



حسگر مگنتوالکتریک بر پایه جفت شدگی لایه نازک آلیاژ گالفنول طرحدار شده و آلومینیم نیترید

میثم حق پرست^۱، محمدمهدی طهرانچی^{۱*}، سیده مهری حمیدی^۱

۱. پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، تهران
۲. دانشکده فیزیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

چکیده: حسگرهای میدان مغناطیسی برپایه ساختارهای مغناطوالکتریک کاربردهای مختلفی در صنایع از قبیل حسگرهای زیستی می‌توانند داشته باشند. با استفاده از شبیه‌سازی بر پایه روش المان محدود، می‌توان حسگرهایی با فرکانس کاری و حساسیت مناسب طراحی کرد که مسیر را برای ساخت حسگرهای بیومغناطیسی هموار می‌کند. در همین راستا در این مقاله به منظور کنترل مغناطش اشباع و ذخیره نفوذ پذیری از ساختارهای مغناطوالکتریک بر پایه نانوساختار طرحدار شده آلیاژ گالفنول به عنوان لایه مغناطوتنگش و آلومینیم نیترید به عنوان لایه پیزوالکتریک استفاده کردیم. ساختار طراحی شده بصورت تیرکی بوده و دارای ضریب مغناطوالکتریک 5850 V/cm.Oe در فرکانس تشدید $3051/9$ هرتز بوده و توانایی اندازه‌گیری میدان مغناطیسی در محدوده یک پیکوتسلا دارد.

واژگان کلیدی: حسگر میدان مغناطیسی، ضریب مغناطوالکتریک، اثر مغناطوتنگش، روش المان محدود، آلیاژ گالفنول

*Tehranchi@sbu.ac.ir

فرومغناطیس، فری‌مغناطیس، دیامغناطیس و پارامغناطیس تقسیم کرد [۷].

در بین این مواد، فرومغناطیس‌ها مغناطش خودبخود داشته و می‌توان با اعمال میدان مغناطیسی خارجی این مغناطش را کنترل نمود. از طرفی مواد فرومغناطیس خاصیت مغناطوتنگش نیز از خود نشان می‌دهند و با اعمال یک میدان مغناطیسی خارجی، تغییر طول یا حجم در این مواد دیده می‌شود. این خاصیت یک اثر جفت‌کننده بین انرژی مغناطیسی و مکانیکی بوده و در برخی مواد فرومغناطیس درصد بزرگتری نسبت به بقیه مواد دارد. خاصیت مغناطوتنگش با افزایش میدان مغناطیسی خارجی، تا زمانی که ماده به مغناطش اشباع برسد افزایش یافته و پس از آن تغییری در مقدار مغناطوتنگشی ماده دیده نمی‌شود. در

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، حسگرها و به ویژه حسگرهای میدان مغناطیسی کاربرد گوناگونی در صنایع مختلف از قبیل پزشکی، هوافضا، صنایع ارتباطی و گوشی‌های هوشمند پیدا کرده‌اند [۵-۱]. با کوچک‌سازی حسگرها و استفاده آنها به عنوان سیستم‌های میکرو الکترومکانیکی و نانو الکترومکانیکی و همچنین کاهش هزینه ساخت و نگهداری آنها، می‌توان گستره استفاده از آنها را افزایش داد [۶]. برای ساخت حسگرهای میدان مغناطیسی، شناخت کافی از مواد مغناطیسی و رفتار آنها در مقابل میدان مغناطیسی الزامی است. این مواد را طبق پاسخگویی به میدان مغناطیسی خارجی می‌توان به فازهای فرومغناطیس، آنتی

می‌رسد. میزان میدان مورد نیاز برای رسیدن به مغناطش اشباع در این ماده و همچنین مواد دیگر، به ضخامت آنها وابستگی مستقیم دارد که می‌توان با کم کردن آن در ابعاد نانو و همچنین طرح دار کردن آن، به این مهم دست یافت. از سوی دیگر آلومینیم نیتريد با توجه خاصیت پیزوالکتریکی بالا، پایداری شیمیایی و لایه نشانی راحت برای کارهای تجربی به عنوان ماده پیزوالکتریک انتخاب شد. این حسگر قابلیت استفاده در دمای اتاق را دارا بوده و به عنوان حسگر فوق حساس به میدان مغناطیسی، از توانایی حسگری میدان های نانوتسلا تا پیکوتسلا در فرکانس تشدید الکترومکانیکی برخوردار است.

۲- محاسبات و مدل سازی

بطور کلی ساختارهای مغناطوالکتریک شامل دو بخش مغناطوتنگش و پیزوالکتریک می باشند که به صورت های مختلف یک جفت شدگی بین آنها وجود دارد. یکی از این جفت شدگی ها، جفت شدگی از طریق کرنش بین آنها است.

با توجه به اینکه این ساختارها، میدان مغناطیسی اعمالی را به میدان الکتریکی تبدیل می کنند، می توان ضریب مغناطوالکتریک را به صورت زیر تعریف کرد [۱۵]:

$$\alpha_{ME} = \frac{\partial E}{\partial H} \quad (1)$$

در این رابطه، α_{ME} ضریب مغناطوالکتریک، H میدان مغناطیسی اعمالی و E میدان الکتریکی به وجود آمده در ساختار است. در این ساختارها با اعمال میدان مغناطیسی خارجی، یک کرنش در لایه مغناطوتنگش به وجود می آید. این کرنش با انتقال به لایه پیزوالکتریک باعث ایجاد فشار در آن شده و یک جریان الکتریکی را تولید می کند. انتقال کرنش از لایه مغناطوتنگش به لایه پیزوالکتریک دارای ضریبی بین صفر تا یک بوده و ضریب جفت شدگی نام دارد.

با در نظر گرفتن ماتریس جفت شدگی پیزوالکتریک (g)، ماتریس جفت شدگی مغناطوتنگش (d)، و ضریب جفت شدگی بین این دو لایه (k)، می توان ضریب مغناطوالکتریک را بصورت زیر تعریف کرد:

مواد فرومغناطیس، مغناطش اشباع ناحیه ای از نمودار پسماند است که با افزایش شدت میدان مغناطیسی اعمالی، چگالی مغناطیسی تقریباً ثابت می ماند [۸].

حسگرهای میدان مغناطیسی AC با دقت اندازه گیری زیاد و همچنین، قابلیت انتخاب فرکانس برای برخی از سیستم ها بسیار با اهمیت هستند که می توان این حسگرها را با استفاده از قابلیت مغناطوالکتریک طراحی کرد. این نوع حسگرها دارای ساختارهای متنوعی هستند که ساختار لایه ای ۲-۲ بهترین نوع آنها بوده و از ضریب مغناطوالکتریک بالایی برخوردار است، همچنین طراحی و ساخت آن نسبت به انواع دیگر آسان می باشد [۹]. این ساختارها از دو قسمت مغناطوتنگش و پیزوالکتریک تشکیل می شوند، در نتیجه سه فاکتور ضریب مغناطوتنگش بزرگ، ضریب پیزوالکتریک بزرگ و جفت شدگی مناسب بین این دو قسمت از اهمیت بالایی برخوردار است [۱۰].

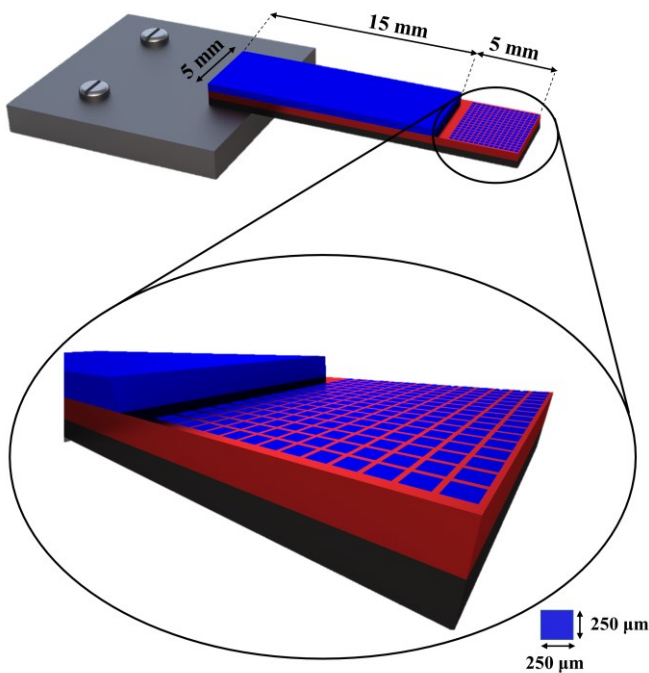
از بهترین موادی که قابلیت مغناطوتنگشی بالایی داشته و همچنین به عنوان لایه نازک می توان از آن استفاده کرد آلیاژ گالفنول با ساختار $Fe_{0.83}Ga_{0.17}$ است. همچنین آلومینیم نیتريد و تیتانات زیرکونات سرب از جمله بهترین مواد پیزوالکتریک هستند که قابلیت استفاده در سیستم های میکرو و نانو الکترومکانیکی را دارند [۱۱ و ۱۲].

تنش مکانیکی عامل جفت شدگی در ساختارهای مغناطوالکتریک است، در نتیجه می توان با استفاده از فرکانس تشدید الکترومکانیکی باعث افزایش حساسیت این حسگرها شد [۱۳].

به منظور استفاده از این نوع حسگرها به عنوان حسگرهای زیستی و سیستم های مغزنگاری، این حسگرها را بصورت تیرک طراحی کردیم تا فرکانس کاری آن را کاهش دهیم. در حسگرهای تیرکی شکل، زمانی که فرکانس میدان اعمالی به حسگر، برابر با فرکانس ذاتی حسگر شود، حسگر شروع به نوسان می کند و در نتیجه دامنه و ولتاژ خروجی از حسگر به بیشینه مقدار خود می رسد. این فرکانس ذاتی به عواملی از قبیل هندسه ساختار، چگالی مواد، طول تیرک وابسته است [۱۴].

با توجه به مطالب فوق، ما از روش المان محدود برای طراحی حسگر مغناطوالکتریک بر پایه آلیاژ گالفنول و آلومینیم نیتريد استفاده کردیم. آلیاژ گالفنول دارای ثابت مغناطوتنگش بالایی بوده و در میدان مغناطیسی با شدت پایین، به مغناطش اشباع

مغناطوتنگش از یک بخش با ابعاد $15 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ و ضخامت $500 \mu\text{m}$ و بخش دیگر بصورت طرحدار تشکیل شده است. بخش طرحدار از 224 سلول واحد با طول و عرض $250 \mu\text{m}$ و ضخامت 100 nm تشکیل یافته که هر یک از این سلول ها فاصله 50 میکرومتری از سلول دیگر دارد (شکل ۱).



شکل ۱: حسگر مغناطوالتکریک شبیه سازی شده با لایه های مغناطوتنگش (آبی)، پیزوالتکریک (قرمز) و زیر لایه سیلیکون (خاکستری)

مدل مورد نظر شامل یک جفت کویل هلمهولتز برای ایجاد میدان مغناطیسی AC، الکترومگنت برای ایجاد میدان مغناطیسی DC، و بخش حسگر است که همگی داخل یک جعبه هوا قرار دارند. جعبه هوا به منظور شبیه سازی یک محیط طبیعی و مرز محدود برای شبیه سازی حسگر و اعمال میدان مغناطیسی در نظر گرفته شده است.

با اعمال میدان مغناطیسی DC لایه مغناطوتنگش تغییر ابعاد داده و طبق این نکته که سه لایه مغناطوتنگش، پیزوالتکریک و سیلیکون بصورت ساختار ساندویچ شده هستند و خواص مکانیکی مختلف دارند، یک خمش در حسگر بوجود می آید.

مواد مغناطوتنگش یک پاسخ غیرخطی به میدان مغناطیسی اعمالی از خود نشان می دهند، این پاسخ با توجه به مشخصات

$$\alpha_{ME} = g \cdot k \cdot d \quad (2)$$

با مقایسه روابط ۱ و ۲ می توان رابطه ۳ را بدست آورد:

$$\Delta E = g \cdot k \cdot d \cdot \Delta H \quad (3)$$

با در نظر گرفتن اینکه ولتاژ ایجادی در صفحات خازنی تخت به ضخامت t برابر با $\Delta U = t \cdot \Delta E$ است، طبق روابط ۲ و ۳، رابطه ۴ بدست می آید:

$$\Delta U = \alpha_{ME} \cdot t \cdot \Delta H \quad (4)$$

طبق این رابطه، اساس کار حسگرهای مغناطوالتکریک اندازه گیری ولتاژ ایجاد شده در لایه پیزوالتکریک توسط میدان مغناطیسی خارجی است. با اعمال یک ΔH و اندازه گیری ولتاژ، α_{ME} ساختار بدست می آید، سپس با مشخص شدن ضریب مغناطوالتکریک، می توان با اندازه گیری ولتاژ ایجاد شده توسط لایه پیزوالتکریک، میدان مغناطیسی مجهول را محاسبه کرد.

رفتار ساختارهای مغناطوالتکریک تحت تاثیر میدان مغناطیسی خارجی را نمی توان دقیقاً پیش بینی کرد، به خصوص اگر حسگر از نظر ساختار و مواد پیچیده باشد. همچنین ایجاد تمام ساختارهای ممکن با تمام مواد قابل استفاده بسیار پرهزینه و زمان بر است. به همین دلیل می توان از شبیه سازی های قابل اعتماد برای یافتن بهترین ترکیبات در مواد و هندسه ساختار استفاده کرد.

نرم افزار مولتی فیزیک کامسول، با استفاده از روش المان محدود، یک مجموعه سه بعدی را فراهم می کند که طبق آن می توان حسگر مورد نظر را شبیه سازی کرد. با توجه به ساختار حسگرهای مغناطوالتکریک، نیازمند شبیه سازی دو بخش مغناطوتنگش و پیزوالتکریک، و ترکیب این دو بخش بصورت جفت شدگی از طریق کرنش هستیم. حسگر شبیه سازی شده متشکل از لایه سیلیکون به عنوان زیر لایه و آلومینیم نیتريد به عنوان پیزوالتکریک با ابعاد $20 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ و ضخامت $500 \mu\text{m}$ در نظر گرفته شد. آلیاژ گالفنول نیز به عنوان لایه

کویل هلمهولتز اعمال شده و یک کرنش در لایه مغناطوتنگش ایجاد می‌کند، با انتقال این کرنش به لایه پیزوالکتریک، یک ولتاژ الکتریکی از این لایه بدست می‌آید. با استفاده از این ولتاژ و طبق رابطه ۴، ضریب مغناطوالکتریک محاسبه می‌شود.

برای شبیه سازی لایه پیزوالکتریک از ماژول‌های حالت جامد و الکترواستاتیک استفاده شده و طبق روابط ۷ و ۸، جفت شدگی تنش-بار در این لایه محاسبه شد.

$$S = cT - eE \quad (7)$$

$$D = eT + \epsilon E \quad (8)$$

در این روابط، E میدان الکتریکی، D میدان جابجایی الکتریکی، S تنش مکانیکی، T کرنش مکانیکی، c ماتریس الاستیسیته فاز پیزوالکتریک، e ماتریس جفت شدگی پیزوالکتریک و E گذردهی الکتریکی است. ماده پیزوالکتریک استفاده شده در این شبیه سازی آلومینیم نیتريد بوده و مشخصات آن در جدول ۲ ذکر شده است. همچنین از سیلیکون به عنوان زیرلایه با مشخصاتی که در جدول ۳ بیان شده است، استفاده شد.

جدول ۲: مشخصات آلومینیم نیتريد استفاده شده برای شبیه سازی [۱۷]

مشخصات	مقادیر
چگالی	$3300 \text{ (kg.m}^{-3}\text{)}$
گذردهی نسبی	۹ (۱)
ماتریس پیزوالکتریک	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -0.48 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.48 & 0 & 0 \\ -0.58 & -0.58 & 1.55 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{C/m}^2$
ماتریس سختی	$\begin{bmatrix} 410 & 149 & 99 & 0 & 0 & 0 \\ 149 & 410 & 99 & 0 & 0 & 0 \\ 99 & 99 & 389 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 125 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 125 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 130 \end{bmatrix} \text{GPa}$

روش المان محدود یک روش محاسبات عددی معادلات دیفرانسل است که نیازمند گسسته سازی و مش بندی جسم مورد نظر است.

ماده و ماتریس‌های داده شده به نرم افزار کامسول، از طریق روش المان محدود محاسبه می‌شود.

با بدست آوردن این پاسخ، با اعمال یک میدان مغناطیسی DC بایاس، ساختار را به حساس‌ترین منطقه نسبت به میدان مغناطیسی می‌بریم. در این ناحیه که بیشترین شیب نمودار را دارد، با کمترین تغییرات میدان مغناطیسی، بیشترین تغییر در مغناطوتنگش ماده را بدست می‌آوریم. با استفاده از ماژول‌های حالت جامد و مغناطوتنگش، و طبق روابط ۵ و ۶، نمودار تغییرات مغناطوتنگش نسبت به میدان مغناطیسی خارجی را برای ماده بدست می‌آوریم.

$$S = cT - qH \quad (5)$$

$$B = qT + \mu_0 \mu_r H \quad (6)$$

در این روابط، H میدان مغناطیسی خارجی، B چگالی شار مغناطیسی، S تنش مکانیکی، T کرنش مکانیکی، c ماتریس سختی فاز مغناطوتنگش، q جفت شدگی پیزومغناطیس، μ_r نفوذپذیری مغناطیسی نسبی و μ_0 نفوذپذیری مغناطیسی در خلا است.

ماده مغناطوتنگش مورد استفاده آلیاژ گالفنول بوده و مشخصات آن در جدول ۱ ذکر شده است.

جدول ۱: مشخصات آلیاژ گالفنول استفاده شده برای شبیه سازی [۱۶و۱۲]

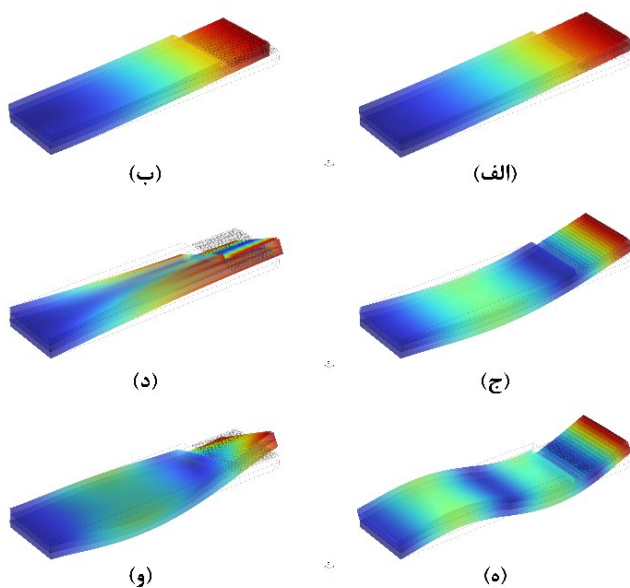
مشخصات	مقادیر (واحد)
چگالی	$7800 \text{ (kg.m}^{-3}\text{)}$
نفوذپذیری نسبی	۷۵ (۱)
مغناطش اشباع	۲۵ (mT)
مغناطوتنگش	۲۰۰ (ppm)
ثابت پیزومغناطیس	$20 \text{ (nm.A}^{-1}\text{)}$
ماتریس سختی	$\begin{bmatrix} 196 & 156 & 156 & 0 & 0 & 0 \\ 156 & 196 & 156 & 0 & 0 & 0 \\ 156 & 156 & 196 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 123 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 123 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 123 \end{bmatrix} \text{GPa}$

با اعمال میدان مغناطیسی DC بایاس، و رسیدن به حساس‌ترین منطقه نمودار مغناطوتنگش، یک میدان مغناطیسی AC توسط

مورد نظر بصورت تیرکی طراحی گشته و فرکانس تشدید توسط میدان مغناطیسی AC به آن اعمال شد.

۳- نتایج و بحث

ابتدا فرکانس تشدید ساختار توسط ماژول‌های حالت جامد و ویژه فرکانس‌ها، محاسبه شد. شش فرکانس تشدید نخست، همانگونه که در شکل ۳ مشخص است، بدست آمد.



شکل ۳: فرکانس‌های تشدید ساختار مغناطوالکتریک، الف) ۳۰۵۱/۹، ب) ۱۳۹۵۶، ج) ۱۷۹۷۴، د) ۲۳۸۸۵، ه) ۴۷۷۲۸، و) ۶۵۷۶۷ هرتز

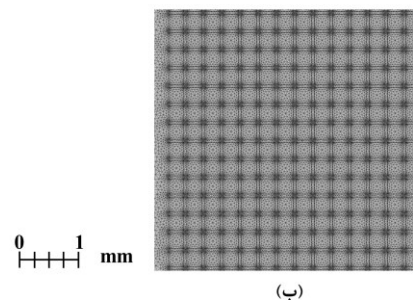
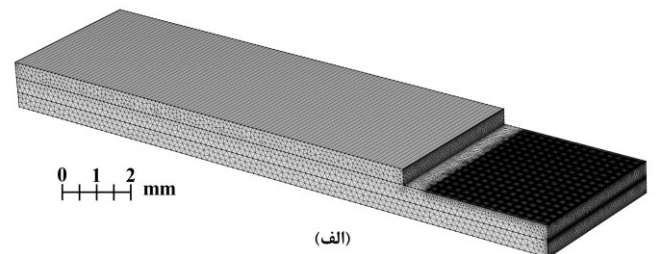
با اعمال میدان مغناطیسی خارجی DC و جاروب آن از صفر تا ۴۰ mT نمودار مغناطش گالفنول بدست می‌آید. طبق شکل (۴-الف) این ماده در میدان مغناطیسی ۲۵ mT به مغناطش اشباع می‌رسد.

با افزایش مغناطش ماده، طبق شکل (۴-ب) ساختار مغناطوالکتریک تا زمانی که ماده به مغناطش اشباع برسد، خمیده می‌شود و در این ناحیه به حداکثر میزان خمش که $18.5 \mu\text{m}$ است می‌رسد. این منطقه را می‌توان منطقه اشباع مغناطوتنگش نیز تلقی کرد، با توجه به نموداری که در این شکل وجود دارد، با افزایش میدان مغناطیسی به علت هم جهت شدن حوزه‌های

جدول ۳: مشخصات سیلیکون استفاده شده برای شبیه سازی [۱۲]

مشخصات	مقادیر
چگالی	$2330 \text{ (kg.m}^{-3}\text{)}$
مدول یانگ	$169 \times 10^9 \text{ (Pa)}$
ثابت پواسن	0.22 (1)
ماتریس سختی	$\begin{bmatrix} 216 & 84 & 84 & 0 & 0 & 0 \\ 84 & 216 & 84 & 0 & 0 & 0 \\ 84 & 84 & 216 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 66 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 66 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 66 \end{bmatrix} \text{ GPa}$

از این رو، میزان و اندازه مش‌بندی رابطه مستقیمی با دقت نتایج بدست آمده دارد. در این شبیه سازی، مش‌بندی به گونه‌ای انجام شد که مناطقی از حسگر که با اعمال میدان مغناطیسی خمیده شده و نوسان می‌کند دارای مش‌بندی بیشتر و ریزتری بوده و دقت محاسبات را افزایش می‌دهد. مش‌بندی صورت گرفته بر روی ساختار مغناطوالکتریک در شکل ۲ نشان داده شده است.

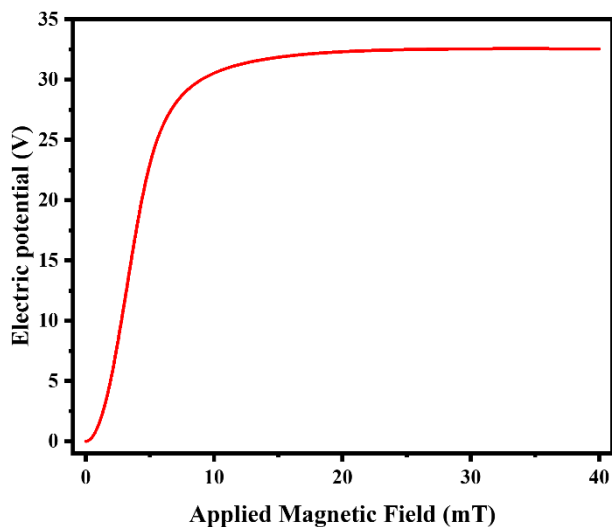


شکل ۴: مش بندی انجام شده برای حسگر مغناطوالکتریک توسط نرم افزار کامسول، الف) مش بندی ساختار مغناطوالکتریک، ب) مش بندی ناحیه طرح‌دار

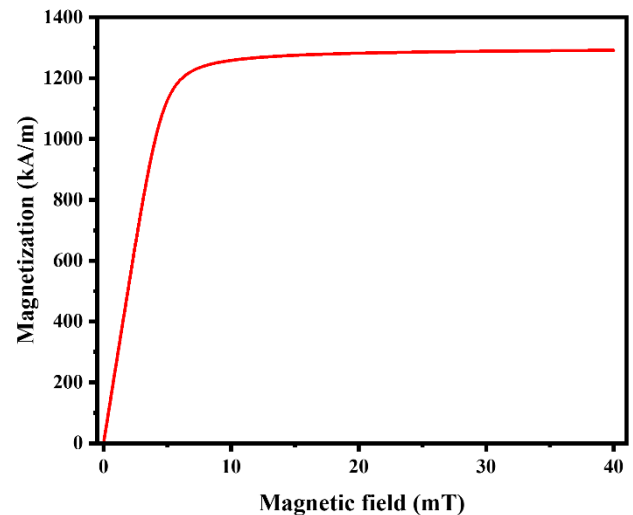
با توجه به جفت شدگی مکانیکی بین لایه‌های مغناطوتنگش و پیزوالکتریک، از فرکانس تشدید الکترومکانیکی ساختار، برای افزایش حساسیت حسگر استفاده شد. برای همین منظور، حسگر

میدان مغناطیسی، بیشترین تغییر در ولتاژ خروجی را نشان می‌دهد. با محاسبه این حساسیت و رسم نمودار حساسیت بر حسب میدان مغناطیسی (شکل ۵-ب)، میدان مغناطیسی با میزان ۳/۳ به عنوان میدان مغناطیسی DC بایاس مشخص می‌شود. میدان مغناطیس بایاس لازمه کارکرد این حسگرها در بیشینه حسگری آنها است.

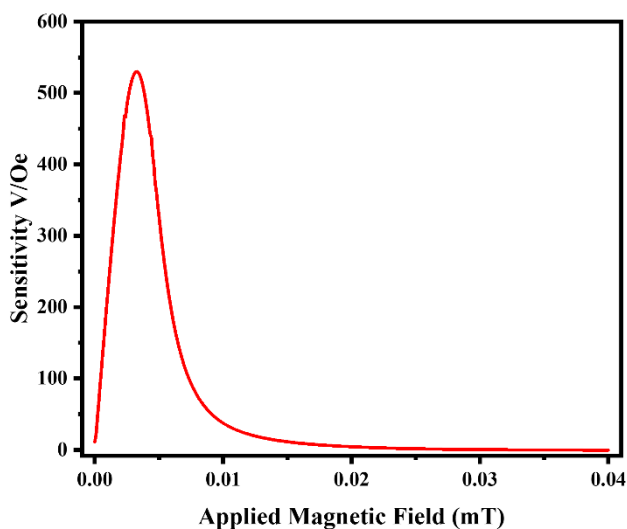
مغناطیسی ماده، تغییری در خمش دیده نمی‌شود. همچنین با جاروب میدان مغناطیسی DC، نمودار ولتاژ خروجی از حسگر بدست می‌آید (شکل ۵-الف). با هم جهت شدن حوزه‌های مغناطیسی و در نتیجه ثابت شدن مقدار خمش، نیروی اضافی به ماده پیزوالکتریک وارد نشده و ولتاژ دریافتی از حسگر ثابت باقی می‌ماند.



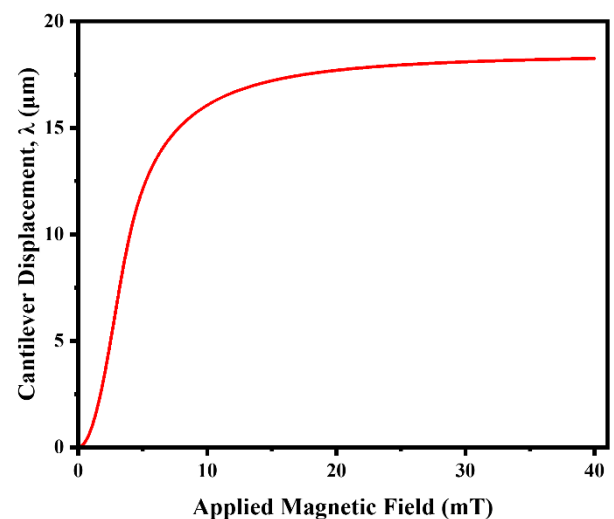
(الف)



(الف)



(ب)



(ب)

شکل ۵: الف) بیشینه ولتاژ خروجی، ب) حساسیت ساختار مغناطوالکتریک به میدان مغناطیسی خارجی

با ثابت نگه داشتن میدان مغناطیسی DC به عنوان میدان مغناطیسی بایاس و با استفاده از روش دینامیک، میدان

شکل ۴: الف) نمودار مغناطش گالفنول، ب) جابجایی قسمت آزاد حسگر نسبت به تغییرات میدان مغناطیسی اعمالی

طبق این نمودار، منطقه ای که بیشترین شیب نمودار را دارد، حساس‌ترین نقطه به میدان مغناطیسی بوده و با کمترین تغییر در

با استفاده از روش تقویت کننده قفل شونده، که دارای رزولوشن 10 nV است، رزولوشن میدان مغناطیسی در محدوده 1 pT برای حسگر شبیه سازی شده بدست می آید.

در این مقاله با طراحی یک قسمت از لایه مغناطوتنگش بر پایه نانوساختار طرحدار شده آلیاژ گالفنول به منظور کنترل مغناطش اشباع و ذخیره نفوذ پذیری، افزایش قابل ملاحظه ای در ضریب مغناطوالکتریک نسبت به کارهای مشابه [۱۲] دیده می شود. همچنین، برای کنترل فرکانس تشدید و جلوگیری از افزایش آن فقط قسمتی از آلیاژ گالفنول طرحدار شد. در واقع حالتی بهینه برای فرکانس تشدید و ضریب مغناطوالکتریک در نظر گرفته شد.

در مقالات مشابه ضریب مغناطوالکتریک $Q_e \cdot v/\text{cm}$ در فرکانس $2521/8 \text{ Hz}$ بدست آمده است، در حالیکه برای این مقاله با استفاده از ایده طرحدار کردن ساختار بر پایه نانوساختار آلیاژ گالفنول، ضریب مغناطوالکتریک به اندازه $v/\text{cm} \cdot Q_e$ در 5850 Hz فرکانس $3051/9 \text{ Hz}$ بدست آمد.

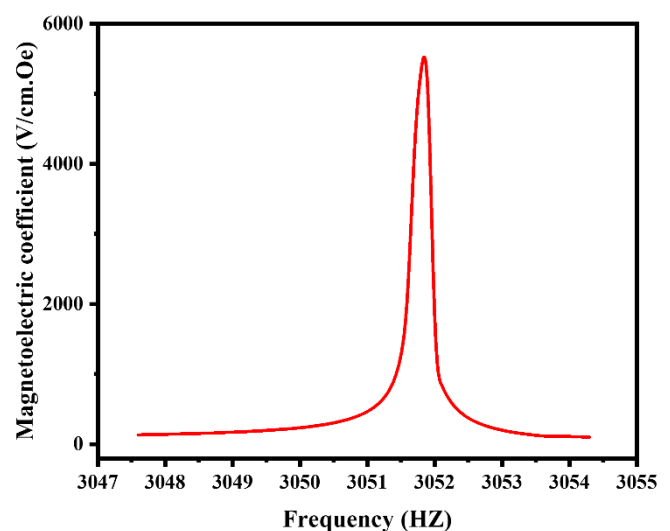
با استفاده از روش المان محدود و شبیه سازی ساختارهای مختلف، می توان با کمترین هزینه ساختارهایی با حساسیت بیشتر و فرکانس کاری کمتر بدست آورد و از این حسگرها به عنوان حسگرهای زیستی و برای تصویربرداری عصبی کارکردی برای نقشه برداری فعالیت های مغز با محاسبه میدان مغناطیسی آن استفاده کرد.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله، ساختار مغناطوالکتریک بر پایه نانوساختار آلیاژ گالفنول طرحدار شده و آلومینیم نیتريد شبیه سازی شده و با استفاده از روش المان محدود، با اعمال یک میدان مغناطیسی DC بایاس به مقدار $3/3 \text{ mT}$ ، در فرکانس تشدید $3051/9 \text{ Hz}$ ضریب مغناطوالکتریک 5850 V/cm.Oe برای این ساختار بدست آمد که چندین مرتبه بیشتر از حساسیت آن در فرکانس های دیگر است. همچنین، ساختار طراحی شده قابلیت حسگری میدان مغناطیسی در محدوده 1 pT را دارد. با شبیه سازی حسگرهای مغناطوالکتریک با ساختارها و مواد مغناطوتنگش و

مغناطیسی AC توسط کوپل هلمهولتز طراحی شده اعمال می شود. طبق این روش، همزمان یک میدان مغناطیسی کوچک AC و میدان مغناطیسی DC به حسگر اعمال می شود. با ثابت نگه داشتن میدان مغناطیسی متغیر، و جاروب فرکانس های مختلف، در فرکانس های تشدید میزان حساسیت حسگر افزایش می یابد. فرکانس $3051/9 \text{ Hz}$ به علت کمتر بودن به عنوان فرکانس اصلی حسگر انتخاب شده و میدان مغناطیسی یک اورستد با این فرکانس به حسگر اعمال می شود. پایین بودن فرکانس کاری حسگر از این جهت حائز اهمیت است که می توان در تحقیقات آینده و ساخت تجربی این حسگرها، با کاهش فرکانس آن، از حسگرهای مغناطوالکتریک به عنوان حسگرهای زیستی استفاده کرد.

طبق شکل ۶، ضریب مغناطوالکتریک به ازای فرکانس های متفاوت، مقادیر مختلفی داشته و در $3051/9 \text{ Hz}$ که فرکانس تشدید الکترومکانیکی ساختار بوده به حداکثر خود می رسد. ساختار طراحی شده در این فرکانس ضریب مغناطوالکتریک 5850 V/cm.Oe را دارا است، که این مقدار چندین برابر بیشتر از حالت های دیگر است.



شکل ۶: ضریب مغناطوالکتریک ساختار شبیه سازی شده به ازای فرکانس های مختلف و فرکانس تشدید

[8] A.G. Olabi, and A. Grunwald, "Design and application of magnetostrictive materials," *Materials & Design*, 2008, 29(2), 469-483.

[9] F. Fang, C. Zhao, and W. Yang, "Thickness effects on magnetoelectric coupling for Metglas/PZT/Metglas laminates," *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, 2011, 54, 581-585.

[10] W. Eerenstein, N.D. Mathur, and J.F. Scott, "Multiferroic and magnetoelectric materials," *nature*, 2006, 442(7104), 759-765.

[11] M.I. Bichurin, D.A. Filippov, V.M. Petrov, V.M. Laletsin, N. Paddubnaya, and G. Srinivasan, "Resonance magnetoelectric effects in layered magnetostrictive-piezoelectric composites," *Physical Review B*, 2003, 68(13), 132408.

[12] M. Haghparast, M.M. Tehranchi, and S.M. Hamidi, "Magneto electric sensor based on cantilever coated galphenol/AlN structure," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2023, 572, 170602,.

[13] M.I. Bichurin, V.M. Petrov, and R.V. Petrov, "Direct and inverse magnetoelectric effect in layered composites in electromechanical resonance range: A review," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2012, 324(21), 3548-3550.

[14] M. Bichurin, R. Petrov, O. Sokolov, V. Leontiev, V. Kuts, D. Kiselev, and Y. Wang, "Magnetoelectric magnetic field sensors: A review," *Sensors*, 2021, 21(18), 6232,.

[15] C. Lu, H. Zhou, L. Li, A. Yang, C. Xu, Z. Ou, J. Wang, X. Wang, and F. Tian, "Split-core magnetoelectric current sensor and wireless current measurement application," *Measurement*, 2022, 188, 110527,.

[16] <http://www.tdvib.com/galphenol/>

[17] B. Xie, F. Ding, Z. Dong, H. Shang, D. Huang, and H. Gu, "FEM analysis of piezoelectric

پیزوالکتریک مختلف، می‌توان راه را برای ساخت حسگرهای زیستی با قابلیت اندازه‌گیری میدان مغناطیسی ناشی از جریانات الکتریکی مغز را فراهم آورد.

مراجع

[1] A.A. Basheer, "Advances in the smart materials applications in the aerospace industries," *Aircraft Engineering and Aerospace Technology* 2020., 92(7), 1027-1035.

[2] T. Kalsoom, N. Ramzan, S. Ahmed, and M. Ur-Rehman, "Advances in sensor technologies in the era of smart factory and industry 4.0," *Sensors*, 2020, 20(23), 6783,.

[3] U. Pili, and R. Violanda, "Measuring a spring constant with a smartphone magnetic field sensor," *Smartphones as Mobile Minilabs in Physics*, 2022, 201-205,.

[4] D. Murzin, D.J. Mapps, K. Levada, V. Belyaev, A. Omelyanchik, L. Panina, and V. Rodionova, "Ultrasensitive magnetic field sensors for biomedical applications," *Sensors*, 2020, 20(6), 1569.

[5] M. Ranjbaran, M.M. Tehranchi, S.M. Hamidi, and S. M. H. Khalkhali, "Relaxation time dependencies of optically detected magnetic resonance harmonics in highly sensitive Mx magnetometers," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2019, 469, 522-530,.

[6] K. Rao, H. Liu, X. Wei, W. Wu, C. Hu, J. Fan, J. Liu, and L. Tu, "A high-resolution area-change-based capacitive MEMS tilt sensor," *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020, 313, 112191,.

[7] N.A. Spaldin, "Magnetic materials: fundamentals and applications," Cambridge university press, 2010.

film as IDT on the diamond substrate to enhance the quality factor of SAW devices,” *Diamond and Related Materials*, 2020,102, 107659.



Magnetolectric sensor based on coupling of patterned galfenol alloy thin film and aluminum nitride

M.Hagparast¹, M.M.Tehranchi^{1,2*}, S.M.Hamidi¹

1. Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
2. Faculty of Physics, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Abstract: Magnetic field sensors based on magneto-electric structures have various applications in industries such as biosensors. Through simulation using the finite element method (FEM), sensors with appropriate main frequency and sensitivity can be designed, paving the way for the fabrication of bio magnetic sensors. In this article, we utilized magneto-electric structures based on patterned Galfenol alloy nanostructures as the magnetostrictive layer and aluminum nitride as the piezoelectric layer. The designed cantilever-type structure has a magnetolectric coefficient of 5850 V/cm.Oe at the resonance frequency of 3051.9 Hz and is capable of measuring magnetic fields in the range of one Pico tesla.

Keywords: Magnetic field sensor, Magnetolectric coefficient, Magnetostrictive effect, Finite Element Method, Galfenol alloy