

شبیه‌سازی و تحلیل رفتار مکانیکی میکروسنسور فشار پیزورزیستیوی

محمد طماسبی پور^۱، مهرزاد مدرس^۲، مجتبی طوفان^۳

۱ استادیار، عضو هیئت علمی دانشگاه تهران، تهران، tahmasebipour@ut.ac.ir

۲ و ۳ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۸/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۱/۰۵

چکیده

سنسورهای میکروالکترومکانیکی فشار به دلیل سهولت ساخت، هزینه پایین، روش اندازه‌گیری ساده، محدوده گسترده فشار مورد اندازه‌گیری و دقت اندازه‌گیری بالا محبوبیت بسیاری دارند. در این پژوهش، رفتار مکانیکی یک میکروسنسور فشار پیزورزیستیوی به روش المان محدود شبیه‌سازی شده است. اعمال فشار به مرکز دیافراگم سبب ایجاد تنش‌های طولی و عرضی در پیزورزیستیوها می‌شود و تنش‌های ایجاد شده در پیزورزیستیوها باعث تغییر مقاومت الکتریکی آنها می‌گردد. در این مقاله، ماکزیمم مقدار جابه‌جایی دیافراگم سنسور، تنش‌های طولی و عرضی و توزیع پتانسیل الکتریکی در پیزورزیستیوها به ازای اعمال فشار ۱۴ مگاپاسکال مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین ماکزیمم مقدار جابه‌جایی دیافراگم و تغییرات مقاومت الکتریکی به ازای اعمال فشارهای گوناگون بررسی شده است. با انجام تحلیل تنش ون‌مایرز روی سازه سنسور مشخص شد که حداکثر تنش ون‌مایرز ایجاد شده در این سازه به ازای اعمال فشار ۱۴ مگاپاسکال، ۶ گیگاپاسکال است. همچنین با انجام تحلیل خستگی روی سنسور مذکور معلوم شد که این سنسور از عمر بسیار بالایی برخوردار است.

واژگان کلیدی

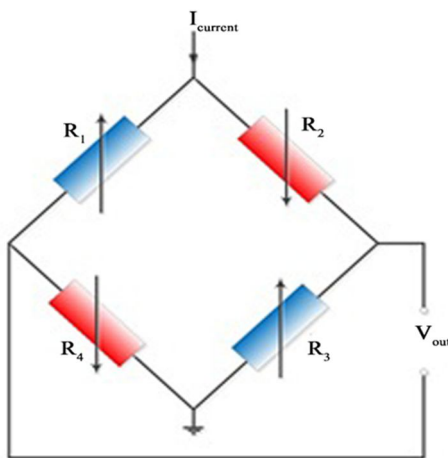
سیستم میکروالکترومکانیک، میکروسنسور پیزورزیستیو فشار، تنش ون‌مایرز، المان محدود، خستگی

۱. مقدمه

رزونانسی، اندازه‌گیری فشار از طریق اندازه‌گیری شیفت فرکانس تشدید حاصل از تنش‌های اعمال شده به دیافراگم انجام می‌شود. مزیت این سنسورها پایداری طولانی‌مدت، مدار خوانش ساده و دقت بالاست. سنسورهای فشار نوع جابه‌جایی، بر پایه جابه‌جایی نقطه اثر اعمال نیرو کار می‌کنند. میکروسنسورهای اختلاف فشار دارای دیافراگم یا تیری هستند که در اثر اختلاف فشار اعمالی

سنسورهای فشار از جمله مسائل مهم و پرکاربرد در بیشتر صنایع هستند. از انواع میکروسنسورهای فشار می‌توان به میکروسنسور خازنی فشار، میکروسنسور پیزو الکتریکی فشار، میکروسنسور اپتیکی فشار و میکروسنسور پیزورزیستیوی فشار اشاره کرد. سنسورهای فشار را می‌توان از نظر روش اندازه‌گیری به دو گروه رزونانسی و جابه‌جایی تقسیم کرد. در سنسورهای فشار نوع

وقتی اختلاف فشار در دو طرف سطح دیافراگم ایجاد می‌شود، دیافراگم در اثر فشار اعمال شده به سمت بالا یا پایین خم و باعث می‌شود که در پیزورزیستیوها کشش یا فشار ایجاد شود. کرنش ایجاد شده در پیزورزیستیوها سبب تغییر در مقاومت الکتریکی آنها و در نتیجه تغییر در ولتاژ خروجی مدار خوانش سنسور می‌گردد. بنابراین با اندازه‌گیری مقدار تغییر در ولتاژ الکتریکی خروجی، می‌توان مقدار فشار وارده بر سنسور را اندازه‌گیری کرد. مدار الکتریکی خوانش این میکروسنسور بر مبنای پل‌وتستون است. فرم مدار پل‌وتستون در شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱. مدار خوانش میکروسنسور فشار [۹]

تغییر در مقاومت الکتریکی مواد پیزورزیستیو به دلیل تنش‌های اعمال شده و کرنش‌های حاصل از آنهاست. مقدار این تغییر توسط رابطه ۱ محاسبه می‌شود [۱۰].

$$\Delta \rho_{ij} = \sum_{k,l} \pi_{ijkl} \sigma_{kl} \quad (1)$$

به طوری که در این رابطه، ضرایب پیزورزیستیو، σ تنش و $\Delta \rho$ تغییرات ایجاد شده در مقاومت به دلیل تنش‌های اعمال شده می‌باشد. تنش در جهت طولی و عرضی یک ماده پیزورزیستیو به ترتیب با σ_l و σ_t نشان داده می‌شود و نسبت تغییرات ایجاد شده در مقاومت، توسط رابطه ۲ بیان می‌گردد [۱۰].

$$\frac{\Delta R}{R} = \pi_l \sigma_l + \pi_t \sigma_t \quad (2)$$

به طوری که در آن، π_l و π_t به ترتیب ضرایب پیزورزیستیو طولی و عرضی می‌باشند. ضرایب پیزورزیستیو به ضریب رسانندگی الکتریکی، جهت، دما و میزان دوپینگ وابسته‌اند. ضرایب π_l و π_t را می‌توان از روابط ۳ و ۴ به دست آورد [۱۰].

جابه‌جا می‌شود و با استفاده از سازوکارهای سنجش مختلفی چون خازنی، پیزوالکتریکی و پیزورزیستیوی مقدار جابه‌جایی و در نتیجه اختلاف فشار را اندازه‌گیری می‌کنند [۱].

در طول دهه‌های اخیر، سنسورهای میکروالکترومکانیکی فشار مبتنی بر پدیده پیزورزیستیوی در اکثر حوزه‌های صنعتی از جمله صنعت لوازم خانگی، صنایع مهندسی پزشکی، صنایع خودرو، صنایع هوافضا و صنایع شیمیایی جایگاه خوبی پیدا کرده است [۲-۳]. از دلایل این محبوبیت می‌توان به سهولت ساخت، هزینه پایین، روش اندازه‌گیری ساده، محدوده گسترده فشار مورد اندازه‌گیری و دقت اندازه‌گیری بالا اشاره کرد [۴]. تاکنون بسیاری از این سنسورها با تغییراتی در ساختار و شکل هندسی آنها مورد مطالعه قرار گرفته‌اند و برای کاربردهای مختلف و میزان فشارهای مختلف کاری مدل‌های مختلفی پیشنهاد داده شده است. شیم و همکاران (۲۰۰۸) با ایجاد دو دیافراگم، یک سنسور فشار پیزورزیستیو با حساسیت بالا ارائه کردند که برای اندازه‌گیری فشار و اعماق اقیانوس‌ها مورد استفاده قرار گرفت [۵]. زین و همکاران (۲۰۱۲) میکروسنسور فشار پیزورزیستیو را با استفاده از دوپینگ اکسیژن روی لایه سیلیکونی ساختند که قادر بود فشار صفر تا ۶ مگاپاسکال را اندازه‌گیری کند [۶]. شو و همکاران (۲۰۱۳) میکروسنسور فشار پیزورزیستیوی با محدوده کاری صفر تا ۷۰۰ میلی‌بار را ارائه کردند که در آن از نیتريد سیلیکون به عنوان دیافراگم و از گرافن به عنوان ماده پیزورزیستیو استفاده شده بود [۷]. مافلین و همکاران (۲۰۱۵) نیز یک سنسور فشار پیزورزیستیوی با دیافراگم دایروی ارائه کردند که در آن از نانو وایرهای ژرمانیوم به منظور بالابردن حساسیت سنسور و ایجاد پل بین دیافراگم و لایه زیرین استفاده کردند [۸].

در این مقاله مقدار جابه‌جایی دیافراگم میکروسنسور فشار پیزورزیستیوی، تنش‌های طولی و عرضی، توزیع پتانسیل الکتریکی در پیزورزیستیوهای سنسور و تغییرات مقاومت میکروسنسور به ازای اعمال فشارهای مختلف، تحلیل استاتیکی (تحلیل تنش و مایز) و تحلیل دینامیکی (تحلیل خستگی) روی سازه سنسور بررسی شده است.

۲. مباحث نظری

میکروسنسور فشار پیزورزیستیوی شامل یک غشای نازک سیلیکونی است که از اطراف به بدنه محکمی وصل شده است.

جدول ۱. مشخصات جنس دیافراگم سیلیکونی

مشخصات	مقدار	واحد
چگالی	۲۳۲۰	کیلوگرم بر متر مکعب
ضریب گذردهی نسبی	۴/۵	۱
مدول یانگ	۱۶۰	گیگاپاسکال
ضریب پواسون	۰/۲۲	۱

۴. نتایج و بحث

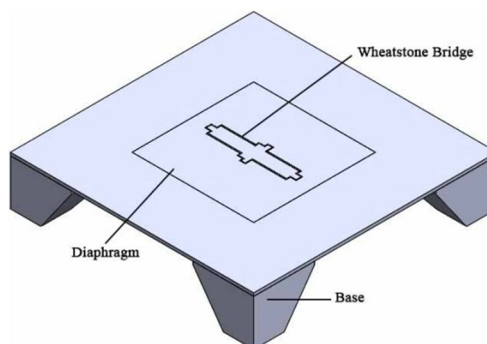
در طراحی میکروسنسور فشار، تعیین حداکثر جابه‌جایی ایجادشده در دیافراگم در اثر اعمال حداکثر فشار محدوده کاری سنسور بسیار ضروری می‌باشد. علاوه بر آن شناخت مناسبی از عملکرد سنسور را ایجاد می‌کند و قابلیت اطمینان طرح را افزایش می‌دهد. در طراحی بسته‌بندی آن نیز، لحاظ نمودن حداکثر جابه‌جایی دیافراگم لازم است. در این مقاله، مقدار جابه‌جایی دیافراگم میکروسنسور تحت فشار ۱ تا ۱۴ مگاپاسکال مورد بررسی قرار گرفت. طرح گرافیکی جابه‌جایی دیافراگم در اثر فشار اعمالی ۱۴ مگاپاسکال در شکل ۴ نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که جابه‌جایی در مرکز دیافراگم بیشترین مقدار را دارد و برابر ۱۷۲ میکرومتر می‌باشد. نمودار تغییرات جابه‌جایی مرکز دیافراگم میکروسنسور فشار نسبت به فشار اعمالی در شکل ۵ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش فشار وارده، مقدار جابه‌جایی مرکز دیافراگم بصورت خطی افزایش می‌یابد. با در دست داشتن این نمودار می‌توان مقدار ماکزیمم جابه‌جایی حاصل از یک مقدار فشار اعمالی مشخص را به دست آورد و در طراحی میکروسنسور فشار مورد استفاده قرار داد. مثلاً مقدار جابه‌جایی مرکز دیافراگم در اثر اعمال فشار ۱۰ مگاپاسکال حدود ۱۲۰ میکرومتر است. بنابراین لازم است ملاحظات مربوط به این مقدار جابه‌جایی در طراحی میکروسنسور فشاری که برای محدوده ۱ تا ۱۰ مگاپاسکال کار می‌کند لحاظ شود. با توجه به رابطه ۲، به دست آوردن مقادیر تنش‌های طولی و عرضی برای محاسبه تغییرات مقاومت ضروری و حائز اهمیت است. در شکل ۶ و ۷، تنش‌های طولی و عرضی به ترتیب در راستای محورهای X و Y به ازای فشار ۱۴ مگاپاسکال نمایش داده شده است. با توجه به شکل‌های ۶ و ۷، ماکزیمم مقدار تنش‌های طولی و عرضی حدوداً برابر با ۶ گیگاپاسکال است که در قسمت محل اتصال دیافراگم به پایه ثابت اتفاق می‌افتد. فرم گرافیکی نحوه توزیع پتانسیل الکتریکی اعمال شده در پیروززیستیوهای ایجادشده روی سطح دیافراگم

$$\pi_t = \frac{\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44}}{2} \approx \frac{\pi_{44}}{2} \quad (3)$$

$$\pi_t = \frac{\pi_{11} + \pi_{12} - \pi_{44}}{2} \approx -\frac{\pi_{44}}{2} \quad (4)$$

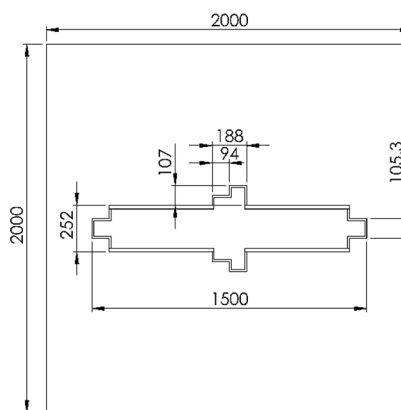
۳. مدل‌سازی میکروسنسور فشار

در این مقاله برای مدل‌سازی میکروسنسور فشار پیروززیستیوی به روش المان محدود از نرم‌افزار COMSOL استفاده شده است. فرم کلی سنسور همراه با پیروززیستیوها در شکل ۲ نمایش داده شده است.



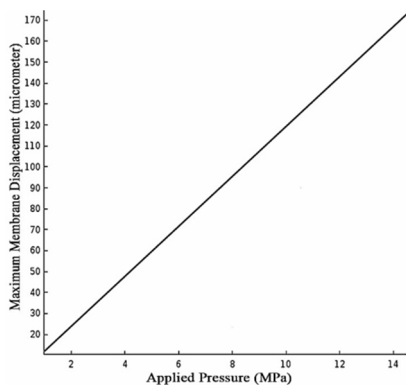
شکل ۲. مدل گرافیکی میکروسنسور فشار پیروززیستیوی

ابعاد هندسی میکروسنسور فشار با ابعاد کلی ۴×۴ میلی‌متر مربع از جنس سیلیکون $\langle 100 \rangle$ دارای دیافراگم نازک سیلیکونی ۲×۲ میلی‌متر مربعی و ضخامت ۵۰ میکرومتر در شکل ۳ نشان داده شده است. پیروززیستیوها به صورت یکنواخت و با میزان غلظت دوپینگ $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ و اتصالات الکتریکی به صورت دوپ سنگین با غلظت $3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ در نظر گرفته شده‌اند. بار اعمالی به صورت گسترده و به دیافراگم اعمال می‌شود. میزان ولتاژ اعمال شده به پیروززیستیوها ۰/۲ ولت است. مشخصات دیافراگم میکروسنسور مذکور در جدول ۱ آمده است.



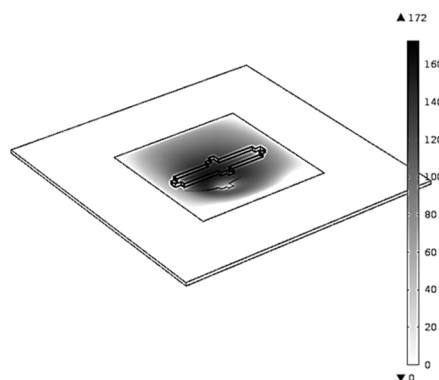
شکل ۳. مدل هندسی میکروسنسور فشار پیروززیستیوی (واحد: میکرومتر)

مگاپاسکال نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با اعمال فشار مشخص، پتانسیل الکتریکی در طول پیزورزیستیو تغییر می‌کند.

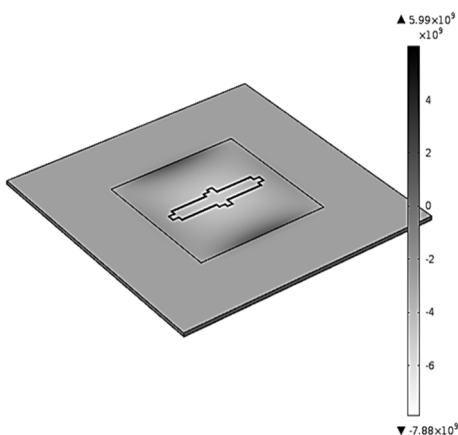


شکل ۵. ماکزیمم جابه‌جایی دیافراگم بر حسب فشار اعمالی

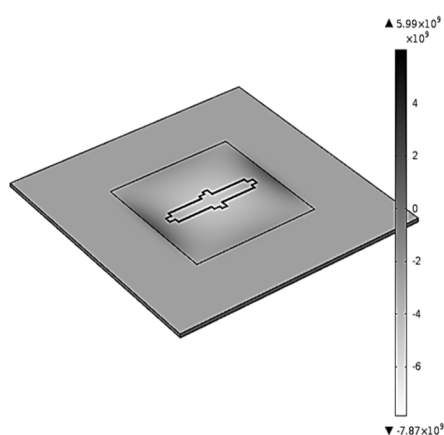
میکروسنسور به ازای فشارهای اعمالی مختلف باهم تفاوت دارد. در شکل ۸، نحوه توزیع پتانسیل الکتریکی به ازای اعمال فشار ۱۴



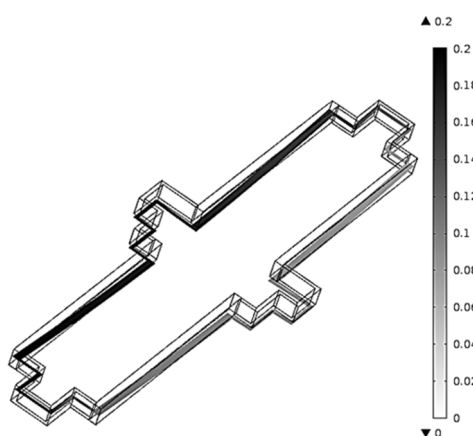
شکل ۴. جابه‌جایی دیافراگم در اثر اعمال فشار ۱۴ مگاپاسکال



شکل ۷. توزیع تنش عرضی (در جهت Y)



شکل ۶. توزیع تنش طولی (در جهت X)

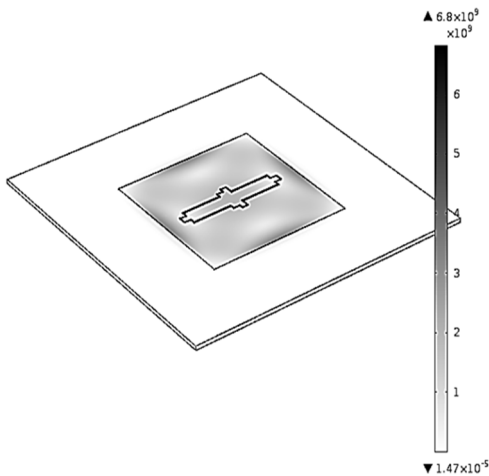


شکل ۸. توزیع پتانسیل الکتریکی در طول پیزورزیستوها و اتصالات به ازای فشار ۱۴ مگاپاسکال

به پیزورزیستوها، مقدار مقاومت مدار پیزورزیستوی کاهش پیدا کرده است. مشاهده می‌شود مقدار تغییر در مقاومت میکروسنسور با اعمال فشار ۱ مگاپاسکال برابر ۱۰۶۲ اهم است که با افزایش

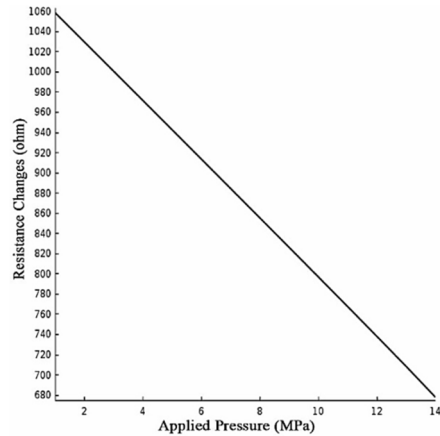
در شکل ۹ نمودار تغییرات مقاومت بر حسب فشار اعمالی نمایش داده شده است. در این نمودار مشاهده می‌شود که با افزایش فشار اعمال شده به سطح دیافراگم و افزایش تنش اعمالی

دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت ۳۵ درصد مورد استفاده قرار گرفته است [۱۲].

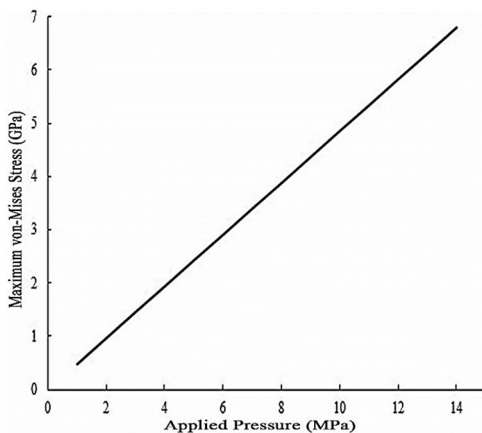


شکل ۱۰. توزیع تنش ون‌مایز در دیافراگم میکروسنور فشار در اثر فشار ۱۴ مگاپاسکال

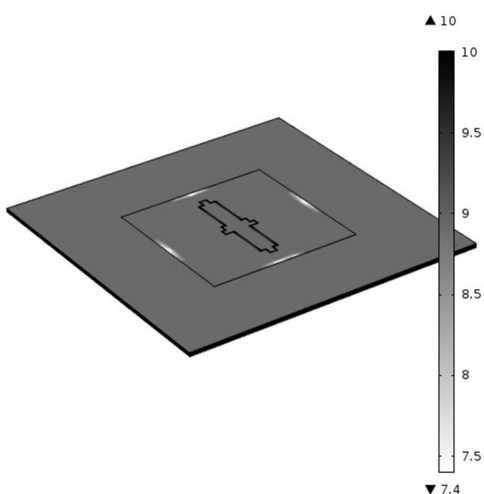
فشار مقدار تغییر مقاومت به صورت خطی کاهش پیدا می‌کند، به طوری که مقدار تغییر مقاومت در فشار ۱۴ مگاپاسکال برابر با ۶۴۷ اهم می‌باشد.



شکل ۹. تغییرات مقاومت میکروسنور فشار بر حسب فشار اعمالی



شکل ۱۱. ماکزیمم تنش ون‌مایز ایجاد شده در دیافراگم میکروسنور فشار بر حسب فشارهای اعمالی مختلف



شکل ۱۲. تحلیل خستگی دیافراگم سیلیکونی میکروسنور فشار

در شکل ۱۰ فرم گرافیکی توزیع تنش ون‌مایز در سطح دیافراگم به ازای تنش اعمالی ۱۴ مگاپاسکال نمایش داده شده است. با اعمال ۱ تا ۱۴ مگاپاسکال فشار به میکروسنور، ماکزیمم مقدار تنش وارده به وسط اضلاع دیافراگم مربعی، از ۰/۴ تا ۶/۸ گیگاپاسکال تغییر می‌کند. همان‌طور که در شکل مشخص است، تنش در چهار ضلع دیافراگم، ماکزیمم مقدار را دارد. با مقایسه ماکزیمم تنش ون‌مایز با تنش تسلیم سیلیکون (۷ گیگاپاسکال [۱۱]) مشخص می‌شود که با در نظر گرفتن ضریب اطمینان ۰/۸ برای دیافراگم سیلیکونی، سنسور مدلسازی شده قادر است تنش‌های ناشی از فشار اعمالی از محدوده ۱ تا ۱۱ مگاپاسکال را بدون تغییر شکل پلاستیک تحمل کند. نمودار شکل ۱۱، ماکزیمم مقدار تنش‌های اعمال شده به دیافراگم را در اثر فشارهای اعمالی از ۱ تا ۱۴ مگاپاسکال نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، ماکزیمم مقدار تنش اعمالی با افزایش فشار وارده به صورت خطی افزایش پیدا می‌کند.

با توجه به نتایج به دست آمده که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، مشخص می‌شود که دیافراگم سیلیکونی مدلسازی شده تا ۲۵۱۱۸۶۴ سیکل می‌تواند عمل کند و بعد از آن دچار خستگی خواهد شد. خستگی در نقاطی که ماکزیمم تنش در آنها اتفاق افتاده است صورت می‌گیرد. در این پژوهش، تحلیل خستگی دیافراگم میکروسنور فشار پیزوزیستیوی به روش المان محدود انجام شد. در تحلیل مذکور، نمودار S-N پلی‌سیلیکون با فرض

۵. نتیجه گیری

افزایش فشار، میزان مقاومت الکتریکی میکروسنسر کاهش می‌یابد. توزیع تنش ون‌مایز در دیافراگم میکروسنسر شبیه‌سازی و مشخص شد که ماکزیمم تنش در وسط چهار ضلع دیافراگم ایجاد می‌شود. با اعمال فشار ۱۴ مگاپاسکال، حداکثر مقدار تنش ون‌مایز ایجاد شده در دیافراگم میکروسنسر ۶/۸ گیگاپاسکال می‌باشد. با در نظر گرفتن ضریب اطمینان ۰/۸ برای دیافراگم سیلیکونی، ماکزیمم مقدار تنش ون‌مایز که سازه می‌تواند تحمل کند ۵/۶ گیگاپاسکال به دست آمد که مقدار آن کمتر از حد تسلیم سیلیکون (۷ گیگاپاسکال) بوده و سنسور در فشارهای اعمالی ۱ تا ۱۱ مگاپاسکال دچار تغییر فرم پلاستیکی نمی‌شود. با توجه به تحلیل خستگی انجام شده روی دیافراگم سیلیکونی مشخص شد این سنسور از عمر بالایی برخوردار است.

در این مقاله، طراحی، مدلسازی و تحلیل میکروسنسر پیزورزیستیوی فشار ارائه شد. میزان جابه‌جایی دیافراگم، توزیع پتانسیل الکتریکی در پیزورزیستیوها، تغییر مقاومت الکتریکی و توزیع تنش ون‌مایز در دیافراگم و همچنین خستگی دیافراگم سیلیکونی در اثر اعمال فشارهای مختلف از ۱ تا ۱۴ مگاپاسکال مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که جابه‌جایی دیافراگم در اثر فشارهای وارده در مرکز دیافراگم ماکزیمم مقدار است و رابطه‌ای خطی بین میزان جابه‌جایی و فشارهای وارده وجود دارد. به طوری که با افزایش مقدار فشار از ۱ تا ۱۴ مگاپاسکال میزان جابه‌جایی دیافراگم از ۱۲ میکرومتر تا ۱۷۲ میکرومتر تغییر می‌کند. همچنین تغییرات مقاومت سنسور با اعمال فشارهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت و این نتیجه حاصل شد که با

۶. مأخذ

- [1] J. W. Song, J. S. Lee, J. E. An, C. G. Park, Design of a MEMS piezoresistive differential pressure sensor with small thermal hysteresis for air data modules, *Review of Scientific Instruments*, Vol. 86, 2015.
- [2] C. L. Dai, Y. W. Tai, P. H. Kao, Modeling and fabrication of micro FET pressure sensor with circuits, *Sensors*, Vol. 7, pp. 3386-3398, 2007.
- [3] K. Singh, R. Joyce, S. Varghese, J. Akhtar, Fabrication of electron beam physical vapor deposited polysilicon piezoresistive MEMS pressure sensor, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 223, pp. 151-158, 2015.
- [4] R. Singh, L. L. Ngo, H. S. Seng, F. N. C. Mok, A silicon piezoresistive pressure sensor, *Conference Proceedings IEEE*, pp. 181-184, 2002.
- [5] S. Aravamudhan, S. Bhansali, Reinforced piezoresistive pressure sensor for ocean depth measurements, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 142, pp. 111-117, 2008.
- [6] X. Li, Q. Liu, S. Pang, K. Xu, H. Tang, C. Sun, High-temperature piezoresistive pressure sensor based on implantation of oxygen into silicon wafer, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 179, pp. 277-282, 2012.
- [7] S. E. Zhu, M. K. Ghatkesar, C. Zhang, G. C. A. M. Janssen, Graphene based piezoresistive pressure sensor, *Applied Physics Letters*, Vol. 102, 2013.
- [8] S. M. Shaby, M. S. G. Premi, B. Martin, Enhancing the Performance of MEMS Piezoresistive Pressure Sensor Using Germanium Nanowire, *Procedia Materials Science*, Vol. 10, pp. 254-262, 2015.
- [9] G. Zhou, Y. Zhao, F. Guo, W. Xu, A smart high accuracy silicon piezoresistive pressure sensor temperature compensation system, *Sensors*, Vol. 14, pp. 12174-12190, 2014.
- [10] S. D. Senturia, *Microsystem design*, Springer Science & Business Media, 2007.
- [11] W. O. Soboyejo, T. S. Srivatsan, *Advanced Structural Materials: Properties, Design Optimization, and Applications*, CRC press, 2006.
- [12] D. H. Alsem, O. N. Pierron, E. A. Stach, C. L. Muhlstein, R. O. Ritchie, Mechanisms for Fatigue of Micron-Scale Silicon Structural Films, *Advanced Engineering Materials*, Vol. 9, pp. 15-30, 2007.