

ساختار متعامد چهار سیمی برای اندازه‌گیری دقیق سرعت و جهت فلوی سیال و باد با استفاده از میکرو ماشینکاری سیلیکان روی غشاء نیتريد سیلیکان

مهدی خیرالهی حسین آبادی^۱ جواد کوهسرخي^۲ امیر قاسمی کردلر^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد- دانشکده علوم و فنون نوین- دانشگاه تهران- تهران- ایران
mehdi.kheirolahi@ut.ac.ir

۲- دانشیار- آزمایشگاه ساخت ادوات پیشرفته میکرو و نانو، دانشکده علوم و فنون نوین- دانشگاه تهران- تهران- ایران
*koohsorkhi@ut.ac.ir

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد- دانشکده علوم و فنون نوین- دانشگاه تهران- تهران- ایران
amir.ghasemi96@ut.ac.ir

چکیده: حسگرهای میکرو الکترومکانیکی حرارتی یکی از دقیقترین و مهمترین ابزارها برای تشخیص جهت و شدت یک سیال و موج آکوستیکی به حساب می‌آیند. تشخیص جهت و سرعت باد و هر سیالی در رنجهای مختلف کاربردهای مختلف از جمله هواشناسی، نیروگاه‌های بادی، اندازه‌گیری فلوی گاز در کنتورهای هوشمند شهری و گاز ورودی به نیروگاه‌های گازی، دارد. در این مقاله یک حسگر برای اندازه‌گیری همزمان سرعت و جهت سیال طراحی و ساخته شده است. از نرم افزار کامسول برای شبیه‌سازی و طراحی استفاده شده است. برای افزایش حساسیت و کاهش انتقال حرارت ساختار با بدنه حسگر، کل المان حسگری روی یک غشاء سیلیکانی ساخته شده است. برای تشخیص جهت از یک ساختار چهار سیمی متعامد استفاده شده است که قابلیت اندازه‌گیری جهت را تا ۵ درجه فراهم می‌کند. برای مشخصه یابی این حسگر یک ست آپ آزمایشگاهی طراحی و ساخته شد و حسگر تا سرعت های ۵ متر بر ثانیه که بازه فلومترهای صنعتی، بادهای ملایم و کنتورهای گازهای شهری است مورد آزمایش قرار گرفت. با تغییر فاصله سیمها این حسگر قادر است تا سرعت های ۳۰ متر بر ثانیه را اندازه‌گیری کند.

واژه‌های کلیدی: حسگر میکرو الکترومکانیکی، حسگر تشخیص جریان هوا، حسگر تشخیص سرعت سیال، حسگر حرارتی، میکرو ماشینکاری توده‌های، سیم داغ، بادسنج

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.20.1.1

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۰۲

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۱/۰۲/۱۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۳/۱۸

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر جواد کوهسرخي

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - تهران - خیابان کارگر شمالی - دانشگاه تهران - دانشکده علوم و فنون نوین

۱- مقدمه

سرعت و جهت باد، با روش‌های مختلفی از جمله پروانه، فنجان، سونوگرافی، صفحه فشار، لوله فشار، بادسنج‌های سیم گرم، رادارهای الکترومغناطیسی و آکوستیک، قابل اندازه‌گیری است. صفحه فشار یا صفحه نرمال قدیمی‌ترین و ساده‌ترین حسگر سرعت باد است. لوله فشار که به عنوان لوله پیتوت معروف است، اطلاعات دقیق سرعت باد را به دست می‌آورد که از آن در تونل استاندارد باد برای تست دیگر حسگرها از جمله حسگرهای میکروماشین کاری استفاده می‌شود [۱،۲]. با این حال، بعضی از این حسگرها خصوصاً لوله فشار برای اندازه‌گیری‌های باد در جو مرطوب مناسب نیستند، زیرا لوله گاهی اوقات توسط گرد و غبار، قطره‌های آب و کریستال یخ آب‌بندی می‌شود و نتایج را تحت تاثیر قرار می‌دهند. بادسنج‌های اولتراسونیک نوعی دیگری از اینگونه حسگرهای هستند که شامل سه مبدل اولتراسونیک است که در یک طرح مثلثی ثابت قرار دارند. هر مبدل به طور متناوب به عنوان فرستنده و گیرنده اولتراسونیک عمل می‌کند و پالس‌های التراسونیک تولید می‌شوند و از یک مبدل به دیگری پخش می‌شوند. پس از آن، نقش مبدل‌ها مبادله می‌شود و پالس‌های حاصل از آن به روش مخالف پی می‌برند. در نهایت سرعت باد توسط زمان پالس‌هایی که از فرستنده به گیرنده می‌رسد قابل اندازه‌گیری است [۳].

حسگرهای اندازه‌گیری سرعت و جهت باد با مکانیزم گرمایی، نوع دیگری محسوب می‌شوند که اولین آنها را ون پوتن در سال ۱۹۷۴ برای اندازه‌گیری پارامترهای باد، ساخت. این حسگر از یک هیتر سیلیسیم نوع P بر روی یک پایه‌ی سیلیسیم ساخته شد [۴]. در همان سال‌ها به بعد تحقیقات برای افزایش بازدهی و همچنین کوچک‌تر کردن سایز حسگر با استفاده از روش‌های ریزساختار استفاده شد. در سال ۲۰۰۳ آدامک و همکارانش حسگری را با استفاده از هیترهای چندلایه بر روی پایه‌ی سیلیسیم با استفاده از روش میکروماشینکاری حجمی به صورت پل دیفرانسیلی ساختند [۵]. در اوایل قرن ۲۱ حسگرهای زیادی ساخته شد که قادر بود سرعت و جهت باد را اندازه‌گیری کنند. در سال ۲۰۰۵ لاف روچ و همکارانش حسگری با ۴۶ هیتر از جنس پلاتین بر روی چیپ سیلیسیم کریستالی به اندازه‌ی ۴ اینچ ساخت که بر روی لایه‌ی عایق سیلیسیم نایتراید قرار گرفته بود. این حسگر می‌توانست سرعت باد را از ۰ تا ۳۵ متر بر ثانیه اندازه‌گیری کند [۶]. در سال ۲۰۱۳ روزم بوم و همکارانش حسگر گرمایی بادی را بر پایه‌ی سیم داغ ساختند که این حسگر با حسگرهای دیگر که عوامل متأثر محیطی که بر روی حسگر گرمایی باد تاثیر می‌گذارند را بر روی یک تراشه ساختند. این حسگر شامل دو جفت سیم است که دوتا سیم نقش هیتر عمود برهم بود و دوتا سیم نقش حسگر را ایفا می‌کنند که می‌توان سرعت و جهت باد را تشخیص دهد [۷]. برای میکروتوربینها نیز از حسگرهای میکرونی استفاده می‌شود [۸].

آقای گارسیا و همکارانش یک حسگر تشخیص باد با فناوری سیم داغ مبتنی بر فیبرنوری معرفی کردند که قادر است رنج وسیعی از سرعت‌های را اندازه‌گیری کند [۹]. سال‌های بعد حسگرهای مبتنی بر تشخیص سرعت و جهت باد ساخته شد که با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی جهت و سرعت باد را تشخیص می‌دهند [۱۰]. خانم قطان کاشانی و همکاران سامانه‌ای را برای پایش پارامترهای جوی ارائه داده اند که سرعت باد را بررسی و گزارش می‌دهد [۱۱]. یکی از چالش‌های اصلی حسگرهای سیم داغ خطاهای ناشی از عوامل محیطی است که در مقاله آقای رشتبرزاده این موضوع بررسی شده است [۱۲].

در این مقاله یک ساختار چهار سیمی متشکل از دو جفت سیم متعامد به عنوان حسگر و هیتر معرفی شده است که قابلیت همزمان سرعت و جهت باد را دارا است. طرح نهایی با استفاده از نرم‌افزار کامسول شبیه‌سازی شده است و با استفاده از فرایند میکروماشینکاری توده‌ای روی بستر سیلیکان ساخته شده است و برای کاهش پدیده انتقال حرارت ساختار روی یک غشاء ساخته شده است. تاثیر غشاء و میزان خیز و خمیدگی آن در اثر عوامل محیطی در مرجع [۱۳] مورد بررسی قرار گرفته شده است. از آنجاییکه هدف از این پژوهش، استفاده حسگر در کنتورهای هوشمند گاز شهری و همچنین بادهای ملایم بوده است به همین علت، رنج مورد مطالعه زیر ۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است.

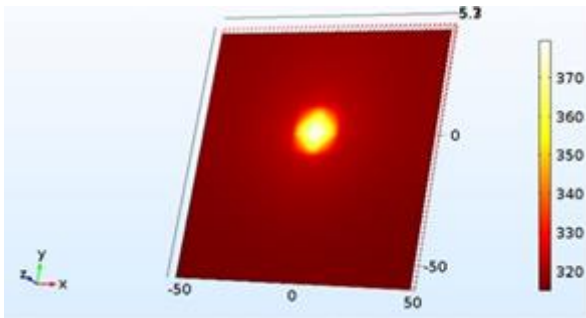
۲- ساختار ۴ سیمی متعامد

۲-۱- شبیه سازی

نرم‌افزار کامسول یک مجموعه کامل شبیه‌سازی است که می‌تواند معادلات دیفرانسیل سیستم‌های غیر خطی را توسط مشتق‌های جزئی به روش اجزاء محدود در فضاهای یک، دو و سه بعدی حل نماید. محیط طراحی نرم‌افزار سه بعدی در نظر گرفته می‌شود. برای طراحی از فیزیک‌های مکانیک ساختاری تنش حرارتی، جریان الکتریکی متناوب و مستقیم جریان الکتریکی روی پوسته، مکانیک ساختاری پوسته و جریان آرام استفاده می‌شود و به ترتیب به منظور اندازه‌گیری تنش حرارتی وارده به غشا و نمونه سیلیکانی، اعمال جریان الکتریکی بر روی پوسته مدار و حل پتانسیل الکتریکی بوسیله آن، شبیه‌سازی حسگر بر روی نمونه سیلیکانی به عنوان یک پوسته و از فیزیک جریان آرام به منظور تعیین جریان سیال ورودی و خروجی و اعمال آن در زوایای مختلف به حسگر استفاده می‌شود.

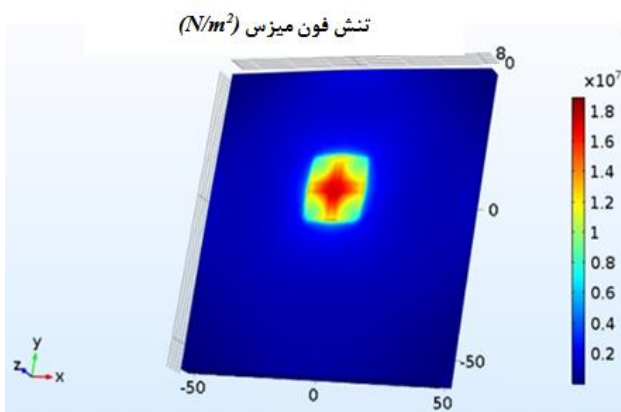
برای شبیه‌سازی فرض‌های معینی در نظر گرفته شده است: اختلاف دمای دو سیم حسگری بدون تأثیر از محیط خارجی است. دیواره کانال و حسگر در شرایط بدون لغزش در نظر گرفته شد. محیط مورد مطالعه برای انجام محاسبات مربوطه، ایستا در نظر گرفته می‌شود. در نهایت از محیط‌های جریان سیال آرام جهت محاسبه میدان سرعت و فشار، برای جریان سیال تک فاز و از محیط انتقال حرارت جهت اعمال

طراحی حسگر از اهمیت بالایی برخوردار است، محاسبه دمای سیمها بر روی غشاء در صورت اعمال ولتاژهای الکتریکی مختلف به نمونه است. در شکل (۲) مشاهده می‌شود، که در صورت اعمال توان مورد نیاز به سیمهای حسگر، دمای حسگر در بازه حدود ۳۶۰-۳۷۵ درجه کلوین است که نشان می‌دهد میزان انتقال حرارت به بدنه قابل اغماض است.



شکل (۲): نمایی از مدل حرارتی شبیه سازی شده حسگر.

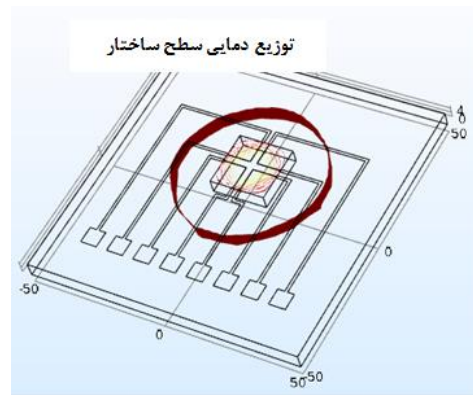
یکی دیگر از مباحثی که در طراحی حسگر بسیار مهم است، محاسبه تنش اعمالی به حسگر و بخصوص غشاء آن است. همانطور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، پس از اعمال جریان به مدار و به طبع آن گرم شدن سیستم، تنش اعمالی به غشاء سیلیکانی چیزی در حدود ۱۸ مگاپاسکال است. همانطور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، لبه های حسگر در جایی که سیمها به غشا رسیده و سطح مقطعشان کوچک می‌شود تنش زیادی به نمونه وارد می‌شود، به منظور کاهش تنش وارده به غشاء در طرح نهایی، محل اتصال سیمها به بدنه ضخیم تر در نظر گرفته شده است تا علاوه بر کاهش تنش، مشکلی به سیمها در فرایند معلق سازی وارد نشود.



شکل (۳): نمایی از میزان تنش وارده به غشاء پس از اعمال جریان الکتریکی به مدار.

انتقال حرارت سیال به بدنه حسگر استفاده می‌شود. همچنین در شرایط مرزی برای حسگر، سرعت پیوسته برای ورودی و فشار ثابت صفر برای خروجی در نظر گرفته شده است.

به منظور شبیه سازی حسگر مقادیر مختلف جریان اعمالی به حسگر و غشاء و فاصله های مختلف سیمها از یکدیگر مورد بررسی قرار گرفته است. در این شبیه سازی جنس زیرلایه سیلیکانی، جنس هیترها نیکل و در نهایت پدها از جنس طلا در نظر گرفته شده است. همچنین چون ساختار روی یک غشاء از جنس سیلیکان نایتراید ساخته شده است، این لایه نیز در نظر گرفته شده است. شکل (۱) نمایی از ساختار مورد مطالعه را نشان می‌دهد. جدول (۱) ابعاد و جنس مواد بکار گرفته شده در این طرح را نشان می‌دهد.



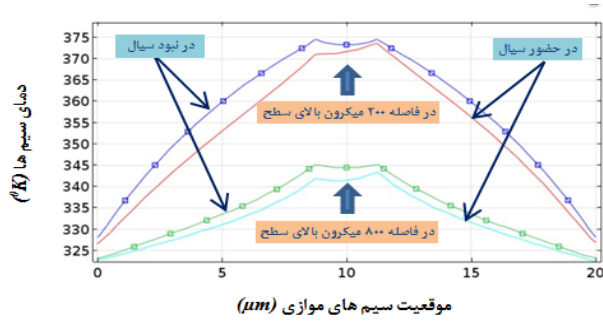
شکل (۱): نمایی از حسگر در محیط شبیه سازی نرم افزار کامسول.

جدول (۱): مشخصات هندسی و جنس بخش های مختلف حسگر

پارامتر	مقدار
جریان عبوری از سیمها	تا ۱۰ میلی آمپر
طول سیمها	۲۰۰۰ میکرومتر
عرض سیمها	۱۰ میکرومتر
ابعاد پدها	۲۰۰*۲۰۰ میکرومتر
ضخامت سیمها	۰,۲ میکرومتر
جنس سیمها	نیکل/پلاتین
جنس پدها	طلا
جنس زیر لایه	سیلیکان (۱۰۰)
دمای هوا	۲۰ درجه سانتیگراد
فشار هوا	۱ اتمسفر

۲-۲- رفتار حسگر بدون حضور سیال (هوا)

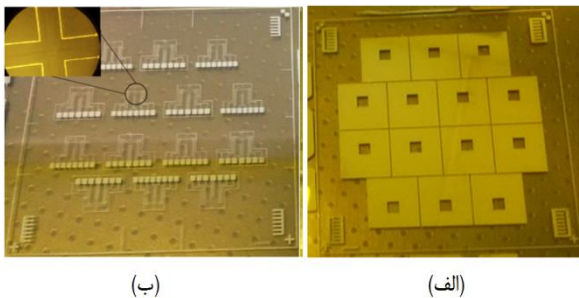
در این حالت ساختار به صورت سه بعدی، در فضای آزاد و بدون حضور جریان سیال مدل شده است، تا بوسیله آن بتوان میزان حداکثر تنش که به غشای سیلیکانی در هنگام گرم شدن به غشاء وارد می‌شود را محاسبه کرد. همچنین میزان اتلاف انرژی در حسگر و حداکثر گرمایی که در سیمها بوجود می‌آید را بدست آورد. یکی از مباحثی که در



شکل (۵) تاثیر تغییرات دما اطراف سیم ها در فواصل ۲۰۰ و ۸۰۰ میکرونی بالای بستر در حضور و عدم حضور سیال

۳- فرآیند ساخت حسگر

برای ساخت حسگر از بستر سیلیکانی با جهت کرسیتالی (۱۰۰) و ضخامت ۵۲۵ میکرون که از دو طرف پولیش شده است، استفاده شد. برای ایجاد یک لایه ایزولاسیون الکتریکی و همچنین استفاده از آن به عنوان ماسک در مراحل زدایش، دو لایه اکسید سیلیکان (۱۰۰ نانومتر) و نیتريد سیلیکان (۲۰۰ نانومتر) روی بستر سیلیکان به روش های لایه نشانی تبخیر بخار شیمیایی در دمای پایین، لایه نشانی شد. در شکل (۶) نمایی از دو ماسک اپتیکی به منظور انجام عملیات لیتوگرافی دو طرفه بر روی یک ویفر کامل دو اینچی مشاهده می شود.



شکل (۶): طرح های پشت و روی بستر. (الف) طرح ماسک پنجره؛ (ب) طرح سیم های متعامد

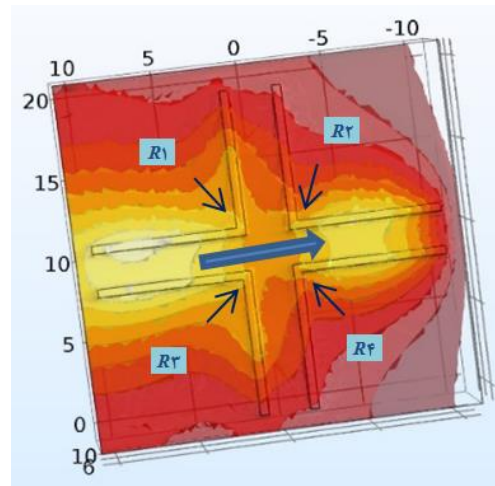
یکی از مراحل مهم در فرآیند ساخت، الگودهی لایه نیتريد سیلیکان است که شکل (۷) مراحل ایجاد طرح مدنظر برای ایجاد غشاء را نشان می دهد. برای زدایش لایه نیتريد سیلیکان از دستگاه زدایش یونی با استفاده از ترکیب گاز SF_6 و O_2 استفاده شده است.



شکل (۷) مراحل زدایش نیتريد سیلیکان پشت بستر

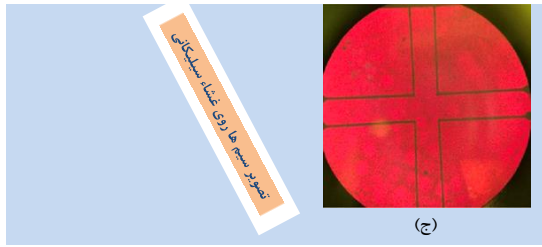
۲-۳- رفتار حسگر در حضور جریان سیال (هوا)

برای بدست آوردن انتقال حرارت بین سیال و سیمها شرایط پیوستگی برای سیال در نظر گرفته می شود. به منظور شبیه سازی حسگر در حضور سیالی با سرعت کم و در نتیجه اختلاف مقاومت پایین بین سیمها، بایستی در محیط شبیه سازی سیال را غیرتراکم پذیر در نظر گرفت. به منظور شبیه سازی سیال با سرعت ثابت و بدون تغییر در ویسکوزیته، سیال نیوتونی در نظر گرفته می شود. همچنین، سیال در حالت بدون لغزش با دیواره ها در نظر گرفته می شود. شمایی از طرح شبیه سازی شده در نرم افزار کامسول با استفاده از شرایط بیان شده در حضور سیال در شکل (۴) نمایان است.



شکل (۴): تغییر پروفایل توزیع دما اطراف ۴ سیم در اثر فلوی هوا (فلش جهت سیال را نشان می دهد)

پس از بررسی پروفیل گرمایی اطراف سیمها، همان طور که در شکل (۴) مشاهده می شود، با اعمال جریان سیال در داخل کانال پروفایل گرمایی اطراف سیمها تغییر می کند. در واقع مکانیزم عملکرد حسگر به این صورت است که هنگام اعمال جریان سیال در داخل کانال دو سیم اول که به جریان نزدیک تر هستند بر اثر عبور جریان خنک شده و مقاومت آنها تغییر می کند، که همزمان گرمای خود را به سیال داده و سیال عبوری گرم می شود. در اثر گرم شدن، سیال دیگر قادر به خنک کردن سیمهای ثانویه نبوده به اندازه دو سیم اول نمی باشد و اختلاف دما بین دو سیم موازی ایجاد می شود. این اختلاف دما موجب تغییر در اختلاف مقاومت سیمها شده و مبنای عملکرد حسگر خواهد بود. شکل (۵) تغییرات دما را در بالای دو سیم در فواصل ۲۰۰ و ۸۰۰ نانومتر نشان می دهد همانطور که مشاهده می شود تغییرات دما بین سیم ها در مکانهای نزدیک به سیم ها بیشتر است برای همین منظور، بهترین مکان بهینه برای سیم ها این است که در یک سطح قرار داشته باشند.

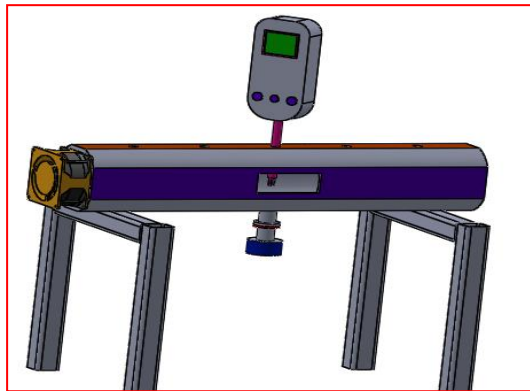


شکل (۸): مراحل ساخت حسگر. سمت چپ: طرح پشت ساختار، سمت راست: (الف): غشاء ایجاد شده به روش زدایش همسانگرد پشت ویفر، (ب): نمایی از سیم‌های متعامد روی ویفر، (ج): نمایی از سیم‌های متعامد زیر میکروسکوپ نوری با نور عبوری

۴- نتایج تست حسگر

۴-۱- اندازه گیری سرعت سیال

برای تست حسگر از دو ست آپ متفاوت استفاده شد. شکل (۹) تونل بادی را نشان می‌دهد که برای تست حسگر تا سرعت های ۳۰ متر بر ثانیه طراحی و ساخته شده که مجهز به حسگر مرجع برای کالیبراسیون است.



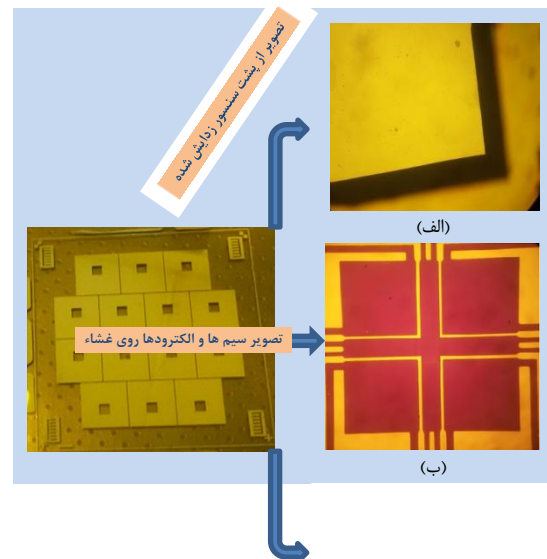
شکل (۹): شماتیکی از تونل باد برای تست سرعت سیال توسط حسگر

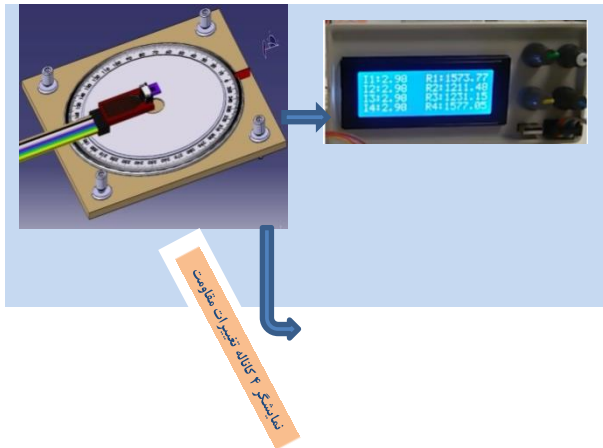
مدار قرائت مخصوص این حسگر طوری طراحی شده است که شامل ۴ عدد سیم حسگری است و این سیمها بایستی از طریق یک منبع جریان تحریک شوند و از طریق آن دمای سیمها بالا می‌رود. بنابراین در مدار مستلزم طراحی ۲ منبع جریان قابل تغییر است. با توجه به جنس و ابعاد سیم‌ها، جریان سیم‌ها بین ۰.۹-۳.۷ میلی آمپر در حال تغییر است که متناسب با فلوی هوا است.

برای اندازه گیری سرعت سیال حسگر در ست آپ تست قرار داده می‌شود و جهت فلو مطابق شکل (۴) به حسگر وارد خواهد شد. در این حالت رفتار مقاومت ۱ و ۳ و مقاومت ۲ و ۴ یکسان هستند ولی تغییر مقاومتی بین مقاومت ۱ و ۲ و همچنین بین مقاومت ۳ و ۴ در اثر عبور سیال از روی سیم‌ها ایجاد خواهد شد. شکل (۱۰) نشان می‌دهد که با اعمال جریان سیال با سرعت‌های متفاوت به حسگر مقاومت سیم‌ها

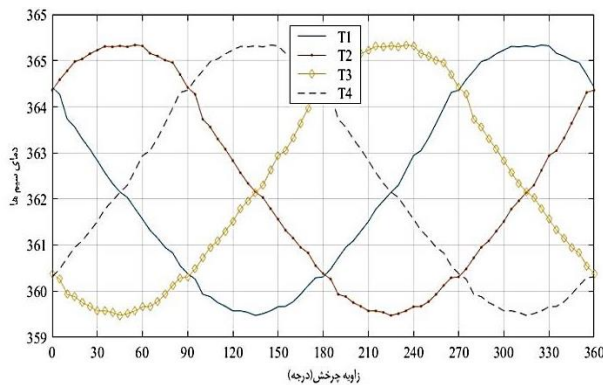
بعد از اینکه پنجره مدنظر روی لایه نیتريد سيليكان ایجاد شد، نمونه با یکی از روش‌های معمول زدایش تر سيليكان که در این مقاله از محلول پتاسیم هیدروکسید استفاده شده است، زدایش شد. در زدایش سيليكان با استفاده از این محلول لایه‌ها به خوبی در طی فرآیند زدوده می‌شوند و در کف غشاء سطح مناسبی حاصل می‌شود که دما، غلظت محلول و مدت زمان زدایش اهمیت زیادی دارد. به طوری که با کاهش دما و افزایش غلظت محلول پتاسیم هیدروکسید نرخ زدایش کاهش یافته و به این ترتیب مدت زمان فرآیند افزایش می‌یابد. از آنجا که کیفیت سطح سيليكان اهمیت زیادی در طرح نهایی حسگر دارد از دماهای بالا برای افزایش نرخ زدایش تر نمی‌توان استفاده کرد. برای تثبیت غلظت محلول و جلوگیری از تغییرات ناگهانی آن، از برج چگالنده استفاده می‌شود. شکل (۸) تصاویر میکروسکوپ اپتیکی را از تمام مراحل ساخت حسگر نمایش می‌دهد. فرآیند زدایش تا جایی ادامه پیدا کرد که ضخامت سيليكان به حدود ۴۰ میکرومتر برسد. در این ضخامت نور قرمز به راحتی از غشاء سيليكانی عبور کرده و به این صورت می‌توان با نور عبوری هر طرحی را روی غشاء مشاهده کرد (شکل ۸-ج).

بعد از ایجاد غشاء مدنظر با ضخامت حدود ۴۰ میکرومتر، فلز نیکل به ضخامت حدود ۱۰۰ نانومتر با استفاده از روش تبخیر حرارتی لایه نشانی شد. طرح نهایی حسگر که شامل دو جفت سیم موازی و متعامد است، روی لایه نیکل الگودهی شد (شکل ۸-ب). برای انطباق طرح سیم‌ها روی غشاء از نور قرمز عبوری استفاده شده که این فرآیند با استفاده از دستگاه ماسک الاینر دو طرفه انجام شد. بعد از اتمام مراحل ایجاد الگوی سیم‌ها روی غشاء، برای کاهش انتقال حرارت بین سیم‌ها و بدنه، غشاء سيليكانی باقیمانده که ضخامتی حدود ۴۰ میکرومتر دارد با روش زدایش تر زدوده می‌شود تا ساختار روی یک غشاء نانومتر از جنس اکسید سيليكان و نیتريد سيليكان قرار بگیرد.





شکل (۱۱): تصاویری از نحوه تست حسگر در تشخیص جهت سیال به همراه نمایشگر ۴ کاناله برای قرائت تغییرات ۴ مقاومت



شکل (۱۲): نتایج حاصل از شبیه سازی تغییر دمای سیمها بر حسب کلونین در حضور سیال و اعمال چرخش

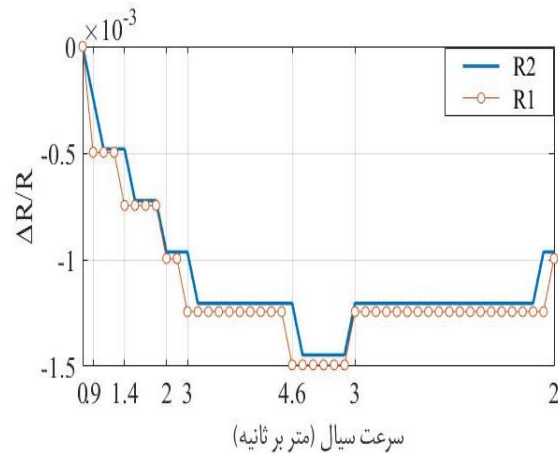
پس از استخراج نمودارهای مربوطه با استفاده از نرم افزار متلب، بایستی داده های بدست آمده را به منظور درجه بندی زاویه چرخش حسگر مورد استفاده قرار داد، به این منظور و با توجه به نتایج، بوسیله بدست آوردن اختلاف بین دمای سیمها و ترسیم نمودارهای مربوط به آن می توان به نموداری به شکل هشت دست یافته. شکل (۱۳) نمودار هشت مانند حسگر نتایج شبیه سازی شده در نرم افزار کامسول را نشان می دهد. جهت بدست آوردن زوایای چرخش حسگر می توان از روابط زیر با توجه به تغییر دمای سیمها استفاده کرد.

$$\Delta T_x = T_1 - T_2 \quad (1)$$

$$\Delta T_y = T_3 - T_1 \quad (2)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta T_y}{\Delta T_x} \right) \quad (3)$$

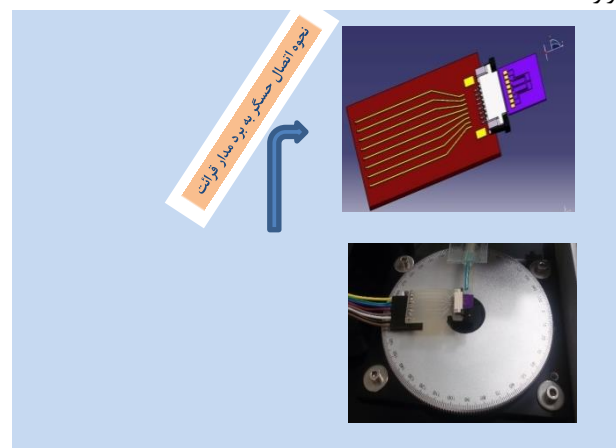
تغییر کرده است. برای حذف خطاهای مربوط به ساخت، از نسبت مقاومت نسبی دیفرانسیلی $\Delta R/R$ به منظور نشان دادن میزان تغییرات مقاومت سیمها نسبت به هم استفاده شده است. اگر تفاوت بین مقاومت های ۱ و ۲ مشاهده شود به این معنی است که جهت جریان سیال نسبت به جهت فلش شکل (۴) تغییر کرده است. در ادامه این مقاله جهت سیال نیز مورد بررسی قرار می گیرد و با استفاده از آن می توان جهت اعمال سیال و همچنین میزان تغییرات جریان سیال در داخل کانال را مشاهده کرد.



شکل (۱۰): تغییرات نسبی مقاومت R2 و R1 در سرعت های مختلف سیال

۴-۲- اندازه گیری جهت سیال

برای تست عملکرد حسگر برای تشخیص جهت باد یا فلوی سیال ست آپ شکل (۱۱) طراحی و ساخته شده است. این ست آپ شامل یک صفحه مدرج و دوار است که قابلیت چرخش با دقت یک درجه را دارا است. همانطور که در شکل (۱۲) مشاهده می شود، با تغییر در زاویه حسگر در برابر اعمال جریان سیال دمای هر یک از سیمها تغییر می کند سپس اختلاف داده های بدست آمده از نرم افزار شبیه ساز را با استفاده از متلب بدست آورده و نمودار مربوط از آن استخراج می شود و با توجه به این داده ها، حسگر را می توان کالیبره کرده و مورد استفاده قرار داد.



$$\frac{\Delta R1}{R1} = \frac{R1 - R01}{R1} \quad (4)$$

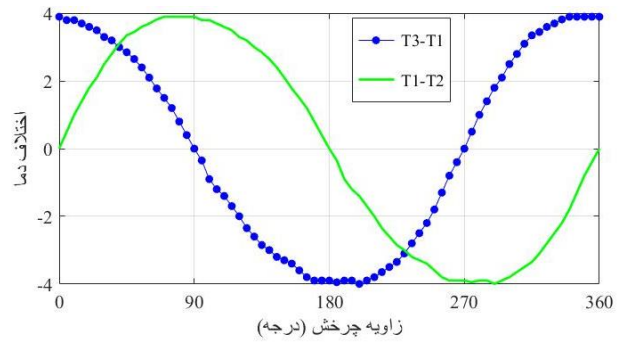
$$\frac{\Delta R2}{R2} = \frac{R2 - R02}{R2} \quad (5)$$

$$\frac{\Delta R3}{R3} = \frac{R3 - R03}{R3} \quad (6)$$

$$\Delta R_x = \frac{\Delta R2}{R2} - \frac{\Delta R1}{R1} = \frac{R1R02 - R2R01}{R1R2} \quad (7)$$

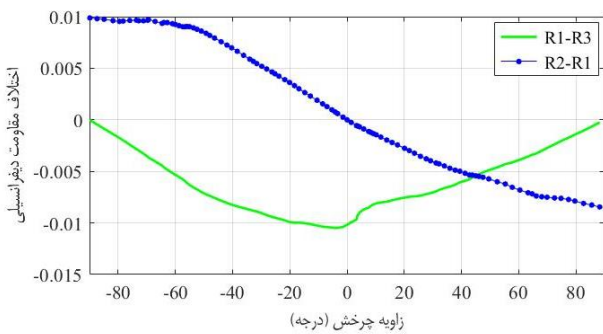
$$\Delta R_y = \frac{\Delta R1}{R1} - \frac{\Delta R3}{R3} = \frac{R3R01 - R1R03}{R1R3} \quad (8)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta R_y}{\Delta R_x} \right) = \frac{R2(R1R03 - R3R01)}{R3(R1R02 - R2R01)} \quad (9)$$



شکل (۱۳): نتایج اختلاف بین دمای سیمها در اثر چرخش نمونه در حضور سیال با استفاده از نرم افزار شبیه ساز کامسول

بر طبق روابط بالا می توان کالیبراسیون حسگر را انجام داد و زاویه چرخش را بر حسب مقاومت هر یک از سیمها بدست آورد. شکل (۱۴) کالیبراسیون حسگر را طبق زوایای بدست آمده در رابطه (۳) نمایش می دهد.



شکل (۱۴): کالیبراسیون حسگر

۵- نتیجه گیری

در این مقاله یک ساختار متعامد و ۴ سیمی روی یک غشاء نازک برای اندازه گیری سرعت و جهت فلوی یک سیال معرفی شده است. به طور کلی برای این کاربردها، از سیم هایی با جنس پلاتین و نیکل استفاده می شود که در این مقاله از فلز نیکل به ضخامت حدود ۱۰۰ نانومتر به عنوان سیم های اصلی استفاده شد که با روش تبخیر حرارتی روی بستر سیلیکان لایه نشانی شد. یک ست آپ آزمایشگاهی برای مشخصه یابی حسگر استفاده شد که حسگر را تا سرعت ۵ متر بر ثانیه مورد آزمایشگاه قرار داد. طبق نتایج، این حسگر قادر است تا سرعت ۵ متر بر ثانیه که اغلب در بازه فلومترهای صنعتی، گاز شهری و بادهای ملایم است را اندازه گیری نماید. دقت اندازه گیری جهت سیال برای این حسگر حدود ۵ درجه است. برای افزایش بازه تا ۳۰ متر بر ثانیه می توان از سیم هایی با فاصله های بیشتر استفاده کرد.

با توجه به مطالب بالا، مقاومت سیمها نیز طبق آنچه که بیان شد با توجه به تغییر دمای هر سیم تغییر کرده و می توان با استفاده از آن نمودار تغییر مقاومت را درجه بندی کرده و از آن به عنوان مبنایی برای استفاده از حسگر استفاده کرد.

برای انجام آزمایش درجه بندی بر روی حسگر به ای صورت عمل می شود که سیال با سرعت ثابت به نمونه اعمال شده و با استفاده از تغییر زاویه حسگر با صفحه مدرج زاویه ای نتایج حاصل از آزمایش درجه بندی نمونه به دست می آید. مطابق به شکل (۱۱) که دستگاه جهت سنج باد مکانیکی استفاده شده در آزمایش را نشان می دهد شکل (۱۴) نتایج حاصل از درجه بندی حسگر، را نشان می دهد. همان طور که ملاحظه می شود، با اعمال جریان سیال به نمونه و چرخش آن اختلاف دما بین هر جفت از سیمها با توجه به موقعیت زاویه ای که دارد ایجاد می شود که این اختلاف دما موجب ایجاد اختلاف مقاومت بین هر جفت از حسگرها می شود. با توجه به شرایط ساختی که بیان شد و در نتیجه تفاوت مقاومت اولیه هر حسگر (سیم) با حسگر دیگر، برای نمایش هر چه بهتر نتایج حاصل از آزمایش اختلاف مقاومت نسبی بین آن ها نمایش داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می شود، زمانیکه به حسگر زاویه داده می شود، بین نمودار حاصل از اختلاف مقاومت هر سیم با سیم های دیگر اختلافی ایجاد شده که مبنای کار برای انجام درجه بندی حسگر می شود.

اگر سیال با زاویه θ به حسگر برخورد کند هر سیم حسگر دمای متفاوتی را پیدا می کنند. با توجه به فرار گرفتن سیمها در پل وتسون تغییرات مقاومتی ناشی از تغییرات دمایی در پل وتسون ایجاد خواهد شد. روابط (۴) تا (۶) تغییرات دیفرانسیلی هر یک از مقاومتها است که به خاطر اختلاف مقاومت اولیه در هر یک از آنها و انجام مقایسه بین تغییرات آنها نیاز به استفاده از آن می باشد. تغییرات مقاومت در جهت X و در جهت Y برابر مؤلفه های (۷) و (۸) خواهد بود و از طریق تغییرات مقاومت در دو جهت عمود بر هم، می توان جهت θ باد را از رابطه (۹) محاسبه کرد :

مراجع

- [1] D. P. Martin, J. J. Grant, and J. V. Ringwood, "Evaluation of a prototype thermal anemometer for use in low airspeed drying measure calculations, Flow Meas. Instrum., vol. 12, no. 5, pp. 385-396, Dec. 2001.
- [2] Y. Zhu, B. Chen, Ming Qin'2-D Micro machined Thermal Wind Sensors—A Review. IEEE INTERNET OF THINGS JOURNAL, VOL. 1, NO. 3, 2014.
- [3] N. Kato, T. Ohkuma, J. R. Kim, H. Marukawa, and Y. Niihori, "Full scale measurements of wind velocity in two urban areas using an ultrasonic anemometer," J. Wind Eng. Ind. Aerodyne., vol. 41, no. 1, pp. 67-78, Jan. 1992.
- [4] F. P. van Putten and S. Middelhoek, "Integrated silicon anemometer," Electron. Lett., vol. 10, no. 21, 1974.
- [5] R. J. Adamec, D. V. Thiel, and P. Tanner, "MEMS wind direction detection: From design to operation," in Proc. 2nd IEEE Conf. Sens., Toronto, ON, Canada, 2003, pp. 340-343, 2003.
- [6] Laghrouche, M., et al., A miniature silicon hot wire sensor for automatic wind speed measurements. Renewable energy, 30(12): p. 1881-1896, 2005.
- [7] C. L. Roozeboom et al., "Integrated multifunctional environmental sensors," J. Microelectromech. Syst., vol. 22, no. 3, pp. 779-793, 2013.
- [8] A. Akhbari, M. Rahimi, A. R. Atapoor, Control System Design and Fault-Ride-through Performance Analysis of Grid-Connected Microturbine Generation System, Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, 19(4), pp. 139-152, 2022.
- [9] A. Garcia-Ruiz, A. Dominguez-Lopez, J. Pastor-Graells, H. F. Martins, S. Martin-Lopez, and M. Gonzalez-Herraez, "Long-range distributed optical fiber hot-wire anemometer based on chirped-pulse Φ OTDR," Optics Express, Vol. 26, Issue 1, pp. 463-476, 2018.
- [10] Shang-Chen Wu, Jong-Chyuan Tzou and Cheng-Yu Ding, "A Low-Cost System for Measuring Wind Speed and Direction Using Thermopile Array and Artificial Neural Network," J. Appl. Sci., 11(9), 4024, 2021.
- [11] زهرا قطان کاشانی، سید امین ایزدی، و محمد جواد سیاهکاری، "طراحی و ساخت سامانه پایش پارامترهای جوی به منظور پایش بینی وضع هوا"، ژورنال الکترومغناطیس کاربردی، شماره ۷ و ۲، صفحه ۱-۱۱، ایران، ۱۳۹۸.
- [12] محمد رشتبیرزاده، محمدحسین قزل ایاغ، "بررسی و تحلیل عوامل ایجاد کننده ی خطا در پاسخ دستگاه بادسنج سیم داغ"، چهارمین کنفرانس ملی تحقیقات کاربردی در مهندسی برق، مکانیک، کامپیوتر و فناوری اطلاعات، ایران، 1397.
- [13] M. R. Mahlooji, J. Koohsorkhi, "Simulation and Derivation of Deflection Equation for Suspended Diaphragm for MEMS Application Using Kirchhoff-Love Theory", Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.4, 2018.