

بهینه‌سازی رفتار استاتیکی، دینامیکی میکروکانتیلور پیزوالکتریک به کمک روش اجزاء محدود

رضا ریاحی فر، محبوبه مومنی

پژوهشکده سرامیک، پژوهشگاه مواد و انرژی

reza_rfr@yahoo.com

چکیده: میکروکانتیلورهای پیزوالکتریک چند لایه در واقع تیرهای یک سر گیردار با ابعاد میکرومتری هستند که امروزه به طور وسیعی در صنایع هوا-فضا، نظامی و خودروسازی به عنوان محرک و حسگر در سازه‌های هوشمند به کار می‌روند. پارامترهایی نظیر ضخامت زیر لایه، ضخامت پوشش، جنس و ابعاد مواد به کار رفته در ساختمان یک میکروکانتیلور بازده دستگاه را تعیین می‌کنند. بنابراین درک رفتار استاتیکی و دینامیکی میکروکانتیلور به طراحان امکان بهینه‌سازی ابزارهای فوق را می‌دهد. میکروکانتیلور مورد مطالعه در این تحقیق از یک زیر پایه سیلیکونی ساخته شده است که با لایه‌ای از جنس اکسید روی (به عنوان ماده پیزوالکتریک) پوشش داده شده است. ضخامت زیر لایه و پوشش اکسید روی و نسبت این دو ضخامت به عنوان پارامتر مورد مطالعه انتخاب گردید و فاکتور K^2 (ضریب کوپلینگ الکترومکانیکی) به عنوان تابع هدف که بهینه‌سازی باید روی آن انجام گیرد در نظر گرفته شد. از نرم افزار تجاری انسیس برای شبیه سازی رفتار استاتیکی و دینامیکی استفاده گردید. بهینه سازی میکروکانتیلور در محدوده‌ی ضخامتی ۱ تا ۷ میکرومتر برای زیر لایه سیلیکونی و محدوده ضخامتی ۱ تا ۵ میکرومتر برای لایه اکسید روی نشان داد در ضخامت ۴/۵ میکرومتر برای زیر لایه و ۲ میکرومتر برای اکسید روی بیشترین ضریب کوپلینگ الکترومکانیکی معادل ۱/۸۵ درصد به دست می‌آید.

کلمات کلیدی: میکروکانتیلور، پیزوالکتریک، المان محدود، انسیس، اکسید روی.

۱- مقدمه

میکروکانتیلورهای پیزوالکتریک عمدتاً به عنوان محرک و حسگر در سازه‌های هوشمند فضایی یا در خودروها به کار می‌روند. علاوه بر این کاربردها این ادوات الکترونیکی می‌توانند در ابزارهایی نظیر دستگاه‌های تشخیص هویت [۱]، مولدهای انرژی الکتریکی با توان در حد میکرووات [۲]، سنسورهای تشخیص گاز و سنسورهای اندازه گیری اجرام کوچک [۳] استفاده شوند. میکروکانتیلورها با توجه به کاربردهایی که نمونه‌های آن ذکر شد دارای فرکانس کاری متفاوتی هستند. طراحان بر اساس نوع فرکانس کاری آنها اقدام به انتخاب اندازه، جنس و تعداد لایه‌های آنها می‌کنند. در اغلب موارد پارامترها به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که راندمان تبدیل انرژی در فرکانس کاری مورد نظر بیشترین مقدار را داشته باشد. انتخاب این پارامترها اغلب با روش سعی و خطا انجام می‌شود که طبعاً برای سازندگان بسیار پرهزینه خواهد بود. خوشبختانه با توسعه روش‌های عددی و در دسترس بودن نرم‌افزارهای تجاری امکان کاهش هزینه‌ها وجود دارد. در این تحقیق هدف آن است که نشان دهیم با نرم افزار انسیس چگونه می‌توان رفتار یک میکروکانتیلور را جهت کاربردی خاص بهینه سازی کرد. از سال ۱۹۷۰ با فرمول بندی مواد PZT به روش المان محدود اساس شبیه‌سازی مواد پیزوالکتریک در نرم افزار انسیس پی ریزی شد [۴]. از آن سال تاکنون شبیه‌سازی‌های متعددی به کمک نرم افزارهای تجاری در این خصوص انجام شده است. پیلما^۱ و همکارانش در سال ۲۰۰۱ روی طرح‌های مختلفی از دستگاه‌های PZT کار کردند و به بهینه‌سازی عملکرد دستگاه پرداختند. آنها نتایج تجربی را با نتایج آنالیز المان محدود مقایسه کرده و مطابقت

¹ Peelamedu

بالایی بین نتایج مشاهده کردند [۵]. پیفرت^۱ و همکارانش بر روی یک محرک دو لایه PZT کار کردند و از یک نوع المان تیر دو لایه استفاده کردند [۶]. کاتافستا^۲ و همکارانش بر روی سیستم‌های کنترلی که دارای محرک‌های پیزوالکتریک بودند کار کردند و نتایج در خور توجهی در ساخت این دستگاه‌ها پس از استفاده از نتایج شبیه‌سازی‌ها به دست آوردند [۷]. همچنین در رابطه با مبدل‌های پیزوالکتریک میکرو ماشین، شبیه‌سازی‌هایی جهت بهینه‌سازی عملکرد آن‌ها انجام شده و یک نسبت ضخامت بهینه برای بالاترین بازدهی مشاهده شده است [۸]. در سال‌های اخیر، علاوه بر شبیه‌سازی رفتار میکروکانتیلور توسط طراحان به منظور بهینه‌سازی فرآیند ساخت [۹]، تحقیقات بنیادی در این رابطه همچنان ادامه دارد. به طور مثال ویلبرگ^۳ [۱۰] در سال ۲۰۱۲ المان جدیدی را برای شبیه‌سازی ساختارهای هوشمند پیزوالکتریک ارائه نمود که قادر است هزینه محاسبات را کاهش و دقت را افزایش دهد. در این مقاله از مولتی فیزیک انسیس و حل مودال، هارمونیک و استاتیکی برای شبیه‌سازی و بهینه‌سازی یک تیر میکروکانتیلور پیزوالکتریک استفاده شده است. منظور از بهینه‌سازی، طراحی ضخامت مناسب لایه‌ها برای دستیابی به بیشترین راندمان تبدیل انرژی مکانیکی به الکتریکی به کمک نرم افزار انسیس می‌باشد.

۲- مراحل مدل‌سازی

۲-۱- معادلات حاکم بر مسئله

معادلات پیزوالکتریسته شامل معادلات الکتریکی و مکانیکی می‌باشند که به دلیل تاثیر متقابل بر یکدیگر باید به صورت هم زمان حل گردند. این معادلات به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\{S\} = [s^E] \{T\} + [d] \{E\} \quad (۱)$$

$$\{D\} = [d]^T \{T\} + [\epsilon^T] \{E\} \quad (۲)$$

که در آنها $\{T\}$ بردار تنش، $\{S\}$ بردار کرنش، $\{D\}$ بردار جابه‌جایی الکتریکی، $\{E\}$ بردار میدان الکتریکی، $[S^E]$ ماتریس سختی (در میدان الکتریکی ثابت)، $[d]$ ماتریس پیزوالکتریک در ارتباط با میدان الکتریکی و تنش، $[d]^T$ ترانهادی $[d]$ و $[\epsilon^T]$ ماتریس دی الکتریک در تنش ثابت است. با انجام آنالیز مودال فرکانس‌های رزونانس و آنتی رزونانس به دست می‌آیند و از روی این دو مقدار ضریب کوپلینگ الکترومکانیکی (K^2) قابل محاسبه است. این ضریب به صورت نسبت انرژی الکتریکی ذخیره شده به مقدار انرژی مکانیکی اعمالی تعریف می‌گردد. به نوعی این پارامتر راندمان تبدیل انرژی محسوب می‌شود و مقداری بین صفر و یک دارد و به وسیله‌ی رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۱ و ۱۲ و ۱۳].

$$\frac{k^2}{1-k^2} = \frac{\pi}{2} \left(\frac{f_a}{f_r} \right) \tan \left[\frac{\pi}{2} \left(\frac{f_a - f_r}{f_r} \right) \right] \quad (۳)$$

که در آن f_a ، f_r فرکانس رزونانس و آنتی رزونانس ماده می‌باشند.

۲-۲- شکل هندسی، خواص الکتریکی و مکانیکی، مش بندی و شرایط مرزی مدل

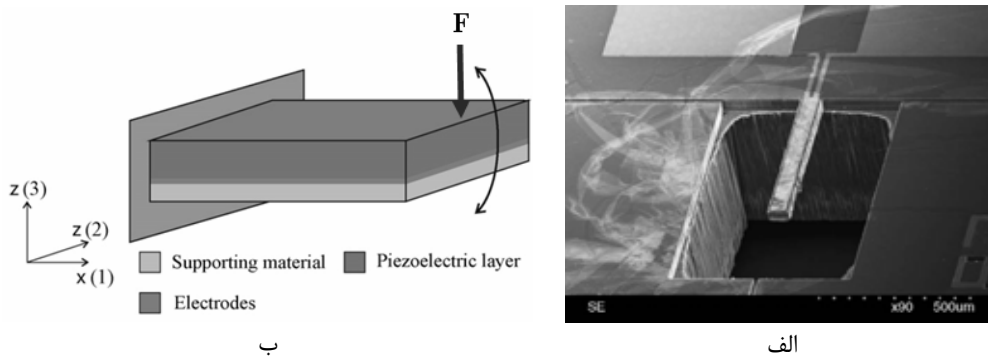
میکروکانتیلور مورد مطالعه از یک زیر پایه سیلیکونی ساخته شده است که با لایه‌ای از جنس اکسید روی (به عنوان ماده پیزوالکتریک) پوشش داده شده است. ضخامت زیر لایه و پوشش اکسید روی و نسبت این دو ضخامت به عنوان پارامتر مورد مطالعه انتخاب گردید و فاکتور K^2 (ضریب کوپلینگ الکترومکانیکی) به عنوان

¹ Piefort

² Cattafesta

³ Willberg

تابع هدف که بهینه‌سازی باید روی آن انجام گیرد در نظر گرفته شد. مدل المان محدود به کمک نرم افزار انسیس ۱۲ ساخته شد. از المان‌های سالیید ۵ برای لایه پیزوالکتریک و از سالیید ۴۵ برای زیرلایه سیلیکونی استفاده گردید. در مجموع مدل دارای ۲۸۸۰۰ المان با نسبت ابعادی ۴ می‌باشد. پس از ایجاد مدل و مش‌بندی، شرایط مرزی مناسب اعمال می‌شود. شکل ۱- الف تصویر SEM و ابعاد واقعی از یک میکروکانتیلور که از آن به عنوان یک مبدل استفاده شده را نشان می‌دهد [۱۴] و شکل ۱- ب تصویر شماتیک آن را نمایش داده است. همانطور که ملاحظه می‌شود این ساختار از چهار لایه شامل یک زیرلایه، دو الکتروود و لایه‌ای از جنس ماده پیزوالکتریک ساخته شده است.



شکل ۱- الف- تصویر SEM و ابعاد واقعی از یک میکروکانتیلور که از آن به عنوان یک مبدل استفاده شده است، ب- تصویر شماتیک آن

با توجه به کم بودن ضخامت الکتروودها و تاثیر ناچیز آنها در جوابها، از تاثیر الکتروودها در مدل صرف‌نظر شده و مدل هندسی مسئله مورد نظر از دولایه شامل یک زیر لایه و یک لایه ساخته شده از جنس ماده پیزوالکتریک ساخته شده است. به این ترتیب ابعاد میکروکانتیلور شامل دو لایه مطابق جدول ۱ انتخاب گردید.

جدول ۱- ابعاد میکروکانتیلور.

ابعاد لایه و زیر لایه	طول	عرض	ضخامت
زیر لایه سیلیکونی	۱۵۰ μm	۵۰ μm	۱-۷ μm
لایه پیزوالکتریک اکسید روی	۱۵۰ μm	۵۰ μm	۱-۵ μm

در این تحقیق هدف انتخاب بهینه ضخامت زیر لایه و پوشش در محدوده نشان داده شده در جدول ۱ می‌باشد. خواص الکتریکی و مکانیکی اکسید روی و زیرلایه سیلیکونی در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- خواص مواد مورد استفاده در نرم افزار انسیس [۱۵].

$$\begin{aligned}
 & \text{ZnO "stiffness" matrix [c]} \\
 [c] &= \begin{bmatrix} 20.97 & 12.11 & 10.51 & 0 & 0 & 0 \\ 12.11 & 20.97 & 10.51 & 0 & 0 & 0 \\ 10.51 & 10.51 & 21.09 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4.43 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4.24 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4.24 \end{bmatrix} \times 10^{10} \text{ N/m}^2 \\
 & \text{ZnO "piezoelectric stress" matrix [e]} \\
 [e] &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.564917 \\ 0 & 0 & 0.564917 \\ 0 & 0 & 2.040803 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.480816 & 0 \\ -0.480816 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ C/m}^2 \\
 & \text{ZnO "dielectric Matrix" [\epsilon_r]} \\
 [\epsilon_r] &= \begin{bmatrix} 8.55 & 0 & 0 \\ 0 & 8.55 & 0 \\ 0 & 0 & 10.2 \end{bmatrix}_{3 \times 3}
 \end{aligned}$$

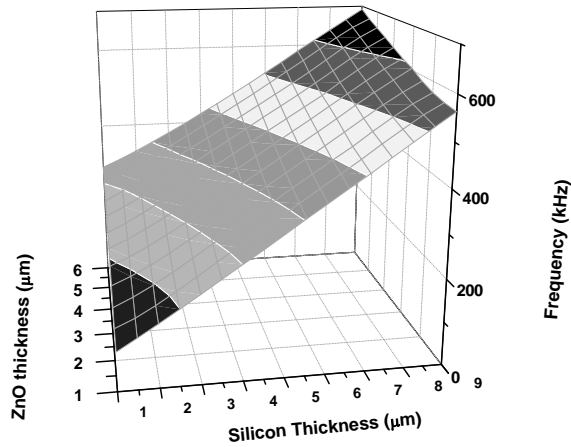
Si: Young's Modulus: 1.689e11 Pa; Poisson's ratio: 0.3; Density: 2329 kg/m³

برای اعمال شرایط مرزی، کافی است شرط جابجایی صفر برای سه جهت اصلی در یک سر تیر در نظر گرفته شود. در آنالیز مودال از شرایط مرزی اتصال کوتاه (Short-circuit) و مدار باز (Open-circuit) استفاده گردید. در آنالیز استاتیک نیروی ثابت مورد نظر، به سر آزاد تیر اعمال گردیده و شرایط مدار باز برقرار بود و در آنالیز هارمونیک، جهت مشخصه‌یابی رفتار دینامیک این سیستم از اعمال ولتاژ دینامیک به تیر بهره گرفته شد. در ابتدا آنالیز مودال بر روی این مدل جهت به دست آوردن فرکانس رزونانس و آنتی رزونانس صورت می‌گیرد. با به دست آوردن این دو مقدار، ضریب کوپلینگ الکترومکانیکی از رابطه ذکر شده به دست می‌آید. حال با تغییر ضخامت زیرلایه و یا تغییر ضخامت لایه پیزوالکتریک این سه مشخصه رفتاری ساختار تغییر می‌کنند. با رسم این تغییرات بیشترین ضریب کوپلینگ الکترومکانیکی دستگاه که بیانگر بازدهی ساختار است به دست می‌آید. در ادامه پس از انتخاب ضخامت‌های بهینه، آنالیز هارمونیک جهت مشاهده رفتار دینامیکی دستگاه بر حسب فرکانس انجام می‌گیرد. خروجی این مرحله فرکانس‌های رزونانس ساختار می‌باشد. تغییرات زاویه فاز از ۰ به ۱۸۰ و پیک‌های جابجایی سر آزاد کانتیلور در ولتاژ اعمالی (۰/۱ ولت) نشانگر این فرکانس‌ها می‌باشند. در مرحله آخر هدف بررسی رفتار استاتیکی این ساختار در حالت سنسوری است که با اعمال نیروهایی در محدوده $-10\mu N$ تا $+10\mu N$ به سر آزاد کانتیلور صورت می‌پذیرد. جهت ارزیابی مدل توسعه داده شده در این پژوهش، نتایج شبیه سازی به کمک مدل حاضر با نتایج شبیه سازی، نتایج تجربی و حل ریاضی یک کانتیلور پیزوالکتریک که در تحقیق مرجع [۱۶] گزارش شده است مقایسه شد که تطابق قابل قبولی را نشان می‌دهد.

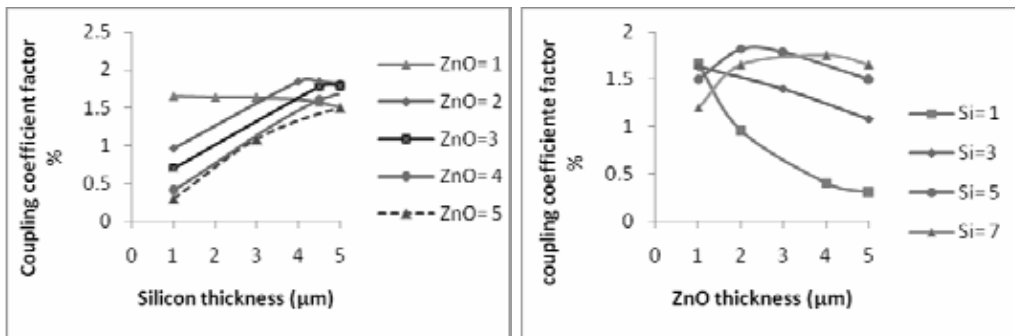
۳- نتایج و بحث

۳-۱- بهینه سازی ضخامت لایه و زیرلایه در ساختار میکروکانتیلور

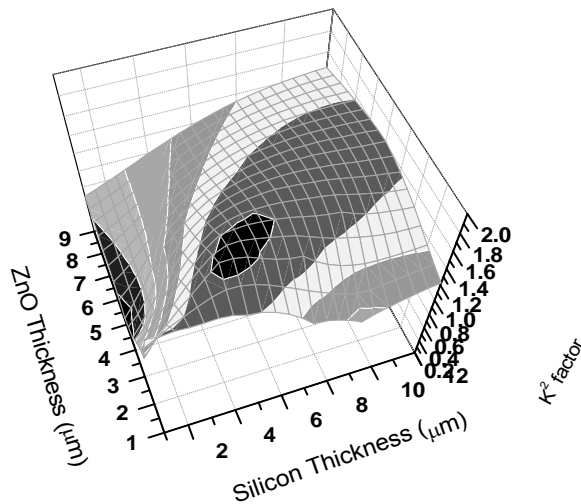
در این تحقیق به کمک آنالیز مودال، بیشترین مقدار ضریب کوپلینگ الکترومکانیکی (به عنوان تابع هدف) برای ساختار میکروکانتیلور در ضخامت‌های مختلف لایه پیزوالکتریک و زیر لایه (به عنوان متغیر) محاسبه شد. به عبارت دیگر پس از انجام آنالیز مودال در محدوده‌ی ضخامت $1\mu m$ تا $7\mu m$ برای زیر لایه سیلیکونی و محدوده ضخامت $1\mu m$ تا $5\mu m$ برای لایه اکسید روی (مطابق با جدول ۱) ضخامت‌هایی تعیین شد که در آن ضریب کوپلینگ (بازده الکترومکانیکی) برای ساختار حداکثر می‌باشد. تغییرات فرکانس رزونانس محاسبه شده بر حسب ضخامت زیر لایه و لایه اکسید روی در یک نمودار سه بعدی مطابق شکل ۲ رسم شده است. این موضوع به وضوح قابل رویت است که روند تغییر فرکانس رزونانس با افزایش ضخامت‌ها (زیر لایه و لایه اکسیدی) خطی و افزایشی می‌باشد. هر یک از دستگاه‌های پیزو الکتریک در فرکانس کاری خاصی به کار برده می‌شوند. لذا دانستن فرکانس رزونانس طراحی شده نکته‌ای است که طراح در طراحی خود و انتخاب ضخامت بهینه باید به آن توجه داشته باشد. در این پژوهش هدف پیدا کردن ضخامت بهینه برای دستیابی به بیشترین راندمان تبدیل انرژی مکانیکی به الکتریکی می‌باشد. برای این منظور روند تغییرات ضریب کوپلینگ الکترومکانیکی بر حسب ضخامت زیر لایه و لایه اکسید روی در شکل‌های ۳ و ۴ رسم شده است. همانطور که در این دو شکل دیده می‌شود، روند تغییرات ضریب کوپلینگ بر حسب ضخامت‌ها به صورت خطی نمی‌باشد. بهترین روش برای درک این رفتار آن است که نمودار تغییرات ضریب کوپلینگ بر حسب ضخامت‌ها به صورت سه بعدی ترسیم گردد. شکل ۵ این روند تغییرات را به صورت سه بعدی نشان می‌دهد. مطابق شکل ۵، صفحه تغییرات ضریب کوپلینگ در محدوده محاسباتی دارای یک ماکزیمم است. به این ترتیب به کمک آنالیز مودال مقادیر بهینه ضخامت‌ها برای رسیدن به حداکثر ضریب کوپلینگ در جدول ۳ نشان داده شده است.



شکل ۲- تغییرات فرکانس رزونانس با تغییر ضخامت سیلیکون و ضخامت اکسید روی.



شکل ۳- تغییرات ضریب کوپلینگ الکترومکانیکی با ضخامت لایه اکسید روی در ضخامت‌های مختلف زیر لایه. شکل ۴- تغییرات فاکتور کوپلینگ الکترومکانیکی با ضخامت زیر لایه سیلیکونی در ضخامت‌های مختلف لایه‌ی پیزوالکتریک.



شکل ۵- تغییرات ضریب کوپلینگ الکترومکانیکی با تغییر ضخامت سیلیکون و ضخامت اکسید روی.

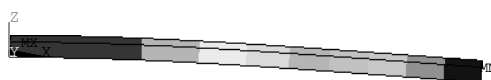
جدول ۳- ابعاد هندسی ساختار میکرو کانتیلور بهینه سازی شده.

ضخامت	عرض	طول	ابعاد لایه و زیر لایه
۴/۵ μm	۵۰ μm	۱۵۰ μm	زیر لایه سیلیکونی
۲ μm	۵۰ μm	۱۵۰ μm	لایه پیزوالکتریک اکسید روی

مهمترین مشخصه‌ی سیستم‌های پیزوالکتریک، فرکانس‌های رزونانس آنها است که در واقع بیانگر عملکرد دستگاه بر حسب زمان می‌باشد، به بیان دیگر، فرکانس‌های رزونانس یک ساختار بیانگر مشخصه‌های رفتار دینامیک آن ساختار می‌باشند. از همین رو ابتدا فرکانس‌های رزونانس در این ساختار بهینه شده محاسبه می‌گردد. مقادیر محاسبه شده در جدول ۴ آورده شده است. شکل ۶ کانتور جابجایی کانتیلور در فرکانس رزونانس اول، شکل ۷ کانتور جابجایی کانتیلور در فرکانس رزونانس دوم و شکل ۸ کانتور جابجایی در فرکانس رزونانس سوم ساختار بهینه شده را نشان می‌دهند.

جدول ۴- فرکانس‌های رزونانس میکرو کانتیلور بهینه سازی شده (Hz).

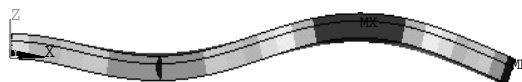
فرکانس رزونانس سوم	فرکانس رزونانس دوم	فرکانس رزونانس اول
۵۴۸۶۴۱۰	۱۹۷۳۹۰۰	۳۱۸۲۸۷



شکل ۷- کانتور جابجایی کانتیلور در فرکانس رزونانس اول.

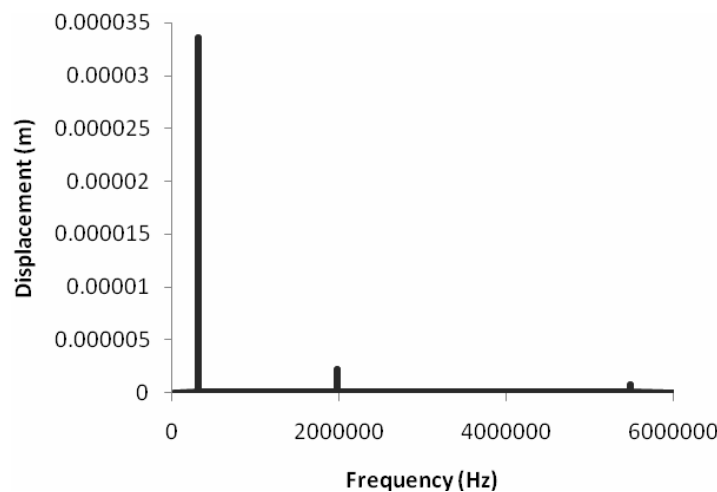


شکل ۶- کانتور جابجایی کانتیلور در فرکانس رزونانس دوم.



شکل ۸- کانتور جابجایی کانتیلور در فرکانس رزونانس سوم.

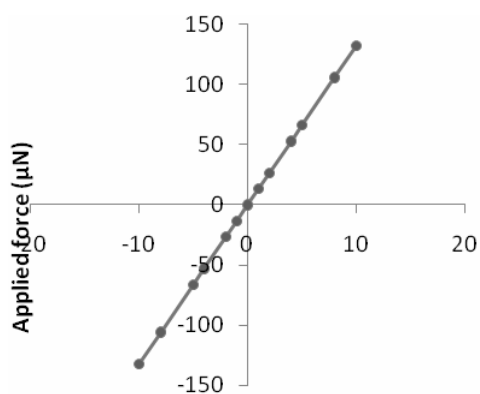
شکل ۹ رفتار دینامیکی این میکرو کانتیلور را در فرکانس‌های مختلف نشان می‌دهد. چنانکه مشاهده می‌شود رفتار این ساختار در سه ناحیه فرکانسی تشدید می‌شود که به صورت پیک دیده می‌شوند. پیک اول در حدود ۴۰۰KHz، پیک دوم نزدیک به ۲MHz و پیک سوم در حدود ۵/۵MHz است. در آزمایش‌های تجربی، مقادیر فرکانس‌های رزونانس سیستم از طریق نمودارهای جابجایی انتهای آزاد کانتیلور بر حسب فرکانس به دست می‌آید. چنین نمودارهایی را می‌توان با استفاده از انجام آنالیز هارمونیک بر روی سیستم پیزوالکتریک مورد نظر به دست آورد.



شکل ۹- جابجایی نوک کانتیلور بر حسب فرکانس وقتی ولتاژی به میزان ۰/۰۱ ولت به دو سر کانتیلور اعمال می‌شود.

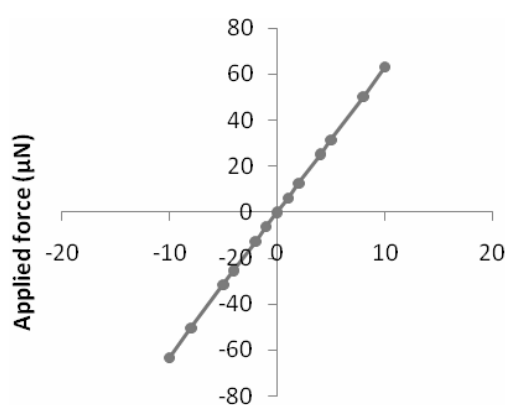
۳-۲- بررسی رفتار استاتیکی میکروکانتیلور بهینه‌سازی شده

بررسی رفتار سیستم‌های پیزوالکتریکی که تحت نیروهای استاتیک کار می‌کنند از اهمیت بالایی برخوردار است. برای بررسی رفتار استاتیکی میکروکانتیلور مورد نظر در این تحقیق (با ساختار بهینه‌سازی شده) آنالیز استاتیک با اعمال نیروهایی در محدوده $10\ \mu\text{N}$ تا $10\ \mu\text{N} +$ در انتهای آزاد کانتیلور انجام شد. نرم‌افزار انسیس در مورد مسائل پیزوالکتریک قادر به انجام تحلیل‌های غیر خطی نمی‌باشد. بنابراین در کلیه شبیه‌سازی‌هایی که توسط این نرم‌افزار تا کنون انجام گرفته است، برای دانستن محدوده‌ی نیروهای اعمالی به ساختار برای بروز رفتار خطی در آن، از پیش‌بینی‌های قابل استخراج از فرمول‌های تحلیلی موجود و یا از نتایج تجربی موجود استفاده می‌شود. در این کار از نتایج تجربی موجود برای ساختاری با ابعاد و مواد مشابه استفاده شد [۱۷]. با اعمال نیرو به یک میکروکانتیلور پیزوالکتریک، اولاً جابجایی در کانتیلور ایجاد می‌شود. ثانیاً ولتاژی در دو سر پیزوالکتریک القا می‌گردد. شکل ۱۰ جابجایی ایجاد شده در انتهای آزاد کانتیلور را بر حسب نیروی اعمالی نشان می‌دهد. شکل ۱۱ تغییرات اختلاف ولتاژ ایجاد شده در کانتیلور را با نیروی اعمالی به آن نشان می‌دهد که در واقع بیانگر پاسخ سنسوری این ساختار است. شکل ۱۲ هم اختلاف پتانسیل ایجاد شده در کانتیلور را بر حسب جابجایی ایجاد شده در نوک کانتیلور به واسطه‌ی نیروهای اعمالی نشان می‌دهد.



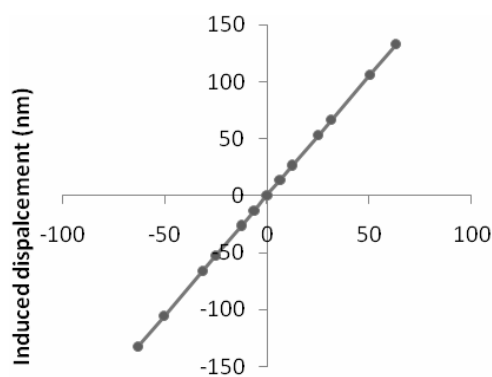
Induced voltage (mV)

شکل ۱۰- تغییرات جابجایی ایجاد شده در نوک کانتیلور با نیروی اعمالی.



Induced Displacement (nm)

شکل ۱۱- تغییرات جابجایی ایجاد شده در نوک کانتیلور با نیروی اعمالی.

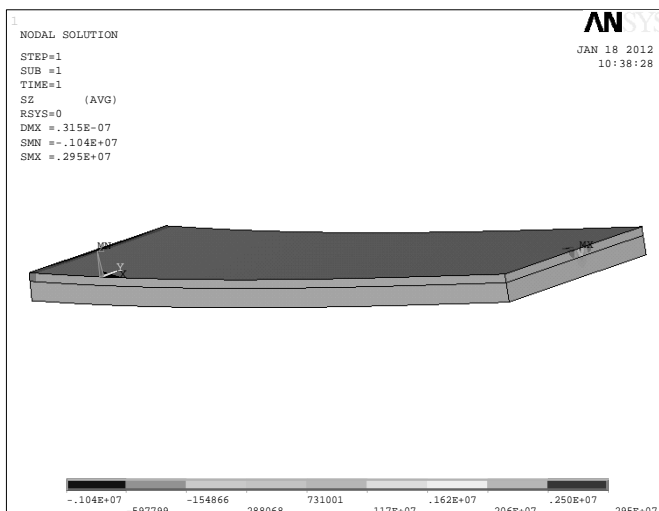


Induced voltage (mV)

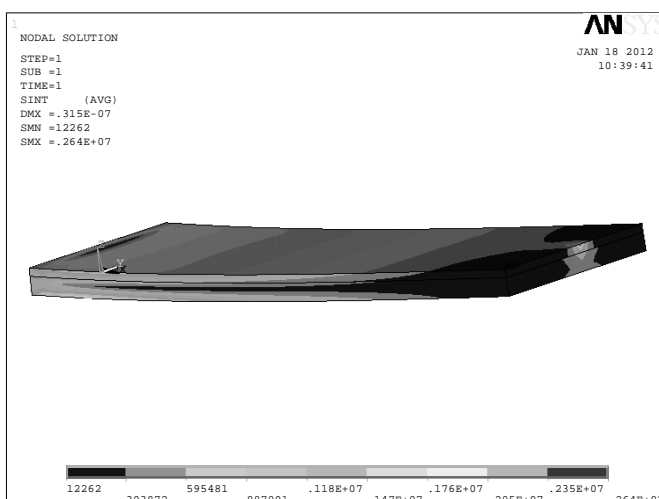
شکل ۱۲- اختلاف پتانسیل ایجاد شده در کانتیلور بر حسب جابجایی ایجاد شده در نوک کانتیلور به واسطه‌ی نیروهای اعمالی.

جهت بررسی بیشتر رفتار استاتیکی این ساختار، در حالتی که به میزان $5\ \mu\text{N}$ نیرو به انتهای آزاد کانتیلور وارد می‌شود کانتورهای جابجایی، تنش، کرنش و میدان الکتریکی ایجاد شده در این ساختار نشان داده شده است.

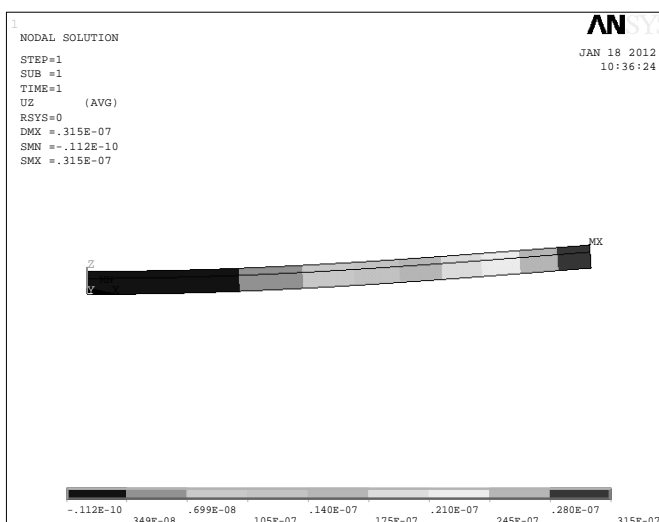
شکل ۱۳ بیانگر شدت تنش ایجاد شده در میکروکانتیلور و شکل ۱۴ شدت تنش ایجاد شده در آن را در جهت پلاریزاسیون نشان می‌دهد. در شکل ۱۵ میزان جابجایی در کانتیلور در جهت پلاریزاسیون رسم شده است.



شکل ۱۳- تنش ایجاد شده در کانتیلور در جهت پلاریزاسیون (Z).



شکل ۱۴- شدت تنش ایجاد شده در کانتیلور.



شکل ۱۵- میزان جابجایی در کانتیلور در جهت پلاریزاسیون (Z).

۴- نتیجه گیری

- شبیه سازی ساختار میکروکانتیلور اولیه با نرم افزار المان محدود انسیس با موفقیت انجام شد. در این ساختار، لایه پیزوالکتریک از جنس اکسید روی و زیرلایه از جنس سیلیکون انتخاب شد.
- بهینه سازی ساختار میکروکانتیلور مورد نظر با تغییر ضخامت لایه های پیزوالکتریک و زیر لایه اجرا شد.
- ساختار بهینه برای لایه اکسید روی به ضخامت ۲ میکرومتر و سیلیکون به ضخامت ۴/۵ میکرومتر به دست آمد که مقدار ضریب کوپلینگ الکترومکانیکی برای این ساختار ۱/۸۵ درصد می باشد.
- با بررسی رفتار دینامیکی میکروکانتیلور بهینه سازی شده، تشدید در رفتار این ساختار در فرکانس ۳۱۸۲۸۷ هرتز مشاهده می شود.
- با بررسی پاسخ سنسوری دستگاه و رفتار استاتیکی آن رابطه ای خطی بین نیروی اعمالی به انتهای آزاد کانتیلور، ولتاژ و همینطور جابجایی ایجاد شده در آن مشاهده می گردد.

مراجع

1. J. Amano, piezoelectric cantilever pressure sensor array, U. S. Patent 7032454 B2, April 2006.
2. H. Fang, J. Liu, Z. Xu, L. Dong, L. Wang, D. Chen, Bi. Cai, Y. Liu, Fabrication and performance of MEMS-based piezoelectric power generator for vibration energy harvesting, *Microelectronics Journal*, 37, 2006, 1280-1284.
3. J. Zhou, P. Li, S. Zhang, Y. Huang, P. Yang, M. Bao, G. Ruan, Self excited piezoelectric microcantilever for gas detection, *Microelectronics Engineering*, 69, 2003, 37-46.
4. H. Alik, T. J. R. Hughes, Finite Element Method for Piezoelectric Vibration, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2, 1970, 151-157.
5. S. M. Peelamedu, R. V. Dukkipati, N. G. Naganathan, Finite element approach to model and analyze piezoelectric actuators, *JSME International Journal, Series C: Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing*, 44, 2001, 476-485.
6. V. Piefort, A. Preumont, Finite Element Modeling of Piezoelectric Structures, *Active Structure Laboratory, Belgium*, 2001.
7. L. Cattafesta, J. Mathew, A. Kurdila, Modeling and Design of Piezoelectric Actuators for Fluid Flow Control, *SAE International and AIAA, Inc*, 2000.
8. Y. L. Geng, L. M. Xu., Y. Wang, Optimization of circular piezoelectric micromechanical transducer on electromechanical coupling coefficient, *China symposium on frequency control technology*, Dec 2009.
9. Q. Wang, X. Pei, Q. Wang, Sh. Jiang, Finite element analysis of a unimorph cantilever for piezoelectric energy harvesting *International Journal of Applied Electromagnetics and mechanics*, 40, 2012, 341-351.
10. C. Willberg, U. Gabbert, Development of a three-dimensional piezoelectric isogeometric finite element for smart structure applications, *Acta Mech*, 223, 2012, 1837-1850.
11. R. Weigel, D. P. Morgan, J. M. Owens, A. Ballato, K. M. Lakin, K. Hashimoto, C. C. W. Ruppel, Microwave acoustic materials, devices, and applications, *Microwave Theory and Techniques*, IEEE Transactions 2002, 738-749.
12. H. Li, Sodium Potassium Niobate-based Lead-free Piezoelectric Ceramics: Bulk and Free standing Thick Film, Ph.D., Drexel University, 144 pages, 2008.
13. B. Jaffe, W. Cook, H. Jaffe, *Piezoceramics*, Academic Press, New York, 1971.
14. J. Xie, M. Hub, S. F. Ling, H. Du, Fabrication and characterization of piezoelectric cantilever for micro transducers, *Sensors and Actuators A*, 126, 2006, 182-186.
15. C. H. Lin, M. C. Tsai., Design and fabrication of static force sensor using piezoelectric cantilever beam, Ph.D. Thesis, National Cheng Kung University, 2008.
16. C. T. Pan, Z. H. Liu, Y. C. Chen, C. F. Liu, Design and fabrication of flexible piezo-microgenerator by depositing ZnO thin films on PET substrates, *Sensors and Actuators A*, 159, 2010, 96-104.
17. T. Shibata, K. Unno, E. Makino, Y. Ito, S. Shimada, Characterization of sputtered ZnO thin film as sensor and actuator for diamond AFM probe, *Sensors and Actuators A*, 102, 2002, 106-113.