

(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 کلون رسید، که می‌تواند منجر به تخریب اجزا شود. با افزودن سیال (هوا) به‌عنوان محیط خنک‌کننده، دما به ۳۱۲ کلون کاهش یافت، این تغییر دما نشان‌دهنده‌ی کاهش ۶۸ کلون 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 کلون، 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 [۱-۳]. 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 شبه‌سنج‌های الگو بلندگو به منظور استفاده در کاربردهای طولانی مدت مانند لغو نوفه فعال. به‌عنوان نمونه در پژوهشی که راواد^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 شبه‌سنج‌ها 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 شبه‌سنج‌های 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. به‌منظور 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 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.

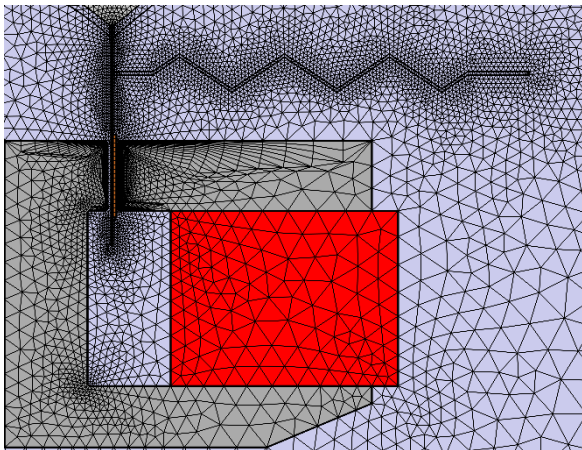
کاربردهای صنعتی و تجاری: با پیشرفت صنایع صوتی، تقاضا برای بلندگوهای کارآمدتر و مقاوم‌تر افزایش یافته است. شرکت‌های تولیدکننده به دنبال راه‌هایی هستند که بتوانند محصولات خود را با کیفیت بالاتر و با دوام بیشتر به بازار عرضه کنند. الگوسازی حرارتی یکی از ابزارهای اساسی برای این هدف است، و از آن در مراحل 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 Ravaud

² Liechti



شکل ۲ الگو مش‌بندی استفاده‌شده در ساختار.

۱-۲. معادلات حاکم بر تحلیل حرارتی بلندگو

انتقال حرارت در مواد به روش انتقال تشعشعی، انتقال هدایتی و انتقال همرفتی انجام می‌شود. هر سه دسته این معادلات و تحلیل حرارتی در نرم‌افزار تعریف می‌شوند. در ادامه هرکدام از این روش‌ها بررسی شده است.

۱-۱-۲. انتقال تشعشعی

انتقال حرارت از یک سطح ماده از طریق تشعشع به دلیل انتشار تابش برقی مغناطیسی فروسرخ (مادون‌قرمز) از الکترون‌های روی سطح اتفاق می‌افتد. تابش می‌تواند از خلأ عبور کند و مقدار تابش به دمای مطلق بستگی دارد. تابش گرما به فضای آزاد با معادله استفان-بولتزمن به دست می‌آید [۸-۱۰]:

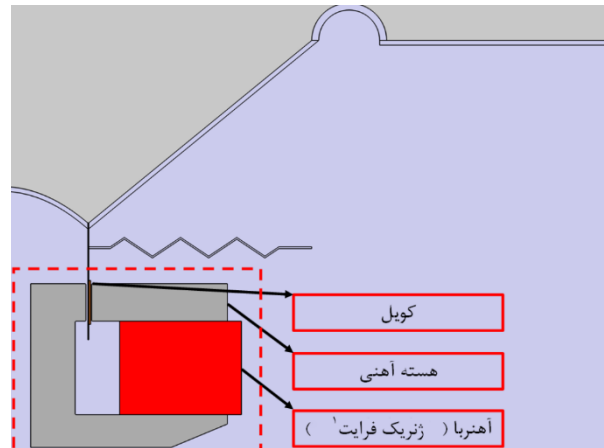
$$Q = \sigma AT^4 \quad (1)$$

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 ساطع‌شده و جذب‌شده توسط ترازهای را در نظر بگیریم. برای دو سطح A_1 و A_2 ، تبادل تابش Q به صورت زیر محاسبه می‌شود:

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

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 میدان‌های مغناطیسی به منظور توصیف ویژگی‌های برقی مغناطیسی سیم‌پیچ به الگو افزوده شده و ماژول انتقال حرارت برای تحلیل توزیع دمایی در ساختار و محاسبه میزان گرمای منتقل‌شده در اجزا به کار گرفته می‌شود. همچنین، جریان ۲ آمپر به‌عنوان جریان تحریک، تعداد ۱۰۰۰ دور برای سیم‌پیچ و رسانایی $10^7 \times 6$ زیمنس بر متر برای مس در نظر گرفته‌شده‌اند.



شکل ۱ طراحی هندسه ساختار.

برای مش‌بندی ساختار (مطابق شکل ۲)، از مش‌های مثلثی استفاده شده است. توزیع مش‌بندی به‌گونه‌ای طراحی شده که در ناحیه تقاطع هسته آهنی و سیم‌پیچ مسی، به دلیل تراکم بالای شار مغناطیسی، از مش‌بندی با دقت بالا (ریز) بهره گرفته شود. این روش مش‌بندی بر اساس اهمیت نواحی مختلف در شبیه‌سازی تنظیم شده است؛ به‌طوری‌که در نواحی دورتر از سیم‌پیچ، تراکم مش نسبت به اطراف سیم‌پیچ کاهش یافته است تا بهینه‌سازی محاسبات و کاهش زمان شبیه‌سازی ممکن شوند. برای شبیه‌سازی در نرم‌افزار کامسول، شبه‌سینج‌های متعددی برای تعریف خصوصیات مواد در نظر گرفته می‌شوند، از جمله ظرفیت گرمایی ویژه، هدایت برقی، و هدایت حرارتی. هر یک از این شبه‌سینج‌ها با توجه به تغییرات دما، مقادیر متفاوتی پیدا می‌کنند. اعمال این تغییرات دمایی در شبیه‌سازی منجر به محاسبه دقیق‌تر توزیع دما در بخش‌های مختلف ساختار و در بازه‌های زمانی گوناگون می‌شود. داده‌های مربوط به شبه‌سینج‌های مواد از منابع معتبر [۳-۷] استخراج شده‌اند تا صحت و دقت الگوسازی به حداکثر برسد.

¹ Generic ferrite

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

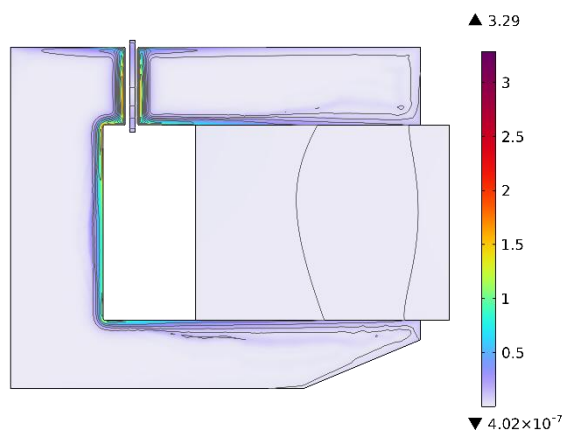
$$H_{fc} = 3.9 \sqrt{\left(\frac{V}{L}\right)} \Delta T \quad (5)$$

$$H_{fc} = \frac{210}{L} (2.71(vL)^{0.8} - 1) \Delta T \quad (6)$$

توجه به این نکته مهم است که آشفتگی ممکن است باعث ایجاد اعوجاج صدای تولیدشده 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 زمان‌های مختلف، از جمله ثانیه‌های ۰ و ۶۰۰، تقریباً یکسان است. بنابراین، توزیع شار مغناطیسی در شکل ۳ برای زمان ۶۰۰ ثانیه نشان داده شده است. در نزدیکی سیم‌پیچ مسی، توزیع شار مغناطیسی بالاتر است که این امر به دلیل نقش سیم‌پیچ به‌عنوان منبع تولید شار مغناطیسی است. با فاصله گرفتن از سیم‌پیچ، شدت توزیع شار مغناطیسی کاهش می‌یابد. ساختار اولیه شبیه‌سازی 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 تولیدشده در ساختار از طریق سیال به محیط منتقل می‌شود.



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 می‌کند ($F_{1-2} \leq 1$) [۸-۱۰].

۲-۱-۲. انتقال هدایتی

رسانایی انتقال گرما به شکل حرکت جنبشی مولکول‌ها در یک ماده است. رسانایی در جامدات، مایعات و گازها اتفاق می‌افتد، اما در سیالات، همرفت تأثیر بسیار مهم‌تری دارد. جریان گرمایی ناشی از رسانایی با قانون فوریه توصیف می‌شود [۸-۱۰]:

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

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

۲-۱-۳. انتقال همرفتی

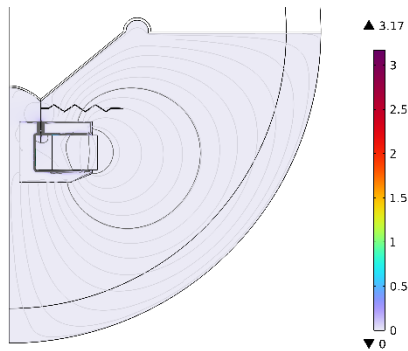
همرفت، فرآیند انتقال به دلیل حرکت سیال است. در همرفت طبیعی، حرکت سیال کاملاً ناشی از نیروهای شناوری حاصل از تغییرات چگالی در سیال است. انتقال حرارت همرفتی با استفاده از تحلیل ابعادی برای توسعه فرمول‌های همبستگی تجربی برای اشکال هندسی مختلف برآورد می‌شود. این فرمول‌ها ضریب انتقال حرارت، H_{nc} (وات بر مترمربع بر درجه سلسیوس) را به هندسه، دما و خواص سیال مرتبط می‌کنند. یک معادله ساده‌شده مناسب برای خنک کردن هوا روی صفحه صاف عمودی [۸-۱۰] به شکل زیر توصیف می‌گردد:

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

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

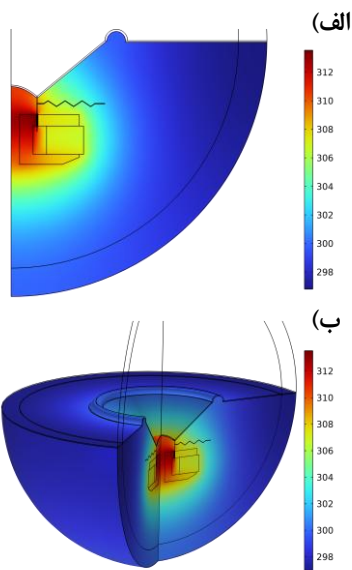
همرفت اجباری شامل انتقال گرما از طریق حرکت سیال است که توسط یک نیروی خارجی هدایت می‌شود. هنگامی که سرعت سیال زیاد است، آشفتگی (الگوی حرکت آشوبناک جریان سیال در مقابل جریان آرام و خطی سیال) ایجاد می‌شود. در جریان آشفته، اختلاط هوای سرد و گرم کارآمدتر می‌شود و منجر به افزایش قابل توجهی در انتقال حرارت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

مشابه همرفت طبیعی، همبستگی‌های 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.

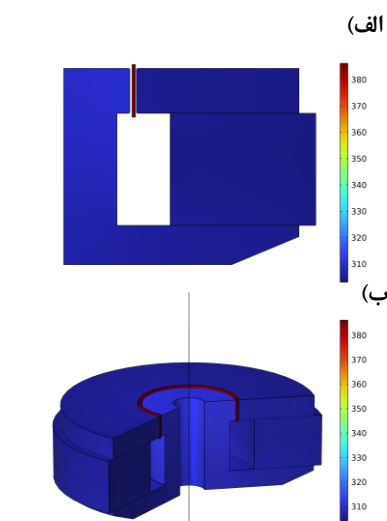
در زمان اولیه، دمای کل ساختار با دمای محیط برابر بوده و در حدود ۲۹۳ کلوین است؛ اما پس از گذشت ۶۰۰ ثانیه، توزیع دما در ساختار در بازه‌ای بین ۲۹۸ تا ۳۱۲ درجه کلوین متغیر است. بیش‌ترین دما در نواحی نزدیک به سیم‌پیچ مسی، هسته آهنی و آهن‌ریا مشاهده می‌شود و با افزایش فاصله از این اجزا، دما به تدریج کاهش می‌یابد.



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.

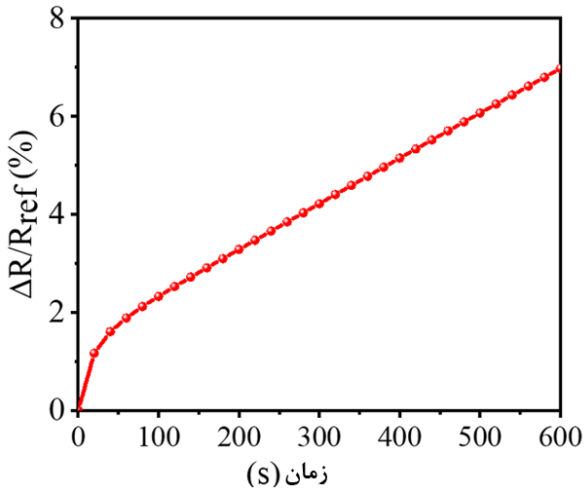
شکل‌های ۴ (الف) و (ب) توزیع دمایی ساختار را در زمان ۶۰۰ ثانیه به ترتیب در حالت‌های دو-بعدی و سه-بعدی نمایش می‌دهند. در زمان اولیه (صفر ثانیه)، دما با دمای اتاق برابر است؛ با گذشت زمان، همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد، دما به تدریج افزایش می‌یابد. در زمان ۶۰۰ ثانیه، دما در محدوده‌ای بین ۳۱۰ تا ۳۸۰ درجه کلوین 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.

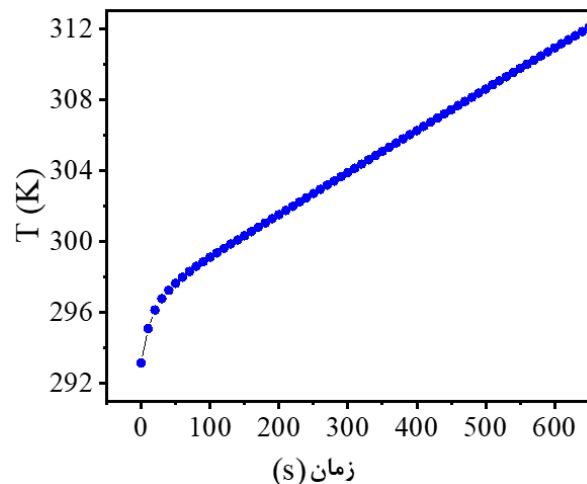
ساختار نهایی مطابق با طراحی یک بلندگوی واقعی ایجاد شده و طرح‌واره نهایی آن در شکل ۵ نمایش داده شده است. در این ساختار، تمامی اجزای فیزیکی مطابق با نمونه واقعی بلندگو الگوسازی شده‌اند و محیط سیال اطراف به‌عنوان هوا در نظر گرفته شده است. به دلیل ناچیز بودن تغییرات حرارتی و مغناطیسی در سایر نواحی، از شبیه‌سازی 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 دمایی 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 نشان‌دهنده تأثیر دما بر مقاومت سیم‌پیچ بوده و تأییدی بر رابطه خطی مقاومت با دما برای رساناهایی مانند مس است.



شکل ۷ درصد تغییرات مقاومت سیم‌پیچ مسی نسبت به زمان.

افزایش دمای سیم‌پیچ موجب افزایش مقاومت آن می‌شود که در نتیجه، منجر به کاهش بازدهی و ایجاد افت توان در سامانه می‌گردد.



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

۴. بحث

با افزایش ولتاژ ورودی به سیم‌پیچ، جریان عبوری از آن افزایش می‌یابد و در نتیجه، میزان گرمای تولیدشده نیز افزایش پیدا می‌کند. این افزایش گرما موجب بالا رفتن دمای سیم‌پیچ شده و خصوصیات مقاومت و امپدانس آن را تغییر می‌دهد. برای جلوگیری از داغ شدن بیش از حد سیم‌پیچ 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 می‌دهد. همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود، با افزایش ولتاژ، توان ورودی افزایش یافته و به دنبال آن، دمای سیم‌پیچ نیز افزایش می‌یابد. کاهش دمای سیم‌پیچ در بلندگو با افزایش تعداد دورهای سیم‌پیچ، همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده است، به عوامل کلیدی مرتبط با مقاومت سیم‌پیچ، تولید گرما و کارایی (راندمان) سیم‌پیچ مرتبط است.

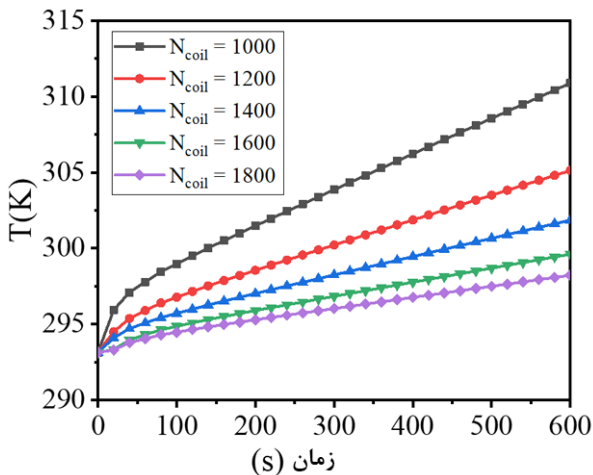
با افزایش تعداد دورها، اندوکتانس سیم‌پیچ نیز افزایش می‌یابد که به تشکیل یک میدان مغناطیسی قوی‌تر برای جریان مشابه منجر می‌شود. میدان مغناطیسی قوی‌تر کارایی تبدیل انرژی در بلندگو را بهبود می‌بخشد و انرژی کم‌تری به صورت گرما هدر می‌رود، که در نتیجه منجر به کاهش دمای سیم‌پیچ می‌شود.

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

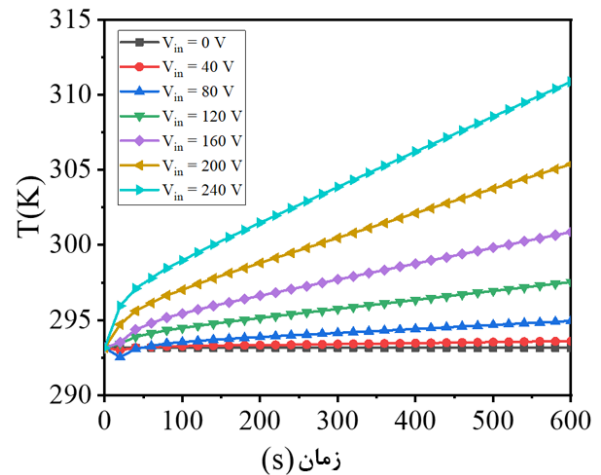
$$R = R_{ref}[1 + \alpha(T - T_{ref})] \quad (7)$$

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 می‌دهد. 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 شبیه‌سازی 20 درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است. این رابطه نشان می‌دهد که با افزایش دما، مقاومت مس نیز به‌طور خطی افزایش می‌یابد. برای سیم‌پیچ مسی در بلندگوها، این افزایش مقاومت موجب افت توان و کاهش بازدهی سامانه خواهد شد.

در شکل ۷ با استفاده از ابزارهای اندازه‌گیری کامسول مقاومت سیم‌پیچ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که تغییر مقاومت سیم‌پیچ 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 سیم‌پیچ مسی در تعداد دورهای مختلف سیم‌پیچ.



شکل ۸ تغییر دمای سیم‌پیچ مسی در ولتاژهای مختلف.

شبه‌سازی‌های وابسته به زمان، رفتار پویا را نشان می‌دهند و نحوه واکنش بلندگو در هنگام راه‌اندازی، استفاده طولانی‌مدت و خنک‌شدن را هم نشان می‌دهند. بلندگوهای دنیای واقعی در داخل محفظه‌ها کار می‌کنند. وجود هوا یا گازهای دیگر بر رفتار حرارتی تأثیر می‌گذارد. طراحی محفظه باید گردش سیال و اتلاف گرما را در نظر بگیرد.

هم‌چنین، گرمای بیش‌ازحد می‌تواند اجزا را تخریب کند و کیفیت و طول عمر صدا را تحت تأثیر قرار دهد. یافته‌های ما بینش‌هایی را برای تنظیم آستانه‌های دمایی مناسب ارائه می‌دهند.

هم‌چنین، افزایش تعداد چرخش سیم در یک سیم‌پیچ بلندگو به طور کلی منجر به کاهش دما به دلیل افزایش لندوکتانس و بازده مغناطیسی، کاهش چگالی جریان، بهبود قابلیت‌های اتلاف حرارت و تغییرات دینامیکی در مقاومت با دما می‌شود. این عوامل در مجموع به حفظ دمای عملیاتی پایین‌تر در سیم‌پیچ‌ها با تعداد دور بیش‌تر کمک می‌کنند.

استفاده از رویکرد بررسی جامعی که در این مقاله اتخاذ شده است، موجب تخمین دقیق‌تر پژوهش‌هایی از سازوکار بلندگو می‌شود که در گذشته توسط دیگر محققان صورت پذیرفته است.

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

علاوه بر این، با افزایش تعداد دورها، جریان موجود در سیم‌پیچ بین تعداد بیش‌تری از حلقه‌های سیم توزیع می‌شود که چگالی جریان (میزان جریان در واحد سطح) را در هر دور کاهش می‌دهد.

کاهش چگالی جریان، به نوبه خود، باعث کاهش گرمایش مقاومتی می‌شود که اصلی‌ترین عامل افزایش دما در سیم‌پیچ‌هاست. این کاهش گرمایش مقاومتی به کاهش کلی دمای سیم‌پیچ و بهبود کارایی و طول عمر بلندگو کمک می‌کند.

وجود سیال در ساختار بلندگو به‌طور قابل توجهی بر رفتار حرارتی آن تأثیر می‌گذارد. هنگامی که سیال وارد می‌شود، انتقال حرارت از طریق همرفتی انجام می‌شود. این سیال، گرما را از اجزای بلندگو (هسته آهنی، آهنربا و سیم‌پیچ) جذب کرده و آن را با خود می‌برد. این فرآیند، افزایش دما را تعدیل می‌کند و از گرم شدن بیش‌ازحد جلوگیری می‌کند.

انتخاب مواد به‌طور قابل توجهی بر عملکرد حرارتی تأثیر می‌گذارد. مواد آهنی، آهنربا و سیم‌پیچ دارای رسانایی حرارتی متفاوتی هستند. درک این ویژگی‌ها به مهندسان اجازه می‌دهد تا موادی را انتخاب کنند که یکپارچگی ساختاری را با اتلاف گرمای کارآمد، متعادل کند.

مقاومت حرارتی در فصل مشترک مواد (به‌عنوان مثال، بین سیم‌پیچ و هسته آهنی) بر جریان حرارت کلی تأثیر می‌گذارد. به حداقل رساندن مقاومت سطحی، رسانایی حرارتی را بهبود می‌بخشد. 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. Mäkivirta, "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 افی‌ام^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.