

بهینه سازی ساختار میکروفن خازنی جدید با دیافراگم قورباغه ای جهت افزایش حساسیت و کاهش ولتاژ تغذیه

صدیقه بابایی صداقت^۱ و بهرام عزیزالله گنجی^{۲*}

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۶/۱۹	در این مقاله هندسه و ابعاد یک میکروفن خازنی جدید قورباغه‌ای شکل با استفاده از الگوریتم تجمع ذرات (PSO) برای کاهش ولتاژ تغذیه و افزایش حساسیت بهینه‌سازی شده است. الگوریتم تجمع ذرات روش بهینه‌سازی تصادفی مبتنی بر جمعیت است که از رفتار اجتماعی پرندگان الهام گرفته است که برای حل فضاهای طراحی پیچیده و چندجانبه مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش پیشنهادی در این مقاله می‌تواند با بسیاری از طراحی‌های قطعات ماشینکاری میکرونی دیگر سازگار باشد. این رویکرد نشان دهنده بهبودهایی نسبت به طرح‌های قبلی است که از شیوه طراحی معمول (روش‌های تقریبی مبتنی بر سعی و خطا) ساخته می‌شدند. باتوجه به این که عملکرد میکروفن از جهات مختلف مورد مطالعه قرار می‌گیرد و پارامترهای طراحی مختلف در مصالحه با یکدیگرند، تعریف تابع هدفی چند منظوره بسیار مهم است. در این کار، ما تابع هدف را به گونه‌ای تعریف کرده‌ایم که هر سه فاکتور فرکانس تشدید، ولتاژ کشش و حساسیت مکانیکی به طور همزمان در نظر گرفته شوند. نتایج نشان می‌دهد که میکروفن طراحی شده از عملکرد مطلوبی برخوردار است. در واقع تنها با انتخاب ابعاد بهینه برای طول و عرض بازوها، حساسیت مکانیکی ساختار حدود ۴ برابر و حساسیت مدار باز به ۲ برابر نسبت به طرح‌های پیشین افزایش یافته است و مقدار ولتاژ کشش نیز تقریباً به نصف کاهش یافته است.
پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۶/۱۳	
واژگان کلیدی: میکروفن خازنی قورباغه‌ای، تکنولوژی ماشین کاری میکرونی، ثابت فنر، الگوریتم بهینه‌ساز تجمع ذرات.	

۱- مقدمه

شنیداری مورد استفاده هستند [۵ و ۶]. متناسب با این کاربردها، نیاز به میکروفن‌های خیلی کوچک با عملکرد مطلوب خواهد بود. انواع مختلف میکروفن‌های میکروماشین‌کاری انواع مختلفی دارند که عبارتند از میکروفن‌های پیروزریستیو، پیزوالکتریک و خازنی که در مراجع مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۷ و ۸]. میکروفن‌های خازنی به دلیل عملکرد بهترشان همچون، حساسیت بالا، مصرف توان کم، پاسخ فرکانسی هموار در پهنای باند عریض، سطح نویز کم، پایداری و قابلیت اطمینان بسیار مورد مطالعه قرار گرفته‌اند [۹-۱۱].

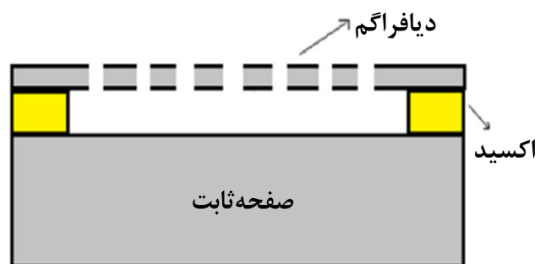
زمینه‌ای جدید در علم مهندسی در ابعاد میکرون در حال رشد است که به نام‌های مختلفی در جهان شناخته شده است، همچون MST در اروپا و MEMS در ایالات متحده و میکروماشین‌کاری در ژاپن. میکروفن‌ها نوعی میدل هستند که انرژی آکوستیکی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. تکنولوژی میکروالکترومکانیک برای طراحی و ساخت میکروفن‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌است [۴-۱]. میکروفن‌ها به طور گسترده در زمینه‌های مختلف از جمله اهداف نظامی، کاوش‌های امنیتی و وسایل کمک

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: baganji@nit.ac.ir

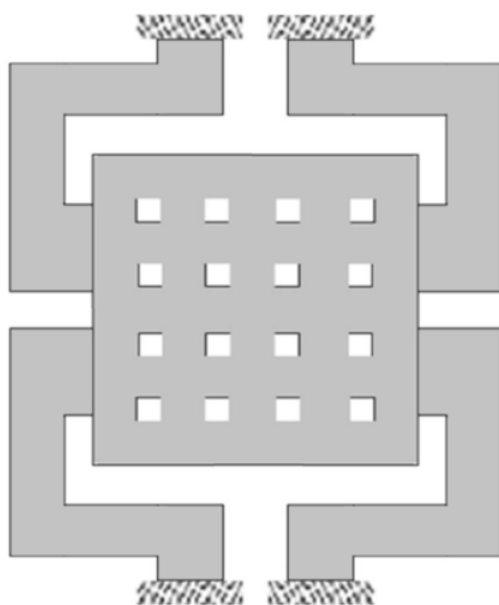
۱. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ۴۸۴، بابل، ایران.
۲. دانشیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ۴۸۴، بابل، ایران.

مورد توجه و استفاده گرفته‌اند [۲۴-۲۷]. در این مقاله از الگوریتم تجمع ذرات برای بهینه‌سازی ساختار قورباغه‌ای استفاده شده است. در واقع می‌توان با انتخاب ابعاد بهینه عملکرد میکروفن را بهبود بخشید.

این مقاله در شش بخش اصلی سازماندهی شده است. در بخش دوم ساختار کلی میکروفن خازنی قورباغه‌ای شکل آورده شده است. در بخش سوم به بررسی روشی برای بهینه‌سازی ساختار و تعیین پارامترهای ساختاری و پارامترهای عملکردی مطلوب مورد انتظار می‌پردازیم. در بخش چهارم اصول اولیه الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذرات ارائه شده است و با توجه به مسئله‌ی مورد بحث تابع هدف تعریف شده است. سپس در بخش پنجم به ارائه‌ی نتایج بهینه‌سازی و ارزیابی عملکرد الگوریتم و مقایسه‌ی عملکرد ساختار بهینه شده با میکروفن اولیه و دیگر میکروفن‌های خازنی طراحی شده در چندسال اخیر می‌پردازیم. در نهایت در بخش ششم جمع بندی کلی انجام گرفته است.



(الف)



(ب)

شکل ۱- میکروفن قورباغه ای شکل، (الف) نمای جانبی. (ب) نمای فوقانی از دیافراگم [۲۳].

میکروفن‌های خازنی عموماً شامل یک دیافراگم هستند که فشار موج‌های صوتی سبب نوسان آن می‌شود. در ساده‌ترین حالت، یک دیافراگم بر روی صفحه‌ی ثابت هادی کشیده شده و توسط ستون‌هایی محافظت می‌گردد به طوری که یک شکاف هوایی بین دیافراگم و صفحه‌ی ثابت وجود داشته باشد.

میکروفن‌های خازنی مطالعه شده تا به امروز دارای ساختارهای متنوعی هستند، بسیاری از میکروفن‌های خازنی با استفاده از دو ویفر مجزا و سپس اتصال آن‌ها ساخته می‌شوند، که مشکل این میکروفن‌ها هم‌راستا کردن دقیق دو ویفر قبل از اتصال می‌باشد [۱۲]. روش دیگر نشست لایه‌های مختلف و سپس حکاکی آن‌ها برای شکل‌گیری ساختار مورد نظر می‌باشد [۱۳]. با استفاده از ویفر SOI به عنوان ماده اولیه برای ساخت میکروفن می‌توان بسیاری از مشکلات قبلی از قبیل هم‌راستایی و نشست لایه‌های مختلف و طراحی ماسک‌ها و چندین مرحله لیتوگرافی را برطرف کرد و در نتیجه زمان و هزینه قطعه ساخته شده را کاهش داد [۱۴]. به منظور افزایش ظرفیت خازنی، میکروفن‌های خازنی با دو دیافراگم و میکروفن خازنی با دو صفحه‌ی ثابت نیز مورد مطالعه قرار گرفته‌اند [۱۵ و ۱۶]. همچنین به منظور حکاکی لایه قربانی، باید حفره‌هایی در صفحه ثابت یا دیافراگم ایجاد شود، که به دلیل ضخامت بالای صفحه‌ی ثابت، پروسه ساخت زمان بر و پرهزینه بود، یکی از راهکارها برای رفع این مشکل ایجاد حفره‌ها در دیافراگم بود [۱۷ و ۱۸]. علاوه بر این به منظور بهبود عملکرد میکروفن از دیافراگم‌های موجدار و شیاردار و فترنی شکل نیز استفاده شده است [۱۹-۲۱].

به طور کلی یکی از معایب میکروفن‌هایی که تا به امروز با ابعاد زیر ۱ میکرون ساخته شده‌اند، این است که حساسیت پایینی دارند و نیاز به ولتاژ تغذیه بالایی دارند. در واقع با کوچک کردن ابعاد، حساسیت میکروفن شدیداً تنزل یافته و ولتاژ پولین ساختار افزایش می‌یابد [۱۸ و ۲۲]. در مرجع [۲۳] ساختار میکروفن جدیدی با نام میکروفن قورباغه‌ای پیشنهاد شده است، با وجود آن که دارای ابعاد زیر نیم میکرون است، از عملکرد خوبی برخوردار است. در این مقاله به بهینه‌سازی ساختار قورباغه‌ای به منظور حصول عملکرد بهینه خواهیم پرداخت. اخیراً در زمینه‌های مختلف مهندسی، استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌ساز متنوعی همچون الگوریتم ژنتیک، فاخته، زنبور و تجمع ذرات بسیار

حساسیت بالایی داشته باشد. با بررسی ساختار میکروفن از زوایای مختلف لزوم بهینه سازی ساختار کاملاً ملموس خواهد بود.

۳- روش پیشنهادی برای طراحی بهینه میکروفن

همان طور که از عنوان تکنولوژی سیستم میکروالکترومکانیک مشهود است، این تکنیک هم شامل مؤلفه‌های الکتریکی و هم مکانیکی است که سبب پیچیدگی طراحی خواهد شد. عموماً طراحی‌های انجام گرفته در این زمینه به صورت تقریبی و به روش سعی و خطا انجام پذیرفته‌اند [۲۹-۳۱] و یا اینکه در مدل سازی ساختارها با معادلات چند جزئی پیچیده سر و کار خواهند داشت [۳۲]. این مسئله باعث شده که عموماً در بحث طراحی ساختارهای میکروالکترو مکانیک، شناخت کامل از عملکرد حاصل نشده و طراحی اولیه به صورت تقریبی انجام گرفته و مطمئناً بهینه نیز نخواهد بود. تکنیک بیان شده، برای طراحی بهینه میکروفن در این مقاله، زمینه‌ای جذاب برای بحث طراحی خواهد بود. با توجه به این مسئله که، آنالیز ساختار قورباغه‌ای شکل به طور کامل در مرجع [۲۳] آورده شده است و مدل‌های ارائه شده نیز از دقت بسیار مطلوبی برخوردار هستند، در واقع می‌توان با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی با ابعاد بهینه به میکروفنی با عملکرد به مراتب بهتر از [۲۳] دست یافت. مؤلفه‌های طراحی با استفاده از الگوریتم تجمع ذرات بهینه‌سازی شده‌اند.

۳-۱- پارامترهای طراحی میکروفن بهینه

در ابتدا روند کار با انتخاب ساختار اولیه میکروفن قورباغه‌ای شروع می‌شود. سپس با توجه به این که مشخصات عملکردی این ساختار با دقت بالایی مدل شده است، می‌توان از طریق الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذرات به طراحی ساختاری بهینه برای ساختار مورد بحث پردازیم. برخی از مؤلفه‌های ساختاری میکروفن (مانند طول و ضخامت دیافراگم، تعداد و عرض حفره‌ها و ضخامت شکاف هوایی) ثابت فرض شده‌اند. در مورد این طراحی با توجه به این که از دیافراگمی با ابعاد ۳۰۰ میکرون (که در واقع کوچکترین میکروفن خازنی طراحی شده تا به امروز است) استفاده شده است و از آنجا که در مراجع مختلف شاهد بوده‌ایم که با کوچک کردن ابعاد میکروفن ولتاژ تغذیه به شدت افزایش یافته و حساسیت نیز کاهش شدیدی داشته است [۲۲]. در

۲- ساختار میکروفن قورباغه‌ای

در این مقاله ساختار میکروفن خازنی میکروالکترومکانیک قورباغه‌ای شکل که در مرجع [۲۳] معرفی شده است، به منظور بهینه‌سازی مورد بررسی قرار گرفته است. شکل (۱-الف) نمای جانبی بدون مقیاس از میکروفن خازنی و شکل (۱-ب) نمای فوقانی دیافراگم میکروفن را نشان می‌دهد. مشخصات کلی میکروفن در جدول ۱ ارائه شده است. همان طور که از شکل (۱) مشاهده می‌شود از دی‌اکسید سیلیکون برای ایجاد شکاف هوایی بین دیافراگم و صفحه‌ی ثابت استفاده شده است و جنس دیافراگم از سیلیکون تک کریستال است. علاوه بر این به دلیل کاهش مشکل دمپینگ و سادگی پروسه‌ی ساخت، دیافراگم حفره‌دار شده است و به منظور افزایش حساسیت در اطراف دیافراگم بازوهای قورباغه‌ای شکل افزوده شده است. از آنجا که سیلیکون تک کریستال ماده‌ی سختی است و از نظر قدرت مکانیکی مانند استیل است، این قدرت مکانیکی سبب می‌شود تا سیلیکون تک کریستالی برای بسیاری از ساختارهای میکروالکترومکانیک ایده‌آل باشد. همچنین سیلیکون تک کریستال می‌تواند تقریباً بدون استرس ساخته شود، اما عملکرد میکروفن‌های ساخته شده با دیافراگم سیلیکون تک کریستالی به دلیل ضخامت بالای دیافراگم مناسب نیست، چون ضخامت بالای دیافراگم منجر به کاهش حساسیت مکانیکی میکروفن می‌شود [۲۸].

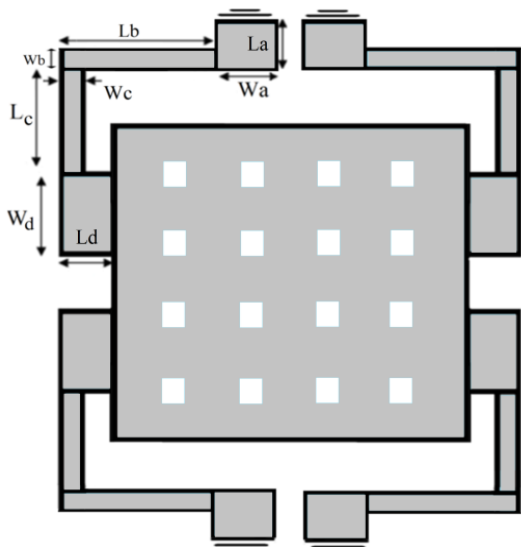
جدول ۱- پارامترهای فیزیکی ساختار میکروفن

مشخصات	مقادیر
جنس دیافراگم	سیلیکون تک کریستال
طول دیافراگم	۳۰۰ μm
ضخامت دیافراگم	۵ μm
تعداد حفره‌ها	۱۶ μm
عرض حفره‌ها	۱۰ μm
ضخامت شکاف هوایی	۱ μm
یانگ مدولوس	۱۳۰ GPa
نسبت پواسن	۰/۲۸

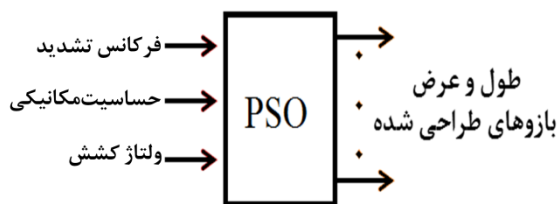
حساسیت میکروفن‌های خازنی با افزایش ابعاد دیافراگم و افزایش ولتاژ تغذیه و کاهش شکاف هوایی و کاهش استرس پسماند دیافراگم افزایش می‌یابد. به دلیل تناقض بین پارامترها باید به دنبال ساختاری باشیم که بتوانیم مصالحه‌ای بین پارامترهای عملکردی و ساختاری مختلف ایجاد کنیم تا قطعه‌ی نهایی با ابعاد کوچک و ولتاژ تغذیه کم

عرض بیم‌ها $W(W_a, W_b, W_c, W_d) =$

پس به طور کلی در خروجی الگوریتم ۸ پارامتر ساختاری باید تعیین شوند. پارامترهای عملکردی هدف مورد بررسی در این مقاله نیز عبارتند از فرکانس تشدید، ولتاژ کشش و حساسیت مکانیکی.



شکل ۳- دیافراگم قورباغه‌ای شکل



شکل ۴- الگوی پارامترهای ورودی و خروجی الگوریتم بهینه‌ساز

۲-۳- مشخصات عملکردی میکروفن خازنی قورباغه‌ای شکل

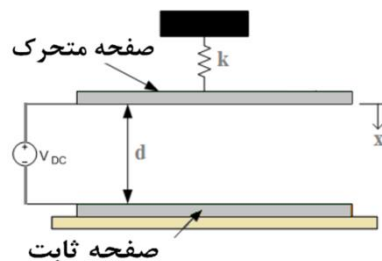
در واقع بهینه‌سازی برای تعیین موقعیت بهینه برای کاهش ولتاژ تغذیه و افزایش حساسیت میکروفن با در نظر گرفتن محدودیت فرکانس تشدید میکروفن است. معادلات ریاضی که برای توصیف پارامترهای عملکردی این میکروفن وجود دارند [۲۳] عبارتند از:

$$f_r = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{(k_{am})}{\rho(W_d^2 - n.a_h^2)t}} \quad (1)$$

$$V_{pi} = \sqrt{\frac{32d_0^3(k_{am})}{27\varepsilon(W_d^2 - n.a_h^2)}} \quad (2)$$

$$S_m = \frac{(W_d^2 - n.a_h^2)}{4k_{am}} \quad (3)$$

نتیجه بحث بهینه‌سازی سایر پارامترها با کوچک کردن ابعاد میکروفن بسیار حائز اهمیت خواهد بود. البته در بحث بهینه‌سازی، توجه به این نکته که فرکانس تشدید ساختار تحت تغذیه وارد محدوده شنیداری نشود بسیار مهم است. پس سه پارامتر عملکردی فرکانس تشدید، ولتاژ کشش و حساسیت مکانیکی توابع هدف بهینه‌سازی ما خواهند بود. ولتاژ کشش ولتاژی است که به ازای آن صفحه متحرک خازن بر روی صفحه ثابت فرو می‌ریزد. به منظور محاسبه ولتاژ کشش، ساختار در محیط خلأ در نظر گرفته می‌شود. شکل (۲) را در نظر بگیرید که دو صفحه با فاصله d از هم، تحت اعمال ولتاژ مستقیم قرار گرفته‌اند. به دلیل اعمال ولتاژ تغذیه، نیروی الکتروستاتیکی به سمت پایین در جهت x به صفحه متحرک وارد می‌شود، در حالی که جهت نیروی کشسانی فنر در جهت مخالف و به سمت بالا خواهد بود. اگر ولتاژ تغذیه افزایش یابد، نیروی الکتروستاتیکی افزایش یافته و صفحه متحرک به سمت پایین متمایل می‌شود. وقتی ولتاژ تغذیه به مقدار ولتاژ کشش می‌رسد، نیروی الکترواستاتیکی بر نیروی مقاوم فنر غلبه کرده که سبب فروریزش ناگهانی صفحه متحرک بر صفحه ثابت خواهد شد [۲۳].



شکل ۲- مدل ساختار خازنی با صفحه‌ی متحرک

همان‌طور که مطابق شکل (۳) از ساختار دیافراگم مشهود است، دیافراگم شامل چهار بازو است که هر یک از بازوها از چهار بیم تشکیل شده‌اند. پس در بحث طراحی انتخاب مقادیر مناسب برای طول و عرض هر یک از این بیم‌ها مسئله‌ی مهمی خواهند بود. شکل (۴) نمای کلی از روش پیشنهادی برای بهینه‌سازی میکروفن قورباغه‌ای شکل را نشان می‌دهد.

روش پیشنهادی بر مبنای انتخاب پارامترهای هندسی ساختار میکروفن همچون طول و عرض بیم‌ها با استفاده از الگوریتم بهینه‌ساز است. پارامترهای ساختاری مورد بررسی در این مقاله عبارتند از:

طول بیم‌ها $L(L_a, L_b, L_c, L_d) =$

۴- الگوریتم

عملکرد الگوریتم به این صورت است که با یک گروه از ذرات تصادفی آغاز می‌شود و سپس بهینه‌ها را با تولیدات به روز شده دنبال می‌کند. با هر ذره به عنوان یک پرنده در فضای N بعدی رفتار می‌شود که پروازش را بر طبق تجربیات پرواز خود به علاوه تجربیات پرواز دیگر پرنده‌ها تنظیم می‌کند. هر ذره مسیرش را در مختصاتش در فضای حل ادامه می‌دهد. هر یک از این ذرات بر اساس مکانی که دارند، یک مقدار سازگاری دارند که با تابع هدفی که باید بهینه شود ارزیابی می‌گردند و همچنین هر یک از ذرات سرعتی دارند که در جهت حرکت مکان بهینه است. در واقع در هر مرحله هر ذره با دنبال کردن دو مقدار بهینه به روز می‌شود:

۱- بهترین سازگاری که توسط خود ذره تاکنون به دست آمده است که این مقدار به عنوان بهترین تجربه شخصی ذخیره می‌شود pbest نام دارد.

۲- بهترین سازگاری که تاکنون به وسیله همه ذرات به دست آمده است که این مقدار به عنوان بهترین تجربه گروهی ذخیره می‌شود gbest نام دارد.

مفهوم اصلی در الگوریتم بهینه‌ساز تجمع ذرات، شتاب گرفتن هر ذره نسبت به مکان‌های gbest و pbest. با یک شتاب دهنده وزن داده شده به طور تصادفی، در هر مرحله زمانی است. بعد از یافتن بهترین ذره، دو مقدار سرعت و مکان ذره به روز رسانی می‌شوند. هر ذره سعی می‌کند تا مکانش را با استفاده از اطلاعات مکان کنونی، سرعت کنونی، فاصله میان مکان کنونی و بهترین تجربه شخصی، فاصله میان مکان کنونی و بهترین تجربه گروهی اصلاح کند. این اصلاحات می‌تواند به طور ریاضی با معادله زیر مدل شود:

$$V_i^{k+1} = wV_i^k + C_1 \text{rand}_1(pbest_i - S_i^k) + C_2 \text{rand}_2(gbest - S_i^k) \quad (9)$$

که در آن سرعت ذره i ام در k امین تکرار، w تابع وزن دهی، zj فاکتور وزن دهی یا یادگیری، rand عددی تصادفی با توزیع یکنواخت بین صفر تا یک، S_i^k مکان کنونی نماینده i ام در k امین تکرار، pbest برای i امین نماینده و gbest مربوط به گروه است. مقدار فاکتورهای وزن دهی معمولاً برابر با دو می‌باشند (C₁=C₂=2). برای به روز رسانی مکانی داریم:

$$S_i^{k+1} = S_i^k + V_i^{k+1} \quad (10)$$

که ε₀، ρ، بیانگر چگالی و ضریب گذردهی فضای آزاد و فاصله شکاف هوایی بین دیافراگم و صفحه‌ی ثابت است و W_d، n، t، an به ترتیب معرف طول و ضخامت دیافراگم، تعداد و عرض حفره‌های موجود در دیافراگم است و K_{arm} ثابت فنر محاسبه شده برای یک بازو است که با استفاده از روش انرژی از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$k_{arm} = \left(-\frac{1}{3S_{ea}} \left[(C_2 - L_c - L_d)^3 - (C_2 - L_c)^3 \right] + \frac{1}{S_{ga}} (C_1 - L_d + L_b)^2 L_d - \frac{1}{3S_{ed}} \left[(C_1 - L_d)^3 - (C_1)^3 \right] + \frac{1}{3S_{eb}} \left[(C_1 - L_d - L_b)^3 - (C_1 - L_d)^3 \right] + \frac{1}{S_{gb}} (C_2 - L_c)^2 L_b + \frac{1}{S_{gc}} (C_1 - L_d)^2 L_c + \frac{C_2^2 L_d}{S_{gd}} - \frac{1}{3S_{ec}} \left[(C_2 - L_c)^3 - (C_2)^3 \right] \right)^{-1} \quad (4)$$

پارامترهای S_{ei} و S_{gi} به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$S_{ei} = EI_i, i : a, b, c, d \quad (5)$$

$$S_{gi} = GJ_i, i : a, b, c, d \quad (6)$$

که E یانگ مدولوس، G مدول پیچشی، I ممان اینرسی و J ثابت پیچشی است و پارامترهای C₁ و C₂ از روابط ۷ و ۸ محاسبه می‌شوند:

$$C_1 = \frac{\frac{L_a(L_d - L_b)}{S_{ga}} + \frac{L_b(2L_d - L_b)}{2S_{eb}} + \frac{L_c L_d}{S_{gc}} + \frac{L_d^2}{2S_{ed}}}{\frac{L_a}{S_{ga}} + \frac{L_b}{S_{eb}} + \frac{L_c}{S_{gc}} + \frac{L_d}{S_{ed}}} \quad (7)$$

$$C_2 = \frac{\frac{L_a(2L_c + L_d)}{2S_{ea}} + \frac{L_c L_b}{S_{gb}} + \frac{L_c^2}{2S_{ec}}}{\frac{L_a}{S_{ea}} + \frac{L_b}{S_{gb}} + \frac{L_c}{S_{ec}} + \frac{L_d}{S_{gd}}} \quad (8)$$

فضای طراحی مطلوب که برای بهینه‌سازی پارامترهای عملکردی میکروفن در نظر گرفته شده است، مطابق جدول ۲ است که در واقع فضای هدف این طراحی است. فرکانس تشدید مطلوب بالای ۳۰ کیلوهرتز انتخاب شده است تا اطمینان حاصل شود که فرکانس تشدید میکروفن تحت تغذیه وارد محدوده شنیداری نخواهد شد.

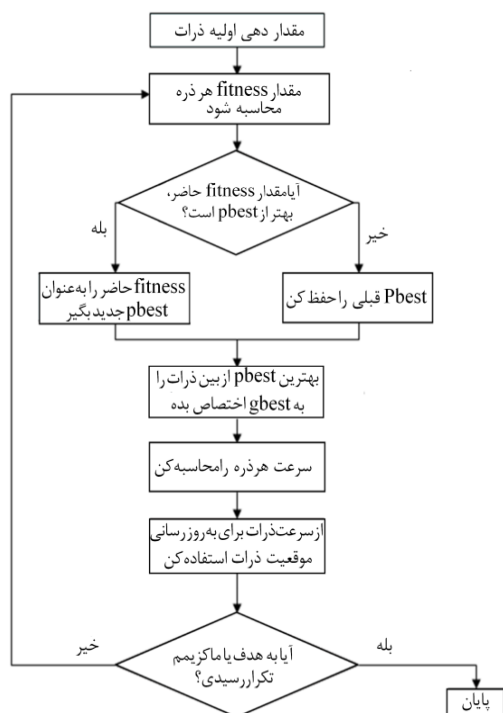
جدول ۲- محدوده‌ی مشخصات مطلوب برای بهینه‌سازی

ساختار میکروفن

اهداف مطلوب	میکروفن با دیافراگم قورباغه‌ای شکل
فرکانس تشدید (kHz)	F _r > ۳۰
حساسیت مکانیکی (nm/Pa)	S _m > ۱
ولتاژ کشش (V)	V _p < ۹

پارامتر عملکردی میکروفن است، باید تابع هدفی که تعریف می گردد شامل هر سه فاکتور فرکانس تشدید و حساسیت مکانیکی و ولتاژ کشش باشد. پس تابع هدف به صورت زیر تعریف میشود:

$$Z = \sqrt{a_1 Z_{-fr} + a_2 Z_{-sm} + a_3 Z_{-vp}} \quad (11)$$



شکل ۵- فلوجارت الگوریتم بهینه سازی تجمع ذرات

از روابط به دست آمده برای فرکانس تشدید، حساسیت مکانیکی و ولتاژ کشش در بخش ۲، به منظور نوشتن تابع هدف استفاده می شود. در واقع Z_{-fr} بخشی از تابع هدف برای بهینه سازی فرکانس تشدید است که به صورت رابطه ی زیر تعریف شده است:

$$Z_{-fr} = \sqrt{f_r - f_{r,desired}} \quad (12)$$

که کمترین مقدار فرکانس مطلوب و هدف است که مطابق جدول ۲ برابر با ۳۰ کیلوهرتز در نظر گرفته شده است و ضریب a_1 به گونه ای تعریف شده که اگر $f_r > f_{r,desired}$ باشد مقدار این ضریب برابر با صفر خواهد شد و در غیر این صورت یک می شود و Z_{-sm} بخشی از تابع هدف برای بهینه سازی حساسیت مکانیکی ساختار است که به صورت زیر تعریف می شود:

$$Z_{-sm} = \sqrt{S_m - S_{m,desired}} \quad (13)$$

که در آن S_i^k مکان ذره i ام در k امین تکرار است. بعد از شناخت از عملکرد و نحوه ی بهینه سازی این الگوریتم، به بیان گام به گام برنامه نویسی این الگوریتم می پردازیم که به صورت زیر می باشد:

گام اول) ابتدا n ذره با موقعیت های تصادفی مقداردهی می شوند.

گام دوم) مقدار سازگاری هر یک از ذرات، متناسب با تابع هدف تعریف شده، محاسبه می شود.

گام سوم) تا زمانی که به هدف یا ماکزیمم تکرار تعریف شده نرسد، گام های ۴ تا ۸ تکرار می شوند.

گام چهارم) مقدار سازگاری تمامی ذرات ارزیابی می شوند. تابع سازگاری به صورت میانگین قدر مطلق خطای نسبی تعریف می شود. هدف این روش کمینه کردن میزان خطا با انتخاب مقادیر مناسب از محدوده های تعیین شده در گام اول است.

گام پنجم) با ارزیابی و مقایسه میزان سازگاری تلاش های فعلی و قبلی هر ذره، بهترین تجربه شخصی ($pbest$) آن ذره تعیین می گردد.

گام ششم) با ارزیابی بهترین تجربه شخصی تمامی ذرات، بهترین آن به عنوان بهترین تجربه گروهی ($gbest$) در نظر گرفته می شود.

گام هفتم) موقعیت مکانی و سرعت ذرات از طریق روابط ۹ و ۱۰ به روز رسانی می شوند.

گام هشتم) بهترین تجربه از بین تمامی ذرات در $gbest$ ذخیره می شود.

گام نهم) پایان
شکل (۵) مراحل الگوریتم بهینه سازی تجمع ذرات را به صورت فلوجارت نشان می دهد.

۴-۱- تعیین تابع هدف برای بهینه سازی های پارامترهای عملکردی میکروفن

هدف از بهینه سازی حصول میکروفنی با بهترین عملکرد است. به منظور بررسی عملکرد میکروفن سه پارامتر اصلی (فرکانس تشدید، حساسیت مکانیکی و ولتاژ کشش) بررسی می شوند. بنابراین تابع هدف باید به گونه ای تعریف شود که در طراحی میکروفن بهینه هر سه پارامتر فوق بهبود یابند. مقدار سازگاری ذرات توسط ارزیابی تابع هدف مشخص می شود که هدف کمینه سازی آن است.

با توجه به این مسئله که در این کار هدف بهینه سازی سه

در نتیجه مقدار تابع هدف کمینه شود. با توجه به جدول ۴ مشاهده می‌شود که کاملاً به اهداف اولیه طراحی دست یافتیم و در نتیجه انتظار مقدار صفر برای تابع هدف را خواهیم داشت. در برنامه، بیشینه تعداد تکرارها در شبیه-سازی ۲۰۰ انتخاب شد و در تکرار ۸۲ به پاسخ بهینه (مقدار تابع هدف برابر با صفر) دست یافتیم.

در جدول ۳ مقادیر ابعاد بازوها برای طراحی میکروفن قورباغه‌ای شکل اولیه [۲۳] و بهینه شده توسط الگوریتم تجمع ذرات آورده شده است.

با استفاده از ساختار بهینه پیشنهادی توسط الگوریتم بهینه‌ساز تجمع ذرات به مقایسه مشخصات عملکردی میکروفن طراحی شده اولیه و میکروفن بهینه‌سازی شده خواهیم پرداخت. در واقع با استفاده از ابعاد بهینه‌ای ارائه شده در جدول ۳ و با استفاده از رابطه‌ی ۴ به محاسبه‌ی ثابت فنر ساختار بهینه می‌پردازیم و سپس با استفاده از رابطه‌ی ۱، فرکانس تشدید میکروفن محاسبه می‌شود که مقدار آن برابر ۳۷ کیلوهرتز به دست می‌آید، که شرط لازم برای عملکرد صحیح میکروفن است. چون اطمینان حاصل می‌شود که با ابعاد بهینه‌ی حاصله، فرکانس تشدید ساختار وارد محدوده‌ی شنیداری (زیر ۲۰ کیلوهرتز) نشده است. در مرحله‌ی بعد با استفاده از ثابت فنر محاسبه شده‌ی ساختار بهینه و روابط ۲ و ۳، به محاسبه ولتاژ کشش و حساسیت مکانیکی میکروفن می‌پردازیم که به ترتیب مقدار ولتاژ کشش میکروفن ۴/۶ ولت و مقدار حساسیت مکانیکی میکروفن ۱/۵۶ نانومتر بر پاسکال به دست آمد. سپس با استفاده از رابطه‌ی ۱۵ حساسیت مدار باز میکروفن (S_{oc}) محاسبه خواهد شد [۶]

جدول ۳- مقادیر ابعاد بازوهای میکروفن قورباغه‌ای اولیه و

بهینه

پارامترهای طراحی میکروفن	ساختار اولیه [۲۳]	ساختار بهینه شده
La (μm)	۳۵	۳۷/۵۹
Lb (μm)	۹۵	۱۴۷/۰۳۷۱
Lc (μm)	۸۵	۱۳۴/۳۵۲
Ld (μm)	۲۵	۲۲/۴۷۴۵
Wa (μm)	۸۰	۲۵/۴۳۷۴
Wb (μm)	۲۰	۲۲/۵۹
Wc (μm)	۲۰	۱۷/۴۷۴۵
Wd (μm)	۷۰	۲۰/۶۴۸

$S_{m,desired}$ کمترین مقدار حساسیت مکانیکی مطلوب است که مطابق جدول ۲ برابر با ۱ نانومتر بر پاسکال انتخاب شده است و ضریب a_2 به گونه‌ای تعریف شده که اگر $S_m > S_{m,desired}$ باشد مقدار این ضریب برابر با صفر خواهد شد و در غیر اینصورت یک می‌شود و Z_{-vp} بخشی از تابع هدف برای بهینه‌سازی ولتاژ کشش است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Z_{-vp} = \sqrt{V_p - V_{p,desired}} \quad (14)$$

$V_{p,desired}$ حداکثر مقدار ولتاژ کشش مطلوب است که مطابق جدول ۲ برابر با ۹ ولت در نظر گرفته شده است و ضریب a_3 به گونه‌ای تعریف شده است که اگر $V_p < V_{p,desired}$ باشد مقدار این ضریب برابر با صفر خواهد شد و در غیر اینصورت یک می‌شود. بنابراین الگوریتم بهینه‌ساز تجمع ذرات قادر خواهد بود با توجه به مقادیر متغیرهای اصلی ساختار بازوها، مقدار تابع هدف (Z) را کمینه سازد. در واقع خروجی این الگوریتم، شامل طراحی ابعاد بازوهای میکروفن است در حالی که فرکانس تشدید ساختار از بازه‌ی مطلوب خارج نگردد و مقدار حساسیت آن از حد مطلوب تعیین شده بیشتر و ولتاژ کشش آن از حد مطلوب تعیین شده کمتر باشد.

۵- بحث و بررسی نتایج

در بحث طراحی، رسیدن به یک نقطه‌ی بهینه به منظور مصالحه بین پارامترهای عملکردی مختلف، امری ضروری خواهد بود. به طور کلی مقدار سازگاری ذرات توسط ارزیابی تابع هدف مشخص می‌شود، که هدف مینیمم‌سازی آن می‌باشد. مشخصات مطلوبی که برای بهینه‌سازی پارامترهای عملکردی میکروفن‌ها در نظر گرفته شده است، مطابق جدول ۲ است. با استفاده از محدوده‌ی مشخصات مطلوب نشان داده شده در جدول ۲ و تابع هدف ارائه شده در رابطه‌ی ۱۱، در واقع سعی در بهینه‌سازی همزمان فرکانس تشدید، ولتاژ کشش و حساسیت مکانیکی میکروفن است. پس الگوریتم تجمع ذرات ابعاد میکروفن با عملکرد بهینه را نتیجه می‌دهد.

با توجه به تعریفی که برای تابع Z در رابطه ۱۱ انجام شد، ضرایب (a_1, a_2, a_3) را به گونه‌ای تعریف کردیم که در صورت رسیدن به اهداف طراحی در محدوده مورد نظر (جدول ۲)، مقادیر این ضرایب به مقدار صفر همگرا شود و

۵-۱- مقایسه ساختار بهینه شده با سایر کارها

به منظور بررسی عملکرد میکروفن با ابعاد بهینه شده به مقایسه پارامترهای عملکردی آن با سایر کارهای انجام شده می‌پردازیم. با توجه به این مسئله که میکروفن‌های مختلف با اهداف متفاوتی همچون کاهش ولتاژ پولین یا افزایش حساسیت یا افزایش پهنای باند و یا کوچک کردن ابعاد طراحی شده‌اند، به منظور حصول یک مقایسه عادلانه بین میکروفن‌های مختلف نیاز به تعریف یک ضریب شایستگی است، که تمامی این پارامترها را در برگیرد.

تمامی پارامترها (پهنای باند، حساسیت مدار باز، ولتاژ تغذیه و مساحت دیافراگم) در مصالحه با یکدیگر هستند و در نتیجه طرحی که منجر به حصول میکروفنی با ضریب شایستگی بالاتر گردد، مطلوب‌تر خواهد بود. به منظور مقایسه‌ی عملکرد میکروفن‌های مختلف، پارامتر ضریب شایستگی (FOM) میکروفن را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$FOM = \frac{f_r \cdot S_{o.c}}{V_b \cdot A_d} \quad (17)$$

که در رابطه فوق f_r معرف فرکانس رزونانس، $S_{o.c}$ حساسیت مدار باز، V_b ولتاژ تغذیه اعمالی به میکروفن و A_d مساحت دیافراگم است. در جدول ۵ به مقایسه‌ی عملکرد میکروفن قورباغه‌ای با ابعاد بهینه شده پیشنهادی و برخی از میکروفن‌های خازنی ساخته شده تا به امروز می‌پردازیم.

جدول ۵- مقایسه عملکرد میکروفن قورباغه بهینه شده با سایر

کارها

مراجع	A (mm ²)	f _r (kHz)	V _b (V)	Soc (mV/Pa)	FOM
[۶]	۲/۸۳۵	۲۰	۱۲	۳/۰۹	۵/۷
[۱۶]	۰/۱۶۶	۱۷۸	۹/۳	۰/۳۹	۴۴/۹۷
[۱۹]	۰/۵۰۲	۱۰	۶	۷/۹۴	۲۶/۳۲
[۲۰]	۰/۱۴۴	۷۰	۵	۳/۱۶	۳۰۶/۴
[۳۳]	۰/۰۹	۹۰	۵	۱/۳۳	۲۶۶
[۳۴]	۰/۰۹	۶۰	۵	۲/۴۶	۳۲۸
ساختار جدید	۰/۰۹	۳۷/۳	۲/۷۷	۴/۳۵	۶۵۰

همان‌طور که در جدول ۵ نشان داده شده است، میکروفن قورباغه‌ای با ساختار بهینه شده، دارای عملکرد بسیار مطلوبی است و بهترین ضریب شایستگی را نسبت به میکروفن‌های دیگر دارد.

$$S_{OC} = S_m \cdot S_e \quad (15)$$

S_e میکروفن است که به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$S_e = \frac{V_b}{d} \quad (16)$$

که d مقدار شکاف هوایی اولیه و V_b ولتاژ تغذیه اعمالی به میکروفن است. در واقع حساسیت الکتریکی با ولتاژ تغذیه افزایش می‌یابد. از طرفی ولتاژ تغذیه را نمی‌توان بدون محدودیت افزایش داد، چون در ولتاژ کشش دیافراگم به طور کامل فرو می‌ریزد و علاوه بر این در بسیاری از کاربردهای ولتاژ پایین، استفاده از ولتاژ تغذیه کم ارجحیت خواهد داشت. به منظور اِیمنی در عملکرد و ماکزیمم کردن حساسیت الکتریکی، ولتاژ تغذیه باید به گونه‌ای انتخاب شود که حاصل جمع ولتاژ تغذیه و ماکزیمم دامنه‌ی ولتاژ ورودی از ولتاژ کشش تجاوز نکند. بنابراین ولتاژ تغذیه بهینه حدود ۶۰ درصد ولتاژ کشش انتخاب می‌شود [۱۸] که با استفاده از رابطه‌ی ۱۵، مقدار حساسیت مدار باز میکروفن حدود ۴/۳ میلی‌ولت بر پاسکال به دست آمد. در جدول ۴ به مقایسه عملکرد میکروفن با دیافراگم قورباغه‌ای شکل اولیه و بهینه شده پرداخته‌ایم. همان‌طور که مشاهده می‌شود با انتخاب بهینه پارامترهای طراحی حساسیت مکانیکی ساختار حدود ۴ برابر و حساسیت مدار باز به ۲ برابر ساختار قبلی افزایش یافته است و مقدار ولتاژ کشش تقریباً به نصف کاهش یافته است. همان‌طور که اشاره شده است به غیر از ابعاد بازوها تمامی پارامترهای اصلی ساختار ثابت فرض شده‌اند و این مسئله مبین این مطلب خواهد بود که تنها با تنظیم بهینه طول و عرض بازوها می‌توان به میکروفنی با مشخصات عملکردی به مراتب بهتر دست یافت.

جدول ۴- مقایسه عملکرد میکروفن پیشنهادی با ساختار اولیه

و ساختار بهینه شده

میکروفن قورباغه‌ای شکل	فرکانس تشدید (kHz)	حساسیت مکانیکی (nm/Pa)	ولتاژ کشش (V)	حساسیت مدار باز در ۶۰ درصد (mV/Pa)
ساختار اولیه [۲۳]	۷۳/۷۴	۰/۴۰	۹/۱۳	۲/۲۰
ساختار بهینه شده	۳۷/۳۰	۱/۵۷	۴/۶۲	۴/۳۵

۶- نتیجه گیری

آزادی عمل بیشتری در طراحی میکروفن خواهیم داشت که منجر به حصول ساختاری با عملکرد به مراتب بهتر خواهد شد. البته شناخت همه جانبه از فضای مسئله و تعریف صحیحی از تابع هدف، نقش مهمی در فرآیند بهینه سازی خواهد داشت. با استفاده از ابعاد بهینه‌ی حاصل شده از الگوریتم، در واقع حساسیت مکانیکی ساختار حدود ۴ برابر شده است و مقدار ولتاژ کشش، تقریباً به نصف کاهش یافته است. مشاهده می‌شود که میکروفن با ساختار بهینه شده دارای عملکرد مطلوبی نسبت به دیگر میکروفن‌های طراحی شده تا به امروز است.

در این مقاله سعی شده است با استفاده از الگوریتم بهینه سازی تجمع ذرات و انتخاب پارامترهای طراحی مناسب و تعیین تابع هدف سه منظوره ابعاد ساختاری میکروفن خازنی قورباغه‌ای شکل را تا حد ممکن به گونه‌ای اصلاح کنیم که مقدار پارامترهای عملکردی بهینه شوند. در واقع ابعاد اولیه‌ی طراحی میکروفن با استفاده از روش‌های تقریبی و یک سری مفروضات اولیه به منظور ساده سازی محاسبات به دست آمده بودند. در حالی که با استفاده از الگوریتم تجمع ذرات به عنوان یک الگوریتم بهینه‌ساز قوی

مراجع

- [1] W. Kronast, B. Muller, W. Siedel, A. Stoffel, "Single-chip condenser microphone using porous silicon as sacrificial layer for the air gap", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 87, No. 3, 2001, pp. 188–193.
- [2] S. Horowitz, T. Nishida, L. Cattafesta, M. Sheplak, "Development of a micro machined piezoelectric microphone for aeroacoustics applications", *the journal of the acoustical society of America*, Vol. 122, No. 6, 2007, pp. 3428–3436.
- [3] W.S. Lee, S.S. Lee, "Piezoelectric microphone built on circular diaphragm", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 144, No. 2, 2008, pp. 367–373.
- [4] G. Li, Y. Zohar, and M. Wong, "Piezoresistive microphone with integrated amplifier realized using metal-induced laterally crystallized polycrystalline silicon", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 14, No. 10, 2004, pp. 1352–1358.
- [5] J. Bay, O. Hansen, S. Bouwstra, "Micromachined double backplate differential capacitive microphone", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 9, No. 1, 1999, pp. 30–33.
- [6] Z.Z. Shu, M.L. Ke, G.W. Chen, R.H. Horng, et al., "Design And Fabrication of Condenser Microphone Using Wafer Transfer And Micro-electroplating Technique", *Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS Symposium*, 2008, pp. 386–390.
- [7] M.D. Williams, "Development of A MEMS Piezoelectric Microphone for Aero acoustic Applications", Ph.D. dissertation, University of Florida, 2011.
- [8] G. Li, Y. Zohar, and M. Wong, "Piezoresistive microphone with integrated amplifier realized using metal-induced laterally crystallized polycrystalline silicon", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 14, No. 10, 2004, pp. 1352–1358.
- [9] J. Bergqvist, J. Gobet, "Capacitive microphone with a surface micromachined backplate using electroplating technology", *Journal of Micro electro mechanical Systems*, Vol. 3, No. 2, 1994, pp. 69–75.
- [10] A. Torkkeli, O. Rusanen, J. Saari lahti, H. Seppa, H. Sipola, J. Hietanen, "Capacitive microphone with low-stress polysilicon membrane and high-stress polysilicon backplate", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 85, Nos. 1–3, 2000, pp. 116–123.
- [11] A.E. Kabir, R. Bashir, J. Bernstein, J.D. Santis, R. Mathews, J.O. O'Boyle, C. Bracken; "High sensitivity acoustic transducers with thin p+ membrane and gold backplate", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 78, Nos. 2–3, 1999, pp. 138–142.
- [12] T. Tajima, T. Nishiguchi, S. Chiba, A. Morita, M. Abe, "High-performance ultra-small single crystalline silicon microphone of an integrated structure", *Microelectronic Engineering*, Vols. 67–68, 2003, pp. 508–519.
- [13] W. Kronast, B. Muller, W. Siedel, and A. Stoffel, "Single-Chip Condenser Microphone Using Porous Silicon as Sacrificial Layer for the Airgap", *The 11th Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems* 98, 1998, pp. 591–596.

- [14] N. Kimori, Y. Kumai, Sh. Hishinuma, T. Ikehara, "Ten-micrometer-thick Silicon Diaphragm Used in Condenser Microphone", *Key Engineering Materials*, Trans Tech Publications, Vol. 538, 2013, pp. 277–280.
- [15] J. Bay, O. Hansen, and S. Bouwstra, "Design of a silicon microphone with differential read-out of a sealed double parallel-plate capacitor", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 53, Nos. 1–3, 1996, pp. 232–236.
- [16] D.T. Martin, J. Liu, K. Kadirvel, R.M. Fox, M. Sheplak, T. Nishida, "A Micromachined Dual-Backplate Capacitive Microphone for Aeroacoustic Measurements", *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 16, No. 6, 2007, pp. 1289–1302.
- [17] P. R. Scheeper, B. Nordstrand, J. O. Gullov, B. Liu, T. Clausen, L. Midjord, "A New Measurement Microphone Based on MEMS Technology", *Journal of Microelectromechanical Systems* Vol. 12, No. 6, 2003, pp. 880–891.
- [18] B.A. Ganji, B.Y. Majlis, "Design and fabrication of a new MEMS capacitive microphone using a perforated aluminum diaphragm", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 149, No. 1, 2009, pp. 29–37.
- [19] C.H. Huang, C.H. Lee, T.M. Hsieh, L.Ch. Tsao, Sh. Wu, et al., "Implementation of the CMOS MEMS Condenser Microphonewith Corrugated Metal Diaphragm and Silicon Back-Plate", *Sensors*, Vol. 11, No. 6, 2011, pp.6257–6269.
- [20] B.A. Ganji, S. Babaei Sedaghat, A. Roncaglia, L. Belsito, "Design and fabrication of high performance condenser microphone using C-slotted diaphragm", *Microsystem Technologies*, Vol. 24, 2018, pp. 3133–3140.
- [21] N. Mohamad, P. Iovenitti, T. Vinay, "High sensitivity capacitive MEMS microphone with spring supported diaphragm – art. no. 68001T", In: *Proceedings of SPIE—the international society for optical engineering*, Vol. 6800, 2008.
- [22] B.A. Ganji, B.Y. Majlis, "Slotted capacitive microphone with sputtered aluminum diaphragm and photo resist sacrificial layer", *Micro System Technologies*, Vol. 16, 2010, pp. 1803–1809.
- [23] S.B. Sedaghat, B.A. Ganji, and R. Ansari, "Design and modeling of a frog-shape MEMS capacitive microphone using SOI technology", *Microsystem Technologies*, Vol. 24, 2018, pp. 1061–1070.
- [۲۴] سید مرتضی جوادپور، سعید فراهت و حسام الدین ابن الدین، "بهینه سازی یک دیفیووزر تونل باد مافوق صوت با دیواره های انعطاف پذیر با کمک الگوریتم ژنتیک"، *مجله مدل سازی در مهندسی دانشگاه سمنان*، دوره ۱۰، شماره ۲۸، بهار ۱۳۹۱، صفحه ۱۹–۲۹.
- [۲۵] صابر ارمغانی، نیما امجدی، "توزیع بار اقتصادی با در نظر گرفتن آلودگی در سیستم های قدرت چندناحیه ای با استفاده از الگوریتم بهینه سازی فاخته"، *مجله مدل سازی در مهندسی دانشگاه سمنان*، دوره ۱۲، شماره ۳۷، زمستان ۱۳۹۳، صفحه ۸۹–۱۰۴.
- [۲۶] روح الله مقصودی، یعقوب حیدری، بهزاد مشیری، "یک تحلیل مقایسه‌ای از الگوریتم‌های هوش جمعی کلونی زنبور مصنوعی و بهینه سازی ذرات در طراحی یک کنترل کننده PID فازی کسری و پیاده‌سازی آن بر روی موتور DC"، *مجله مدل سازی در مهندسی دانشگاه سمنان*، دوره ۱۱، شماره ۳۵، زمستان ۱۳۹۲، صفحه ۱۱–۲۳.
- [۲۷] حسین شریف زاده، نیما امجدی، "توزیع بهینه توان راکتیو با استفاده از الگوریتم بهینه سازی دسته ذرات"، *مجله مدل سازی در مهندسی دانشگاه سمنان*، دوره ۷، شماره ۱۸، پاییز ۱۳۸۸، صفحه ۶۷–۷۳.
- [28] J. Miao, R. Lin, L. Chen, Q. Zou, S.Y. Lim, S.H. Seah, "Design considerations in micromachined silicon microphones", *Microelectronic Journal*, Vol. 33, Nos. 1–2, 2002, pp. 21–28.
- [29] P.R. Scheeper, A.G.H. Vanderdonk, W. Olthuis, P. Bergveld, "Fabrication of Silicon Condenser Microphones Using Single Wafer Technology", *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 1, No. 3, 1992, pp. 147–154.
- [30] P.R. Scheeper, W. Olthuis and P. Bergveld, "Improvement of the performance of microphones with a silicon nitride diaphragm and backplate", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 40, No. 3, 1994, pp. 179–186.
- [31] A. Arora, A. Arora, V.K. Dwivedi, et al., "Zinc oxide thin film-based MEMS acoustic sensor with tunnel for pressure compensation", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 141, No. 2, 2008, pp. 256–261.
- [32] P.C. Hsu, C.H. Mastrangelo, K.D. Wise, "A high density poly-silicon diaphragm condenser microphone", *Conference Record IEEE 11th International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*, IEEE, 1998, pp. 580–585.

[33] B.A. Ganjia, S. Babaei Sedaghat, Alberto Roncaglia, etc, "Design, modeling, and fabrication of crab-shape capacitive microphone using silicon-on-isolator wafer," Journal of Micro/Nanolithography MEMS, and MOEMS, Vol. 17, No. 1, 2018, pp. 015002-9.

[34] B.A. Ganjia, S. Babaei Sedaghat, A. Roncaglia, et al., "Design and fabrication of very small MEMS microphone with silicon diaphragm supported by Z-shape arms using SOI wafer", Solid-State Electronics, Vol. 148, 2018, pp. 27–34.