

بررسی حساسیت فشار سنج دیافراگمی مبتنی بر فناوری میکروالکترومکانیک با استفاده از تحلیل المان محدود

سید فرحان موسویان
دانشجوی کارشناسی ارشد

داریوش برزویی
دانشجوی کارشناسی ارشد

میثم فرج الهی*
استادیار،

دانشکده فناوری های نوین، گروه
سیستم های انرژی، دانشگاه علم و
صنعت ایران، تهران

چکیده: سنسورهای فشار دیافراگمی در صنایع مختلفی مورد استفاده قرار می گیرند. پژوهش های زیادی برای بهینه سازی و ارتقای کیفی این سنسورها انجام گرفته است. در این مقاله، "حساسیت" به عنوان یک متغیر کلیدی در طراحی سنسور فشار دیافراگمی مبتنی بر فناوری میکروالکترومکانیک مورد بررسی قرار گرفته است. هندسه دیافراگم یکی از تاثیر گذارترین متغیرها در حساسیت یک فشار سنج دیافراگمی است که می تواند علاوه بر حساسیت، محدوده عملکردی، دقت سنسور، ابعاد و حتی قیمت آن را تحت تاثیر قرار دهد. لذا با هدف افزایش عملکرد و حساسیت سنسور های فشار، نسبت به شبیه سازی دیافراگم سنسور در نرم افزار تجاری آباکوس اقدام گردید و ضمن اعتبار سنجی حلگر محاسباتی، هندسه های مختلف دیافراگم مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج بدست آمده گواه آن بود که دیافراگم دایره ای دارای بهترین عملکرد است. در اثر موج دار کردن سطح دیافراگم بررسی شد و شکل های مختلفی از موج های ایجادی در بستر دیافراگم، شبیه سازی گردید. نتایج بدست آمده حاکی از آن بود که ایجاد موج دایره ای با شعاع 15 میکرومتر در انتهای سطح دیافراگم، موجب افزایش 18 درصدی حساسیت سنسور می گردد.

واژه های راهنما: فشار سنج، فناوری میکروالکترومکانیک، حساسیت، تحلیل المان محدود، دیافراگم موج دار

مقاله علمی پژوهشی
دریافت: 1400/07/28
پذیرش: 1401/02/30

Seyed Farhan
Moosavian
M.Sc. Student

Daryoosh Borzuei
M.Sc. Student

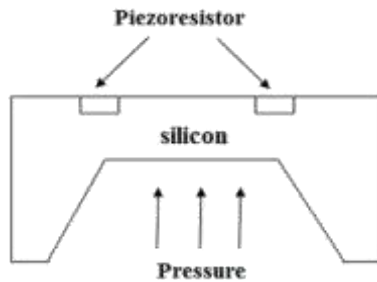
Meisam
Farajollahi*
Assistant Professor,
School of Advanced
Technologies,
Department of Energy
Systems, Iran University
of Science and
Technology, Tehran

Evaluation of diaphragm pressure sensor sensitivity based on MEMS technology using finite element analysis

Abstract: Diaphragm pressure sensors are used in various industries. Much research has been done to optimize and improve the quality of these sensors. This paper investigates "sensitivity" as a critical variable in diaphragm pressure sensors based on MEMS technology. Aperture geometry is one of the most influential variables in the sensitivity of a diaphragm sphygmomanometer, which in addition to sensitivity, can affect other variables such as operating range, sensor accuracy, dimensions, and even price. To increase the performance and sensitivity of pressure sensors, the sensor aperture was simulated in AbaqusFEA software, and while validating the computational solver, different geometries were evaluated. The results showed that the circular diaphragm has the best performance. Then the effect of corrugations on the surface of the diaphragm was investigated, and different forms of waves were simulated. The results showed that creating a circular wave with a radius of 15 μm at the end of the diaphragm surface increases the sensor's sensitivity by 18%.

Keywords: Pressure sensor , MEMS , Sensitivity , FEA , corrugated diaphragm

۱- مقدمه



شکل ۱ سنسور فشارسنج پیزومقاومتی [۱۱]

در سالهای اخیر استفاده از سنسور های میکروالکترو مکانیک فشاری مبتنی بر پدیده پیزومقاومتی به دلیل سهولت ساخت، هزینه پایین، روش اندازه گیری ساده، محدوده گسترده کاری و دقت اندازه گیری بالا، متداول گشته است [۸]. مطالعات گسترده ای پیرامون شکل هندسی و ساختار دیافراگم این نوع سنسور ها انجام گرفته [۱۲]، [۱۳] و برای کاربرد های مختلف و گستره ی فشار کاری، مدل های متنوعی ارائه گردیده است که در ادامه به مرور برخی از این مطالعات پرداخته می شود.

پیرامون موضوع انتخاب بهترین هندسه دیافراگم، محمدی و محمدزاده به شبیه سازی هندسه ی دیافراگم سنسور های فشار در نرم افزار آباکوس و بررسی اثر سوراخ در آن پرداخته و ضمن بررسی سه هندسه ی دایره، مربع و مستطیل، مشاهده نمودند که دیافراگم دایره ای تحت بارگذاری یکسان، دارای کمترین تنش و بیشترین تغییر شکل، می باشد [۱۴]. سوچا و همکاران شکل های مختلف دیافراگم سنسور های فشار مانند مربعی، مستطیلی و دایره ای متشکل از سیلیکون را مدل سازی نموده و پارامترهای عملکردی آن ها یعنی خیز و تنش را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. نتایج آنان حاکی از آن بود که دیافراگم دایره ای از جنس سیلیکون تک کریستاله بهترین عملکرد را دارا می باشد [۱۱]. نولتامبی و مگوانتانام نیز سنسور های فشار مبتنی بر دیافراگم را برای کاربرد های محیطی مورد بررسی قرار داده و ضمن شبیه سازی سه هندسه ی دایره ای، مستطیلی و مربعی، نتایج خود را با روابط تحلیلی موجود مقایسه نموده و بیشترین خطا را در هندسه مستطیلی گزارش نمودند [۱۵]. رحمان و ابراهیم به شبیه سازی دیافراگم های مستطیلی از جنس گرافن در سنسور های فشار میکروالکترومکانیک با استفاده از نرم افزار کامسول، پرداخته و اثر تغییر ضخامت در نسبت های طول به عرض ثابت را بررسی نمودند. نتایج بدست آمده حاکی از آن بود که افزایش نسبت طول به عرض، موجب کاهش تغییر شکل بیشینه ی دیافراگم می گردد [۱۶].

در خصوص تغییر ماده سازنده دیافراگم و خواص آن نیز مطالعات گسترده ای انجام گرفته است. شاکلیا و همکاران به شبیه سازی دیافراگم دایره ای مقید پرداخته و در مطالعه خود

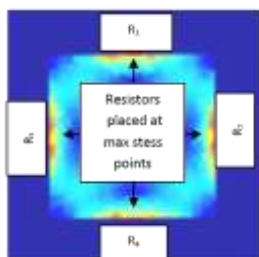
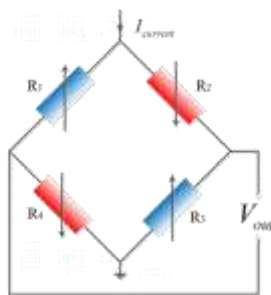
امروزه با پیشرفت تکنولوژی، کاهش ابعاد سنسور ها به منظور کاهش هزینه، افزایش دقت و قابلیت ساخت در تعداد بالا در یک فرآیند واحد، از اهمیت بالایی برخوردار بوده بطوریکه باعث افزایش تمرکز پژوهش های متعدد در این راستا گردیده است. از طرف دیگر پیشرفت های چشمگیر در صنعت ساخت در ابعاد میکرون و مزیت های ویژه این روش ها، طراحی و ساخت بسیاری از حسگر های جدید مبتنی بر سیستم های میکرو الکترو مکانیکی (ممز) بوده که در واقع ترکیبی از سیستم های هوشمند مکانیکی و الکتریکی در ابعاد میکرون می باشند [۱].

فناوری های مختلفی جهت استفاده در داده برداری و تبدیل داده مورد نظر به یک پارامتر قابل اندازه گیری مورد استفاده قرار گرفته و شامل سیستم های نوری، خازنی، پیزوالکتریک، پیزو مقاومتی، رزونانسی و ترموالکتریکی می گردد [۲]. در این میان روش های پیزو مقاومتی دارای کاربرد گسترده تری نسبت به موارد دیگر می باشند. از مهمترین محصولات تولیدی از تکنولوژی میکرو الکترو مکانیک، سنسور های فشارسنج بوده که دقت بالا و هزینه ساخت پایین از مزایای بارز این نوع از سنسورها است [۳]. به طور کلی سنسور های فشار را می توان از پرکاربردترین المان ها در اکثر صنایع (هوافضا [۴]، اتومبیل سازی، دریایی [۵]، [۶]، پایش سلامت [۷] و ...) و سایر تجهیزات دانست. این سنسورها را می توان از نظر روش اندازه گیری به دو نوع رزونانسی و جابجایی تقسیم نمود. در سنسور های فشار رزونانسی اندازه گیری فشار توسط شیفت فرکانس تشدید حاصل از تنش های اعمالی به دیافراگم انجام گرفته که از مزایای این روش می توان به پایداری طولانی مدت، مدار خوانش ساده و دقت بالا اشاره نمود [۸]. در سنسور های فشار از نوع جابجایی، اندازه گیری بر پایه ی جابجایی نقطه اثر اعمال نیرو انجام گرفته و به همین دلیل اینگونه سنسور ها دارای دیافراگم یا تیری هستند که به عنوان المان اولیه در اثر اعمال فشار، تغییر شکل می دهند [۹]. میزان جابجایی دیافراگم یا تیر با استفاده از ساز و کار ها و المان های سنجشی متفاوتی همچون خازنی، پیزوالکتریکی و پیزومقاومتی محاسبه شده و در نهایت مقدار بدست آمده از جابجایی، باتوجه به نوع ساز و کار سنجشی به مقدار فشار، تبدیل می گردد [۱۰]. در شکل ۱، شماتیکی از یک سنسور فشار پیزو مقاومتی مشاهده می گردد.

است. در مقاله حاضر مدلسازی المان محدود دیافراگم سنسور های فشار در نرم افزار آباکوس نسخه ۶،۱۴ انجام شده و دیافراگم بهینه از میان هندسه های متداول مربعی، دایره ای و مستطیلی انتخاب می گردد. سپس تاثیر ایجاد موج در سطح دیافراگم بهینه شبیه سازی شده و تغییرات شکل موج ایجاد می و محل آن، مورد بررسی قرار می گیرد. در نهایت نتایج بدست آمده از دیافراگم موج دار با مدل ساده مقایسه گشته و منحنی های مشخصه ی اثر موج دار کردن در تغییر خواص دیافراگم دایره ای ارائه و هندسه بهینه نتیجه می گردد.

۲- مدلسازی دیافراگم فشار سنج پیزو مقاومتی

مکانیزم دیافراگم در سنسور های فشار پیزومقاومتی به گونه ای است که یک غشای نازک سیلیکونی به عنوان دیافراگم از طرفین به بدنه مقید شده است (شکل ۱). هنگامیکه اختلاف فشار در دوطرف دیافراگم ایجاد می شود، دیافراگم در اثر فشار اعمالی به سمت بالا یا پایین خم گشته و سبب ایجاد کشش یا فشار در المان های پیزومقاومتی می گردد. کرنش ایجاد شده در پیزومقاومت ها باعث تغییر در مقاومت الکتریکی آنها و نتیجتاً تغییر در ولتاژ خروجی مدار خوانش سنسور می گردد. نهایتاً با بدست آوردن میزان تغییرات ولتاژ خروجی، مقدار فشار وارده بدست می آید. اساس مدار الکتریکی خوانش در اینگونه سنسور ها عموماً بر مبنای مکانیزم پل و تستون است. در این مکانیزم چهار عدد پیزومقاومت مطابق آرایش شکل ۲، به گونه ای قرار گرفته که دو مقاومت تنش های عمود بر جریان خود را حس کرده و دو مقاومت دیگر، تنش های هم امتداد با جریان را حس می کنند.



شکل ۲ محل قرارگیری مقاومت ها در پل و تستون [۲۴]

دو جنس سیلیکون و سیلیکون کارباید را بررسی نمودند. آنان ضمن نشان دادن این موضوع که حساسیت "سیلیکون کارباید"، ۱۳ درصد از سیلیکون بیشتر است، سیلیکون کارباید را، ماده ای بهینه برای ساخت سنسور های فشار دانستند [۱۷]. موسر و همکاران به بررسی تجربی حسگر های فشار ساخته شده از کریستال پلی سیلیسیم پرداختند. نتایج حاصله حاکی از آن بود که انتخاب جنس کریستال پلی سیلیسیم برای ساخت سنسور های فشار مناسب می باشد [۱۸]. ژو و همکاران ریز سنسور فشار پیزو مقاومتی با محدوده کاری صفر تا هفتصد میلی بار ارائه نمودند که دیافراگم آن مربعی از جنس نیتريد سیلیکون و گرافن به عنوان ماده پیزو مقاومتی آن می باشد. [۱۹].

علیرغم تغییر شکل هندسی و جنس دیافراگم، پژوهش هایی در راستای افزایش محدوده کاری توسط موج دار کردن هندسه دیافراگم نیز صورت گرفته و مطالعه پیرامون آن در سالهای اخیر افزایش یافته است. گوپی و همکاران تاثیر موج دار کردن دیافراگم در هندسه دایره ای را بررسی کرده و مشاهده نمودند که موج دار کردن دیافراگم باعث افزایش حساسیت و محدوده کاری می گردد [۲۰]. لی و همکاران مروری بر پژوهش های انجام شده در زمینه موج دار کردن دیافراگم سنسور های فشاری انجام دادند. آنان مطالعات خود را به چند بخش شامل بررسی خواص دیافراگم های ساده، بررسی خواص دیافراگم های موج دار، تاثیر دیافراگم های موج دار بر عملکرد سنسور و کاربرد دیافراگم های موج دار در سنسور های فشار، تقسیم نمودند [۲۱].

تحقیقات در خصوص فشارسنج های میکروالکترومکانیکی پیزومقاومتی به شبیه سازی محدود نگشته و آزمایشات و مطالعات تجربی گسترده ای پیرامون آن صورت گرفته است. جویریج و همکاران به صورت تجربی به بررسی رفتار فشار سنج های پیزومقاومتی پرداخته و نتایج تجربی خود را با تئوری موجود مقایسه نمودند [۲۲]. ویلیانی و همکاران به بررسی تجربی همراه با شبیه سازی فشارسنج های پیزو مقاومتی پرداختند. آنان در نتایج خود اذعان نمودند که حساسیت حسگر، تابعی از موقعیت، هندسه و ضخامت دیافراگم می باشد. نتایج آزمایشگاهی آنان خطای کمتر از ۰/۵ درصدی را در محدوده کاری صفر تا شش بار گزارش می کند [۲۳].

باتوجه به اهمیت موضوع و کاربرد های گسترده آن، در خصوص بهینه سازی سنسور های فشار از طریق تغییر ساختار هندسی دیافراگم، مطالعات گسترده ای انجام گرفته و علاوه بر تغییر شکل هندسی دیافراگم، ایده هایی نظیر موج کردن سطح آن، پیشنهاد شده است. با این حال اثر شیوه موج دار کردن، شکل موج ایجاد می و جایگاه آن، تا کنون مورد مطالعه قرار نگرفته

$$(\sigma_{xx})_{max} = \frac{\sigma(M_x)_{max}}{h^2} \quad (5)$$

$$(\sigma_{yy})_{max} = \frac{\sigma(M_y)_{max}}{h^2} \quad (6)$$

$$(\sigma_{xy})_{max} = \frac{\sigma(M_{xy})_{max}}{h^2} \quad (7)$$

در ادامه باتوجه به معادلات بدست آمده، روابط مربوط به هندسه های مربعی، مستطیلی و دایره ای استخراج می گردد. جهت ایجاد امکان مقایسه نتایج، لازم است، هندسه هایی با مساحت یکسان مدلسازی شود. در شکل ۴ ابعاد پارامتری هندسه های مربعی، مستطیلی و دایره ای، (با مساحت یکسان) ملاحظه شده و سپس معادلات مربوط به هر مورد ارائه گردیده است.



شکل ۴ ابعاد پارامتری دیافراگم مستطیلی، دایره ای و مربعی

مولفه های تنش و تغییر شکل بیشینه در هندسه دایره ای، به ترتیب مطابق روابط ۸ و ۹، در دو راستای r و θ بدست می آید [۲۵].

$$(\sigma_{max})_{rr} = \frac{3Q}{4\pi h^2} \quad (8)$$

$$(\sigma_{max})_{\theta\theta} = \frac{3\nu Q}{4\pi h^2}$$

$$w_{max} = -\frac{3Q \times (m^2 - 1)a^2}{16\pi E m^2 h^3}, m = \frac{1}{\nu} \quad (9)$$

که در روابط فوق Q برابر مقدار نیروی وارده بر سطح دیافراگم بوده و از رابطه $Q = \pi \times a^2 \times p$ محاسبه می گردد.

در هندسه مستطیلی مولفه های تنش و تغییر شکل بیشینه مطابق روابط ۱۰ و ۱۱، در دو راستای x و y بدست می آید [۲۵].

$$(\sigma_{max})_{yy} = \beta \frac{pb^2}{h^2} \quad (10)$$

$$(\sigma_{max})_{xx} = \beta \frac{p\nu b^2}{h^2}$$

$$w_{max} = \alpha \frac{pb^4}{Eh^3} \quad (11)$$

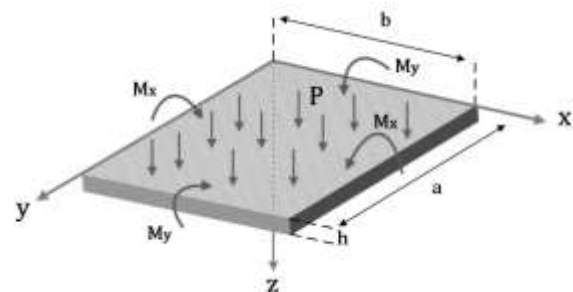
در روابط فوق، b برابر عرض مستطیل بوده و مقادیر α و β از جدول ۱ بدست می آید.

از آنجایی که المان اصلی در سنسور های فشار سنج پیزومقاومتی، دیافراگم آن است، تحلیل تئوری این عنصر، مستلزم بررسی معادلات حاکم بر دیافراگم می باشد.

۱-۲- معادلات حاکم

هنگامیکه فشار یکنواخت P ، مطابق شکل ۳ بر سطح یک دیافراگم وارد می گردد، کرنشی تحت تاثیر موارد ذیل حاصل می گردد:

- تنش نرمال σ_x و σ_y که باعث افزایش گشتاور خمشی M_x و M_y می گردد.
- تنش برشی τ_{xy} که باعث افزایش گشتاور پیچشی M_{xy} می گردد.



شکل ۳ شماتیک دیافراگم خمشی یک صفحه مستطیلی

معادله دیفرانسیل اصلی تغییرشکل صفحه دیافراگمی با ضخامت معین و لبه های کاملاً مقید تحت فشار خارجی P مطابق رابطه زیر می باشد [۲۵].

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}\right)\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right) = \frac{p}{D} \quad (1)$$

که در آن w مقدار تغییر شکل ورق، p فشار وارد بر دیافراگم و D صلبیت خمشی بوده که مقدار آن $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$ می باشد. مقادیر E و ν به ترتیب برابر: مدول یانگ دیافراگم، ضریب پواسون و ضخامت دیافراگم می باشند.

با حل معادله ۱ تحت شرایط مرزی مناسب، مقدار تغییر شکل دیافراگم بدست می آید. در ادامه با در دست داشتن تغییر شکل $(w(x, y))$ مقادیر گشتاور های خمشی و تنش های بیشینه، مطابق روابط ۲ تا ۷ بدست می آید [۲۵].

$$M_x = -D\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right) \quad (2)$$

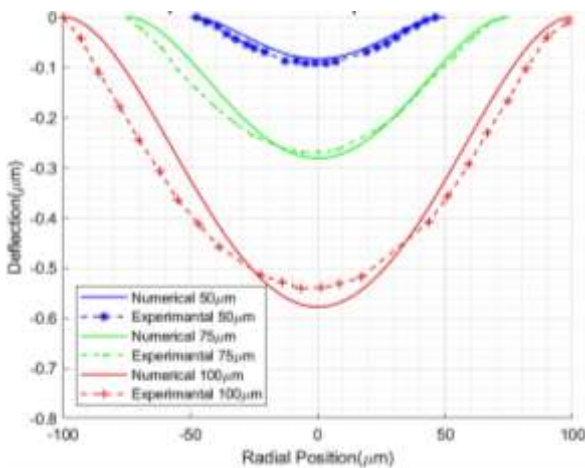
$$M_y = -D\left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right) \quad (3)$$

$$M_{xy} = D(1 - \nu) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad (4)$$

مدلسازی دیافراگم ها متداول است و در پژوهش های متعددی [۱۷]، [۲۰] استفاده شده است. نهایتاً کلیه شرایط مدلسازی در نرم افزار آباکوس اعمال شده و کانتور های تنش و تغییر شکل حاصل می گردد.

۳-۲- اعتبار سنجی حلگر محاسباتی

جهت بررسی صحت عملکرد نرم افزار آباکوس و تنظیمات آن از داده های تجربی موجود در خصوص دیافراگم دایره ای ساده استفاده شده است. بدین منظور، نمودار تغییر شکل دیافراگم دایره ای که به روش عددی تولید شده، با نتایج تجربی ارایه شده در مطالعه ی ایتن و همکاران [۲۷]، مقایسه گردیده است. شرایط این مدلسازی به گونه ای است که دیافراگمی دایره ای با ضخامت $1/4$ میکرومتر، از جنس نیترات سیلیکون (با مدول یانگ 300 گیگا پاسکال و ضریب پوآسون $0/24$) تحت فشار 12 psi در سه شعاع 50 ، 75 و 100 میکرومتر مورد آزمایش قرار گرفته است [۲۹]. در شکل ۵، مقایسه ای میان نتایج ایتن و همکاران و مرجع مدلسازی مقاله ی حاضر، ارائه گردیده و تطابق خوبی میان آنان ملاحظه می گردد. بیشینه مقدار خطای "جذر میانگین مربعات" مربوط به شعاع 100 میکرومتر بوده و برابر $2/47$ است و کمینه مقدار آن مربوط به شعاع 50 میکرومتری بوده و برابر $1/06$ می باشد.



شکل ۵ مقایسه ی نتایج مدلسازی عددی با نتایج تجربی ایتن و همکاران [۲۷] جهت اعتبار سنجی حلگر محاسباتی

۳-۲-۴- شبیه سازی دیافراگم ساده

کانتور های تنش و تغییر شکل در فشار 5 مگاپاسکال برای هندسه های مستطیلی، مربعی و دایره ای، در شکل ۶ و ۷ ملاحظه

جدول ۱ مقادیر ضرایب مربوط به محاسبه تنش و تغییر شکل در

هندسه مستطیلی [۱۵]

a/b	۱	۱/۲	۱/۴	۱/۶	۲
α	۰/۰۱۳۸	۰/۰۱۸۸	۰/۰۲۲۶	۰/۰۲۵۱	۰/۰۲۷۷
β	۰/۳۰۷۸	۰/۳۸۳۴	۰/۴۳۵۶	۰/۴۶۸۰	۰/۴۹۷۴

از آنجایی که هندسه مربعی، حالت خاصی از هندسه مستطیلی می باشد، تنش و کرنش آن از روابط 10 و 11 قابل محاسبه است. پس از مرور معادلات حاکم بر انواع هندسه متداول در دیافراگم ها، لازم است تا جنس، ابعاد و سایر شرایط مدلسازی ذکر شود.

۳-۲-۲- شرایط مدلسازی دیافراگم ساده

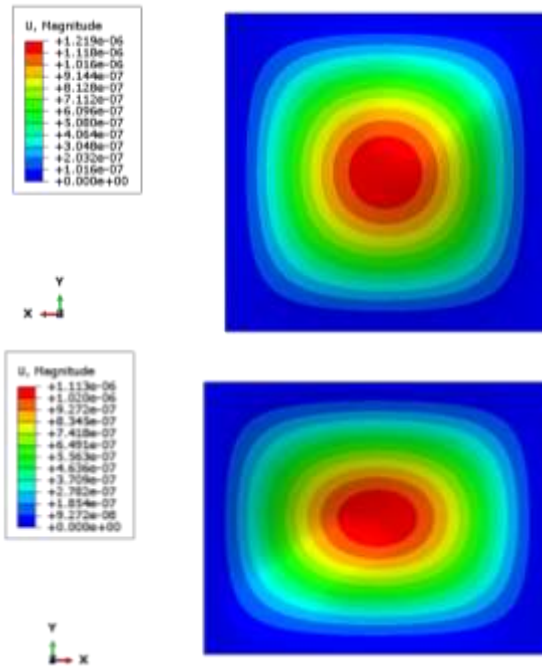
باتوجه به پژوهش های انجام شده در خصوص انتخاب جنس بهینه ی دیافراگم، و اتفاق نظر در انتخاب جنس سیلیکون [۱۴]، [۱۵]، [۲۶] در این پژوهش نیز ماده سیلیکون تک کریستاله به عنوان جنس دیافراگم انتخاب گردید. جدول ۲ بیانگر خواص مکانیکی و ابعاد دیافراگم در هندسه های مختلف می باشد. لازم به ذکر است شرط مساحت، در ابعاد داده شده، مطابق شرایط شکل ۴، رعایت شده است.

جدول ۲ ابعاد و خواص مکانیکی دیافراگم ها

خواص مکانیکی ماده			جنس دیافراگم
چگالی (kg/m^3)	ضریب پوآسون	مدول یانگ (GPa)	
۲۳۳۰	۰/۲۸	۱۸۰	سیلیکون تک کریستال
ابعاد دیافراگم در هندسه های مختلف			
هندسه دیافراگم	طول (μm)	عرض (μm)	ضخامت (μm)
مربع	۵۳۱/۷۳۶	۵۳۱/۷۳۶	۳۰
مستطیل	۶۰۰	۴۷۱/۲۳۹	۳۰
دایره	D=۳۰۰		۳۰

شرط مرزی اعمال شده بر هندسه دیافراگم به گونه ای است که، تمامی درجات آزادی گره های محیط دیافراگم مقید شده و فشار اعمالی به صورت یکنواخت در سطح توزیع شده باشد. لازم به ذکر است، استفاده از قید لبه های محیطی ثابت (کَلِمپ) در

می گردد. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که هندسه دایره ای علیرغم کمترین تنش وارده، دارای بیشترین تغییر شکل می باشد.



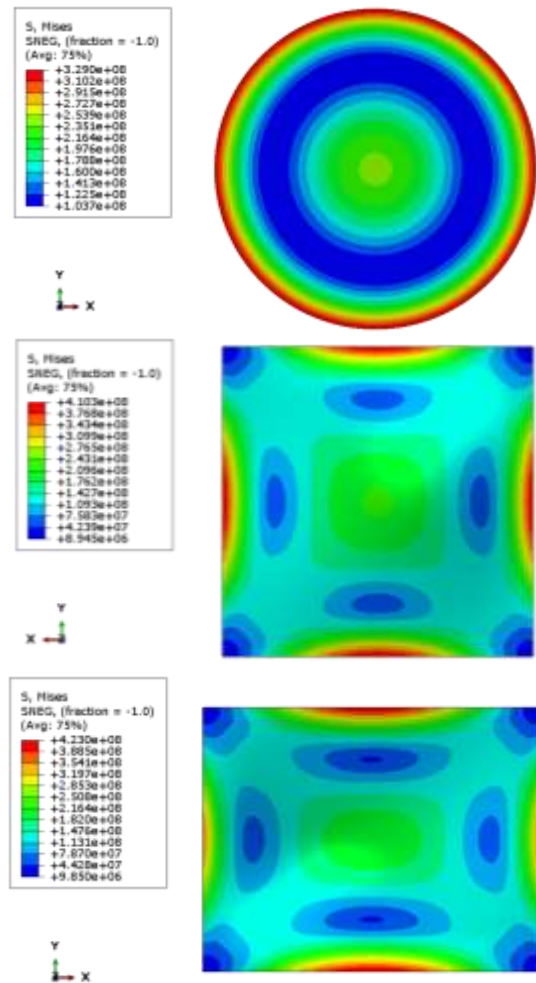
شکل ۷ کانتور های تغییر شکل، برای هندسه های دایره ای، مربعی و مستطیلی

در جدول ۳، نتایج بدست آمده از مقادیر تنش و تغییر شکل بیشینه (در فشار اعمالی ۵ مگاپاسکال) برای هندسه های مختلف با نتایج تئوری بدست آمده از روابط ارائه شده، مقایسه گردیده است.

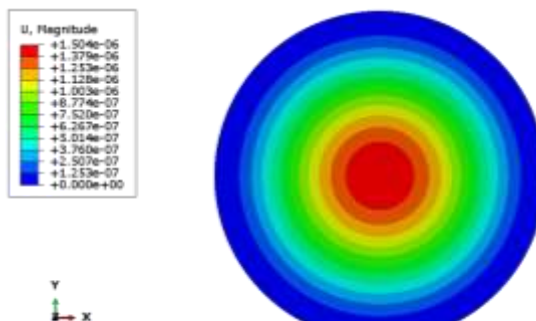
جدول ۳ مقایسه نتایج شبیه سازی عددی و روابط تئوری برای هندسه های مختلف

تغییر شکل بیشینه (در فشار ۵ مگاپاسکال) (μm)	تنش مایز بیشینه (در فشار ۵ مگاپاسکال) (MPa)		شکل دیافراگم
	روابط تئوری	شبیه سازی	
۱/۴۴	۳۳۵/۰۷	۳۲۹	دایره
۱/۱۴	۴۳۲/۳	۴۱۰/۳	مربع
۱/۰۲	۴۴۳/۷	۴۲۳	مستطیل

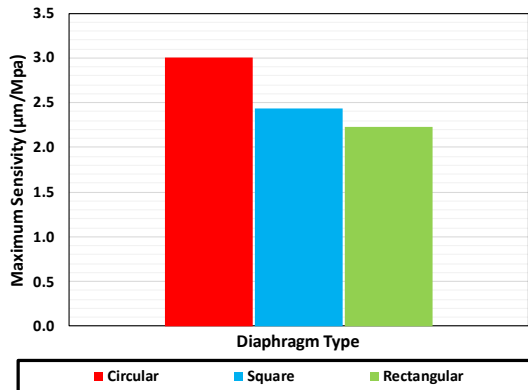
چنانچه از نتایج جدول ۳ برمی آید، مطابقت خوبی میان داده های تئوری و شبیه سازی عددی ملاحظه گردیده و این موضوع، گواهی بر صحت اعتبار شبیه سازی انجام شده می باشد. در شکل ۷ نمودار تنش های بیشینه در فشارهای ۱ تا ۱۰ مگاپاسکال، برای هندسه های مختلف ترسیم گردیده است. همچنین نمودار تنش های تئوری در همان فشار ها نیز، جهت مقایسه با نتایج عددی ملاحظه می گردد.



شکل ۶ کانتور های تنش مایز، برای هندسه های دایره ای، مربعی و مستطیلی



بر حسب فشار است. در شکل ۱۰ نمودار میله ای مقایسه حساسیت هندسه های مختلف با یکدیگر آورده شده است.



شکل ۱۰ مقایسه حساسیت هندسه های مختلف با یکدیگر

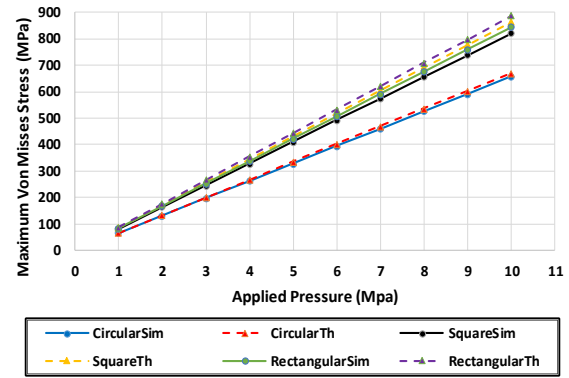
مطابق نمودار شکل ۱۰، بیشینه حساسیت در هندسه دایره ای مشاهده شده و هندسه مربعی و مستطیلی در رتبه های بعدی قرار می گیرند. لذا نتایج بدست آمده حاکی از آن است که هندسه دایره ای، با دارا بودن بیشترین حساسیت و کمترین تنش، به عنوان مناسب ترین دیافراگم برای استفاده در سنسور های فشار سنج پیزومقاومتی می باشد. در ادامه برای افزایش بیشتر حساسیت دیافراگم دایره ای از روش موج دار کردن هندسه استفاده می گردد.

۲-۴- مدل سازی دیافراگم موج دار

باتوجه به مطالعات انجام شده در خصوص موج دار کردن دیافراگم، ایجاد موج دایره ای مختلف جهت در انتهای دیافراگم، برای افزایش حساسیت هندسه دایره ای، پیشنهاد گردیده است [۲۰]، [۲۸]. در این پژوهش نیز تاثیر ایجاد موج دایره ای مختلف جهت در دیافراگم دایره ای مطالعه گردیده و تاثیر تغییر پارامتر های آن در حساسیت دیافراگم مد نظر می باشد. در شکل ۱۱ مقطعی از یک دیافراگم موج دار با موج دایره ای مختلف جهت، ارائه گردیده است.

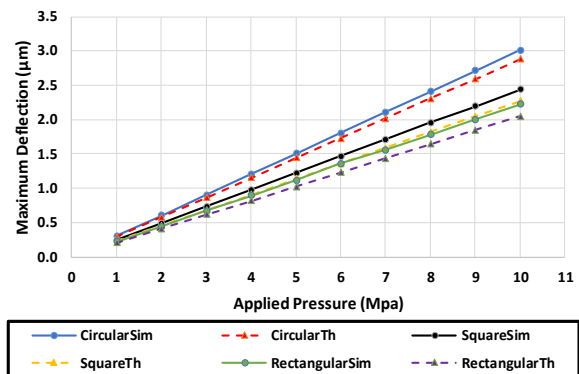


شکل ۱۱ مقطع دیافراگم دایره ای موجدار با موج دایره ای مختلف جهت [۲۸]



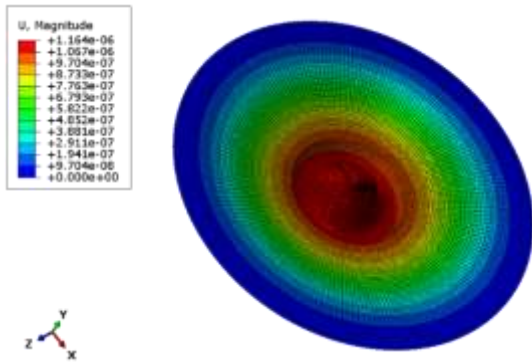
شکل ۸ نمودار تنش تئوری و عددی بر حسب فشار برای هندسه های مختلف

همانطور که در شکل ۸ مشاهده می شود، بیشینه مقدار تنش با افزایش فشار به صورت خطی تغییر کرده و بیشترین مطابقت میان شبیه سازی عددی و نتایج تئوری و همچنین کمترین مقدار تنش در هندسه دایره ای ملاحظه می گردد. اشاره به این نکته نیز ضروری است که برای هر سه هندسه بررسی شده اختلاف بین نتایج شبیه سازی و تئوری با افزایش فشار افزایش خواهد یافت زیرا فرضیات هر دو روش برای جابجایی های کوچک معتبر می باشد و برای جابجایی های بزرگ نیاز به اصلاح فرمول ها احساس می گردد. در شکل ۹ نمودار تغییر شکل بیشینه، در فشارهای ۱ تا ۱۰ مگاپاسکال، برای هندسه های مختلف ترسیم گردیده است. همچنین نمودار تغییر شکل تئوری در همان فشار ها نیز، جهت مقایسه با نتایج عددی مشاهده می گردد.

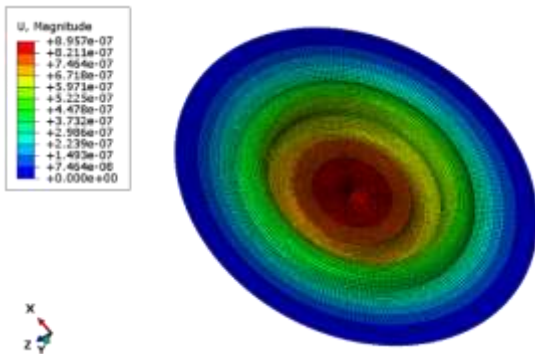


شکل ۹ تغییر شکل تئوری و عددی بر حسب فشار برای هندسه های مختلف

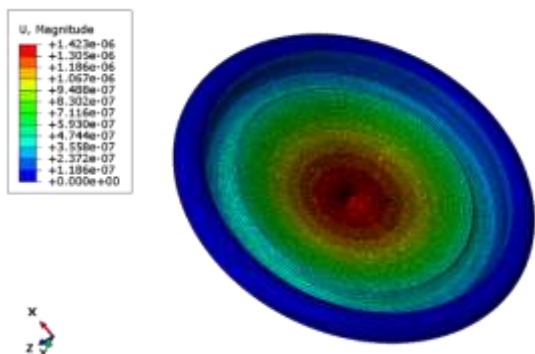
بیشینه تغییر شکل مطابق نتایج بدست آمده به گونه ای است که هندسه دایره ای دارای بیشترین مقدار تغییر شکل در اثر فشار اعمالی و کمترین مقدار اختلاف با نتایج تئوری می باشد. یکی از معیار های توصیف بهینه ترین هندسه دیافراگم، میزان حساسیت [۱۵] آن بوده که برابر شیب نمودار تغییر شکل بیشینه



شکل ۱۳ الف - کانتور تغییر شکل هندسه دایره موج دار در شعاع موج ۲۵ و در فاصله از انتهای (x) ۲۰۰ میکرومتر



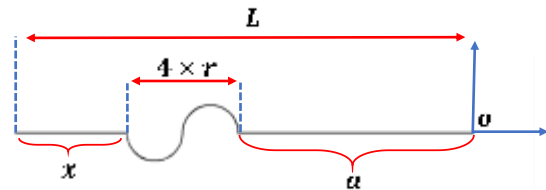
شکل ۱۳ ب - کانتور تغییر شکل هندسه دایره موج دار در شعاع موج ۲۵ و در فاصله از انتهای (x) ۱۰۰ میکرومتر



شکل ۱۳ ج - کانتور تغییر شکل هندسه دایره ای موج دار در شعاع موج ۲۵ و در فاصله از انتهای (x) ۰ میکرومتر

کانتورهای ارائه شده در شکل ۱۳ نشان می دهد، در حالتی که موج دایره ای ایجاد شده در لبه خارجی دیافراگم دایره ای قرار دارد، مقدار تغییر شکل، بیشینه می باشد. برای روشن تر شدن اثر پارامترهای موج دایره ای مختلف جهت، لازم است که نمودار تغییر پارامترهای موج دایره ای بر حسب بیشینه تغییر شکل، تنش و حساسیت ارائه گردد. از آنجا که مشخص کردن هر حالت از دیافراگم موج دار نیاز به ۲ پارامتر مستقل "شعاع موج (r)" و "فاصله از انتها (x)" دارد، نمودارهای مربوطه، به صورت رویه های سه بعدی اشکال ۱۴ و ۱۵ در آمده که شکل ۱۴ مربوط به بیشینه تغییر شکل و تنش در فشار ۵ مگاپاسکال بوده و شکل ۱۵ مربوط به پارامتر حساسیت می باشد.

شرط لازم جهت ایجاد امکان مقایسه نتایج دیافراگم موج دار، با دیافراگم ساده آن است که تصویر افقی مساحت در هر دو مورد یکسان باشد. با توجه به اینکه تصویر افقی دیافراگم ساده برابر مساحت سطح دایره ای آن است، شرط فوق ایجاب می کند که سطح افقی دیافراگم موج دار، مساحتی برابر شرایط جدول ۲ داشته باشد (L=300μm). برای سهولت مطالعه اثر تغییر پارامترهای دیافراگم موج دار، شماتیک شکل ۱۲ برای یک نیمه از آن، ارائه گردیده است.



شکل ۱۲ پارامترهای دیافراگم موج دار

برای بررسی اجمالی اثر تغییر پارامترهای موجود در شکل ۱۲، حالات موجود در جدول ۴ در نظر گرفته شده و شبیه سازی می گردد.

جدول ۴ پارامترهای بررسی دیافراگم دایره ای موج دار

$a = 300 - x - (4 \times r)$							$x(\mu m)$ r (μm)
۲۴۰	۲۲۰	۲۰۰	۱۵۰	۱۰۰	۵۰	۰	
۰	۲۰	۴۰	۹۰	۱۴۰	۱۹۰	۲۴۰	۱۵
-	۰	۲۰	۷۰	۱۲۰	۱۷۰	۲۲۰	۲۰
-	-	۰	۵۰	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰	۲۵

پس از شبیه سازی هریک از موارد موجود در جدول ۴، برای فشارهای ۱ تا ۱۰ مگاپاسکال، مقادیر بیشینه تنش، بیشینه تغییر شکل و حساسیت بدست می آید.

در شکل ۱۳، کانتورهای مربوط به بیشینه تغییر شکل برای شعاع موج (r) ۲۵ و در فاصله از انتهای (x) ۱۰۰، ۲۰۰ و ۰ میکرومتر در فشار ۵ مگاپاسکال، ارائه گردیده است.

در خصوص روند تغییر حساسیت در دیافراگم موج دار دایره ای، چنانچه در شکل ۱۵ نیز مشهود است، بیشینه مقدار حساسیت در شعاع موج ۱۵ میکرومتر و در لبه خارجی، اتفاق افتاده و روندی مشابه منحنی تغییر شکل دارد.

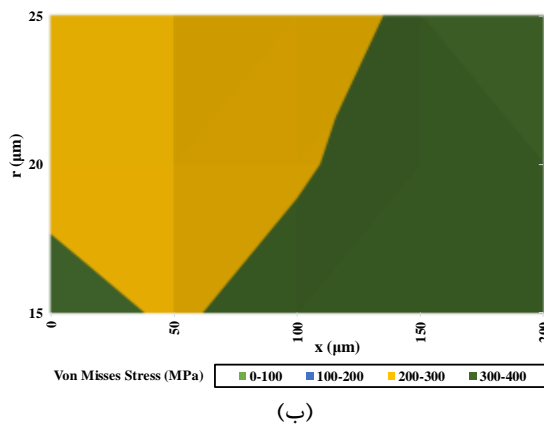
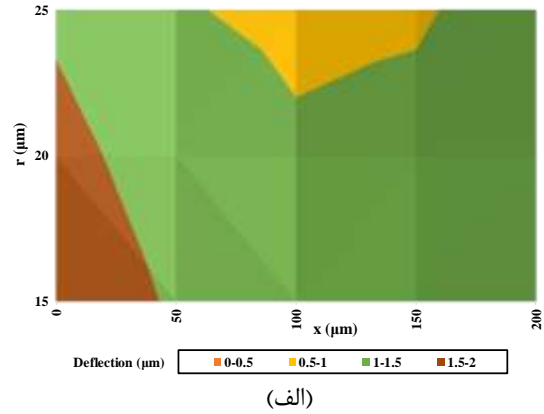
باتوجه به نتایج بدست آمده از میزان تغییر شکل، تنش و حساسیت، می توان هندسه دایره ای موج دار با شعاع موج ۱۵ میکرومتری که در لبه خارجی دیافراگم قراردارد را به عنوان بهینه ترین هندسه، از میان موارد بررسی شده در جدول ۴، معرفی نمود.

پس از بدست آوردن نتایج دیافراگم های ساده و موج دار و با عنایت به اینکه تصویر مساحت افقی در تمامی حالات شبیه سازی، یکسان در نظر گرفته شده است، شایسته است، نتایج بدست آمده از تمامی موارد، مطابق جدول ۵ با یکدیگر مقایسه گردد. از آنجایی که در بخش قبل، بهینه ترین هندسه ی موج دار، در حالت وجود موج در لبه خارجی آن بدست آمد، در جدول ۵، حالات وجود موج در لبه خارجی و برای شعاع های مختلف با دیافراگم های ساده مورد مقایسه قرار گرفته است.

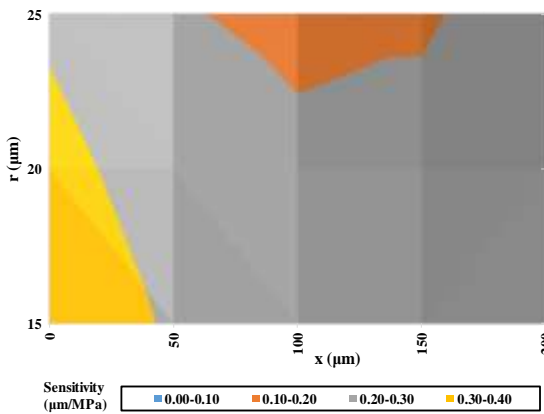
نتایج بدست آمده از جدول ۵ نشان می دهد بهینه ترین هندسه موجود، در دیافراگم موج دار ($r = 15, x = 0$) می باشد این هندسه دارای بیشینه مقدار حساسیت در میان تمامی موارد بررسی شده بوده و این حساسیت بالا موجب افزایش کارایی سنسور فشار پیزو مقاومتی مربوطه می گردد. مقایسه میان هندسه ی دایره ای ساده و دایره ای موج دار ($r = 15, x = 0$) نشان می دهد که اثر موج دار کردن هندسه، ضمن کاهش ۵/۵ درصدی مقدار تنش بیشینه، موجب افزایش ۱۷/۹ درصدی معیار حساسیت می گردد.

جدول ۵ مقایسه نتایج بدست آمده از هندسه های مختلف دیافراگم در فشار ۵ مگاپاسکال

تغییر شکل (μm)	تنش مایز (MPa)	حساسیت ($\mu m/MPa$)	نوع دیافراگم	هندسه دیافراگم
۱/۷۶۹	۳۱۰/۹	۰/۳۵۴	موج دار ($r = 15, x = 0$)	دایره
۱/۶۵۰	۲۹۰/۵	۰/۳۳۰	موج دار ($r = 20, x = 0$)	
۱/۴۲۳	۲۶۸/۷	۰/۲۸۵	موج دار ($r = 25, x = 0$)	
۱/۵۰۰	۳۲۹/۰	۰/۳۰۱	ساده	مربع
۱/۲۲۰	۴۱۰/۳	۰/۲۴۴	ساده	
۱/۱۱۰	۴۲۳/۰	۰/۲۲۲	ساده	



شکل ۱۴ الف- بیشینه تغییر شکل مربوط به دیافراگم دایره ای موج دار در فشار ۵ مگاپاسکال ب- بیشینه تنش (معیار مایز) مربوط به دیافراگم دایره ای موج در فشار ۵ مگاپاسکال



شکل ۱۵ معیار حساسیت مربوط به دیافراگم دایره ای موج دار

همانگونه که در شکل ۱۴ الف) مشخص است، بیشینه مقدار تغییر شکل، در شعاع موج ۱۵ میکرومتر و در لبه خارجی اتفاق می افتد. روند مقدار تغییر شکل دیافراگم با افزایش شعاع موج، به صورت کاهشی بوده و در شعاع ثابت، تغییر شکل دیافراگم دارای مقداری کمینه است. نتایج شکل ۱۴ ب) حاکی از آن است که مقدار کمینه تنش در شعاع موج ۲۵ و در فاصله ۵۰ میکرومتری از لبه خارجی رخ می دهد.

علائم انگلیسی

W	تغییر شکل (μm)
τ	تنش برشی (MPa)
σ	تنش نرمال (MPa)
ζ	حساسیت ($\mu m/MPa$)
P	فشار خارجی (Pa)
M	گشتاور خمشی ($N.m$)

زیرنویس ها

max	بیشینه مقدار
z	راستای ارتفاع
r	راستای شعاعی
x	راستای طولی
y	راستای عرضی
θ	راستای مماسی

۵- مراجع

- [1] Jena, S., Pandey, C., Gupta, A., "Mathematical modeling of different diaphragm geometries in MEMS pressure sensor", *Materials Today: Proceedings*, Vol. 44, No., pp. 1243-1248, (2021).
- [2] Li, R., Zhou, Q., Bi, Y., Cao, S., Xia, X., Yang, A., Li, S., Xiao, X., "Research progress of flexible capacitive pressure sensor for sensitivity enhancement approaches", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 321, No., pp. 112425, (2021).
- [3] Cao, M., Su, J., Fan, S., Qiu, H., Su, D., Li, L., Wearable, "piezoresistive pressure sensors based on 3D graphene", *Chemical Engineering Journal*, Vol. 406, No., pp. 126777, (2021).
- [4] Kumar, S., Kumar, R.R., Pandey, S.K., "Performance Analysis of MEMS Capacitive Pressure Sensor with Different Dielectrics, in: Computational Mathematics, Nanoelectronics, and Astrophysics: CMNA 2018, Indore", India, November 1-3, Springer, pp. 97-105, (2021).
- [5] Aravamudhan, S., Bhansali, S., Reinforced, "piezoresistive pressure sensor for ocean depth measurements, *Sensors and Actuators A: Physical*", Vol. 142, No. 1, pp. 111-117, (2008).
- [6] Sathishkumar, R., Vimalajuliet, A., Prasath, J., Selvakumar, K., Reddy, V.V., "Micro size ultrasonic transducer for marine applications", *Indian Journal of Science and Technology*, Vol. 4, No. 1, pp. 8-11, (2011).
- [7] dos Santos, A., Fortunato, E., Martins, R., Águas, H., Igreja, R., E-Skin, "Piezoresistive Pressure Sensor Combining Laser Engraving and Shrinking Polymeric Films for Health Monitoring Applications", *Advanced Materials Interfaces*, Vol. 8, No. 21, pp. 2100877, (2021).

نتایج بدست آمده از جدول ۵ نشان می دهد بهینه ترین هندسه موجود، در دیافراگم موج دار ($r = 15, x = 0$) می باشد این هندسه دارای بیشینه مقدار حساسیت در میان تمامی موارد بررسی شده بوده و این حساسیت بالا موجب افزایش کارایی سنسور فشار پیزو مقاومتی مربوطه می گردد. مقایسه میان هندسه ی دایره ی ساده و دایره ی موج دار ($r = 15, x = 0$) نشان می دهد که اثر موج دار کردن هندسه، ضمن کاهش ۵/۵ درصدی مقدار تنش بیشینه، موجب افزایش ۱۷/۹ درصدی معیار حساسیت می گردد.

۳- نتیجه گیری

در این پژوهش با هدف بهینه سازی سنسور های فشار ، نسبت به تحلیل شکل هندسی دیافراگم موجود در سنسور های فشار اقدام گردید. در بدو امر، با هدف یافتن شکل هندسی بهینه دیافراگم سنسور، سه هندسه ی پایه ی دایره ای، مستطیلی و مربعی مورد ارزیابی و شبیه سازی قرار گرفت. در ادامه، ضمن صحت سنجی نتایج حاصل از شبیه سازی عددی با نتایج تجربی پژوهش ایتن و همکاران [۲۷]، هندسه دایره ای به عنوان حساس ترین دیافراگم از میان سایرین، انتخاب شد. سپس برای افزایش هرچه بیشتر مقدار حساسیت در دیافراگم دایره ای، از روش موج دار کردن سطح دیافراگم استفاده شد و پارامتر های مختلف شکل موج ایجاد ی و تاثیر آنها در مقدار تنش و تغییر شکل بیشینه سنسور بررسی شد. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که:

- ✓ موج دار کردن سطح دیافراگم ، علیرغم کاهش مقدار تنش بیشینه، موجب افزایش معیار حساسیت و تغییر شکل بیشینه دیافراگم می شود.
- ✓ با شبیه سازی حالات مختلف قرارگیری موج ایجاد ی بر روی سطح دیافراگم، حالت بهینه در موج دایره ای با شعاع ۱۵ میکرومتری که در لبه خارجی دیافراگم قرار گرفته است، معرفی گردید.
- ✓ با ایجاد یک موج دایره ای با شعاع ۱۵ میکرومتر در انتهای سطح دیافراگم سنسور، مقدار حساسیت آن ۱۷/۹ درصد افزایش یافت.
- ✓ موج کردن دیافراگم سنسور های فشار با موج هایی با مشخصات ارائه شده، جهت افزایش حساسیت و کارایی سنسور، پیشنهاد می شود.

۴- فهرست علائم و اختصارات

- [18] Mosser, V., Suski, J., Goss, J., Obermeier, E., "Piezoresistive pressure sensors based on polycrystalline silicon", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 28, No. 2, pp. 113-132, (1991).
- [19] Zhu, S.-E., Krishna Ghatkesar, M., Zhang, C., Janssen, G., Graphene, "based piezoresistive pressure sensor", *Applied Physics Letters*, Vol. 102, No. 16, pp. 161904, (2013).
- [20] Gui, Y., Zhang, Y., Liu, G., Hao, Y., Gao, C., "Design and simulation of corrugated diaphragm applied to the MEMS fiber optic pressure sensor", in: 2016 IEEE 11th Annual International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS), pp. 152-155, (2016).
- [21] Li, H., Deng, H., Zheng, G., Shan, M., Zhong, Z., Liu, B., "Reviews on Corrugated Diaphragms in Miniature Fiber-Optic Pressure Sensors", *Applied Sciences*, Vol. 9, No. 11, pp. 2241, (2019).
- [22] Djurić, Z., Matić, M., Matović, J., Petrovic, R., Simičić, N., "Experimental determination of silicon pressure sensor diaphragm deflection", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 24, No. 3, pp. 175-179, (1990).
- [23] SeyedKazem Viliiani, N., Hashemi, M., Vadizadeh, H., Pourrostami, H., Mostafavi, S.M., Hashemizadeh, F., "Modelling and empirical investigation of micro-electro-mechanical piezo-resistive pressure sensor based on the requirements of petrochemical industry", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 16, pp. 349-357, (2015).
- [24] Zhou, G., Zhao, Y., Guo, F., Xu, W., "A smart high accuracy silicon piezoresistive pressure sensor temperature compensation system", *Sensors*, Vol. 14, No. 7, pp. 12174-12190, (2014).
- [25] Hsu, T.-R., "MEMS and microsystems: design, manufacture, and nanoscale engineering", John Wiley & Sons, (2008).
- [26] Niu, Z., Liu, K., Wang, H., "A new method for the design of pressure sensor in hyperbaric environment", *Sensor Review*, Vol. 37, No. 1, pp. 110-116, (2017).
- [27] Eaton, W.P., Bitsie, F., Smith, J.H., Plummer, D.W., "A new analytical solution for diaphragm deflection and its application to a surface-micromachined pressure sensor", in: International Conference on Modeling and Simulation, MSM, pp., (1999).
- [28] Hamilton, K.A., "Improvements to the Design of a Flexible Diaphragm for use in Pressure Wave Generators for Cryogenic Refrigeration Systems", Vol., No., pp., (2013).
- [8] Farajollahi, M., Goharzay, M., Borzuei, D., Moosavian, S.F., "Stress, sensitivity and frequency analysis of the corrugated diaphragm for different corrugation structures", *Smart Structures and Systems*, Vol. 27, No. 5, pp. 837, (2021).
- [9] Zheng, Y., Yin, R., Zhao, Y., Liu, H., Zhang, D., Shi, X., Zhang, B., Liu, C., Shen, C., "Conductive MXene/cotton fabric based pressure sensor with both high sensitivity and wide sensing range for human motion detection and E-skin", *Chemical Engineering Journal*, Vol. 420, No., pp. 127720, (2021).
- [10] Song, J.W., Lee, J.-S., An, J.-E., Park, C.G., "Design of a MEMS piezoresistive differential pressure sensor with small thermal hysteresis for air data modules", *Review of Scientific Instruments*, Vol. 86, No. 6, pp. 065003, (2015).
- [11] Suja, K., Raveendran, E.S., Komaragiri, R., "Investigation on better sensitive silicon based MEMS pressure sensor for high pressure measurement", *International Journal of Computer Applications*, Vol. 72, No. 8, pp., (2013).
- [12] Devi, R., Gill, S.S., "A squared bossed diaphragm piezoresistive pressure sensor based on CNTs for low pressure range with enhanced sensitivity", *Microsystem Technologies*, Vol., No., pp. 1-9, (2021).
- [13] Yashaswini, P., Mamatha, N., Srikanth, P., "Circular diaphragm-based MOEMS pressure sensor using ring resonator", *International Journal of Information Technology*, Vol. 13, No. 1, pp. 213-220, (2021).
- [14] Mohammadi, N., Mohammadzadeh, A., Tafti, F.F., "Design and Optimization of Piezoresistive MEMS Pressure Sensors Using ABAQUS", *International Journal of Engineering & Technology Sciences*, Vol. 2, No. 6, pp. 461-473, (2014).
- [15] Nallathambi, A., Shanmuganatham, T., "Design of Diaphragm Based MEMS Pressure Sensor with Sensitivity Analysis for Environmental Applications", *Sensors & Transducers*, Vol. 188, No. 5, pp. 48, (2015).
- [16] Rahman, S.H.A., Soim, N., Ibrahim, F., Load, "deflection analysis of rectangular graphene diaphragm for MEMS intracranial pressure sensor applications", *Microsystem Technologies*, Vol. 24, No. 2, pp. 1147-1152, (2018).
- [17] Shaklya, M., Pratyusha, S., Jindal, S., Design, Modelling and Simulation of MEMS Piezo-Resistive Pressure Sensor with Clamped Edge Silicon Carbide Circular Diaphragm, (2018).