

## شبیه‌سازی و بررسی تجربی پکیج فشارسنج میکرو الکترومکانیکی پیزومقاومتی بر اساس الزمات عملکرد صنعت پتروشیمی

نوید سیدکاظم ولیانی<sup>۱\*</sup>، مهدی هاشمی<sup>۲</sup>، هادی وادیزاده<sup>۳</sup>، حسن پورrostami<sup>۱</sup>، سید محسن مصطفوی<sup>۴</sup>، فرامند  
هاشمیزاده<sup>۴</sup>

۱- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ابهر، ابهر

۲- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

۳- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، تهران، ایران

۴- کارشناس ارشد، بخش پژوهش و فناوری شرکت پتروشیمی فن آوران، شهر

\* تهران، ۰۹۹۸۶۶۴۷۹۹ n.viliani@abharbau.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۱۴ تیر ۱۳۹۳

پذیرش: ۲۴ مرداد ۱۳۹۳

ارائه در سایت: ۲۴ آبان ۱۳۹۳

کلید واژگان:

حسگر فشارسنج میکرو الکترومکانیکی

پیزومقاومت

صنایع پتروشیمی

بررسی تحلیلی و تجربی

**چکیده**  
در این مقاله به بررسی تحلیلی و تجربی پکیج فشارسنج میکرو الکترومکانیکی پرداخته شده است. این پکیج فشارسنج از یک حسگر میکرو الکترومکانیکی، بد مدار چایی، نمایشگر خازنی تشکیل شده است. در ابتداء، مدل سازی ریاضی و سپس شبیه‌سازی کامپیوتری با استفاده از نرم‌افزار کامسول که بر اساس تحلیل اجزاء محدود می‌باشد، ارائه شده است. از این طریق مقادیر خروجی ولتاژ و حساسیت از حسگر فشار میکرو الکترومکانیکی پیزومقاومتی محاسبه شده است. شایان ذکر است که عنصر مقاومتی در نظر گرفته شده روی دیافراگم از نوع ضربه‌ری می‌باشد. علاوه بر تحلیل استاتیکی و مودال دیافراگم این فشارسنج، اثرات پارامترهای هندسی بر روی ولتاژ خروجی مورد بررسی قرار گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با تغییر ابعاد و موقعیت عنصر مقاومتی روی دیافراگم و همچنین ابعاد و خصامت دیافراگم، حساسیت حسگر تغییر می‌یابد. سپس، با ساخت بد مدار چایی و تعیین نمودن اجزا بر روی آن، پکیج نهایی تهیه شده و مورد تست آزمایشگاهی قرار گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که پکیج فشارسنج میکرو الکترومکانیکی دارای خطای کمتر از ۰/۵ درصد می‌باشد. این پکیج فشارسنج قادر است تا فشار ۶ بار را با دقت مذکور اندازه‌گیری کند. نتایج تجربی حاصل از کار آزمایشگاهی در بیان مقاله ارائه شده است. از این پکیج می‌توان با توجه به الزامات طراحی در صنعت پتروشیمی در اندازه‌گیری فشار گاز در تعدادی از مخازن ذخیره و مخازن تحت فشار مشخص شده در پتروشیمی فن آوران استفاده کرد.

## Simulation and empirical investigation of micro-electro-mechanical piezo-resistive pressure sensor package based on the requirements of petrochemical industry

Navid SeyedKazem Viliani<sup>1\*</sup>, Mehdi Hashemi<sup>2</sup>, Hadi Vadizadeh<sup>3</sup>, Hassan Pourrostami<sup>1</sup>, Seyed Mohsen Mostafavi<sup>4</sup>, Faramand Hashemizadeh<sup>4</sup>

1- Department of Engineering, Islamic Azad University, Abhar Branch, Abhar, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

3-Young Researchers and Elite Club, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

4- Department of Research and Development, Fanavaran Petrochemical Co., Mahshahr, Iran

\* P.O.B. 1998664799 Tehran, Iran. n.viliani@abharbau.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 05 July 2014

Accepted 15 August 2014

Available Online 15 November 2014

**Keywords:**

Micro-electromechanical pressure sensor

Piezoresistive

Petrochemical industry

Analytical and empirical investigation

### ABSTRACT

In this paper, a designed micro-electromechanical pressure sensor package is studied analytically and empirically. This package includes a piezoresistive micro-electromechanical pressure sensor, printed circuit board (PCB), the capacitance LCD. First, a mathematical model for the sensor is presented, then the behavior of the sensor is simulated using COMSOL computer software which is based on finite element method. As a consequence, the sensitivity of the micro-electromechanical pressure sensor and output voltage are determined. It should be noted that an Xducer resistor type is adopted in this study. In addition to static and modal analyses of the sensor, the effects of geometrical parameters on output voltage have also been studied. Simulation results show that by changing the size and position of the resistor, as well as the size and thickness of the diaphragm, the sensitivity of the sensor can alter. Then, with the construction and placement of components on printed circuit boards, the package has been prepared and tested in a laboratory. The experimental results of the package show that the error of the devised package in measuring the pressure is less than 0.5 percent. This pressure sensor package is capable of measuring the pressure with the mentioned accuracy within the range of 0-6 bar. For verification, the empirical results are presented at the end of the study. The package can be used according to the requirements of the petrochemical industry in measuring gas pressure of specific storage tanks and pressure vessels in FANAVARN petrochemical company.

Please cite this article using:

N. S. Viliani, M. Hashemi, H. Vadizadeh, H. Pourrostami, S. M. Mostafavi, F. Hashemizadeh, Simulation and empirical investigation of micro-electro-mechanical piezo-resistive pressure sensor package based on the requirements of petrochemical industry, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 16, pp. 349-357, 2015 (In Persian)

یک حل بسته برای روابط بین تنش، جابه‌جایی دیافراگم و تغییرات مقاومت با فشار در حسگرهای فشار پیزومقاومتی سیلیسیمی ارائه نمود. کاندا و یاسکوا [15] در سال 1997 میلادی به بررسی ملاحظات طراحی بهینه برای این فشارسنج‌های پیزومقاومتی که دارای چهار المان پیزومقاومت می‌شد، پرداختند. در همان سال ایتون و اسمیت [16] به بررسی اجمالی فشارسنج‌هایی که از طریق میکروماشین‌کاری ساخته می‌شوند، پرداختند. در اوخر همان دهه، لین و همکاران [17] یک برنامه شبیه‌سازی برای بررسی حساسیت و خطی بودن رفتار حسگرهای فشار پیزومقاومتی ارائه نمودند. توریباما و سوگیاما [18] در سال 2002 میلادی اقدام به بررسی رفتار پیزومقاومتی در سیلیسیم نوع p در حسگرهای مکانیکی کردند.

تحقیقات در خصوص فشارسنج‌های میکرو الکترومکانیکی پیزومقاومتی نه تنها به این جا محدود نگشت، بلکه در دهه اخیر رشد بیشتری نیز یافت. این تحقیقات را می‌توان در قالب مدل سازی (مانند مرجع [5]), بهینه‌سازی رفتار بهمنظور بالا بردن حساسیت فشارسنج (برای مثال در مرجع [19]), نحوه ساخت و تولید، (برای نمونه در مرجع [6]). بررسی اثرات مختلف از جمله دما (به عنوان مثال مرجع [20]) و بررسی مدارهای الکترونیکی خروجی (برای مثال در مرجع [21]), تقسیم‌بندی نمود. بدلیل کاربرد وسیع و مزایای منحصربفرد این فشارسنج‌ها شرکت‌های فعال در زمینه سیستم‌های الکترومکانیکی از جمله متوروولا<sup>2</sup> بر اساس مطالعات وسیع انجام گرفته اقدام به ساخت نمونه‌های صنعتی نموده‌اند.

با توجه به اهمیت موضوع و کاربردهای وسیع، در این مقاله به بررسی تحلیلی و تجربی یک پکیج فشارسنج میکرو الکترومکانیکی از نوع پیزومقاومتی پرداخته شده است. این پکیج فشارسنج شامل یک حسگر میکرو الکترومکانیکی، برد مدار چایی، نمایشگر خازنی می‌باشد. در ابتدا، مدل سازی ریاضی بهمنظور مشخص نمودن پارامترهای مهم و موثر بر حساسیت ارائه شده است. سپس مدل کامپیوتراًی با استفاده از نرم‌افزار کامسول<sup>3</sup> که بر اساس تحلیل اجزاء محدود می‌باشد، ارائه شده و بدین ترتیب مقادیر خروجی ولتاژ و حساسیت حسگر فشار میکرو الکترومکانیکی پیزومقاومتی محاسبه شده است. عنصر مقاومتی در نظر گرفته شده روی دیافراگم از نوع ضربدری<sup>4</sup> می‌باشد که این عنصر توسط شرکت متوروولا مورد استفاده قرار گرفته شده است. علاوه بر تحلیل استاتیکی و مودال دیافراگم این حسگر فشارسنج، اثرات پارامترهای مختلف هندسی بر روی ولتاژ خروجی نیز مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با تغییر ابعاد و موقعیت عنصر مقاومتی روی دیافراگم و ابعاد و ضخامت دیافراگم، حساسیت حسگر تغییر می‌یابد. سپس، با ساخت برد مدار چایی و تعییه نمودن اجزا بر روی آن، پکیج نهایی تهیه شده و مورد تست آزمایشگاهی قرار گرفته است. همچنین چگونگی طراحی میکرو کنترلر و سایر اجزای این مدار در ادامه این مقاله تشریح شده است. در انتها، نتایج حاصل از کار آزمایشگاهی و کالیبراسیون آن ارائه شده است.

## 2- مدل سازی فشارسنج پیزومقاومتی

### 2-1- مدل سازی ریاضی

#### 2-1-1- جهات اصلی در ویفر سیلیسیم

## 1- مقدمه

اساس کار بیشتر محركها و حسگرهای نسل جدید بر پایه سیستم‌های الکترومکانیکی<sup>1</sup> می‌باشد. سیستم‌های الکترومکانیکی ترکیبی از سیستم‌های هوشمند مکانیکی و الکتریکی در ابعاد میکرو می‌باشند. از دیگر محصولاتی که می‌توان به شکل سیستم‌های الکترومکانیکی از آن‌ها استفاده کرد سوپاپ‌ها [1]، چرخ‌دنده‌ها [2] و میکروآینه‌ها [3] می‌باشند.

اساس عملکرد حسگرها در شکل‌های مختلفی می‌باشد که هر کدام دارای پایه و اساس فیزیکی مخصوص به خود می‌باشد. این پدیده‌های فیزیکی عبارتند از: نوری، خازنی، پیزو الکتریک، پیزومقاومتی، رزونانسی و ترمومکتریکی [4]. در بین روش‌های مذکور، روش پیزومقاومت دارای کارایی بیشتری نسبت به روش‌های دیگر می‌باشد. از مهمترین محصولات تولید شده در سیستم‌های میکرو الکترومکانیکی، حسگرهای فشار میکرو الکترومکانیکی می‌باشند که از مقبولیت و پیوسته در صنایع مختلف از جمله صنعت پتروشیمی برخوردار هستند. علت این امر را می‌توان در بالا بودن دقت و پایین بودن هزینه ساخت آن‌ها جویا شد [5].

حسگرهای فشار در شکل رایج خود به شکل کرنش‌سنج می‌باشند که برای دهه‌های متوالی مورد استفاده قرار گرفته است [6] ولی پس از کشف خاصیت پیزومقاومتی در بعضی از نیمه‌های همچون سیلیسیم توسعه اسمیت [7]، اساس کار حسگرهای فشار بر پایه پدیده‌ی پیزومقاومت تغییر یافت. پیزومقاومت به تهایی یک خاصیت ماده می‌باشد که در اثر اعمال تشکیل مکانیکی، مقاومت کلی جسم تغییر می‌کند [8].

فشارسنج‌های به چندین دسته تقسیم‌بندی می‌شوند که عبارتند از: حسگر فشار مطلق، حسگر فشار گیج و حسگر فشار دیفرانسیلی. در تمامی دسته‌های یاد شده، حسگر فشار یک دیافراگم می‌باشد که در اثر اعمال فشار به آن تغییر شکل ایجاد می‌شود. از آن جا که تغییر شکل پدیدار شده در دیافراگم کوچک است نمی‌توان آن را مستقیماً به سادگی اندازه‌گیری کرد. این تغییر شکل مکانیکی یا به عبارت دیگر کرنش‌های ایجاد شده در دیافراگم با استفاده از خاصیت پیزومقاومتی مواد نیمه‌هادی به سینگال‌های الکتریکی تبدیل می‌شوند که در نهایت می‌توان، فشار اعمال شده به دیافراگم را اندازه‌گیری کرد [6].

به طور کلی دو گروه اصلی در سیلیسیم می‌توان در نظر گرفت که در طراحی و ساخت دیافراگم در حسگرهای میکرو الکترومکانیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این دو گروه عبارتند از نوع p و نوع n. تفاوت این دو گروه در نوع ناخالصی بکار رفته در آن‌ها می‌باشد [9].

تحقیقات در خصوص فشارسنج‌های میکرو الکترومکانیکی پیزومقاومتی سیار گسترده می‌باشد. برای اولین بار در سال 1979 میلادی، کلارک و وايز [10] یک نمونه از این فشارسنج‌ها را طراحی نمودند و برای آن به همراه میزان حساسیت آن یک مدل ریاضی ارائه نمودند. مدل آن‌ها، شامل چهار عنصر پیزومقاومت در وسط یک دیافراگم مربعی بود. در همان سال، کو و همکاران [11] بر همین اساس مبدل فشار برای کاربردهای پزشکی طراحی کردند. لی و وايز [12] در سال 1982 میلادی برای فشارسنج مذکور، یک برنامه شبیه‌سازی پیشنهاد کردند. جورج و همکاران [13] در سال 1990 میلادی به صورت تجربی به بررسی رفتار این فشارسنج‌ها پرداختند. یک سال بعد، موسر و همکاران [14] به بررسی حسگرهای فشار که از کربیستال پلی سیلیسیم ساخته شده‌اند، پرداختند. در سال 1995 میلادی، الگام [8]

### 2-3-1 معادلات ساختاری حاکم بر سیلیسیم

به طور کلی رابطه تنش و کرنش در مواد با رابطه (3) تعریف می‌شود.

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} \quad (3)$$

در آن  $T$  نشان دهنده ماتریس تنش و  $S$  نشان دهنده ماتریس کرنش مواد می‌باشد. با توجه به تقارن کریستال سیلیسیم تعداد ضرایب به 3 ضریب مستقل کاهش می‌یابد که در رابطه (4) بیان شده است.

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} \quad (4)$$

در رابطه (4)، مقدار ضرایب برای سیلیسیم  $C_{11} = 166 \text{ GPa}$ ،  $C_{12} = 64 \text{ GPa}$ ،  $C_{44} = 80 \text{ GPa}$  می‌باشد [9].

با توجه به قانون اهم، رابطه میدان الکتریکی و جریان برای سه بعد مطابق رابطه (5) می‌باشد [9]:

$$E_i = \rho_{ij} i_j \quad (5)$$

رابطه (5) در فرم ماتریسی به صورت  $\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_1 & \rho_6 & \rho_5 \\ \rho_6 & \rho_2 & \rho_4 \\ \rho_5 & \rho_4 & \rho_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix}$  می‌باشد.

در رابطه (5) ماتریس  $\rho$  ماتریس مقاومت الکتریکی و  $i$  ماتریس جریان الکتریکی می‌باشد.

با در نظر گرفتن خطی بودن خواص پیزو مقاومتی (که با توجه به کرنش کم ماده فرض درستی است) رابطه بین ضرایب پیزو مقاومت و مقادیر تنش به شکل رابطه (6) می‌باشد [9]:

$$\rho_{ij} = \rho_{ij}^0 + \pi_{ijkl} \sigma_{kl} \quad (6)$$

که در آن  $\rho_{ij}^0$  مقاومت الکتریکی برای سیلیکون در حالتی که هیچ‌گونه تنشی بر آن وارد نمی‌شود و  $\pi_{ijkl}$  تانسور پیزو مقاومت می‌باشد. به شکل ماتریسی مطابق رابطه (7) بیان می‌شود:

$$\begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \rho_3 \\ \rho_4 \\ \rho_5 \\ \rho_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{11} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{12} & \pi_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} \quad (7)$$

با توجه به روابط بالا و با ترکیب آنها رابطه بین میدان الکتریکی و تنش

به طور کلی، در صنعت ساخت ترازیستورها، استفاده از ویفر (100) به علت عیوب کم بین سیلیسیم و دی‌اسی‌دی‌سی‌لیسیم رایج می‌باشد. همانطور که قبل اشاره شد، سیلیسیم را براساس میزان ناخالصی آن به دو دسته  $n$  و  $p$  تقسیم بنده می‌کنند که با تغییر مقدار ناخالصی در سیلیسیم مقدار رسانایی و خواص الکتریکی آن تغییر می‌باید. از آنجایی که سیلیسیم در گروه سوم جدول تنایوی ناخالص شود، سیلیسیم به نوع  $p$  تبدیل می‌شود و اگر با مواد گروه پنجم جدول تنایوی این فرآیند ناخالصی صورت گیرد، سیلیسیم از نوع  $n$  می‌باشد. عموماً در حسگرهای طراحی شده، دیافراگم را از سیلیسیم نوع  $n$  انتخاب می‌کنند و عنصر مقاومتی را از سیلیسیم نوع  $p$  بر می‌گزینند. در حسگر طراحی شده از ویفر (100) سیلیسیم استفاده شده که جهات آن مطابق شکل 1 نمایش داده می‌شود [9].

از آنجایی که قسمت اصلی فشارسنج به منظور حس فشار، دیافراگم می‌باشد، تحلیل ریاضی این حسگر مستلزم آن است که معادلات حاکم بر دیافراگم مورد بررسی قرار گیرد.

### 2-1-2 معادلات حاکم بر دیافراگم

در تحلیل دیافراگم این حسگر، از تئوری کلاسیک ورق‌ها استفاده می‌شود. در تئوری ورق‌ها معادله دیافراگم با توجه به کرنش‌ها و تنش‌های تولید شده به صورت رابطه (1) می‌باشد [9].

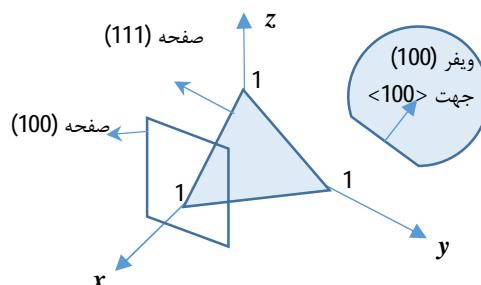
$$\frac{\partial^4 w(x, y)}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w(x, y)}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w(x, y)}{\partial y^4} = \frac{P}{D} \quad (1)$$

که در آن  $w$  مقدار خیز ورق،  $P$  فشار واردہ بر دیافراگم و مقدار  $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$  می‌باشد. مقادیر  $E$ ،  $\nu$  و  $h$  به ترتیب عبارتند از مدول یانگ دیافراگم، ضریب پواسون و ضخامت دیافراگم می‌باشد.

حل معادله ارائه شده در رابطه (1) برای شکل‌های هندسی مختلف و شرایط مرزی‌های مختلف، متفاوت است. دیافراگم مورد تحلیل در حسگر طراحی شده به شکل مربع مستطیل می‌باشد که چهار ضلع آن به صورت گیردار مقید شده است. حل‌های تحلیلی مختلفی برای این شرایط مرزی ارائه شده که در این مقاله تابع شکل دیافراگم مطابق رابطه (2) تعریف می‌شود [9].

$$w(x, y) = \frac{c_1}{4} [1 + \cos(\frac{2\pi x}{a})] [1 + \cos(\frac{2\pi y}{a})] \quad (2)$$

که در آن  $a$  طول یا عرض دیافراگم می‌باشد و  $c_1$  مقدار خیز دیافراگم در نقطه  $x = 0, y = 0$  می‌باشد.



شکل 1 جهات مختلف در ویفر سیلیسیم

تولید شده در اثر اعمال فشار را به دست آورد. فشارسنج مدل ضربدری، یک نمونه از فشارسنج‌های میکروالکترومکانیکی می‌باشد که اساس کار آن از نوع پیزومقاومتی است. هندسه‌ی دیافراگم این فشارسنج به صورت مربعی می‌باشد که از جنس سیلیکن نوع  $n$  بوده و نوع عنصر مقاومتی نیز از جنس سیلیکن نوع  $p$  می‌باشد که به صورت یک تکه و ضربدری در راستای 45 درجه بر روی لبه دیافراگم مطابق شکل 2 قرار گرفته شده است.

با توجه به مطالب ارائه شده در بخش تعریف صفحات و کریستال سیلیسیم، جهت سیلیسیم در لبه‌ها  $\langle 110 \rangle$  می‌باشد و جهت عنصر پیزومقاومتی با چرخش 45 درجه در راستای  $\langle 100 \rangle$  خواهد بود. با توجه به جهت عنصر مقاومتی معادلات میدان الکتریکی از رابطه (13) به دست می‌آید [9].

$$\begin{aligned} E_1 &= \rho^0 i_1 + \rho^0 \pi_{11} \sigma_{11} i_1 + \rho^0 \pi_{12} (\sigma_2) i_1 \\ E_2 &= \rho^0 \pi_{44} i_1 \tau_{12} \\ E_3 &= 0 \end{aligned} \quad (13)$$

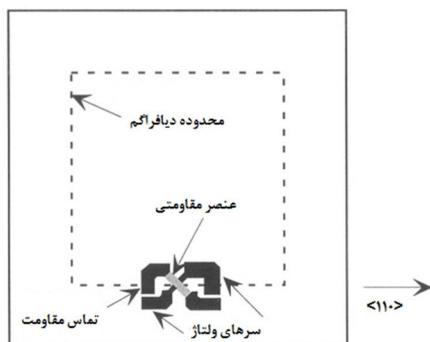
در رابطه (13)، معادلات مربوط به میدان الکتریکی با فرض تنش صفر در راستای 3 (بدلیل تنش صفحه‌ی دیافراگم) وجود جریان در راستای 1، ارائه شده‌اند. بر این اساس، مقدار ولتاژ با انتگرال گیری از روابط (13) در طول عنصر مقاومتی با رابطه (14) (بیان می‌شود):

$$\begin{cases} V_1 = \int E_1 dl \approx \rho^0 i_1 L_r, \\ V_2 = \int E_2 d2 = \rho^0 \pi_{44} \tau_{12} i_1 w_r \\ \rightarrow \frac{V_2}{V_1} = \pi_{44} \tau_{12} \frac{w_r}{L_r} \end{cases} \quad (14)$$

با توجه به رابطه بالا، اختلاف ولتاژ دو سر عنصر مقاومتی با ابعاد آن، ضربی 44 پیزومقاومت  $\pi_{44}$  و تنش برشی  $\tau_{12}$  دیافراگم بستگی دارد. تنش برشی با استفاده از روش انرژی و همچنین مقادیر جابه‌جایی دیافراگم که در قبیل ارائه شد قابل محاسبه است.

جدول 1 مقادیر ضرایب پیزومقاومتی ویفر سیلیسیم [9]

$\pi_{44}$	$\pi_{12}$	$\pi_{11}$	مقاومت	نوع
$10^{-11} \text{ Pa}^{-1}$	$10^{-11} \text{ Pa}^{-1}$	$10^{-11} \text{ Pa}^{-1}$	$\Omega - \text{cm}$	واحد
-13/6	53/4	-102/2	11/7	$n$ نوع
138/1	-1/1	6/6	7/8	$p$ نوع



شکل 2 نمایش شماتیک مدل پیزومقاومت ضربدری [9]

به شکل رابطه (8) به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} E_1 &= \rho^0 i_1 + \rho^0 \pi_{11} \sigma_{11} i_1 + \rho^0 \pi_{12} (\sigma_2 + \sigma_3) i_1 + \rho^0 \pi_{44} (i_2 \tau_{12} + i_3 \tau_{13}) \\ E_2 &= \rho^0 i_2 + \rho^0 \pi_{11} \sigma_{12} i_2 + \rho^0 \pi_{12} (\sigma_1 + \sigma_3) i_2 + \rho^0 \pi_{44} (i_1 \tau_{12} + i_3 \tau_{23}) \\ E_3 &= \rho^0 i_3 + \rho^0 \pi_{11} \sigma_{13} i_3 + \rho^0 \pi_{12} (\sigma_1 + \sigma_2) i_3 + \rho^0 \pi_{44} (i_1 \tau_{13} + i_2 \tau_{23}) \end{aligned} \quad (8)$$

به منظور به دست آوردن رابطه میدان الکتریکی در جهات مختلف می‌بایست جهت  $\langle 100 \rangle$  به جهت  $\langle 110 \rangle$  انتقال یابد که این امر با ماتریس‌های انتقال محقق می‌شود. رابطه انتقال یافته میدان الکتریکی به شکل رابطه (9) است.

$$\begin{aligned} E'_1 / \rho^0 &= i'_1 [1 + \pi'_{11} \sigma'_1 + \pi'_{12} \sigma'_2] + i'_2 [\pi'_{11} \sigma'_1 + \pi'_{12} \sigma'_1] \\ E'_2 / \rho^0 &= i'_2 [1 + \pi'_{21} \sigma'_1 + \pi'_{11} \sigma'_2] + i'_1 [\pi'_{11} \sigma'_1 + \pi'_{12} \sigma'_1] \\ E'_3 / \rho^0 &= i'_3 \end{aligned} \quad (9)$$

که در رابطه (9)  $\pi'_{11}$  و  $\pi'_{12}$  عبارتست از:

$$\begin{aligned} \pi'_{11} &= \pi_{11} + 2(\pi_{44} + \pi_{12} - \pi_{11})(l_1^2 m_1^2 + l_1^2 n_1^2 + m_1^2 n_1^2) \\ \pi'_{12} &= \pi_{12} - (\pi_{44} + \pi_{12} - \pi_{11})(l_1^2 l_2^2 + n_1^2 n_2^2 + m_1^2 m_2^2) \end{aligned} \quad (10)$$

برای هر المان حسگر می‌توان ضرایب طولی و عرضی را به دست آورد که این ضرایب به شکل رابطه (11) است [9].

$$\begin{aligned} \pi_L &= \pi'_{11} = \pi_{11} + 2(\pi_{44} + \pi_{12} - \pi_{11})(l_1^2 m_1^2 + l_1^2 n_1^2 + m_1^2 n_1^2) \\ \pi_t &= \pi'_{12} = \pi_{12} - (\pi_{44} + \pi_{12} - \pi_{11})(l_1^2 l_2^2 + n_1^2 n_2^2 + m_1^2 m_2^2) \end{aligned} \quad (11)$$

ضرایب  $L$  و  $t$  برای تنش طولی و عرضی انتخاب شده است که با توجه به محور المان حسگر انتخاب می‌شوند. همچنین عبارات  $l_1, m_1, n_1$  و  $l_2, m_2, n_2$  محورهای هادی راستای طولی و عرضی عنصر مقاومتی با محورهای مختصات کریستال سیلیسیم می‌باشد.

با توجه به روابط بالا رابطه بین تنش و تغییرات مقاومت عنصر مقاومتی به شکل رابطه (12) می‌باشد:

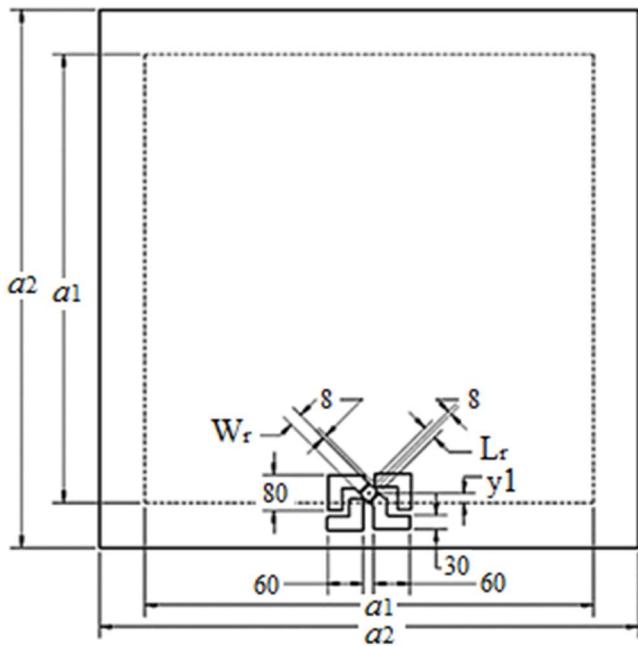
$$\frac{\Delta R}{R} = \pi_L \sigma_L + \pi_t \sigma_t \quad (12)$$

در بسیاری از حسگرهای میکروالکترومکانیکی، عنصر پیزومقاومتی در راستای  $\langle 110 \rangle$  قرار دارد در صورتی که ویفر سیلیسیمی آن ویفر  $\langle 100 \rangle$  می‌باشد بدین منظور ضرایب پیزو مقاومت برای این حالت به صورت

$$\pi_{L,110} = \frac{1}{2}(\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44}) \quad \text{و} \quad \pi_{t,110} = \frac{1}{2}(\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44})$$

ضرایب پیزومقاومتی به میزان ناخالصی سیلیسیم وابسته است که در جدول 1 ارائه شده است. از آن جایی که این ضرایب با افزایش دما تغییر کرده (کم می‌شوند) با افزایش میزان ناخالصی سیلیسیم می‌توان اثرات تغییر دما را کاهش داد.

با توجه به مقادیر تحلیلی به دست آمده در بالا می‌توان با تشکیل مدار پل و تسویه برای عنصر مقاومتی موجود بر روی صفحه سیلیسیمی، مقدار ولتاژ



شکل 3 نمایش شماتیک مدل فشارسنج مدل سازی شده (بعد بر حسب میکرومتر)

شده از سیلیسیم نوع  $n$  می‌باشد، در حالی که جنس پیزومقاومت همرا با کانکتورهای آن، سیلیسیم نوع  $p$  می‌باشد. شایان ذکر است که میزان ناخالصی بر روی لایه پیزومقاومت به میزان  $1/32 \times 10^9$  بر سانتی متر مکعب و چگالی ناخالصی بر روی کانکتورها،  $1/45 \times 10^{10}$  بر سانتی متر مکعب تعريف شده است. همچنین فرض می‌شود، که لبه‌های دیافراگم تا  $a_2$  به صورت درگیر می‌باشد.

از چهار کانکتور موجود، دو به دو کانکتورهای روبروی هم جهت انتقال جریان و اعمال ولتاژ به عنصر پیزومقاومتی، در نظر گرفته می‌شود. از دو کانکتور روبروی هم به یکی ولتاژ 3 ولت و دیگری را متصل به زمین تعريف می‌شود. اختلاف ولتاژ دو کانکتور دیگر را به عنوان ولتاژ خروجی خوانده می‌شود. بدین ترتیب مدار پل وتسون شکل می‌گیرد.

نتایج مربوط به تحلیل این فشارسنج پیزومقاومتی مدل ضربدری در ادامه آورده شده است. در شکل 4، میزان و چگونگی جابه‌جایی دیافراگم مربعی شکل تحت فشار 100 کیلوپاسکال نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، حداقل جابه‌جایی دیافراگم در وسط آن و به میزان  $1/223$  میکرومتر می‌باشد. از آن جا که تنش برشی صفحه‌ای با توجه به معادلات ریاضی حاکمه بر مسئله نقش تعیین کننده‌ای بر ولتاژ خروجی این نوع از فشارسنج پیزومقاومتی دارد، می‌بایست توزیع آن مورد بررسی قرار گیرد. از این رو در شکل 5 نیز توزیع تنش برشی داخل صفحه ناشی از این بار بر روی صفحه در سرتاسر دیافراگم و بر روی لبه‌های آن نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، حداقل مقدار این مولفه از تنش بر روی وسط لبه‌ها می‌باشد که مقدار آن برابر  $38/43$  مگاپاسکال است. از این رو به منظور تحلیل رفتار ارتعاشی این دیافراگم، نتایج حاصل از تحلیل مودال دیافراگم در اینجا ارائه شده است. بر این اساس، فرکانس اول  $270\text{kHz}$  فرکانس دوم  $550\text{kHz}$  و فرکانس سوم  $786\text{kHz}$  حاصل شده‌اند. همچنین شکل مودهای نظری هر یک در شکل 6 ترسیم شده است.

با فرض اینکه جابه‌جایی دیافراگم با رابطه (2) بیان شود،  $C_1$  از رابطه (15) به دست می‌آید.

$$C_1 = \frac{3(1 - \nu^2)a^4}{2\pi^4 Eh^3} P \quad (15)$$

همچنین تنش در جهت  $x$  و  $y$  بر روی لبه دیافراگم با رابطه (16) بیان می‌شود [9].

$$\sigma_x = \frac{6M_x}{h^2}, \quad \sigma_y = \frac{6M_y}{h^2}. \quad (16)$$

که در آن  $h$  ضخامت دیافراگم و  $M_x$  و  $M_y$  به ترتیب عبارتند از برآیند گشتاور خمی در راستای  $x$  و  $y$  که از رابطه (17) محاسبه می‌شوند.

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

$$M_y = -D \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right). \quad (17)$$

با توجه به قرارگیری عنصر مقاومتی در مختصات  $(y=-a/2, x=0)$  و از آنجایی که مقدار ضریب پواسون در راستای  $<110>$  برابر است با  $0/06$ ، مقدار تنش برشی با استفاده از مولفه‌های تنش عمودی داده شده در رابطه (16) از طریق رابطه (18) محاسبه می‌شود.

$$\tau_{12} = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} = 0.07143 \left( \frac{a}{h} \right)^2 P. \quad (18)$$

با توجه به رابطه (14)، نسبت بین ولتاژها از رابطه (19) به دست می‌آید.

$$\frac{V_2}{V_1} = (0.0984 \times 10^{-9}) \left( \frac{a}{h} \right)^2 \left( \frac{W_r}{L_r} \right) P \quad (19)$$

از رابطه (19) می‌توان نتیجه گرفت که ولتاژ خروجی ( $V_2$ ) نسبت خطی با نسبت عرض به طول عنصر مقاومتی دارد و با توان دوم نسبت طول ورق به ضخامت آن رابطه مستقیم دارد. همچنین این ولتاژ با فشار وارد بر دیافراگم رابطه مستقیم دارد. شایان ذکر است که این روابط تا زمانی که دیافراگم دچار تغییر شکل بزرگ نشده است، برقرار می‌باشد. اگر فشار وارد از یک حد فراتر رود، دیگر فرض تغییر شکل‌های کوچک صحیح نمی‌باشد و از این رو رابطه (19) برقرار نخواهد بود.

## 2-2- مدل‌سازی کامپیوتوری

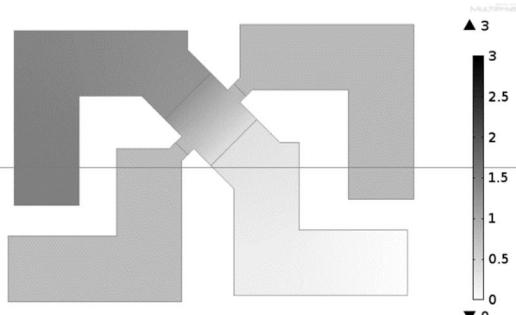
به منظور مدل‌سازی کامپیوتوری، این نوع فشارسنج از نرم‌افزار کامسول<sup>1</sup> استفاده شده است. در ابتدا، مطابق شکل 3 یک ورق مربعی با ابعاد مشخص (ا<sub>1</sub>) به مقدار  $1000\mu\text{m}$  و ضخامت  $20\mu\text{m}$  به صورت یک دیافراگم در نرم‌افزار تعريف می‌شود. سپس عنصر مقاومتی ضربدری نیز با ابعاد مشخص بر روی دیافراگم در نرم‌افزار تعريف می‌شود. جنس دیافراگم در نظر گرفته

<sup>1</sup>- COMSOL

بهمنظور بررسی چگونگی توزیع میدان الکتریکی در پیزومقاومت و کانکتورها در شکل 7 این توزیع در اثر اعمال فشار 100 کیلوپاسکال نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در کانکتورها بدلیل ناخالصی بالا، تغییرات ولتاژ سیار ناچیز می‌باشد. چرا که مقاومت آن‌ها در مقایسه با پیزومقاومت بخارطه میزان ناخالصی تقریباً 10 برابر آن، سیار کم می‌باشد.

بهمنظور بررسی تغییرات ولتاژ خروجی بر حسب فشار اعمالی در این فشارسنگ پیزومقاومتی، بارهای مختلفی بر روی صفحه (دیافراگم) اعمال شده است. این فشار از 0 تا 300 کیلوپاسکال اعمال شده و ولتاژ خروجی آن مورد محاسبه قرار گرفته شده است. نتایج حاصل از این تغییرات در شکل 8 نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، تغییرات بهصورت خطی می‌باشد. بهطوری که در فشار 0 کیلوپاسکال ولتاژ خروجی در حدود صفر 0/259 میلیولت) می‌باشد و با افزایش فشار، ولتاژ خروجی با شیب ثابت 0/598 افزایش می‌یابد. (میزان حساسیت 0/598 mV/kPa می‌باشد).

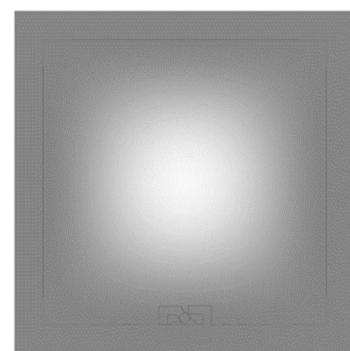
اثرات پارامترهای هندسی فشارسنگ مقاومتی از جمله نسبت پهنا به طول عنصر مقاومتی و نسبت عرض به ضخامت دیافراگم مربعی، بر روی ولتاژ خروجی مورد بررسی قرار گرفته شده و نتایج آن در جدول 2 و 3 آورده شده است. مطابق با رابطه (19)، این دو نسبت سهم مهمنی در میزان ولتاژ خروجی و به عبارت دیگر حساسیت حسگر دارند. همانطور که در جدول 2 مشاهده می‌شود با افزایش نسبت عرض به ضخامت دیافراگم، ولتاژ خروجی بیشتر مطابق روابط ریاضی حاکم (رابطه 19)، رابطه خطی دارد. البته افزایش بیش از اندازه این نسبت سبب می‌شود تا تنش‌های وارد بر دیافراگم بشکل قابل توجهی افزایش یابد و دیافراگم دچار وامندگی شود. همچنین سبب می‌شود تا جابه‌جایی‌ها بزرگ شود و از این رو تحلیل‌ها و جواب‌های حاصله غیرخطی شود که برای طراحی مناسب نمی‌باشد. علاوه بر آن، همانطور که در جدول 3 مشاهده می‌شود، هرچه نسبت پهنا به طول پیزومقاومت کاهش می‌یابد، میزان ولتاژ خروجی بازی یک فشار مشخص کاهش می‌یابد. با توجه به آن که رابطه (19) بیان‌گر آن است که ولتاژ خروجی با نسبت پهنا به طول عنصر مقاومتی رابطه خطی دارد، اما نتایج برای این نسبت دقیقاً خطی نمی‌باشد. علت اصلی آن است که رابطه (19) یک رابطه تقریبی است که با فرض ثابت بودن نتش برشی در محدوده قرارگیری عنصر پیزومقاومت ارائه شده در حالی نتش برشی در این محدوده تغییر می‌کند.



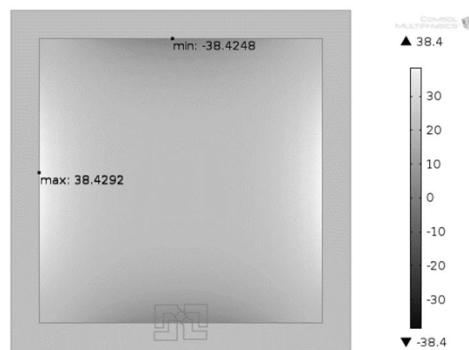
شکل 7 توزیع میدان الکتریکی در کانکتورها و عنصر مقاومتی بر حسب ولت

جدول 2 میزان ولتاژ خروجی به ازای فشار 100 کیلوپاسکال بر حسب تغییرات نسبت عرض به ضخامت دیافراگم برای  $W_r/L_r = 1$  (بر حسب میلیولت)

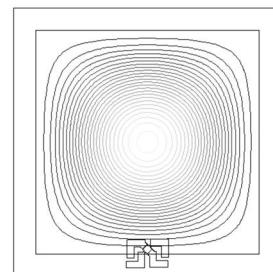
$a/h$	$V_2$
60	50
88/38	59/53
40	36/39



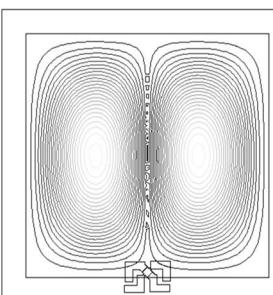
شکل 4 جابه‌جایی دیافراگم تحت فشار 100 کیلوپاسکال (بر حسب میکرومتر)



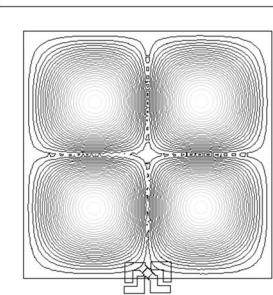
شکل 5 توزیع نتش برشی صفحه‌ای بر روی دیافراگم (بر حسب مگاپاسکال)



(الف)



(ب)



(ج)

شکل 6 شکل مدهای مود (الف) اول، (ب) دوم (ج) سوم

حسگر 4/889 ولت می‌شود. بنابراین ورودی مدار می‌بایست قدرت اندازه‌گیری ولتاژ 0 تا 5 ولت را داشته باشد. با توجه به تغییرات کم ولتاژ به ازای تغییرات فشار ورودی مدار می‌بایست از دقت خوبی برخوردار باشد. برای اندازه‌گیری تغییرات ولتاژ و نمایش آن به صورت دیجیتالی نیاز به یک مبدل آنالوگ به دیجیتال (ADC) می‌باشد، مبدل انتخاب شده یک مبدل آنالوگ به دیجیتال از نوع سیگما دلتا به دقت 24 بیت و ضریب تقویت قابل برنامه‌ریزی با رابط سریال SPI ساخته شرکت آنالوگ دیوایس<sup>1</sup> به شماره AD7714 می‌باشد (شکل 10). ورودی این مبدل به صورت دیفرانسیل بوده و برای اندازه‌گیری ولتاژ پل وتسون بهینه می‌باشد.

برای بهینه‌سازی مدار و نمایش دما از یک حسگر دمای دیجیتالی با رابط سریال I2C به شماره LM75 استفاده می‌شود. برای نمایش مقادیر از یک نمایشگر رنگی از نوع TFT به اندازه 3/2 اینچ بزرگنمایی 320 در 240 پیکسل استفاده شده است. برای اعمال تنظیمات از یک نمایشگر لمسی مقاوتمی به اندازه 3/2 اینچ به همراه یک درایور لمسی استفاده شده است. به عنوان پردازشگر و قلب مدار به یک میکروکنترلر نیاز است که میکروکنترلر ARM به شماره LPC1768 ساخت شرکت NXP انتخاب شده است.

عملکرد کلی مدار به این صورت است که میکروکنترلر در ابتدا تنظیمات مربوط به ADC را انجام داده و فرمان‌های حذف آفست و کالیبراسیون را از طریق رابط SPI به مبدل آنالوگ به دیجیتال می‌دهد. بعد از این کار پیکربندی نمایشگر تماسی صورت می‌گیرد. سپس مقادیر تبدیل شده از ADC و همچنین مقدار حسگر دما را خوانده و پس از محاسبه فشار از طریق مقادیر از قبل کالیبره شده که به صورت دستی به برنامه وارد شده مقدار حسگر فشار، حسگر دما و ولتاژ ورودی مبدل را بر روی نمایشگر نمایش می‌دهد.

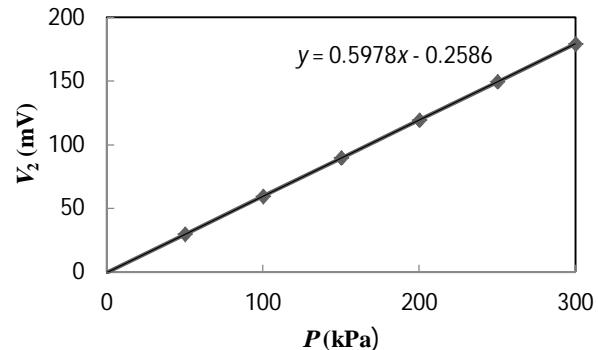
در قسمتی از برنامه مقدار حسگر همواره با مقدار از قبل مشخص شده مقایسه شده و در صورت بیشتر بودن مقدار حسگر از مقدار تعیین شده یک رله وصل می‌شود و در صورت کمتر شدن مقدار حسگر از مقدار تعیین شده دوباره رله قطع می‌شود.

تجزیه ورودی مدار 12 ولت بوده و برای قسمت‌های مختلف مدار نیاز به ولتاژ‌های خاصی می‌باشد. ولتاژ 12 ولت ورودی با استفاده از یک رگولاتور سوئیچینگ با فرکانس کلید زنی 40 کیلوهرتز و با تپولوژی باک به ولتاژ 5 ولت با حداکثر جریان دهی 3 آمپر تبدیل می‌شود. شماره فنی این رگولاتور LM2576 می‌باشد. با توجه به سوئیچینگ بودن این قسمت از مدار راندمان این قسمت از مدار در بیش از 80% بوده پس توان تلف شده بسیار پایینی دارد.

تجزیه مبدل آنالوگ به دیجیتال 5 ولت بوده و مستقیماً از خروجی رگولاتور سوئیچینگ تامین می‌شود. تجزیه نمایشگر، میکرو و سایر قسمت‌ها 3/3 ولت بوده از طریق رگولاتور خطی به شماره LM1117 تامین می‌شود. حداکثر جریان خروجی این رگلاتور 800 میلی‌آمپر می‌باشد که با توجه به توان مصرفی مدار کافی می‌باشد.

برای رفنس مبدل آنالوگ به دیجیتال نیاز به یک ولتاژ 2/5 ولت با دقت بالا می‌باشد که از طریق رگولاتور ولتاژ رفنس به شماره TL431 تامین می‌شود. تفاوت این رگولاتور با رگولاتورهای معمولی در ثبات بالای حرارتی و جریان دهی کم می‌باشد.

کریستال مدار برای ایجاد کلاک مورد نیاز میکرو 12 مگاهرتز انتخاب شده که از طریق ضرب‌کننده داخلی میکرو (PLL) به فرکانس 100 مگاهرتز



شکل 8 تغییرات ولتاژ خروجی (بر حسب میلی‌ولت) بر حسب فشار اعمالی (بر حسب کیلوپاسکال)

جدول 3 میزان ولتاژ خروجی به ازای فشار 100 کیلوپاسکال بر حسب تغییرات

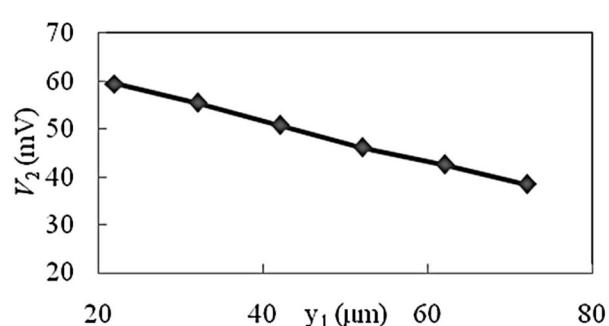
$$\text{نسبت طول به عرض عنصر مقاومتی برای } a/h = 50 \text{ (بر حسب میلی‌ولت)}$$

W <sub>r</sub> /L <sub>r</sub>	0/5	0/25	0/2	V <sub>2</sub>
59/53	49/99	29/84	24/49	

در انتهای، اثر موقعیت عنصر مقاومتی یا پیزومقاومت از لبه دیافراگم (y<sub>1</sub>) بر روی ولتاژ خروجی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از این تحلیل در شکل 9 نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با دور نمودن پیزومقاومت از لبه دیافراگم و حرکت به سمت مرکز ولتاژ خروجی کاهش می‌یابد. از این رو موقعیت اولیه آن در لبه دیافراگم در مقایسه با بقیه موارد موقعیت مناسبی می‌باشد. چرا که بیشترین مقدار ولتاژ خروجی بدليل بیشینه بودن تنش برشی داخل صفحه در این موقعیت حاصل می‌شود.

### 3- طراحی و ساخت پکیج فشارسنج میکرو الکترومکانیکی پیزومقاومتی

در این قسمت به تشریح مدار خروجی و در نهایت پکیج فشارسنج خروجی ساخته شده، پرداخته شده است. حسگر فشار استفاده شده از نوع حسگر پیزومقاومتی ساخت شرکت موتورولا می‌باشد که از یک المان حسگر ضربدری ساخته شده است با توجه به مدار وتسون، خروجی حسگر از جنس ولتاژ می‌باشد. حداکثر فشار قابل اندازه‌گیری با این حسگر برابر 600 کیلوپاسکال می‌باشد. با توجه به مشخصات ارائه شده از طرف شرکت موتورولا حداکثر ولتاژ خروجی حسگر 4/48 ولت است که با اضافه کردن حداکثر ولتاژ آفست حسگر که برابر 409 میلی‌ولت است مقدار حداکثر خروجی واقعی



شکل 9 تغییرات ولتاژ خروجی (بر حسب میلی‌ولت) بر حسب فاصله پیزومقاومت از لبه دیافراگم (بر حسب میکرومتر)

در تست انجام شده از سیال هوا به عنوان سیال عامل استفاده شده که با اعمال آن توسط دستگاه مرجع و نتایج خوانده شده از پکیج فشارسنج میکروالکتروموکانیکی می‌توان میزان خطای پکیج را بدست آورد. نتایج حاصل از آزمایش و همچنین میزان خطای تولید شده در جدول ۴ و ۵ آورده شده است:

جدول ۴ نتایج حاصل از تست فشار و کالیبراسیون پکیج فشارسنج حین بارگذاری

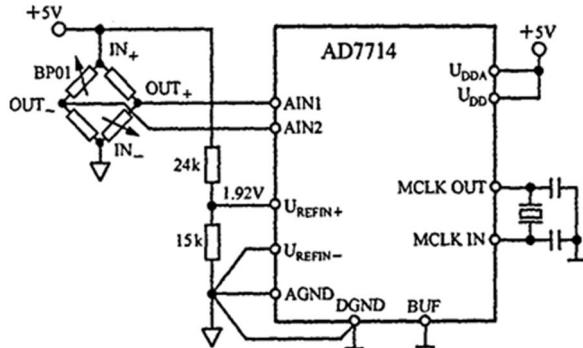
	عدم قطعیت (%)	خطای (%)	فشار دستگاه طراحی شده (kPa)	فشار مرجع شده (kPa)	شماره
0/53	0/03	10/2	10	1	
	0/10	35/6	35	2	
	0/05	60/3	60	3	
	0/00	100/6	100	4	
	-0/08	124/5	125	5	
	-0/08	149/5	150	6	
	0/03	175/2	175	7	
	0/00	200/0	200	8	
	0/05	225/3	225	9	
	-0/03	249/8	250	10	
	0/20	276/2	275	11	
	0/25	301/5	300	12	
	0/27	326/6	325	13	
	0/28	351/7	350	14	
	0/23	376/4	375	15	
	0/32	401/9	400	16	
	0/33	427/0	425	17	
	0/32	451/9	450	18	
	0/33	477/0	475	19	
	0/42	502/5	500	20	
	0/45	527/7	525	21	
	0/43	552/6	550	22	
	0/48	577/9	575	23	
	0/42	602/5	600	24	

جدول ۵ نتایج حاصل از تست فشار و کالیبراسیون پکیج فشارسنج حین باربرداری

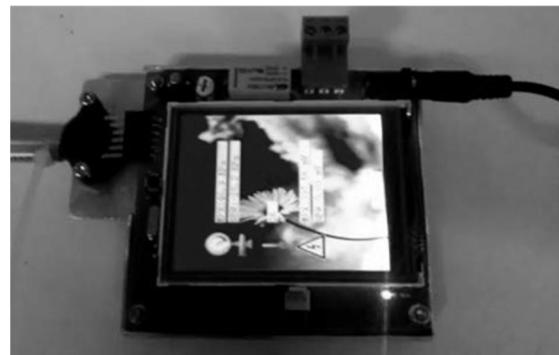
	عدم قطعیت (%)	خطای (%)	فشار دستگاه طراحی شده (kPa)	فشار مرجع شده (kPa)	شماره
0/53	0/42	602/5	600	1	
	0/43	552/6	550	2	
	0/37	502/2	500	3	
	0/35	452/1	450	4	
	0/30	401/8	400	5	
	0/25	351/5	350	6	
	0/18	301/1	300	7	
	0/18	251/1	250	8	
	0/18	201/1	200	9	
	0/05	150/3	150	10	
	0/12	100/7	100	11	
	0/07	50/4	50	12	
	0/00	10/0	10	13	

می‌رسد. تمامی خازن‌های الکتروولیت مدار از نوع سالید<sup>۱</sup> انتخاب شده که دارای طول عمر بالا و جریان نشتی (ESD) فوق العاده پایین می‌باشد. سایر خازن‌ها از جنس تانتالیوم بوده که دارای دقت و عمر بالا می‌باشند. شایان ذکر است که برد مدار از جنس فایبر گلاس و به صورت متالیزه و PCB مدار دولا به می‌باشد. در نهایت پکیج این فشارسنج میکروالکتروموکانیکی پیزومقاومتی مطابق شکل ۱۱ حاصل شده است.

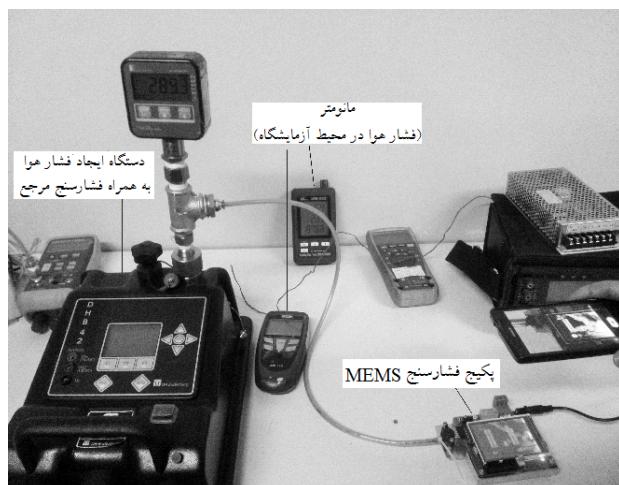
۴- تست آزمایشگاهی پکیج فشارسنج میکروالکتروموکانیکی  
به منظور تست پکیج فشارسنج و همچنین کالیبراسیون آن از یک دستگاه فشار مرجع مطابق شکل ۱۲ استفاده شده است.



شکل ۱۰ مدار شماتیک مبدل آنالوگ به دیجیتال



شکل ۱۱ پکیج فشارسنج میکروالکتروموکانیکی پیزومقاومتی طراحی شده



شکل ۱۲ نحوی کالیبراسیون و تست پکیج فشارسنج

## 6- مراجع

- [1] K. W. Oh, C. H. Ahn, A review of microvalves, *Journal of Micromechanics and Microengineering* Vol. 16, No. 5, pp. 13-39, 2006.
- [2] F. Karpat, S. Ekwaro-Osire, M. P. Khandaker, Probabilistic Analysis of MEMS Asymmetric Gear Tooth, *Journal of Mechanical Design*, Vol. 130, pp. 042306-042306, 2008.
- [3] Y.-C. Cheng, C.-L. Dai, C.-Y. Lee, P.-H. Chen, P.-Z. Chang, A MEMS micromirror fabricated using CMOS post-process, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 120, pp. 573-581, 2005.
- [4] A. A. S. Mohammed, W. A. Moussa, E. Lou, High-Performance Piezoresistive MEMS Strain Sensor with Low Thermal Sensitivity, *Sensors*, Vol. 11, pp. 1819-1846, 2011.
- [5] M. Rajavelu, D. Sivakumar, R. J. Daniel, K. Sumangala, Simulation of Perforated Diaphragms Employed Piezoresistive Pressure Sensor for Sensitivity Enhancement and Validation with Modified Analytical Model, *Procedia Engineering*, Vol. 38, pp. 3495-3508, 2012.
- [6] K. N. Bhat, M. M. Nayak, MEMS Pressure Sensors- An Overview of Challenges in TechNology and Packaging, *Journal of Smart structures and systems*, Vol. 2, pp. 1-10, 2013.
- [7] C. S. Smith, Piezoresistance effect in germanium and silicon, *Physics Review*, Vol. 94, pp. 42-49, 1954.
- [8] H. E. Elgamel, Closed-form expressions for the relationships between stress, diaphragm deflection, and resistance change with pressure in silicon piezoresistive pressure sensors, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 50, pp. 17-22, 1995.
- [9] S. D. Senturia, *Microsystem design*. London: Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [10] S. K. Clark, K. D. Wise, "Pressure sensivity in anisotropically etched thin-diaphragm pressure sensors," *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. ED-26, pp. 1887-1896, 1979.
- [11] Wen Hsiung Ko, Jarolav Hynečí, S. F. Boettcher, Development of a Miniature Pressure Transducer for Biomedical Applications, *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. ED-26, 1979.
- [12] K.-W. Lee, K. D. Wis, SENSIM: a simulation program for solid state pressure sensors, *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. ED-29, pp. 34-41, 1982.
- [13] M. M. Z. Djuric, J. Matovic, R. Petrovic, Simicic, Experimental determination of silicon pressure sensor diaphragm deflection, *Sensors and Actuators A*, Vol. 24, pp. 175-179, 1990.
- [14] V. Musser, J. Suski, J. Goss, Piezoresistive pressure sensors based on polycrystalline silicon, *Sensors and Actuators A*, Vol. 28, pp. 113-132, 1991.
- [15] Y. Kanda, A. Yasukawa, Optimum design considerations for silicon piezoresistive pressure sensors, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 62, pp. 539-542, 1997.
- [16] W. P. Eaton, J. H. Smith, Micromachined pressure sensors: review and recent developments, in *Proc. SPIE 3046, Smart Structures and Materials*, vol. 6, pp. 30-41, 1997.
- [17] L. Lin, H.-C. Chu, Y.-W. Lu, "A Simulation Program for the Sensitivity and Linearity of Piezoresistive Pressure Sensors," *Journal of microelectromechanical systems*, Vol. 8, pp. 514-522, 1999.
- [18] T. Toriyama, S. Sugiyama, Analysis of Piezoresistance in p-Type Silicon for Mechanical Sensors, *Journal of microelectromechanical systems*, Vol. 11, No. 5, pp. 598-604, 2002.
- [19] M. Rajavelu, D. Sivakumar, R. Joseph Daniel, K. Sumangala, Perforated diaphragms employed piezoresistive MEMS pressure sensor for sensitivity enhancement in gas flow measurement, *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 35, pp. 63-75, 2014.
- [20] R. Otmani, N. Benmoussa, B. Benyoucef, The Thermal Drift Characteristics of Piezoresistive Pressure Sensor, *Physics Procedia*, Vol. 21, pp. 47-52, 2011.
- [21] J. Jordana, R. Pallás-Areny, A simple, efficient interface circuit for piezoresistive pressure sensors, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 127, pp. 69-73, 2006.

همانطور که مشاهده می‌شود درصد خطای تولید شده در مسیر افزایش فشار و در مسیر برگشت آن حداقل ۰/۵ درصد می‌باشد و همچنین حداقل فشار خوانده شده از پکیج فشارسنج میکروالکترومکانیکی ۶ بار می‌باشد. در صنایع پتروشیمی، مخازن ذخیره و تحت فشار مختلفی از انواع گازهای گوناگون مانند متانول وجود دارد که تحت فشار حداقل ۶ بار می‌باشند. برای مثال در شرکت پتروشیمی فن‌آورن مخازن ذخیره و تحت فشار مشخصی وجود دارد که فشار بخار بالای سیال در آن‌ها به منظور ملاحظات اینمی می‌باشد به دقت مورد اندازه‌گیری قرار گیرد. از این‌رو، با توجه به الزامات موجود حداقل خطای خواندن فشار در این مخازن نباید از ۱ درصد فراتر رود. همچنین بخاطر تغییرات دمایی بالایی که در سایتهای این صنایع وجود دارد، حسگرهای فشار بخار رفته در این مخازن نباید به این تغییرات حساسیت داشته باشند. با توجه به این توضیحات و نتایج به دست آمده از تست پکیج فشارسنج طراحی شده وابستگی پایین حسگرهای میکروالکترومکانیکی پیزومقاومتی می‌توان از این دستگاه به عنوان فشارسنج ثابت یا پرتابل در اندازه‌گیری فشار گاز مخازن ذخیره و مخازن تحت فشار و یا دستگاه عیوب یاب در صنعت پتروشیمی فن‌آورن استفاده کرد. شایان ذکر است که هزینه ساخت این دستگاه در مقایسه با فشارسنج‌هایی با این دقت بسیار کمتر می‌باشد. از این‌رو از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر می‌باشد.

## 5- نتیجه‌گیری

از آن‌جا که اندازه‌گیری فشار سیالات در صنعت پتروشیمی از اهمیت بالایی برخودار است بدین منظور در این مقاله به بررسی تحلیلی و تجربی یک پکیج فشارسنج میکروالکترومکانیکی پرداخته شده است. این پکیج فشارسنج از یک حسگر میکروالکترومکانیکی، برد مدار چایی، نمایشگر خازنی تشکیل شده است. چگونگی مدل‌سازی حسگر فشار میکروالکترومکانیکی پیزومقاومتی به صورت ریاضی و شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار کامسول در این مقاله تشریح شد. نتایج به دست آمده از تحلیل‌های انجام شده با نرم‌افزار کامسول و مدل‌سازی ریاضی نشان می‌دهد که با تغییر ابعاد عنصر مقاومتی و ابعاد دیافراگم می‌توان به یک حسگر با حساسیت مناسب دست یافت. همچنین نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که درصد خطای پکیج فشارسنج میکروالکترومکانیکی پیزومقاومتی طراحی شده حدوداً ۰/۵ درصد می‌باشد. که با توجه به دقت دستگاه، حساسیت کم آن به تغییرات دمایی و پارامترهای اقتصادی و کاربردی (اندازه کوچک آن) می‌توان از آن در صنایع پتروشیمی استفاده نمود. شایان ذکر است که فشارسنج رایج در صنعت پتروشیمی که بتواند در محدوده فشاری مذکور کار کند دارای ابعاد و وزن بسیار بیشتر نسبت به فشارسنج طراحی شده، می‌باشد. از این پکیج می‌توان با توجه به الزامات طراحی در صنعت پتروشیمی در اندازه‌گیری فشار گاز مخازن ذخیره و مخازن تحت فشار پتروشیمی فن‌آوران استفاده نمود.