

ISAV2023

سیزدهمین کنفرانس بین المللی آکوستیک و ارتعاشات

تهران - ایران

۲۹ و ۳۰ آذر ماه ۱۴۰۲



انجمن آکوستیک و ارتعاشات ایران

بررسی اثر لایه هوایی بر ضریب جذب صوتی کامپوزیت ترموفیوز و وول پنل

روح اله سیاه تیری^{*}، احسان صفرزاده^ب

^ا تهران کارشناس فیزیک و کارشناس ارشد مهندسی برق مخابرات، سازمان صدا و سیما

^ب تهران کارشناس ارشد فیزیک، سازمان صدا و سیما

* siahtiry@gmail.com

چکیده

جذب کننده های صوتی از جنس پشم های معدنی در جذب انرژی صوتی بسیار خوب عمل می کنند اما از نظر بهداشت محیط استفاده از آنها چالش های بسیاری را در پی دارد. از این رو استفاده از جاذب هایی که مشکلات بهداشتی نداشته باشند همواره در اولویت هستند. ماده جاذب نمد ترموفیوز ماده ای تولید داخل، سازگار با محیط زیست و بهداشت محیط است اما از ضریب جذب صوتی پایینی نسبت به جاذب های معدنی برخوردار است. چند لایه نمودن یکی از روشهای موثر در افزایش ضریب جذب صوتی است. در این تحقیق برای چند لایه نمودن از وول پنل با توجه به مشخصات فیزیکی آن استفاده شده است. پس از انجام اندازه گیری ها مشخص شد که وول پنل به عنوان لایه دوم نمی تواند اثری بر افزایش ضریب جذب نهایی داشته باشد از این رو برای بهره بردن از خاصیت پوسته ای وول پنل تأثیر لایه ای از هوا با سه ضخامت ۱، ۳ و ۵ سانتی متر در بین دو لایه نمد ترموفیوز و وول پنل بررسی شد. بررسی ها نشان می دهد که لایه هوایی با ضخامت ۳ سانتی متر می تواند ضریب جذب صوتی نهایی کامپوزیت را تماماً در محدوده فرکانسی ۶۳۰ هرتز تا ۲۰۰۰ هرتز تقریباً به ۰.۹ افزایش دهد. این در حالی است که لایه هوایی با ضخامت ۵ سانتی متر می تواند ضریب جذب صوتی را در فرکانس ۶۳۰ هرتز به ۰.۹۳ برساند اما بعد از این فرکانس ضریب جذب شروع به کاهش می کند و در فرکانس ۲۵۰۰ هرتز به ۰.۷۲ می رسد.

کلمات کلیدی: ضریب جذب صوتی؛ نمد ترموفیوز؛ وول پنل؛ لایه هوا.

۱- مقدمه

جذب کننده های صوتی که از پشم های معدنی تولید می شوند علی رغم توانمندی بالا در جذب صوت و ضد حریق بودن از نظر بهداشت حرفه ای استفاده از آنها نیازمند رعایت پروتکل های بهداشتی در زمان اجرا و نحوه نصب می باشد. از این رو تولید کننده

ها سعی در تولید جاذب های صوتی دارند که بتوانند در کنار بالابردن ضریب جذب صوتی، هزینه تولید و نصب مسائل بهداشتی را نیز بر طرف نمایند. ماده جاذبی که در این تحقیق انتخاب شده نمد ترموفیوز است. نمد ترموفیوز ماده ای تولید داخل، سازگار با محیط زیست و بهداشت محیط، قابلیت نصب آسان، موجود در بازار و در دسترس است، اما علی رغم همه این خصوصیات جذب صوتی آن نسبت به عایق های معدنی قابل مقایسه نیست. در این تحقیق ابتدا ضریب جذب صوتی نمد ترموفیوز را بررسی خواهیم نمود سپس به بررسی ضریب جذب وول پنل به عنوان لایه دوم می پردازیم. در ادامه بررسی میکنیم که آیا دو لایه وول پنل و نمد ترموفیوز در کنار هم می تواند به بهبود ضریب جذب کمک نماید. در قدم آخر به بررسی اثر لایه هوایی بین دو لایه وول پنل و نمد ترموفیوز خواهیم پرداخت.

۲- تئوری و روش اندازه گیری

برای محاسبه امپدانس صوتی جاذب های یک لایه و چند لایه روش های مختلفی بیان شده است. دلانی و بازلیان بیان کردند که ثابت انتشار موج و امپدانس مشخصه را می توان بر حسب مقاومت جریان، عدد موج، چگالی هوا و فرکانس صدا بیان کرد [1] [2]. زویبکر و کاستن [3] نشان دادند امپدانس آکوستیکی نرمال یک لایه با ضخامت L در جلو آن با امپدانس لایه پشتی خود در ارتباط است که در رابطه شماره ۱ آمده است و در آن W امپدانس مشخصه و γ ثابت انتشار Z_0 امپدانس پشتی است.

$$Z_I = W \frac{Z_0 \cosh \gamma L + W \sinh \gamma L}{Z_0 \sinh \gamma L + W \cosh \gamma L} \quad (1)$$

دان و داورن در تحقیق خود روش زویبکر و کاستن را برای جاذب های چند لایه توسعه دادند و بیان نمودند که امپدانس در قسمت جلوی یک ماده چند لایه ای مرکب را می توان با اعمال معادله تک لایه برای هر ماده به طور متوالی محاسبه کرد. رابطه شماره ۲ که در آن i اشاره به شماره لایه دارد.

$$Z_i = W_i \frac{Z_{i-1} \cosh \gamma_i L_i + W_i \sinh \gamma_i L_i}{Z_{i-1} \sinh \gamma_i L_i + W_i \cosh \gamma_i L_i} \quad (2)$$

برای اندازه گیری ضرایب جذب در این تحقیق از لوله امپدانس استفاده شده است. در لوله امپدانس از روش تابع انتقال برای اندازه گیری ضریب جذب صوتی استفاده می شود [4]. در این روش موج صوتی تابیده شده به نمونه به اجزای موج فرودی P_i و موج بازتابیده شده P_r تقسیم می شود. این اجزا از رابطه بین فشار صوتی اندازه گیری شده توسط دو میکروفون که در دو موقعیت مختلف روی دیواره لوله قرار دارند تعیین می شوند. فشار کل در دو نقطه X_1 و X_2 در لوله را می توان با رابطه شماره ۳ بیان کرد.

$$\begin{cases} P(X_1, t) = P_i(X_1, t) + P_r(X_1, t) \\ P(X_2, t) = P_i(X_2, t) + P_r(X_2, t) \end{cases} \quad (3)$$

از سوی دیگر، از مولفه های برخوردی و منعکس شده فشار صوت در دو مکان میکروفون X_1 و X_2 می توان چگالی های طیفی S_{11} و S_{12} را در این نقاط تخمین زد:

$$\begin{cases} S_{11} = \frac{1}{T} [P_1(f, T) P_1^*(f, T)] \\ S_{12} = \frac{1}{T} [P_1(f, T) P_2^*(f, T)] \end{cases} \quad (4)$$

در رابطه شماره ۴، f فرکانس موج، T طول سری زمانی و کمیت‌های $P_1(f, T)$ و $P_2(f, T)$ تبدیل فوریه محدود سری زمانی فشار در نقاط X_1 و X_2 هستند. یک تحلیل‌گر سیگنال دو کاناله امکان محاسبه تبدیل فوریه را در یک محدوده فرکانس وسیع فراهم می‌کند. از مقادیر S_{11} و S_{12} تابع پاسخ فرکانسی (تابع انتقال) را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$H_{12} = \frac{S_{12}(f)}{S_{11}(f)} \quad (5)$$

به طور مشابه، توابع انتقال مرتبط با مولفه منعکس شده $H_r(f)$ و مولفه تصادفی $H_i(f)$ را می‌توان به دست آورد:

$$H_r(f) = \frac{S_{1r2r}(f)}{S_{1r1r}(f)} \quad (6)$$

$$H_i(f) = \frac{S_{1i2i}(f)}{S_{1i1i}(f)} \quad (7)$$

بنابراین، از (۵)، (۶) و (۷) بیان ضریب بازتاب مختلط با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$R(f) = \frac{H_{12}(f) - H_i(f)}{H_r(f) - H_{12}(f)} \quad (8)$$

با استفاده از معادله شماره ۸، ضریب جذب (α) به دست می‌آید:

$$\alpha = 1 - |R|^2 = 1 - \left| \frac{H_{12} - H_i}{H_r - H_{12}} \right|^2 \quad (9)$$

و امیدانس آکوستیک نرمال شده عبارت است از:

$$\frac{Z_0}{\rho c} = \frac{1 + |R|}{1 - |R|} \quad (10)$$

که در آن چگالی هوا، c سرعت صوت در هوا و ρc امیدانس مشخصه است. سه عملکرد صوتی بیان شده در (۸)، (۹) و (۱۰) توسط نرم افزار ارزیابی می‌شوند. [6] [5] [7]

۳- روش انجام تحقیق

در هر فضا برای رسیدن به شرایط استاندارد آکوستیک ساختمانی همواره از چند لایه مواد مختلف بر اساس شرایط آن فضا استفاده می‌شود. در این طراحی‌ها معمولاً لایه‌های زیرین لایه‌هایی از جنس جاذب صوت هستند و لایه آخر که در معرض دید قرار دارد باید از استحکام و زیبایی قابل قبولی برخوردار باشد. دان و دارون یک تجزیه و تحلیل برای پوشش دیواره مسطح متشکل از مواد متخلخل لایه بیرونی، میانی و داخلی ارائه کردند. پیشنهاد کردند که ماده متخلخل لایه بیرونی با امیدانس مناسب باید صدای فرود را تشویق

کند تا وارد ساختار کامپوزیت شود، اما ماده متخلخل لایه داخلی برای تضعیف انرژی صوتی و جلوگیری از ترکیب مجدد صدای فرودی انتخاب شد. [8]

نمد ترموفیوز دارای خاصیت سلول باز است و درون خود لایه‌هایی از هوا دارد که نقش جرم - فنر را برای میرایی انرژی صوت ایفا می‌کند. از این رو این ماده را می‌توان در دسته جاذب‌های صوتی در نظر گرفت. از نظر جذب صوتی نمد ترموفیوز با ضخامت ۲۵ میلی‌متر در فرکانس‌های بالای یک کیلوهرتز دارای ضریب جذب بالاتر از ۰.۸ است، اما در فرکانس‌های پایین و در محدوده ۲۰۰ هرتز تا ۸۰۰ هرتز از ضریب جذب قابل قبولی برخوردار نیست. افزایش ضخامت می‌تواند روشی برای افزایش ضریب جذب صوتی است اما با توجه به اینکه همواره امکان افزایش ضخامت ممکن نیست این روش کنار گذاشته شد. چون در عمل نمد ترموفیوز به عنوان لایه نهایی بکار نمی‌رود و همواره یک لایه نهایی روی آن قرار می‌گیرد بهترین روش جهت افزایش ضریب جذب انتخاب صحیح لایه نهایی است. از نظر فرکانس رزونانسی ماده با توجه به اینکه ضخامت نمد ترموفیوز ۲۵ میلی‌متر است، اگر آن را به عنوان یک طول موج فرض کنیم ضخامت ماده ای که باید انتخاب شود نباید مضربی از یک هشتم باشد. برای بدست آوردن جذب بیشتر در فرکانس‌های پایین باید از خاصیت پوسته ای مواد بهره ببریم. با توجه به خصوصیات بیان شده ماده ای که به عنوان لایه دوم انتخاب شد وول پنل با ضخامت ۹.۳ است، که دقیقاً ضخامت آن مضرب فردی از ۱/۸ ضخامت نمد ترموفیوز است. وول پنل به تنهایی دارای خاصیت پوسته ای نیست اما زمانیکه یک لایه هوایی بین آن و نمد ترموفیوز قرار داده می‌شود. اثر لایه هوایی بخاطر چگال بودن بر حسب ضخامت لایه هوایی تاحدی خاصیت پوسته ای را از خود نشان می‌دهد.

۴- اندازه گیری های ضریب جذب صوتی

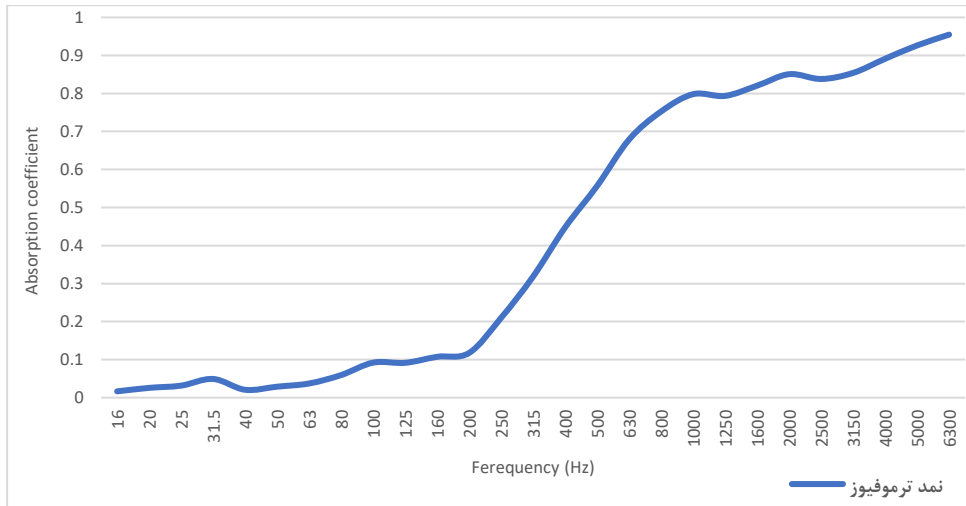
برای انجام تست های ضریب جذب از دو نمونه بزرگ و کوچک به ترتیب استوانه های با شعاع ۹۹.۸ میلی متر و ۲.۹ میلی متر استفاده شده است. همه اندازه گیری های انجام شده در این تحقیق توسط دستگاه لوله صوتی B&K انجام شده است.

۴-۱ نمد ترموفیوز

نمد ترموفیوز استفاده شده دارای ضخامت ۲۵ میلی متر و چگالی ۹۹.۵ کیلوگرم بر متر مکعب است که در شکل شماره ۱ نشان داده شده است. مقادیر ضریب جذب صوتی نمد ترموفیوز در نمودار شماره ۱ آمده است.



شکل ۱: نمد ترموفیوز



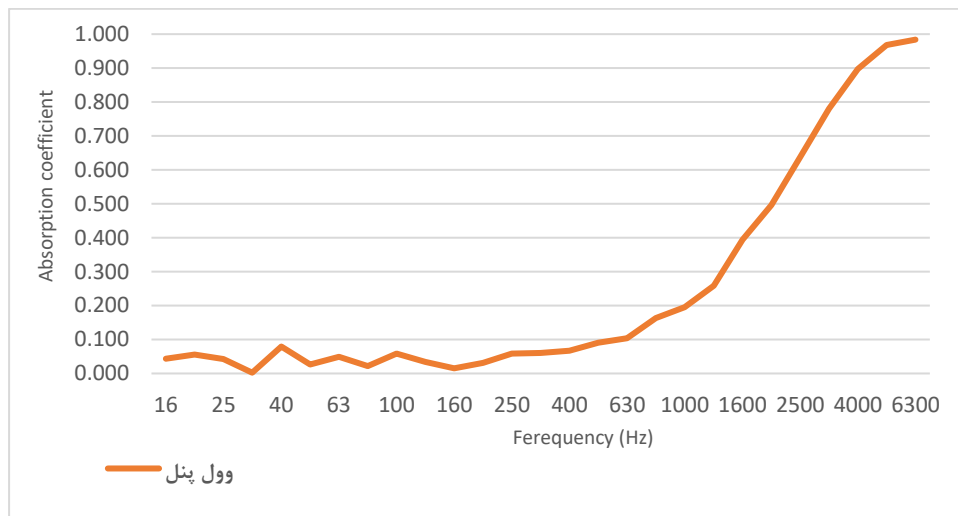
نمودار شماره ۱

۴-۲ وول پنل

وول پنل استفاده شده دارای ضخامت ۹.۳ میلی متر و چگالی ۲۰۷.۱ کیلوگرم بر متر مکعب است که در شکل شماره ۲ نشان داده شده است. مقادیر ضریب جذب صوتی وول پنل در نمودار شماره ۲ آمده است.



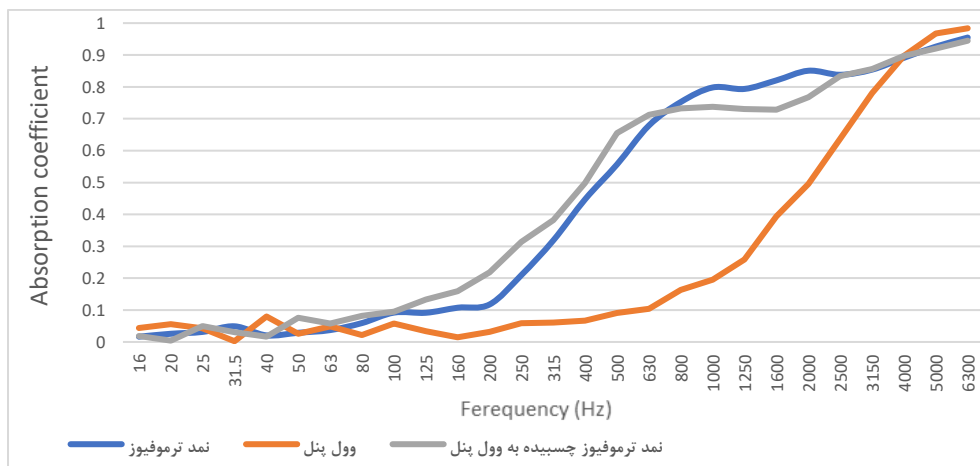
شکل ۲: وول پنل



نمودار شماره ۲

۴-۲-۱ دو لایه ترموفیوز و وول پنل

در این حالت از دو لایه نمد ترموفیوز و وول پنل استفاده شد. دو لایه کاملاً به هم چسبیده شدند و ترتیب قرار گیری در معرض صوت به این ترتیب است که امواج ابتدا به وول پنل برخورد نموده سپس بعد از عبور از آن وارد نمد ترموفیوز می‌شود. نتایج بدست آمده از این ترکیب در نمودار شماره ۳ به همراه ضریب جذب نمد ترموفیوز و وول پنل آورده شده است.

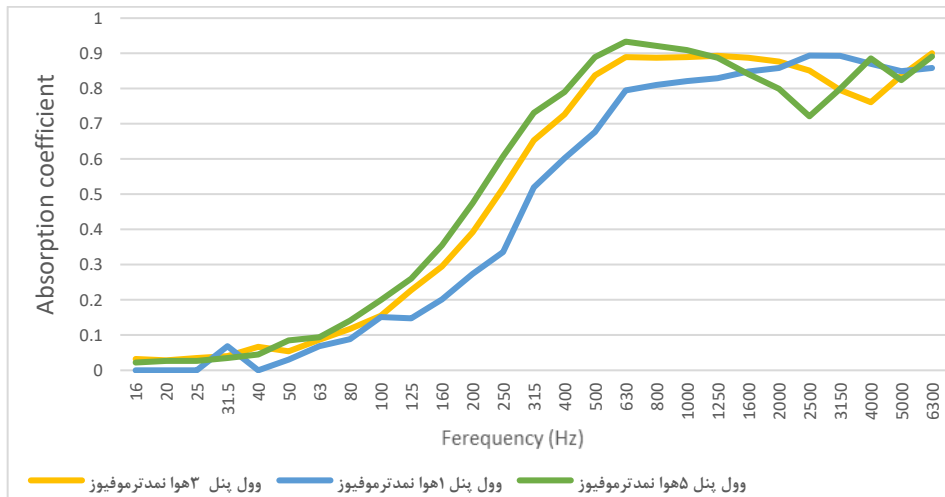


نمودار شماره ۳

۴-۲-۲ سه لایه ترموفیوز، هوا و وول پنل

در این حالت از سه لایه نمد ترموفیوز، هوا و وول پنل استفاده شده است. ترتیب قرار گیری به این شرح است که امواج صوتی ابتدا به لایه وول پنل برخورد نموده سپس وارد لایه هوایی شده و در آخر وارد لایه نمد ترموفیوز می‌شوند. در این حالت لایه هوایی با

سه ضخامت یک سانتی متر، سه سانتی متر و پنج سانتی متر قرار داده شد و اندازه گیری ها انجام شده اند. نتایج حاصل از اندازه گیری در نمودار شماره ۴ آمده است.

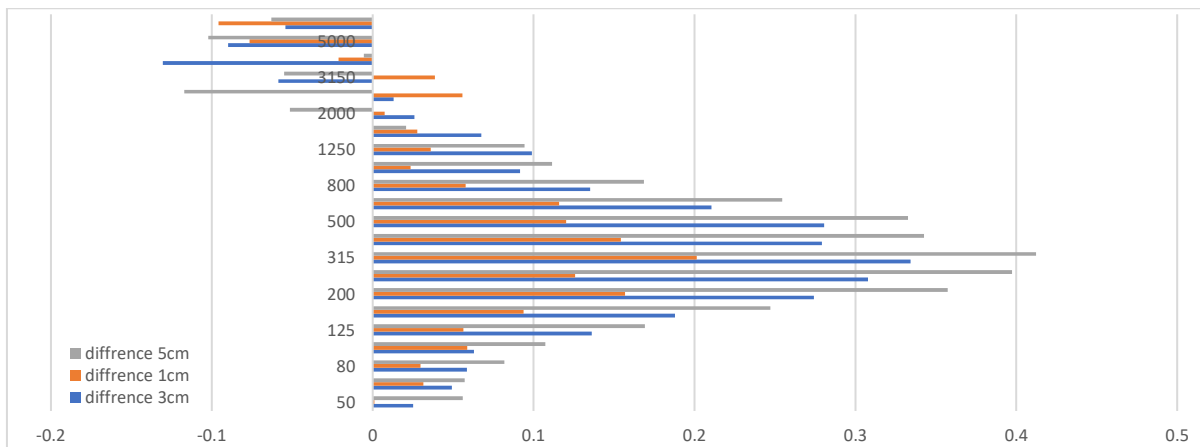
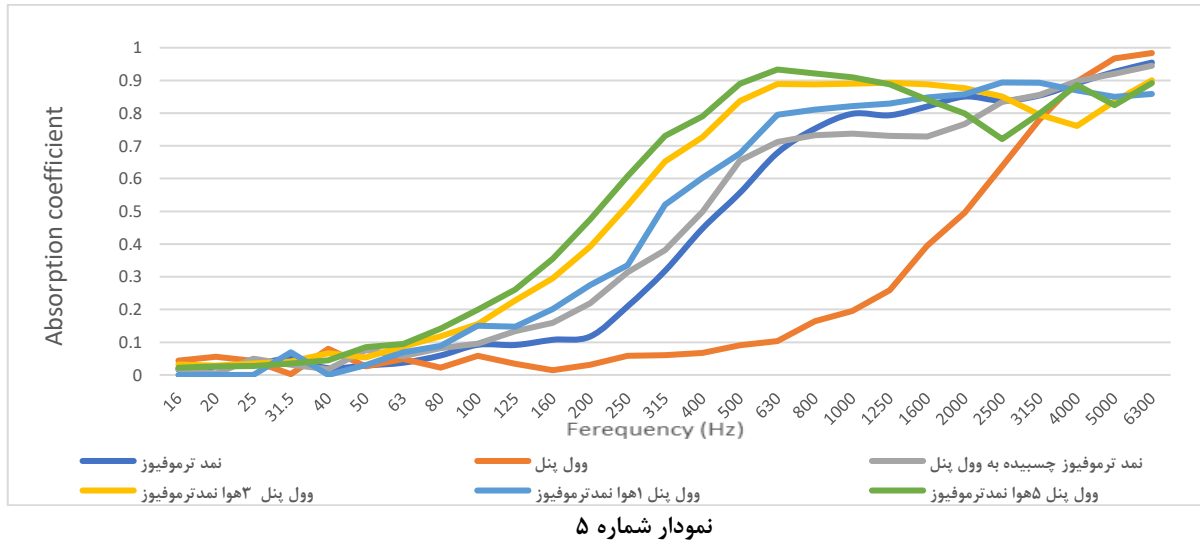


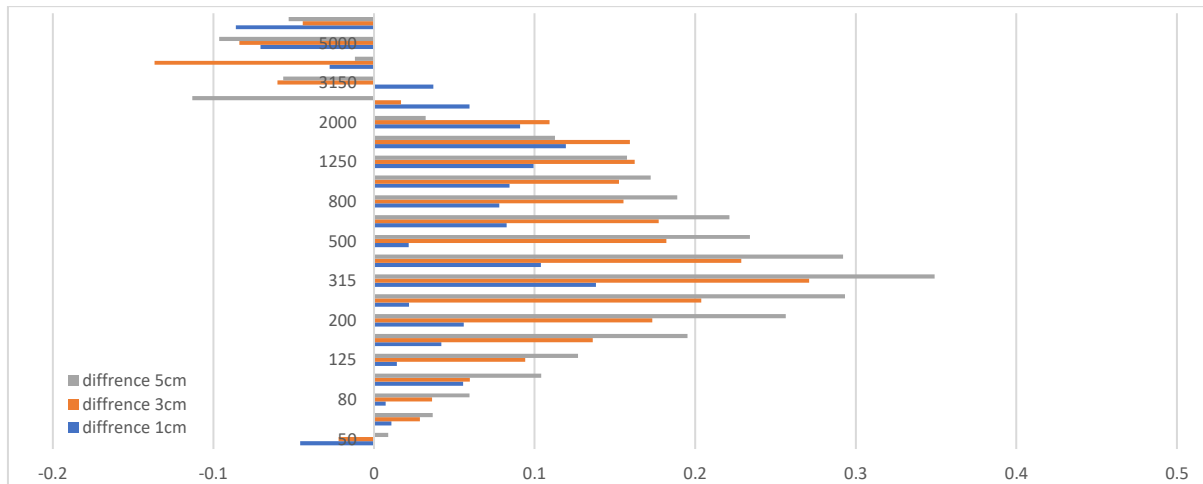
نمودار شماره ۴

۵- تحلیل نتایج

نتایج حاصل از اندازه گیری برای مقایسه در نمودار شماره ۵ آمده است. همانطور که مشاهده می کنیم نمد ترموفیوز در حالت دو لایه چسبیده به وول پنل در فرکانس های ۱۰۰ هرتز تا ۶۳۰ هرتز در بیشترین مقدار ضریب جذب صوتی به اندازه ۰.۱ افزایش یافته است. در همین حالت ضریب جذب صوتی در محدوده فرکانسی ۶۳۰ هرتز تا ۲۵۰۰ هرتز تقریباً به اندازه ۰.۰۹ کاهش نشان می دهد. در حالت سه لایه یعنی بعد از قرار دادن لایه هوایی به اندازه یک سانتی متر در بین نمد ترموفیوز و وول پنل مشاهده می کنیم که در تمام فرکانس ها شاهد افزایش ضریب جذب بوده ایم. این افزایش بدلیل این است که با قرار دادن لایه هوایی وول پنل می تواند از خاصیت پوسته ای خود بهره ببرد و منجر به افزایش ضریب جذب در فرکانس های محدوده ۵۰۰ هرتز شود. این خاصیت با افزایش ضخامت لایه هوایی به اندازه ۳ سانتی متر تقویت شده و ملاحظه می کنیم که ضریب جذب صوتی از فرکانس های ۶۳۰ هرتز تا ۲۰۰۰ هرتز در محدوده ۰.۹ قرار گرفته است. با افزایش ضخامت لایه هوایی به ۵ سانتی متر بیشترین ضریب جذب در ۶۳۰ هرتز به حدوده ۰.۹۵ می رسد.

در کنار افزایش ضریب جذب صوتی در بعضی فرکانس ها شاهد کاهش نیز هستیم. در فاصله هوایی ۳ سانتی متر شاهد افت ضریب جذب به اندازه ۰.۱ در فرکانس ۴۰۰۰ هرتز هستیم که با افزایش ضخامت لایه هوایی به ۵ سانتی متر این افت در فرکانس ۲۵۰۰ هرتز اتفاق می افتد و ضریب جذب ۰.۷۲ را شاهد هستیم که البته این افت در هماهنگی بعدی آن یعنی فرکانس ۵۰۰۰ هرتز نیز تا حدی وجود دارد. در نمودار شماره ۷ مشاهده می کنیم که در صورتیکه بخواهیم از دو ماده نمد ترموفیوز و وول پنل در کنار هم استفاده کنیم قرار دادن یک لایه هوایی تا چه اندازه می تواند میزان ضریب جذب صوتی را در فرکانس های محدوده ۱۰۰ هرتز تا ۲۰۰۰ هرتز افزایش دهد. بیشترین افزایش در محدوده ۳۱۵ هرتز به اندازه ۰.۳۵ است. البته باید خاطر نشان کرد که در فرکانس های ۳۱۵۰ هرتز تا ۶۳۰۰ هرتز تقریباً به اندازه ۰.۱ نیز کاهش میزان ضریب جذب را شاهد هستیم.





نمودار شماره ۷: اختلاف ضریب جذب صوتی حالت سه لایه نمد ترموفیوز + هوا + وول پنل (با سه ضخامت ۱، ۳ و ۵ سانتی متر هوا) با حالت دو لایه نمد ترموفیوز + وول پنل

۶- نتیجه گیری

در طراحی فضاها همواره در هر فضایی برای بدست آوردن زمان واخنش در محدوده استاندارد با چالش های مختص به خود آن فضا مواجهیم و استفاده از مواد چند لایه نیاز به اطلاعات و دانش در مورد میزان ضریب جذب آن ماده چند لایه دارد. نمد ترموفیوز جذبی است که از نظر پارامترهای بهداشتی نسبت به جاذب های معدنی از سطح قابل قبولی برخوردار است اما متاسفانه از نظر خاصیت جذبی از مقدار جذب پایینی برخوردار است. در این تحقیق نشان دادیم که استفاده از یک لایه وول بدون لایه هوایی نمی تواند تاثیری بر افزایش میزان ضریب جذب داشته باشد، در حالیکه اگر از یک لایه هوایی استفاده کنیم می تواند ضریب جذب را افزایش دهد. ضخامت لایه هوایی در میزان افزایش و یا کاهش ضریب جذب در فرکانس های مختلف بسیار تاثیر گذار است. در لایه هوایی با ضخامت ۳ سانتی متر شاهد هستیم که در محدوده ۶۳۰ هرتز تا ۲۰۰۰ هرتز که محدوده مهمی است ضریب جذب صوتی به حدود ۰.۹ رسیده است. از طرفی لایه هوایی با ضخامت ۵ سانتی متر می تواند ضریب جذب را در فرکانس ۶۳۰ هرتز تا حدود ۰.۹۵ نیز افزایش دهد اما بعد از فرکانس ۶۳۰ هرتز میزان ضریب جذب صوتی شروع به کاهش می کند تا فرکانس ۲۵۰۰ هرتز که هماهنگ دوم ۶۳۰ هرتز است. استفاده از لایه هوایی ۳ سانتی متر ضریب جذب صوتی را در محدوده فرکانسی وسیع تری در حد بالایی نگه می دارد که البته در اجرا پیاده سازی راحتتری را نیز به همراه دارد.

مراجع

- [۱] M.DELANY; E.N.BAZELY, "Acoustic properties of fibrous absorbent material ",*Applied Acoustics* ,pp. ۱۰۵-۱۱۶, ۱۹۷۰ .
- [۲] W. DAVERN, "Perforated facings backed with porous materials as sound absorbers-an experimental study ",*Applied Acoustics* ,pp. ۸۵-۱۱۲, ۱۹۷۷ .
- [۳] Zwikker, Cornelis, and Cornelis Willem Kosten., "Sound absorbing materials ",*Elsevier* .۱۹۴۹ ,
- [۴] A.F. Seybert and D.F. Ross., "Experimental determination of acoustic properties using a two-microphone random-excitation technique ",*J. Acoust. Soc. Am* ,p. ۱۳۶۲-۱۳۷۰, ۱۹۷۷ .
- [۵] Brüel and Kjaer, "Sound and vibration measurement software ",*PULSE LabShop* , .۲۰۱۲
- [۶] J.Y. Chung and D.A. Blaser, "Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. I: theory",*J. Acoust. Soc* ,.p. ۹۰۷-۹۱۳, ۱۹۸۰ .
- [۷] International Standard ISO ۱۰۵۳۴-۲,, "Acoustics-Determination of Sound Absorption Coefficient and Impedance in Impedance Tube Part ۲: Transfer Function ",*International Organization for Standardization* .۲۰۰۱ ,
- [۸] I. P. DUNN; W. A. DAVERN., "Calculation of acoustic impedance of multi-layer absorbers",*Applied Acoustics* , جلد ۱۹ ,pp. ۳۲۱-۳۳۴, ۱۹۸۶ .