

## طراحی، شبیه‌سازی و تحلیل عملکرد هیدروفن‌های حساس باند پهن فرکانس پایین با استفاده از ترانزیستورهای گیت معلق

روزبه نگهداری<sup>۱\*</sup>، محمد زارع احتشامی<sup>۲</sup>، حسین شاهمیرزایی<sup>۳</sup>

r.neghahdari@sutech.ac.ir

m.ehteshami@sutech.ac.ir

hshahmirzaee@mut.ac.ir

\*نویسنده مسئول، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز

<sup>۲</sup>مجتمع دانشگاهی هوادریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

<sup>۳</sup>استادیار، مجتمع دانشگاهی هوادریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

تاریخ پذیرش: ۹۷/۸/۱۹

تاریخ دریافت: ۹۷/۶/۳

### چکیده

در این مقاله ساختاری نوین برای طراحی و ساخت هیدروفن‌های حساس باند پهن فرکانس پایین ارائه شده است. ساختار پیشنهادی از یک ترانزیستور با گیت معلق تشکیل شده است. با برخورد امواج آکوستیکی به گیت معلق که روی یک ترانزیستور اثر میدانی قرار دارد، فاصله بین گیت و کانال ترانزیستور و به تبع آن ظرفیت خازنی معادل بین گیت و کانال ترانزیستور تغییر می‌کند که این امر به تغییر در جریان و ولتاژ خروجی ترانزیستور می‌انجامد. در اینجا از تغییر فاصله بین گیت و کانال ترانزیستور که به تغییر جریان درین-سورس منجر می‌شود، برای آشکارسازی امواج آکوستیکی استفاده می‌شود. به منظور یافتن حساسیت ساختار پیشنهادی، در ابتدا میزان جابه‌جایی بیم معلق ترانزیستور به روش المان محدود مورد بررسی قرار می‌گیرد. حساسیت به دست آمده برای ساختار پیشنهادی در محدوده فرکانس پایین (فرکانس‌های زیر ده هزار هرتز که پایین تر از اولین فرکانس رزونانس است  $-170\text{ dB}$ ) است که در مقایسه با مبدل‌های سنتی افزایش نسبتاً مناسبی را نشان می‌دهد. بازه فرکانسی به دست آمده برای این هیدروفن‌ها از فرکانس‌های بسیار پایین تا  $13/5$  کیلوهرتز بوده و برخلاف مبدل‌های پیزوالکتریک سنتی، این مبدل نیازی به تقویت کننده بار در نزدیکی المان پیزوسرامیک ندارد. علاوه بر این، ابعاد ساختار پیشنهادی در مقایسه با ساختارهای متداول کوچک تر است.

**واژه‌های کلیدی:** آکوستیک، هیدروفن، سیستم‌های میکرو الکترومکانیکی، سنسور، گیت معلق، ماسفت

### ۱. مقدمه

در سال‌های اخیر تحقیقات در رابطه با مبدل‌های الکتروآکوستیک زیر آبی به ویژه در ابعاد میکرومتری سرعت

بسیار چشمگیری داشته است [۱-۴]. مبدل الکتروآکوستیکی، وسیله‌ای است که انرژی الکتریکی را به انرژی آکوستیکی یا برعکس تبدیل می‌کند. اگر یک مبدل آکوستیکی فقط

قابل پردازش، در دو طرف ماده پیزوالکتریک، لایه نازکی از فلز قرار می‌دهند تا یک خازن تشکیل شود. با تشکیل خازن، ولتاژی متناسب با بار تولید می‌شود که خود بر اساس فشار اعمالی به وجود آمده است. ولتاژی که با ماده پیزوالکتریک ایجاد شده، رابطه مستقیمی با تنش (ناشی از فشار اعمالی) دارد که به «جنس» و «ابعاد» بستگی دارد [۱۵، ۱۶].

در هیدروفن‌های پیزوالکتریک کوچک‌سازی ابعاد، با کاهش حساسیت و افزایش امیدانس در فرکانس‌های پایین همراه است. علاوه بر این مواد پیزوالکتریک به امواج الکترومغناطیسی حساس هستند [۱۵]. پس به منظور غلبه بر این محدودیت‌ها، ساختارهای متفاوتی ارائه شده است. در سال‌های اخیر، استفاده از ترانزیستورهای ارگانیک و غیر ارگانیک در سنسورها توجه زیادی را جلب کرده است [۱۷]. امیدانس ورودی بالا و امیدانس خروجی پایین ماسفت‌ها مزیت عمده استفاده از این ترانزیستورها در مبدل‌هاست. علاوه بر این، تقویت اولیه سیگنال با ماسفت نیز از مزیت‌های استفاده از ترانزیستور است. سنسورهای متفاوتی با کاربردهای مختلف با استفاده از ترانزیستورها ساخته شده‌اند؛ زیرا جریان خروجی بیشتر، حساسیت بالاتری را به دنبال دارد [۱۸-۱۹].

در این مقاله به منظور رفع محدودیت‌های یادشده هیدروفن‌های پیزوالکتریک، با استفاده از ترانزیستور ماسفت<sup>۵</sup> گیت معلق، ساختاری بدیع معرفی و طراحی شده است. همان‌طور که در ادامه مقاله دیده می‌شود؛ ساختار پیشنهادی حساسیت بسیار بالایی دارد و درعین حال پهنای باند مطلوبی نسبت به کارهای مشابه ارائه شده دارد. یکی از مزایای این ساختار نسبت به سنسورهای پیزوالکتریک قدیمی، عدم نیاز به تقویت‌کننده بارالکتریکی در نزدیکی محل تجمع بار است. زیرا در مبدل‌های پیزوالکتریک، بارهای تجمع یافته الکتروستاتیکی وجود دارد، پس مبدل‌های پیزوالکتریک برای انتقال بار، نیازمند تقویت‌کننده بار الکتریکی در نزدیکی محل تجمع بار هستند. در صورتی که ترانزیستورها جریان الکتریکی دارند.

هیدروفن پیشنهادی در این مقاله از نظر شکل ساختار، مشابه مبدل‌های CMUT<sup>۶</sup> است. برای ساخت این مبدل‌ها یک

به‌عنوان یک گیرنده استفاده شود، یعنی ارتعاشات آکوستیکی را به سیگنال‌های الکتریکی تبدیل نماید، به‌عنوان هیدروفن یا گیرنده شناخته می‌شود. این شاخه از دانش با تکنولوژی سیستم‌های میکرومتری و الکترومکانیکی در ابعاد میکرومتری<sup>۱</sup> (MEMS) که نیاز به ترکیبی از دانش‌های مکانیک، الکتریسته، مغناطیس، نیمه‌هادی‌ها و آکوستیک دارد، آمیخته شده است [۵]. سیستم‌های MEMS در واقع تلاشی برای به‌کارگیری و گسترش تکنیک‌های توسعه یافته ساخت در صنعت مدار مجتمع، برای اضافه کردن عناصر مکانیکی به مدارات الکتریکی است. هدف این تکنولوژی، کوچک‌سازی، کثرت و میکروالکترونیک (هوشمند شدن و یکپارچگی سنسورها) است [۶].

بازه فرکانسی هیدروفن‌هایی که در کاربردهای آکوستیک زیر آب مورد استفاده قرار می‌گیرند، از یک هرتز تا چندین مگاهرتز متغیر است. به‌عنوان مثال امکان برقراری ارتباط آکوستیکی زیر آبی تا مسافت‌های هزاران کیلومتر تنها در فرکانس‌های زیر ۱۰۰ هرتز ممکن است [۶]؛ زیرا با افزایش فرکانس، جذب صوت به‌سرعت افزایش پیدا می‌کند. از سوی دیگر از سونارهای اکتیو برد پایین تا فرکانس‌های ۱/۵ مگاهرتز بهره‌برداری می‌شود. کاربردهایی به این گستردگی نیاز به طراحی مبدل‌های متفاوتی را ایجاد می‌کند [۷].

هیدروفن‌ها یکی از کلیدی‌ترین ابزار در سیستم‌های سوناری محسوب می‌شوند. کاربردهای هیدروفن‌ها اغلب به محدوده حساسیت<sup>۲</sup>، پهنای فرکانسی قابل استفاده<sup>۳</sup> و ابعاد آن‌ها بستگی دارد. اخیراً تمرکز زیادی روی کوچک‌سازی ابعاد هیدروفن‌ها صورت گرفته است [۸-۹]. علاوه بر این، هیدروفن‌های کوچک در مقابل اثر پراش<sup>۴</sup> آکوستیکی کمتر تحت تأثیر قرار می‌گیرند که این مزیتی برای اندازه‌گیری‌های دقیق آکوستیکی محسوب می‌شود [۱۰-۱۱].

مواد پیزوالکتریک به دلیل ویژگی‌های منحصر به فردی که دارند بسیار مورد توجه طراحان مبدل‌های الکتروآکوستیکی بوده‌اند [۱۲-۱۴]. حسگرهای پیزوالکتریک متناسب با فشاری که به آن‌ها وارد می‌شود بار الکتریکی تولید می‌کنند. برای تبدیل این تغییرات بار به یک سیگنال الکتریکی

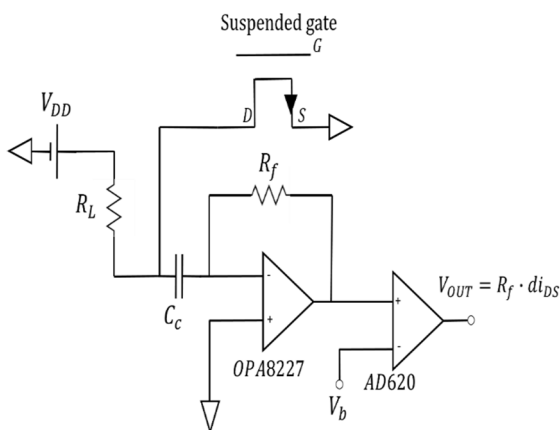
$$I_{ds} = (1/2) \mu_n C_{ox\ eq} (W/L) (V_{gs} - V_T)^2 \quad (1)$$

که در آن  $\mu_n$  موبیلیته الکترون‌ها،  $W$  پهنای گیت ترانزیستور،  $L$  طول گیت ترانزیستور،  $V_{gs}$  اختلاف پتانسیل گیت و سورس است. همچنین  $V_T$  ولتاژ آستانه ترانزیستور است.

$C_{ox\ eq}$  که در معادله ۱ وجود دارد خازن اکسید معادل گیت است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$C_{ox\ eq} = C_{GS} \parallel C_{air} \parallel C_{Gsub} \quad (2)$$

جریان خروجی ترانزیستور باید به ولتاژ تبدیل شود و مدار ارائه شده در مرجع [۸] نیز دقیقاً همین کار را انجام می‌دهد. از آنجا که انتقال سیگنال ترانزیستور در ساختار مرجع بیان شده مشابه ساختار مقاله حاضر است، از مدار شکل ۳ استفاده می‌کنیم.



شکل ۳. مدار تقویت تغییرات جریان خروجی ترانزیستور و تبدیل آن به ولتاژ الکتریکی

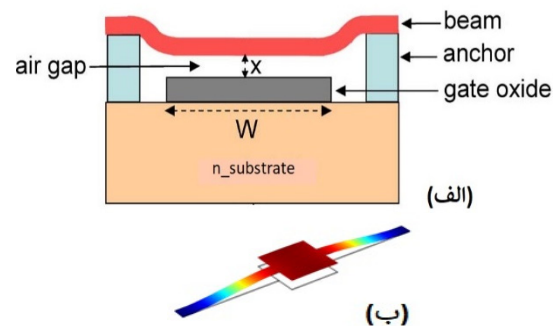
تغییرات جریان با عبور از مقاومت  $R_f$  تقویت شده و در مرحله بعد بایاس dc از سیگنال خروجی طبقه اول گرفته می‌شود تا سیگنال ac در خروجی نهایی ظاهر شود. مقادیر  $R_L$  و  $C_C$  باید طوری انتخاب شوند که فرکانس قطع آن در حدود ۰/۱ Hz باشد.

نکته‌ای که در طراحی این سنسور نیاز به توجه دارد؛ اثر نیروی الکترواستاتیک بین گیت و زیر لایه است. به علت اختلاف پتانسیل بین گیت و زیر لایه<sup>۷</sup>، یک نیروی الکترواستاتیکی بین بارهای تجمع یافته روی این دو صفحه ایجاد می‌شود که می‌تواند باعث اختلال در جابه‌جایی بیم

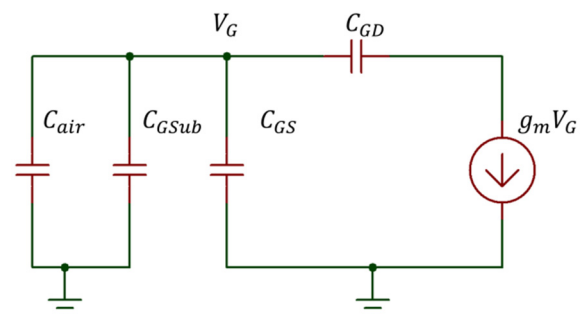
حفره در بستر سیلیکون قرار داده شده و یک لایه معلق به‌عنوان دیافراگم در بالای آن قرار داده می‌شود که تشکیل خازن می‌دهد. انرژی مبادله شده در میدل‌های CMUT نیز به دلیل تغییر ظرفیت خازن است [۲۰].

## ۲. اصول عملکرد ساختار پیشنهادی

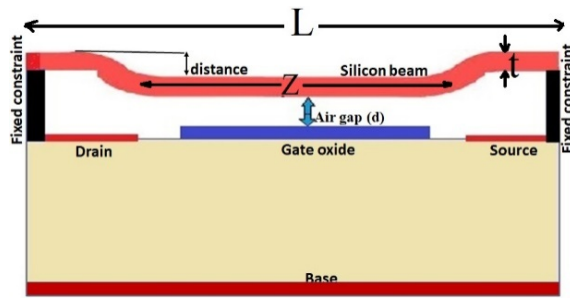
در شکل ۱ نمایی از ساختار پیشنهادی ارائه شده است. این ساختار از یک ترانزیستور با گیت معلق تشکیل شده است. در بالای سطح ترانزیستور بیم نازکی از Si قرار می‌گیرد. این بیم متأثر از فشاری که با موج برخوردی به آن وارد می‌شود، ولتاژ و در نتیجه جریان درین را تغییر می‌دهد. با حرکت بیم، فاصله بین گیت و لایه اکسید گیت تغییر می‌کند که به تغییر در ظرفیت خازنی گیت اکسید ترانزیستور منجر می‌شود. حال با توجه به مدار معادل سیگنال کوچک ترانزیستور ماسفت که در شکل ۲ رسم شده است کاملاً واضح است که به صورت مستقیم این تغییر ظرفیت خازنی منجر به تغییرات در جریان درین و سورس می‌شود. تغییرات جریان را می‌توان به صورت رابطه (۱) نشان داد [۲۱].



شکل ۱. الف: ترانزیستور با گیت معلق؛ با برخورد صوت به گیت فاصله بین بیم و گپ کاهش می‌یابد، در نتیجه ظرفیت خازن حاصل تغییر می‌کند. ب: شکل سه‌بعدی بیم.



شکل ۲. مدار معادل خازنی سیگنال کوچک ترانزیستور



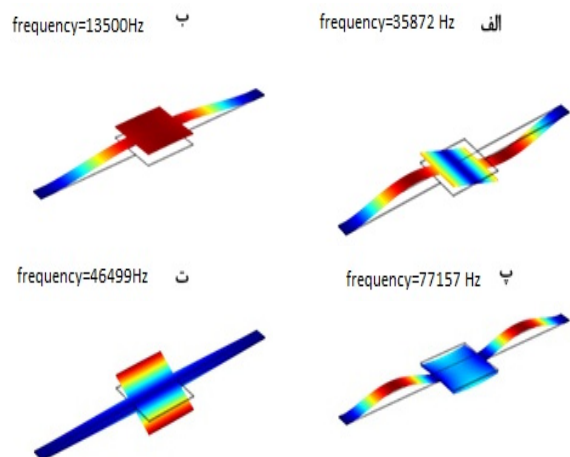
شکل ۴. ساختار پیشنهادی

جدول ۱. ابعاد ساختار پیشنهادی و مشخصات فیزیکی سیلیکون

نام پارامتر	مشخصات پارامتر
طول بیم (L)	۱۰۰۰ میکرومتر
مساحت صفحه میانی (z) متصل به بیم	۵۰۰ × ۵۰۰ میکرومتر
پهنای بیم	۱۲۰ میکرومتر
ضخامت بیم و صفحه میانی (t)	۱۰ میکرومتر
$R_f$	۱۰۰۰ k $\Omega$
چگالی سیلیکون	۲۳۲۹ kg/m <sup>3</sup>
ضریب مازول یانگ سیلیکون	۱۷۰ <sup>۹</sup> [nm]
عدد پواسن سیلیکون	۰/۲۸

#### ۴. تحلیل دینامیک

اولین قدم در تحلیل دینامیک ساختار ارائه شده، تحلیل فرکانس‌های رزونانس است. اهمیت فرکانس رزونانس در یافتن پهنای باند سنسور است. به منظور اطمینان از عملکرد در ناحیه خطی و پاسخ فرکانسی همواره<sup>۱۰</sup>، باید در فرکانس‌های بسیار پایین‌تر از اولین فرکانس رزونانس از هیدروفون استفاده شود<sup>[۸]</sup>. در شکل ۵، چهار فرکانس رزونانس اول به همراه شکل هر مد ارائه شده است.



شکل ۵. چهار فرکانس رزونانس اول ساختار پیشنهادی

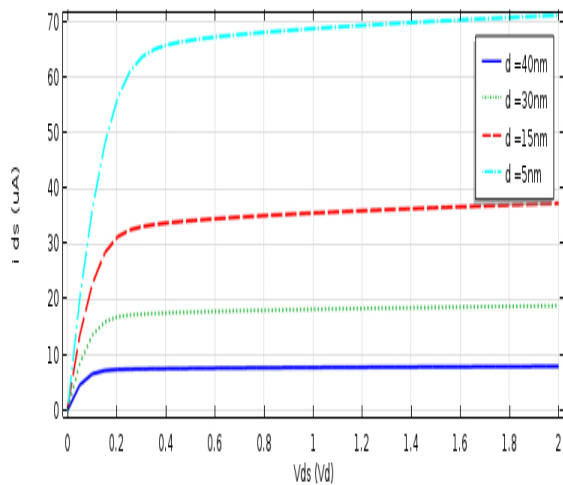
شود. برای حل این مشکل و از بین بردن نیروی الکتروستاتیکی مزاحم، ولتاژ گیت را برابر ولتاژ زیرلایه قرار داده و برای جلوگیری از خاموش شدن ترانزیستور، ولتاژ آستانه را منفی قرار می‌دهیم. به عبارت دیگر؛ به منظور از بین بردن تأثیر نیروی الکتروستاتیکی بین گیت و زیرلایه، لازم است در طراحی ترانزیستور ملاحظاتی در نظر گرفته شود تا ولتاژ آستانه منفی شود. در غیر این صورت ممکن است تحت تأثیر نیروی الکتروستاتیکی جابه‌جایی بیم با فشار موج آکوستیکی رابطه غیرخطی پیدا کند.

از آنجا که ماسفت نوع n موبیلیته بیشتری دارد، در نتیجه طبق رابطه (۱) تغییرات جریان بیشتری را در خروجی شاهد هستیم. به منظور داشتن حداکثر حساسیت (نسبت تغییرات جریان درین به فشار عمودی وارد به گیت) و همچنین برای مصون ماندن از تغییرات ولتاژ درین\_سورس باید در ناحیه اشباع باشد. به عبارت دیگر به علت نیاز به مصنویت جریان ترانزیستور به ولتاژ درین\_سورس و وابستگی تغییرات جریان فقط به فشار اعمالی گیت، ترانزیستور باید در ناحیه اشباع باشد.

#### ۳. شبیه‌سازی و نتایج آن

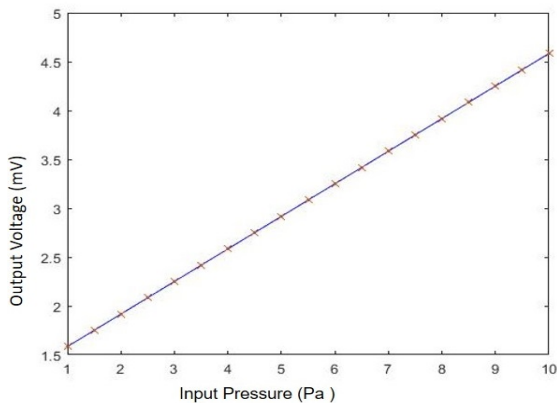
در شکل ۴ ساختار مطالعه شده با جزئیات بیشتری نشان داده شده است. این ساختار در قالب دو بخش مکانیکی و الکترونیکی شبیه‌سازی می‌شود. در قسمت شبیه‌سازی مکانیکی (شکل ۱-ب)، ساختار از دو بیم و یک صفحه در مرکز، تشکیل شده است که جنس بیم و صفحه یکسان است. فاصله بین بیم و اکسید گیت (air-gap در شکل ۴) ۷۰ نانومتر است. بستر ترانزیستور نیز از جنس سیلیکون و اکسید گیت از جنس SiO<sub>2</sub> است. ویژگی مواد استفاده شده به همراه ابعاد در جدول ۱ نشان داده شده است. شبیه‌سازی این ساختار با بهره‌گیری از روش المان محدود<sup>۸</sup> با نرم‌افزار کامسول<sup>۹</sup> انجام شده است.

به عبارت دیگر هر چقدر تفاوت فاصله هوایی<sup>۱۱</sup> که در اینجا  $d$  نامیده شده کمتر شود، میزان جریان خروجی، به علت افزایش ظرفیت خازنی بین بیم و بستر ترانزیستور، افزایش می‌یابد.



شکل ۸. بررسی تأثیر فاصله گیت با زیر لایه (air gap)

در شکل ۹ ولتاژ خروجی مبدل در فشارهای مختلف بررسی شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در فشار یک پاسکال ولتاژ خروجی برابر با ۱/۸ میلی‌ولت است.

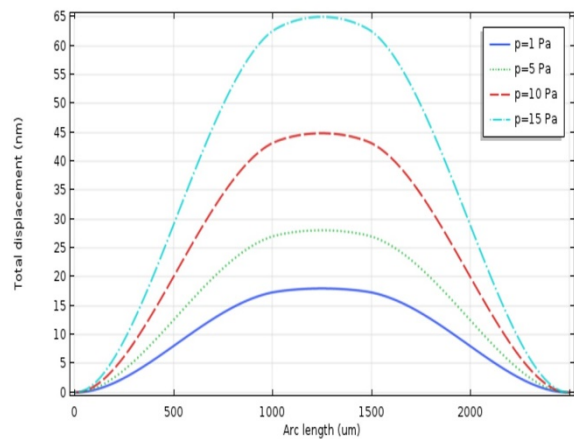


شکل ۹. مشخصه ورودی خروجی مبدل پیشنهادی

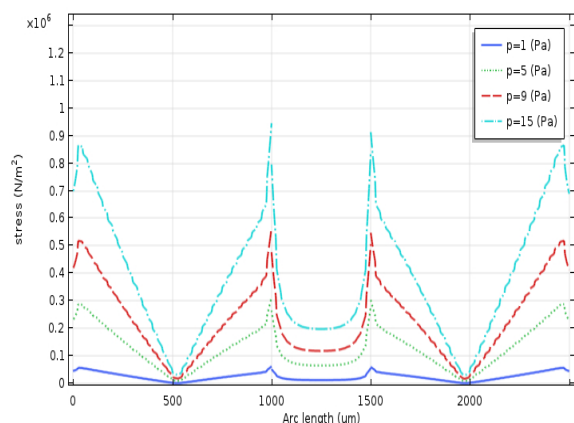
حساسیت ساختار طراحی شده در بازه فرکانسی ده هرتز تا سی کیلوهرتز بررسی شده و در شکل ۱۰ رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تا فرکانس ۱۳۵۰۰ هرتز منحنی حساسیت مستقل از فرکانس است و می‌توان این بازه را محدوده خطی سنسور برشمرد. حساسیت مبدل ارائه شده با ساختار ارائه شده در مرجع [۸] مقایسه شده است. همان‌طور که دیده می‌شود میزان حساسیت ساختار پیشنهادی ۱۵

## ۵. تحلیل استاتیک

جنبه دیگری که در طراحی مبدل‌ها نیاز به بررسی دارد و در اینجا مورد مطالعه قرار گرفته است، عملکرد ساختار مکانیکی تحت فشار استاتیک است. میزان جابه‌جایی ساختار بیم در فشارهای مختلف در شکل ۶ مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین در شکل ۷ میزان استرس ایجاد شده در طول ساختار رسم شده است. همان‌طور که دیده می‌شود بیشترین جابه‌جایی در مرکز بیم اتفاق می‌افتد. چرا که استرس کمتری در مرکز بیم مشاهده می‌شود و طرفین بین ثابت نگه داشته شده استرس زیادی را تحمل می‌کنند و جابه‌جایی بسیار کمی دارند.



شکل ۶. میزان جابه‌جایی در طول بیم



شکل ۷. استرس ایجاد شده در طول بیم

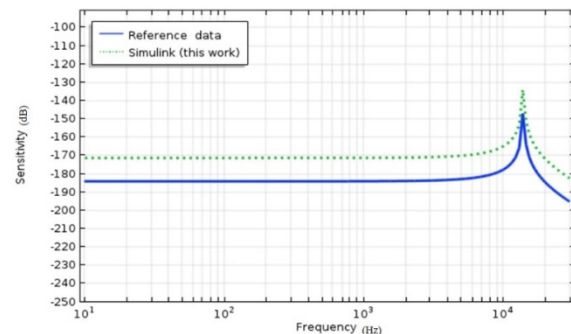
میزان جریان و ولتاژ خروجی ترانزیستور با توجه به میزان جابه‌جایی بیم تغییر می‌کند که این تغییر در شکل ۸ نشان داده شده است. هر چقدر میزان جابه‌جایی بیم زیادتر شود یا

در مقایسه با ساختارهای سنتی مرسوم ابعاد بسیار کوچکتری داشته که برای استفاده به صورت ارائه مطلوب است. از طرف دیگر در مقایسه با مبدل‌های پیزوالکتریکی که نیاز به تقویت کننده بار در نزدیکی مبدل‌ها دارند، مدار الکترونیکی مبدل تغییرات جریان به تغییرات ولتاژ را می‌توان در فاصله دورتری قرار داد که این کار انتقال و پردازش سیگنال را ساده تر می‌کند.

### منابع

- [1] Bai B, Ren Z, Ding J, Xu W, Zhang G, Liu J, Zhang W et al. Cross-supported planar MEMS vector hydrophone for high impact resistance. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2017 Aug 15;263:563-70.
- [2] Zhang G, Liu M, Shen N, Wang X, Zhang W. The development of the differential MEMS vector hydrophone. *Sensors*. 2017;17(6):1332.
- [3] Okada N, Takeuchi S. Robust hydrophone with hydrothermal PZT thick-film vibrator and titanium front layer for use in high-power ultrasound fields. 2015 Joint IEEE International Symposium on the Applications of Ferroelectric (ISAF), International Symposium on Integrated Functionalities (ISIF), and Piezoelectric Force Microscopy Workshop (PFM);2015;Singapore. IEEE; 2015. p.147-50.doi: 10.1109/ISAF.2015.7172691
- [4] Chaggares NC, Ivanytsky O, Pang G, Moszczynski M. Membrane hydrophone for high frequency ultrasound and method of manufacture. Google Patents; 2016 . p.1-3.
- [5] Ando Y, Fletcher NH, Schroeder MR. *Modern Acoustics and Signal Processing*.
- [6] Helvajian H. *Microengineering aerospace systems*. Aiaa; 1999.
- [7] Butler JL, Sherman CH. *Transducers and arrays for underwater sound*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing; 2016 Sep 1.
- [8] Sung M, Shin K, Moon W. A micro-machined hydrophone employing a piezoelectric body combined on the gate of a field-effect transistor. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2016 Jan 1;237:155-66.
- [9] Sung M, Shin K, Moon W. A new transduction mechanism for hydrophones employing piezoelectricity and a field-effect transistor. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2015 Sep 1;233:557-68.

دسی بل افزایش یافته است. افزایش حساسیت این امکان را ایجاد می‌کند که بتوان مبدل‌هایی با کیفیت بالاتر را در مقایسه با مبدل‌های موجود طراحی و تولید کرد.



شکل ۱۰. پاسخ فرکانسی مبدل پیشنهادی

### ۶. نتیجه گیری

نیاز به بهبود در ویژگی‌های مبدل‌های الکتروآکوستیکی حال حاضر، از جمله افزایش حساسیت، کاهش فرکانس کاری، افزایش پهنای باند و کاهش ابعاد، باعث شد تا در این مقاله یک مبدل امواج آکوستیکی در ابعاد میکرومتر طراحی و شبیه‌سازی شود. اساس کار مبدل پیشنهادی تغییر ظرفیت خازن گیت-سورس در ترانزیستورهای ماسفت است. جابه‌جایی بیم در اثر موج آکوستیکی با تغییر ظرفیت خازن گیت-سورس به‌طور مستقیم جریان درین سورس را تغییر داده و این تغییرات به‌وسیله مدار الکتریکی به تغییرات ولتاژ تبدیل می‌شود.

شبیه‌سازی این مبدل با استفاده از نرم‌افزار کامسول صورت پذیرفت. برای این منظور، برای شبیه‌سازی بخش‌های مکانیکی و الکترونیکی این هیدروفن‌ها به ترتیب از ماژول‌های سالیید مکانیک<sup>۱۲</sup> و سیمی کانداکتورز<sup>۱۳</sup> استفاده شد. در قسمت مکانیکی میزان جابه‌جایی بیم در اثر امواج مکانیکی بررسی شده و در بخش دوم با استفاده از مقادیر به‌دست آمده تغییرات جریان و ولتاژ محاسبه شد. ملاحظه می‌کنید که در ساختار پیشنهادی حساسیت ۱۷۰ dB- و پهنای باند ۱۳/۵ kHz در بازه فرکانسی ۱۰ تا ۱۳۵۰۰ هرتز برای هیدروفن به دست می‌آید. در مقایسه با ساختارهای قبلی مشاهده شد که این میزان حساسیت به مقدار ۱۵ dB افزایش یافته اما پهنای باند اندکی کاهش می‌یابد. هیدروفن پیشنهادی

## پی‌نوشت

1. Microelectromechanical Systems
2. Sensitivity
3. Usable Frequency Range
4. Diffraction
5. MOSFET(Metal-Oxide-Semiconductor-field-Effect Transistor)
6. Capacitive micromachined ultrasonic transducers
7. Substrate
8. Finite-element-method
9. Comsol
10. Smooth
11. Air Gap
12. Solid mechanic
13. Semiconductors

- [10] Arshad MR. Recent advancement in sensor technology for underwater applications.
- [11] Xue C, Chen S, Zhang W, Zhang B, Zhang G, Qiao H. Design, fabrication, and preliminary characterization of a novel MEMS bionic vector hydrophone. *Microelectronics Journal*. 2007 Oct 1;38(10-11):1021-6.
- [12] Qiu Y, Gigliotti JV, Wallace M, Griggio F, Demore CE, Cochran S, Trolrier-McKinstry S. Piezoelectric micromachined ultrasound transducer (PMUT) arrays for integrated sensing, actuation and imaging. *Sensors*. 2015 Apr;15(4):8020-41.
- [13] Ganji BA, Nateri MS, Dardel M. Design and modeling of a novel high sensitive MEMS piezoelectric vector hydrophone. *Microsystem Technologies*. 2018 Apr 1;24(4):2085-95.
- [14] Mohammadi S, Abdalbeigi M. Analytical optimization of piezoelectric circular diaphragm generator. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2013;2013.
- [15] Liu C. *Foundations of MEMS*. Pearson Education India; 2012.
- [16] Lee H, Kang D, Moon W. A micro-machined source transducer for a parametric array in air. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2009 Apr;125(4):1879-93.
- [17] Thuau D, Abbas M, Wantz G, Hirsch L, Dufour I, Ayela C. Piezoelectric polymer gated OFET: Cutting-edge electro-mechanical transducer for organic MEMS-based sensors. *Scientific reports*. 2016 Dec 7;6:38672.
- [18] Zhu B, Zhang J, Varadan VK, Varadan VV. Solid state MOSFET-based hydrophone. *In Smart Structures and Materials 2000: Smart Electronics and MEMS 2000 Jun 21 (Vol. 3990, pp. 368-377)*. International Society for Optics and Photonics.
- [19] Bradley AT, Jaeger RC, Suhling JC, O'Connor KJ. Piezoresistive characteristics of short-channel MOSFETs on (100) silicon. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2001 Sep;48(9):2009-15.
- [20] Banerji S, Goh WL, Cheong JH, Je M. CMUT ultrasonic power link front-end for wireless power transfer deep in body. *2013 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on RF and Wireless Technologies for Biomedical and Healthcare Applications (IMWS-BIO);2013 Dec 9; Singapore. IEEE;2014. p.1-3.*

[۲۱] میرعشقی علی. مبانی الکترونیک. تهران: نشر شیخ بهایی؛

۱۳۸۷. (جلد ۱)