

بهینه‌سازی ساختار خازن‌های متغیر میکروالکترومکانیکی با تحریک الکتروستاتیکی به روش مهاجرت اعضاء

محمد مجیدی^۱

علی‌رضا عرفانیان^۲، پیام حیدری^۳، مهدی مجیدی^۴، مجید رشیدی^۵

چکیده

با توجه به نقش خازن‌های الکتریکی متغیر در افزایش دقت تجهیزات الکتریکی، پیشرفت روزافزونی در طراحی و ساخت آن‌ها به وجود آمده است. با وجود تمام پیشرفت‌ها، دستیابی همزمان به خازن متغیر با ولتاژ تحریک پایین، زمان نشست کوتاه، دامنه تغییرات زیاد ظرفیت الکتریکی، اندازه کوچکتر و طول عمر طولانی هنوز امری دشوار است. برای غلبه بر این محدودیت‌ها بهینه‌سازی در طراحی خازن‌ها اهمیت ویژه‌ای می‌یابد. در این مقاله، طراحی یک خازن متغیر میکروالکترومکانیکی با تحریک الکتروستاتیکی، شامل قسمت‌های مدل‌سازی، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی ساختار انجام شده است. بهینه‌سازی در ساختار با الگوریتم جدید مهاجرت اعضاء انجام شده، که برخلاف روش‌های مشتق پایه، بهینه‌ی مطلق را بدست می‌دهد. همچنین با برقراری ارتباط بین نرم‌افزارهای ANSYS و MATLAB، نرم‌افزاری تهیه شده که قابلیت انجام طراحی هر گونه ساختار خازن متغیر میکروالکترومکانیکی دو صفحه‌ای با تحریک الکتروستاتیکی را دارا است، به طوری که فقط کافی است معیارهای مورد نظر طراح از جمله بیشینه ولتاژ تحریک، خازن اولیه، و محدوده‌ی مجاز ابعاد ساختار به برنامه داده شود، تا با واگذاری بقیه فرآیند به برنامه، طراحی و ابعاد بهینه‌ی ساختار معلوم گردد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که محدوده‌ی تنظیم خازنی ۵۰٪، با مقدار ولتاژ تحریک کمتری نسبت به کارهای دیگر، بدست می‌آید.

کلید واژه

بهینه‌سازی، خازن متغیر، طراحی، الگوریتم مهاجرت اعضاء، MEMS

^۱ دانشگاه صنعتی مالک اشتر، mmajidi85@gmail.com

^۲ دانشگاه صنعتی مالک اشتر

^۳ استادیار دانشکده برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد رودهن

^۴ دانشجوی دکتری برق مخابرات، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

^۵ دانشگاه صنعتی مالک اشتر

خازن‌ها در مدارهای الکتریکی متنوعی به کار می‌روند به طوری که پارامترهای الکتریکی ویژه‌ای را کنترل می‌کنند. برخی از این پارامترها شامل تقویت کننده‌های با نویز پایین، مولدهای فرکانس هارمونیک، و کنترل کننده‌های فرکانس هستند [۱]. بسیاری از سیستم‌های مخابراتی جدید به ضریب کیفیت^۴ بالا، پایداری مناسب، و رزوناتورهای کنترل شده با ولتاژ (VCOs) با محدوده‌ی تنظیم بزرگ و با نویز کم‌فاز نیازمند هستند. در این میان خازن‌های متغیر که از اجزای مهم سیستم‌های مخابراتی هستند به طور رایج به وسیله خازن‌های دیودی تأمین می‌شوند. خازن‌های دیودی به دلیل ضریب کیفیت بالا، اشغال فضای زیاد بر روی میکروتراشه و هزینه‌ی بالای ساخت دارای محدودیت‌هایی در بکارگیری هستند [۲]، بنابراین اغلب در مدارها از آن‌ها به صورت قطعات خارجی استفاده می‌شود. خصوصاً ضریب کیفیت خازن‌های متغیر مرسوم ساخته شده با سیلیکون، گالیوم آرسناید p-n، یا خازن‌های پیوندی حد شاتکی که در کاربردهای تنظیم جریان به کار می‌روند، برای قطعات با نویز کم فاز کافی نیستند [۳]. بنابراین برای تأمین خازن با ضریب کیفیت بالا و همچنین کاهش هزینه‌ها از خازن‌های ساخته شده به روش میکروماشین کاری استفاده شده است. در سال‌های اخیر تکنولوژی سیستم‌های میکروالکترومکانیکی پیشرفت قابل توجهی کرده است [۴] و از آن در ساخت قطعات مختلف الکترومکانیکی، به ویژه قطعات الکتریکی مورد استفاده در مدارات فرکانس رادیویی، استفاده می‌شود [۵]. تکنولوژی میکروماشین کاری با استفاده از روش‌های متنوع در ساخت قطعات میکرومتری مختلف، ما را قادر به ساخت صفحه‌های متحرکی می‌سازد که نیاز به ولتاژ تحریک کمی دارند و می‌توانند در سیستم‌های فرکانس رادیویی برای کاربردهای تنظیمی و سوئیچی به کار روند [۶]. خازن‌های متغیر میکروالکترومکانیکی در مقایسه با خازن‌های متغیر نیمه هادی دارای تلفات و توان مصرفی کمتر و محدوده‌ی تنظیم خازنی بزرگتری هستند [۷]. همچنین به علت پایین بودن مقدار ولتاژ تحریک و زیاد بودن ضریب کیفیت این خازن‌ها، می‌توان از آن‌ها در مصارفی هم‌چون میکروماهواره‌ها و وسایل ارتباط بی‌سیم استفاده نمود [۸ و ۹]. نحوه‌ی عملکرد خازن‌های میکروالکترومکانیکی متغیر بسیار ساده است این ابزارها از دو صفحه، یکی ثابت و دیگری متحرک تشکیل شده‌اند. با اعمال ولتاژ DC بین دو صفحه، نیروی الکتروستاتیکی بین آن‌ها به وجود می‌آید. با روش‌های مختلفی از جمله تغییر در فاصله هوایی بین دو صفحه، تغییر سطح هم‌پوشانی صفحات، یا تغییر دی‌الکتریک بین صفحات، خازن متغیر بدست

می‌آید. در حالت اول با تغییر ولتاژ DC فاصله هوایی بین دو صفحه تغییر می‌کند و در نتیجه ظرفیت خازن تغییر می‌یابد که در این مقاله از این نوع خازن‌ها استفاده شده است.

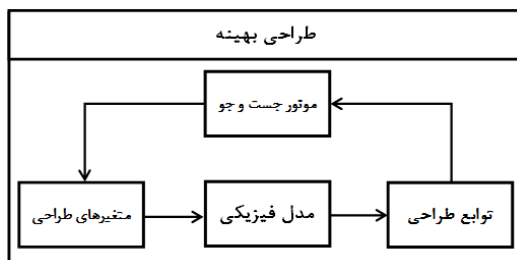
با وجود تمام پیشرفت‌ها در این زمینه دستیابی هم‌زمان به خازن متغیر با ولتاژ تحریک پایین، زمان نشست کوتاه، دامنه تغییرات بالای ظرفیت الکتریکی، اندازه کوچکتر و طول عمر طولانی هنوز امری دشوار است. برای مثال هر چه ابعاد المان‌های الکتریکی به کار رفته بر روی میکروتراشه بزرگتر باشد، تعداد قطعات تولیدی روی هر ویفر سیلیکون کاهش می‌یابد و در نتیجه باعث کاهش تعداد تولید و افزایش قیمت تمام شده می‌گردد. بنابراین بزرگتر شدن ابعاد خازن، و به سبب آن افزایش ظرفیت خازنی، با کاهش هزینه‌ها در تضاد است. همچنین برای کاهش ولتاژ تحریک لازم است ساختار انعطاف‌پذیرتر باشد در نتیجه، میزان نرمی ساختار افزایش می‌یابد و در ازای آن فرکانس طبیعی سیستم کاهش می‌یابد، بنابراین زمان نشست صفحه‌ی بالایی با افزایش روبرو می‌شود. پس ولتاژ تحریک کمتر با زمان نشست سریع‌تر در تضاد با یکدیگرند. در نهایت برای رسیدن به یک طرح مناسب که تمام پارامترها مقدار مناسبی داشته باشند، نیاز به بهینه‌سازی مشخص می‌گردد. در نتیجه با در نظر گرفتن تمام پارامترها، برای رسیدن به یک تعادل در طراحی، بهینه‌سازی نقش مهمی ایفا می‌کند. با طراحی بهینه یک ابزار میکروالکترومکانیکی در زمان ساخت آن و در هزینه‌ها کاهش چشم‌گیری خواهیم داشت. چون با حذف روش‌های صحیح و خطا در فرآیند ساخت، با تعداد آزمایش کمتری به نتیجه‌ی مطلوب خواهیم رسید [۱۰]. به این ترتیب روش‌های بهینه‌سازی، در این مساله می‌تواند متغیرهای طراحی را به گونه‌ای انتخاب کند که معیارهای کارایی که در تضاد با یکدیگرند (یعنی با بهبود یک معیار، معیار دیگری دچار اختلال می‌گردد) در بهترین حالت خود قرار گیرند. با توجه به مطالعه‌ی ما در منابع و مقاله‌ها، بهینه‌سازی‌هایی که تا به حال انجام گرفته است، مبتنی بر نرم‌افزارهای CoventorWare و نرم‌افزارهای مشابه است که به روش المان محدود انجام می‌گیرد [۱۱ و ۱۲]. روش بهینه‌سازی در این نرم‌افزارها بسیار محدود می‌باشد به عنوان مثال در نرم‌افزار CoventorWare از روش تاگوچی استفاده شده است [۱۳] که دارای اشکال‌هایی است [۱۴]. مثلاً در ساختارهایی که تعداد متغیرها زیاد است، معلوم نبودن این که کدام پارامتر بیشترین تاثیر را در عملکرد ساختار می‌گذارد، از جمله این اشکال‌ها است یا اینکه استفاده از ترکیب متنوعی از تمام متغیرها در این روش جواب‌گو نمی‌باشد. بنابراین برای غلبه بر این مشکل، در اینجا از ترکیب نرم‌افزارهای ANSYS و MATLAB استفاده شده است که به راحتی در دسترس می‌باشند.

در این مقاله، طراحی یک خازن متغیر میکروالکترومکانیکی با تحریک الکتروستاتیکی انجام شده است به طوری که شامل قسمت‌های مدل‌سازی، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی ساختار است. در اینجا

برای بهینه‌سازی خازن متغیر طراحی شده از روش جدید بهینه‌سازی، یعنی الگوریتم مهاجرت اعضا^۵ استفاده شده است، که بر خلاف روش‌های مشتق پایه، بهینه‌ی مطلق را بدست می‌دهد. با استفاده از این الگوریتم می‌توان برای خازن متغیر، پارامترهای مورد نیاز در طراحی را به بهترین نحو بدست آورد. علاوه بر این می‌توان از این الگوریتم در طراحی انواع ساختارهای میکروالکترومکانیکی نیز استفاده نمود. در این مقاله کدنویسی دقیقی در نرم‌افزارهای ANSYS و MATLAB انجام شده است که قابلیت انجام طراحی هر گونه ساختار خازن متغیر میکروالکترومکانیکی از نوع دو صفحه‌ای با تحریک الکتروستاتیکی را دارا است، به این صورت که فقط کافی است معیارهای مورد نظر طراح از جمله ماکزیمم ولتاژ تحریک، مقدار خازن اولیه، و محدوده‌ی مجاز ابعاد کلی خازن (با توجه به محدودیت‌های مربوط به اندازه‌ی ساختار بر روی میکروتراشه‌های الکترونیکی) به برنامه داده شود، تا با واگذاری بقیه فرآیند به برنامه، طراحی و ابعاد بهینه‌ی ساختار معلوم گردد. برای مشخص شدن توانمندی‌های روش طراحی و کدهای تدوین شده برای ولتاژ تحریک ۵ ولت، ماکزیمم ابعاد صفحه‌ی متحرک بالایی، ۱۰۰۰ میکرومتر، ماکزیمم ابعاد طولی فنر برابر ۴۰۰ میکرومتر، و خازن اولیه‌ی ۳ پیکوفاراد طرح بهینه شده است. در نتیجه خازنی با ابعاد $2 \times 824 \times 824$ میکرومتر مکعب و طول فنر برابر ۱۰۰ میکرومتر و عرض ۲۴ میکرومتر بدست آمده است که با تغییر ولتاژ از ۳ تا ۵ ولت، مقدار ظرفیت خازنی آن بین ۳ تا ۴/۴۷ پیکوفاراد تغییر می‌یابد.

طراحی

در این مقاله یک خازن متغیر میکروالکترومکانیکی به گونه‌ای طراحی شده است که در مقایسه با خازن‌های میکروالکترومکانیکی موجود، دارای ساختار ساده‌ای است و برای ساخت آن می‌توان از روش‌های متداول میکروماشین‌کاری استفاده نمود. مبنای اصلی طراحی خازن‌های متغیر، مشخصات الکتریکی است که شرکت‌های تولید کننده از ما انتظار دارند. با توجه به کاربردهای فراوان خازن متغیر در مدارات الکترونیکی مخصوصاً مدارات RF، طرح‌های مختلف این خازن‌ها با مشخصات الکتریکی مختلف مورد نیاز هستند. برای انجام طراحی بهینه‌ی خازن متغیر میکروالکترومکانیکی با تحریک الکتروستاتیکی لازم است چهار بخش اصلی شامل مدل رفتار فیزیکی، متغیرهای طراحی، توابع طراحی، و هسته‌ی بهینه‌سازی مشخص شوند که در ادامه به توضیح آن‌ها می‌پردازیم. در شکل ۱ چرخه‌ی طراحی بهینه نشان داده شده است.



شکل ۱. نمایش چرخه طراحی بهینه

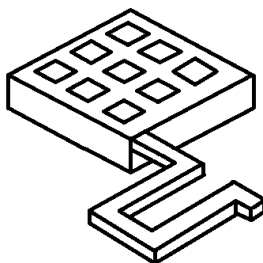
متغیرهای طراحی

خازن متغیر میکروالکترومکانیکی یک قطعه‌ی متحرک الکتریکی است. بنابراین برای شروع طراحی باید روابط حاکم بین دو حوزه‌ی مکانیک (فیزیک) مساله و حوزه‌ی الکترونیک مساله مشخص گردد. بنابراین اولین گام در طراحی مناسب یک خازن متغیر میکروالکترومکانیکی، مشخص نمودن متغیرهای طراحی است. در این قسمت ساختار فیزیکی خازن متغیر و متغیرهای طراحی مورد بررسی قرار می‌گیرد تا مشخص گردد که با تغییر هر کدام از قسمت‌های ساختار، چه تغییری در ظرفیت خازن ایجاد می‌شود.

ساختار خازن متغیر میکروالکترومکانیکی

خازن‌های متغیر میکروالکترومکانیکی دارای اشکال مختلف دو صفحه‌ای و سه صفحه‌ای هستند [۱۵و۱۶]. در این مقاله خازن میکروالکترومکانیکی از دو صفحه‌ی رسانا از جنس آلومینیوم، یکی ثابت و دیگری متحرک تشکیل شده است. با اعمال ولتاژ DC بین دو صفحه، نیروی الکتروستاتیکی بین آن‌ها به وجود می‌آید. با تغییر ولتاژ DC، فاصله هوایی بین دو صفحه تغییر می‌کند و در نتیجه ظرفیت خازن تغییر می‌یابد. روش‌های تحریک صفحه‌ی بالایی در تکنولوژی MEMS بسیار متنوع می‌باشند به طوری تحریک الکتروستاتیکی و تحریک پیزوالکتریک دو روش مختلف تحریک می‌باشند که در اینجا از تحریک الکتروستاتیکی استفاده شده است. روش تحریک الکتروستاتیک در مقایسه با روش تحریک پیزوالکتریک با وجود دارا بودن توان کم مصرفی و سرعت پاسخ بالا از نظر ساخت هم بسیار ساده‌تر از روش تحریک پیزوالکتریک است و با روش‌های میکروماشین‌کاری رایج به سادگی قابل تولید است [۱۷]. به دلیل متقارن بودن طرح ساختار، و برای کاهش زمان شبیه‌سازی توسط ANSYS، ساختار یک چهارم آن را بررسی می‌کنیم. ساختار یک

چهارم صفحه‌ی متحرک بالایی یک خازن متغیر میکروالکترومکانیکی در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. نمایش ساختار یک چهارم از یک خازن متغیر میکروالکترومکانیکی

ابعاد میکرو صفحه

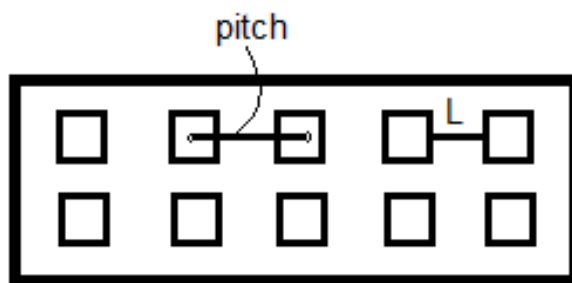
میکرو صفحه بصورت مربعی شکل است و هر چه ابعاد آن بزرگتر گردد، مقدار خازن اولیه بزرگتر می‌گردد. اما باید توجه داشت که برای استفاده‌ی خازن متغیر در کاربردهای گوناگون، به علت محدودیت فضای قرارگیری قطعات الکتریکی، ما دارای محدودیت‌های ابعادی هستیم. همچنین با بزرگتر شدن ابعاد این صفحه، ساخت آن نیز به دلیل مشکلات ناشی از معلق‌سازی، و حذف لایه‌ی قربانی زیر آن، دشوارتر می‌گردد. چون مقدار خازن اولیه ۳ pF انتخاب شده است، با توجه به رابطه‌ی ساده‌ی (۱)، و اینکه لایه دی‌الکتریک هوا می‌باشد، و فاصله هوایی برابر $2 \mu\text{m}$ ، مقدار اندازه‌ی میکرو صفحه باید برابر $824 \mu\text{m}$ باشد.

$$C = k \varepsilon_0 \frac{A}{x} \quad (1)$$

در این رابطه $k=1$ ، $\varepsilon_0 = 8.85415 \times 10^{-12}$ ، A برابر مساحت موثر میکرو صفحه، و x برابر فاصله‌ی هوایی بین دو صفحه است. برای کاهش تنش پسماند و استهلاک، و امکان سونش لایه قربانی، حفره‌هایی بر روی میکرو صفحه تعبیه شده است. با وجود این مزایا به دلیل کاهش سطح موثر خازن، در ادامه به بررسی اثرات آن می‌پردازیم.

حفره‌ها

برای کاهش استهلاک خازن متحرک حفره‌هایی بر روی آن تعبیه شده است. همچنین این حفره‌ها باعث سهولت در عمل آزادسازی صفحه‌ی متحرک در فرآیند میکروماشین‌کاری می‌شود. در بسیاری از سوئیچ‌های میکروالکترومکانیکی و خازن‌های متغیر، به منظور کاهش نوسانات و افزایش سرعت سوئیچ میکروالکترومکانیکی به کمک کاهش استهلاک، حفره‌هایی را با قطر کوچک ۳-۸ میکرومتر در باریکه ایجاد می‌کنند که در شکل ۳ نشان داده شده است. این حفره‌ها سبب کاهش میرایی لایه‌ی فیلم می‌شود. مساحت ناحیه حفره‌ها می‌تواند تا حداکثر ۶۰٪ کل مساحت سطح ساختار MEMS را شامل شود. در مقاله [۱۸] ثابت شده است که با به وجود آوردن حفره‌ها در لایه، خواص مکانیکی لایه تغییر می‌کند اما رفتار نیروی الکتروستاتیکی لایه به خاطر وجود اثرات میدان‌های لبه در لبه‌های حفره‌ها با حالت قبل از ایجاد حفره‌ها تقریباً برابر است. الگوی ایجاد سوراخ توسط راندمان لیگامنت، $\mu = L / \text{pitch}$ ، مشخص می‌شوند که برابر نسبت عرض اتصال باقی‌مانده به گام نمونه است.



شکل ۳. نمایش تعداد حفره‌های ساختار

حفره‌ها، مقداری از تنش پسماند در باریکه را آزاد می‌کنند و مدول یانگ ساختار MEMS را کاهش می‌دهند. این نتیجه با استفاده از مدل سه بعدی مکانیکی ارائه شده توسط سنتوریا و همکارانش بدست آمده است [۱۸]. کاهش تنش پسماند تقریباً برابر است با:

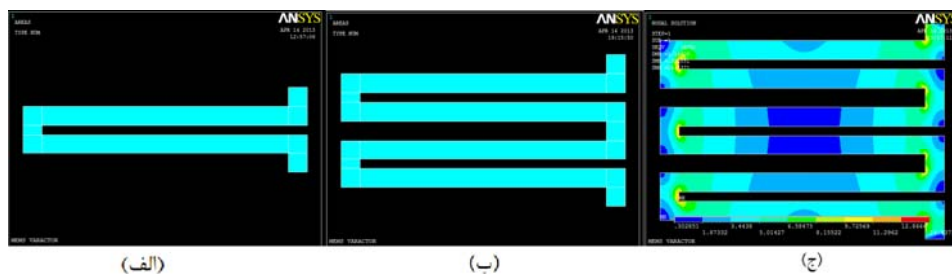
$$\sigma = (1 - \mu) \sigma_0 \quad (2)$$

که σ_0 تنش پسماند در باریکه بدون حفره می‌باشد. در صفحه‌ی حفره‌داری با $\mu = 0.625$ ، مادول یانگ در حدود ۲۵ درصد کاهش می‌یابد. حفره‌ها موجب کاهش جرم باریکه می‌شوند، در نتیجه فرکانس تشدید مکانیکی بیشتر می‌گردد. اگر قطر حفره‌ها کوچک باشد، اثر حفره‌ها روی خازن حالت بالا، ناچیز است. علت این امر دربرگیری ناحیه سوراخ‌ها توسط میدان لبه می‌باشد. بنابراین،

نیروی الکترواستاتیکی توسط چگالی حفره تحت تاثیر قرار نمی‌گیرند. از طرف دیگر، حفره‌ها روی خازن حالت پایین اثر می‌گذارند و موجب کاهش نسبت خازنی می‌شود.

ابعاد و شکل فنرها

در طراحی خازن متغیر انتخاب نوع فنر و طول و عرض آن بسیار حائز اهمیت است زیرا که هر چه طول آن بیشتر و عرض آن کمتر باشد، میزان نرمی ساختار افزایش می‌یابد و در نتیجه ماکزیمم جابجایی صفحه‌ی بالایی، افزایش می‌یابد. همچنین به علت محدودیت در فضای قرارگیری خازن متغیر، نمی‌توان طول فنر را به مقدار زیادی افزایش داد. در این طراحی از چهار فنر مشابه که به صورت U شکل هستند استفاده شده است. کدنویسی که در نرم‌افزار ANSYS انجام شده است، قابلیت این را دارد که تعداد فنرها را برای تنظیم مقدار سختی فنر، کم و زیاد کند تا مقدار مناسب مشخص گردد. در شکل ۴ انواع فنرها نشان داده شده است.



شکل ۴. انواع فنرها: (الف) تک فنر، (ب) دو فنر، (ج) سه فنر به همراه تحلیل مودال در ANSYS

ضخامت ساختار

از دیگر متغیرهای طراحی ضخامت ساختار می‌باشد. در طراحی‌های مختلف برای داشتن کنترل روی فرکانس طبیعی و همچنین سهولت در ساختن میکروخازن به روش میکروماشین‌کاری، ضخامت فنر با ضخامت صفحه‌ی بالایی متفاوت نیست [۱۹]. با افزایش ضخامت ساختار، جرم آن بصورت خطی، و ثابت فنر بصورت توان سوم افزایش می‌یابد. در نتیجه فرکانس طبیعی سیستم نیز افزایش می‌یابد. با افزایش فرکانس طبیعی سیستم، زمان نشست کاهش می‌یابد و علاوه بر آن سبب افزایش ولتاژ تحریک می‌گردد. بنابراین باید توجه داشت که به علت محدودیت ولتاژ تحریک،

نمی‌توان ضخامت ساختار را از حدی (مثلا ۱۰ میکرومتر) بیشتر و به دلیل مقاومت در برابر تنش ناشی از ضربه از حدی (مثلا ۲ میکرومتر) کمتر نمود.

فاصله‌ی هوایی

یکی دیگر از متغیرهای طراحی فاصله‌ی هوایی است به طوری که با افزایش آن، مقدار ظرفیت خازنی کاهش می‌یابد. همچنین با توجه به رابطه‌ی (۳)، فاصله هوایی بر روی ضریب میرایی سیستم نیز موثر است [۲۰].

$$B = \frac{0.4217\mu}{d} \cdot \frac{L^2}{Tx^3} \cdot M \quad (3)$$

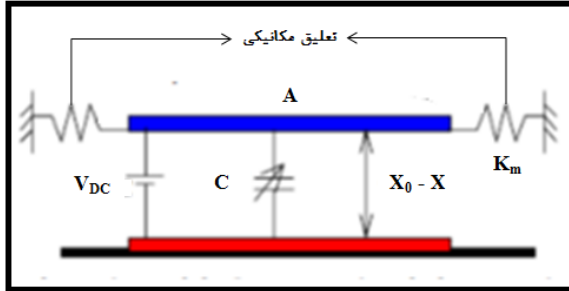
به طوری که d برابر چگالی جرمی، T برابر ضخامت صفحه‌ی متحرک بالایی، x برابر فاصله هوایی، L برابر طول هر حفره، μ برابر چسبندگی گاز، و M برابر جرم صفحه‌ی بالایی می‌باشد. در طراحی‌ها مقدار فاصله هوایی با توجه به ولتاژ تحریک (یا به صورت معادل ولتاژ متوقف‌کنندگی) مشخص می‌گردد.

توابع طراحی

همیشه در طراحی ساختارها، پارامترها و توابعی وجود دارند که حدودی را برای تعیین متغیرهای طراحی مشخص می‌کنند. این حدود با توجه به شرایط مورد نیاز برای ساختارهای گوناگون، متفاوت هستند و با توجه به کاربرد آن‌ها در زمینه‌های گوناگون، تعیین می‌گردند. در زیر این توابع طراحی، برای طراحی خازن متغیر میکروالکترومکانیکی آورده شده‌اند.

ولتاژ متوقف‌کنندگی

در شکل ۵ ساختار خازن متغیر دو صفحه‌ای و سیستم تعلیق آن نشان داده شده است.



شکل ۵. ساختار خازن متغیر دو صفحه‌ای و سیستم تعلیق آن

در ابتدا ولتاژ اولیه V_{DC} بین دو صفحه اعمال می‌شود. در حالتی که ولتاژ اولیه برابر $V_{DC} = 0$ است، فاصله‌ی بین دو صفحه برابر x_0 است. اما با اعمال ولتاژ V_{DC} مخالف صفر به سیستم، فاصله‌ی بین دو صفحه برابر $x - x_0$ می‌گردد. با صرف نظر کردن از خازن‌های حاشیه‌ای بین دو صفحه مقدار خازن C برابر است با [۲۱]:

$$C = \frac{\epsilon A}{(X_0 - X)} \quad (۴)$$

با اعمال ولتاژ V_{DC} نیروی الکتروستاتیکی F_e بین دو صفحه ایجاد می‌شود:

$$F_e = \frac{1}{2} \frac{\partial C}{\partial X} V_{DC}^2 = \frac{1}{2} \frac{C V_{DC}^2}{(X_0 - X)} \quad (۵)$$

با اعمال نیروی الکتروستاتیکی ثابت فنریت منفی ناشی از نیروی الکترواستاتیکی k_e برابر می‌شود با:

$$K_e = \left| \frac{\partial F_e}{\partial X} \right| = \frac{C V_{DC}^2}{(X_0 - X)^2} \quad (۶)$$

تعلیق مکانیکی صفحه‌ی بالایی با ثابت فنر k_m انجام می‌گیرد. با جابجایی صفحه‌ی بالایی، سیستم تعلیق نیروی بازدارنده‌ی F_m را تولید می‌نماید. دامنه‌ی F_m وابسته به میزان جابجایی x است به طوری که $F_m = k_m x$ است. در حالت تعادل مقدار F_e با F_m برابر است:

$$K_m X = \frac{C V_{DC}^2}{2(X_0 - X)} = \frac{1}{2} K_e (X_0 - X) \quad (۷)$$

در نتیجه k_e بر حسب k_m بصورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$K_e = \frac{2K_m X}{(X_0 - X)} \quad (۸)$$

در این رابطه اگر $x = x_0/3$ باشد $k_e = k_m$ می‌گردد. مقدار ولتاژ V_{DC} ی در $x = x_0/3$ را ولتاژ متوقف‌کنندگی می‌نامند که آن را با $v_{pull-in}$ نمایش می‌دهند:

$$v_{pull-in} = \sqrt{\frac{8KX_0^3}{27\varepsilon A}} \quad (۹)$$

با بیشتر شدن مقدار ولتاژ V_{DC} از میزان بحرانی $v_{pull-in}$ ، به دلیل ناپایدار شدن سیستم، و اینکه ثابت فنر مکانیکی دیگر قادر به تامین نیروی باز دارنده‌ی کافی برای نگهداری صفحه‌ی بالایی نیست، صفحه‌ی بالایی به روی صفحه‌ی پایینی می‌افتد.

ماکزیمم تنش ساختار

یکی از مهمترین خواص مکانیکی مواد، مقدار تحمل ماکزیمم تنش است. چون اگر تنش‌ی که به ساختار ماده وارد می‌شود، از مقدار تنش ماکزیممی که ماده می‌تواند تحمل کند بیشتر گردد، ساختار شکسته می‌شود. وقتی صفحه‌ی متحرک بالایی بیشترین جابجایی خود را دارد، بیشترین تنش به فنرها وارد می‌گردد. علاوه بر این در اثر ضرباتی که به طور معمول به ساختار وارد می‌شود تنش‌های شدیدی توسط ساختار باید تحمل شود. در این طراحی جنس صفحه‌ی متحرک بالایی و فنرها از آلومینیوم است که ماکزیمم تنش قابل تحمل آن برابر ۱۱۰ مگا پاسکال است. خواص فیزیکی آلومینیوم در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. خواص فیزیکی آلومینیوم

ویژگی فیزیکی	نماد	مقدار	تبدیل
مدول یانگ	E	۱۶۰ [Gpa]	۱۶۰×۱۰^۳ [$\text{kg} \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$]
چگالی	ρ	۲.۳۳ [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$]	۲.۳۳×۱۰^{-۱۵} [$\text{g} \cdot \mu\text{m}^{-3}$]
نسبت پواسون	ν	—	۰.۲۲

خازن اولیه

یکی از مهم‌ترین پارامترهایی که در بحث خازن متغیر وجود دارد، مقدار خازن اولیه است. با توجه به کاربرد خازن متغیر در سیستم‌های مختلف، خازن اولیه می‌تواند دارای مقادیر متفاوتی باشد. مقدار خازن اولیه، مشخص‌کننده‌ی محدوده‌ی ابعاد میکروصفحه است.

محدوده‌ی تغییرات خازنی

به اختلاف بین حداکثر و حداقل مقدار خازن متغیر، محدوده‌ی تغییرات خازن می‌گویند. با توجه به اینکه در VCOها، شیفتهنده‌های فازی و غیره، از این خاصیت خازن‌های متغیر استفاده می‌شود، بنابراین یک پارامتر اساسی محسوب می‌گردد. محدوده‌ی تغییرات خازنی، TR، از رابطه‌ی (۱۰) بدست می‌آید.

$$TR = \frac{C_2 - C_1}{C_1} \times 100\% \quad (10)$$

در این رابطه C_1 کمترین مقدار خازنی و C_2 بیشترین مقدار خازنی است. محدوده‌ی مورد نظر برای ولتاژ تحریک (یا به صورت معادل ولتاژ متوقف‌کنندگی)، مقدار خازن اولیه، و محدوده‌ی تغییرات خازنی برای کاربردهای مختلف، توسط شرکت‌های تولیدکننده‌ی قطعات مشخص می‌گردد.

زمان نشست

در میکروساختارهایی که دارای یک قسمت معلق هستند، و تحریک به آنجا اعمال می‌گردد، زمان نشست ساختار متحرک بسیار با اهمیت است. هر چه زمان نشست کمتر باشد، پایداری خروجی سیستم نیز بیشتر می‌شود. زمان نشست از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$T_s = \frac{4}{\zeta \omega_n} = \frac{4}{\zeta (2\pi f_n)} \quad (11)$$

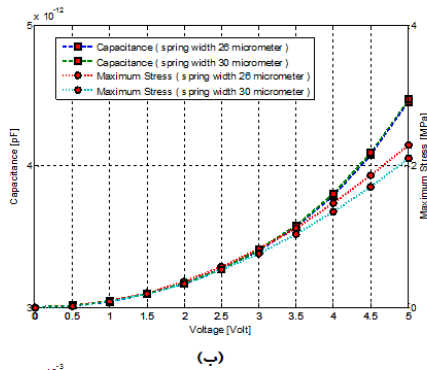
به طوری که f_n برابر فرکانس طبیعی و ζ برابر نسبت میرایی است و از رابطه‌ی (۱۲) بدست می‌آید:

$$\zeta = \frac{B}{2\omega_n M} \quad (12)$$

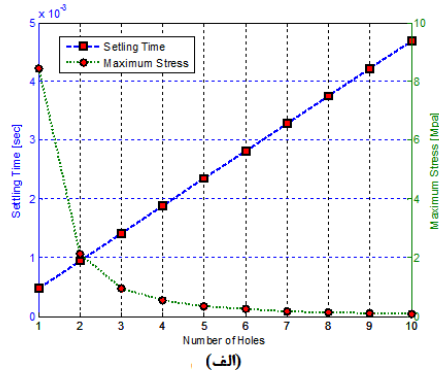
در رابطه‌ی (۱۲)، B برابر ضریب میرایی، و M برابر جرم صفحه‌ی بالایی است.

آنالیز حساسیت

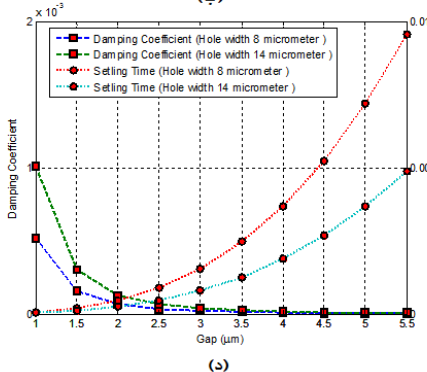
قبل از انجام فرآیند بهینه‌سازی ساختار و برای اطمینان از صحیح بودن مدل‌سازی و مش‌بندی در این مرحله با ایجاد تغییرات در اندازه‌ی طول فنر، اندازه‌ی طول صفحه‌ی بالایی، تغییر تعداد حفره‌ها، و تغییر ضخامت صفحه‌ی بالایی و فنرهای متصل به آن، در گام‌های مختلف شبیه‌سازی انجام شده است. به طوری که ولتاژ تحریک بین صفر تا ۵ ولت، فاصله‌ی هوایی بین ۱ تا ۵.۵ میکرومتر، طول هر حفره بین ۵ تا ۱۵ میکرومتر، عرض فنر بین ۱۰ تا ۳۰ میکرومتر تغییر می‌کند در حالی که طول صفحه‌ی متحرک برابر ۸۲۴ میکرومتر در نظر گرفته شده است. همان‌گونه که در شکل ۶ الف نشان داده شده است با ایجاد حفره‌ها بر روی ساختار صفحه‌ی بالایی، ماکزیمم تنش بصورت نمایی کاهش و زمان نشست افزایش می‌یابد. با ایجاد حفره‌ها بر روی صفحه‌ی متحرک بالایی، با حرکت صفحه‌ی بالایی، هوا به راحتی می‌تواند از بین سوراخ‌ها عبور کند و در نتیجه نیروی مقاومتی هوا در برابر حرکت صفحه به میزان زیادی کاهش می‌یابد. در نتیجه صفحه‌ی متحرک بالایی سریع‌تر و راحت‌تر حرکت می‌کند. بنابراین در اصطلاح می‌گویند که به دلیل ایجاد حفره‌ها، استهلاک کاهش پیدا کرده است.



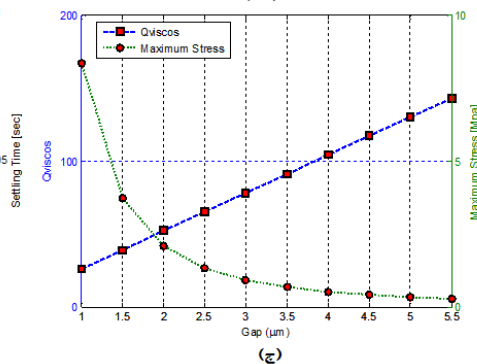
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۶. نتایج آنالیز حساسیت تغییرات مقادیر متغیرهای طراحی در خازن متغیر میکروالکترومکانیکی، (الف) تغییرات زمان نشست و تغییرات ماکزیمم تنش بر حسب تغییرات تعداد حفره‌ها، (ب) تغییرات ظرفیت خازنی و تغییرات ماکزیمم تنش بر حسب تغییرات ولتاژ تحریک، (ج) تغییرات Q_{viscos} و تغییرات ماکزیمم تنش بر حسب تغییرات فاصله‌ی هوایی، (د) تغییرات ضریب میرایی و تغییرات زمان نشست بر حسب تغییرات در فاصله هوایی.

بنابراین صفحه‌ی متحرک بالایی نوسانات بیشتری می‌کند تا به حالت سکون برسد. پس در نتیجه زمان نشست صفحه‌ی متحرک افزایش پیدا می‌کند. تعداد حفره‌هایی که در شکل نشان داده شده است، نمایانگر تعداد حفره‌ها در عرض خازن است. یعنی اگر مثلاً تعداد برابر ۸ نشان داده شده است، در کل صفحه‌ی بالایی، تعداد حفره‌ها برابر $8 \times 8 = 64$ است. بنابراین از نمودار مشخص است که با ایجاد تغییر در تعداد حفره‌ها، ماکزیمم تنش ساختار و زمان نشست آن در تضاد با یکدیگر عمل می‌کنند.

در شکل ۶ ب، نمودار C-V خازن متغیر میکروالکترومکانیکی بر حسب تغییر در ولتاژ تحریک از صفر تا ۵ ولت، و تنش متناظر با حرکت صفحه‌ی متحرک آورده شده است. همان‌طوری که از نمودار پیداست، با افزایش ولتاژ تحریک، تا قبل از رسیدن به ولتاژ متوقف‌کنندگی، مقدار ظرفیت

خازنی و مقدار تنش افزایش می‌یابد. افزایش ظرفیت خازنی مناسب، و افزایش تنش نامناسب است. پس این دو پارامتر با تغییر ولتاژ تحریک در تناقض با یکدیگر رفتار می‌کنند. همان‌طوری که از نمودار شکل ۶ ج پیداست، با افزایش فاصله هوایی Q_{viscos} به صورت نمایی کاهش و ماکزیمم تنش به صورت خطی افزایش می‌یابد. بنابراین با افزایش فاصله هوایی، ماکزیمم تنش و Q_{viscos} در تضاد با یکدیگر تغییر می‌کنند.

در شکل ۶ د، با افزایش فاصله هوایی ضریب میرایی به صورت نمایی کاهش می‌یابد اما در عوض زمان نشست ساختار به صورت نمایی افزایش می‌یابد. در رابطه‌ی (۳) با افزایش فاصله‌ی هوایی، ضریب میرایی به صورت درجه سوم کاهش می‌یابد. در نتیجه نسبت میرایی نیز که در رابطه‌ی مستقیم با ضریب میرایی است، به صورت درجه سوم کاهش می‌یابد. در نهایت با توجه به رابطه‌ی (۱۱)، زمان نشست کاهش می‌یابد. بنابراین با افزایش فاصله هوایی، دو پارامتر ضریب میرایی و زمان نشست در تضاد با یکدیگر عمل می‌کنند.

با انجام آنالیز حساسیت به دو نتیجه رسیدیم. اول اینکه شبیه‌سازی برای تمام محدوده‌ی مقادیر متغیرها در ANSYS به درستی جواب می‌دهد. دوم اینکه دیدیم که با تغییر در مقدار متغیرها، ویژگی‌های عملکردی قطعه در تناقض با یکدیگر عمل می‌کنند. بنابراین برای انتخاب بهترین گزینه از بین همه‌ی حالت‌های موجود، باید از روش‌های بهینه‌سازی استفاده نمود.

بهینه‌سازی

برای کاهش هزینه‌های ناشی از تکرار در ساخت میکروساختارها، برای رسیدن به توصیفات سیستمی مناسب، یکی از روش‌های انجام طراحی مناسب، بهینه‌سازی ساختارها با استفاده از روش‌های مختلف است. بهینه‌سازی در ساختار سبب رسیدن به بهترین مقادیر پارامترهای مختلف می‌گردد، به طوری که با کمترین زمان ممکن، و با کمترین تعداد انجام آزمایش‌های سعی و خطای آزمایشگاهی، به نتیجه‌ی مطلوب خواهیم رسید.

روش‌های موجود بهینه‌سازی را می‌توان به دو دسته‌ی اتفاقی و مشتقی تقسیم نمود. در این مقاله از الگوریتم PSO به عنوان جدیدترین روش موفق از روش‌های اتفاقی استفاده شده است. از مزایای روش مهاجرت اعضا نسبت به روش‌های دیگر بهینه‌سازی، حافظه‌دار بودن این روش است که از تجربیات دیگر اعضا و تجربیات گذشته‌ی خودش استفاده می‌کند و بهینه‌ی مطلق را بدست می‌آورد. همچنین در مقایسه با دیگر روش‌های مشتق پایه، به دلیل داشتن حافظه، دارای برتری است به این صورت که بهینه‌ی مطلق را می‌یابد. به همین دلیل در این مقاله از این روش

بهینه‌سازی بهره‌جست‌ه‌ایم. در این مقاله بهینه‌سازی با الگوریتم PSO توسط کد تدوین شده در نرم‌افزار MATLAB، پیاده‌سازی شده است. رابطه مورد استفاده در این روش برای سرعت و موقعیت هر پرنده عبارت است از:

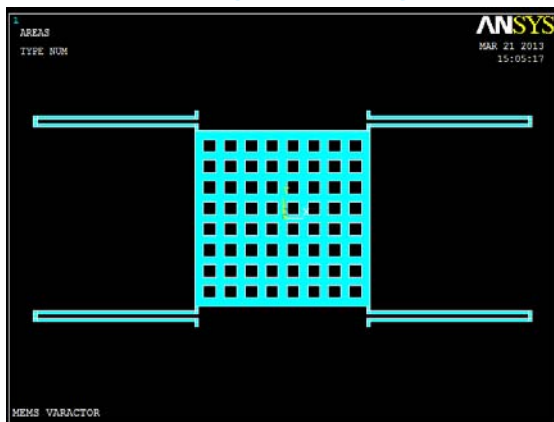
$$v_{k+1} = a v_k + b_1 r_1 (p_1 - x_k) + b_2 r_2 (p_2 - x_k) \quad (13)$$

$$x_{k+1} = c x_k + d v_{k+1}$$

سرعت و موقعیت هر شیء توسط کدنویسی تدوین شده در MATLAB مشخص می‌شود به طوری که با توجه به حداقل و حداکثر مقادیر در نظر گرفته شده برای متغیرها، که به صورت ماتریسی به برنامه اعمال می‌شود و کد تدوین شده، سرعت و موقعیت اولیه برای هر شیء تخمین زده می‌شود. در رابطه (۱۳) p_1, p_2 از نتایج مدل‌سازی بدست می‌آیند که با توجه به کدنویسی انجام شده، و توابع هدفی که برای برنامه در نظر گرفته می‌شود، مقادیر آنها توسط برنامه مشخص می‌گردد. پارامترهای $a, b_1, b_2, c, d, r_1, r_2$ بصورت $0.7, 0.3, 0.3, 1, 0.5, 0.5$ انتخاب شده‌اند، که اثبات می‌شود [۲۲] با این مقادیر هرگز الگوریتم بهینه‌سازی واگرا نمی‌شود. همچنین برای این که امکان حل مسائل بهینه‌سازی مقید فراهم شود از روش تابع پنالیتی استفاده شده است.

ارتباط بین ANSYS و MATLAB

با استفاده از کدنویسی در نرم‌افزار ANSYS مدلی برای این ساختار در نظر گرفته شده است. در این مدل پارامترهای مختلفی نظیر جنس ماده، طول صفحه‌ی میانی، کلیه‌ی ابعاد فنر، ضخامت قطعه، تعداد حفره‌ها، و اندازه‌ی ابعاد حفره‌ها متغیر هستند. این مدل در شکل ۷ نشان داده شده است.

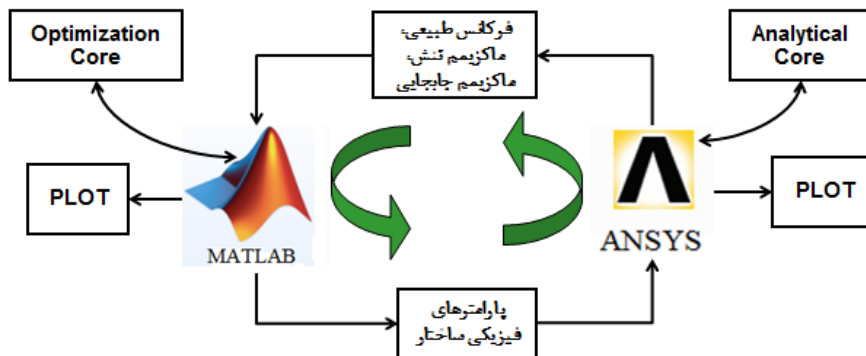


شکل ۷. نمایش ساختار کلی صفحه‌ی متحرک بالایی خازن متغیر میکروالکترومکانیکی در نرم‌افزار ANSYS.

فرآیند طراحی شامل دو قسمت اصلی است. قسمت اول شامل طراحی خازن متغیر و انجام تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی است. برای تحقق این مساله، کدنویسی تدوین شده که بصورت دقیق تحلیل‌های مورد نظر شامل یافتن فرکانس طبیعی سیستم، ماکزیمم جابجایی، و ماکزیمم تنش را انجام می‌دهد. هر چه فرکانس طبیعی سیستم بیشتر باشد، زمان نشست آن کمتر می‌گردد. با در نظر گرفتن اثر ولتاژ متوقف‌کنندگی هر چه ماکزیمم جابجایی بیشتر باشد، نسبت خازنی بزرگتری بدست می‌آید در نتیجه با تغییر ولتاژ اعمالی بین صفحات، مقادیر مختلف خازنی بدست می‌آیند.

قسمت دوم طراحی شامل خواندن خروجی‌های ANSYS و بررسی متغیرهای طراحی است که با استفاده از نرم‌افزار MATLAB انجام می‌گیرد. نرم‌افزار MATLAB یک نرم‌افزار تحلیل ریاضی بسیار قوی است که با استفاده از آن می‌توان زمان تحلیل‌های ریاضی را به میزان قابل توجهی کاهش داد. در ابتدا MATLAB پارامترهای فیزیکی مساله (جنس ماده و ابعاد قسمت‌های مختلف میکرو ساختار خازن متغیر) را به صورت یک فایل ورودی به ANSYS می‌دهد. از درون محیط نرم‌افزار MATLAB، نرم‌افزار ANSYS به واسطه‌ی پل ارتباطی DOS اجرا می‌گیرد. نرم‌افزار ANSYS تحلیل‌های لازم را انجام داده، و مقادیر خروجی را در فایل‌ی قرار می‌دهد. نرم‌افزار MATLAB این فایل خروجی را می‌خواند و مقادیر را در خود ذخیره می‌کند. در نتیجه ارتباط کاملی بین این دو نرم‌افزار قوی محاسباتی برقرار می‌گردد. با تکرار این چرخه و گرفتن تمام

خروجی‌ها، نمودارهای تحلیل حساسیت بدست می‌آیند و چرخه‌ی بهینه‌سازی و طراحی تکمیل می‌گردد. شکل ۸ چرخه‌ی کامل طراحی را نمایش می‌دهد.



شکل ۸. نمایش چرخه‌ی طراحی با استفاده از دو نرم‌افزار ANSYS و MATLAB که در واقع نرم‌افزار MATLAB نقش هسته‌ی بهینه‌سازی را دارد و نرم‌افزار ANSYS نقش هسته‌ی تحلیلی مساله را بر عهده دارد.

بررسی صحت طراحی

قبل از این که به بررسی نتایج گرفته شده از دو نرم‌افزار بپردازیم، باید از صحت کدنویسی و درست بودن طراحی اطمینان حاصل کنیم. برای تایید روش طراحی و محاسبات انجام شده، لازم است تا این روش بر روی نمونه‌های موجود در مقالات دیگر اعمال گردد و نتایج آن با نتایج شبیه‌سازی مقایسه گردد. در تحلیل‌هایی که با ANSYS انجام می‌گیرد، باید به نوع مش‌بندی توجه نمود چون با تغییر مش‌بندی، نتایج تحلیل‌ها متفاوت خواهد بود. اما اگر مش‌بندی به صورت مناسب و بدون عیب انجام گردد، نتایج تحلیل‌ها درست خواهند بود. برای اطمینان از مدل و نوع مش‌بندی انجام شده بر روی آن، این روش بر روی نمونه‌های موجود در جدول ۲ امتحان شده و نتایج شبیه‌سازی بصورت زیر آورده شده است:

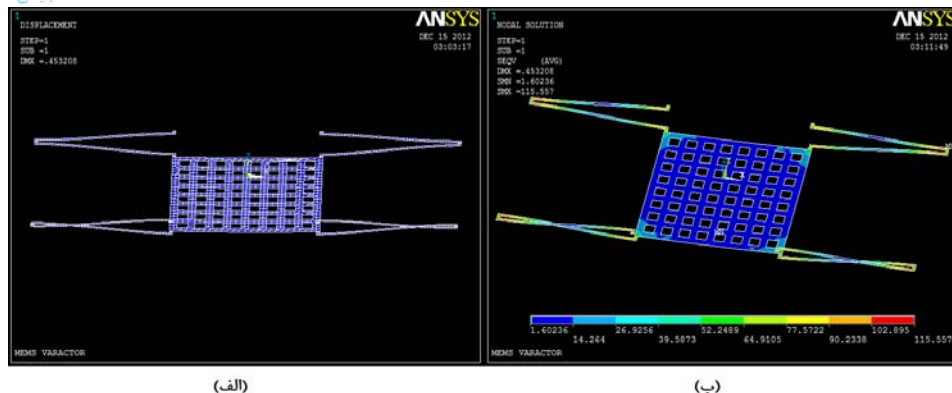
جدول ۲. مقایسه فرکانس طبیعی

ساختار	فرکانس طبیعی گزارش شده	فرکانس طبیعی شبیه‌سازی شده	درصد خطا
ساختار ۱ در [۲۳]	۱۲۵۶	۱۲۸۰	۰.۰۱۹
ساختار ۱ در [۲۴]	۱۶۸۴۳	۱۶۸۰۵	۰.۰۰۲
ساختار ۲ در [۲۴]	۲۳۴۹۵	۲۳۴۹۰	۰.۰۰۰۲

همان طوری که از نتایج جدول ۲ پیدا است، فرکانس طبیعی بدست آمده از شبیه‌سازی‌ها، بسیار نزدیک به فرکانس طبیعی موجود در مقالات است. در نتیجه مش‌بندی در نرم‌افزار ANSYS درست بوده و نتایج سایر تحلیل‌ها نیز به درستی بدست می‌آید.

تحلیل استاتیکی و مودال

پس از اتمام طراحی اولیه‌ی خازن متغیر، از طریق نرم‌افزار MATLAB ورودی‌های اولیه به کدنویسی تدوین شده در نرم‌افزار ANSYS اعمال می‌گردد. سپس برای یافتن ماکزیمم جابجایی صفحه‌ی بالایی و یافتن مقدار تنش در ماکزیمم جابجایی، تحلیل استاتیکی در نرم‌افزار ANSYS انجام می‌گیرد. همچنین برای یافتن فرکانس طبیعی سیستم تحلیل مودال انجام می‌شود. در شکل ۹ تحلیل استاتیکی انجام گرفته و ماکزیمم جابجایی به ازای نیروی الکتروستاتیکی وارد شده به ساختار، به نمایش در آمده است. در این حالت با اعمال ولتاژ به مقدار ۳ ولت به ساختار، نیرویی به اندازه‌ی ۰/۰۹۵۷۰۵ میکرو نیوتن به صفحه‌ی بالایی وارد می‌گردد. بنابراین ماکزیمم جابجایی صفحه‌ی بالایی برابر ۰/۴۵ میکرومتر می‌گردد که در شکل ۹ الف نشان داده شده است.



(الف)

(ب)

شکل ۹. ساختار کلی صفحه‌ی متحرک بالایی، الف) جابجایی صفحه‌ی بالایی خازن متغیر به سمت پایین با اعمال ولتاژ تحریک ۳ ولت، ب) نمایش توزیع تنش منتظر با جابجایی صفحه‌ی بالایی خازن متغیر.

به علت اینکه ساختار به شکل متقارن است، تحریک (اعمال نیرو به صفحه‌ی بالایی) نیز به صورت متقارن به صفحه‌ی بالایی اعمال می‌گردد. هر چقدر که قسمت تعلیق صفحه‌ی بالایی، ساختار متقارن تری داشته باشد، توزیع تنش در ساختار بیشتر می‌گردد و سبب کاهش تنش پسماند می‌شود. با کمتر شدن تنش در صفحه‌ی بالایی، ماکزیمم جابجایی آن افزایش می‌یابد و در نتیجه محدوده‌ی تنظیم خازن نیز افزایش می‌یابد. بنابراین یکی از تحلیل‌های اساسی در این گونه ساختارها، تحلیل تنش می‌باشد که در شکل ۹ ب تحلیل تنش میکروخازن با صفحه‌ای به اندازه‌ی $2 \times 100 \times 100 \mu\text{m}^3$ با طول فنر ۹۰ میکرومتر آورده شده است. همانطوری که در شکل مشاهده می‌کنید، بیشترین تنش در ماکزیمم جابجایی در محل تکیه‌گاه فنر رخ می‌دهد. که این مقدار بسیار کمتر از مقدار تنش ماکزیمم آلومینیوم، ۱۱۰ مگاپاسکال، است. برای حالت‌های مختلف ساختار، فرکانس طبیعی اندازه‌گیری می‌شود. هر چه فرکانس طبیعی سیستم بیشتر باشد، زمان نشست آن کمتر می‌گردد و سیستم سریع‌تر به حالت پایدار می‌رسد. بنابراین ساختاری با فرکانس طبیعی بیشتر، عملکرد بهتری را دارا است. بیشترین فرکانس طبیعی مربوط به ساختاری با ضخامت بیشتر و طول فنر کمتر است.

اعمال روش PSO به ساختار

با توجه به کاربردهای مختلف خازن متغیر در مدارات مختلف، ولتاژ تحریک آن متفاوت است. در میکروماهواره‌ها به علت محدودیت در تامین انرژی مدارات الکتریکی، هر چه ولتاژ تحریک قطعات

پایین‌تر باشد، بهتر است. با انتخاب ولتاژ تحریک برابر ۵ ولت، برای ایجاد بیشترین جابجایی در صفحه‌ی بالایی، و در نتیجه بیشترین تغییرات خازنی، خازن اولیه‌ی ۳ pF، و محدوده‌ی تغییرات متغیرهای طراحی که در جدول ۳ نشان داده شده است، طراحی و بهینه‌سازی آغاز می‌گردد. این محدودیت‌ها با توجه به شرایط ویژه‌ی هر متغیر در مرحله‌ی ساخت آزمایشگاهی، بدست آمده‌اند.

جدول ۳. محدوده تغییرات متغیرهای طراحی

متغیرهای طراحی	کمترین مقدار	بیشترین مقدار
طول فنر	۶۰	۴۰۰
عرض فنر	۱۰	۳۰
طول صفحه‌ی بالایی	۱۰۰	۱۰۰۰
طول هر حفره	۵	۱۵
ضخامت میکروصفحه	۱	۱۰
ولتاژ تحریک	۰	۵
فاصله هوایی	۱	۵.۵

پس از بیان روش بهینه‌سازی مهاجرت اعضا، نوبت به کدنویسی این روابط و استفاده از این روش در نرم‌افزار MATLAB، برای بهینه‌سازی می‌رسد. چون فاصله هوایی برابر ۲ میکرومتر است، پس ارتفاع متوقف‌کنندگی برابر ۱/۳ میکرومتر است. بنابراین بیشترین حد امکان جابجایی صفحه‌ی متحرک بالایی برابر ۰.۶۶ میکرومتر است. بنابراین این محدودیت به عنوان یک تابع برای کدنویسی تعریف می‌شود. با توجه به محدودیت‌های آورده شده در جدول ۳ بهینه‌سازی را شروع می‌کنیم. در بهینه‌سازی باید به دنبال به حداقل رساندن یک تابع باشیم. با توجه به محدودیت جابجایی صفحه‌ی بالایی به اندازه‌ی ۰/۶۶ میکرومتر، قسمتی از تابع هدف بصورت رابطه (۱۴) تعریف می‌گردد.

$$y = (m - 0.66)^2 \quad (14)$$

در این تابع m نمایانگر ماکزیمم جابجایی صفحه‌ی بالایی است که از ANSYS دریافت می‌گردد. همچنین مقدار تنش ماکزیمم نباید از ۱۱۰ مگا پاسکال بیشتر گردد. بنابراین یکی دیگر از توابع قیدی بصورت رابطه (۱۵) می‌گردد.

$$z - 110 \leq 0$$

(۱۵)

در این رابطه، z مقدار تنش ماکزیمم است که از محاسبات تحلیلی در ANSYS بدست می‌آید و به داخل MATLAB فرآخوانی می‌گردد. با تغییر در ابعاد خازن متغیر میکروالکترومکانیکی از طریق کدنویسی بهینه‌سازی در MATLAB و دریافت نتایج از ANSYS به صورت چرخه‌ای، چرخه‌ی بهینه‌سازی فعالیت خود را آغاز می‌کند و تمام متغیرهای طراحی را به گونه‌ای تغییر می‌دهد تا تابع (۱۴) مینیمم گردد، و رابطه‌ی (۱۵) به حداقل مقدار مثبت خود برسد. چون تابع (۱۴) درجه دو است، پس حداقل مقدار تابع y صفر می‌باشد. پس زمانی که مقدار این تابع صفر می‌گردد، مقادیر تمام متغیرها بدست می‌آیند. با اعمال محدودیت‌های بیان شده و با در نظر گرفتن مقادیر جدول ۳ پس از انجام بهینه‌سازی مقادیر متغیرها به صورت جدول ۴ بدست آمده است.

جدول ۴. مقادیر بهینه ابعاد ساختار خازن MEMS

مقدار بهینه	متغیرهای طراحی
۱۰۰ میکرومتر	طول فنر
۲۴ میکرومتر	عرض فنر
۸۲۴ میکرومتر	طول صفحه‌ی بالایی
۷ میکرومتر	طول هر حفره
۸ عدد	تعداد حفره‌ها
۲ میکرومتر	ضخامت میکروصفحه
۵ ولت	ولتاژ تحریک
۲ میکرومتر	فاصله هوایی

در نهایت با اعمال مقادیر بهینه‌سازی شده‌ی نهایی به ساختار، شرایط کاری خازن متغیر میکروالکترومکانیکی با تحریک الکتروستاتیکی طراحی شده در جدول ۵ نمایش داده شده است.

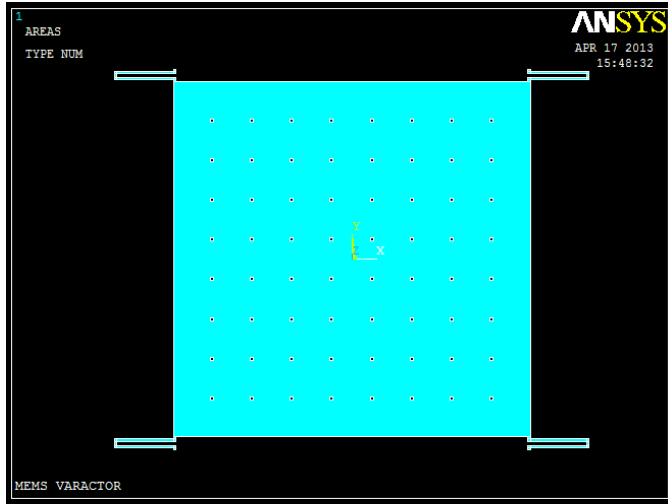
جدول ۵. شرایط کاری خازن متغیر MEMS

مقدار	پارامتر عملکردی قطعه
۴۲۰۸ هرتز	فرکانس طبیعی
۲/۵ مگاپاسکال	ماکزیمم تنش
۳ پیکوفاراد	کمترین مقدار خازنی
۴/۴۷ پیکوفاراد	بیشترین مقدار خازنی
۵ ولت	بیشترین ولتاژ تحریک
۳.۵ میلی ثانیه	زمان نشست
۴۲۰۸ هرتز	فرکانس طبیعی
۲/۵ مگاپاسکال	ماکزیمم تنش

طرح نهایی

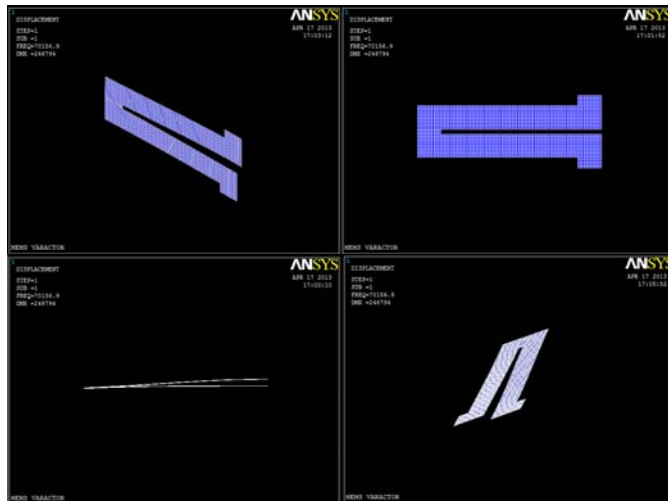
پس از انجام طراحی و شبیه‌سازی، و انجام بهینه‌سازی بر روی ساختار خازن متغیر میکروالکترومکانیکی، طراحی به پایان رسید. از مهمترین نوع آوری‌های این مقاله استفاده از دو نرم‌افزار ANSYS و MATLAB برای انجام طراحی، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی است. به دلیل اینکه این دو نرم‌افزار به راحتی در اختیار کاربران است، کدنویسی انجام شده نقش یک نرم‌افزار طراحی و بهینه‌سازی خازن متغیر میکروالکترومکانیکی با تحریک الکتروستاتیکی را ایفا می‌کند. با انجام کدنویسی در نرم‌افزارهای MATLAB و ANSYS، بستر نرم‌افزاری بدست آمده است، به گونه‌ای که با اعمال ورودی‌های مورد نظر از جمله ماکزیمم ولتاژ تحریک، مقدار خازن اولیه، و محدوده‌ی مجاز ابعاد کلی خازن (با توجه به محدودیت‌های مربوط به اندازه‌ی ساختار بر روی میکروتراشه‌های الکترونیکی) به برنامه، بصورت خودکار عملیات طراحی، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی ساختار خازن متغیر میکروالکترومکانیکی انجام می‌گردد و ساختار بهینه بدست می‌آید. نتایج نهایی ساختار خازن متغیر بدست آمده در ادامه آورده شده است.

با توجه به بهینه‌سازی انجام شده، و مقادیر جدول ۴ ساختار نهایی خازن متغیر میکروالکترومکانیکی در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



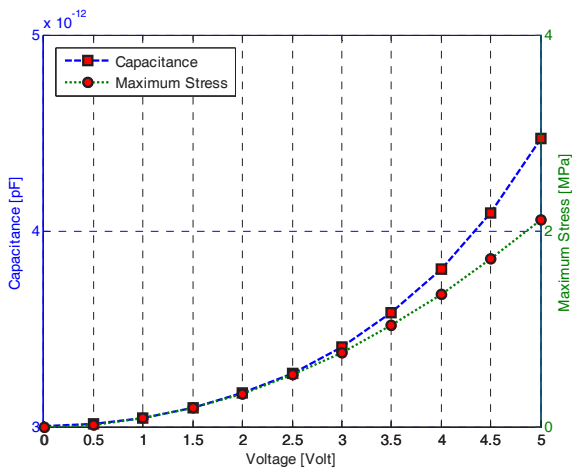
شکل ۱۰. نمایش ساختار نهایی صفحه‌ی بالایی خازن متغیر میکروالکترومکانیکی.

پس از اعمال تحریک به ساختار شکل حالت‌های مختلف فنرها در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



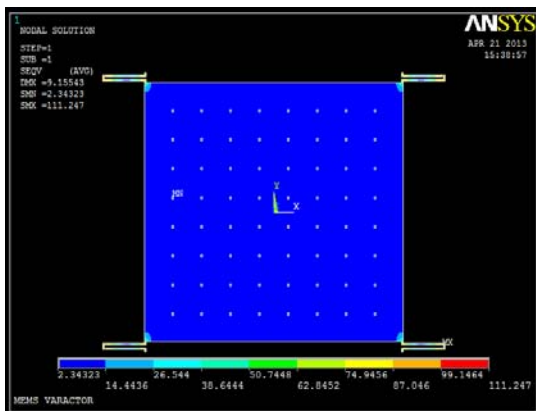
شکل ۱۱. تصویر یک فنر از ساختار صفحه‌ی متحرک بالایی در حالت تحریک از زوایای مختلف.

همچنین منحنی C-V خازن متغیر طراحی شده در شکل ۱۲ نمایش داده شده است.



شکل ۱۲. منحنی C-V خازن متغیر میکروالکترومکانیکی بهینه شده و همچنین ماکزیمم تنش متناظر با آن.

همان‌طوری که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، با تغییر ولتاژ از ۰ تا ۵ ولت، مقدار ظرفیت خازنی از ۳ تا ۴/۴۷ پیکوفاراد تغییر می‌کند. همچنین مقدار تنش ماکزیمم متناظر با آن از صفر تا ۲/۵ مگا پاسکال تغییر می‌یابد که بسیار کمتر از مقدار تنش ماکزیمم قابل تحمل آلومینیوم است. با اعمال نیروی الکتروستاتیکی، به ساختار تنش وارد می‌گردد که تحلیل تنش اعمالی به ساختار خازن متغیر در شکل ۱۳ آورده شده است.



شکل ۱۳. نمایش تحلیل تنش در صفحه‌ی بالایی خازن متغیر میکروالکترومکانیکی طراحی شده در ANSYS پس از اعمال ولتاژ تحریک ۵ ولت به ساختار.

خازن متغیر میکروالکترومکانیکی طراحی شده در مقایسه با طرح‌های موجود، با دو مقاله‌ی یانگ [۲۵] و سنوک [۲۶] مقایسه شده است که نتایج آن در جدول ۶ نشان داده شده است.

جدول ۶. محدوده تغییرات متغیرهای طراحی

پارامتر عملکردی	یانگ	سنوک	کارانجام شده
کمترین مقدار خازنی [Pf]	۲.۱۱	۱.۴	۳
بیشترین مقدار خازنی [Pf]	۲.۴۶	۱.۵۳	۴.۴۷
بیشترین ولتاژ تحریک [V]	۵.۵	۸	۵
فرکانس کاری [GHz]	۱	۲	۱
ضریب کیفیت	۶۲	۴	۱۶

همانطوری که از نتایج جدول ۶ مشخص است، با اعمال ولتاژ تحریک کمتر، محدوده‌ی تغییرات خازنی بیشتر، در حدود ۵۰٪، شد که سبب بهبود عملکرد تنظیمی خازن‌های متغیر در میکروتراشه‌ها می‌گردد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، با کدنویسی در دو نرم‌افزار ANSYS و MATLAB، بستر نرم‌افزاری برای طراحی، شبیه‌سازی، و بهینه‌سازی ساختار خازن متغیر میکروالکترومکانیکی با تحریک الکتروستاتیکی به ازای مقادیر دلخواه ولتاژ تحریک، مقدار خازن اولیه و دیگر پارامترهای الکتریکی فراهم شد. در قسمت بهینه‌سازی از روش جدید مهاجرت اعضا استفاده نمودیم، که نسبت به روش‌های دیگر بهینه‌سازی، یک روش حافظه‌دار است که از تجربیات گذشته‌ی خود و دیگر اجزاء استفاده می‌نماید و بهینه‌ی مطلق را پیدا می‌کند. نتایج شبیه‌سازی حاکی از آن است که با ولتاژ تحریک کمتر، می‌توان به محدوده‌ی تغییرات خازنی بزرگتر رسید. همچنین با برقراری کامل ارتباط بین دو نرم‌افزار، می‌توان از بلوک‌های کنترلی MATLAB در کنترل رفتار خازن متغیر میکروالکترومکانیکی استفاده نمود.

- [1] T. Tsang and M. El-Gamal, "Very wide tuning range micro-electromechanical capacitors in the MUMPS process for RF applications" in *VLSI Circuits Symp. Tech. Dig.*, June 2003, pp. 33–36.
- [2] J. Lepkowski, "An Introduction to Transient Voltage Suppression Devices", Semiconductor Components Industries, LLC, 2005.
- [3] S. Lucyszyn, "Review of radio frequency microelectromechanical systems technology" *IEE Proceedings - Science, Measurement and Technology*, 2004 ,vol. 151, pp. 93-103.
- [4] N. Maluf, K. Williams, "An Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering", London: Artech House, Inc., Second Edition, 2004, pp. 1-11.
- [5] Ai Qun Liu, "RF MEMS Switches and Integrated Switching Circuits", New York: Springer, Dordrecht Heidelberg London, 2010, 1936-4407.
- [6] K. Lee, R. Liu, and B. Kim, "Double Beam RF MEMS Switches for Wireless Applications" *Electron. Lett.*, Mar. 2003, vol. 39, No. 6, pp. 532–533.
- [7] A. Dec and K. Suyama, "A 1.9 GHz CMOS VCO with micromachined electromechanically tunable capacitors," *IEEE J.Solid-State Circuits*, Aug. 2000,vol. 35, no. 8, pp. 1231–1237.
- [8] D. chicherin, M. sterner, D. lioubtchenko, J. oberhammer and A. V. raisanen, "Analog-Type Millimeter-Wave Phase Shifters Based on MEMS Tunable High-Impedance Surface And Dielectric Rod Waveguide", *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 2011, pp 533–538.
- [9] J. Basu and T. K. Bhattacharyya, "Microelectromechanical Resonators for Radio Frequency Communication Applications", *Microsystem Technologies*, Oct 2011 ,vol. 17(10–11), pp. 1557–1580.
- [10] A. M. Elshurafa and E. I. El-Masry," Finite-Element Modeling of Low-Stress Suspension Structures and Applications in RF MEMS Parallel-Plate Variable Capacitors", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, May 2006, vol. 54, No. 5.
- [11] S. Dey and S. K.Koul, "Design, Fabrication and Characterization of RF MEMS Varactor for VCO Application", *Institute of Smart Structures and Systems (ISSS)*, J. ISSS, Sept 2012 Vol. 1 No. 1, pp. 1-10.
- [12] S. Chakraborty, A. Bhattacharya, A. Ray Chaudhuri and T.K. Bhattacharyya, "Development and Characterization of Micro-Machined MEMS Based Varactor",

- International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, March 2010, VOL. 3, NO. 1.
- [13] M. Spasos, K. Tsiakmakis, N. Charalampidis, R. Nilavalan, "RF-MEMS Switch actuation pulse optimization using Taguchi's method", Department of Electronic and Computer Engineering Brunel University Uxbridge, London, United Kingdom, 2011.
- [14] U. Esme, "Application of Taguchi Methode for the Optimization of Resistance Spot Welding Process", *The Arabian Journal for Science and Engineering*, May 27, 2009, Volume 34, Number 2B,.
- [15] H. Konishi, M. Nishiyama, J. Suzuki, Y. Tezuka, A. Komai, Y. Suzuki, and K. Suzuki, "Built-in upwards-bending electrostatic actuator capable of three-level-structural variable capacitor" in Proc. *IEEE International Conference on Solid State Sensors, Actuators and Microsystems*, Lyon, France, 2007, 10-14 Jun, pp. 447-450.
- [16] S. Leidich, S. Kurth, and T. Gessner, "Continuously tunable RF-MEMS varactor for high power applications" in *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, Atlanta, GA, USA, 15-20 Jun, 2008, pp. 1267-1270.
- [17] D. Bell, T. J. Lu, N. A. Fleck, and S. M. Spearing, "MEMS Actuators and Sensors: Observations on Their Performance and Selection for Purpose" *Journal of Micromechanics and Microengineering*, June 2005, S153-S164.
- [18] V. L. Rabinovich, R. K. Gupta, and S. D. Senturia, "The Effect of Release-Etch Holes On The Electromechanical Behavior Of MEMS Structures", IEEE, Chicago, June, 1997. 16- 19.
- [19] Q. Shen, and N. S. Barker, "Distributed MEMS Tunable Matching Network Using Minimal-Contact RF-MEMS Varactors", *IEEE Transactions On Microwave Theory And Techniques*, June 2006, vol. 54, NO. 6.
- [20] J. B. Starr, "Squeeze Film Damping in Solid State Accelerometer", Tech. Digest, *IEEE Solid State Sensor and Actuator Workshop*, USA, June 1990, pp. 44-47.
- [21] J. Zou, C. Liu, J. Schutt Aine, J. Chen, and S. Kang, "Development of a Wide Tuning Range MEMS Tunable Capacitor for Wireless Communication Systems", IEEE, IEDM, *Department of Electrical & Computer Engineering*, University of Illinois, Urbana, IL 6 180 1, 2000.
- [22] I. C. Trelea, "The Particle Swarm Optimization Algorithm: Convergence Analysis and Parameter Selection", elsevier, *Information Processing Letters*, 2003, 85 317–325.
- [23] M. J. Novack, "Design and Fabrication of a Thin Film Micromachined Accelerometer", *Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute*

of Technology, September 1992.

- [24] Z. E. Fabrim, W. Chong, M. M. Pérez, "Natural vibration frequency of classic MEMS structures", *Mechanics of Solids*, Brazil, 2009.
- [25] D. J. Young, B. E. Boser, "A Micromachined Variable Capacitor for Monolithic Low-Noise VCOS", *Integrated Circuits Conference*, Santa Clara, CA, May 1995, pp. 83-90.
- [26] S. Seok, W. Choi and K. Chun, "A Novel Linearly Tunable MEMS Variable Capacitor", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Dec. 2001, pp. 82–86, 11.

