



طراحی و شبیه سازی شتاب‌سنج حرارتی MEMS با حساسیت بهینه شده و قابلیت اندازه گیری شتاب در دو محور

شبنم قادری^۱، محمد طهماسبی پور^{۲*}، ابراهیم عباسپور ثانی^۳ و مهرزاد مدرس^۴

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی برق، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه ارومیه، ارومیه

^۲ استادیار، مهندسی سیستم‌های میکرو و نانو الکترومکانیک، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران

^۳ دانشیار، مهندسی برق، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه ارومیه، ارومیه

^۴ دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی سیستم‌های میکرو و نانو الکترومکانیک، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۰/۰۴، تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۰۱/۰۹، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۵/۲۹

چکیده

در این مقاله، یک میکرو حسگر شتاب با طراحی ساده، هزینه ساخت پائین، حجم و وزن کم و همچنین حساس به شتاب‌های بسیار کوچک با قابلیت اندازه‌گیری شتاب در دو محور طراحی شده است. در طرح پیشنهادی از روش حرارتی - همرفتی برای اندازه‌گیری شتاب استفاده شده است. این میکرو حسگر شامل، یک المان گرم‌کننده (هیتر)، دو جفت حسگر دما (دیتکتور) و یک محیط بسته حاوی یک سیال است. با اعمال شتاب در راستای محور X یا Y، دمای دیتکتورها متناسب با شتاب اعمالی تغییر می‌کند. پارامترهای هندسی و نوع سیال مورد استفاده در شتاب‌سنج مذکور، تاثیر بالایی بر حساسیت آن دارند. در این پژوهش، تاثیر سطوح مختلف پارامترهای هندسی و نوع سیال بر حساسیت سنسور، مورد مطالعه قرار گرفت. سطح بهینه متغیرهای مذکور برای دستیابی به حساسیت ماکزیمم با تحلیل ضرایب سیگنال به نویز (S/N) تعیین شد. با تنظیم متغیرهای مورد مطالعه روی سطوح بهینه، حساسیت سنسور نسبت به میانگین نتایج شبیه سازی‌های انجام شده ۱۲٫۷۷ برابر شد. با انتخاب بهترین مقادیر برای پارامترهای هندسی، حساسیت ۰٫۲۳ °C/g در محیط هوا و ۰٫۷۰ °C/g در محیط گاز دی‌اکسیدکربن به دست آمد.

کلمات کلیدی: شتاب‌سنج حرارتی؛ سیستم‌های میکروالکترومکانیک (MEMS)؛ روش المان محدود (FEM)؛ طراحی آزمون تاگوچی.

Design and Simulation of a Two-Axis Thermal MEMS Accelerometer with Optimized Sensitivity

S. Ghaderi¹, M. Tahmasebipour^{2*}, E. Abbaspour Sani³, M. Modarres⁴

¹ M.S. Student, Elect. Eng., Faculty of Elect. Eng., Urmia University, Urmia, Iran.

² Assist. Prof., MEMS/NEMS Eng., Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran.

³ Assoc. Prof., Elect. Eng., Faculty of Elect. Eng., Urmia University, Urmia, Iran.

⁴ M.S. Student, MEMS/NEMS Eng., Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran.

Abstract

In this paper a micro-accelerometer with a simple design, low fabrication cost, low volume and weight as well as sensitive to very small accelerations with acceleration measurement capability in two axes has been designed. In the proposed design, thermal-convection method has been used to measure the acceleration. This microsensors includes of a heater, two pairs of detectors, and a closed environment containing a fluid. By applying acceleration along the X or Y axis, a temperature change occurs in the detectors that is proportional to the acceleration applied to the system. The geometric parameters and the type of fluid used in the accelerometer have a high impact on its sensitivity. So the effects of different levels of geometric parameters and the type of fluid have been studied and optimized for achieving the maximum sensitivity by analyzing the signal to noise ratio in the Taguchi experimental design method. The sensitivity was improved 12.77 times compared to the average value of the simulations results, by adjusting the geometric parameters on the optimal levels. As a result, the sensitivity of 0.23 [°C/g] for air-filled package and 0.70 [°C/g] for CO₂-filled package was obtained in this research.

Keywords: Thermal Accelerometer; Micro-Electro-Mechanical Systems; Finite Element Method (FEM); Taguchi Experimental Design Method.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر استفاده از حسگرها در ابعاد میکرونی به دلیل مقرون به صرفه بودن و امکان تولید انبوه آنها، بصورت چشم‌گیری گسترش یافته است. در بین سیستم‌های میکروالکترومکانیکی، میکرو حسگرهای شتاب بعد از فشارسنج‌ها، بیشترین حجم تولید و تحقیقات را به خود اختصاص داده‌اند.

شتاب‌سنج میکروالکترومکانیکی (MEMS)، وسیله‌ای است که می‌تواند شتاب اعمال شده به سیستم را با مکانیزم‌های تبدیل مختلفی اندازه‌گیری کند. انواع گوناگون مکانیزم‌ها، باعث به وجود آمدن انواع مختلفی از شتاب‌سنج‌های MEMS از جمله شتاب‌سنج‌های خازنی، پیزورزیستو، پیزوالکتریک، تونلی، حرارتی و ... شده است. شتاب‌سنج‌ها دارای مدل‌های یک محوری و چند محوری می‌باشند که می‌توانند اندازه و جهت شتاب را به عنوان یک کمیت برداری اندازه‌گیری کند. یکی از انواع شتاب‌سنج‌های میکروالکترومکانیکی، شتاب‌سنج‌های حرارتی می‌باشند. ویژگی بارز این شتاب‌سنج‌ها، عدم وجود جرم متحرک در آنهاست. اساس کار این نوع شتاب‌سنج‌ها، استفاده از یک منبع حرارتی برای تشکیل حباب (حباب هوای گرم) در اطراف هیتر و همرفت آزاد حباب گرم داخل محفظه سنسور است. در اثر اعمال شتاب به این سیستم، تعادل حرارتی حباب به هم می‌ریزد و این عدم تعادل بوسیله دو حسگر دمایی متقارن اندازه‌گیری می‌شود.

شتاب‌سنج‌های حرارتی در مقایسه با شتاب‌سنج‌های دارای جرم متحرک، دارای ساختار و پروسه ساخت ساده‌تر، ارزان‌تر، وزن کمتر و استحکام بالاتری می‌باشند؛ زیرا وجود جرم متحرک و پل‌های نازک نگهدارنده آن در شتاب‌سنج‌های دیگر، امکان شکسته شدن سنسور در شوک‌های بالا را افزایش می‌دهد. همچنین بسته‌بندی این نوع سنسورها ساده‌تر بوده و اثر لایه نازک هوا در آن وجود ندارد. حساسیت شتاب‌سنج‌های حرارتی نسبت به شتاب‌های بسیار کوچک در مقایسه با انواع دیگر شتاب‌سنج‌ها، بسیار بالاتر است.

در زمینه مدل‌سازی رفتار شتاب‌سنج حرارتی MEMS، تاکنون تحقیقاتی صورت گرفته است که مهم‌ترین آنها در ادامه ذکر می‌شوند.

ایده ساخت شتاب‌سنج نوع حرارتی، نخستین بار توسط دائو در سال ۱۹۹۱ مطرح گردید و بعدها توسط محققان دیگر ادامه یافت [۱]. در سال ۱۹۹۷ یک شتاب‌سنج سیلیکونی فاقد جرم متحرک با تکنولوژی میکروماشین‌کاری حجمی، توسط لانگ و همکارانش ساخته شد [۲].

در سال ۲۰۰۰، دو نوع شتاب‌سنج همرفتی ترموپیلی و ترموکوپلی با تکنیک Standard IC ساخته شد. این شتاب‌سنج‌ها، دارای مزیت‌های مهمی از جمله، هزینه پایین، سایز بسیار کوچک، قابلیت مجتمع‌سازی و پاسخ فرکانسی خوب می‌باشند [۳].

در سال ۲۰۰۲، تاثیر فاصله هیتر و دیتکتور در یک شتاب‌سنج حرارتی تک محوره با قابلیت اندازه‌گیری شتاب در رنج ۰ تا ۱۰g بر خروجی‌های شتاب‌سنج از جمله حساسیت و پاسخ فرکانسی، توسط لائو و همکارانش به صورت دوبعدی مدل‌سازی شد؛ همچنین اثر محیط‌های گازی مختلف بر حساسیت این سنسور نیز، مورد بررسی واقع گردید [۴ و ۵].

در سال ۲۰۰۳ یک شتاب‌سنج حرارتی با سه جفت دیتکتور توسط مایلی و همکارانش، معرفی و ساخته شد. دیتکتورها در فاصله‌های ۱۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ میکرومتر از هیتر مرکزی قرار داشته و تاثیر فاصله هیتر و دیتکتور بر حساسیت سیستم در فشارهای مختلف، مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. روش تحلیل مایلی در شبیه‌سازی‌های این شتاب‌سنج، روش عددی بود که در نهایت با نتایج اندازه‌گیری تجربی شتاب‌سنج مقایسه گردید [۶].

لیائو و همکارانش در سال ۲۰۰۵ طرح جدیدی از شتاب‌سنج حرارتی تک محور را معرفی کردند. در طرح پیشنهادی لیائو، بر خلاف شتاب‌سنج‌های معمول که دارای محیط گازی می‌باشند، از آب دیونیزه (آب تمیز) استفاده شده است. در این طرح، طبق نتایجی که به دست آوردند، شتاب‌سنج پیشنهادی دارای حساسیت بالاتر و پاسخ سریع‌تری بود [۷ و ۸].

در سال‌های ۲۰۰۵، ۲۰۰۷ و ۲۰۱۱ نیز، تاثیر ابعاد هندسی شتاب‌سنج حرارتی از جمله فاصله هیتر و دیتکتورها، ابعاد هیتر، ابعاد محفظه و عمق گودال بر حساسیت شتاب‌سنج حرارتی با ساختارهای متفاوت، به ترتیب توسط مایلی، گوستوریدز و مزقانی با استفاده از روش المان محدود بصورت ۲ و ۳ بعدی، مورد بررسی قرار گرفت [۹-۱۱].

۲- اصول و مبانی

شتاب‌سنج‌ها معمولاً دارای یک جرم متحرک می‌باشند. جرم متحرک، معمولاً ساختار مکانیکی است که توسط آن حرکت و گرانش را می‌توان شناسایی کرد. برخلاف شتاب‌سنج‌های مرسوم، در شتاب‌سنج‌های حرارتی، جرم متحرک مکانیکی وجود ندارد. شتاب‌سنج‌های حرارتی از حباب هوای گرم به جای جرم معلق استفاده می‌کنند. این امر، امکان ساخت حسگر بدون نیاز به قسمت متحرک را فراهم می‌سازد که باعث می‌شود، مقاومت مکانیکی حسگر و توانایی آن در تحمل شوک‌های بالا و ضربه‌های ناگهانی افزایش یابد. در واقع در این نوع میکرو حسگرها، مولکول‌های سیال (گاز یا مایع) نقش جرم متحرک را ایفا می‌کنند. این نوع حسگرها شامل، یک هیتر مرکزی جهت ایجاد گرادیان دمایی در گاز محبوس در محفظه و چند حسگر دما، جهت اندازه‌گیری گرادیان دمایی می‌باشند. نحوه عملکرد بدین‌گونه است که در اثر عبور جریان الکتریکی، دمای هیتر افزایش پیدا می‌کند. وقتی هیتر روشن می‌شود، گاز اطراف آن گرم شده و حبابی از هوای گرم در اطراف آن ایجاد می‌شود. با اعمال شتاب، مولکول‌های گرم‌شده گاز با غلظت کم در جهت شتاب و مولکول‌های سرد و متراکم‌تر در خلاف جهت شتاب اعمالی حرکت خواهند کرد [۷]؛ لذا حباب گرمایی ایجاد شده حرکت نموده و باعث ایجاد اختلاف دما بین سنسورهای دمای اطراف هیتر می‌شود. شکل ۱ پروفایل دمایی شتاب‌سنج حرارتی را در حالات وجود و عدم وجود شتاب اعمالی خارجی نشان می‌دهد. در حالتی که شتاب خارجی وجود ندارد، پروفایل دمایی شکل متقارنی دارد که با خط پرننگ نمایش داده شده است. با اعمال شتاب به حسگر، یک اختلاف دما بین دو حسگر دما ایجاد می‌شود و پروفایل دمایی منتقل می‌شود که در شکل ۱ با خط چین مشخص شده است. در نهایت با استفاده از ترموکوپل یا ترمورزیستور، اختلاف دمای سنسورهای دما به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌شود. با اندازه‌گیری مقدار اختلاف دما و علامت آن، مقدار و جهت شتاب اعمالی مشخص می‌شود.

معادلات اساسی حاکم بر دینامیک سیالات شامل، معادله پیوستگی، معادلات بقای مومنوم (ناویر-استوکس) و معادله انرژی است. در این معادلات، از آنجایی‌که در شتاب‌سنج حرارتی پیشنهادی، محفظه ایزوله و مقدار حجم کنترل شده

در سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۰۸، تاثیر سایز گودال و تغییرات دمای محیط بر عملکرد شتاب‌سنج حرارتی با روش حل عددی به ترتیب توسط دائو و کورتیود بررسی شد [۱۳ و ۱۴].

در سال ۲۰۱۵، جیم-مینگ و همکارانش یک سنسور شتاب‌سنج حرارتی را پیشنهاد کردند که هیترها و حسگرهای دمای آن روی یک زیرلایه انعطاف‌پذیری قرار داشت و روی آن لایه نازکی از نیتريد آلومینیوم به ضخامت ۱ میلی‌متر پوشش داده شده بود. آنها در مدل پیشنهادی خود، از گاز زنون به عنوان سیال جهت انتقال حرارت استفاده کردند و از این طریق حساسیت سنسور را تا $0.227 \text{ } ^\circ\text{C/g}$ افزایش دادند [۱۴].

در سال ۲۰۱۷، راهول و همکارانش یک حسگر شتاب‌سنج حرارتی دو محوره با حساسیت بالا را ارائه کردند که شامل، یک میکروهیتر در مرکز بود و دیکتورهایی به صورت متقارن نسبت به میکروهیتر قرار گرفته بودند. آنها از سیلیکون‌های هرمی شکل که در دو سمت میکروهیتر قرار داده بودند، به منظور افزایش حساسیت میکروسنسور استفاده کردند [۱۵].

در سال ۲۰۱۷، طهماسبی‌پور و وفايي یک میکرو شتاب‌سنج سه محوره با حساسیت 0.54 mV/g و با پهنای باند 10 kHz را پیشنهاد کردند [۱۶].

در تحقیق حاضر، پس از مطالعه و بررسی طرح‌های مختلف، طرح جدیدی ارائه گردید که قابلیت اندازه‌گیری جهت و مقدار شتاب در دو جهت X و Y را دارا است. به همین منظور، در این شتاب‌سنج از چهار حسگر دما (دیتکتور) در دو جهت متفاوت در اطراف هیتر مرکزی استفاده شده است. هر کدام از جفت دیتکتورهای روبروی هم، میزان اختلاف دمای ناشی از اعمال شتاب در یک محور را اندازه‌گیری می‌کنند. این اختلاف دما، متناسب با شتاب اعمالی به سیستم است. با استفاده از روش المان محدود، مدل دوبعدی شتاب‌سنج پیشنهادی مورد مطالعه قرار گرفت. با بهره‌گیری از روش طراحی آزمون تاگوچی، ابعاد و شرایط دمایی بهینه برای افزایش حساسیت، با تحلیل ضرایب سیگنال به نویز (S/N) به دست آمد و ترتیب اهمیت تاثیر متغیرها بر حساسیت سنسور، با آنالیز واریانس ضرایب سیگنال به نویز تعیین گردید.

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u V) = \rho f_x \quad (۶)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v V) = \rho f_y \quad (۷)$$

سومین اصل فیزیکی، یعنی اصل بقای انرژی که در رابطه (۸) برای شتابسنج حرارتی پیشنهادی به صورت رابطه (۹) ساده می‌شود. در رابطه (۹)، انرژی e و ضریب رسانش انتقال حرارت است [۲۰-۱۸].

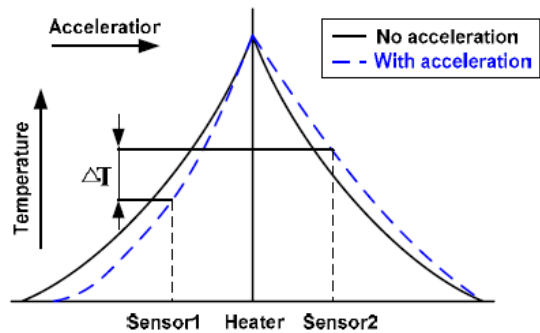
$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho e V) = \rho q + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) - p \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \\ + \lambda \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \mu \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \right. \\ \left. + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (۸)$$

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho e V) = \rho q \quad (۹)$$

حل معادلات مذکور به سادگی انجام پذیر نیست. در تحقیق حاضر، از آنجایی که هندسه مطرح شده، هندسه‌ای دوبعدی و پیچیده است، حل عددی برای معادلات بالا مورد نیاز است. روش اجزاء محدود، از مهم‌ترین روش‌های ساده-ساز است که برای شبیه‌سازی رفتار حسگر و بهینه‌سازی هندسی طرح از نرم افزار تجاری COMSOL استفاده شده است.

۳- مدل سازی

در شتابسنج پیشنهادی چهار حسگر دما (دیتکتور) بصورت متقارن در چهار طرف المان هیتر قرار دارند که به صورت یک صفحه مربعی با فرم واشری است. دو دیتکتور روبروی هم که در راستای محور X قرار دارند، برای آشکارسازی شتاب در جهت X و دو دیتکتور دیگر، جهت آشکارسازی شتاب در جهت Y استفاده شده‌اند. واشری بودن ساختار هیتر باعث می‌شود، جریان مصرفی جهت گرم کردن هیتر بیشتر در گوشه‌های آن جریان یابد و از مصرف بی‌بهره توان الکتریکی جلوگیری شود که باعث گرم نمودن کل صفحه هیتر می‌شود. هیتر به واسطه چهار پل از جنس نیتريد سيليكون به بدنه سيليكونی متصل است. همان‌گونه که در شکل ۲ مشخص است، حسگر دارای یک گودال است که هدف از ایجاد آن، ایزولاسیون حرارتی است [۵].



شکل ۱- اصول عملکرد حسگرهای شتابسنج حرارتی [۸]

است، گاز درون محفظه تراکم ناپذیر فرض شده است. بدلیل ابعاد و میدان جابجایی بسیار کوچک و سرعت بسیار پائین و در نتیجه عدد رینولدز پائین برای این گونه سیستم‌ها که با استفاده از رابطه (۱) قابل محاسبه است، جریان سیال آرام و گذرا در نظر گرفته شده است [۱۷].

$$Re = \frac{\rho v l}{\mu} \quad (۱)$$

در رابطه بالا، ρ چگالی، v سرعت متوسط سیال، l مشخصه طولی و μ لزجت دینامیکی سیال است.

از آنجایی که سیال تراکم ناپذیر است، معادله پیوستگی که در رابطه (۲) نشان داده شده است، به شکل رابطه (۳) ساده می‌شود [۲۰-۱۸].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \left[\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \right] = 0 \quad (۲)$$

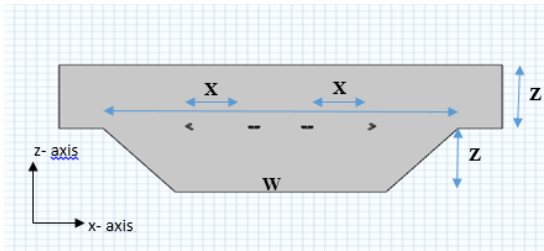
$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (۳)$$

در روابط بالا، ρ چگالی سیال، t زمان، u مولفه سرعت در جهت x و v مولفه سرعت در جهت y است.

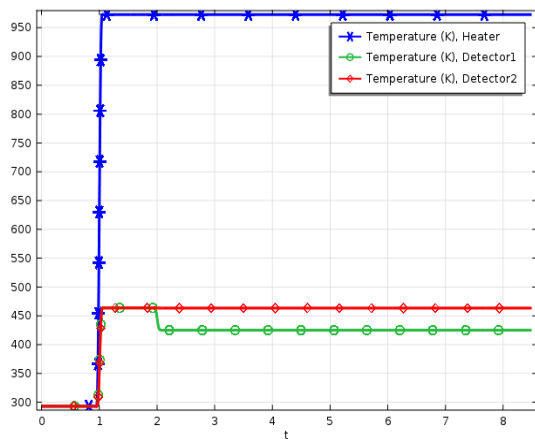
روابط (۴) و (۵) (معادلات ناویر-استوکس) برای شتاب-سنج پیشنهادی به صورت روابط (۶) و (۷) ساده می‌گردند که در آن μ ، ضریب ویسکوزیته مولکولی و λ ، ضریب ویسکوزیته دوم می‌باشند [۲۰-۱۸].

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u V) = \\ - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \zeta_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \zeta_{yx}}{\partial y} + \rho f_x \end{aligned} \quad (۴)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v V) = \\ - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \zeta_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \zeta_{xx}}{\partial y} + \rho f_y \end{aligned} \quad (۵)$$



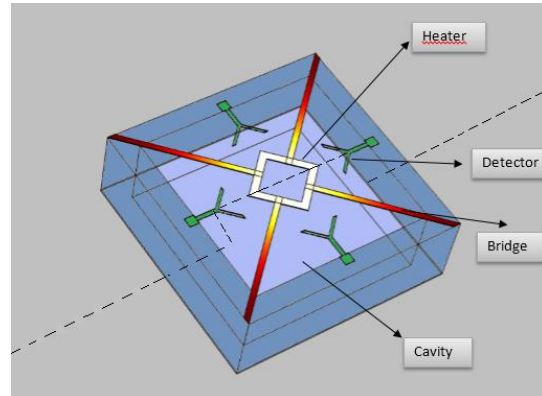
شکل ۳- نمای کلی مدل دو بعدی حسگر پیشنهادی



شکل ۴- نمودار پاسخ زمانی شتابسنج حرارتی پیشنهادی در شتاب ۲۰۰g

$$S = \frac{\Delta T}{a} \text{ [}^\circ\text{C/g]} \quad (10)$$

که در آن ΔT تفاوت دمایی بین دو سنسور دما و a شتاب اعمالی به سیستم است. همانطور که قبلا نیز بیان شد، ابعاد هندسی و شرایط دمایی این سیستم تاثیر بسزایی بر حساسیت خروجی آن دارد؛ لذا بررسی اثر هرکدام از این پارامترها جهت دستیابی به بهینه‌ترین ابعاد، بسیار حائز اهمیت است. تمامی پارامترهای احتمالی موثر بر حساسیت در این پژوهش، مورد مطالعه قرار گرفتند تا در نهایت شش پارامتر عرض W ، عمق گودال Z ، فاصله لبه هیتر از دیتکتور X ، فاصله بین دیواره‌های هیتر، دمای محیط و دمای هیتر به عنوان پارامترهای پروسه انتخاب شدند که در جدول ۱ آورده شده‌اند. بازه‌های مشخص شده برای هر پارامتر با در نظر گرفتن ابعاد فیزیکی سازه سنسور و محدودیت‌های ساخت انتخاب شده‌اند.



شکل ۲- ساختار شتابسنج میکروالکترومکانیکی حرارتی پیشنهادی با قابلیت اندازه‌گیری شتاب در دو محور

در این پروژه از نرم‌افزار المان محدود COMSOL 5.2 برای شبیه‌سازی و بهینه‌سازی شتابسنج حرارتی استفاده شده است. نمای کلی مدل ایجاد شده به صورت دو بعدی در شکل ۳ نمایش داده شده است. در این شکل، X فاصله بین لبه بیرونی هیتر و لبه دیتکتور، D طول فضای خالی بین صفحه هیتر با ساختار واشری، W عرض صفحه پایینی گودال و Z ارتفاع گودال‌های بالا و پایین است.

در این شبیه‌سازی، عملیات روشن شدن هیتر و اعمال شتاب به صورت گام‌های زمانی تعریف شده است. همان‌طور که از شکل ۴ مشخص است، در گام اول هیتر روشن می‌شود و هوای اطراف خود را گرم می‌نماید. این موضوع باعث می‌شود که دمای حسگرهای دما نیز رفته رفته افزایش یابد. در گام دوم شتاب به سیستم اعمال می‌شود و حباب در جهت شتاب اعمالی حرکت می‌کند؛ لذا دمای یکی از دیتکتورها کاهش و دمای دیگری افزایش می‌یابد تا در نهایت، سیستم به حالت تعادل می‌رسد و یک اختلاف دمایی ثابت بین دو دیتکتور برقرار می‌شود. این اختلاف دما، میزان حساسیت سیستم را تعیین می‌کند. هرچه مقدار این اختلاف دما بالاتر باشد، یعنی سیستم از حساسیت بالاتری برخوردار است.

حساسیت شتابسنج حرارتی براساس اختلاف دمایی سنسورهای دما، در یک شتاب مشخص به صورت رابطه ۱۰ تعریف می‌شود [۴، ۸ و ۱۳].

۴- نتایج و بحث

در این تحقیق، از آنجایی که ابعاد حسگر کوچک و سرعت گاز کم است، جریان گاز در شتابسنج از نوع جریان آرام است [۴]. همانگونه که در شکل (۵-الف) مشاهده می شود، هنگامی که شتابی به سیستم اعمال نشده است، حباب به صورت کاملاً متقارن در مرکز شتابسنج تشکیل شده است.

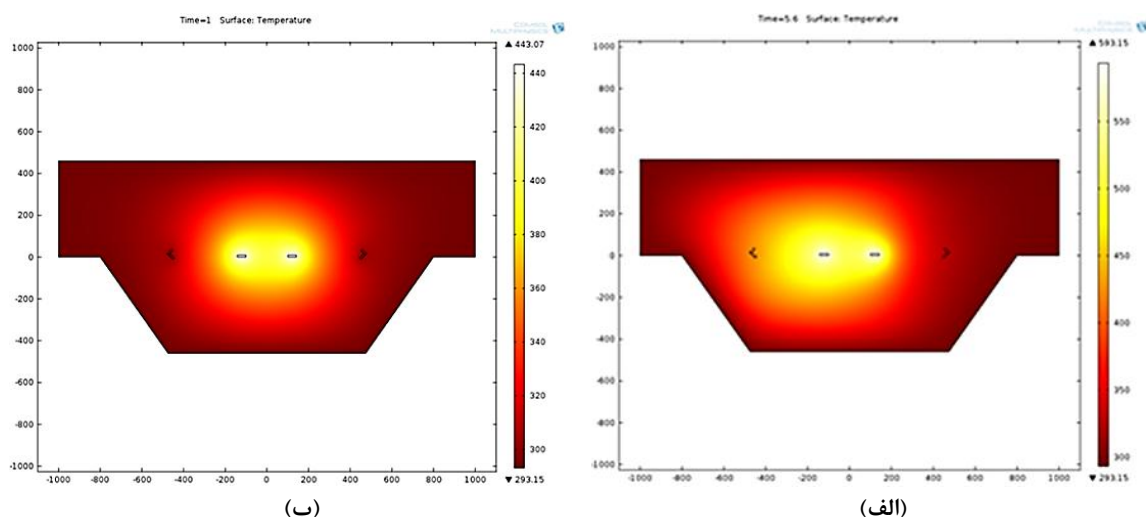
در شکل (۵-ب) مشاهده می شود که با اعمال شتاب g ۲۰۰ در جهت چپ، حباب هوا نیز به سمت چپ حرکت نموده و باعث شده است تا اختلاف دمایی بین سنسورهای دما به وجود بیاید. طبق این شبیه سازی مشاهده می شود،

حباب ایجاد شده در جهت شتاب اعمالی حرکت می کند و شکل حباب عوض می شود.

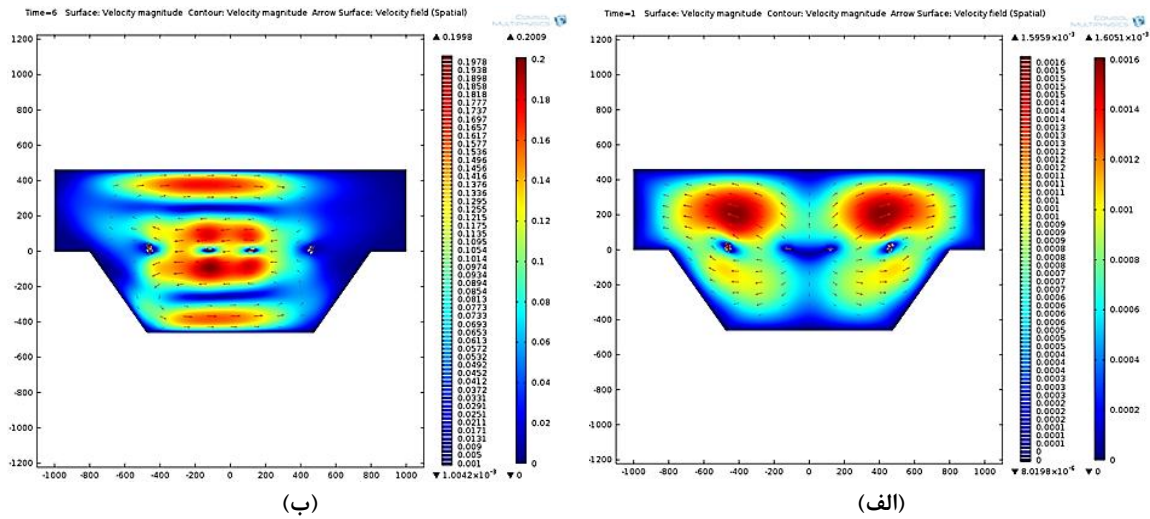
شکل ۶ فرم گرافیکی توزیع سرعت سیال را در شتاب-سنج حرارتی نمایش می دهد. همان طور که از شکل (۶-الف) مشاهده می شود، هنگامی که شتابی به سیستم اعمال نشده است، جهت همرفت گاز از سمت هیتر به سمت قسمت های کم دمای فضای محفظه است. این همرفت، در اثر اختلاف دما ایجاد شده و همرفت آزاد نام دارد. با اعمال شتاب g ۲۰۰ به سیستم در جهت چپ، گاز درون محفظه در اثر همرفت اجباری جابجا می شود. شکل (۶-ب) جهت همرفت گاز گرم را در اطراف هیتر و قسمت های با دمای پایین تر را به خوبی نمایش می دهد.

جدول ۱- فاکتورهای موثر بر حساسیت خروجی شتابسنج حرارتی

واحد	سطح					پارامتر
	۵	۴	۳	۲	۱	
میکرومتر	۴۶۰	۳۷۰	۲۸۰	۱۹۰	۱۰۰	عمق حفره (Z)
میکرومتر	۱۶۰۰	۱۵۰۰	۱۴۰۰	۱۳۰۰	۱۲۰۰	عرض حفره (W)
درجه کلونین	۳۳۳٫۱۵	۳۱۳٫۱۵	۲۹۳٫۱۵	۲۷۳٫۱۵	۲۵۳٫۱۵	دمای محیط
میکرومتر	۳۱۸	۳۱۰	۳۰۲	۲۹۴	۲۸۶	فاصله لبه هیتر از دینکتور (X)
میکرومتر	۱۸۰	۱۷۰	۱۶۰	۱۵۰	۱۴۰	فاصله بین دیواره های هیتر
درجه کلونین	۹۷۳	۸۳۵٫۵	۶۹۸	۵۶۰٫۵	۴۲۳	دمای هیتر



شکل ۵- جابجایی حباب هوای گرم شده در اثر شتاب g (الف) و g ۲۰۰ (ب)



شکل ۶- فرم گرافیکی توزیع سرعت سیال در اثر شتاب الف) g و ب) شتاب $200g$

کاهش چشمگیری ایجاد می‌نماید. روش‌های مرسوم شامل، تغییرات یک فاکتور در یک زمان می‌باشند؛ در حالیکه بقیه فاکتورهای موثر، ثابت نگاه داشته می‌شوند. برای مطالعه اثرات فردی همه فاکتورها، نیاز به صرف هزینه و زمان زیادی است. تکنیک تاگوچی، بر همه این معایب غلبه کرده است. مراحل روش تاگوچی به صورت زیر دنبال می‌شوند:

۱. تعریف توابع اصلی و پارامترهای پروسه جهت ارزیابی
۲. مشخص کردن تعداد سطوح برای پارامترهای فرآیند
۳. انتخاب آرایه متعامد مناسب و قرار دادن پارامترهای فرآیند در آرایه و تنظیم آزمایشات یا شبیه‌سازی‌ها بر اساس آن
۴. مطالعه نتایج توسط آنالیز نسبت سیگنال به نویز جهت مشخص کردن سطح بهینه پارامترهای فرآیند
۵. اثبات جهت سطوح بهینه پارامترهای فرآیند از طریق آزمایش یا شبیه‌سازی تصدیق [۲۱].

در این تحقیق، حساسیت به عنوان تابع اصلی فرآیند طراحی شتاب‌سنج حرارتی انتخاب شده است. بر اساس شبیه‌سازی‌های اولیه انجام شده، مهم‌ترین پارامترهای موثر بر حساسیت شتاب‌سنج حرارتی پیشنهادی، عمق گودال C_1 ، عرض گودال C_2 ، دمای محیط C_3 ، فاصله لبه هیتر از دیتکتور

با اعمال شتاب در جهت چپ، هوای سرد و متراکم درون محفظه به سمت راست حرکت کرده است. حباب گرم ایجاد شده در اطراف هیتر نیز، در راستای شتاب و به سمت چپ جابجا شده است.

۴-۱- بهینه‌سازی

ارزیابی متغیرهای بخش قبل باعث شد تا در نهایت شش فاکتور اصلی شامل، عمق گودال، عرض گودال، دمای محیط، فاصله لبه هیتر از دیتکتور، فاصله بین دیوارهای داخلی هیتر و دمای هیتر به عنوان متغیرهای موثر بر حساسیت حسگر، جهت بهینه‌سازی نهایی طرح انتخاب شوند. در این تحقیق، از روش تاگوچی برای یافتن بهترین ابعاد و شرایط، جهت افزایش حساسیت شتاب‌سنج حرارتی پیشنهادی استفاده شده است. این روش ابزاری قوی برای طراحی آزمایش است که راهی ساده، موثر و سیستماتیک برای مشخص کردن پارامترهای پروسه ایجاد می‌کند. در روش تاگوچی، نتایج آزمایشات به منظور رسیدن به اهداف زیر، مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند:

- تعیین شرایط بهینه
 - تعیین اثر مجزای هر فاکتور
 - برآورد عملکرد در شرایط بهینه
- روش تاگوچی در مقایسه با روش‌های مرسوم، در تعداد آزمایش‌ها یا شبیه‌سازی‌های لازم برای مدل کردن تابع پاسخ،

$$\frac{1}{5} [(-84.8066) + (-80.3095) + (-73.3917) + (-76.6242) + (-67.361)] = -76.4986 \quad (13)$$

شکل ۷ نمودار حاصل از مقادیر متوسط نسبت سیگنال به نویز را برای شش پارامتر فرآیند C_1 تا C_6 ، در سطوح مختلف تعریف شده نشان می‌دهد. همانگونه که از نمودارهای حاصل از آنالیز سیگنال به نویز پیداست، عمق گودال C_1 ، یکی از فاکتورهای بسیار موثر در افزایش حساسیت است. نمودار نشان می‌دهد که سطح ۵، یعنی عمق ۴۶۰ میکرومتر برای گودال، بهینه‌ترین حالت برای این فاکتور است. بررسی-های مربوط به عرض گودال C_2 ، نیز حاکی از آن است سطح ۵ که عرض ۱۶۰۰ میکرومتر را نشان می‌دهد، برای این فاکتور بهینه‌ترین مقدار را دارد؛ بنابراین افزایش عمق و عرض گودال، باعث افزایش حساسیت سیستم می‌شود. نمودار مربوط به دمای محیط C_3 ، نشان داد که در سطح ۱، یعنی دمای ۲۰- درجه سانتیگراد، مقدار متوسط نسبت سیگنال به نویز، ماکزیمم مقدار را دارد؛ یعنی هرچه دمای محیط بیرون حسگر پایین‌تر باشد، حساسیت سیستم بالاتر است. فاصله بهینه بین لبه هیتز تا لبه دیتکتور C_4 ، طبق نمودار حاصل، در سطح ۳ که برابر ۳۰۲ میکرومتر است، بهینه‌ترین حالت خود را دارا می‌باشد. در نهایت، برای فاکتور پنجم مورد بررسی، یعنی دمای هیتز C_6 ، سطح ۵ به عنوان دمای بهینه انتخاب شده است؛ یعنی هرچه دمای هیتز بالاتر باشد، حساسیت شتاب‌سنج حرارتی بالاتر است. ماکزیمم دمای مجاز برای هیتز پلی‌سیلیکونی ۷۰۰ درجه سانتیگراد است که در سطح ۵ به سیستم اعمال شده است.

۴-۱-۲- آزمایش تصدیق

آخرین مرحله در روش تاگوچی، پس از تعیین سطح بهینه پارامترهای فرآیند، اثبات بهبود کارایی سیستم با استفاده از سطح بهینه پارامترهای فرآیند است. نسبت سیگنال به نویز تخمینی (η_{opt})، با استفاده از سطح بهینه پارامترهای فرآیند به صورت رابطه ۱۴ بدست می‌آید [۲۲].

$$\eta_{opt} = \eta_m + \sum_{i=1}^p (\bar{\eta}_i - \eta_m) \quad (14)$$

C_4 ، فاصله بین دیواره‌های داخلی هیتز C_5 و دمای هیتز C_6 می‌باشند که سطوح مربوط به محدوده بررسی آن‌ها در جدول ۱ آورده شده است. همانگونه که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، شش پارامتر فرآیند مورد نظر در پنج سطح تعریف شده‌اند؛ لذا آرایه متعامد (5^6) L_{25} ، به صورت جدول ۲ (ضمایم) تشکیل و تعداد ۲۵ شبیه‌سازی انجام و نتایج آن ثبت گردیده است [۲۲]. لازم به ذکر است که در این شبیه‌سازی‌ها، گاز داخل محفظه هوا فرض شده است و شتاب اعمالی برابر ۲۰g است.

۴-۱-۱- تحلیل نتایج تاگوچی

بر اساس روش تاگوچی، سطح بهینه پارامترهای فرآیند، با استفاده از تحلیل نسبت سیگنال به نویز (S/N) مشخص می‌شود. در روش تاگوچی، چندین مرتبه کارایی از نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده از جمله "کمتر بهتر است" (LB)، "مقدار اسمی بهتر است" (NB) و "بالاتر بهتر است" (HB) وجود دارد. از آنجایی که حساسیت شتاب‌سنج باید حداکثر امکان بالا باشد، HB به عنوان کارایی بهینه فرآیند انتخاب گردید. نسبت S/N با استفاده از روش تبدیل لگاریتمی تابع Loss تعریف می‌شود. برای حالت HB، این نسبت به صورت رابطه ۱۱ بیان می‌شود [۲۲].

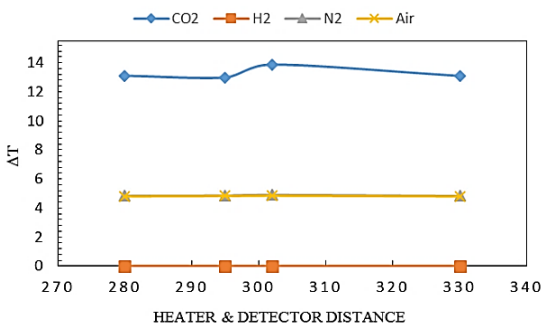
$$\eta = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (11)$$

که در آن، y_i پاسخ i ام آزمایش و n تعداد تکرار هر آزمایش است. صرفنظر از مرتبه کارایی انتخاب شده، هرچه نسبت S/N به دست آمده مقدار بزرگتری داشته باشد، بهتر است. مقادیر نسبت S/N، برای آرایه متعامد L_{25} در ستون آخر جدول ۲ آورده شده است. به عنوان مثال، مقدار S/N برای شبیه‌سازی شماره یک، به صورت رابطه ۱۲ بدست می‌آید:

$$\eta = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{(0.00058)^2} \right) = -84.8066 \text{ dB} \quad (12)$$

مقدار متوسط نسبت S/N برای هر یک از پارامترهای فرآیند، در یک سطح، با استفاده از مقادیر ستون آخر جدول ۲ به دست می‌آید. برای مثال، برای پارامتر C_1 ، مقدار متوسط نسبت S/N به صورت رابطه ۱۳ حاصل می‌شود.

سیستم مشخص شود. نتایج حاصل در شکل ۸ نمایش داده شده‌اند. مشاهده می‌شود که نیتروژن و هوا، تاثیر تقریباً یکسانی بر حساسیت خروجی میکرو حسگر دارند. گاز هیدروژن، حساسیت حسگر را بسیار کوچک و نزدیک به صفر می‌کند. علت این امر، جرم کم مولکول‌های هیدروژن است که مانع از همرفت و تشکیل حباب گرم می‌شود. در صورت استفاده از گاز دی‌اکسید کربن به جای هوا، حساسیت خروجی حدود ۳/۵ برابر افزایش می‌یابد. با انجام شبیه‌سازی‌های مربوط به محیط گازی دی‌اکسید کربن، تفاوت دمایی برابر با ۱۴°C در شتاب ۲۰ g در حسگرهای دما ایجاد شد؛ در نتیجه حساسیت حدود سه برابری، یعنی [°C/g] ۰/۷۰ حاصل گشت.



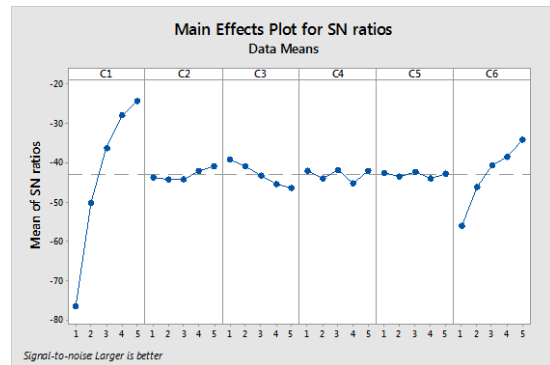
شکل ۸- تاثیر گازهای مختلف بر حساسیت سنسور

۴-۲- اعتبار سنجی

جدول ۹، خلاصه‌ای از دستاوردهای طرح پیشنهادی را با کارهای پیشین مقایسه می‌کند. همانطور که در جدول ۹ مشاهده می‌شود، بیشترین حساسیت میکرو شتاب‌سنج حرارتی برای محیط گازی هوا در بین مراجع داده شده در جدول ۹، توسط مرجع ۱۳ گزارش شده است که تقریباً نصف حساسیت گزارش شده برای شتاب‌سنج ارائه شده در این مقاله است؛ همچنین مقدار حساسیت شتاب‌سنج ارائه شده در این مقاله برای محیطی با گاز دی‌اکسید کربن نزدیک به ۴ برابر بیشتر از حساسیت ارائه شده توسط رفرنس ۱۴ در محیط گازی مشابه است.

۵- نتیجه گیری

حساسیت از مهم‌ترین مشخصات شتاب‌سنج‌ها است که مقدار آن بستگی زیادی به طراحی و انتخاب ابعاد هندسی مناسب



شکل ۷- نمودار سیگنال به نویز پنج پارامتر فرآیند تعریف شده برای تابع حساسیت

که در آن، مقدار میانگین کل نسبت سیگنال به نویز شبیه‌سازی‌های انجام شده، p تعداد پارامترهای فرآیند و $\bar{\eta}_1$ مقدار میانگین نسبت سیگنال به نویز سطح بهینه هر پارامتر است. جدول ۳ نتایج حاصل از مرحله تصدیق را نمایش می‌دهد. طبق این نتایج، سازگاری خوبی بین مقادیر پیش‌بینی شده برای نسبت سیگنال به نویز و مقادیر واقعی وجود دارد. نسبت سیگنال به نویز به اندازه ۲۳/۳۸ dB و مقدار حساسیت سنسور نیز نسبت به مقدار میانگین حساسیت‌های به دست آمده، ۱۲/۷۷ برابر شد و حساسیت [°C/g] ۰/۲۳ حاصل شد. این نتایج، کارآمد بودن روش تاگوچی برای بهینه‌سازی حساسیت سیستم را کاملاً اثبات می‌کند.

جدول ۳- نتایج آزمایش تصدیق

پارامتر	شرایط بهینه شده	
	نتایج پیش‌بینی	نتایج آزمایش
سطوح مختلف	۵،۵،۱،۳،۳،۵	۵،۵،۱،۳،۳،۵
نسبت سیگنال به نویز (dB)	-۱۰،۵۸	-۱۲،۷۶۵

۴-۲- تاثیر محیط‌های گازی مختلف بر حساسیت حسگر

تمامی شبیه‌سازی‌های انجام شده در مراحل قبل در شرایطی انجام شد که داخل محفظه حسگر، هوا بود. در این مرحله، حسگر بهینه‌سازی شده با استفاده از گازهای مختلف، مورد شبیه‌سازی قرار گرفت تا تاثیر گازهای مختلف بر حساسیت

جدول ۹- مقایسه کار انجام شده در این مقاله با کارهای

دیگران		
سال چاپ	محدوده شتاب	حساسیت
۲۰۰۸ [۱۳]	۴۰g	۰/۱۲ °C/g
۲۰۱۱ [۲۳]	۱۵۰g	۰/۰۲۴ c/g
۲۰۱۳ [۲۴]	±۱۰g	۰/۰۲ c/g
۲۰۱۵ [۱۴]	-	۰/۱۸۲ c/g (CO ₂) ۰/۲۲۷ c/g (Xenon)
مقاله حاضر	±۱۰g	۰/۲۳ c/g (Air) ۰/۷۰ c/g (CO ₂)

فاصله هیتر از سنسورهای دمای اطرافش است. طبق شبیه سازی های انجام شده، در فواصل پایین و فواصل بالا، مقدار حساسیت کاهش پیدا می کند؛ لذا جهت دستیابی به بهترین حالت، با انجام شبیه سازی های متعدد بهینه ترین فاصله برابر ۳۰۲ میکرومتر شناسایی شد. طبق تحلیل های صورت گرفته، هنگامی که طول فضای خالی وسط هیتر برابر ۱۶۰ میکرومتر است، حساسیت، ماکزیمم مقدار خود را دارد. با توجه به نتایج به دست آمده، افزایش دمای محیط باعث کاهش حساسیت و افزایش دمای هیتر باعث افزایش آن شده است. لذا دمای ۷۰۰ درجه سانتی گراد که ماکزیمم دمای مجاز هیتر پلی سیلیکونی است، به عنوان دمای بهینه هیتر انتخاب گردیده است. در دمای محیط ۲۰- درجه سانتی گراد نیز، شتابسنج بهترین عملکرد را از نظر حساسیت، از خود نشان داده است. در انتها، حساسیت شتابسنج پیشنهادی با ابعاد بهینه، در محیط های گازی مختلف از جمله هوا، نیتروژن، هیدروژن و دی اکسید کربن، مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به نتایج حاصل، دی اکسید کربن به عنوان بهترین محیط برای افزایش حساسیت سیستم انتخاب شده است. در نهایت، با استفاده از ابعاد و شرایط بهینه در شبیه سازی نهایی، حساسیت [C/g] ۰/۲۳ در محفظه حاوی هوا، [C/g] ۰/۷ در محفظه حاوی گاز دی اکسید کربن به دست آمد.

دارد. در این مقاله به مدل سازی شتابسنج حرارتی دو محوره و بررسی تاثیر اندازه ابعاد هندسی ساختار آن و همچنین شرایط محیطی بر حساسیت شتابسنج پرداخته شده است. بر اساس شبیه سازی رفتار شتابسنج مذکور به روش المان محدود و تحلیل نتایج بر اساس روش تاگوچی، این نتیجه حاصل شد که افزایش عرض و عمق گودال، باعث افزایش حساسیت شده است. بطوریکه در عرض ۱۶۰۰ میکرومتر و ارتفاع گودال های بالا و پایین ۴۶۰ میکرومتر، شتابسنج بیشترین اختلاف دما و در نتیجه بیشترین حساسیت را داشته است. یکی دیگر از راه های افزایش حساسیت، تنظیم

۶- ضمائم

جدول ۲- نتایج حاصل از شبیه سازی به روش تاگوچی

شماره	عمق حفره	عرض حفره	دمای محیط	فاصله بین دیواره های هیتر	فاصله بین دپتکتور و هیتر	دمای هیتر	T ₁ [K]	T ₂ [K]	ΔT [K]	S [K/g]	S/N
۱	۱۰۰	۱۲۰۰	۲۵۳/۱۵	۱۴۰	۲۸۶	۴۲۳	۲۵۴/۳۱	۲۵۴/۳۱	۰/۰۰۳۱	۰/۰۰۰۰۳	-۹۰/۰۸
۲	۱۰۰	۱۳۰۰	۲۷۳/۱۵	۱۵۰	۲۹۴	۵۶۰/۵	۲۷۵/۰۷	۲۵/۰۹	۰/۰۱۳۹۴	۰/۰۰۰۱۳	-۷۷/۱۱
۳	۱۰۰	۱۴۰۰	۲۹۳/۱۵	۱۶۰	۳۰۲	۶۹۸	۲۹۵/۷۳	۲۹۵/۷۳	۰/۰۰۴۸۹	۰/۰۰۰۰۴	-۸۶/۲۱
۴	۱۰۰	۱۵۰۰	۳۱۳/۱۵	۱۷۰	۳۱۰	۸۳۵/۵	۳۱۶/۲۲	۳۱۶/۲۴	۰/۰۲۱۴۸	۰/۰۰۰۰۲	-۷۳/۳۵
۵	۱۰۰	۱۶۰۰	۳۳۳/۱۵	۱۸۰	۳۱۸	۹۷۳	۳۳۶/۶۱	۳۳۶/۶۵	۰/۰۳۳۸۴	۰/۰۰۰۰۳	-۶۹/۴۱
۶	۱۹۰	۱۲۰۰	۲۷۳/۱۵	۱۷۰	۳۰۲	۸۳۵/۵	۳۱۹/۲۵	۳۲۱/۲۴	۱/۹۸۷۳۱	۰/۰۱	-۳۴/۰۳
۷	۱۹۰	۱۳۰۰	۲۹۳/۱۵	۱۸۰	۳۱۰	۹۷۳	۲۹۸/۷۶	۲۹۸/۸۸	۰/۱۱۹۵۴	۰/۰۰۱	-۵۸/۴۴

-۴۹/۵۵	۰/۰۰۳	۰/۳۳۲۷	۳۲۵/۱۳	۳۲۴/۸۰	۴۲۳	۳۱۸	۱۴۰	۳۱۳/۱۵	۱۴۰۰	۱۹۰	۸
-۴۲/۶۴	۰/۰۰۶	۰/۶۵۷۵	۳۵۸/۰۱۸	۳۵۷/۳۶	۵۶۰/۵	۲۸۶	۱۵۰	۳۳۳/۱۵	۱۵۰۰	۱۹۰	۹
-۳۳/۸۸	۰/۰۰۲	۰/۰۲۱۳۱	۳۰۰/۲۲	۲۹۸/۲۰	۶۹۸	۲۹۴	۱۶۰	۲۵۳/۱۵	۱۶۰۰	۱۹۰	۱۰
-۲۶/۱۰	۰/۰۴۹	۴/۹۵	۳۵۱/۴۶	۳۴۶/۵۱	۵۶۰/۵	۳۱۸	۱۵۰	۲۹۳/۱۵	۱۲۰۰	۲۸۰	۱۱
-۲۳/۱۷	۰/۰۶۹	۶/۹۳	۴۱۳/۴۷	۴۰۶/۵۳	۶۹۸	۲۸۶	۱۶۰	۳۱۳/۱۵	۱۳۰۰	۲۸۰	۱۲
-۵۰/۳۰	۰/۰۰۳	۰/۳۰	۳۴۲/۶۰	۳۴۲/۳۰	۸۳۵/۵	۲۹۴	۱۷۰	۳۳۳/۱۵	۱۴۰۰	۲۸۰	۱۳
-۲۷/۵۲	۰/۰۴۲	۴/۲۰	۲۹۴/۹۹	۲۹۰/۷۸	۹۷۳	۳۰۲	۱۸۰	۲۵۳/۱۵	۱۵۰۰	۲۸۰	۱۴
-۲۵/۱۷	۰/۰۵۵	۵/۵۱	۳۳۳/۶۵	۳۲۸/۱۴	۴۲۳	۳۱۰	۱۴۰	۲۷۳/۱۵	۱۶۰۰	۲۸۰	۱۵
-۲۳/۳۵	۰/۰۶۷	۶/۷۹	۳۷۰/۲۸	۳۶۳/۴۸	۹۷۳	۲۹۴	۱۸۰	۳۱۳/۱۵	۱۲۰۰	۳۷۰	۱۶
-۱۹/۸۷	۰/۱۰۱	۱۰/۱۴	۴۲۱/۹۳	۴۱۱/۷۹	۴۲۳	۳۰۲	۱۴۰	۳۳۳/۱۵	۱۳۰۰	۳۷۰	۱۷
-۱۲/۹۸	۰/۲۲	۲۲/۴۳	۴۰۷/۹۴	۳۸۵/۵	۵۶۰/۵	۳۱۰	۱۵۰	۲۵۳/۱۵	۱۴۰۰	۳۷۰	۱۸
-۳۰/۱۶	۰/۰۳۱	۳/۱۰	۲۹۶/۶۹	۲۹۳/۵۹	۶۹۸	۳۱۸	۱۶۰	۲۷۳/۱۵	۱۵۰۰	۳۷۰	۱۹
-۲۲/۹۲	۰/۰۷۱	۷/۱۴	۳۴۷/۸۱	۳۴۰/۶۶	۸۳۵/۵	۲۸۶	۱۷۰	۲۹۳/۱۵	۱۶۰۰	۳۷۰	۲۰
-۲۶/۶۸	۰/۰۴۶	۴/۶۳	۳۶۵/۳۴	۳۶۰/۷۱	۶۹۸	۳۱۰	۱۶۰	۳۳۳/۱۵	۱۲۰۰	۴۶۰	۲۱
-۱۳/۱۷	۰/۲۱۹	۲۱/۹۳	۳۴۲/۸۲	۳۲۰/۸۸	۸۳۵/۵	۳۱۸	۱۷۰	۲۵۳/۱۵	۱۳۰۰	۴۶۰	۲۲
-۱۰/۵۹	۰/۲۹۵	۲۹/۵۱	۴۱۹/۹۹	۳۹۰/۴۷	۹۷۳	۲۸۶	۱۸۰	۲۷۳/۱۵	۱۴۰۰	۴۶۰	۲۳
-۹/۱۰	۰/۳۵	۳۵/۰۵	۴۸۲/۰۵	۴۴۶/۹۹	۴۲۳	۲۹۴	۱۴۰	۲۹۳/۱۵	۱۵۰۰	۴۶۰	۲۴
-۳۰/۷۹	۰/۰۲۸	۲/۸۸	۳۳۵/۶۱	۳۳۲/۷۲	۵۶۰/۵	۳۰۲	۱۵۰	۳۱۳/۱۵	۱۶۰۰	۴۶۰	۲۵

[6] Maily F, Martinez A, Giani A, Pascal-Delanoy F, Boyer A (2003) Design of a micromachined thermal accelerometer: thermal simulation and experimental results. *Microelectron J* 34(4): 275-280.

[7] Liao KM, Chen R, Chou BC (2005) Design of a thermal-bubble-based micromachined accelerometer. In: MEMS, NANO, and Smart Systems, International Conference on (ICMENS).

[8] Liao KM, Chen R, Chou BC (2006) A novel thermal bubblebased micromachined accelerometer. *Sens Actuators A* 130: 282-289.

[9] Chaehoi A, Maily F, Latorre L, Nouet P (2006) Experimental and finite-element study of convective accelerometer on CMOS. *Sens Actuators A* 132(1): 78-84.

[10] Goustouridis D, Kaltsas G, Nassiopoulou AG (2007) A silicon thermal accelerometer without solid proof mass using porous silicon thermal isolation. *IEEE Sens J* 7(7): 983-989.

۷- مراجع

[1] Dao R, Morgan DE, Kries HH, Bachelder DM (1996) Convective accelerometer and inclinometer. U.S. Patent 5,581,034.

[2] Leung AM, Jones J, Czyzewska E, Chen J, Pascal M (1997) Micromachined accelerometer with no proof mass. In: *Electron Devices Meeting, 1997. IEDM'97. Tech Dig Int Electron Devices Meet, Washington, DC, USA.*

[3] Milanović V, Bowen E, Zaghoul ME, Tea NH, Suehle JS, Payne B, Gaitan M (2000) Micromachined convective accelerometers in standard integrated circuits technology. *Appl Phys Lett* 76(4): 508-510.

[4] Luo XB, Li ZX, Guo ZY, Yang YJ (2002) Thermal optimization on micromachined convective accelerometer. *Heat Mass Transfer* 38(7): 705-712.

[5] Luo XB, Li ZX, Guo ZY, Yang YJ (2003) Study on linearity of a micromachined convective accelerometer. *Microelectron Eng* 65(1): 87-101.

- [18] Drazin PG, Riley N (2006) The Navier-Stokes equations: a classification of flows and exact solutions. Cambridge University Press.
- [19] Temam R (2001) Navier-Stokes equations: theory and numerical analysis. American Mathematical Soc..
- [20] Bustillo JM, Howe RT, Muller RS (1998) Surface micromachining for microelectromechanical systems. Proceedings of the IEEE 86(8): 1552-1574.
- [21] Tahmasebipour G, Hojjat Y, Ahmadi V, Abdullah A (2009) Optimization of STM/FIM nanotip aspect ratio based on the Taguchi method. Int J Adv Manuf Technol 44(1): 80-90.
- [22] Taguchi G, Chowdhury S, Wu Y (2005) Taguchi's quality engineering handbook. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- [23] Garraud A, Giani A, Combette P, Charlot B, Richard M (2011) A dual axis CMOS micromachined convective thermal accelerometer. Sens Actuators A 170(1-2): 44-50.
- [24] Cai SL, Zhu R, Ding HG, Yang YJ, Su Y (2013) A micromachined integrated gyroscope and accelerometer based on gas thermal expansion. In: Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems 2013 (Transducers & Eurosensors XXVII).
- [11] Mezghani B, Brahim A, Tounsi F, Masmoudi M, Rekik AA, Nouet P (2011) From 2D to 3D FEM simulations of a CMOS MEMS convective accelerometer. In: Microelectronics (ICM), International Conference on.
- [12] Dau VT, Dao DV, Sugiyama S (2007) A 2-DOF convective micro accelerometer with a low thermal stress sensing element. Smart Mater Struct 16(6): 2308.
- [13] Courteaud J, Crespy N, Combette P, Sorli B, Giani A (2008) Studies and optimization of the frequency response of a micromachined thermal accelerometer. Sens Actuators A 147(1): 75-82.
- [14] Lin JM, Lin CH, Lin CH (2015) RFID-Based Thermal Convection Non-Floating Type Accelerometer with Stacking Material for Heater and Thermal Sensors. Appl Mech Mater 764: 1344-1348.
- [15] Mukherjee R, Mandal P, Guha PK (2017) Sensitivity improvement of a dual axis thermal accelerometer with modified cavity structure. Microsyst Technol 23(12):5357-63.
- [16] Tahmasebipour M, Vafaei A (2017) A Highly Sensitive Three Axis Piezoelectric Microaccelerometer for High Bandwidth Applications. Micro Nanosyst 9(2):111-120.
- [17] Streeter VL, Wylie EB, Bedford KW (1998) Fluid mechanics. McGraw-Hill, New York.