

## بررسی تاثیر ضخامت و فشار در دیافراگم‌های میکروالکترومکانیکی در میزان جابجایی در کاربردهای پزشکی

نازلی زرگروفرردین

مری، واحد ایلخچی، دانشگاه آزاد اسلامی، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، ایلخچی، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۲/۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۲/۲۲

**خلاصه:** در این مقاله، تأثیر پارامترهای طراحی در دیافراگم بر روی حساسیت میکروفون به منظور استفاده در کاربردهای پزشکی قابل کاشت ارائه گردیده است. پارامترهای متفاوتی از دیافراگم همچون شکل، ابعاد، ضخامت و فشارهای اعمالی مختلف بر روی دیافراگم در نظر گرفته شده است. تأثیر تغییرات در این پارامترها بر روی میزان جابجایی و استرس در انواع شکل دیافراگم‌ها مورد بحث و بررسی واقع شده است. به منظور طراحی بهینه، انواع شکل دیافراگم‌های پیشنهادی، از جهت پارامترهای در نظر گرفته شده در نرم‌افزار COMSOL شبیه‌سازی و آنالیز شده‌اند. با توجه به پارامترهای مورد بررسی، انواع اشکال دیافراگم مربعی، مستطیلی و بیضوی شکل با توجه به شرایط در نظر گرفته شده، دارای میانگین جابجایی مرکزی در محدوده فرکانس شنوایی انسان 20 Hz- 20 kHz به ترتیب 6.2 nm، 5.5 nm و 130 nm می‌باشد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها بدین صورت می‌باشد که دیافراگم بیضوی شکل نسبت به اشکال دیگر مورد بررسی در این مقاله، برای کاربردهای پزشکی و امکان کاشت شدن، دارای کارایی بهینه و مطلوبی می‌باشد. به علاوه، ماده‌ی پیزوالکتریک مورد استفاده در طراحی دیافراگم PZT است.

**کلمات کلیدی:** سیستم میکروالکترومکانیکی (MEMS)، دیافراگم، جابجایی، ماده پیزوالکتریک، COMSOL.

## Evaluating the Effect of Pressure on the Diaphragm Micro-Electro-Mechanical Thickness and the Amount of Shift in Medical Applications

Nazli Zargarpourfardin

Young Researchers and Elite Club, Ilkhchi Branch, Islamic Azad University, Ilkhchi, Iran.

Zargarpour.n@gmail.com

In this paper, the influence of design parameters on the sensitive microphone diaphragm for use in implantable medical applications is presented. The different parameters such as diaphragm shape, size, thickness and different applied pressures on the diaphragm has been considered. The effect of changes in these parameters on the displacement and stress in a variety of shapes of diaphragm is discussed. In order to design the optimal shape of the proposed diaphragm for the considered parameters, it has been simulated and analyzed in software COMSOL. According to the parameters, the diaphragm shapes of square, rectangular and oval with respect to the intended user, average central displacement in human hearing frequency range 20Hz-20KHz are 5.5 nm, 2.6 nm, and 130 nm respectively. According to the results of the simulations, the oval-shaped diaphragm that has been studied in this paper, the possibility of implanted medical applications, performance is optimal than other shapes. In addition, the piezoelectric material is PZT used in the design of the diaphragm.

**Index Terms:** Micro-Electro-Mechanical System, Diaphragm, Displacement, Piezoelectric, COMSOL.

نویسنده مسئول: نازلی زرگروفرردین، مری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد ایلخچی، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، ایلخچی، ایران، Zargarpour.n@gmail.com

## ۱. مقدمه

اساس کار میکروفن‌های میکروالکترومکانیکی، انتقال انرژی صوتی به انرژی الکتریکی با تبدیل جابجایی مکانیکی به یک سیگنال الکتریکی است. میکروفن‌ها را می‌توان به دو نوع اصلی تقسیم‌بندی کرد: میکروفن‌های قدیمی و سیلیکونی. حدود ۵۰ سال پیش ابعاد میکروفن‌ها، بزرگ و در حد 4 mm تا 6 mm و دارای ارتفاع 1 mm تا 2 mm بودند که عملکرد این میکروفن‌ها توسط نوبز محیط و نوبز مکانیکی و الکترومغناطیسی محدود می‌گشت و این نوع میکروفن‌ها نمی‌توانستند این عوامل را جبران کنند. بنابراین کیفیت صوت پایینی داشتند که با پیشرفت و توسعه تکنولوژی میکروالکترومکانیکی (حدود ۲۰ سال پیش) سایز میکروفن‌ها کوچک شد که این خود باعث کاهش هزینه و سایر مزایا گشت [۱].

میکروفن‌های میکروالکترومکانیکی (MEMS<sup>1</sup>)، در حال حاضر برای بسیاری از دستگاه‌های قابل حمل مانند تلفن‌های هوشمند، تبلت و یا لپ‌تاپ مورد استفاده قرار می‌گیرند و جایگزین میکروفن‌های معمولی الکترومکانیکی شده‌اند. از طرفی سایز و هزینه، دو پارامتر اساسی در طراحی میکروفن می‌باشد.

از جمله مزایای میکروفن‌های MEMS شامل ایمنی در تداخل الکترومغناطیسی و جهت پرتو فرکانس رادیویی (برای میکروفن دیجیتال)، حذف نوبز با استفاده از آرایه‌ای از میکروفن‌ها، یکپارچه‌سازی بر روی تراشه، سازگاری با CMOS<sup>2</sup> و عملکرد و ثبات بهتر با سایز کوچک و هزینه مناسب می‌باشد [۳-۲].

میکروفن‌های میکروالکترومکانیکی جزو دسته میکروفن‌های سیلیکونی بوده و می‌توانند به صورت پیروزیستیو، خازنی و پیزوالکتریک طراحی شوند. در مکانیزم انتقال پیزوالکتریک، خمش دیافراگم به ولتاژ تبدیل می‌شود و این از طریق الکترودهای بالا و پایین بر روی دیافراگم تشخیص داده می‌شود. مکانیزم انتقال پیروزیستیو بر اساس تغییر مقاومت به دلیل تنش ناشی از دیافراگم می‌باشد. در این نوع مکانیزم، سنجش و ارزیابی بر اساس پل وتستون انجام می‌گیرد. مکانیزم انتقال خازنی مبتنی بر تغییرات ظرفیت خازنی مابین دیافراگم می‌باشد. کاربردهای زیادی همچون تلفن‌های همراه، سمعک‌ها و سیستم‌های آلتراسونیک از مکانیزم‌های مختلف تحریک همچون پیزوالکتریک، الکترواستاتیک و الکتروپنماتیک استفاده می‌کنند [۴-۱۲]. علیرغم نیاز میکروفن‌های خازنی به ولتاژ بایاس بالا، استفاده از این نوع نسبت به بقیه متداول‌تر می‌باشد [۱۳ و ۱۴]. زیرا از جمله مزایای عمده میکروفن‌های پیزوالکتریک، داشتن رنج دینامیکی وسیع، نیاز نداشتن به توان ورودی، جابجایی بسیار دقیق، مصرف انرژی کم و پاسخ زمانی سریع (در حد  $\mu\text{m}$ ) می‌باشد [۱۶-۱۹]. تنها مشکل مطرح در مورد میکروفن از جنس پیزوالکتریک، پایین بودن حساسیت آن می‌باشد که به منظور رفع این مشکل، راهکارهایی در منبع [۱۴] ارائه شده است. در دو دهه اخیر، تکنولوژی MEMS، به نیازهای صنعت پزشکی پاسخگو بوده است. به طوری که صنعت پزشکی با استفاده از این نوع

تکنولوژی، در حال کسب محبوبیت در ساخت دستگاه‌های پزشکی مانند سوزن میکرونی، دستگاه‌های مبتنی بر روش اسمز، دستگاه‌های پمپ میکرونی و قطعات مورد نیاز قابل کاشت در حال رشد و تقاضا در بازار صنعت پزشکی می‌باشد [۲۰].

در این مقاله، دیافراگم پیزوالکتریک مبتنی بر تکنولوژی میکروالکترومکانیکی برای کاربردهای پزشکی ارائه شده است. بدین منظور سه نوع شکل مختلف دیافراگم (مربع، مستطیل و بیضی) با سایزهای متناظر با هم و تحت شرایط یکسان، در نرم‌افزار COMSOL از نظر میزان جابجایی (که مهمترین پارامتر در بررسی دیافراگم میکروفن میکروالکترومکانیکی می‌باشد) و استرس شبیه‌سازی و آنالیز شده‌اند. از طرفی دیافراگم مطلوب و پیشنهادی با ضخامت‌های مختلف و تحت فشارهای اعمالی متفاوت جهت ارزیابی میزان جابجایی مرکزی دیافراگم مورد بررسی قرار گرفته شده است [۱۴] به طوری که مواد پیزوالکتریک دارای مکانیزم مستقیم می‌باشند، یعنی سیگنال‌های مکانیکی را به الکتریکی و الکتریکی را به مکانیکی تبدیل می‌نمایند. میکروفن‌های میکروالکترومکانیکی پیزوالکتریک برای کاشت در محیط گوش برای بیماران با ناشنوایی معمولی یا عمیق در ابعاد کوچک کاربرد دارد. فقدان شنوایی یکی از اختلالات معمول شنوایی می‌باشد و این نوع اختلالات چه از نوع عمیق و چه معمولی میلیون‌ها نفر را در جهان تحت تاثیر قرار داده است [۴].

هدف ما در این مقاله، بررسی دیافراگم اشکال مربع، مستطیل و بیضی که از طریق شبیه‌سازی در نرم‌افزار COMSOL جهت رسیدن به ماکزیمم جابجایی در مرکز دیافراگم و استرس که جهت استفاده در سمعک مناسب می‌باشد. بدین ترتیب استفاده از انواع سمعک بسته به شدت ناشنوایی از عمده‌ترین راه‌های درمان ناشنوایی به شمار می‌روند. گرایش به سمت توسعه کوچک‌سازی و فشرده‌سازی در مساحت تکنولوژی میکروسیستم منجر به توسعه سمعک‌های قابل کاشت کامل در گوش شد. از اهداف اصلی و مهم در سمعک‌ها، توسعه میکروفن قابل کاشت در گوش می‌باشد [۲۱-۲۲]. بنابراین انتخاب و طراحی نوع شکل دیافراگم در میکروفن از اهداف اصلی و مهم به شمار می‌رود.

## ۲. کارهای انجام شده

بر اساس مقاله‌ای که در سال ۲۰۰۸، ارائه گردیده است، دیافراگم میکروفن پیزوالکتریک با استفاده از تکنولوژی میکروالکترومکانیکی جهت به کارگیری در کاربردهای صنعتی پیشنهاد شده است. در مقاله مذکور، دو نوع شکل دیافراگم پیزوالکتریک تحت شرایط یکسان و تحت یک ضخامت و ابعاد متناسب و مشخص برای کاربردهای صنعتی بررسی شده است [۱۴].

در ادامه، طراحی دیافراگم میکروالکترومکانیکی و نتایج حاصل از انجام شبیه‌سازی‌ها در نرم‌افزار COMSOL و مقایسه نتایج حاصل با یکدیگر و نتیجه‌گیری حاصل از طرح پیشنهادی ارائه شده است.

## ۳. روش کار

$$V = \frac{Ed_{31}\epsilon_{11}dA}{c} \quad (2)$$

که E مدول یانگ یا مدول الاستیسیته ماده با واحد Pa،  $d_{31}$  ضریب پیزوالکتریک،  $\epsilon_{11}$  کرنش اعمالی، dA سطح الکترودها با واحد  $\mu\text{m}^2$ ، c ظرفیت ساختار با واحد فاراد می باشد که بر اساس مطالعات انجام شده در [۲۳] استخراج شده است.

#### ۴. اشکال دیافراگم

در این بخش برای طراحی دیافراگم، سه شکل مختلف مربعی، مستطیلی و بیضی با ابعاد متنظر با هم و تحت نیروی اعمالی ۱Pa، ویفر سیلیکونی، ضخامت  $15\mu\text{m}$  و ماده پیزوالکتریک مورد استفاده PZT مد نظر قرار گرفته و در نرم افزار COMSOL آنالیز و شبیه سازی شده اند.

الف. دیافراگم طراحی شده با شکل مربعی

تحت شرایط ذکر شده مربعی با ضلع  $100\mu\text{m}$  در نرم افزار COMSOL شبیه سازی شده است.

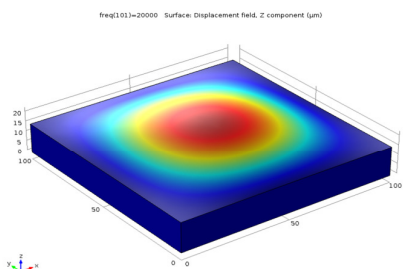
ماکزیمم جابجایی و استرس یا تنش دیافراگم مربعی با فشار اعمالی  $1\text{ Pa} (\text{N}/\text{m}^2)$  به ترتیب از روابط (۳) و (۴) به دست می آیند:

$$W_{\max} = \frac{0.0133 \text{ Pa}^2}{Eh^3} \quad (3)$$

$$\delta_{\max} = \frac{0.309 \text{ Pa}^2}{h^2} \quad (4)$$

به طوری که، P فشار اعمالی با واحد  $\text{N}/\text{m}^2$ ، a طول ضلع مربع با واحد  $\mu\text{m}$ ، E مدول یانگ با واحد Pa نیرو اعمالی و h ضخامت دیافراگم با واحد  $\mu\text{m}$  می باشد که رابطه (۳) بیانگر ماکزیمم جابجایی مرکز دیافراگم و رابطه ۴ بیانگر استرس ایجاد شده در دیافراگم مد نظر گرفته شده، هستند که بر اساس [۲۳] محاسبه شده اند.

مدل شبیه سازی شده ی دیافراگم مربعی، آنالیز مش، جابجایی، استرس یا تنش در امتداد خط پیوستن به نقطه میانی ضلع مقابل، استرس یا تنش خط مورب اتصال یک گوشه به گوشه مقابل که در نرم افزار COMSOL انجام شده اند، به ترتیب در اشکال (۶-۲) ارائه گردیده اند.



شکل (۲): آنالیز ۳ بعدی جابجایی مرکز دیافراگم مربعی با اندازه  $100\mu\text{m}$   
Fig. (2): Analysis of 3D displacement of the center square diaphragm with size  $100\mu\text{m}$

در این بخش از مقاله، طراحی و نتایج به دست آمده از شبیه سازی ها برای میکروفن میکروالکترومکانیکی پیزوالکتریک پیشنهادی ارائه گردیده است.

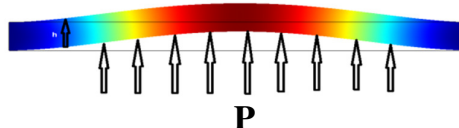
طراحی دیافراگم:

دیافراگم، وقتی در معرض فشار صوتی قرار می گیرد، دچار خمش می گردد. فشار صوتی کل برابر است با: [۱۴، ۱۸]

$$P = p_0 + p \quad (1)$$

که p فشار محیط و  $p_0$  نویزهای محیطی که با هم ترکیب شده و فشار صوتی کل را طبق رابطه فوق [۲۳-۲۴] ایجاد می کنند.

شماتیکی از دیافراگم در شکل (۱) نشان داده شده است. برای آنالیز، فرض بر این است که دیافراگم همگن، متقارن و خطی است. به علاوه، در این تحلیل فرض شده است که دیافراگم از دو سمت ثابت می باشد و باید استرس باقی مانده اش در صفحه، صفر باشد. شعاع a، ضخامت h، مدولاسیون الاستیسیته ی E و نسبت پواسن  $\nu$  برای آنالیز کردن دیافراگم فرض شده اند. به علاوه، دیافراگم تحت تأثیر فشار عمودی یکنواخت p قرار گرفته است [۲۷-۲۵].



شکل (۱): شماتیک دیافراگم کشیده شده در نرم افزار COMSOL  
Fig. (1): Diaphragm schematic in COMSOL software

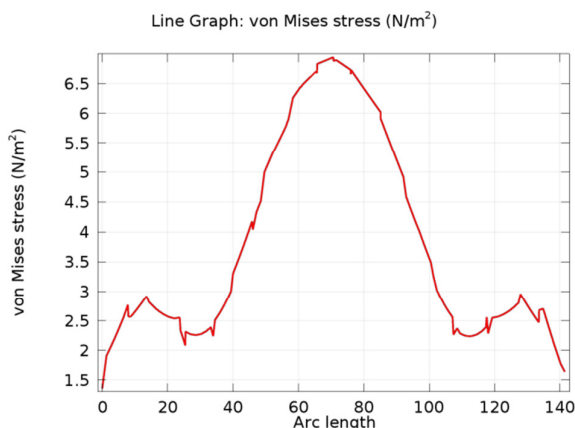
بر اساس تئوری صفحه، اگر انحراف و خمش عمودی دیافراگم، خیلی کوچکتر از ضخامت اش باشد، کرنش در صفحه ی مبدأ دیافراگم، می تواند نادیده گرفته شود و آنالیز در این مورد، آنالیز جابجایی کوچک نامیده می شود. اما اگر انحراف عمودی دیافراگم به ضخامت اش بستگی داشته باشد، کرنش داخلی را نمی توان نادیده گرفت و آنالیز در این مورد، آنالیز جابجایی بزرگ، نامیده می شود.

شبیه سازی و تجزیه و تحلیل پارامترهای مختلف یعنی حساسیت، فرکانس رزونانس، جابجایی در مرکز دیافراگم و تنش و کرنش ایجاد شده در دیافراگم به دلیل فشار اعمالی، مبتنی بر تئوری انحراف کوچک دیافراگم انجام می گیرد.

بر طبق این تئوری، بیشترین خمش با توجه به بار اعمال شده کوچک است به عنوان مثال بیشتر از ۳۰ درصد ضخامت دیافراگم نیست. فرض دیگر این است که صفحه یا دیافراگم تخت است و ضخامت یکنواختی دارد و همه نیروها و بارها به طور عمودی به صفحه دیافراگم وارد می شوند. و نیروی اعمال شده به طور عمودی به صفحه دیافراگم وارد می شوند.

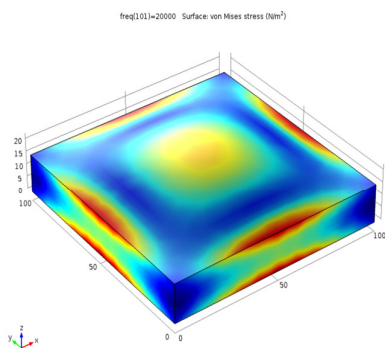
در این بخش از مطالعه، فشار استاتیکی  $1\text{ Pa} (\text{N}/\text{m}^2)$  به سمت زیر دیافراگم میکروفن میکروالکترومکانیکی اعمال می گردد، بنابراین نیرو مخالف با نیروی گرانش عمل می کند.

ولتاژ ایجاد شده در دیافراگم در ازای اعمال فشار برابر است با:



شکل (۶): استرس در امتداد خط پیوستن یک گوشه به گوشه مقابل  
Fig. (6): Stress along the line joining one corner to the opposite corner

با توجه به نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی دیافراگم مربعی (شکل ۵ و ۷)، استرس ایجاد شده برای فشار داده شده در لبه‌ها بیشترین مقدار را دارد. بنابراین شکل مربعی جهت طراحی دیافراگم هم می‌تواند به دلیل جدا کردن آسان دیافراگم از ویفرهای استاندارد، یک شکل هندسی معتبر تلقی گردد.



شکل (۷): شبیه‌سازی دیافراگم مربعی با بیشترین استرس ایجاد شده در لبه‌ها  
Fig. (7): Simulation of square diaphragm with the most stress at the edges

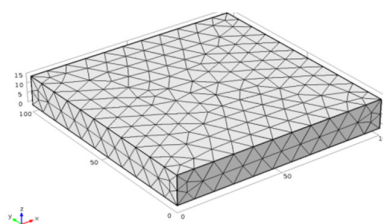
### ب. دیافراگم مستطیلی

در این قسمت مستطیلی با ابعاد  $200 \mu\text{m} * 100 \mu\text{m}$  و تحت شرایط یکسان در نظر گرفته شده، در نرم‌افزار COMSOL آنالیز و شبیه‌سازی شده است.

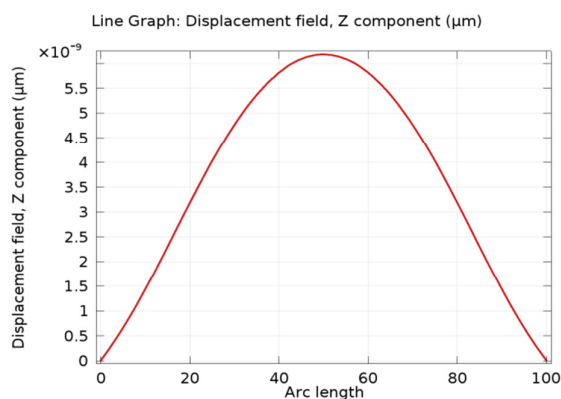
ماکزیمم استرس و ماکزیمم جابجایی در مرکز در نقطه میانی هر لبه، به ترتیب با معادلات (۵) و (۶) محاسبه می‌گردد [۲۳]:

$$\delta_{\max} = \frac{0.309 P_{ab}}{h^2} \quad (5)$$

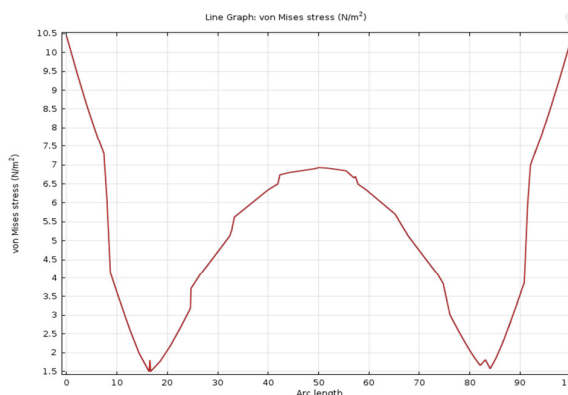
$$W_{\max} = \frac{0.0133 Pab}{Eh^3} \quad (6)$$



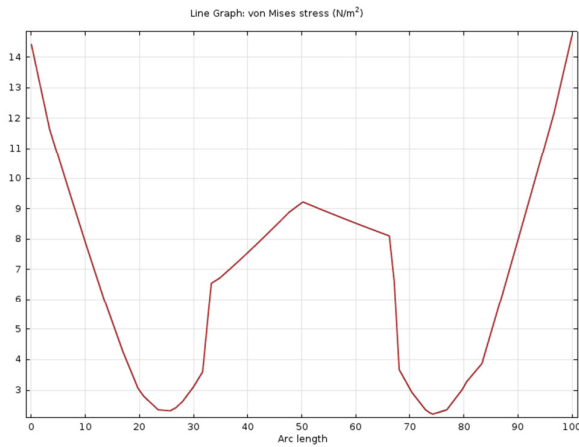
شکل (۳): آنالیز مش ۳ بعدی دیافراگم مربعی با اندازه  $100 \mu\text{m}$   
Fig. (3): Analysis of 3D mesh of the square diaphragm with size  $100 \mu\text{m}$



شکل (۴): جابجایی در امتداد محور مورب  
Fig. (4): Displacement along the diagonal axis



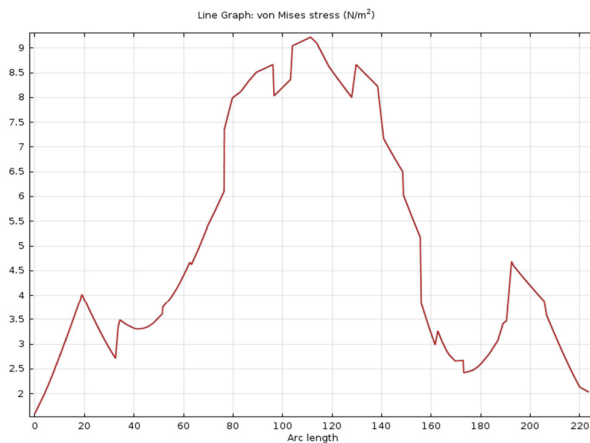
شکل (۵): استرس در امتداد خط پیوستن به نقطه میانی طرف مقابل  
Fig. (5): Stress along the line joining the midpoint of the opposite side



شکل (۱۱): استرس در امتداد خط پیوستن نقطه وسط یک ضلع به ضلع

مقابل با کوتاهترین فاصله (استرس لبه)

Fig. (11): Stress along the line joining the midpoint of a side to the opposite side with the shortest distance (edge stress)



شکل (۱۲): استرس در امتداد خط پیوستن یک گوشه به گوشه مقابل

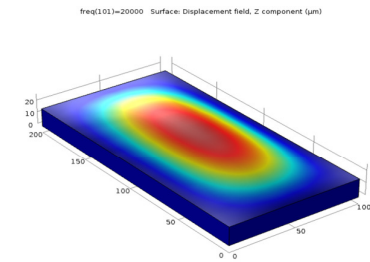
Fig. (12): Stress along the line joining one corner to the opposite corner

با توجه به آنالیزهای (شکل ۱۲)، ملاحظه می‌گردد که استرس ایجاد شده به مراتب کمتر می باشد.

### ج. دیافراگم بیضوی شکل:

دیافراگم بیضوی تحت شرایط یکسان با دیافراگم‌های مربعی و مستطیلی شکل و دارای ابعاد محور نیمه A برابر  $200\ \mu\text{m}$  و محور نیمه B برابر  $100\ \mu\text{m}$  و آنالیز شده است و نتایج حاصل از شبیه سازی‌ها در شکل‌های (۱۶-۱۳) که مدل شبیه‌سازی شده دیافراگم بیضوی، جابجایی، استرس یا تنش عرضی، استرس یا تنش خط مورب طولی نشان داده شده است.

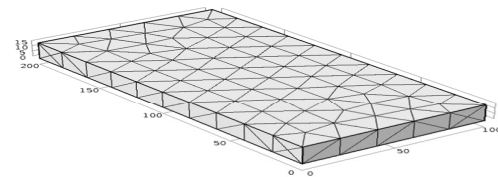
P بیانگر فشار با واحد  $\text{N}/\text{m}^2$  و a و b طول و عرض مستطیل با واحد  $\mu\text{m}$  ضخامت دیافراگم با واحد  $\mu\text{m}$ ، E مدول الاستیسیته با واحد Pa می‌باشد که معادله ۵، بیانگر ماکزیمم استرس ایجاد شده در نقطه میانی هر ضلع مستطیل و معادله ۶ ماکزیمم جابجایی در مرکز دیافراگم مستطیلی را با توجه به [۲۳] ارائه می‌کنند. مدل شبیه‌سازی شده دیافراگم مستطیلی، آنالیز مش، جابجایی، استرس یا تنش در امتداد خط پیوستن به نقطه میانی ضلع مقابل، استرس یا تنش خط مورب اتصال یک گوشه به گوشه مقابل به ترتیب در اشکال (۱۲-۸) و با استفاده از نرم‌افزار COMSOL نشان داده شده‌اند.



شکل (۸): آنالیز ۳ بعدی جابجایی مرکز دیافراگم مستطیلی با ابعاد

$100\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$

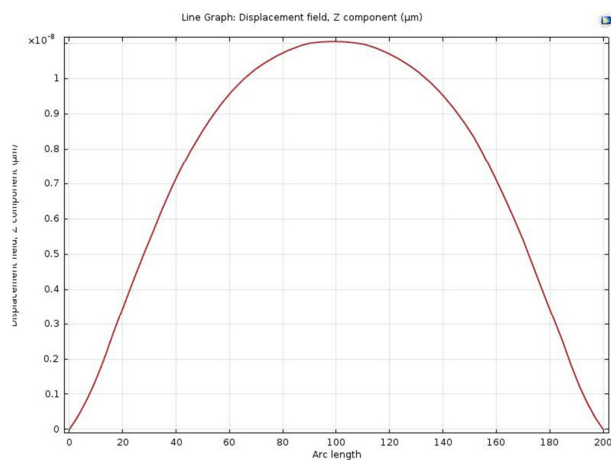
Fig. (8): Analysis of 3D displacement of the center the rectangular diaphragm with  $100\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$



شکل (۹): آنالیز مش ۳ بعدی دیافراگم مستطیلی با اندازه  $200\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$

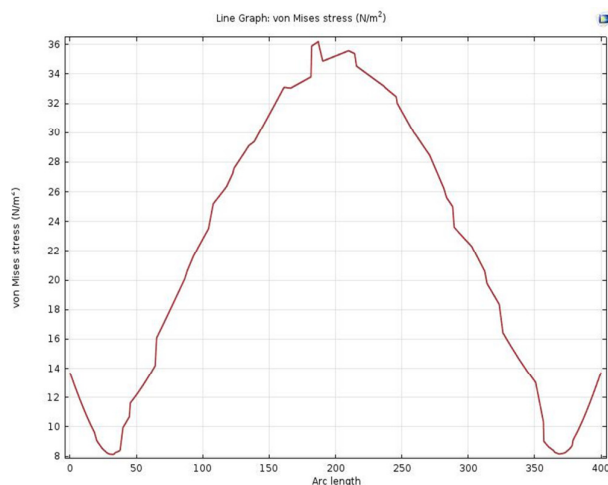
$100\ \mu\text{m}$

Fig. (9): Analysis of 3D mesh rectangular diaphragm with  $100\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$

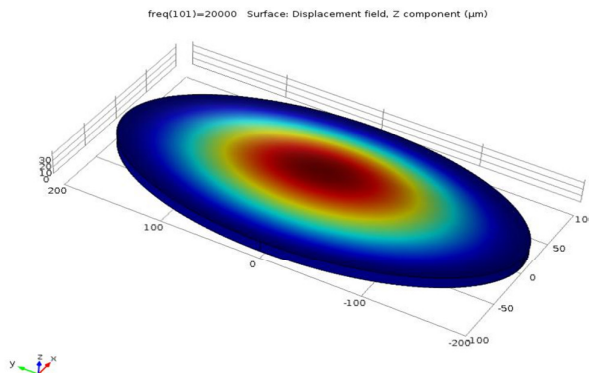


شکل (۱۰): جابجایی در امتداد محور مورب

Fig. (10): Displacement along the diagonal axis



شکل (۱۶): استرس در امتداد خط پیوستن طولی  
Fig. (16): Stress along the longitudinal join line



شکل (۱۳): آنالیز ۳ بعدی جابجایی مرکز دیافراگم بیضوی با ابعاد  $100 \mu m \times 200 \mu m$

Fig. (13): Analysis of 3D displacement of the center the oval diaphragm  $100 \mu m \times 200 \mu m$

### ۵. یافته‌ها

جدول (۱)، مقایسه ما بین اشکال مختلف دیافراگم با ابعاد متناظر با هم و تحت شرایط یکسان که در نرم‌افزار COMSOL طراحی و شبیه‌سازی شده است را نشان می‌دهد.

با توجه به نتیجه مقایسه بین دیافراگم‌های مربعی، مستطیلی و بیضوی شکل، ملاحظه می‌گردد که دیافراگم با شکل بیضوی بیشترین جابجایی مرکزی را دارا می‌باشد و برای میکروفن میکروالکترومکانیکی پیزوالکتریک در کاربردهای پزشکی داشتن دیافراگمی با بیشترین جابجایی نقش اصلی بر روی حساسیت‌اش ایفا می‌کند. پس دیافراگم بیضوی شکل، از نقطه نظر طراحی مطلوب می‌باشد. از طرفی بیشترین استرس لبه مربوط به دیافراگم بیضوی است.

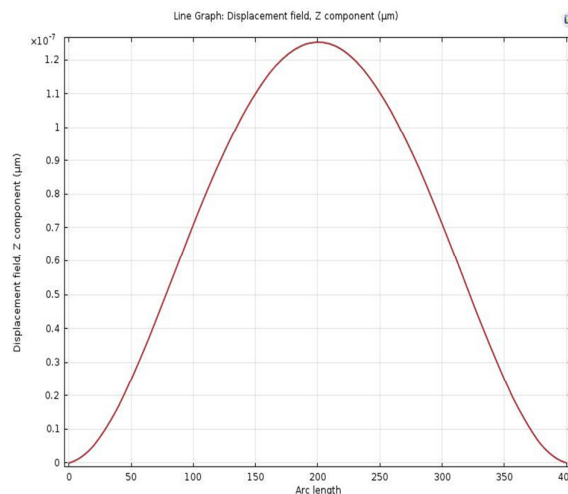
#### ۵-۱- تغییر ضخامت دیافراگم بیضوی

در این قسمت، تأثیر تغییر ضخامت دیافراگم مطلوب بر روی میزان جابجایی مرکز دیافراگم مورد مطالعه قرار گرفته شده است. لازم به ذکر است که ابعاد دیافراگم بیضوی محور A:  $200 \mu m$  و محور B:  $100 \mu m$  و فشار اعمالی  $1 Pa$  و در محدوده فرکانسی  $20 KHz-20 Hz$  شبیه‌سازی شده است. جدول (۲)، تاثیر تغییرات ضخامت بر روی میزان جابجایی مرکز دیافراگم را نشان می‌دهد.

Table (2): Change of Elliptic diaphragm thickness

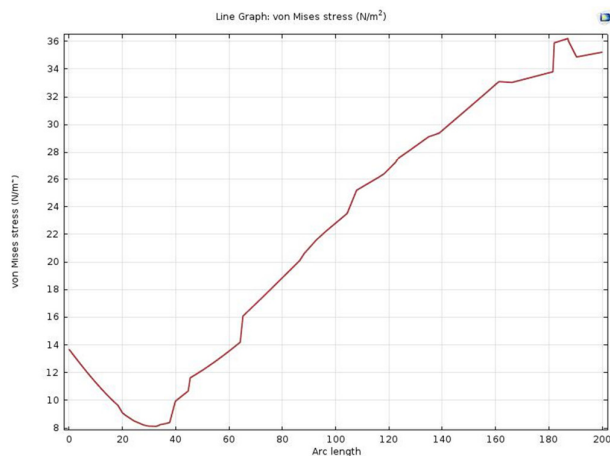
جدول (۲): تغییرات ضخامت دیافراگم بیضوی

ضخامت ( $\mu m$ )	میانگین جابجایی مرکز دیافراگم ( $\mu m$ )	
۱۰	۰/۴۱	۱
۱۵	۰/۱۳	۲
۲۰	۰/۰۵۴	۳
۲۵	۰/۰۳	۴
۴۰	۰/۰۱	۵



شکل (۱۴): جابجایی در امتداد محور مورب

Fig. (14): Displacement along the diagonal axis



شکل (۱۵): استرس در امتداد خط پیوستن در کوتاهترین مسیر (عرضی)

Fig. (15): Stress along the line joining the shortest path (transverse)

Table(1): Comparison between different types of diaphragm

جدول (۱): مقایسه مابین اشکال مختلف دیافراگم

بیشترین میانگین جابجایی مرکز دیافراگم ( $\mu m$ )	بیشترین استرس ( $N/m^2$ )	سایز ( $\mu m$ )	شکل	
۶/۲ nm	لبه: ۵/۱۵ گوشه به گوشه مقابل: ۴/۸۲	۱۰۰	مربع	۱
۵/۵ nm	لبه: ۴/۷۷ گوشه به گوشه مقابل: ۲/۲۲	۱۰۰×۲۰۰	مستطیل	۲
۱۳۰ nm	لبه: ۲۳/۹ طولی: ۲۲/۵	محور A: ۲۰۰ محور B: ۱۰۰	بیضی	۳

مذکور دو نوع شکل شش ضلعی و هشت ضلعی تحت شرایط یکسان و تحت یک ضخامت و ابعاد متناسب و مشخص برای کاربردهای پزشکی بررسی شده است [۲۸].

در این مقاله، طراحی و شبیه‌سازی دیافراگم‌های مربعی، مستطیلی و بیضی شکل با ابعاد متناظر با هم در نرم‌افزار COMSOL جهت استفاده در کاربردهای پزشکی مورد مطالعه قرار گرفته شده است و نسبت به مقاله [۲۸] دارای جابجایی بیشتر و همچنین از ماده بهتری استفاده شده است. ابعاد دیافراگم پیشنهادی متناسب با کاربرد پزشکی بوده و قابلیت کاشته شدن در گوش را دارد. ماده پیزوالکتریک مورد استفاده در شبیه‌سازی‌ها PZT می‌باشد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها در این مقاله نشان داده شده است که دیافراگم بیضی با ابعاد  $200\mu m \times 100\mu m$  نسبت به دیافراگم‌های مربعی و مستطیلی با سایزهای که در جدول (۱) است و تحت شرایط یکسان می‌باشد. جابجایی مرکز دیافراگم بیضی پیشنهادی با ابعاد  $200\mu m \times 100\mu m$  تحت نیروی اعمالی  $1Pa$  در راستای محور Z و دمپینگ  $0.0001$ ،  $130nm$  می‌باشد. همچنین ماده پیزوالکتریک مورد استفاده در این شبیه‌سازی‌ها PZT می‌باشد که این مقدار به ازای شکل مربعی به ضلع  $100\mu m$  و دیافراگم مستطیلی با ابعاد  $100\mu m \times 200\mu m$ ، ضخامت  $15\mu m$  و تحت شرایط یکسان به ترتیب  $6/2nm$  و  $5/5nm$  می‌باشد. چون جابجایی مرکزی مهمترین پارامتر در میکروفن‌های قابل کاشت در کاربردهای پزشکی می‌باشد، در این مقاله به تحلیل این پارامتر در شرایط مختلف پرداخته شده است. بعد از تعیین دیافراگم بیضی شکل تحت شرایط یکسان و با ضخامت‌های متفاوتی شبیه‌سازی شده است که با توجه به نتایج جدول (۲) می‌توان استنباط کرد که دیافراگم پیشنهادی با زیاد شدن ضخامتش دارای کمترین میانگین جابجایی مرکزی می‌باشد. تحلیل بعدی که بر روی دیافراگم بیضی انجام گرفته شده است، طبق جدول (۳) دیافراگم مطلوب تحت فشارهای مختلف آنالیز شده است و به این نتیجه رسیدیم که هر قدر فشار اعمالی به دیافراگم با در نظر گرفتن قوانین مربوط به خطینگی و کاربرد در پزشکی بیشتر باشد، میزان میانگین جابجایی مرکزی نیز بیشتر می‌شود.

پی‌نوشت:

1. Micro-Electro-Mechanical-System
2. Complementary Metal Oxide Semiconductor

با توجه به نتایج به دست آمده از جدول (۲) ملاحظه می‌گردد که هر چه قدر ضخامت دیافراگم بیشتر می‌شود میزان جابجایی در مرکز دیافراگم کمتر می‌گردد. لازم به ذکر است جدول (۲) در شرایط یکسان اعمال شده به دست آمده است.

### ۵-۲- تغییرات فشار اعمالی بر دیافراگم بیضی

در این بخش، دیافراگم پیشنهادی با شکل بیضی را با ابعاد، ضخامت و با همان شرایط در نظر گرفته شده در نرم‌افزار COMSOL تحت فشارهای اعمالی متفاوتی قرار داده و تاثیر تغییرات فشار اعمالی بر روی میزان جابجایی مرکز دیافراگم بررسی شده است. نتایج حاصل از آنالیز در جدول (۳) آورده شده است.

Table (3): Change of applied pressure on the proposed diaphragm

جدول (۳): تغییرات فشار اعمالی بر دیافراگم پیشنهادی

فشار (Pa)	میانگین جابجایی مرکز دیافراگم ( $\mu m$ )	
۰/۵	۰/۱۳	۱
۱	۰/۲۵	۲
۵	۱/۲۵	۳
۱۰	۲/۵	۴
۲۰	۵	۵
۵۰	۱۲/۵	۶
۱۰۰	۲۵	۷

با توجه به جدول (۳)، ملاحظه می‌گردد که هر چه قدر فشار اعمالی به دیافراگم پیشنهادی بیشتر می‌شود، میانگین جابجایی مرکز دیافراگم بیشتر می‌گردد که داشتن بیشترین مقدار جابجایی مطلوب می‌باشد. البته بسته به کاربرد دیافراگم، فشار مربوطه اعمال می‌شود و به شرطی که سیستم را از خطی بودن خارج نکند.

### ۶. نتیجه گیری

بر اساس مقاله‌ای که در سال ۲۰۱۳، ارائه گردیده است، دیافراگم میکروفن پیزوالکتریک با استفاده از تکنولوژی میکروالکترومکانیکی جهت به کارگیری در کاربردهای پزشکی پیشنهاد شده است. در مقاله

## References

- [1] R.J. Littrell, "High performance piezoelectric MEMS microphones", Ph.D. dissertation, The University of Michigan, 2010.
- [2] D.R. Dixon, "Mems microphones break design mould", April 2006.
- [3] J. Bouchaud, "Mems microphones make noise", Jan. 2012.
- [4] I.J. Cho, S. Jang, H.J. Nam, "A piezoelectrically actuated mems speaker with polyimide membrane and thin film pb(zr,tio<sub>3</sub>(pzt) actuator", *Integrated Ferroelectrics*, Vol. 105, No. 1, pp. 27-36, 2009.
- [5] M.C. Cheng, W.S. Huang, S.R.S. Huang, "A silicon microspeaker for hearing instruments", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 14, No. 7, pp. 859-866, May 2004.
- [6] H. Kim, A. Astle, K. Najafi, L. Bernal, P. Washabaugh, F. Cheng, "Bi-directional electrostatic microspeaker with two large-deflection flexible membranes actuated by single/dual electrodes", *Proceeding of the IEEE/ICSENS*, pp. 89-92, Irvine, CA, USA, Nov. 2005.
- [7] H. J. Kim, K. Koo, S.Q. Lee, K.H. Park, J. Kim, "High performance piezoelectric microspeakers and thin speaker array system", *ETRI Journal*, Vol. 31, No. 6, pp. 680-687, Dec. 2009.
- [8] G. Lemarquand, R. Ravaud, I. Shahosseini, V. Lemarquand, J. Moulin, E. Lefeuvre, "Memselectrodynamical loudspeakers for mobile phones", *Applied Acoustics*, Vol. 73, No. 4, pp. 379 -385, April 2012.
- [9] Y.J. Chang, Y.W. Chung, T.A. Chou, M.F. Huang, "Valve-less diaphragm micropump with electromagnetic actuation", *Advanced Materials Research*, Vol. 647, pp. 929-934, Jan. 2013.
- [10] S.S. Je, F. Rivas, R.E. Diaz, J. Kwon, J. Kim, B. Bakkaloglu, S. Kiaei, J. Chae, "A compact and low-cost MEMS loudspeaker for digital hearing aids", *IEEE Trans. on Biomedical Circuits and Systems*, Vol. 3, No. 5, pp. 348-358, Oct. 2009.
- [11] S. Kim, X. Zhang, R. Daugherty, E. Lee, G. Kunnen, D. Allee, E. Forsythe, J. Chae, "Microelectromechanical systems (mems) based-ultrasonic electrostatic actuators on a flexible substrate", *IEEE Electron Device Letters*, Vol. 33, No. 7, pp. 1072 -1074, July 2012.
- [12] P. Rangsten, L. Smith, L. Rosengren, B. Hok. "Electrostatically excited diaphragm driven as a loudspeaker", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 52, pp. 211-215, 1996.
- [13] P. Scheeper, A.D. Van der, W. Olthuis, P. Bergveld, "A review of silicon microphones", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 44, No. 1, pp. 1-11, 1994.
- [14] W.S. Lee, S.S. Lee, "Piezoelectric microphone built on circular diaphragm", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 144, No. 2, pp. 367-373, June 2008.
- [15] H. Bruhns, A. Marianovich, M. Wolff, "Photoacoustic spectroscopy using a MEMS microphone with inter-IC sound digital output", *International Journal of Thermophysics*, Vol. 35, No. 12, pp. 2292-2301, Dec. 2014.
- [16] C. Han, E. Kim, "Fabrication of dome-shaped diaphragm with circular clamped boundary on silicon substrate", in *Proc. IEEE Conference MEMS*, pp. 505-510, Jan. 1999.
- [17] S.H. Yi, E.S. Kim, "Piezoelectric Micro-speaker with Compressive Nitride Diaphragm", *IEEE International Micro Electro Mechanical Systems Conference*, pp. 260-263, Jan. 2002.
- [18] M. Niu, E.S. Kim, "Piezoelectric bimorph microphone built onmicromachinedparylene diaphragm", *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 12, No. 6, pp. 892-898, Dec. 2003.
- [19] S.C. Ko, Y.C. Kim, S.S. Lee, S.H. Choi, S.R. Kim, "Micromachined piezoelectricmembrane acoustic device", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 103, No. 1-2, pp. 130-134, Jan. 2003.
- [20] J.W. Judy, "Microelectromechanical systems (MEMS): fabrication, design and applications", *Smart Materials and Structures*, Vol. 10, No. 6, pp. 1115-1134, Nov. 2001.
- [21] D.T. Blackstock, "Fundamentals of physical acoustics", California: John Wiley & Sons, Inc, Ch. 4, 14, 2000.
- [22] N. Zargarpour, M.H. Zarifi, "A piezoelectric micro-electromechanical microphone for implantable hearing aid applications", *Berlin Heidelberg*, Vol. 21, No. 4, pp. 893-902, April 2014.
- [23] S.N. Laboratories, A. Sandia, "MEMS advanced design short course notes", National Laboratories, NM, pp. 5-21, July 2002.
- [24] J.J. Sniegowski, M.S. Rodgers, "Multi-layer enhancement to polysilicon surface micromachining technology", *International Electron Devices Meeting*, pp. 903-906, Dec. 1997.
- [25] S. Timoshenko, S.W. Krieger, "Theory of plates and shells", McGraw-Hill, New York, pp. 396-404, 1959.
- [26] N. Zargarpour, M. Zarifi, "Proposing a new design for microelectromechanical microphone's diaphragm in implantable hearing aid", *Proceeding of the National Conf. on Computer and Intelligent Systems*. Iran-Tabriz, 2013.
- [27] P. DahaleKetaki, M. RasalSuyog, "An aid hearing for stone deaf person", *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)*, Vol. 4, No. 4, pp. 1544-1552, 2012.
- [28] T.Y. Cheng, "The sensitivity analysis of a MEMS microphone with different membrane diameters", *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 18, No. 6, pp. 790-796 , Dec. 2010.