

(Research Article)

Long-term thermal analysis of the loudspeaker using COMSOL software, examining the impact of design parameters and providing optimization solutions

Amir Ghasemi , Mostafa Abedi*, Alireza Yazdi Zadeh

Department of Electrical and Computer Engineering, Shahid Beheshti University

Revised: 2024/11/02, Accepted: 2025/02/21

Abstract:

In this paper, a comprehensive thermal analysis of a loudspeaker is presented using COMSOL software. The aim of this research is to investigate the effect of design variables on thermal behavior and to provide solutions for optimization and prevention of overheating. First, the temperature behavior of the loudspeaker without the presence of a fluid was investigated. The coil temperature reached 380 Kelvin after 10 minutes, which could lead to component damage. By adding a fluid (air) as the cooling medium, the temperature was reduced to 312 Kelvin, a decrease of 68 Kelvin compared to the initial condition, and only a 19-degree increase from room temperature. The effect of variables such as input voltage, number of turns, and wire diameter on temperature and resistance was examined. The results showed that a 14-Kelvin increase in coil temperature led to a 7% increase in resistance, which negatively impacted electrical performance. Increasing the number of turns and wire diameter reduced current density and improved heat dissipation. The findings indicate that by carefully tuning design variables and using cooling mechanisms, thermal efficiency can be improved, leading to increased lifespan and sound quality.

Keywords: Thermal analysis of the loudspeaker, COMSOL software, Electrical modeling, Mechanical modeling, Thermal modeling.

pp. 26-35 (In Persian)

* Corresponding author E-mail: mo-abedi@sbu.ac.ir

تحلیل حرارتی بلندمدت بلندگو با استفاده از نرم‌افزار کامسول، بررسی تأثیر شبه‌سنگ‌های طراحی و ارائه راهکارهای بهینه‌سازی

امیر قاسمی، مصطفی عابدی* و علیرضا یزدی‌زاده

دانشکده برق و کامپیوتر دانشگاه شهید بهشتی

دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۱۲، پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۰۳

چکیده

در این مقاله، تحلیل حرارتی جامع بلندگو با استفاده از نرم‌افزار کامسول ارائه شده است. هدف از این پژوهش بررسی تأثیر شبه‌سنگ‌های طراحی بر رفتار حرارتی و ارائه راهکارهایی برای بهینه‌سازی و جلوگیری از گرم شدن بیش از حد است. در ابتدا، رفتار دمایی بلندگو بدون حضور سیال بررسی شد. دمای سیم‌پیچ پس از ۱۰ دقیقه به ۳۸۰ درجه کلوین رسید، که می‌تواند منجر به تخریب اجزا شود. با افزودن سیال (هوا) به‌عنوان محیط خنک‌کننده، دما به ۳۱۲ کلوین کاهش یافت، این تغییر دما نشان‌دهنده کاهش ۶۸ کلوین نسبت به حالت اولیه و افزایش تنها ۱۹ درجه نسبت به دمای اتاق است. تأثیر شبه‌سنگ‌های مانند ولتاژ ورودی، تعداد دور و قطر سیم‌پیچ بر دما و مقاومت بررسی شد. نتایج نشان دادند افزایش دمای سیم‌پیچ به ۱۴ درجه کلوین، مقاومت را حدود ۷ درصد افزایش می‌دهد، که بر عملکرد برقی تأثیر منفی دارد. افزایش تعداد دورها و قطر سیم‌پیچ، چگالی جریان را کاهش داده و اتلاف حرارت را بهبود بخشید. یافته‌ها نشان می‌دهند که با تنظیم دقیق شبه‌سنگ‌های طراحی و استفاده از سازوکارهای خنک‌کننده، می‌توان کارایی حرارتی را بهبود داد و به افزایش طول عمر و کیفیت صدا دست یافت.

کلیدواژه‌ها: تحلیل حرارتی بلندگو، نرم‌افزار کامسول، الگوسازی برقی، الگوسازی مکانیکی، الگوسازی حرارتی.

۱. مقدمه

بلندگوها دستگاه‌های برق‌صوتی پیچیده‌ای هستند که علامت برقی را به انرژی صوتی تبدیل می‌کنند [۱]. در طی سال‌های گذشته، بلندگوها با تحولات چشمگیری مواجه شده‌اند تا نیازهای متنوعی را در سامانه‌های صوتی مختلف برآورده کنند؛ از سامانه‌های اعلان عمومی و اطلاع‌رسانی گرفته تا سامانه‌های پیشرفته تقویت و پخش صدا در محیط‌های بزرگ همچون تالارهای تئاتر و سینما و همچنین کاربردهای متناظر با تلفن‌های همراه و لغو نوفه فعال^۱، که به کیفیت، پایداری و قدرت پخش بسیار بالایی نیاز دارند. بنابراین، شناخت هر چه عمیق‌تر کارکرد بلندگو تأثیر بسیار زیادی را در کاربردهای یادشده خواهد داشت [۲].

مفهوم بلندگو از اختراع تلفن توسط الکساندر گراهام بل در سال ۱۸۷۶ سرچشمه گرفت که از یک شکل خام بلندگو برای تبدیل برق به صدا استفاده کرد. عملکرد یک بلندگو با ارسال یک علامت به سیم‌پیچ برقی آغاز می‌شود و یک میدان مغناطیسی

ایجاد می‌کند که با میدان آهنربای دائمی تعامل دارد. این فعل‌وانفعال باعث می‌شود سیم‌پیچ صدا و دیافراگم (پرده حاجز) متصل به حرکت درآیند و با فشار هوا، امواج صوتی ایجاد کنند. نوع طراحی و مواد مورد استفاده در بلندگوها همچون استفاده از غشاهای الاستومتری^۲ دی‌الکتریک به‌طور قابل‌توجهی تکامل یافته است [۳-۱]. آنچه که در این میان اهمیت بسیار زیادی در توسعه و بکارگیری مواد جدید در بلندگوها دارد، نقش توزیع حرارتی در کل بلندگو است [۴].

بلندگوها هنگام تبدیل علامت برقی به صوتی انرژی زیادی را به گرما تبدیل می‌کنند. این تولید گرما اگر به‌درستی مدیریت نشود، باعث آسیب به قطعات بلندگو مانند سیم‌پیچ‌ها و دیافراگم‌ها (پرده‌های حاجز) می‌شود. از مهم‌ترین مسائل در این زمینه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

کاهش خطر آسیب حرارتی: سیم‌پیچ‌ها و دیگر اجزای داخلی بلندگو در اثر حرارت آسیب می‌بینند و این مسئله می‌تواند به کاهش عمر بلندگو و کاهش کیفیت صدای خروجی منجر شود.

¹ ANC; Active Noise Cancellation

² Elastomeric Membrane

* نویسنده پاسخگو: mo_abedi@sbu.ac.ir

فعال" کند. در این کار الگوسازی با استفاده از نرم‌افزار کامسول با رویکرد محاسباتی عنصر متناهی (اجزا محدود) انجام شده است، این روش در منابع متعدد علمی مورد استفاده قرار گرفته است [۱۵].

مهمترین اهداف این پژوهش عبارتند از:

۱. بررسی تغییر دمای طولانی مدت روی شبه‌سینج‌های الگو بلندگو به منظور استفاده در کاربردهای طولانی مدت مانند لغو نوفه فعال. به عنوان نمونه در پژوهشی که راوادی^۱ و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۰۹ میلادی جهت الگوسازی برقادینامیک بلندگو انجام دادند، نتایج برای کوتاه مدت ارائه شده‌اند و در طولانی مدت که تغییر شبه‌سینج‌ها چشمگیر می‌باشد، بررسی نشده است.

۲. الگوی غیرخطی و با الگوسازی تمام پدیده‌های مکانیکی، برقی، صوتی، مغناطیسی و حرارتی می‌باشد. در پژوهش‌های لیختی^۲ و گازولا^۳ که به ترتیب در سال‌های ۲۰۲۴ و ۲۰۲۵ میلادی انجام شده‌اند [۱۷ و ۱۸]، به منظور الگوسازی بلندگو تنها بخش‌های الگو برقی سیم‌پیچ و ارتعاش صفحه دیافراگم (برده حاجز) استفاده شده است. الگو بکار گرفته شده در این مقاله، غیرخطی و شامل تمام پدیده‌های مکانیکی، برق، صوتی، مغناطیسی و حرارتی می‌باشد.

۳. با در نظر گرفتن حرارت طولانی مدت و الگوسازی تمام پدیده‌های مذکور در بند قبل، تأثیر شبه‌سینج‌های مختلف از جمله ولتاژ ورودی، معادل تغییرات توان، ویژگی‌های سیم‌پیچ همچون تعداد دور و قطر سیم‌پیچ مسی روی توزیع دما مورد بررسی قرار گرفتند.

۲. مواد و روش

هدف اصلی از این پژوهش الگوسازی و تحلیل انتقال حرارت از سیم‌پیچ به هسته آهنی و سپس به آهنربا و محیط سیال اطراف آن است. به منظور تعریف دقیق مسئله، هندسه مورد نظر مطابق با شکل ۱ انتخاب شده است و با فرض تقارن محوری، مسئله به صورت دو-بعدی شبیه‌سازی می‌شود که نتایج حاصل را می‌توان به هندسه سه-بعدی تعمیم داد.

برای اجرای شبیه‌سازی، از ماژول‌های میدان‌های مغناطیسی و انتقال حرارت در جامدات در نرم‌افزار کامسول استفاده شده

تحقیقات متعددی این مشکل را بررسی کرده‌اند و از الگوسازی حرارتی برای بهبود عملکرد و پایداری بلندگو استفاده کرده‌اند. برای مثال، در تحقیقاتی مانند [۵-۷] الگوسازی حرارتی برای شناسایی نقاط داغ و جلوگیری از تجمع حرارت مورد استفاده قرار گرفته است.

بهبود کارایی و کاهش اعوجاج: گرما نه تنها به قطعات آسیب می‌زند، بلکه باعث تغییر خواص فیزیکی مواد مورد استفاده در بلندگوها می‌شود که این امر به ایجاد اعوجاج و کاهش کیفیت صدا منجر می‌شود. به همین دلیل، الگوهای حرارتی دقیق می‌توانند نقش مهمی در بهبود کارایی و کاهش اعوجاج داشته باشند. مطالعات [۲ و ۸] نشان می‌دهند که با بهبود الگوهای حرارتی می‌توان عملکرد بلندگوها را در ترازهای بالاتر و ولتاژها حفظ کرد.

بهینه‌سازی طراحی‌های جدید و کاهش مصرف انرژی: الگوسازی حرارتی هم‌چنین به طراحی و بهبود سامانه‌های خنک‌کننده کمک می‌کند. خنک‌سازی مناسب موجب می‌شود که انرژی کم‌تری هدر رود و اجزای بلندگو در دماهای بهینه فعالیت کنند. [۹ و ۱۰] در تحقیق خود با استفاده از الگوسازی حرارتی موفق شدند راهکارهای خنک‌کننده مناسب‌تری برای بلندگوهای قوی‌تر طراحی کنند که منجر به کاهش مصرف انرژی و افزایش طول عمر دستگاه شد.

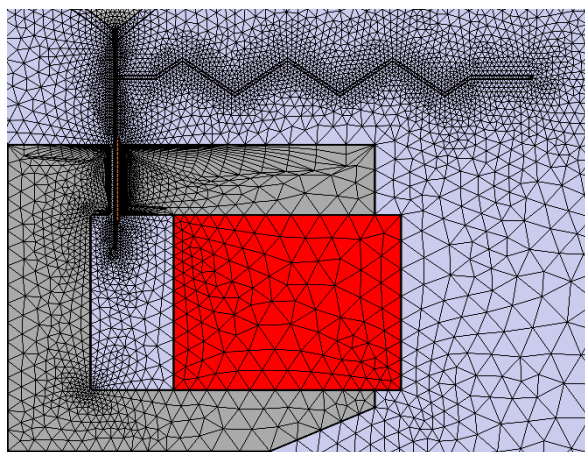
کاربردهای صنعتی و تجاری: با پیشرفت صنایع صوتی، تقاضا برای بلندگوهای کارآمدتر و مقاوم‌تر افزایش یافته است. شرکت‌های تولیدکننده به دنبال راه‌هایی هستند که بتوانند محصولات خود را با کیفیت بالاتر و با دوام بیش‌تر به بازار عرضه کنند. الگوسازی حرارتی یکی از ابزارهای اساسی برای این هدف است، و از آن در مراحل طراحی و بهینه‌سازی تجاری استفاده می‌شود. مطالعات [۱۱-۱۴] نشان می‌دهند که چگونه الگوهای حرارتی می‌توانند نقش مهمی در توسعه بلندگوهای با دوام و با کیفیت بالا برای کاربردهای خانگی و صنعتی ایفا کنند.

با توجه به نکات مطرح شده که حالی از لزوم آگاهی از نحوه توزیع دما در بلندگو هستند، الگوسازی حرارتی ضمن کمک به درک صحیح از گرمایش و توزیع حرارت در داخل بلندگو، می‌تواند کمک شایانی را به محققان در خصوص طراحی بلندگوهای پایدار خصوصاً در کاربردهای متناظر با "لغو نوفه

³ Gazzola

¹ Ravau

² Liechti



شکل ۲ الگو مش بندی استفاده شده در ساختار.

۱-۲. معادلات حاکم بر تحلیل حرارتی بلندگو

انتقال حرارت در مواد به روش انتقال تشعشعی، انتقال هدایتی و انتقال همرفتی انجام می شود. هر سه دسته این معادلات و تحلیل حرارتی در نرم افزار تعریف می شوند. در ادامه هر کدام از این روش ها بررسی شده است.

۱-۱-۲. انتقال تشعشعی

انتقال حرارت از یک سطح ماده از طریق تشعشع به دلیل انتشار تابش برقی مغناطیسی فروسرخ (مادون قرمز) از الکترون های روی سطح اتفاق می افتد. تابش می تواند از خلأ عبور کند و مقدار تابش به دمای مطلق بستگی دارد. تابش گرما به فضای آزاد با معادله استفان-بولتزمن به دست می آید [۸-۱۰]:

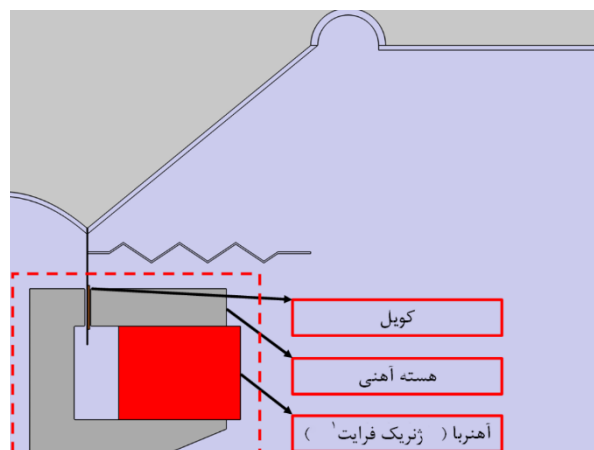
$$Q = \sigma AT^f \quad (1)$$

که در آن Q نرخ انتقال حرارت بر حسب وات، A مساحت جسم کاملاً تابنده بر حسب مترمربع است. σ ثابت استفان بولتزمن است و برابر با 5.669×10^{-8} وات بر مترمربع بر کلونین به توان چهار و T دمای مطلق سطح بر حسب کلونین است. برای جریان گرما بین دو سطح، باید گرمای ساطع شده و جذب شده توسط ترازهای را در نظر بگیریم. برای دو سطح A_1 و A_2 ، تبادل تابش Q به صورت زیر محاسبه می شود:

$$Q = \sigma A_1 \xi_1 F_{1-2} (T_1^4 - T_2^4) \quad (2)$$

که در آن T_1 دمای مطلق سطح یک و T_2 دمای مطلق سطح دو بر حسب کلونین است. ξ_1 میزان انتشار سطح یک است F_{1-2}

است. ماژول میدان های مغناطیسی به منظور توصیف ویژگی های برقی مغناطیسی سیم پیچ به الگو افزوده شده و ماژول انتقال حرارت برای تحلیل توزیع دمایی در ساختار و محاسبه میزان گرمای منتقل شده در اجزا به کار گرفته می شود. همچنین، جریان ۲ آمپر به عنوان جریان تحریک، تعداد ۱۰۰۰ دور برای سیم پیچ و رسانایی $10^7 \times 6$ زیمنس بر متر برای مس در نظر گرفته شده اند.



شکل ۳ طراحی هندسه ساختار.

برای مش بندی ساختار (مطابق شکل ۲)، از مش های مثلثی استفاده شده است. توزیع مش بندی به گونه ای طراحی شده که در ناحیه تقاطع هسته آهنی و سیم پیچ مسی، به دلیل تراکم بالای شار مغناطیسی، از مش بندی با دقت بالا (ریز) بهره گرفته شود. این روش مش بندی بر اساس اهمیت نواحی مختلف در شبیه سازی تنظیم شده است؛ به طوری که در نواحی دورتر از سیم پیچ، تراکم مش نسبت به اطراف سیم پیچ کاهش یافته است تا بهینه سازی محاسبات و کاهش زمان شبیه سازی ممکن شوند. برای شبیه سازی در نرم افزار کامسول، شبه سنج های متعددی برای تعریف خصوصیات مواد در نظر گرفته می شوند، از جمله ظرفیت گرمایی ویژه، هدایت برقی، و هدایت حرارتی. هر یک از این شبه سنج ها با توجه به تغییرات دما، مقادیر متفاوتی پیدا می کنند. اعمال این تغییرات دمایی در شبیه سازی منجر به محاسبه دقیق تر توزیع دما در بخش های مختلف ساختار و در بازه های زمانی گوناگون می شود. داده های مربوط به شبه سنج های مواد از منابع معتبر [۳-۷] استخراج شده اند تا صحت و دقت الگوسازی به حداکثر برسد.

¹ Generic ferrite

ساده شده مناسب برای جریان هوای آرام و آشفته با سرعت V که از روی صفحه مسطح عبور می کند در معادلات زیر ارائه شده است [۱۰].

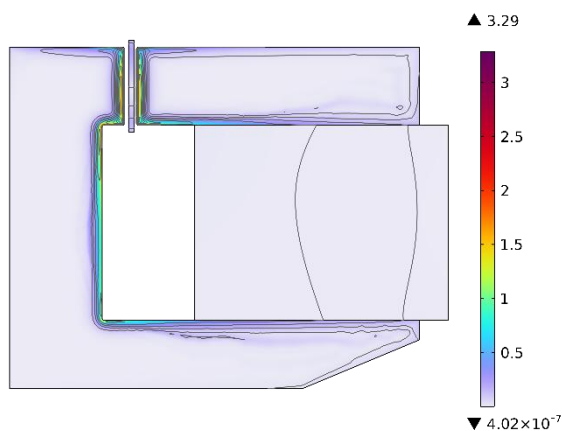
$$H_{fc} = 3/9 \sqrt{\left(\frac{V}{L}\right)} \Delta T \quad (5)$$

$$H_{fc} = \frac{210}{L} (2/71 (vL)^{0.8} - 1) \Delta T \quad (6)$$

توجه به این نکته مهم است که آشفتگی ممکن است باعث ایجاد اعوجاج صدای تولید شده به صورت ایجاد بسامدهای اضافی و کاهش کیفیت صدا شود.

۳. نتایج

پس از تحلیل ساختار، نتایج حاصل شامل توزیع شار مغناطیسی و توزیع دمایی در بازه زمانی ۰ تا ۶۰۰ ثانیه به دست آمد. با توجه به اینکه شار مغناطیسی در طول زمان تغییر قابل توجهی ندارد، توزیع آن در زمان های مختلف، از جمله ثانیه های ۰ و ۶۰۰، تقریباً یکسان است. بنابراین، توزیع شار مغناطیسی در شکل ۳ برای زمان ۶۰۰ ثانیه نشان داده شده است. در نزدیکی سیم پیچ مسی، توزیع شار مغناطیسی بالاتر است که این امر به دلیل نقش سیم پیچ به عنوان منبع تولید شار مغناطیسی است. با فاصله گرفتن از سیم پیچ، شدت توزیع شار مغناطیسی کاهش می یابد. ساختار اولیه شبیه سازی بدون در نظر گرفتن محیط سیال اطراف در نظر گرفته شده است، اما در واقعیت، حضور سیال در اطراف ساختار ضروری است؛ زیرا بخشی از حرارت تولید شده در ساختار از طریق سیال به محیط منتقل می شود.



شکل ۳ توزیع شار مغناطیسی در ثانیه ۶۰۰.

ضریب دید است که میزان مشاهده سطح دو را در سطح یک به یک مقدار کمی تبدیل می کند $(F_{1-2} \leq 1)$ [۸-۱۰].

۲-۱-۲. انتقال هدایتی

رسانایی انتقال گرما به شکل حرکت جنبشی مولکول ها در یک ماده است. رسانایی در جامدات، مایعات و گازها اتفاق می افتد، اما در سیالات، همرفت تأثیر بسیار مهم تری دارد. جریان گرمایی ناشی از رسانایی با قانون فوریه توصیف می شود [۸-۱۰]:

$$Q = -KA \frac{dT}{dx} \quad (3)$$

که در آن k هدایت حرارتی ماده (وات بر متر بر درجه سیلسیوس) و dT/dx گرادیان دما (درجه سیلسیوس بر متر) هستند.

۲-۱-۳. انتقال همرفتی

همرفت، فرآیند انتقال به دلیل حرکت سیال است. در همرفت طبیعی، حرکت سیال کاملاً ناشی از نیروهای شناوری حاصل از تغییرات چگالی در سیال است. انتقال حرارت همرفتی با استفاده از تحلیل ابعادی برای توسعه فرمول های همبستگی تجربی برای اشکال هندسی مختلف برآورد می شود.

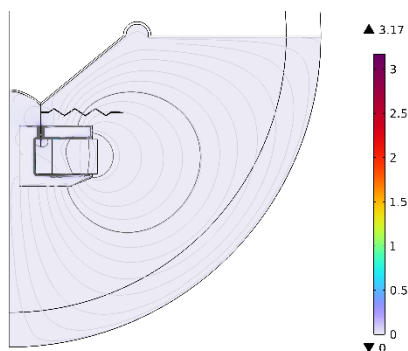
این فرمول ها ضریب انتقال حرارت، H_{nc} (وات بر مترمربع بر درجه سیلسیوس) را به هندسه، دما و خواص سیال مرتبط می کنند. یک معادله ساده شده مناسب برای خنک کردن هوا روی صفحه صاف عمودی [۸-۱۰] به شکل زیر توصیف می گردد:

$$H_{nc} = 1.41 (\Delta T/L)^{0.25} \quad (4)$$

جایی که ΔT اختلاف دما بین سطح صفحه و دمای محیط سیال و L طول مشخصه است.

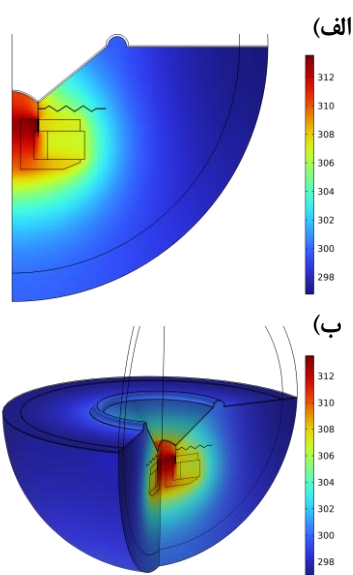
همرفت اجباری شامل انتقال گرما از طریق حرکت سیال است که توسط یک نیروی خارجی هدایت می شود. هنگامی که سرعت سیال زیاد است، آشفتگی (الگوی حرکت آشوبناک جریان سیال در مقابل جریان آرام و خطی سیال) ایجاد می شود. در جریان آشفته، اختلاط هوای سرد و گرم کارآمدتر می شود و منجر به افزایش قابل توجهی در انتقال حرارت می شود.

مشابه همرفت طبیعی، همبستگی های تجربی متعددی برای تخمین ضریب انتقال حرارت، H_{fc} ، با در نظر گرفتن اشکال هندسی مختلف، خواص سیال و سرعت وجود دارد. معادلات



شکل ۵ توزیع شار مغناطیسی در ساختار نهایی در ثانیه ۶۰۰.

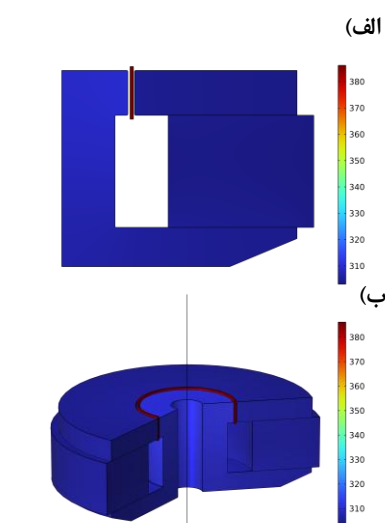
در زمان اولیه، دمای کل ساختار با دمای محیط برابر بوده و در حدود ۲۹۳ کلوین است؛ اما پس از گذشت ۶۰۰ ثانیه، توزیع دما در ساختار در بازه‌ای بین ۲۹۸ تا ۳۱۲ درجه کلوین متغیر است. بیش‌ترین دما در نواحی نزدیک به سیم‌پیچ مسی، هسته آهنی و آهن‌ریا مشاهده می‌شود و با افزایش فاصله از این اجزا، دما به تدریج کاهش می‌یابد.



شکل ۶ توزیع شار مغناطیسی در ساختار نهایی در ثانیه ۶۰۰.

نمودار تغییرات دما در سیم‌پیچ مسی در بازه زمانی ۰ تا ۶۰۰ ثانیه در شکل ۷ نمایش داده شده است. با توجه به توضیحات مربوط به توزیع دما، سیم‌پیچ مسی به عنوان اصلی‌ترین منبع تولید گرما در بلندگو نقش دارد. از این‌رو، بررسی مقاومت حرارتی سیم‌پیچ ضروری است، زیرا این عامل به‌طور مستقیم بر افت توان و کاهش کارایی سامانه تأثیرگذار است.

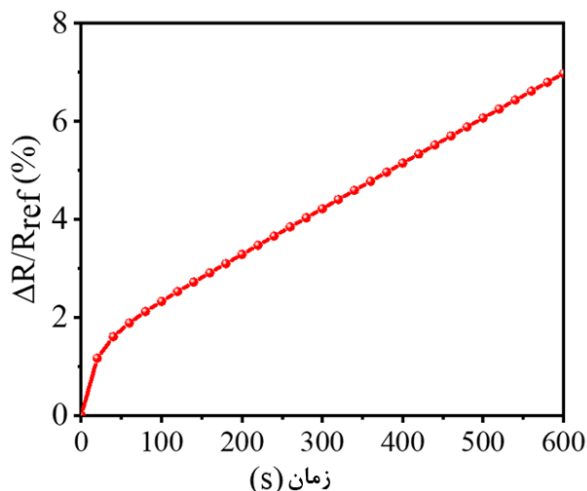
شکل‌های ۴ (الف) و (ب) توزیع دمایی ساختار را در زمان ۶۰۰ ثانیه به ترتیب در حالت‌های دو-بعدی و سه-بعدی نمایش می‌دهند. در زمان اولیه (صفر ثانیه)، دما با دمای اتاق برابر است؛ با گذشت زمان، همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد، دما به تدریج افزایش می‌یابد. در زمان ۶۰۰ ثانیه، دما در محدوده‌ای بین ۳۱۰ تا ۳۸۰ درجه کلوین متغیر است. بیش‌ترین دما در نزدیکی سیم‌پیچ مشاهده می‌شود که این امر به دلیل تولید حرارت ناشی از سیم‌پیچ است؛ با فاصله گرفتن از سیم‌پیچ، توزیع دمایی در ساختار کاهش می‌یابد.



شکل ۴ تغییرات نسبت حجمی در راستای ضخامت.

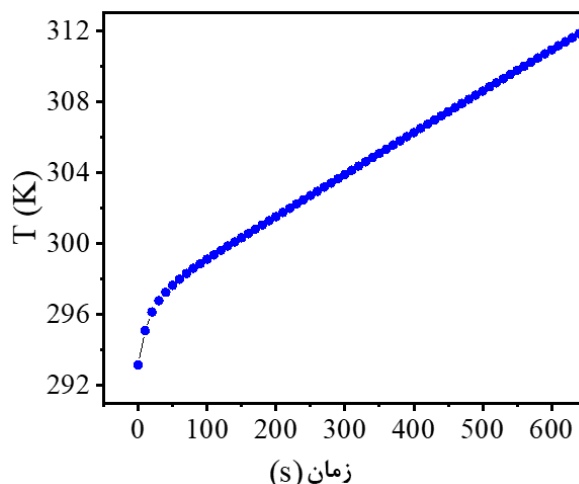
ساختار نهایی مطابق با طراحی یک بلندگوی واقعی ایجاد شده و طرح‌واره نهایی آن در شکل ۵ نمایش داده شده است. در این ساختار، تمامی اجزای فیزیکی مطابق با نمونه واقعی بلندگو الگوسازی شده‌اند و محیط سیال اطراف به‌عنوان هوا در نظر گرفته شده است. به دلیل ناچیز بودن تغییرات حرارتی و مغناطیسی در سایر نواحی، از شبیه‌سازی محیط‌های اضافی صرف‌نظر شده است. همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، توزیع شار مغناطیسی در ساختار نهایی به‌صورتی است که بیش‌ترین تراکم شار در اطراف سیم‌پیچ مسی قرار دارد؛ این تراکم با فاصله گرفتن از سیم‌پیچ به تدریج کاهش می‌یابد و میدان مغناطیسی در نواحی دورتر کم‌تر می‌شود. توزیع دمای سه-بعدی در ساختار نهایی در زمان ۶۰۰ ثانیه به‌صورت دو-بعدی و سه-بعدی، به ترتیب در شکل‌های ۶ (الف) و (ب) نمایش داده شد.

این تغییرات نشان دهنده تأثیر دما بر مقاومت سیم پیچ بوده و تأییدی بر رابطه خطی مقاومت با دما برای رساناهایی مانند مس است.



شکل ۷ درصد تغییرات مقاومت سیم پیچ مسی نسبت به زمان.

افزایش دمای سیم پیچ موجب افزایش مقاومت آن می شود که در نتیجه، منجر به کاهش بازدهی و ایجاد افت توان در سامانه می گردد.



شکل ۸ نمودار دما در سیم پیچ مسی بعد از گذشت ۶۰۰ ثانیه.

۴. بحث

با افزایش ولتاژ ورودی به سیم پیچ، جریان عبوری از آن افزایش می یابد و در نتیجه، میزان گرمای تولید شده نیز افزایش پیدا می کند. این افزایش گرما موجب بالا رفتن دمای سیم پیچ شده و خصوصیات مقاومت و امپدانس آن را تغییر می دهد. برای جلوگیری از داغ شدن بیش از حد سیم پیچ و حفظ عملکرد پایدار و قابل اعتماد بلندگو، پایش و مدیریت این تغییرات ضروری است. شکل ۸ نمودار تغییرات دما بر حسب زمان را برای مقادیر مختلف ولتاژ ورودی نمایش می دهد. همان طور که در نمودار مشاهده می شود، با افزایش ولتاژ، توان ورودی افزایش یافته و به دنبال آن، دمای سیم پیچ نیز افزایش می یابد. کاهش دمای سیم پیچ در بلندگو با افزایش تعداد دورهای سیم پیچ، همان طور که در شکل ۹ نشان داده شده است، به عوامل کلیدی مرتبط با مقاومت سیم پیچ، تولید گرما و کارایی (راندمان) سیم پیچ مرتبط است.

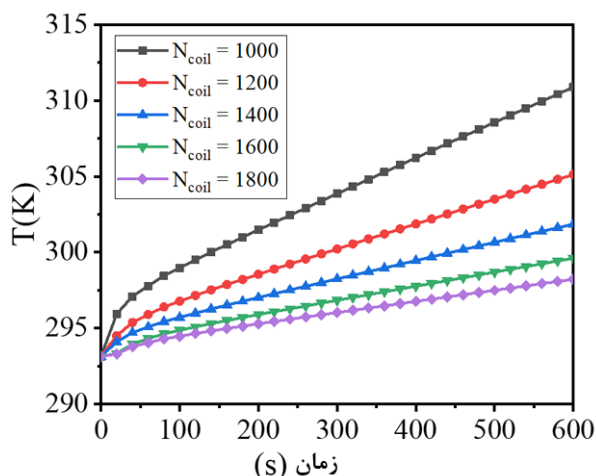
با افزایش تعداد دورها، اندوکتانس سیم پیچ نیز افزایش می یابد که به تشکیل یک میدان مغناطیسی قوی تر برای جریان مشابه منجر می شود. میدان مغناطیسی قوی تر کارایی تبدیل انرژی در بلندگو را بهبود می بخشد و انرژی کمتری به صورت گرما هدر می رود، که در نتیجه منجر به کاهش دمای سیم پیچ می شود.

به منظور ارزیابی صحت نتایج به دست آمده برای محاسبه دمای بلندگو و تحلیل حرارتی بلندگو، اثر افزایش دما بر روی مقاومت سیم پیچ بلندگو به عنوان معیار در نظر گرفته می شود. رابطه بین مقاومت یک رسانا مانند مس و دمای آن با استفاده از رابطه زیر به دست می آید:

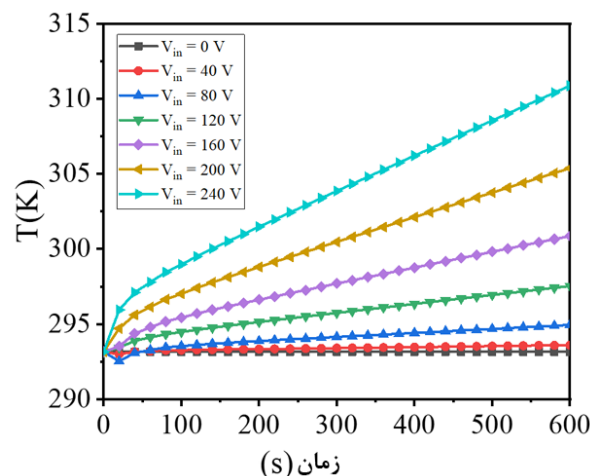
$$R = R_{ref}[1 + \alpha(T - T_{ref})] \quad (7)$$

که در آن R مقاومت در دمای T بر حسب اهم است. همچنین، R_{ref} مقاومت در دمای مرجع T_{ref} بر حسب اهم را نشان می دهد. α ضریب مقاومت دمایی برای ماده (برای مس، تقریباً 0.00393 بر درجه سلسیوس) و T دمای فعلی بر حسب درجه سلسیوس و T_{ref} دمای مرجع که در این شبیه سازی 20 درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است. این رابطه نشان می دهد که با افزایش دما، مقاومت مس نیز به طور خطی افزایش می یابد. برای سیم پیچ مسی در بلندگوها، این افزایش مقاومت موجب افت توان و کاهش بازدهی سامانه خواهد شد.

در شکل ۷ با استفاده از ابزارهای اندازه گیری کامسول مقاومت سیم پیچ نشان داده شده است. مشاهده می شود که تغییر مقاومت سیم پیچ نسبت به مقاومت اولیه حدود 7 درصد افزایش یافته است. این افزایش در بازه زمانی 10 دقیقه و در نتیجه افزایش دمایی معادل 14 درجه کلونین رخ داده است.



شکل ۹ تغییرات دمای سیم پیچ مسی در تعداد دورهای مختلف سیم پیچ.



شکل ۸ تغییر دمای سیم پیچ مسی در ولتاژهای مختلف.

شبه سازی های وابسته به زمان، رفتار پویا را نشان می دهند و نحوه واکنش بلندگو در هنگام راه اندازی، استفاده طولانی مدت و خنک شدن را هم نشان می دهند. بلندگوهای دنیای واقعی در داخل محفظه ها کار می کنند. وجود هوا یا گازهای دیگر بر رفتار حرارتی تأثیر می گذارد. طراحی محفظه باید گردش سیال و اتلاف گرما را در نظر بگیرد.

هم چنین، گرمای بیش از حد می تواند اجزا را تخریب کند و کیفیت و طول عمر صدا را تحت تأثیر قرار دهد. یافته های ما بینش هایی را برای تنظیم آستانه های دمایی مناسب ارائه می دهند.

هم چنین، افزایش تعداد چرخش سیم در یک سیم پیچ بلندگو به طور کلی منجر به کاهش دما به دلیل افزایش لندوکتانس و بازده مغناطیسی، کاهش چگالی جریان، بهبود قابلیت های اتلاف حرارت و تغییرات دینامیکی در مقاومت با دما می شود. این عوامل در مجموع به حفظ دمای عملیاتی پایین تر در سیم پیچ ها با تعداد دور بیش تر کمک می کنند.

استفاده از رویکرد بررسی جامعی که در این مقاله اتخاذ شده است، موجب تخمین دقیق تر پژوهش هایی از سازوکار بلندگو می شود که در گذشته توسط دیگر محققان صورت پذیرفته است.

به عنوان نمونه، پژوهش گازالا [۱۸] در حالی که یک تحلیل مناسب از ناپایداری های غیرخطی در تحریک پیزوالکتریک و اثرات هندسی در الگوسازی غیرخطی بلندگوهای ممز با

علاوه بر این، با افزایش تعداد دورها، جریان موجود در سیم پیچ بین تعداد بیشتری از حلقه های سیم توزیع می شود که چگالی جریان (میزان جریان در واحد سطح) را در هر دور کاهش می دهد.

کاهش چگالی جریان، به نوبه خود، باعث کاهش گرمایش مقاومتی می شود که اصلی ترین عامل افزایش دما در سیم پیچ هاست. این کاهش گرمایش مقاومتی به کاهش کلی دمای سیم پیچ و بهبود کارایی و طول عمر بلندگو کمک می کند.

وجود سیال در ساختار بلندگو به طور قابل توجهی بر رفتار حرارتی آن تأثیر می گذارد. هنگامی که سیال وارد می شود، انتقال حرارت از طریق همرفتی انجام می شود. این سیال، گرما را از اجزای بلندگو (هسته آهنی، آهنربا و سیم پیچ) جذب کرده و آن را با خود می برد. این فرآیند، افزایش دما را تعدیل می کند و از گرم شدن بیش از حد جلوگیری می کند.

انتخاب مواد به طور قابل توجهی بر عملکرد حرارتی تأثیر می گذارد. مواد آهنی، آهنربا و سیم پیچ دارای رسانایی حرارتی متفاوتی هستند. درک این ویژگی ها به مهندسان اجازه می دهد تا موادی را انتخاب کنند که یکپارچگی ساختاری را با اتلاف گرمای کارآمد، متعادل کند.

مقاومت حرارتی در فصل مشترک مواد (به عنوان مثال، بین سیم پیچ و هسته آهنی) بر جریان حرارت کلی تأثیر می گذارد. به حداقل رساندن مقاومت سطحی، رسانایی حرارتی را بهبود می بخشد. مطالعه ما تطور (تکامل) دما را در طول زمان در نظر گرفت.

تولیدی کم‌تری دارد که این امر به بهبود کارایی حرارتی کمک شایانی می‌کند. مقاومت حرارتی در فصل مشترک مواد، مانند بین سیم‌پیچ و هسته آهنی، نیز باید به دقت بررسی و بهینه‌سازی شود.

موادی با رسانایی حرارتی بالا می‌توانند انتقال حرارت بین اجزا را بهبود بخشیده و از افزایش دمای موضعی جلوگیری کنند. علاوه بر این، طراحی محفظه باید به گونه‌ای باشد که گردش سیال درون آن به خوبی صورت گیرد تا حرارت به طور مؤثری از سامانه خارج شود.

با توجه به این یافته‌ها، توصیه می‌شود که طراحان بلندگو در طراحی‌های خود، این عوامل را به‌طور جامع در نظر بگیرند تا بتوانند محصولاتی با کارایی حرارتی بهینه‌تر و طول عمر بالاتر تولید کنند. این رویکردها می‌توانند به توسعه بلندگوهای منجر شوند که در برابر شرایط عملیاتی دشوار مقاومت بیش‌تری داشته باشند و کیفیت صدای مطلوب‌تری را ارائه دهند.

تقدیر و تشکر

در پایان از تمامی افرادی که به هر شکلی در این مسیر به ما یاری رساندند، صمیمانه قدردانی می‌نماییم و برای آنها آرزوی سربلندی داریم.

تضاد منافع

مقاله ارائه شده فاقد هرگونه تضاد منافع می‌باشد.

فهرست منابع

- [1] A. Mäkilvirta, "Loudspeaker Design and Performance Evaluation", Handbook of Signal Processing in Acoustics, Springer, pp. 649-667, 2008.
- [2] J. Seo, C. Kim, J. Lee, M. Lee, M. Patil, "Numerical study on magneto-acoustic thermal characteristics of micro-speaker for mobile phones", International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 164, pp.120479, 2023.
- [3] C. Shi, W. Gan, "Development of parametric loudspeaker", IEEE Potentials, vol. 29, no. 6, pp. 20-24, 2010.

استفاده از روش تخمین اعوجاج هارمونیک کل^۱ ارائه داده است، اما یک الگوسازی کامل از بلندگوهای برقی دینامیکی که شامل تمام جنبه‌های چندرشته‌ای باشد، معرفی نشده است و شبیه‌سازی‌ها با آزمون تجربی نیازمند توافق بیش‌تری هستند. علاوه بر این، در [۱۹] بهینه‌سازی مدارهای مغناطیسی بلندگو با استفاده از شبیه‌سازی فای‌ام^۲ انجام شده است. این درحالی‌است که با ترکیب الگوی جامع معرفی‌شده در این مقاله که شامل ترکیب زیرسامانه‌های برقی مغناطیسی، سیالاتی و مکانیکی است، الگو می‌توانست یک (نیم‌رخ) پروفایل اعوجاج دقیق‌تر ارائه دهد که این کار باعث بهبود پاسخ بسامد پایین و شناسایی مصنوعات^۳ اعوجاج مرتبه بالاتر تأثیرگذار بر کیفیت صدا می‌شد.

هم‌چنین، ترکیب این دو رهیافت به طراحان کمک کند تا بهترین مواد پیزوالکتریک، ساختارهای پرده حاجز (دیافراگم) و هندسه‌های محفظه را برای حداکثر کارایی و حداقل اعوجاج انتخاب کرده و اثر دما، رطوبت و خستگی مواد بر عملکرد بلندمدت مورد بررسی قرار گیرد تا از این روش بهبود عملکرد صوتی بلندگو در شرایط واقعی حاصل شود.

۵. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، از طریق شبیه‌سازی‌های پیچیده حرارتی در نرم‌افزار کامسول، عوامل متعددی که بر رفتار حرارتی بلندگو تأثیر می‌گذارند، مورد بررسی قرار گرفتند. مطالعه ما نشان داد که استفاده از جریان سیالات در محیط بلندگو به‌طور چشمگیری می‌تواند انتقال حرارت را تسهیل بخشیده و از افزایش بی‌رویه دما جلوگیری کند.

بررسی‌ها هم‌چنین تأکید کردند که افزایش تعداد دور سیم‌پیچ می‌تواند به کاهش چگالی جریان و در نتیجه کاهش دما کمک کند. راهکارهای خنک‌کننده مورد بحث در این مطالعه، شامل بهبود طراحی محفظه بلندگو، استفاده از مواد با رسانایی حرارتی بهینه و افزایش تعداد دور سیم‌پیچ بودند.

هر یک از این راهبردها می‌تواند به تنظیم دقیق‌تر جریان حرارتی کمک کرده و اثرات ناشی از تجمع گرما را به حداقل برساند. به‌ویژه، تعداد دور سیم‌پیچ بیش‌تر نه تنها اندوکتانس را افزایش می‌دهد، بلکه به دلیل کاهش چگالی جریان، گرمای

³ Artifacts

¹ THD; Total Harmonic Distortion

² FEM; Finite Element Method

- [12] J. Mecking, "Investigating the thermal properties of microspeakers", 19th International Student Conference on Electrical Engineering, CTU Prague, 2015.
- [13] S. Kim, "High Power Micro-speaker", KR101187510B1, 2011.
- [14] D. Button, "A loudspeaker motor structure for very high power handling and high linear excursion ", Journal of the Audio Engineering Society ,vol. 36, no. 10, pp. 788–796, 1988.
- [15] M. Dodd, "The Application of FEM to the analysis of loudspeaker motor thermal behaviour", Audio Engineering Society Convention, vol. 112, 2002.
- [16] R. Ravaud, G. Lemarquand, T. Roussel, "Time-varying non linear modeling of electrodynamic loudspeakers", Applied Acoustics, Vol. 70, no. 3, pp. 450-457, 2009.
- [17] R. Liechti, "Equivalent electrical circuits for electroacoustic MEMS design", Journal of Micromechanics and Microengineering, vol. 34, no. 8, pp. 1-23, 2024.
- [18] C. Gazzola, A. Corigliano, V. Zega, "Total harmonic distortion estimation in piezoelectric micro-electro-mechanical-system loudspeakers via a FEM-assisted reduced-order-model", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 222, pp. 111762, 2025.
- [19] B. Sciarrone, "Topologic Optimization of Magnetic Circuits in Loudspeakers", Thesis, Politecnico Milano, 2022.
- [4] M. Colloms, "High Performance Loudspeakers: Optimising High Fidelity Loudspeaker Systems", John Wiley & Sons, 2018.
- [5] A. Hill, "Voice Coil Temperature in Loudspeaker Performance: Causes, Effects and Prevention Techniques", M.Sc. Dissertation, University of Edinburgh, UK, 2008.
- [6] W. Klippel, "Nonlinear modeling of the heat transfer in loudspeakers", Journal of Audio Engineering Society Convention, vol. 114, 2003.
- [7] T. Hsu, K. Poornima, "Loudspeaker failure modes and error correction techniques", Applied Acoustics, vol. 62, no. 6, pp. 717-734, 2001.
- [8] J. Hargreaves, J. Hipperson, D. Wong-McSweeney, N. O'Doherty, "Adventures in high intensity acoustic testing: A loudspeaker system for small-scale tests", Conference of Reproduced Sound, vol. 45, 2023.
- [9] J. Seo, M. Patil, S. Panchal, M. Lee, "Numerical investigations on magnetohydrodynamic pump based microchannel cooling system for heat dissipating element", Symmetry, vol. 12, no. 10, pp. 1713, 2020.
- [10] G. Hill, "Loudspeaker Modelling and Design: A Practical Introduction", Routledge, 2018.
- [11] C. Ionescu, N. Codreanu, V. Golumbeanu, P. Svasta, "Thermal simulation of a high power loudspeaker", 28th International Spring Seminar on Electronics Technology: Meeting the Challenges of Electronics Technology Progress, 2005.