



یک آشکارساز انواع گاز مبتنی بر سنسور گرمایی میکروالکترومکانیکی

مصطفی پروین

گروه مهندسی برق، واحد بندرعباس، دانشگاه آزاد اسلامی، بندرعباس، ایران

Email: Mostafa.Parvin@gmail.com

فرشاد بابازاده

استادیار گروه الکترونیک، دانشکده مهندسی برق، واحد یادگار امام خمینی (ره) شهر ری، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

Email: Babazadeh@iausr.ac.ir

علی تجویدی

استادیار گروه مهندسی برق، واحد بندرعباس، دانشگاه آزاد اسلامی، بندرعباس، ایران

Email: Tajvidy@iauba.ac.ir

چکیده

در این مقاله، یک سنسور میکروالکترومکانیکی برای تشخیص نوع گاز عبوری از سطح سنسور معرفی شده است. گازهای مختلف با توجه به ویژگی‌های متفاوتی که دارند، بر روی پروفایل سرعت سیال در کانال عبوری و همچنین توزیع گرمای تولید شده توسط هیتر و حس شده از سوی سنسور، تأثیر می‌گذارند. با ورود گاز نامشخص به کانال و سنجش دما توسط سنسور و با داشتن سرعت سیال می‌توان یک پروفایل سرعت و دما برای آن تعیین نمود و با مقایسه پروفایل‌های دما و سرعت برای گازهای مختلف از آزمون‌های قبل، نوع گاز عبوری را تشخیص داد. در این تحقیق، پروفایل سرعت و توزیع دما مربوط به گازهایی مانند هیدروژن، هلیوم، پروپان و گاز طبیعی به دست آمده است و در صورتی که گاز نامعلوم یکی از این گازها باشد، می‌توان با تطبیق نرم‌افزاری پروفایل گاز نامعلوم با گازهای مشخص شده، نوع گاز را تشخیص داد. بدیهی است که هرچه تعداد پروفایل‌های سرعت و دمای گازهای بیشتری در دسترس باشد، گازهای بیشتری را می‌توان تشخیص داد. ساختار طراحی شده شامل یک زیرلایه سیلیکونی است که بر روی آن یک لایه عایق SiO_2 قرار گرفته است؛ به طوری که دو نوار هیتر و یک نوار سنسور در میان این لایه عایق قرار گرفته‌اند. ساختار دارای طول کلی $1800 \mu\text{m}$ بوده و نوارهای سنسور و هیتر هر کدام دارای طول $30 \mu\text{m}$ ، ضخامت $3 \mu\text{m}$ و پهنای $600 \mu\text{m}$ و از جنس پلی‌سیلیکون می‌باشند. سیال از سطح ساختار عبور کرده و تحت تأثیر گرمای ایجاد شده توسط هیتر قرار می‌گیرد. گرادیان دما در اطراف سنسور به آهنگ انتقال گرمای سیال بستگی دارد. ارتباط سرعت سیال و گرادیان دمای ایجاد شده در اطراف سنسور توسط نرم‌افزار COMSOL Multiphysics شبیه‌سازی شده است.

واژگان کلیدی: آشکارساز گاز، سنسور گرمایی، گرادیان دما، سیستم‌های میکروالکترومکانیکی، MEMS

مقدمه

به طور کلی انتقال گرمای همرفتی، تأثیرگذاری متقابل بین یک سطح، که در مسیر سیال قرار گرفته و سیال متحرک است. عوامل مؤثر بر انتقال گرمای همرفتی عبارتند از:

الف) جنس سیال

ب) هندسه سطح سیال

ج) حرکت سیال

در طی این تأثیرگذاری، حرکت سیال، گرما را با سطح مجاور خود مبادله می کند. هدف اصلی از پرداختن به مسأله انتقال گرما، تعیین نرخ انتقال گرما از سطح به سیال متحرک است. برای بررسی این نکته باید به توزیع گرما و پروفایل دما در سیال متحرک پرداخته شود. توزیع گرما در سیال، متناظر با ابعاد مکانی و زمان است. در انتقال گرمای همرفتی خواص ماده از قبیل چگالی، ضریب رسانندگی گرمایی و گرمای ویژه از عوامل مؤثر هستند. به شکل دقیق تر، همه مواد از مولکولها ساخته شده اند که حرکت آنها به صورت تصادفی بوده و انتقال گرما به دلیل فعالیت این مولکولها است که با برخورد های تصادفی با هم، انرژی جنبشی و ارتعاشی خود را با لایه های مجاور مبادله می کنند. گرادیان دمایی، به دلیل انتقال پیوسته گرما در جهت کاهش دما عمل می کند. مکانیسم تبادل انرژی بین سطح و سیال از نوع رسانش است ولی انتقال گرما در سرتاسر سیال توسط رسانش گرمایی و انتقال همرفتی صورت می گیرد. (لطیف، ۱۳۹۲)

رابطه رسانش گرمایی به صورت زیر است.

$$q = -kA(dt/dx) \quad (1)$$

که k ضریب رسانندگی گرمایی ماده می باشد. رابطه بالا روی یک نقطه از بعد مکانی اعمال می شود و نه در ناحیه ای نامحدود، پس لازم نیست ضریب رسانندگی گرمایی یکنواخت باشد. علامت منفی نشان می دهد که وقتی گرادیان منفی است، انتقال گرما در جهت مثبت و به صورت کاهش می باشد. در عمل ضریب رسانندگی گرمایی با دما تغییر می کند.

بخش دیگری از انتقال گرما، به صورت انتقال گرمای همرفتی است. در انتقال گرمای همرفتی علاوه بر وابستگی به خواص گرمایی سیال مانند رسانندگی گرمایی، گرمای ویژه، چگالی، به ویسکوزیته سیال نیز وابسته است. این انتظار منطقی است، زیرا ویسکوزیته در توزیع سرعت و در نتیجه در آهنگ انتقال انرژی در ناحیه نزدیک جدار کانال، تأثیر می گذارد. اگر سطح داغ در معرض هوای محیط قرار بگیرد و حرکتی با منشأ خارجی نداشته باشد، در نتیجه گرادیان چگالی در نزدیک سطح، شاهد حرکتی بوده که به آن همرفت طبیعی یا آزاد، در مقابل همرفت واداشته یا اجباری گویند. (هولمن، ۱۳۹۱)

برای تعیین نرخ انتقال گرمای همرفتی از رابطه زیر استفاده می شود.

$$q = h(T_s - T_\infty) \quad (2)$$

بر خلاف ضریب رسانندگی گرمایی k ، ضریب انتقال گرمای همرفتی h ، به هندسه، خواص سیال، حرکت سیال و در برخی حالات به اختلاف دمای بین سطح و سیال وابسته است.

اساس این مقاله و تحقیق بر تأثیر ضریب k و h بر روی پروفایل سرعت سیال و توزیع گرما در کانال می باشد. همانگونه که گفته شد k از خواص ماده تأثیر پذیرفته و h نیز با توجه به ویسکوزیته سیال و مشخصات دیگری که گفته شد تغییر می کند. تغییر این دو ضریب باعث تغییر در نرخ انتقال گرما می شود. (لطیف، ۱۳۹۲)

در این پژوهش، یک هیتر تولید گرما نموده و یک نوع گاز با خواص مشخص از کانال عبور می‌کند؛ مؤلفه‌های مختلف گاز در ضرایب گفته شده تأثیر گذاشته و نرخ انتقال گرما را مشخص می‌کند. پس با تغییر ضرایب گرمای توزیع شده، پروفایل متفاوتی شکل می‌گیرد و دمای حس شده در سطح سنسور با توجه به نوع گاز متفاوت خواهد بود. در میان گازهای مورد بررسی قرار گرفته، گاز طبیعی شامل ترکیبی از گازهای متفاوت است. این ترکیب شامل گاز متان، اتان، پروپان، بوتان و عناصر غیر هیدروکربنی می‌باشد. تأثیر ترکیب این گازها روی ویسکوزیته نهایی گاز مؤثر است. بسته به اینکه چه درصدی از متان و سایر گازهای نام برده شده در گاز طبیعی وجود داشته باشد، خواص گاز طبیعی تغییر می‌کند. عمده عنصر تشکیل دهنده گاز طبیعی متان است. (طارق، ۱۳۸۹)

ضریب انتقال گرمای همرفتی برای گاز طبیعی از رابطه زیر به دست می‌آید. (Geankoplis, 1993)

$$h = 0.027(k/D)N_{Re}^{0.8}N_{Pr}(\mu_b/\mu_w)^{0.14} \quad (3)$$

که در آن k ضریب رسانندگی گرمایی، D قطر داخلی کانال، N_{Re} عدد رینولدز، N_{Pr} عدد پرانتل، μ_b ویسکوزیته سیال در کانال و در دمای جداره داخلی کانال، μ_w ویسکوزیته سیال در کانال و در دمای جداره بیرونی کانال می‌باشد.

ساختار سنسور تشخیص گاز

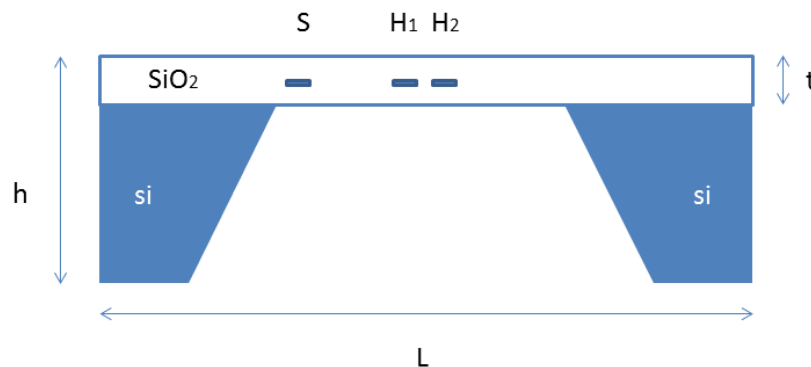
ساختار سنسور طراحی شده در شکل ۱ نشان داده شده است. زیرلایه^۱ از جنس سیلیکون بوده که قابلیت مجتمع‌سازی با مدارهای الکترونیکی را دارد. با اکسیداسیون حرارتی بر روی سطح زیرلایه، لایه‌ای از عایق SiO_2 شکل می‌گیرد. در ادامه، نوارهای هیتر و سنسور از جنس پلی‌سیلیکون بر روی آن لایه‌نشانی شده و در نهایت یک لایه SiO_2 به عنوان لایه غیرفعال ساز^۲ روی کل ساختار را می‌پوشاند. (زی، ۱۳۹۱)

ابعاد کلی ساختار دارای طول $L=1800 \mu m$ و نوارهای سنسور و هیتر هرکدام دارای طول $30 \mu m$ ، ضخامت $3 \mu m$ و پهنای $600 \mu m$ می‌باشند. دو هیتر در میانه ساختار و یک سنسور در ابتدای مسیر ورود گاز و قبل از هیتر قرار می‌گیرد. فاصله بین سنسور و میانه هیترها $400 \mu m$ انتخاب شده است. فاصله بین هیترها $100 \mu m$ می‌باشد. ارتفاع ساختار $h = 500 \mu m$ و ضخامت لایه عایق SiO_2 با $t = 70 \mu m$ می‌باشد. (پروین و همکاران، ۱۳۹۴)

در این تحقیق، دمای هیتر در $87^\circ C$ ثابت نگه شده است. در صورتی که نیاز به شار گرمایی بیشتری باشد، از هیتر دوم استفاده می‌شود تا بدون آن که مقدار دمای هیتر افزایش داشته باشد، شار گرمایی اطراف سنسور بیشتر شود. این کار برای موقعیت‌هایی در نظر گرفته شده که افزایش دما باعث ایجاد شرایط خود احتراقی و موارد نقض ایمنی گردد و افزایش دمای بیش از حد، مجاز نباشد.

¹ substrate

² passivation layer



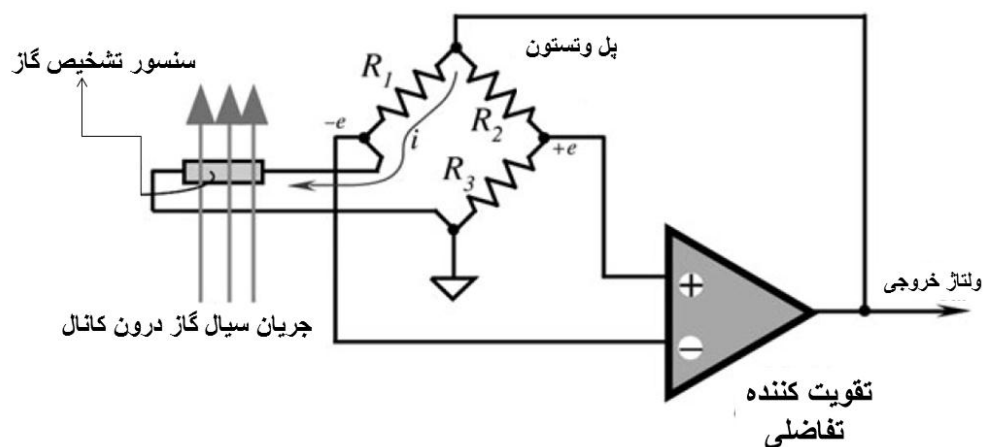
شکل ۱- ساختار کلی سنسور تشخیص گاز

یافته ها

در ابتدا، هیتر شماره دو که نسبت به هیتر شماره یک در فاصله بیشتری از سنسور قرار گرفته است، با دمای 87°C وارد مدار می‌شود. دمای سیال و گاز عبوری از کانال نیز 37°C در نظر گرفته شده است. با عبور سیال از روی سطح ساختار کلی در شکل ۱، گرمای تولید شده توسط هیتر با نرخ انتقال متناسب با رابطه ۲ به سطح سنسور رسیده و آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد. گرمای حس شده در اطراف سنسور، باعث ایجاد تغییرات مقاومتی در ماده پلی‌سیلیکون شده و این تغییرات مقاومتی توسط یک مدار الکتریکی که در شکل ۲ نشان داده شده است، به تغییرات ولتاژ تبدیل می‌شود؛ که با شار گرمایی و در نهایت با سرعت سیال عبوری متناسب می‌باشد.

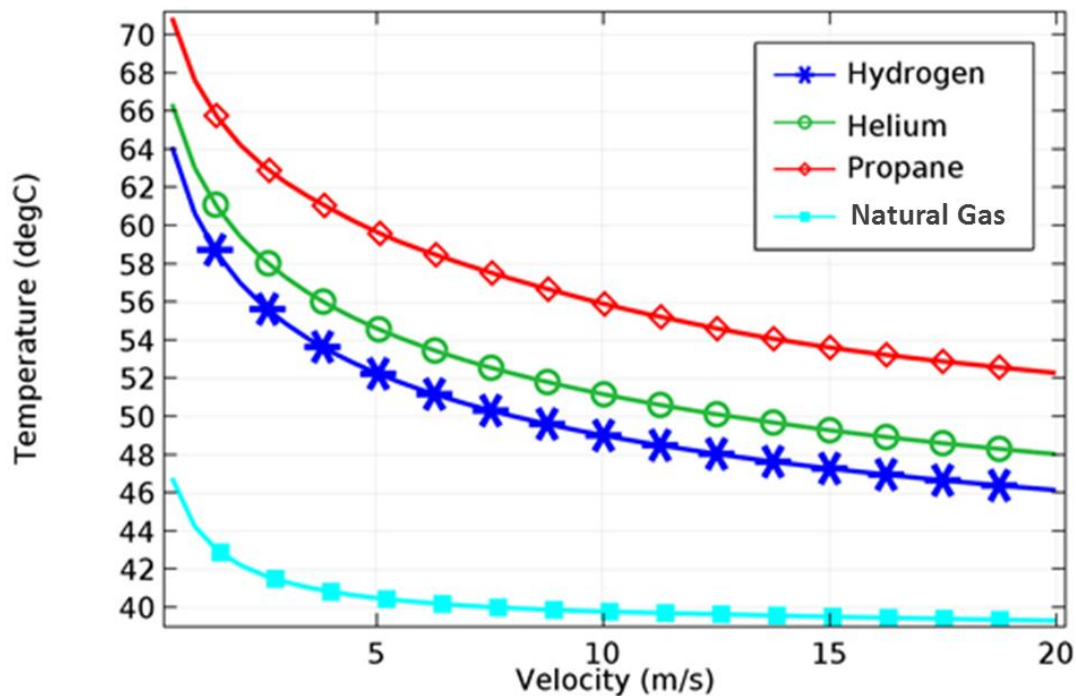
تغییرات مقاومت براساس دمای حس شده، با رابطه ۴ داده می‌شود. (Farden, 2010)

$$R(T) = R(T_0) \cdot [1 + \alpha \cdot (T - T_0)] \quad (4)$$



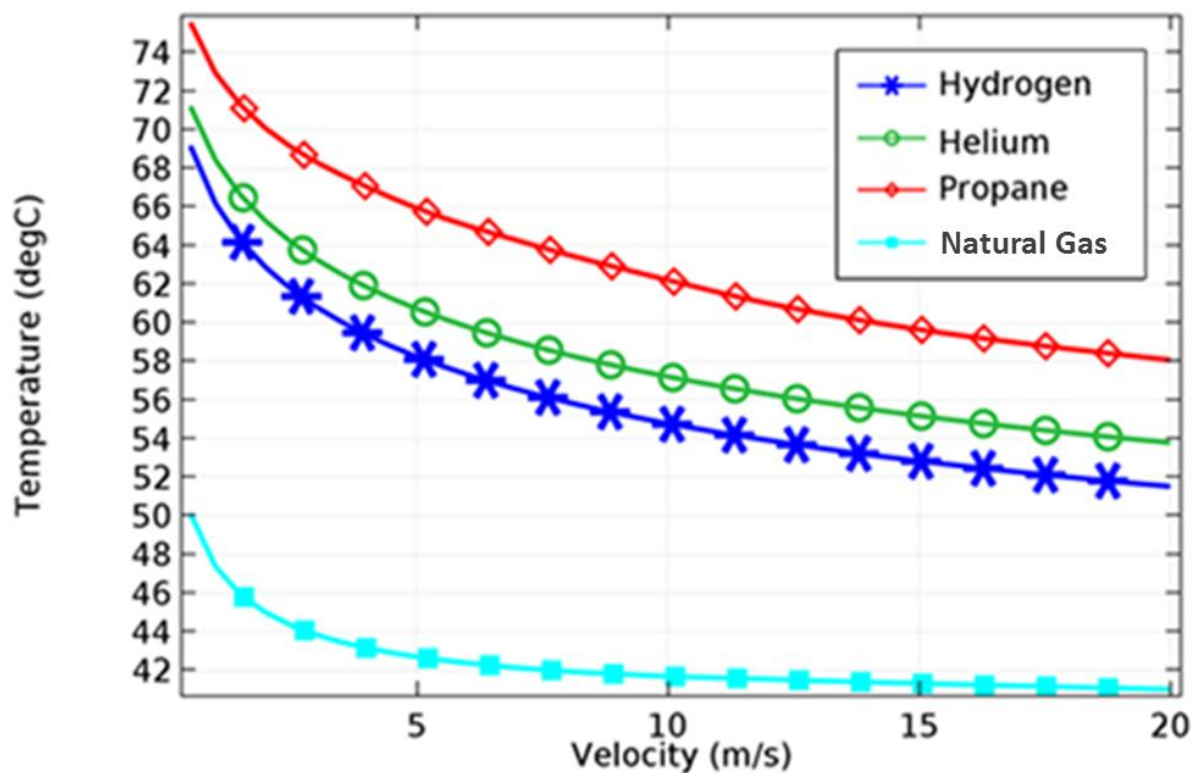
شکل ۲- چگونگی قرارگیری سنسور در مدار

تحلیل انتقال شار گرمایی توسط نرم افزار COMSOL Multiphysics انجام گرفته و اثر تغییرات سرعت سیال در محور افقی و تغییرات دمایی اطراف سنسور در محور عمودی نمودار شکل ۳ باعث ایجاد یک پروفایل توزیع گرمایی برای گازهای مختلف شده که می توان از آن برای تشخیص گاز ورودی بهره برد. (Pryor, 2011)



شکل ۳- نمودار دما نسبت به پروفایل سرعت در وضعیتی که هیتر اول خاموش و هیتر دوم روشن است

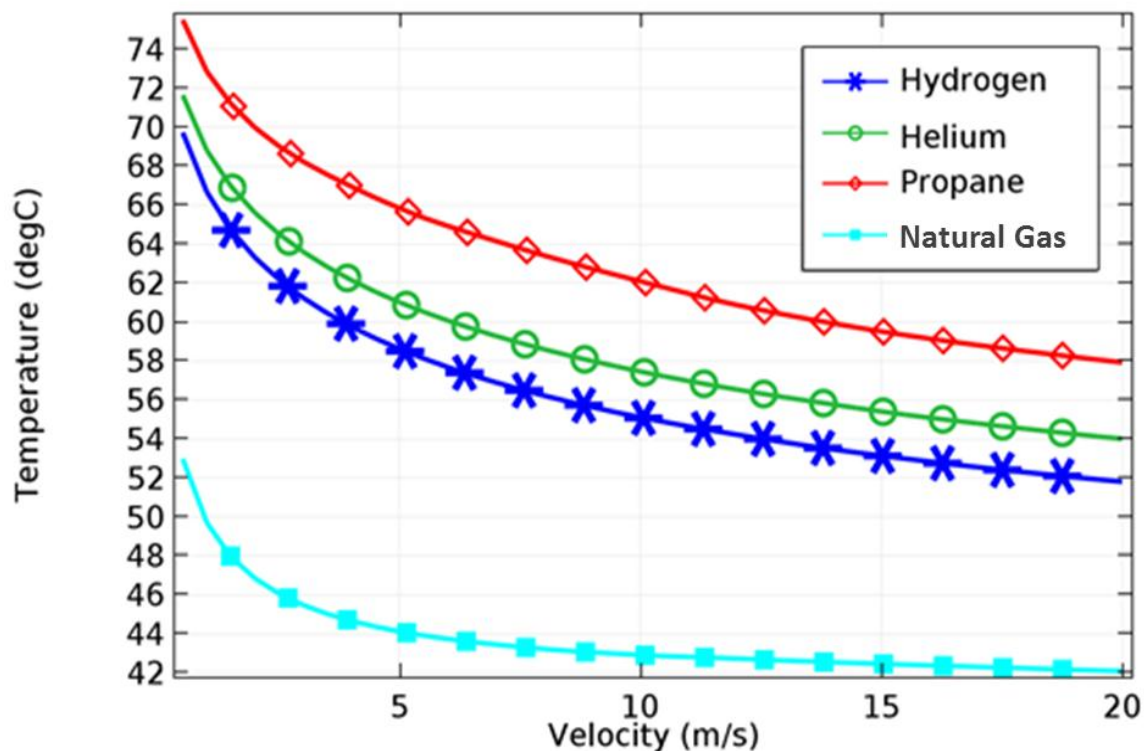
توزیع دما در اطراف سنسور، با توجه به نوع گاز به کار رفته متفاوت می باشد. در نمودار شکل ۳ نمودار توزیع دما برای گازهای هیدروژن، هلیوم، پروپان و گاز طبیعی نشان داده شده است. با توجه به این نمودارها می توان دریافت که گاز طبیعی، باعث کاهش بیشتری در دمای حس شده در اطراف سنسور می شود. بازه سرعت گاز عبوری از ۰/۵ m/s تا ۲۰ m/s در نظر گرفته شده است؛ که در این محدوده سرعت، بازه دمایی برای گاز طبیعی نسبت به سایر گازها کاهش بیشتری داشته است. کمترین تأثیر در کاهش دمای سنسور را گاز پروپان داشته و گازهای هلیوم و هیدروژن به ترتیب در مرتبه های بعدی قرار می گیرند. برای بالا بردن حساسیت سنسور، یا باید دمای هیتر افزایش یابد تا بازه دمایی گسترده تر شود و یا باید حجم شار گرمایی اضافه شود. افزایش حساسیت سنسور یعنی اینکه با تغییر کوچک سرعت سیال، تغییرات گسترده تری در محور دما داشته باشیم. در مرحله بعد برای بررسی این موضوع که آیا با نزدیک تر شدن منبع گرما به سنسور، تغییرات بازه دمایی بیشتر می شود، هیتر مجاور سنسور فعال می گردد.



شکل ۴- نمودار دما نسبت به پروفایل سرعت در وضعیتی که هیتر اول روشن و هیتر دوم خاموش است

در این مرحله، هیتر دوم خاموش و هیتر اول روشن است. با این کار، منبع گرمایی به سنسور نزدیک تر می شود. با بررسی نمودار شکل ۴ می توان دریافت که بازه دمایی نسبت به تغییرات سرعت، گسترده تر شده است. این وضعیت در شرایطی رخ داده است که دمای هیتر افزایش پیدا نکرده و فقط شار گرمایی بیشتری در اطراف سنسور منتشر شده است.

در مرحله بعد، هر دو هیتر وارد مدار می شوند. دمای هر دو هیتر به اندازه مراحل قبلی و در حد 87°C تنظیم شده است. با مشاهده نمودار و نتایج مربوط به این قسمت می توان مشاهده کرد که بازه دمایی باز هم تغییر کرده و شار گرمایی بیشتری نسبت به مرحله قبل در اطراف سنسور قرار گرفته و در حدود 3°C این بازه دمایی نسبت به مرحله قبل گسترده تر شده است. شکل ۵ نتایج مربوط به این مرحله را نشان می دهد. در وضعیتی که هر دو هیتر وارد مدار شده و شار گرمایی بیشتری تولید کنند، حساسیت دمایی نیز افزایش می یابد و در نهایت باعث افزایش دقت پروفایل گرمایی تولید شده برای هر گاز با ویژگی های منحصر به فرد آن می شود.



شکل ۵- نمودار دما نسبت به پروفایل سرعت در وضعیتی که هیتر اول و دوم روشن است

بحث و نتیجه گیری

از نمودارهای به دست آمده می توان نتیجه گرفت که خواص گازها مانند ضریب رسانندگی گرمایی و ضریب انتقال گرمایی، در انتقال گرما به شکل همرفتی کاملاً مؤثر هستند. خواصی مانند چگالی، گرمای ویژه و ویسکوزیته بر آهنگ انتقال گرما تأثیر می گذارند و دمای حس شده در اطراف سنسور از نرخ انتقال گرمای همرفتی تأثیر می پذیرد. البته شکل، سطح، هندسه و نوع حرکت نیز روی این عوامل تأثیرگذار بوده ولی با توجه به این که شرایط فیزیکی کانال سیال و سطوح آن در آزمایش گازهای مختلف یکسان است، بنابراین مهم ترین عوامل مؤثر بر روی پروفایل سرعت سیال و توزیع دما در اطراف سنسور، همان ضریب هدایت گرمایی و ضریب انتقال همرفتی می باشند.

در ساختار سنسور معرفی شده، از دو هیتر استفاده شده است تا بدون افزایش بیش از حد دما، توزیع دمایی بیشتر شده و میزان حساسیت افزایش یابد. در این وضعیت، هر گاز پروفایل سرعت و توزیع دمای ویژه خود را دارا می باشد. اگر از میان گازهایی که پروفایل دما و سرعت آنها قبلاً آزموده شده و در اختیار می باشند، گاز مجهولی وارد کانال شود، تأثیر ویژه خود را بر روی کمیت های مورد نظر گذاشته و با مقایسه پروفایل به دست آمده و نتایج استاندارد ثبت شده قبلی، می توان به نوع گاز ورودی به کانال پی برد. بدیهی است که با افزودن و ثبت پروفایل سرعت و توزیع دمایی سایر گازها، می توان محدوده آشکارسازی سنسور را برای تشخیص گازهای بیشتر توسعه داد.



منابع

- ۱) لطیف، ام.جی. (۱۳۹۲). هدایت حرارتی، مترجم احمدرضا عظیمیان و داود طغرای. انتشارات پویش اندیشه.
- ۲) لطیف، ام.جی. (۱۳۹۲). جابجایی حرارتی، مترجم احمدرضا عظیمیان و داود طغرای. انتشارات پویش اندیشه.
- ۳) هولمن، جی پی، (۱۳۹۱)، "انتقال گرما،" محمد رضا افضلی، ویراست دهم، نشر کتاب دانشگاهی، تهران، ایران.
- ۴) طارق، احمد، (۱۳۸۹)، "مهندسی مخازن هیدروکربوری،" صادق قاسمی، نشر شرکت ملی نفت ایران، تهران، ایران.
- ۵) زی، اس.ام. (۱۳۹۱). فیزیک و تکنولوژی قطعات نیم‌رسانا. ترجمه غلامحسین سدید عابدی، مؤسسه چاپ و انتشارات آستان قدس رضوی، مشهد، ایران.
- ۶) پروین، مصطفی، بابازاده، فرشاد و تجویدی، علی، یک سنسور فلوی گاز میکروالکترومکانیکی گرمایی برای کاربرد در خطوط لوله گاز طبیعی، سومین کنفرانس ملی و اولین کنفرانس بین‌المللی پژوهش‌های کاربردی در مهندسی برق، مکانیک و مکاترونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران، ۱۳۹۴.
- 7) Geankoplis, C.J. (1993). Transport Processes and Unit Operations, 3rd Edition. Prentice-Hall International Inc.
- 8) Pryor, W. (2011), Multiphysics Modeling Using COMSOL, Jones and Bartlett Publishers, USA.
- 9) Fraden, Jacob. (2010), Handbook of Modern Sensors Physics, Designs, and Applications, 4th Edition. Springer.

Archive of SID