

بررسی شبه‌سنگ‌های هندسی مؤثر بر عملکرد حسگرهای برداری صوتی با استفاده از یک شیوه عددی عنصر متناهی

مصطفی مظفری^{۱*}، محمدحسین حمیدزاده^۲، حمیدرضا مساح^۳

۱. دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف

۲. دانشکده مکانیک و هوافضا، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

۳. پژوهشگر انجمن مهندسی صوتیات ایران

دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۲۰، پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۱۲

چکیده

هدف از این تحلیل عددی، بررسی اختلاف دمای بین دو سیم داغ حسگر که ناشی از حرکت سرعت ذرات است، می‌باشد. در این پژوهش، اثرات تغییر مؤلفه‌های هندسی حسگر نظیر ابعاد مقطع سیم‌ها، فاصله‌ی مابین سیم‌ها و نحوه‌ی قرارگیری سیم‌ها نسبت به جهت موج صوتی بر عملکرد حساسیت حسگر به روش عددی بررسی شده‌اند. هم‌چنین، نتایج با حل تحلیلی آن مقایسه شده و از تطابق خوبی برخوردار هستند. از این‌رو، بررسی‌های عددی نشان می‌دهند که حساسیت تابعی از بسامد است و عملکرد حساسیت حسگر با افزایش بسامد از ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ هرتز کاهش شدید و از آن به بعد به‌صورت یکنواخت به سمت صفر میل می‌کند. هم‌چنین، مشاهده شده است که حساسیت، وابسته به موقعیت سیم‌ها نسبت به هم و ابعاد مقطع سیم‌ها می‌باشد و با افزایش فاصله‌ی بین سیم‌ها و ارتفاع مقطع سیم‌ها حساسیت کاهش می‌یابد. هم‌چنین می‌توان دریافت که حساسیت وابستگی زاویه‌ای دارد و وابسته به نحوه‌ی قرارگیری سیم‌ها نسبت به جهت موج صوتی می‌باشد و در حالت افقی با افزایش زاویه از ۰ تا ۹۰ درجه، حساسیت کاهش می‌یابد.

کلیدواژه‌ها: تحلیل عددی، حسگر برداری صوتی، میکروفون، حساسیت.

۱. مقدمه

مبدأ شکل‌گیری میکروفون دانشگاه توئنت هلند در سال ۱۹۹۴ می‌باشد [۱]. میکروفون که با فناوری‌های میمز^۱ ساخته شده، یک حسگر حساس به سرعت صوتی ذره است و براساس انتقال حرارت جابجایی کار می‌کند و به‌صورت تک حسگر یا در ترکیب با میکروفون می‌باشد [۲]. در گذشته از میکروفون به‌عنوان حسگر جریان جرمی [۱]، سرعت صوتی ذرات هوا [۳]، شدت صوتی در یک بعد و سه بعد [۲]، مقاومت‌ظاهری صوتی [۴] و جذب صدا [۵] و هم‌چنین، در اولین تحقیقات برای اندازه‌گیری صدا در اتاق کار و محیط شهری استفاده شده است [۶]. در سال ۲۰۰۵ میکروفون به‌صورت جدی در دانشگاه‌های متعددی در سراسر جهان مورد مطالعه قرار گرفت [۱]. در حال حاضر بیش از چند نوع میکروفون وجود دارند. یکی از

مهم‌ترین ساختارهای موجود نوع IS-IS^۲ است که شامل دو رشته مقاومت حرارتی سیمی است که با فاصله‌ی مشخصی از هم قرار دارند. این دو رشته سیم به‌عنوان منبع حرارتی عمل می‌کنند [۷]. IS-IS حالت بهبود یافته‌ی IS-IS^۳ می‌باشد که در آن نسبت علامت به نوفه^۴ به‌طور قابل توجهی بهبود یافته است و پهنای نوار بسامدی بیش‌تری دارد [۸]. میکروفون در داخل یک محفظه‌ی بی‌دررو قرار دارد که توزیع میدان دما در داخل محفظه به‌صورت پایا می‌باشد و اختلاف دمایی که در دو حسگر سیمی وجود دارد، مستقل از شرایط خارجی می‌باشد [۷]. وقتی جریان هوا از روی حسگرها رد می‌شود، حسگر بالادست سرد می‌شود و مقداری از گرمای خود را به جریان هوای عبوری می‌دهد. درحالی‌که، حسگر پایین‌دست به خاطر هوایی که از روی آن عبور می‌کند

^۲ SS; Sensor-Sensor

^۳ SHS; Sensor-Heater-Sensor

^۴ SNR; Signal to Noise

* نویسنده پاسخگو: mostafamozafari@ae.sharif.ir

^۱ MEMS; Micro-Electro-Mechanical Systems

گرم‌تر است، گرمای کم‌تری نسبت به حسگر بالادست از دست می‌دهد. سرعت ذرات، توزیع دما بین دو حسگر دمایی در میکروفون را تغییر می‌دهد و این اختلاف دما باعث تغییر در مقاومت برقی حسگرها می‌شود. تغییر مقاومت برقی هر دو حسگر اندازه‌گیری می‌شود و خروجی برقی متناسب با جریان اعمالی را تولید می‌کند [۹]. جنس حسگرهای دمایی از سیم نازک پلاتینیم به طول حدود ۱۰۰۰ میکرومتر و فاصله حدود ۱۴۰ میکرومتر می‌باشد و از طریق جریان برقی تا دمای ۶۰۰ کلوین گرم می‌شود [۱۰]. حساسیت میکروفون وابسته به دمای عملیاتی می‌باشد و با افزایش دما افزایش می‌یابد. از جهتی به‌خاطر محدودیت در ساخت، نمی‌توان از دمای خیلی بالا استفاده کرد. لذا، حداکثر دمایی که برای گرم کردن سیم‌ها می‌توان استفاده کرد، ۶۰۰ کلوین است [۹]. حسگر میکروفون قابلیت اندازه‌گیری سرعت‌های بسیار کم‌تری را نسبت به بادسنج سیم داغ^۱ دارد. این حسگر قابلیت اندازه‌گیری سرعت ذره به‌کوچکی ۵۰ نانومتر بر ثانیه را دارد. فشار صدای ۱ پاسکال (۹۴ دسی‌بل) متناظر با سرعت ۲/۲ میلی‌متر بر ثانیه می‌باشد، این در حالی است که بادسنج‌ها در سرعت‌های پایین‌تر از حدود ۱ سانتی‌متر بر ثانیه، حساسیت خود را از دست می‌دهند [۱۱]. در ادامه به برخی از پژوهش‌هایی که در حوزه حسگر برداری صوتی انجام شده، پرداخته می‌شود.

هانشوتن و همکاران در سال ۲۰۰۴ الگوسازی و بهینه‌سازی [۸] و در سال ۲۰۰۵ [۱۰] تأثیر پکیجینگ در یک حسگر برداری صوتی را توسط تحلیل‌های آزمایشگاهی و دینامیک سیالات محاسباتی توسط روش حجم متناهی انجام داده‌اند. آن‌ها مشاهده نمودند که علامت (سیگنال) خروجی به دلیل نصب حسگر در داخل هندسه‌ی استوانه مانند (پکیج) افزایش چشم‌گیری دارد و کاهش علامت خروجی در بسامدهای کم‌تر از ۱ هرتز است. در حالی که، در علامت‌های بالاتر از ۱۰ هرتز با یک ضریب ثابت تقریباً ۳/۵ (۱۱ دسی‌بل) تقویت می‌شود. همچنین، این تحلیل منتج به یک بینش بهتری در مورد اثرات لزجت و جریان سیال که نقش اساسی را در

حساسیت حسگر ایفا می‌کنند، می‌شود. در پژوهشی دیگر [۱۲]، بررسی تجربی و نظری الگوی حساسیت همه جهته حسگر بردار صوتی به‌صورت سه‌بعدی و متشکل از چهار حسگر انجام شده و توصیف مشخصات جریان گاز در اطراف حسگر و همچنین تعدادی راهکار برای بهینه‌سازی عملکرد دستگاه ارائه شده است. باستن و همکاران [۱۳]، موقعیت منبع صوتی را در فضای سه‌بعدی، حداقل با دو حسگر برداری صوتی که در فاصله‌ی مشخصی از یک‌دیگر قرار گرفته بودند، تعیین و جهت‌گیری حسگر را به‌عنوان شرط اساسی برای دقت چنین روش‌هایی بیان نمودند. همچنین، تشریح چندین راهکار برای کالیبره کردن جهت‌گیری حسگر به‌صورت تجربی انجام دادند. ریچارد و همکارش [۱۴]، بررسی تجربی و نظری حسگرهای برداری صوتی را در بسامدهای پایین انجام دادند. همچنین، به‌عنوان یک ابزار مهم در کاربردهای دریایی از جمله سونار پیشنهاد دادند. از آن‌جایی که حسگرها برای محدوده‌ی ۵۰ هرتز تا ۲ کیلوهرتز بهینه شده‌اند. اما، آن‌ها نشان دادند که این حسگرها می‌توانند یک پاسخ فضایی مستقل از بسامد را نسبت به پهنای نوار نامبرده تولید کنند. دی‌بری به‌صورت تجربی [۱۵-۱۷] نشان داد که حسگر برداری صوتی، مناسب به‌عنوان حسگر نصبی روی زمین، تجهیزات و پهپادها می‌باشد و یک حسگر منحصر به‌فرد است که اندازه‌ی آن در حد چند میلی‌متر و حساس به صدای ۱۰ هرتز تا ۱۰ کیلوهرتز است. همچنین، عملکرد پهپادها را از نظر برخاست، فرود اتوماتیک و عدم تصادفات هوایی ارتقاء بخشیده و باعث افزایش آگاهی از وضعیت پهپادها شده است. مظفری و همکاران [۹] در کار پیشین خود نشان دادند بهینه‌ترین مقطع برای سیم‌ها مستطیلی می‌باشند و بهترین عملکرد زمانی است که حسگر افقی می‌باشد و بهینه‌ترین ابعاد برای مقطع حسگر، مستطیلی به طول و عرض به‌ترتیب ۵ و ۰/۳ میکرومتر می‌باشد و بهینه‌ترین فاصله‌ی بین سیم‌ها ۱۵۰ میکرومتر می‌باشد. لذا در پژوهش حاضر از هندسه و ابعاد مقاله‌ی قبلی استفاده شده است. این پژوهش گسترده‌تر از کار قبلی خود می‌باشد. در این پژوهش برای میدان محاسباتی، یک مستطیل با دو حسگر در مرکز انتخاب شده است. در ابتدا به مباحث ریاضی و معادلات حل تحلیلی و عددی

^۱ Hot wire anemometry

حرارتی محیط و مقدار گرمای تولید شده در واحد زمان و حجم می‌باشند [۹، ۱۱].

$$Q = \frac{P}{l} \partial(x) \partial(y) \partial(z) \quad (2)$$

که در آن، تابع ∂ بیانگر موقعیت گرم‌کن و P توان کل است. $\frac{P}{l}$ توان بر واحد طول منبع حرارتی است [۹، ۱۱]. بنابراین:

$$-\nabla[k(\frac{\partial T}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial T}{\partial z} \hat{k})] = Q \quad (3)$$

در نهایت با اعمال شرایط مرزی توزیع دما به صورت رابطه زیر حاصل می‌شود [۹، ۱۱]:

$$T(x) = -\frac{P}{2\pi k l} \cdot \frac{1}{w} \int_{-\frac{w}{2}}^{\frac{w}{2}} \ln\left(\frac{\sqrt{(x-x')^2 + l^2}}{l}\right) dx' \quad (4)$$

که در آن، x بیانگر موقعیت گرم‌کن، l طول منبع حرارتی و w عرض سیم حسگر است. در رابطه‌ی ۳ توزیع میدان دمایی از جمع آثار میدان دمای پایا و جابه‌جایی طبیعی هوا به دست آمده است. اما، وقتی میدان صوتی باعث جریان هوا (جابه‌جایی اجباری) در محفظه‌ی میکروفولون شود، تابع هدایت حرارتی به صورت رابطه‌ی زیر ارائه می‌شود [۹، ۱۱].

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T \right) - k \nabla^2 T = Q \quad (5)$$

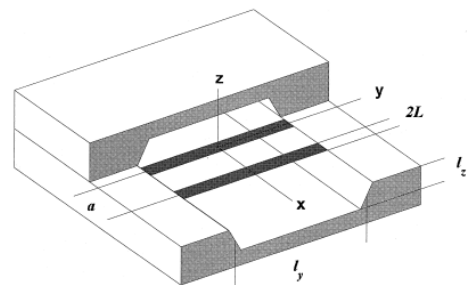
که در آن، $\vec{v}$ ، ρ ، c_p و Q به ترتیب سرعت، چگالی، ظرفیت حرارتی گاز (سیال هوا-آرمانی) و چگالی توان حرارتی (رابطه‌ی ۲) می‌باشند. اگر سرعت سیال نسبتاً کوچک باشد پاسخ معادله‌ی ۵ را می‌توان به صورت حاصل جمع توزیع دمای حالت پایا و یک اغتشاش کوچک (δT) که متناسب با سرعت ($\vec{v}$) است، در نظر گرفت [۹، ۱۱].

$$\frac{\partial \delta T}{\partial t} - D \nabla^2 \delta T = -\vec{v} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (6)$$

که در آن، D ضریب نفوذ حرارتی بوده و به صورت $k/\rho c_p$ تعریف می‌شود. در نهایت اختلاف دما بین دو سیم حسگر که در موقعیت‌های $x=d$ و $x=-d$ قرار دارند به صورت زیر تعریف می‌شود [۷].

$$\Delta T = \delta T(d, \cdot) - \delta T(-d, \cdot) = e^{i\gamma\pi f} \frac{v \cdot Px}{2\pi k l D} \left(\ln \frac{\sqrt{ifx}}{2} + \gamma - \frac{1}{2} \right) \quad (7)$$

پرداخته می‌شود و سپس شبیه‌سازی و نحوه‌ی اعمال آن مطرح خواهد شد. سپس اعتبارسنجی با حل تحلیلی، استقلال از شبکه، بررسی حساسیت با تغییر ابعاد و موقعیت سیم‌ها و جهت‌مندی حسگر بررسی خواهند شد. همچنین، تغییرات حساسیت در حالت افقی در بسامدهای ۳۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ هرتز بررسی خواهند شد. به علاوه مقایسه‌ی تغییرات حساسیت در دو حالت افقی و عمودی در بسامد ۳۰۰ هرتز انجام خواهند شد. پیکربندی استفاده شده در پژوهش حاضر مطابق با الگوی نشان داده شده در شکل ۱ می‌باشد.



شکل ۱ نمای داخلی مجرا و سطح مقطع میکروفولون با مؤلفه‌های هندسی. l_y : عرض مجرا، l_z : نصف ارتفاع مجرا، a : فاصله‌ی بین سیم‌ها و $2L$: عرض سیم‌ها [۱۸].

۲. معادلات و روابط حاکم

در این بخش معادلات و روابط تحلیلی و عددی برای توزیع دمای حسگر بیان خواهند شد. در قسمت معادلات تحلیلی، توزیع دما و حساسیت حسگر میکروفولون به صورت یک عبارت صریح و ساده که دارای دقت کافی برای کاربردهای مهندسی می‌باشد، ارائه می‌گردد. همچنین، در قسمت معادلات عددی معادلات استفاده شده در شبیه‌سازی عددی بیان می‌شود.

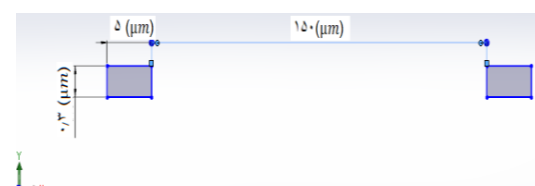
۲-۱. معادلات و روابط حاکم بر حل تحلیلی

در این بخش یک عبارت تحلیلی برای اختلاف دمای بین سیم‌های حسگر میکروفولون ارائه می‌شود. اگر گاز داخل محفظه‌ی میکروفولون حرکت نکند و بین سیم‌ها ثابت نگه داشته شود. آن‌گاه معادله‌ی توزیع دمای آن توسط معادله‌ی انتقال ایستگاهی زیر تعریف می‌شود [۹، ۱۱]:

$$-\nabla(k \nabla T) = Q \quad (1)$$

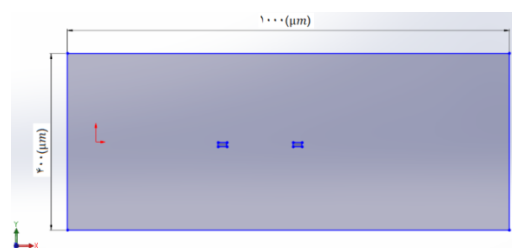
که در آن، $K = (KT)$ و Q به ترتیب ضریب رسانش

حل) شبکه‌بندی شود، ۲) شرایط مرزی، شرایط اولیه و معادلات برای هر یاخته (سلول) تعریف و اعمال شود و ۳) بعد از شبیه‌سازی، اطلاعات مورد نیاز از داده‌های تولیدشده، استخراج شود. دو مستطیل به عرض ۵ میکرومتر و ارتفاع ۰/۳ میکرومتر در فاصله‌ی ۱۵۰ میکرومتری، به‌عنوان مقطع سیم (شکل ۳) در جریان صوتی با بزرگی ۹۷ دسی‌بل (با دامنه‌ی فشار صوتی برابر با ۲ پاسکال)، قرار داده شده‌اند.



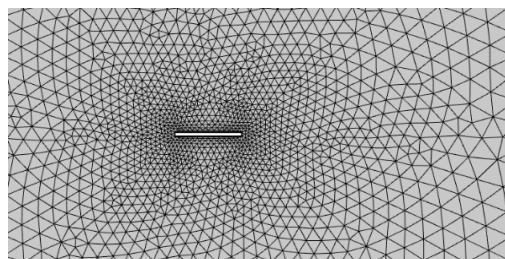
شکل ۳ طرح‌واره‌ی هندسی موردبررسی و محل قرارگیری سیم‌ها و مشخصات هندسی موردنظر.

مستطیلی به طول ۱ میلی‌متر و ارتفاع ۰/۴ میلی‌متر به‌عنوان میدان محاسباتی تعریف شده است (شکل ۴).



شکل ۴ دامنه‌ی محاسباتی در نظر گرفته در این پژوهش.

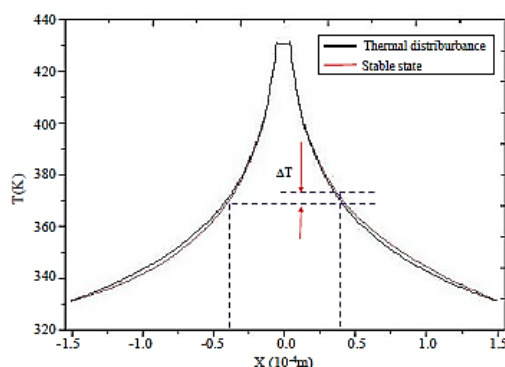
میدان حل با شبکه‌بندی سازمان‌یافته از عناصر سه وجهی در فضای سیال اطراف سیم‌ها تعریف شده است (شکل ۵).



شکل ۵ شبکه‌ی محاسباتی مورد استفاده در نزدیکی سیم‌های پشت سرهم.

تعداد یاخته‌های (سلول‌های) شبکه در حالت بهینه برابر ۴۵۸۳۶ می‌باشد، و در میانه‌ی مستطیل و اطراف سیم‌ها،

در شکل ۲ نیم‌رخ توزیع دما در اطراف گرم‌کن‌های حسگر میکروفلون، برای پیکربندی نشان داده شده در شکل ۱ ارائه شده است. در این شکل نشان داده شده که توزیع دمای وضعیت پایای سیال، می‌تواند به‌عنوان شرایط اولیه مناسبی جهت توصیف تغییر دمای ناشی از یک موج صوتی مورد استفاده قرار بگیرد. هم‌چنین نشان داده شده که با استفاده از تغییر دمای سیم‌های گرم‌شده، حساسیت حسگر به‌دست آمده است.



شکل ۲ تأثیر انتقال حرارت جابجایی ذرات بر منحنی توزیع دمایی بین دو سیم [۷].

۲-۲. معادلات و روابط حاکم بر حل عددی

معادلات حاکم استفاده شده در حل عددی به‌صورت روابط ۸ و ۹ می‌باشند. این روابط به‌ترتیب بیانگر معادلات اندازه حرکت و انتقال حرارت می‌باشند.

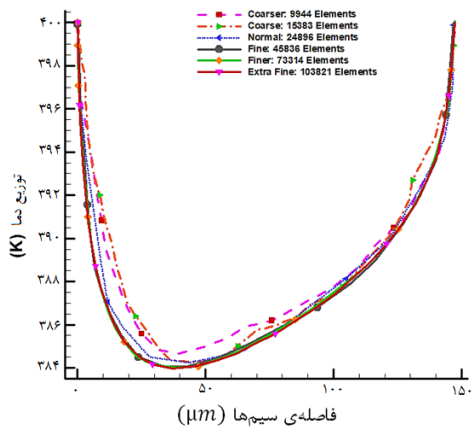
$$\begin{aligned} \rho(u, \nabla)u &= \nabla \cdot [-p + K] \\ \nabla \cdot (\rho u) &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} K &= \mu(\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3} \mu(\nabla \cdot u) \\ \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q &= Q \\ q &= -k \nabla T \end{aligned} \quad (9)$$

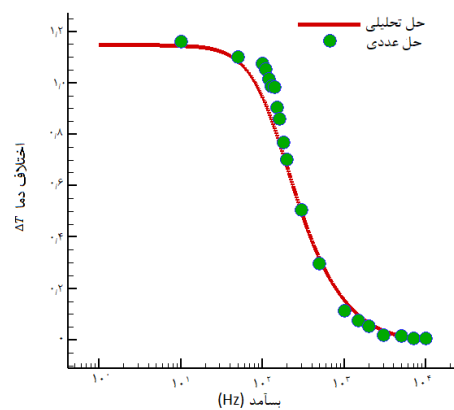
در تمامی معادلات بالا ρ چگالی سیال (kg/m^3)، C_p ظرفیت حرارتی سیال در فشار ثابت (J/kg.k)، k ضریب هدایت حرارتی (W/m.k)، u میدان سرعت سیال (m/s) و Q حرارت تولیدی (W/m^3) می‌باشند.

۳. روی‌کرد عددی

در این پژوهش، بررسی عددی با روش عناصر متناهی (نرم‌افزار تجاری کامسول) انجام شده است. برای شبیه‌سازی عددی رفتار سیال در اطراف حسگر باید سه مرحله‌ی متوالی صورت گیرد. ۱) حجم مورد نظر (میدان



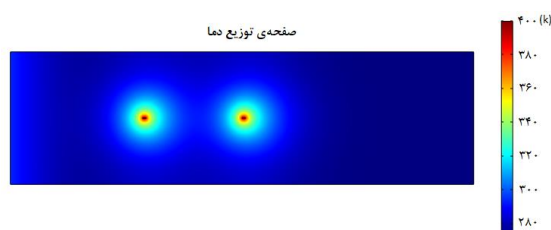
شکل ۷ منحنی استقلال از شبکه.



شکل ۸ اعتبارسنجی حل عددی با حل تحلیلی.

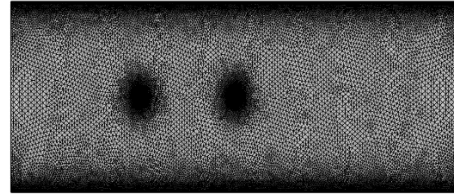
۵. نتایج

در مصورسازی نتایج تحلیل عددی از نرم‌افزار ترسیمی تک‌پلات استفاده شده است. همچنین، بازه‌های انتخابی برای محور افقی (بسامد) و سایر مقادیر روی محور عمودی مطابق با مقادیر بهینه در مقالات تجربی نامبرده می‌باشد. از این‌رو، اولین نتایج به‌دست آمده توزیع دما اطراف سیم‌های گرم‌شده می‌باشد که توزیع دمایی به‌صورت متقارن است. اما در حالتی که موج صوتی اضافه می‌شود، توزیع متقارن به خاطر انتقال حرارت جابجایی ناشی از موج صوتی، تغییر کرده و نامتقارن می‌شود (شکل ۹).



شکل ۹ توزیع دما بین دو حسگر در حالت پایا.

شبکه خیلی ریز و متراکم در نظر گرفته شده است. همچنین، برای دیواره‌ی سیم‌ها و دیواره‌ی میدان حل، از شبکه‌ی لایه مرزی استفاده شده است (شکل ۶).

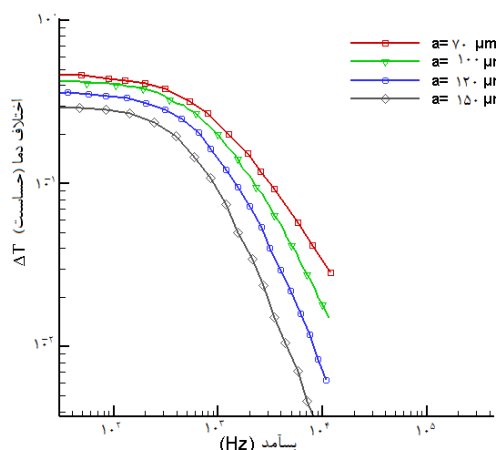


شکل ۶ شبکه‌ی استفاده شده برای دامنه‌ی محاسباتی در این پژوهش.

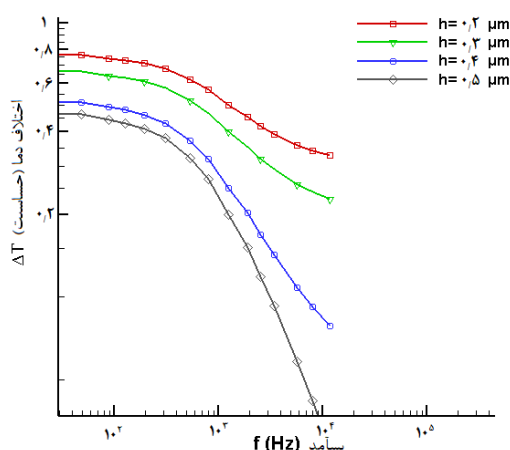
در ادامه برای هر عنصر میدان سیال، معادلات ناویه استوکس با شرط عدم‌لغزش دیواره‌ها و فرض بی‌دررو بودن حل شده‌اند. به‌علاوه شرایط شبیه‌سازی با فرض‌های دما ثابت و برابر ۲۹۳/۱۵ کلوین، لزجت دینامیکی ثابت و برابر 1.8859×10^{-5} مترمربع بر ثانیه، چگالی سیال برابر ۱۱۶۱۴ کیلوگرم بر مترمکعب و فشار برابر 1.0×10^5 پاسکال برای سیال ساکن اطراف حسگرها در نظر گرفته شده است. همچنین، حل عددی با معیار هم‌گرایی 10^{-6} و فرض گاز آرمانی انجام شده است. جهت انتخاب شبکه‌ی محاسباتی مناسب که در آن خطاهای عددی به حداقل برسد و از طرف دیگر هزینه‌ی محاسباتی کم‌تر شود، منحنی استقلال از شبکه برای توزیع دما بین دو حسگر رسم شده است. شبکه‌های مختلفی با تعداد گره‌های متفاوتی در محدوده‌ی بین ۹۹۴۴ تا ۱۰۳۸۲۱ یاخته، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. مطابق شکل ۷ هنگامی که تعداد یاخته‌های شبکه فراتر از ۴۵۸۳۶ می‌شود، تأثیر افزایش تعداد شبکه در دقت نتایج، قابل چشم‌پوشی است.

۴. اعتبارسنجی

برای اعتبارسنجی، مقایسه‌ی اختلاف دمایی به‌دست آمده از حل عددی با مقادیر حل تحلیلی بر حسب بسامد انجام شده است. با توجه به نتایج شکل ۸ مشاهده می‌شود که حل دوبعدی با حل تحلیلی تطابق خوبی دارند و به‌خوبی توانسته است اختلاف دما که به‌نوعی بیانگر حساسیت حسگر می‌باشد، را پیش‌بینی کند.



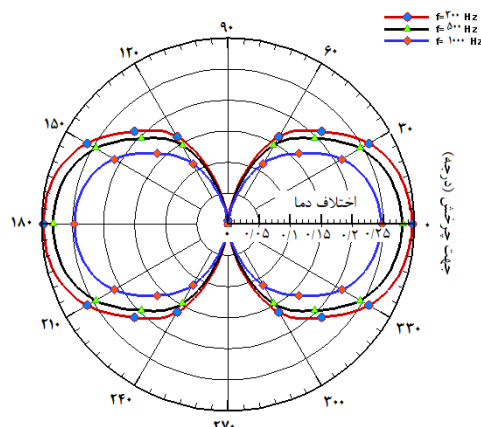
شکل ۱۱ منحنی پاسخ بسامدی با تغییر فاصله‌ی بین سیم‌ها
($a_1 = 150 \mu\text{m}$ و $a_1 = 120 \mu\text{m}$ ، $a_1 = 100 \mu\text{m}$ ، $a_1 = 70 \mu\text{m}$)



شکل ۱۲ منحنی پاسخ بسامدی با تغییر ارتفاع مقطع سیم‌ها
($h_1 = 0.5 \mu\text{m}$ و $h_1 = 0.4 \mu\text{m}$ ، $h_1 = 0.3 \mu\text{m}$ ، $h_1 = 0.2 \mu\text{m}$)

از این‌رو، به جهت صحت اعتبار نتایج عددی به‌دست آمده، کمیتی مانند حساسیت با مقادیر تحلیلی آن مقایسه شده که اختلاف اندکی بین نتایج پژوهش حاضر و حل تحلیلی آن مشاهده می‌شود. رفتار نمودار کاملاً منطبق بر نمودار حاصل از حل تحلیلی است. اندک اختلاف موجود هم قابل قبول است که می‌تواند ناشی از فرضیات اعمال شده در شبه‌سازی عددی باشد. در بررسی‌های عددی مشاهده شده که حساسیت تابع بسامد، موقعیت سیم‌ها نسبت به‌هم، ابعاد مقطع سیم‌های حسگر و نحوه‌ی قرارگیری سیم‌ها نسبت به جهت موج صوتی می‌باشد. هم‌چنین، حساسیت در بسامدهای کم، بیش‌تر است. علاوه بر آن، حساسیت در حالت افقی در زاویه‌های کم، نظیر ۰ و ۳۰ درجه، بیش‌تر است و با افزایش زاویه، کاهش می‌یابد.

علت این عدم تقارن، سرعت ذراتی است که در اثر موج صوتی به وجود آمده و معادل این است که یک عبارت به معادله‌ی استاندارد گرما اضافه شود. در ادامه، تغییرات حساسیت نسبت به تغییر زاویه حسگرها بررسی شده‌اند. وابستگی زاویه‌ای حساسیت (جهت‌مندی) در چند بسامد مختلف در شکل ۱۰ نشان داده شده است. با توجه به شکل زیر مشاهده می‌شود که تغییرات حساسیت برای همه‌ی بسامدها، متفاوت است و با افزایش بسامد حساسیت کاهش می‌یابد. تغییرات حساسیت وابسته به نحوه‌ی قرارگیری نسبت به جهت موج صوتی می‌باشد و با افزایش زاویه‌ی حسگر حساسیت کاهش می‌یابد و بیش‌ترین حساسیت برای حسگر در حالت افقی است.



شکل ۱۰ منحنی قطبی جهت‌مندی در بسامدهای ($f_1 = 300 \text{ Hz}$)
($f_2 = 500 \text{ Hz}$ و $f_3 = 1000 \text{ Hz}$)

در ادامه تغییر پاسخ بسامدی حسگر با تغییر فاصله‌ی بین سیم‌ها (a) و تغییر ارتفاع مقطع سیم‌ها (h) بررسی شده است. با توجه به شکل‌های ۱۱ و ۱۲، مشاهده می‌شود که، حساسیت با افزایش a و h کاهش می‌یابد و این کاهش به‌صورت یکنواخت می‌باشد.

۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش تحلیل عددی دوبعدی یک حسگر برداری صوتی جدید به‌نام میکروفولون انجام شده است. این حسگر قادر به اندازه‌گیری سرعت صوتی ذره به‌طور مستقیم با استفاده از اغتشاشات دمایی می‌باشد. بنابراین، وقتی سرعت ذرات و تغییرات فشار صوتی مشخص هستند، می‌توان پدیده‌های صوتی را به‌طور کامل شرح داد.

- [10] J. Van Honschoten, D.-R. Yntema, M. Dijkstra, V.-B. Svetovoy, R.-J. Wiegerink, M. Elwenspoek, "Analysis of packaging effects on the performance of the microflow," in DTIP 2006.
- [11] J. Van Honschoten, G.J. Krijnen, V. Svetovoy, H.E. De Bree, M.C. Elwenspoek, "Analytic model of a two-wire thermal sensor for flow and sound measurements," Journal of Micromechanics and Microengineering, vol. 14, p. 1468, 2004.
- [12] J. Van Honschoten, D.R. Yntema, R.J. Wiegerink, M. Elwenspoek, "Analysis of a three-dimensional particle velocity sensor for design optimization," Journal of Micromechanics and Microengineering, vol. 17, p. S137, 2007.
- [13] T. Basten, H. De Bree, D. Yntema, "An orientation calibration procedure for two acoustic vector sensor configurations," in 16th International Congress on Sound and Vibration, ICSV16, Kraków, Poland, 5-9 July, 2009.
- [14] M.T. Silvia, R.T. Richards, "A theoretical and experimental investigation of low-frequency acoustic vector sensors," in OCEANS'02 MTS/IEEE, pp. 1886-1897, 2002.
- [15] H.E. de Bree, "Acoustic vector sensors increasing uav's situational awareness," SAE Technical Paper 0148-7191, 2009.
- [16] H.E. De Bree, G. De Croon, "Acoustic vector sensors on small unmanned air vehicles," the SMi Unmanned Aircraft Systems, 2011.
- [17] H.E. De Bree, J.W. Wind, "The acoustic vector sensor: A versatile battlefield acoustics sensor," in Ground/Air Multisensor Interoperability, Integration, and Networking for Persistent ISR II, p. 80470C, 2011.
- [18] V.B. Svetovoy, I. Winter, "Model of the μ -flow microphone," Sensors and Actuators A: Physical, vol. 86, pp. 171-181, 2000.

به‌عنوان نتیجه‌گیری کلی، می‌توان گفت که حل عددی دوبعدی به‌خوبی می‌تواند کارکرد اصلی میکروفون را تشریح کند.

۷. تقدیر و تشکر

بدینوسیله از معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی شریف تقدیر و تشکر می‌گردد.

فهرست منابع

- [1] H.E. De Bree, "Microflow Technologies/Amhem School of Automotive Engineering, Tijs, E," SAE International, 2007.
- [2] O. Pjetri, R.J. Wiegerink, T.S. Lammerink, G. J. Krijnen, "A 2D acoustic particle velocity sensor with perfectly orthogonal sensitivity directions," Sensors and Actuators A: Physical, vol. 246, pp. 28-34, 2016.
- [3] H.E. De Bree, T.S.J. Lammerink, M.C. Elwenspoek, J.H.J. Fluitman, "Fluid flow measuring device as a microphone and system comprising such a microphone," Google Patents, 1999.
- [4] H. Schurer, P. Annema, H.E. De Bree, C.H. Slump, O.E. Herrmann, "Comparison of two methods for measurement of horn input impedance," Journal of the Audio Engineering Society, vol. 46, pp. 1119-1125, 1998.
- [5] H.E. De Bree, T. Lammerink, M. Elwenspoek, J. Fluitman, "Use of a fluid flow-measuring device as a microphone and system comprising such a microphone Patent PCT," NL95/00220, 1995.
- [6] T. Basten, H.E. De Bree, E. Tijs, "Localization and tracking of aircraft with ground based 3D sound probes," 2007.
- [7] J.-N. Shen, B.-l. Liu, L.-h. Zhu, M.-h. Xu, Y.-B. Zeng, H. Guo, "Numerical analysis of the performance of microflow with SHS configuration," in 2017 Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications (SPAWDA), pp. 283-287, 2017.
- [8] J.W. Van Honschoten, "Modelling and optimisation of the Microflow," 2004.
- [9] M. Mozafari, M.H. Hamidzadeh, R. Harbi Monfared, "Analytical and numerical study of a vector sensor using a FEM," presented at the The Fifth Congress of Acoustical Engineering Society of Iran (National), Iran, Tehran, 2019. (In Persian)

(Research Article)

Investigation of geometric parameters affecting the performance of acoustic vector sensors using a finite element method

M. Mozafari^{*1}, M.H. Hamidzadeh², H.R. Massah³

1. Department of Aerospace Engineering, Sharif University of Technology

2. Department of Mechanic and Aerospace Engineering, Islamic Azad University Tehran Science and Research Branch

3. Acoustical Engineering Society of Iran

Received: 2019/06/10, Accepted: 2021/03/02

Abstract

The purpose of this numerical analysis is to deduce the temperature difference between the two heated wires of the sensor due to an imposed particle velocity. In this research, the effects of sensor geometric parameters such as changing the dimensions of the wires, the distance between the wires and how wires are placed over the sound direction. The sensitivity of sensors is investigated numerically. Numerical studies show that sensitivity is a function of frequency. With frequency increase from 100 to 1000 Hz, it is sharply reduced and then monotonic to zero. Also, been observed that the sensitivity is related to the position of the wires relative to each other and the dimensions of the cross-section of the wires, and sensitivity decreases by increasing the distance between the wires and the height of the cross section of the wires. Further, the sensitivity angle dependence has been investigated, and the observed sensitivity is related to how the wires are placed over the sound wave propagation and in parallel mode by increasing angle from zero to 90 degree, the sensitivity decreases.

Keywords: Numerical analysis, Acoustic vector sensor, Microflow, Sensitivity.

pp. 44-50 (In Persian)

* Corresponding author E-mail: mostafamozafari@ae.sharif.ir