتعاش مکانیکی با استفاده از روش المان محدود به صورت ۳ بعدی شبیه‌سازی شد. برای لایه فعال پیزوالکتریک در این نانوژنراتور، مواد پروسکایت  $PZT$ ،  $PMN-PT$  و  $MAPbI_3$  به کار برده شد. همچنین با الکتروگذارای اینتردیجیتال برای بهره‌گیری از ضربه پیزوالکتریک طولی  $d_{33}$  در حین ارتعاش خمشی، سازه نانوژنراتور استفاده شده است. این نانوژنراتور متشکل از بستر منعطف پلیمر  $PET$ ، یک لایه پیزوالکتریک بر روی آن و الکتروود طلا است که در ادامه با پلیمر اپوکسی  $SU-8$  کپسوله شده است. به منظور صحت‌سنجی روش حل نرم‌افزاری نانوژنراتور، نتایج شبیه‌سازی حاضر با دو پژوهش تجربی مقایسه و سپس همگرایی نتایج ولتاژ خروجی با تغییر ابعاد المان‌بندی شبکه بررسی شد. قطبی‌شدگی به وسیله اعمال ولتاژ بالا به صفحه پیزوالکتریک از طریق الکتروودها، توزیع پتانسیل الکتریکی در لایه پیزوالکتریک بعد از اعمال تنش مکانیکی، ولتاژ و توان الکتریکی خروجی در بسامد ارتعاشی و رفتار وابسته به شتاب ( $g = 25-50$ ) در پاسخ به بسامد تشدید ارتعاشی شبیه‌سازی شد. بسامد تشدید محاسبه‌شده برای سه ماده پیزوالکتریک  $PZT$ ،  $PMN-PT$  و  $MAPbI_3$  به ترتیب ۵۴۹، ۵۶۰/۵ و ۶۳۱ هرتز به دست آمد. نتایج محاسبات در این سیستم نشان داد که ماده پیزوالکتریک  $PZT$  با الکتروگذارای اینتردیجیتال، بهترین عملکرد نسبت به سایر مواد پیزوالکتریک در پاسخ بسامدی زیر کیلوهرتز برای برداشت انرژی ارتعاشی محیط را دارد.

**واژه‌های کلیدی:** نانوژنراتور پیزوالکتریک پروسکایت؛ الکتروگذارای اینتردیجیتال؛ توان الکتریکی بالا؛ شبیه‌سازی الکترومکانیکی المان محدود؛

پاسخ ارتعاشی

### ۱. مقدمه

پیشرفته میکرو/نانوژنراتورها اخیراً جایگاه ویژه‌ای را به خود اختصاص داده است. این تولید انرژی حاصل از تغییر شکل و ارتعاش مکانیکی اجسام بوده و از منابع خارجی مختلف قابل برداشت است که برای این منظور می‌توان به ارتعاشات

تولید انرژی الکتریکی از برداشت‌کننده‌های انرژی جنبشی در مقیاس‌های مختلف ماکرو/میکرو و نانو بر اساس تکنولوژی‌های

پتانسیل مناسب و امیدوارکننده‌ای را در کاربرد ذخیره انرژی از خود نشان داده‌اند. تاکنون بیشتر تحقیقات انجام شده در زمینه این نوع پروسکایت‌ها به کاربردهای فوتولتائیک تمرکز داشته است، در حالی که به خواص پیزوالکتریکی و کاربرد الکترومکانیکی این مواد به عنوان پایه‌ای برای طراحی میکرو/نانوژنراتورها به صورت جدی پرداخته نشده است [۹]. توضیح آن که، این مواد فرمول شیمیایی عمومی  $AMX_3$  دارند که در آن A جایگاه کاتیون آلی، M کاتیون فلزی و X شامل یک یا تعداد بیشتری از آنیون‌های هالیدی مانند  $Cl^-$ ,  $Br^-$  و  $I^-$  است [۷ و ۱۰]. یکی از رایج‌ترین این نوع پروسکایت‌ها  $MAPbI_3$  بوده که همانند سرامیک پیزوالکتریک‌های رایج خواص قطبی شدگی فروالکتریکی و پیزوالکتریکی دارد [۱۱].

برای طراحی میکرو/نانوژنراتورها، مدل‌سازی میکرو/نانوژنراتور کانتیلور<sup>۵</sup> تک‌لایه پیزوالکتریک برای بهبود عملکرد برداشت انرژی با استفاده از نرم‌افزار کامسول توسط محققین گزارش شده است [۸]. نکته قابل توجه آن است که بازدهی انرژی نانوژنراتورهای پیزوالکتریکی می‌تواند با تغییر پیکربندی الکترودها [۱۲ و ۱۳] و تغییر ابعاد کانتیلور [۱۲ و ۱۴] بهبود یابد. ما و همکاران نشان دادیم که با استفاده از الکترودهای عمودی به ولتاژ مدار باز ۱/۵ برابر و توان خروجی ۳/۹ برابر نسبت به دستگاه‌هایی با الکترودهای موازی دست یابند [۱۳]. همچنین وانگ و همکاران با تغییر ابعاد کانتیلور توانستند توان خروجی بیشینه برخی از نمونه‌ها را تا ۱۲ برابر و بیشینه ولتاژ خروجی را تا ۳ برابر نسبت به نمونه‌هایی با مدل‌های مرسوم قدیمی تر افزایش دهند [۱۴]. طراحی مکانیکی مختلف نانوژنراتورها و استفاده از مواد جدید نیز می‌تواند بر این عملکرد تاثیر داشته باشد [۱۵]. الکترودهای اینتردیجیتال (IDEs) امکان استفاده از ضرایب ارتعاشی طولیرا در مدل‌های پیزوالکتریکی فراهم می‌کنند [۱۲ و ۱۶]. تاکنون بسیاری از این نوع مدل‌ها با الکترودهای اینتردیجیتال توانایی‌های بالقوه‌ای را در کاربردهای برداشت انرژی ارتعاشی از خود نشان داده‌اند [۱۲].

ساختمان‌ها و پل‌ها، ماشین‌آلات مختلف صنعتی و حمل و نقلی، جریان باد، امواج دریا و حتی حرکات اعضای بدن انسان اشاره کرد [۱ و ۲]. به عنوان یک نکته مهم، این منابع انرژی تجدیدپذیر ابزار امیدبخشی برای تأمین انرژی الکتریکی در محیط‌های با دسترس‌پذیری سخت، محیط‌های ایزوله یا کاربردهای درون بدن انسانی به نظر می‌رسد [۳]. از انرژی‌های تولید شده توسط این برداشت‌کننده‌های انرژی می‌توان برای تأمین انرژی مورد نیاز دستگاه‌هایی با توان انرژی مصرفی کم از محدوده میکرووات تا میلی‌وات استفاده کرد. از کاربردهای این تجهیزات می‌توان به حسگرهای بی‌سیم، دستگاه‌های الکتریکی قابل حمل، ایمپلنت‌های پزشکی که بدون نیاز به منبع انرژی خارجی و به صورت مستقل<sup>۱</sup> توان الکتریکی مصرفی خود را تأمین می‌کنند، نام برد [۴]. نانوژنراتورهای بسیاری با ساختار پیکربندی متفاوت برای تبدیل انرژی مکانیکی به الکتریکی بر پایه مواد پیزوالکتریکی مختلف ساخته شده است [۵].

در این راستا، در طی سال‌های متوالی مواد پیزوالکتریکی مختلفی برای کاربرد در نانوژنراتورها استفاده شده که در این میان مواد پروسکایت توجه زیادی را به خود جلب کرده است. این مواد فرمول شیمیایی عمومی  $ABO_3$  با ساختار مکعبی داشته که A و B نشان دهنده کاتیون و  $O_3$  آنیون اکسیژن است [۴ و ۵]. یکی از مواد پرکاربرد پروسکایت، تیتانیات زیرکونات سرب<sup>۲</sup> (PZT) بوده که به طور وسیعی در دستگاه‌های برداشت انرژی مکانیکی مختلف استفاده شده است [۶ و ۷]. نسل جدیدتر این مواد پروسکایت به نام تیتانات سرب- نئوبات منیزیم سرب<sup>۳</sup> (PMN-PT) نیز دارای خواص الکترومکانیکی قابل توجهی است [۸]. تک‌کریستال‌های PZT و PMN-PT هر دو دارای خواص الکترومکانیکی مناسب مانند ضریب پیزوالکتریک بالا، ضریب جفت‌شدگی الکترومکانیکی بالا، اتلاف دی‌الکتریکی کم و ثابت دی‌الکتریک بالا هستند [۷ و ۸]. در سال‌های اخیر، مواد پروسکایت هالید سرب آلی- معدنی<sup>۴</sup>

۱. Self-powered

۲. Lead zirconate titanate

۳. Lead magnesium niobate-lead titanate

۴. Organic-Inorganic lead halide

۵. Cantilever

عرضی. اگر جهت میدان الکتریکی عمود بر جهت تنش اعمالی باشد آنگاه ضریب پیزوالکتریکی  $d_{۳۱}$  موجود است و اگر موازی با آن، ضریب  $d_{۳۳}$  قابل استفاده است [۲]. رابطه بین تنش اعمالی به ماده پیزوالکتریک ( $\sigma_{xx}$ ) و تولید ولتاژ مدار باز ( $V_H$ ) با رابطه (۱) بیان می‌شود:

$$V_{Hj} = \sigma_{xx} g_{۳j} L_j, \quad (۱)$$

که در آن  $g_{۳j}$  ثابت ولتاژ پیزوالکتریک و  $L_j$  فاصله بین الکترودها است. برای نانوژنراتور با ضریب  $d_{۳۱}$ ،  $L_1$  ضخامت ماده پیزوالکتریک است که در کاربردهای نانوژنراتورهای منعطف محدود است، اما در دستگاه‌هایی با ضریب  $d_{۳۳}$ ،  $L_3$  طول مابین انگشت‌ها در الکتروود ایتتردیجیتال است که در کاربری‌های منعطف تا چند صد میکرومتر نیز می‌رسد [۲۰]. از این رو قابلیت رسیدن به توان خروجی بالاتر در برداشت‌کننده‌های انرژی بر پایه الکترودهای ایتتردیجیتال در مقایسه با دستگاه‌هایی با الکترودهای بالا/پایین بیشتر است. با توجه به قرارگیری الکترودها در دستگاه، نوع ضریب پیزوالکتریکی قابل دسترس شامل  $d_{۳۱}$  و  $d_{۳۳}$  را تعیین می‌کند که برای الکترودهای بالا/پایین یا ایتتردیجیتال متفاوت است [۱۸-۲۰]. بسامد تشدید میکرو تیر کانتیلور برای برداشت انرژی ارتعاشی می‌تواند با استفاده از معادله (۲) محاسبه شود [۲۱ و ۲۲]:

$$f_r = \frac{v_n^2}{2\pi L^3} \sqrt{\frac{EI}{mw}}, \quad (۲)$$

که  $E$  نشان دهنده مدول یانگ،  $I$  نشان دهنده ممان اینرسی،  $L$  طول،  $w$  پهنای کانتیلور،  $m$  جرم بر واحد طول میلۀ کانتیلور و  $v_n = 1/875$  بوده که  $v_n$  ویژه مقدار ضریب ارتعاشی پایه‌ای است. برای کاهش بسامد تشدید کانتیلور، یک جرم آزمایش<sup>۲</sup> به انتهای آزاد کانتیلور متصل شده است. آنگاه معادله (۲) تقریباً به شکل معادله (۳) درمی‌آید:

$$f_r = \frac{v_n^2}{2\pi L^3} \sqrt{\frac{K}{m_e + \Delta m}}, \quad (۳)$$

در یک کار پژوهشی پارک و همکاران یک نانوژنراتور با یک لایه نازک PZT بر روی یک بستر پلاستیکی با الکتروود ایتتردیجیتال را گزارش کردند. بعد از روند قطبی‌کردن<sup>۱</sup> (پولینگ) این نانوژنراتور، با یک خمش مکانیکی توسط انگشتان دست، خروجی الکتریکی بالایی در حدود ۲۰۰ ولت و ۱۵۰ میکروآمپر بر مترمربع ( $\mu A \cdot cm^{-2}$ ) را گزارش کرده‌اند [۳]. بر این اساس، در این مقاله، طرح کانتیلور تک‌لایه، سیستم نانوژنراتور با خروجی توان الکتریکی بالا برای ماده پیزوالکتریک PZT، PMN-PT و MAPbI<sub>۳</sub> با استفاده از روش المان محدود مدل‌سازی شده است. این کانتیلور تک‌لایه پیزوالکتریکی شامل لایه PET به عنوان بستر منعطف و پلیمر اپوکسی SU-۸ جهت کپسوله کردن سیستم و افزایش طول عمر آن است. جهت استفاده از ضریب پیزوالکتریکی طولی  $d_{۳۳}$  در صفحه پیزوالکتریک و دستیابی به انرژی خروجی بالاتر، از الکتروود طلا به شکل ایتتردیجیتال استفاده شده است. با مقایسه نتایج بین مواد پروسکایت پیزوالکتریکی مختلف در پارامترهای ابعادی یکسان، ماده پیزوالکتریک PZT بهترین بازدهی را در پاسخ بسامد ارتعاشی از خود نشان داد.

## ۲. مدل‌سازی نانوژنراتور

### ۲.۱. تئوری

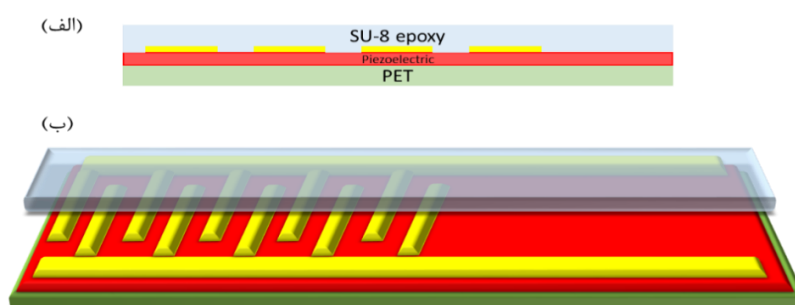
برای افزایش خروجی الکتریکی نانوژنراتورهای پیزوالکتریک، بایستی آنها را در معرض یک میدان الکتریکی بسیار قوی قرار داده که این میدان باعث بهینه‌سازی توزیع دوقطبی‌ها در سرامیک پیزوالکتریک پلی کریستال می‌شود و به این فرایند قطبی‌سازی گویند [۳]. عامل مهم دیگر برای دستیابی به توان خروجی پیزوالکتریکی بالا، رابطه بین فشار مکانیکی اعمالی و بارهای الکتریکی تولید شده است که با ثابت بار دی‌الکتریک پیزوالکتریکی  $d_{ij}$  شناخته می‌شود، که در آنها شاخص  $i$  نشان دهنده جهت دوقطبی‌های قطبیده شده و  $j$  نشانگر نیروی مکانیکی اعمالی است [۱۷-۱۹]. دو روش برای طراحی نانوژنراتورهای پیزوالکتریکی وجود دارد: روش طولی و

۲. Proof mass

۱. Poling process

جدول ۱. نتایج دو پیکربندی مختلف الکتروود برای کانتیلور با ابعاد هندسی یکسان لایه فعال پیزوالکتریک PZT.

توان خروجی (میلی وات)	ولتاژ خروجی (ولت)	بسامد تشدید	لایه پیزوالکتریک	پیکربندی الکتروود
$2 \times 10^{-12}$	$2/2 \times 10^{-7}$	۶۷۱/۵	PZT	بالا/پایین
$3/4 \times 10^2$	۹۱/۶۹	۵۴۹	PZT	اینتردیجیتال



شکل ۱. (الف) برش عرضی و (ب) ساختار ۳ بعدی نانوزنراتور.

نانوزنراتور در پاسخ به بسامد ارتعاشی و پاسخ وابسته به شتاب در بسامد تشدید بررسی شد.

که در آن  $v_n' = v_n \sqrt{0.236/3}$ ، ثابت موثر فنر،  $m_e$  جرم موثر کانتیلور و  $\Delta m$  جرم وزنی است [۲۲].

### ۱.۳. پارامترهای هندسی (تعریف مدل)

هندسه ۳ بعدی برای شبیه سازی نانوزنراتور انتخاب شد که این ساختار شامل پلیمر PET به عنوان بستر، لایه پیزوالکتریک (MAPbI<sub>3</sub>, PZT, PMN-PT) بر روی آن قرار گرفته و سپس الکتروود اینتردیجیتال از جنس طلا بر روی آن قرار می گیرد. در انتها نانوزنراتور توسط اپوکسی SU-8 کپسوله می شود که در شکل ۱ نشان داده شده است.

یک جرم آزمایش از جنس استیل به عنوان بار مکانیکی بر انتهای کانتیلور قرار گرفته و انتهای ثابت دیگر کانتیلور بر روی یک نگهدارنده استیل قرار گرفته است. ابعاد کانتیلور (۵×۴×۳) میلی متر به همراه جرم آزمایش با ابعاد (۰/۵×۳×۱) میلی متر بر روی انتهای ارتعاش شونده در نظر گرفته می شود. خواص مادی لایه های تشکیل دهنده نانوزنراتور در جدول ۲ آورده شده است.

### ۳. شبیه سازی نانوزنراتور

شبیه سازی ۳ بعدی نانوزنراتور بر پایه ماده فعال تک لایه پیزوالکتریک پروسکایت با استفاده از روش المان محدود برای پاسخ بسامدی انجام شد. ابتدا ولتاژ و توان خروجی کانتیلور در پاسخ بسامد ارتعاشی با دو پیکربندی به صورت الکتروود بالا/پایین و الکتروود اینتردیجیتال محاسبه شد که در جدول ۱ نتایج حاصل از دو پیکربندی مختلف با ابعاد هندسی یکسان برای یک لایه فعال آورده شده است.

نتایج محاسبات نشان داد که الکترودهای اینتردیجیتال به طور قابل توجهی عملکرد بهتری را در کانتیلور نسبت به الکترودهای بالا/پایین دارند. در این شبیه سازی ابتدا حالت قطبیده شده برای نانوزنراتور بررسی شد، سپس حالت قطبیده آرمانی برای لایه پیزوالکتریک در نظر گرفته شد و رفتار

جدول ۲. خواص مادی لایه‌های مختلف نانوژنراتور بر پایه پروسکایت [۲۳ و ۲۴].

نوع ماده	مدول یانگ (گیگاپاسکال)	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	نسبت پواسون (ν)
بستر PET	۲	۱۳۸۰	۰/۴
PZT-5H	۶۱/۱	۷۵۰۰	۰/۳
PMN-PT	۷۵	۸۰۳۸	۰/۳۷
MAPbI <sub>۳</sub>	۲۸	۴۱۶۰	۰/۳۳
طلا	۷۰	۱۹۳۰۰	۰/۴۴
اپوکسی SU-۸	۲/۲	۱۲۰۰	۰/۳۳
استیل	۲۰۰	۷۸۵۰	۰/۳۳

جدول ۳. مقایسه نتایج شبیه‌سازی نانوژنراتور تک‌لایه پیزوالکتریک با جابجاری یک الکتروود اینتردیجیتال با پژوهش تجربی [۳].

پژوهش	ولتاژ خروجی (ولت)	درصد خطای ولتاژ خروجی (%)	چگالی توان خروجی (میلی‌وات بر سانتی‌متر مربع)	درصد خطای توان خروجی (%)
شبیه‌سازی	۲۰۶/۶۱	۳/۳۱	۱۸/۷۳	۳/۴۸
تجربی [۳]	۲۰۰		۱۸/۱	

### ۲.۳. تنظیمات هندسه

با توجه به پارامترهای طراحی هندسه که در قسمت قبل توضیح داده شد، مدل‌سازی پارامتر ۳ بعدی برای نانوژنراتور انجام شد. مدل تک‌لایه پیزوالکتریک به وسیله ماژول مکانیک جامد ساخته شد. برای مدل هندسه، شرایط مرزی ثابت به انتهای ثابت نانوژنراتور و نگهدارنده افزوده شد و مابقی ساختار متحرک هستند. در قسمت شرایط مرزی، ترمینال و زمینه برای الکترودها و مرز بین آنها با لایه پیزوالکتریک به طور جداگانه تعریف شدند. همچنین لایه پیزوالکتریک نسبت به الکترودها، به نواحی مختلف با توجه به قطبش آنها برای اعمال  $d_{۳۳}$  در نظر گرفته شد.

### ۳.۳. اعتبارسنجی و المان‌بندی اجزای محدود

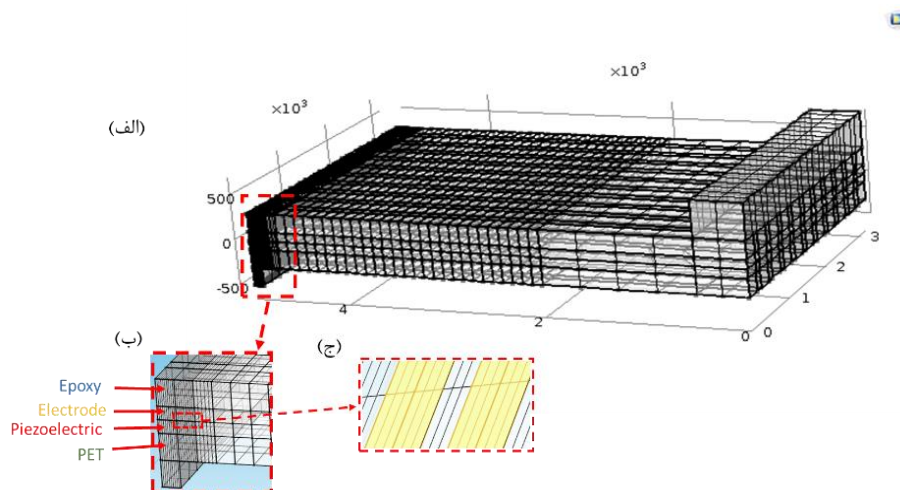
به منظور اعتبارسنجی در این محاسبات و اطمینان از صحت و کارآمدی روش حل نرم‌افزاری، نتایج حاصل از مطالعه حاضر با نتایج به دست آمده از پژوهش تجربی پارک و همکارانش [۳] مقایسه شده است. در جدول ۳ ولتاژ الکتریکی و چگالی توان خروجی برای نانوژنراتور با لایه فعال PZT نسبت به پاسخ بسامدی استخراج شده و با نتایج بر اساس تحقیقات تجربی [۳] مقایسه شده‌اند که برای لایه PZT در نانوژنراتور از مشخصات هندسی زیر استفاده شده است:

$$l = 1/5 \text{ cm} \quad w = 1/5 \text{ cm} \quad t = 2 \mu\text{m}$$

که  $l$  نشان دهنده طول،  $w$  عرض و  $t$  ضخامت لایه پیزوالکتریک است.

جدول ۴. مقایسه نتایج شبیه‌سازی برداشت‌کننده انرژی تک‌لایه پیزوالکتریک با جایگذاری دو الکتروود اینتردیجیتال با پژوهش تجربی [۲۵].

پژوهش	ولتاژ خروجی (ولت)	درصد خطای ولتاژ خروجی (%)	توان خروجی (میکرووات)	درصد خطای توان خروجی (%)
شبیه‌سازی	۴/۴۴	۳/۲۶	۵۲/۱	۳/۳۷
تجربی [۲۵]	۴/۳		۵۰/۴	



شکل ۲. (الف) المان‌بندی اجزاء محدود برای نانوزنراتور، (ب) بزرگنمایی المان‌بندی قسمت متراکم با تنش مکانیکی بیشتر و (ج) بزرگنمایی الکتروود بر روی صفحه پیزوالکتریک.

از طرفی برای المان‌بندی نانوزنراتور، المان صفحه‌ای برای تمام سطح و حجم سازه انتخاب شد. برای قسمت‌هایی که تنش مکانیکی بیشتری به سازه اعمال می‌شد، به صورت توزیعی تراکم شبکه‌بندی بالاتری انتخاب شد. ساختار المان‌بندی شده نانوزنراتور به همراه بزرگنمایی نواحی با تراکم المان توزیعی بیشتر و همچنین بزرگنمایی الکتروود طلا بر روی لایه پیزوالکتریک در شکل ۲ آمده است.

یکی از مهم‌ترین اعمال در مسائل مبتنی بر روش حل عددی از جمله المان محدود، این است که بعد از یافتن پاسخ، همگرایی پاسخ با تغییر ابعاد المان و تراکم شبکه‌بندی انجام شود.

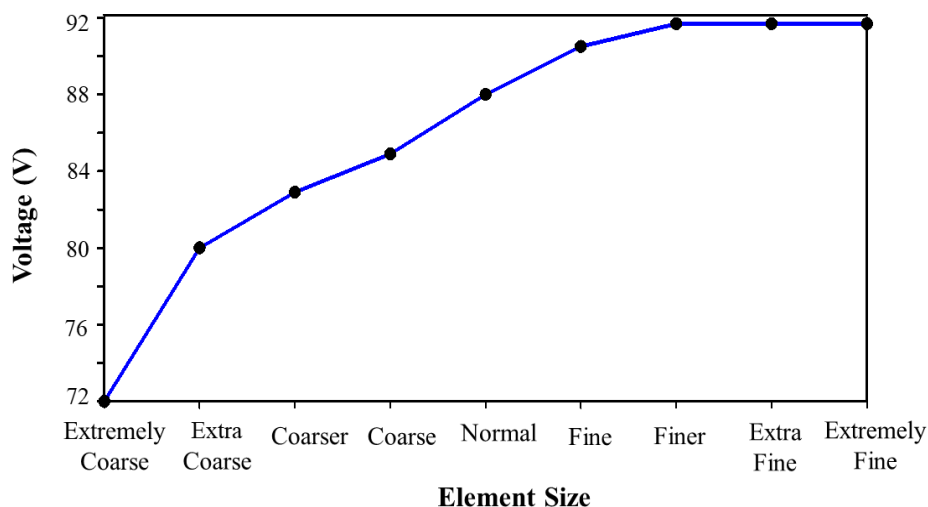
بدین منظور برای المان‌بندی اجزاء محدود سازه نانوزنراتور، اندازه‌های مختلف از فوق‌درشت تا ساختار بسیارریز انتخاب

در ادامه روند اعتبارسنجی محاسبات، نتایج حاصل از شبیه‌سازی برداشت‌کننده انرژی تک‌لایه پیزوالکتریک با نتایج گزارش شده در پژوهش تجربی لی و همکارانش [۲۵] مقایسه شد.

نتایج ولتاژ و توان خروجی برداشت‌کننده انرژی با جایگذاری دو الکتروود اینتردیجیتال در بالا و پایین یک لایه پیزوالکتریک PZT در جدول ۴ آورده شده و با نتایج شبیه‌سازی مقایسه شده‌اند. ابعاد هندسی زیر برای یک لایه پیزوالکتریک PZT در برداشت‌کننده انرژی در نظر گرفته شده است:

$$l_p = 43/9 \text{ mm} \quad w_p = 13/6 \text{ mm} \quad t_p = 0/28 \text{ mm}$$

که  $l_p$  نشان دهنده طول،  $w_p$  عرض و  $t_p$  ضخامت لایه PZT است. با مقایسه داده‌های جدول ۳ و ۴ مشاهده می‌شود نتایج شبیه‌سازی حاضر تطابق خوبی با نتایج پژوهش تجربی در مراجع [۳ و ۲۵] دارند.



شکل ۳. بررسی همگرایی پاسخ با تغییر تراکم شبکه‌بندی برای ولتاژ خروجی نانوژنراتور با ماده پیزوالکتریک PZT.

انگشت‌های الکتروود، باعث قطبی شدن نواحی مجاور الکتروودها شده و در نتیجه دو ناحیه متفاوت از لحاظ جهت قطبش در صفحه پیزوالکتریک نانوژنراتور به وجود می‌آورد. همان طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود قسمت قرمز رنگ اطراف الکتروود نشان دهنده ترمینال اعمال ولتاژ الکتریکی و قسمت آبی رنگ اطراف الکتروودها بیانگر پتانسیل صفر زمینه است.

#### ۴. شبیه‌سازی پاسخ الکترومکانیکی

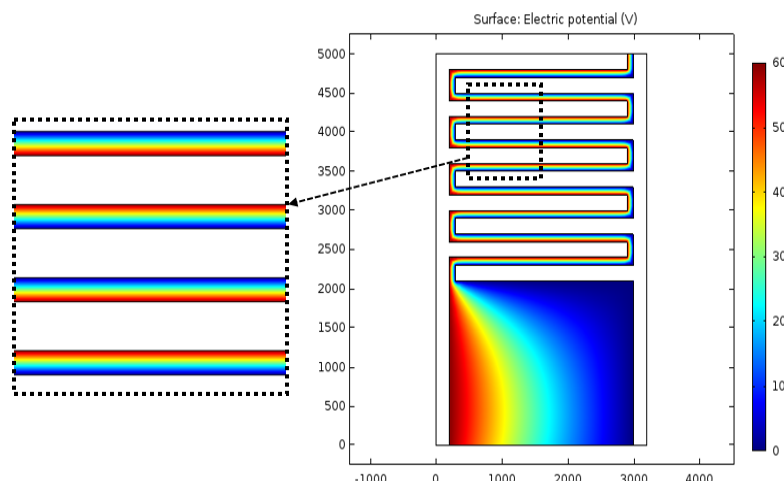
برای شبیه‌سازی این مدل ۳ بعدی با مطالعه وابسته به بسامد ارتعاشی، شاخه فیزیکی مکانیک جامد، الکترواستاتیک (es) و مدار الکتریکی (cir) انتخاب شده است. در قسمت مکانیکی، سمت چپ نانوژنراتور و نگهدارنده آن ثابت در نظر گرفته می‌شوند که از قسمت هندسه به عنوان پیش‌تنظیم انتخاب می‌شود. همچنین قسمت راست آزاد مرتعش که جرم آزمایش بر روی آن قرار گرفته با شتاب  $g = 9/8 \text{ m/s}^2$  تعیین شد. راستای ارتعاش این جرم قرار گرفته در انتهای کانتیلور در جهت z است. ضریب اتلاف ایزوتروپیک برای میرایی خطی مواد الاستیک و میرایی مکانیکی مواد پیزوالکتریک انتخاب شدند. با توجه به جفت الکترون‌ها، تک‌لایه پیزوالکتریک بایستی به دو ناحیه تقسیم شود که یکی از

و نتایج حاصل از هر مرحله با مرحله قبل مقایسه شد. با مقایسه نتایج هر قسمت مشاهده شد که بعد از انتخاب ساختار ریزتر تغییری در نتایج حاصل نشده و مشابه مرحله قبل است. در شکل ۳ همگرایی ولتاژ خروجی با تغییر تراکم شبکه‌بندی برای نانوژنراتور در پاسخ بسامد ارتعاشی نشان داده شده است.

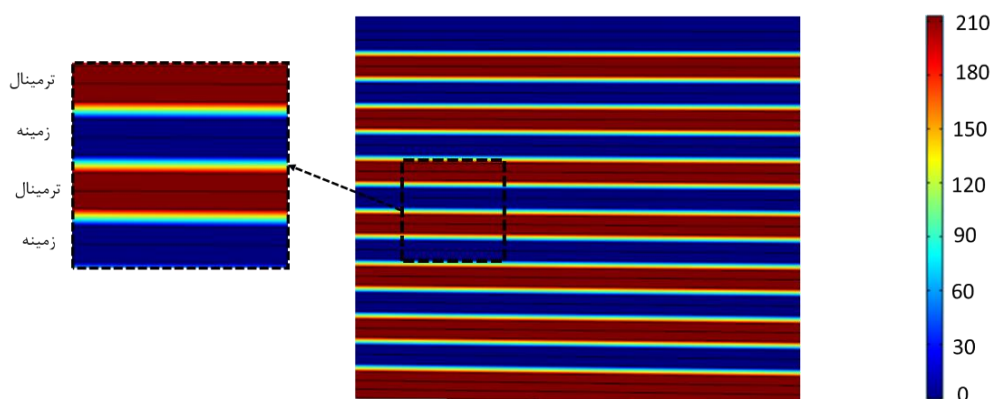
#### ۴.۳. بررسی قطبی‌سازی

در طراحی الکتروودهای اینتردیجیتال، دو ساختار الکتروود شانه‌مانند آدرس‌پذیر به هم اتصال پیدا کرده و با بارهای مثبت و منفی به طور جداگانه بر روی سطح پیزوالکتریک قرار می‌گیرند. در روند قطبی‌سازی، الکتروودها به طور جانبی میدان الکتریکی را به لایه پیزوالکتریک اعمال می‌کنند که در نتیجه قطبی‌سازی جانبی در صفحه پیزوالکتریک اتفاق می‌افتد. در کاربردهای معمولی، قطبی‌سازی در جهت عمودی توسط دو الکتروود بالا و پایین اتفاق می‌افتد [۲۲].

بعد از جایگذاری جفت الکتروودهای اینتردیجیتال بر روی صفحه پیزوالکتریک، میدان الکتریکی با ولتاژ بالا (۶۰ کیلوولت بر سانتی‌متر) را در قسمت الکترواستاتیک (es) به الکتروود ترمینال اعمال کرده و دیگری را به عنوان زمینه با پتانسیل صفر در نظر می‌گیریم. این اختلاف پتانسیل ایجاد شده بین



شکل ۴. نمای از بالا و بزرگنمایی شده صفحه پیزوالکتریک با الکترودهای ایتتردیجیتال تحت اعمال ولتاژ ۶۰ کیلوولت بر سانتی متر.



شکل ۵. نمای از بالای توزیع پتانسیل الکتریکی بعد از اعمال تنش مکانیکی به نانوزنراتور با الکترودیجیتال.

#### ۱.۴. توزیع پتانسیل الکتریکی در سطح لایه پیزوالکتریک

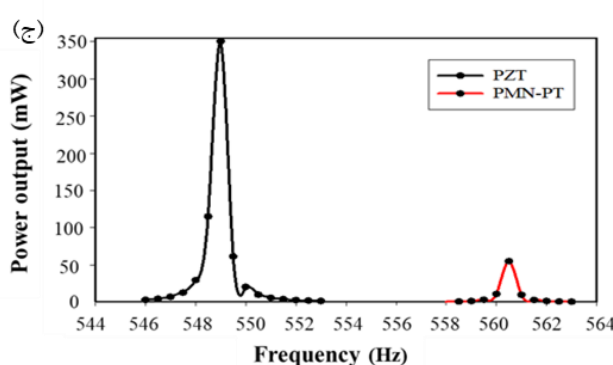
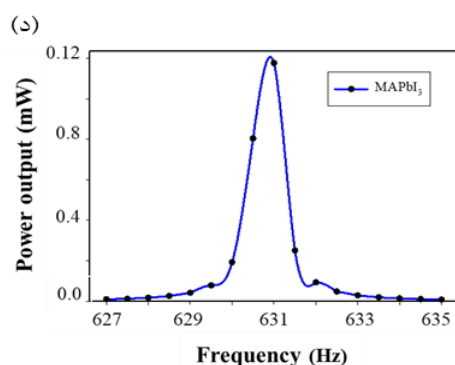
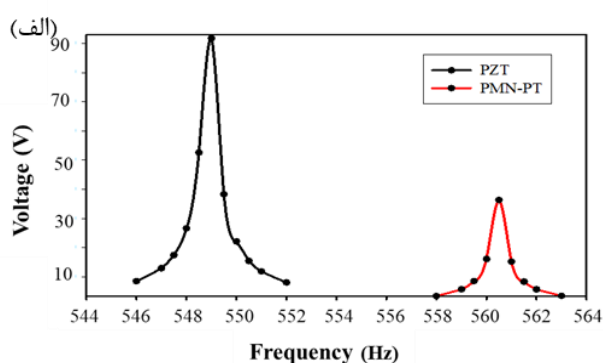
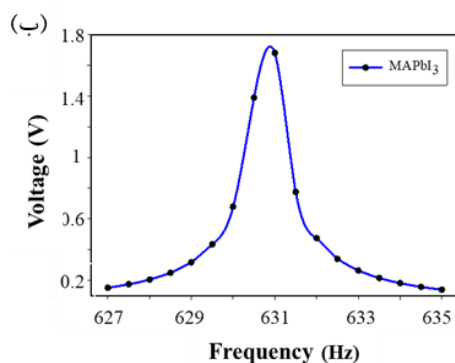
بعد از اعمال تنش مکانیکی به ساختار نانوزنراتور، توزیع پتانسیل الکتریکی در سطح لایه پیزوالکتریک بررسی شد. در این لایه، نواحی ثابت نانوزنراتور پتانسیل بالاتری را نسبت به سایر نواحی از خود نشان داد. تنش اعمالی به صفحه پیزوالکتریک باعث تغییر ساختار تقارنی پروسکایت می شود. این تغییر ساختار باعث تغییر جهت توزیع بار در نواحی مرزی قطبی شده صفحه پیزوالکتریک می شود که بارها را به شارش جریان به سمت الکترودها وادار می کند. الکترودهایی که در نزدیکی نواحی با تنش مکانیکی بیشتر هستند، انتقال دهنده بار بیشتری به سمت مدار خارجی هستند. در شکل ۵ توزیع پتانسیل

آن نواحی به اندازه ۱۸۰ درجه در راستای y دستگاه مختصات گردش دارد. در قسمت الکترواستاتیک، ارتباط بین لایه پیزوالکتریک و الکترودهای ترمینال و زمینه بایستی مورد توجه قرار گیرند. گره ترمینال بایستی به عنوان مدار انتخاب شود که یک مدار خارجی را برای اتصال ترمینال به رابط فیزیک مدار الکتریکی مدل سازی می کند. در قسمت فیزیکی مدار الکتریکی برای ترمینال خارجی، ولتاژ ترمینال باید به عنوان پتانسیل الکتریکی انتخاب شود. در قسمت مولتی فیزیک رابط جفت شدگی پیزوالکتریک باید از طریق میدان الکترواستاتیک (es) به لایه پیزوالکتریک اعمال شود.



جدول ۵. مشخصات ضرایب پیزوالکتریکی PZT، PMN-PT و MAPbI<sub>3</sub> [۲۳ و ۲۴].

ماده پیزوالکتریک	ساختار	$e_{۳۱}$ (C·m <sup>-۲</sup> )	$e_{۳۲}$ (C·m <sup>-۲</sup> )	$e_{۳۳}$ (C·m <sup>-۲</sup> )	$e_{۲۲}$ (C·m <sup>-۲</sup> )	$e_{۱۵}$ (C·m <sup>-۲</sup> )	$d_{۳۱}$ (pC/N)	$d_{۳۲}$ (pC/N)	$d_{۳۳}$ (pC/N)	$d_{۲۲}$ (pC/N)	$d_{۱۵}$ (pC/N)
PZT	ABO <sub>3</sub>	-۶/۶۲۲	-۶/۶۲۲	۲۳/۲۴	۱۷/۰۳	۱۷/۰۳	-۲۷۴	-۲۷۴	۵۹۳	۷۴۱	۷۴۱
PMN-PT	ABO <sub>3</sub>	-۲/۴	-	۲۷/۱	-	۱۳/۶	-۹۲۱	-	۱۹۸۱	-	۱۹۰
MAPbI <sub>3</sub>	AMX <sub>3</sub>	-	-	۰/۸۳	-	-	-	-	۳۱/۴	-	-



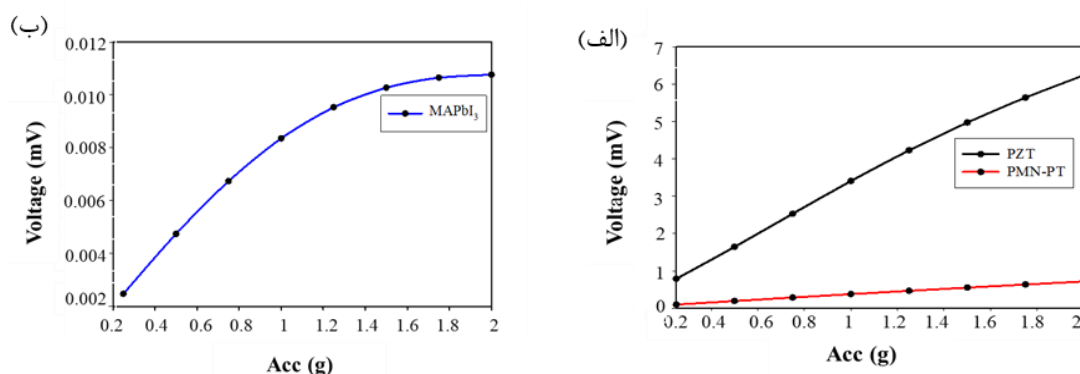
شکل ۶. منحنی پاسخ بسامدی - ولتاژ خروجی نانوژنراتور تک‌لایه پیزوالکتریک (الف) PZT، PMN-PT، (ب) MAPbI<sub>3</sub>، (ج) منحنی پاسخ بسامدی - توان خروجی نانوژنراتور تک‌لایه پیزوالکتریک برای PZT، PMN-PT و (د) MAPbI<sub>3</sub>.

نانوژنراتورهای با الکتروود اینتردیجیتال با مواد پیزوالکتریکی PZT، PMN-PT و MAPbI<sub>3</sub> در بسامد تشدید ۵۴۹، ۵۶۰/۵ و ۶۳۱ به ترتیب بیشینه ولتاژ خروجی ۹۱/۶۹، ۳۶/۳۰ و ۱/۶۷ ولت دارند. ضرایب پیزوالکتریکی هر ۳ ماده پیزوالکتریک در جدول ۵ آورده شده است. همچنین توان الکتریکی خروجی (میلی‌وات) بر حسب بسامد (هرتز) برای نانوژنراتور بر حسب مواد پیزوالکتریک PZT، PMN-PT و MAPbI<sub>3</sub> که توان خروجی برای آنها به ترتیب ۳۵۰، ۵۵ و ۰/۱۲ میلی‌وات در

الکتریکی لایه پیزوالکتریک PZT در حالت ترمینال شده با الکتروود اینتردیجیتال بعد از اعمال ارتعاش خمشی به سازه نانوژنراتور در راستای محور Z به تصویر کشیده شده است.

#### ۲.۴. پاسخ بسامدی: ولتاژ و توان خروجی

شکل ۶ ولتاژ خروجی اندازه‌گیری شده در پاسخ بسامدی برای نانوژنراتورهای بر پایه PZT، PMN-PT و MAPbI<sub>3</sub> با شتاب ۱/۵ گرانش و مقاومت بار ۱۳ کیلو اهم نشان داده شده است.



شکل ۷. الف) پاسخ ولتاژ بر حسب شتاب در بسامد تشدید برای مواد پیزوالکتریک PZT و PMN-PT و (ب) MAPbI<sub>3</sub>.

PMN-PT شیب کمتری دارد (شکل ۷-الف) و در مورد MAPbI<sub>3</sub> به صورت لگاریتمی افزایش می‌یابد که در آن تا شتاب ۱/۳ به طور خطی بوده و بعد از آن ولتاژ تغییر نمی‌کند (شکل ۷-ب). همچنین با بررسی توان خروجی الکتریکی برای هر سه ماده پیزوالکتریک، رفتار خطی برای PZT و PMN-PT مشاهده می‌شود و در مورد MAPbI<sub>3</sub> تا ۱/۴ رفتار خطی و بعد از آن ثابت می‌ماند که در شکل ۸ به تصویر درآمده است. نتایج محاسبات پاسخ بسامدی وابسته به شتاب نشان می‌دهد که به طور واضح PZT ولتاژ و توان خروجی الکتریکی بالاتری نسبت به PMN-PT و MAPbI<sub>3</sub> دارد.

## ۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله، نانوذراتورهای تک‌لایه پیزوالکتریک به شکل کانتیلور بر پایه ۳ مواد پرسکایتی پیزوالکتریک PZT، PMN-PT و MAPbI<sub>3</sub> با جایگذاری الکترودهای اینتردیجیتال به همراه بستر پلیمر PET و اپوکسی SU-8 به عنوان مواد کپسوله کننده روی سطح نانوذراتور با روش المان محدود مورد مطالعه قرار گرفت. الکترودهای اینتردیجیتال برای استفاده از ضریب ارتعاشی طولی  $d_{33}$  پیزوالکتریک در کانتیلور مورد استفاده قرار گرفت که نتایج محاسباتی آن تفاوت چشمگیری را با الکترودهای مرسوم بالا/پایین نشان می‌دهد. برای اعتبارسنجی روش حل نرم‌افزاری، نتایج مطالعه حاضر با دو پژوهش تجربی نیز مقایسه شد که تطابق بسیار مطلوبی با داده‌های تجربی

بسامد تشدید ۵۴۹، ۵۶۰/۵ و ۶۳۱ هرتز است در شکل (۶ ج و د) نشان داده شده است. از شکل ۶ می‌توان دریافت که ماده PZT ولتاژ و توان الکتریکی خروجی بیشتری نسبت به سایر مواد پیزوالکتریک دارد.

نانوذراتور برای ماده پرسکایت MAPbI<sub>3</sub> بسامد تشدید بیشتری را نسبت به PZT و PMN-PT از خود نشان داد که با توجه به کمتر بودن مقدار ضریب پیزوالکتریک  $d_{33}$  و عدم وجود سایر ضرایب پیزوالکتریک، نتایج کمتری حاصل شد. برای این نوع پرسکایت در هنگام ترکیب شدن با پلیمر پیزوالکتریک [۱۱] یا استفاده از ترکیبات دیگر می‌تواند با توجه به بالاتر بودن ضریب  $d_{33}$  نتایج بهتری را ارائه دهد که می‌توان به CF<sub>2</sub>NH<sub>2</sub>PbI<sub>2</sub> با ضریب  $d_{33}$  معادل با ۲۴۸ پیکوکولن بر نیوتن (pC/N) اشاره کرد [۲۴].

## ۳.۴. پاسخ وابسته به شتاب در بسامد تشدید: ولتاژ و توان خروجی

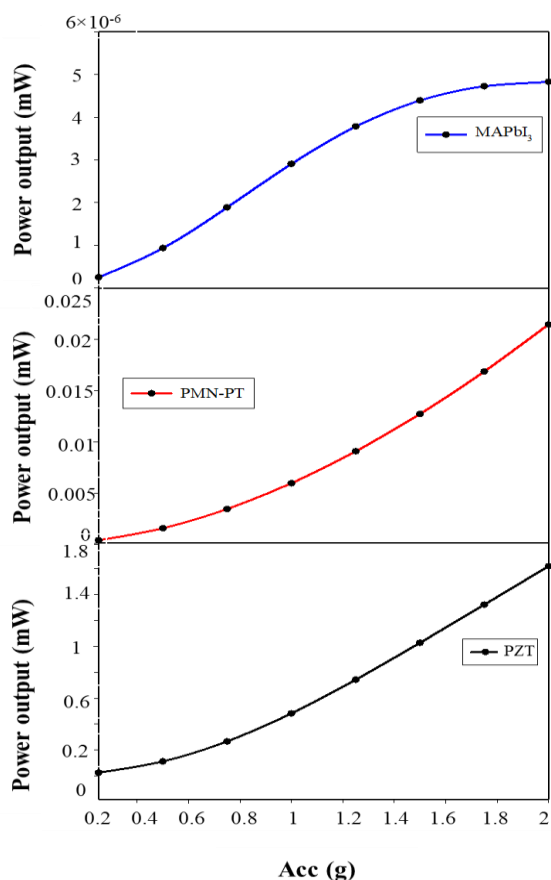
شکل ۷ ولتاژ خروجی محاسبه شده برای نانوذراتور با سه نوع ماده پیزوالکتریک برای رفتار وابسته به شتاب در بسامد تشدید هریک از آنها به صورت جداگانه برای مقاومت بار ۱۳ کیلو اهم را بررسی می‌کند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که ولتاژ خروجی نانوذراتور برای PZT و PMN-PT به صورت خطی با افزایش شتاب ۲ g - ۰/۲۵، افزایش می‌یابد که برای

جدول ۶. نتایج رفتار نانوژنراتور به پاسخ بسامدی و پاسخ وابسته به شتاب در بسامد تشدید

ماده پیزوالکتریک	پاسخ بسامدی		پاسخ وابسته به شتاب در بسامد تشدید	
	ولتاژ خروجی (ولت)	توان الکتریکی خروجی (میلی‌وات)	ولتاژ (میلی‌ولت)	توان الکتریکی خروجی (میلی‌وات)
PZT	۹۱/۶۹	۳۵۰	۶/۲۳	۱/۶۲
PMN-PT	۳۶/۳۰	۵۵	۰/۷۱	۰/۰۲
MAPbI <sub>۳</sub>	۱/۶۷	۰/۱۲	۰/۰۱۱	۴×۵-۱۰

تنش مکانیکی در راستای محور Z در مواد پیزوالکتریک، منجر به تغییر تقارن ساختاری مواد پروسکایت و ایجاد اختلاف پتانسیل الکتریکی در نواحی قطبی شده در صفحه فعال پیزوالکتریک می‌شود. بیشترین میزان ولتاژ و توان خروجی برای شبیه‌سازی نانوژنراتور با هر سه ماده پروسکایت PZT، PMN-PT و MAPbI<sub>۳</sub> به ترتیب در بسامد تشدید ۵۴۹، ۵۶۰/۵ و ۶۳۱ به دست آمد که در جدول ۶ به طور خلاصه آمده است. همچنین رفتار وابسته به شتاب در بسامد تشدید در بازه شتاب ۲g - ۰/۲۵g، با مقاومت بار ۱۳ کیلوهم برای این سازه با هر ۳ ماده پروسکایت بررسی شد. ولتاژ و توان الکتریکی خروجی در پاسخ وابسته به شتاب در بسامد تشدید برای هر سه ماده پیزوالکتریک به اختصار در جدول ۶ آورده شده است.

نانوژنراتور با ماده فعال PZT بیشترین ولتاژ و توان خروجی در پاسخ بسامدی و همچنین در پاسخ وابسته به شتاب در بسامد تشدید را از خود نشان داد. همچنین برای نانوژنراتور با ماده پروسکایت MAPbI<sub>۳</sub> با توجه به عدم دسترسی به همه ضرایب پیزوالکتریک و کمتر بودن مقدار ضریب  $d_{۳۳}$  نتایج به دست آمده ضعیف‌تر از مواد پروسکایت دیگر است که نیازمند تحقیقات تجربی بیشتر در این زمینه است. از طرفی با توجه به خواص پیزوالکتریک پروسکایت‌های نسل جدید فلز هالید آلی-معدنی می‌توان با استفاده از نوع دیگر ترکیبات در این نوع پروسکایت، رفتار پیزوالکتریک بهبود یافته‌تری را در نانوژنراتورهای بر پایه الکتروادیتزدیجیتال شاهد بود.



شکل ۸. خروجی توان الکتریکی بر حسب شتاب در بسامد تشدید برای مواد پیزوالکتریک PZT، PMN-PT و MAPbI<sub>۳</sub>.

داشتند. از طرفی با اعمال ولتاژ الکتریکی بالا توسط این الکترودها، قطبی کردن صفحه پیزوالکتریک مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین ولتاژ و توان خروجی الکتریکی در پاسخ به بسامد ارتعاشی برای این نانوژنراتور شبیه‌سازی شد. با اعمال

در بازه کیلوهرتز را نیز دارد و به عنوان منبع تأمین انرژی دستگاه‌های بدون منبع خارجی و مستقل که توان مصرفی کمی دارند، قابل استفاده است.

پاسخ الکترومکانیکی این نوع پروسکایت‌های جدید نشان دهنده خاصیت پیزوالکتریکی این مواد است.

این مدل قابلیت استفاده برای برداشت انرژی مکانیکی و ارتعاشی محیط در بسامدهای محدود به زیر کیلوهرتز و حتی

## مراجع

- 14- K F Wang and B L Wang, *Composite Structures* **153** (2016) 253.
- 15- A Jemai, F Najjar, et al., *Composite Structures* **135** (2016) 176.
- 16- H Cho, J Park, and J Yeong Park, *Micro and Nano Systems Letters* **5** (2017) 1.
- 17- Y B Jeon, et al., *Sensors and Actuators A: Physical* **122** (2005) 16.
- 18- A E Cohen and R R Kunz, *Sensors and Actuators B: Chemical* **62** (2000) 23.
- 19- E Choi, S Q Lee, et al., *5th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*, (2010) 680.
- 20- Y B Jeon, R Sood, et al., *Sensors and Actuators A: Physical* **122** (2005) 16.
- 21- A M Alsaad, A A Ahmad, et al., *Open Journal of Applied Sciences* **9** (2019) 181.
- 22- H Li, C Tian, and Z D Deng, *Applied Physics Reviews* **1** (2014) 041301.
- 23- R Zhang, W Jiang, et al., *In AIP conference proceedings* **626** (2002) 188.
- 24- S Liu, F Zheng, et al., *The journal of Physical Chemistry Letters* **7** (2016) 1460
- 25- M S Lee, J Yun, et al., *Japanese Journal of Applied Physics* **56** (2017) 127101
- 1- K I Park, C K Jeong, et al., *Nano Convergence* **3** (2016) 1.
- 2- Z Yang, S Zhou, et al., *Joule* **2** (2018) 642.
- 3- K I Park, J H Son, et al., *Advanced materials* **26** (2014) 2514.
- 4- M Safaei, H A Sodano, and S R Anton, *Smart Materials and Structures* **28** (2019) 113001.
- 5- J Hao, W Li, J Zhai, and H Chen, *Materials Science and Engineering: R: Reports* **135** (2019) 1.
- 6- A Assadi, and V S Nasrabad, *IEEE transactions on nanotechnology* **12** (2013) 775.
- 7- V Jella, S Ippili, et al., *Nano Energy* **57** (2019) 74.
- 8- S Nagakalyan, K L Narayana, and B R Kumar, *ARPN journals* **11** (2016) 9171.
- 9- R Ding, H Liu, et al., *Advanced Functional Materials* **26** (2016) 7708.
- 10- H Nikbakht, A E Shalan, et al., *Energy Technology* (2019) 1900728.
- 11- V Jella, S Ippili, et al., *Nano Energy* **53** (2018) 46.
- 12- M S Lee, C I Kim, et al., *Energy* **179** (2019) 373.
- 13- M Ma, S Xia, et al., *Applied Physics Letters* **105** (2014) 043905.