

## پیش‌بینی رفتار اکوستیکی انواع پوشش‌های جاذب

محمد رضا خلیل‌آبادی  
 پژوهشیار دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شیراز  
 rezakhalilabadi@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۱/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۷/۲۴

### چکیده

آگاهی از رفتار اکوستیکی مواد و لایه‌های جاذب صوت در طراحی تجهیزات نظامی و اکوستیکی زیر آب اهمیت زیادی دارد. اگر بتوان با استفاده از روش‌های عملی بدون اعمال محدودیت در عملکرد یک سیستم، نوفه اکوستیکی آن را کاهش داد، توان عملیاتی آن بالا می‌رود. از جمله روش‌های عملی، استفاده از لایه‌های متنوع جاذب صوت روی بدنه این تجهیزات است. در این مقاله با استفاده از بسته نرم‌افزاری وین‌فلگ<sup>۱</sup> و با بهره‌گیری از مدل‌های نظری، تأثیر مشخصه‌های فیزیکی جاذب‌های صوتی زیر آب شامل چگالی، ضخامت و امپدانس اکوستیکی بر میزان جذب انرژی صوتی و شاخص تضعیف در این جاذب‌ها تجزیه و تحلیل شده است.

**واژگان کلیدی:** جاذب صوت، امپدانس اکوستیکی، نوفه اکوستیکی، افت انتقال

### ۱. مقدمه

حل معادلات انتشار صوت در مواد جاذب، مبنای مدلسازی عددی جاذب‌های صوتی است. سپس به روش تحلیلی و با استفاده از مدل‌های عددی موجود، تأثیر مشخصه‌های فیزیکی جاذب‌ها بر میزان جذب انرژی صوتی و شاخص افت انتقال صوت در این جاذب‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. مشخصه‌های مورد بررسی عبارت است از چگالی جاذب صوتی، ضخامت ورقه‌های جاذب و تطبیق امپدانس. حل معادلات انتشار صوت در جاذب‌های اکوستیکی پایه پیش‌یابی‌های انجام‌شده برای ضریب جذب و شاخص افت انتقال صوت بر مبنای مدل‌های انتشار صوت می‌باشد. مدلسازی بر پایه حل معادلات انتشار صوت انجام می‌شود [۱]. در ادامه روشی نظری برای حل این معادلات در مواد

جاذب صوت ارائه شده است. در مواد الاستیک، معادلات ۱ و ۲ برای انتشار امواج الاستیک برقرار است [۲].

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_3^2} + k_p^2 \phi = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_3^2} + k_p^2 \psi = 0 \quad (2)$$

به‌طوری‌که در این روابط  $\phi$  پتانسیل جابه‌جایی اسکالر،  $\psi$  مؤلفه  $x_2$  پتانسیل جابه‌جایی برداری و  $k_p$  و  $k_s$  به ترتیب اعداد موج مربوط به امواج فشاری و برشی‌اند و با روابط  $k_p = \omega/c_p$  و  $k_s = \omega/c_s$  بیان می‌شوند. عبارت‌های  $c_p$  و  $c_s$  نیز سرعت‌های صوت هستند که توسط روابط ۳ و ۴ بیان می‌شوند [۳]. به‌طوری‌که در این روابط  $\rho$  چگالی

ماده و  $\lambda$  و  $\mu$  ثابت‌های Lome هستند. بنابراین ضریب بازتاب را می‌توان به صورت رابطه ۵ به دست آورد.

$$c_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (3)$$

$$c_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (4)$$

$$R = \frac{Z_a - \frac{\rho_w c_w}{\cos \theta_i}}{Z_a + \frac{\rho_w c_w}{\cos \theta_i}} \quad (5)$$

بنابراین ضریب کاهش پژواک<sup>۲</sup> عبارت است از

$$RE = 20 \log_{10}^R \quad (6)$$

وقتی یک موج تخت پیش‌رونده در محیط شماره‌ای به حد فاصل بین آن محیط و محیط دیگر می‌رسد، مقداری از آن بازتابیده شده و در محیط اول انتشار می‌یابد و بقیه از حد فاصل دو محیط می‌گذرد و در محیط دوم به پیشروی خود ادامه می‌دهد که آن را موج انتقال‌یافته<sup>۳</sup> می‌نامند. نسبت شدت و دامنه فشار موج‌های بازتابیده و انتقال‌یافته به شدت و دامنه فشار موج تابشی، به امپدانس‌های مشخصه دو محیط و زاویه تابش موج اصلی بستگی دارد [۴]. نسبت شدت موج انتقالی به شدت موج تابشی را افت انتقال می‌نامند؛ یعنی:

$$TL = 10 \log_{10}^{\frac{I_2}{I_1}} \quad (7)$$

به طوری که در این رابطه  $TL$  افت انتقال در فرکانس معلوم برحسب دسی‌بل،  $I_1$  شدت امواج صوتی تابشی با فرکانس معلوم برحسب وات بر سانتی‌متر مربع و  $I_2$  شدت امواج صوتی انتقالی با فرکانس معلوم در نقطه‌ای دورتر از منبع برحسب وات بر سانتی‌متر مربع است. حال با توجه به شدت موج تخت (رابطه ۷) ضریب توان صوتی انتقال به صورت شدت موج انتقالی به شدت موج تابش تعریف می‌شود:

$$\alpha_i = \frac{I_t}{I_i} = \frac{\rho_2 C_1 A_2^2}{\rho_1 C_2 A_1^2} \quad (8)$$

$$\alpha_i = \frac{4\rho_1 C_1 \rho_2 C_2}{(\rho_2 C_2 + \rho_1 C_1)^2} \quad (9)$$

خاطر نشان می‌شود اگر مقادیر امپدانس‌های اکوستیکی ویژه محیط  $I$  و  $II$  با هم اختلاف زیادی داشته باشند، ضریب

توان صوتی انتقال،  $\alpha_i$ ، کوچک خواهد بود. ضریب  $\alpha_i$  به امتداد حرکت موج بستگی ندارد؛ یعنی مقدار آن در انتقال موج از محیط اول به محیط دوم یا از محیط دوم به محیط اول ثابت می‌ماند [۵]. افت انتشار به فرکانس وابسته است، لذا محاسبات فوق در یک فرکانس خاص انجام می‌گیرد. افت انتشار عموماً به واسطه پخش شدن انرژی<sup>۴</sup> و جذب صوت<sup>۵</sup> به وجود می‌آید. پخش شدن به صورت ساده یک افت هندسی است، در صورتی که جذب مربوط به تلفات انرژی صوتی به صورت حرارت بوده و وابستگی شدیدی به فرکانس و ضخامت دارد. در این مقاله تحلیل‌های مربوط به افت انتقال در شکل‌های مختلف جاذب برحسب فرکانس تحلیل شده است.

## ۲. مواد و روش‌ها

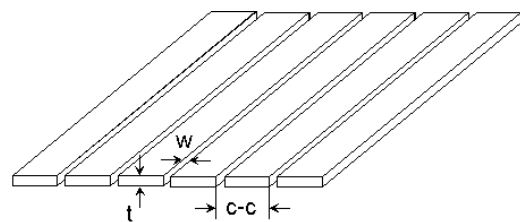
در این مقاله برای پیش‌یابی رفتار اکوستیکی جاذب‌های صوتی از بسته نرم‌افزاری وین‌فلگ استفاده شده است. این برنامه قابلیت محاسبه ضریب جذب، امپدانس و شاخص افت صوت را برای ساختارهایی متشکل از لایه‌هایی از انواع مواد اعم از مواد متخلخل، صفحات سوراخ‌دار و جز این‌ها محاسبه می‌کند. همچنین قابلیت افزودن برنامه‌ها و ماژول‌هایی جهت محاسبه و تخمین تضعیف صوت را برای مجاری خطی شده (اعم از مجاری چهارگوشه در دو طرف یا مجاری دایروی با ساختار لایه‌ای مشخص) دارد [۶]. محاسبات می‌تواند در حالت تک‌فرکانس و یا به صورت مقادیر میانگین در یک سوم باندهای اکتاو برای یک میدان آزاد انتشار صوت اجرا شود. این برنامه، مشخصه‌های اکوستیکی ترکیبی از این مواد لایه‌بندی شده را با استفاده از روش ماتریس انتقال مدلسازی می‌کند. اساساً هر لایه در ترکیب، نامحدود فرض می‌شود و به وسیله یک ماتریس معرفی می‌گردد که رابطه بین یک مجموعه از متغیرهای فیزیکی را در جوه ورودی و خروجی ارائه می‌کند. این ماتریس‌ها ممکن است ترکیب شوند تا رابطه بین متغیرهای فیزیکی مربوط را برای کل ترکیب ارائه کند. داده‌های

مشخصه مانند ضریب جذب، امپدانس ورودی و افت انتقال (شاخص کاهش صوت) با فرض اینکه موج فرودی یک موج تخت باشد، قابل محاسبه است.

### ۳. بررسی نتایج

#### ۳-۱. جذب شیاردار با شیارهای منظم<sup>۶</sup>

در شکل ۱ طراحی از یک جذب شیاردار با شیارهای منظم نمایش داده شده است. مشخصات طراحی نوعی خاص از این جذب در جدول ۱ آمده است. در شکل ۲ نیز تحلیل

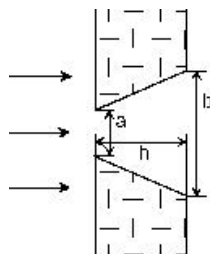


شکل ۱. جذب شیار دار با شیارهای منظم

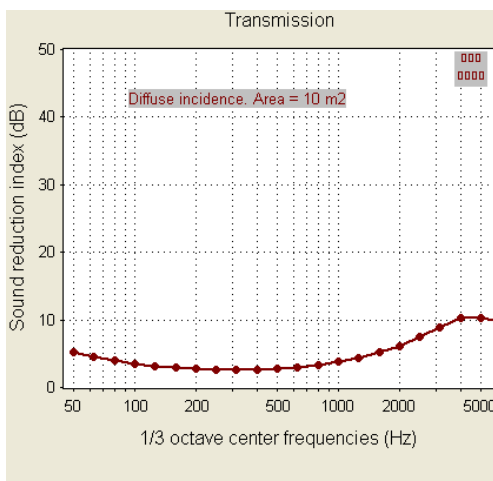
مربوط به افت انتقال در این جذب برحسب فرکانس نمایش داده شده است.

#### ۳-۲. جذب شیار دار با شیارهای مخروطی<sup>۷</sup>

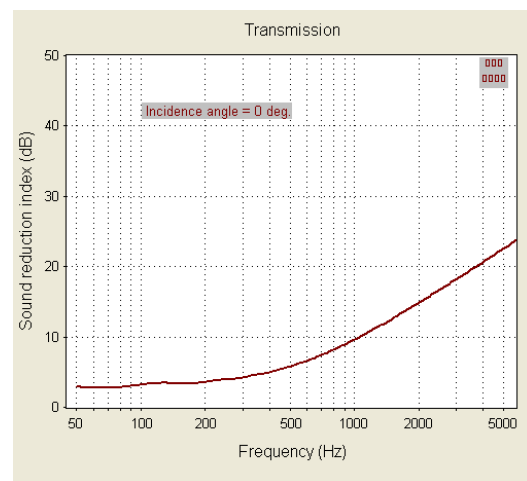
در شکل ۳ طراحی از یک جذب شیاردار با شیارهای مخروطی نمایش داده شده است. مشخصات طراحی نوع خاص از این جذب نیز در جدول ۲ فهرست شده است. در شکل ۴ تحلیل مربوط به افت انتقال در این جذب طراحی شده برحسب فرکانس مشاهده می شود.



شکل ۳. طراحی از جذب شیار دار با شیارهای مخروطی



شکل ۴. افت انتقال در یک جذب شیاردار با شیارهای مخروطی برحسب فرکانس



شکل ۲. افت انتقال در یک جذب شیاردار با شیارهای منظم برحسب فرکانس

#### ۳-۴. جذب‌های سوراخ‌دار با حفره‌های مخروطی<sup>۹</sup>

در جدول ۵ مشخصات طراحی یک جذب سوراخ‌دار با حفره‌های مخروطی فهرست شده است. در شکل ۷ نیز تحلیل مربوط به افت انتقال در جذب‌های سوراخ‌دار با حفره‌های مخروطی برحسب فرکانس نمایش داده شده است.

#### ۳-۳. جذب‌های سوراخ‌دار با حفره‌های منظم<sup>۸</sup>

در شکل ۵ طراحی از یک جذب سوراخ‌دار با حفره‌های منظم نمایش داده شده است. مشخصات طراحی نوع خاص از این جذب در جدول ۳ فهرست شده است. در شکل ۶ تحلیل مربوط به افت انتقال در این جذب را برحسب فرکانس نشان می‌دهد.

جدول ۱. طراحی جاذب شیار دار با شیارهای منظم

مشخصات جاذب	
ضخامت	۱۰ میلی متر
چگالی	۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب
مقاومت	صفر
پهنای شیار	۱۰ میلی متر
فاصله شیارها	۱۰۰ میلی متر
نصف پهنای حفره	۱۵۰ میلی متر
تصحیح امپدانس	$0 < -1 >$

جدول ۲. طراحی جاذب شیار دار با شیارهای مخروطی

مشخصات جاذب	
ضخامت	۱۵ میلی تر
چگالی	۸۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب
مقاومت درونی	صفر
مقاومت بیرونی	۱۰۰
پهنای شیار، ورودی	۵ میلی متر
پهنای شیار، خروجی	۵۰ میلی متر
فاصله شیارها	۲۰ میلی متر
نصف پهنای حفره	۱۵۰ میلی متر
تصحیح امپدانس	صفر

جدول ۳. طراحی جاذب سوراخ دار با حفره های منظم

مشخصات جاذب	
ضخامت	۱ میلی متر
چگالی	۲۷۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب
قطر حفره	۳ میلی متر
سطح حفره	۱۰۰ میلی متر مربع
مقاومت	صفر
تصحیح امپدانس	$0 < -1 >$
نصف پهنای حفره	۱۵۰ میلی متر

جدول ۴. طراحی جاذب سوراخ دار با حفره های مخروطی

مشخصات جاذب	
ضخامت	۱۳ میلی متر
چگالی	۸۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب
قطر حفره	۵ میلی متر
سطح / حفره	۴۰۰ میلی متر مربع
مقاومت ورودی	صفر
مقاومت خروجی	۱۰۰
تصحیح امپدانس	صفر

جدول ۵. مشخصات طراحی جاذب سوراخ دار با حفره های ریز

مشخصات جاذب	
ضخامت	۱ میلی متر
چگالی	۲۷۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب
قطر حفره	۰/۵ میلی متر
سطح/حفره	۱۰ میلی متر مربع
مقاومت	صفر

جدول ۶. مشخصات طراحی جاذب نوع Limp mass

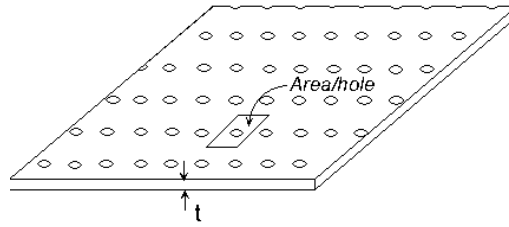
مشخصات جاذب	
ضخامت	۰/۱ میلی متر
چگالی	۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب
مقاومت	صفر

### ۳-۵. جاذب های سوراخ دار با حفره های ریز<sup>۱۰</sup>

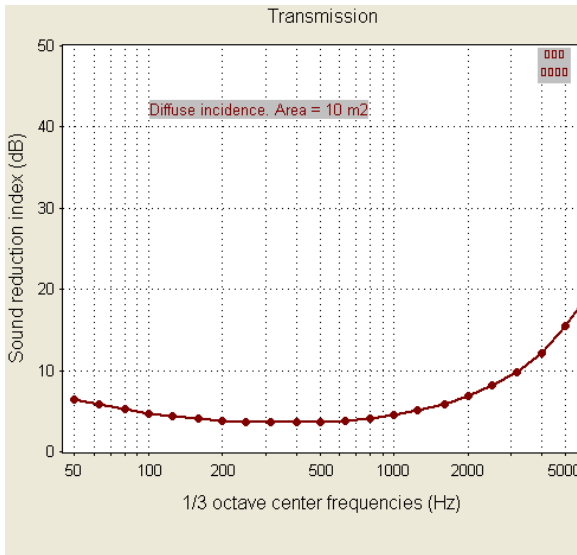
مشخصات طراحی یک جاذب سوراخ دار با حفره های ریز در جدول ۵ فهرست شده است. تحلیل مربوط به شاخص افت انتقال برحسب فرکانس برای این جاذب در شکل ۸ آورده شده است. مشخصات این جاذب به شرح جدول ۵ است.

### ۳-۶. جاذب های نوع Limp mass

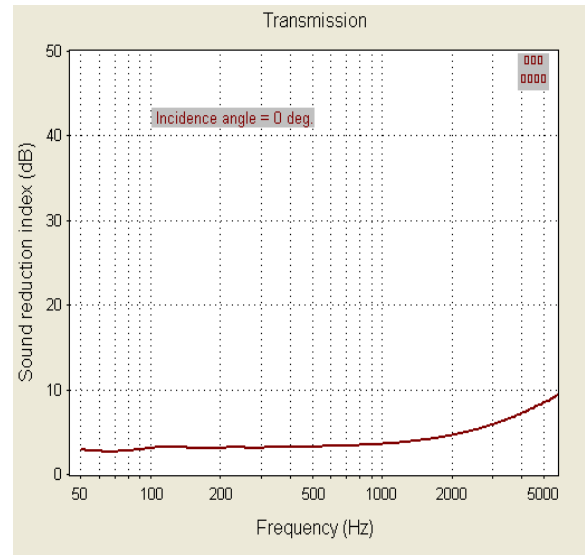
در جدول ۶ مشخصات طراحی نوعی جاذب Limp mass فهرست شده است. در شکل ۹ نیز تحلیل مربوط به شاخص افت انتقال در این جاذب برحسب فرکانس آمده است.



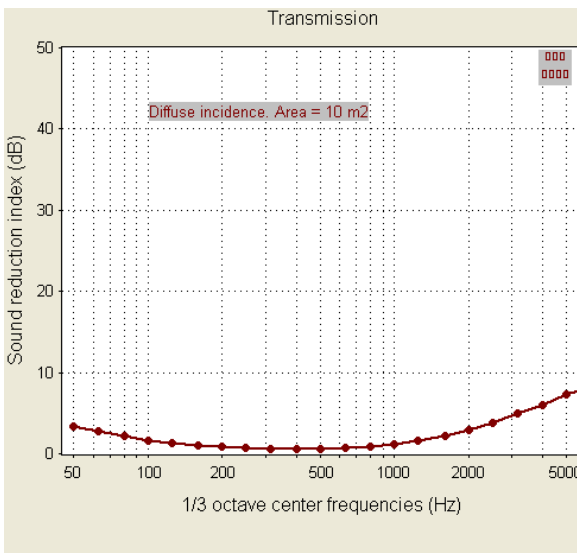
شکل ۵. نمونه‌ای از یک جاذب سوراخ‌دار با حفره‌های منظم



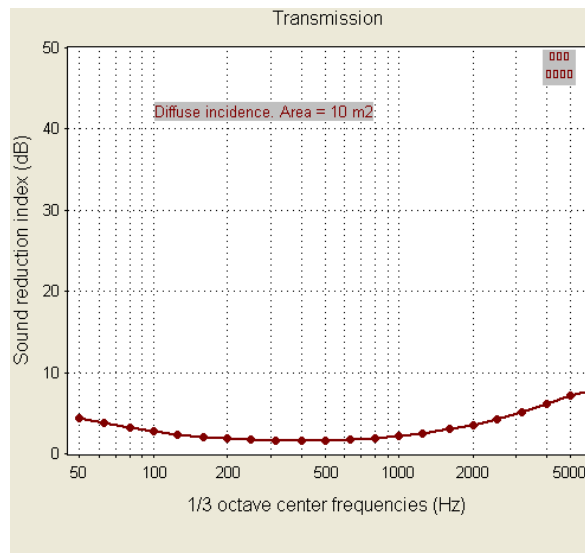
شکل ۷. شاخص افت انتقال در یک جاذب سوراخ‌دار با حفره‌های مخروطی بر حسب فرکانس



شکل ۶. افت انتقال در یک جاذب سوراخ‌دار با حفره‌های منظم بر حسب فرکانس



شکل ۹. شاخص افت انتقال در یک جاذب نوع Limp mass بر حسب فرکانس



شکل ۸. شاخص افت انتقال در یک جاذب سوراخ‌دار با حفره‌های ریز بر حسب فرکانس

### ۳-۷. جاذب‌های جامد ورقه‌ای نازک

مشخصات طراحی یک جاذب نوع جامد ورقه‌ای نازک در جدول ۷ فهرست شده است. در شکل ۱۰ نیز تحلیل مربوط به شاخص افت انتقال در این جاذب برحسب فرکانس نمایش داده شده است.

جدول ۷. مشخصات طراحی نوعی جاذب جامد ورقه‌ای نازک

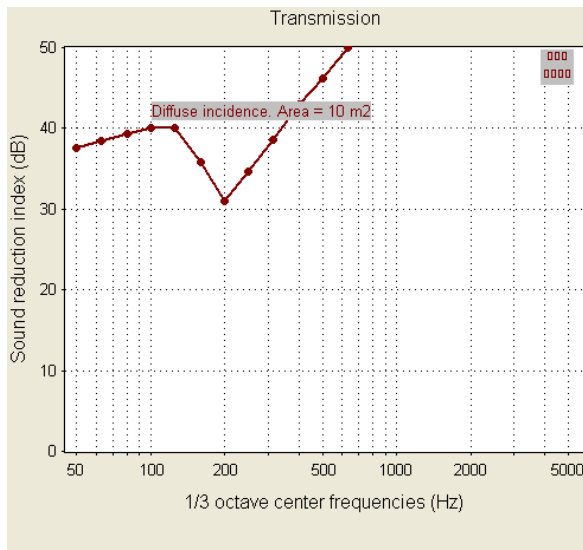
مشخصات جاذب	
ضخامت	۱۰ میلی‌متر
چگالی	۸۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب
ضریب E	۵ گیگاپاسکال
عدد پواسون	۰/۳
ضریب اتلاف	۰/۰۵

### ۳-۸. جاذب‌های جامد ورقه‌ای ضخیم

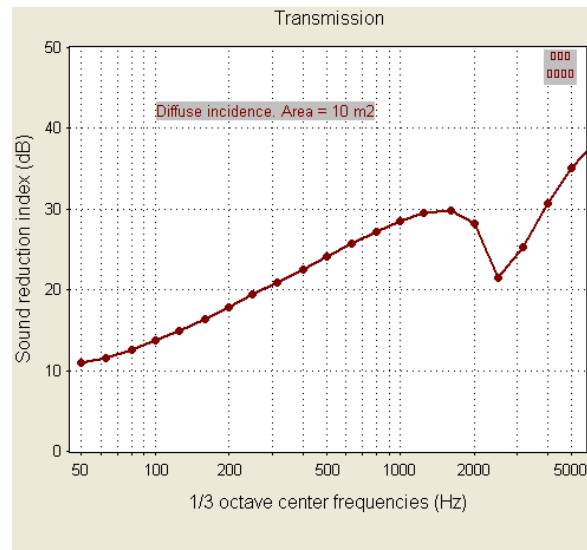
مشخصات طراحی نوعی جاذب جامد ورقه‌ای نازک در جدول ۸ فهرست شده است. در شکل ۱۱ نیز تحلیل مربوط به شاخص افت انتقال در این جاذب برحسب فرکانس نمایش داده شده است.

جدول ۸. مشخصات طراحی نوعی جاذب جامد ورقه‌ای ضخیم

مشخصات جاذب	
ضخامت	۱۰۰ میلی‌متر
چگالی	۲۳۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب
قطر حفره	۵ میلی‌متر
ضریب E	۳۰ گیگاپاسکال
عدد پواسون	۰/۲
ضریب اتلاف	۰/۰۵



شکل ۱۱. شاخص افت انتقال در یک جاذب نوع جامد ورقه‌ای ضخیم برحسب فرکانس



شکل ۱۰. شاخص افت انتقال در یک جاذب نوع جامد ورقه‌ای نازک برحسب فرکانس

### ۴. نتیجه‌گیری

شیارها، شاخص کاهش صوت را تنظیم کند. تحلیل‌های حاصل نشان می‌دهد در فرکانس‌های بالا شیارهای منظم نسبت به شیارهای مخروطی تأثیر بیشتری بر شاخص

با توجه به بررسی‌ها که روی جاذب‌های گوناگون انجام شد، می‌توان نتایج را به صورت زیر دسته‌بندی کرد. در جاذب‌های شیاردار طراح می‌تواند با تغییر شکل و چیدمان

تغییر چگالی فقط تأثیر اندکی بر جذب صوت و شاخص کاهش صدا دارد که این تأثیر در فرکانس‌های بالاتر مشهود است. گفتنی است در طراحی جاذب‌ها چون چگالی تأثیر زیادی بر امپدانس کوستیکی دارد، طراح در تعیین میزان چگالی محدود خواهد بود. خاطر نشان می‌شود که تمامی تغییرات ممکن روی ضخامت، چگالی و درصد تخلخل، همچنین هر تغییری در طراحی و ساخت جاذب تا زمانی قابل قبول خواهد بود که بر تطبیق امپدانس محیط شاره و جاذب تأثیر نگذارد. لذا برای بهینه‌سازی جذب صوت باید در ساخت و طراحی جاذب‌ها هر یک از این عوامل بسته به میزان تأثیر آن در نظر گرفته شود.

کاهش صوت دارند. در جاذب‌های سوراخ‌دار، طراح این انتخاب را دارد تا با تغییر شکل حفره‌ها، شاخص کاهش صوت را به‌ویژه در فرکانس‌های بالا افزایش دهد. اگر حفره‌ها به‌شکل مخروطی طراحی شوند، هرچند ضخامت به ناچار باید کمی افزایش یابد، اما کارایی جاذب در فرکانس‌های بالا افزایش خواهد یافت. کارایی جاذب‌های سوراخ‌دار با حفره‌های منظم کمی بهتر از جاذب سوراخ‌دار با شکل کلی منحنی‌های شاخص افت انتقال در جاذب‌های جامد ورقه‌ای نازک و ضخیم مشابه است؛ با این تفاوت که با کاهش فرکانس کاربری، ضخامت جاذب ورقه‌ای نیز باید تقریباً به‌همان نسبت افزایش یابد. در جاذب limp mass

## ۵. مآخذ

- [1] David, J., N. Cheeke, *Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves*, CRC Pres, 2002.
- [2] Anon. "Underwater Acoustics", *ASA Underwater Acoustics Technical Committee*, 2013.
- [3] Bhatia, A., *Ultrasonic Absorption: An Introduction to the Theory of Sound Absorption and Dispersion in Gases, Liquids and Solids*, Dover Publications, 2012.
- [4] Yang-Hann, K., *Sound Propagation: An Impedance Based Approach*, John Wiley & Sons, 2010.
- [5] Cox, T. J., P. D'antonio, *Acoustic Absorbers and Diffusers*, SponPress, 2004.
- [6] Vugran, T. E., *Manual for WINFLAG, Version 2.2*, 2008.
- [7] Mechel, F. P. "Ausweitung der Absorberformel von Delany und Bazley zu tiefen Frequenzen." *Acustica*, 1976, pp. 210-213.
- [8] Trevor, J. C., P. D. Antonio, *Acoustic Absorbers and Diffusers, Theory, design and application*, Second ed., Taylor & Francis, 2009.
- [9] Leclair, P., L. Kelders, W. Lauriks, M. Melon, N., N. Brown, B. Castanede. "Determination of the viscous and thermal characteristic length of plastic foams by ultrasonic measurements in helium and air. *J. Appl. Physics* 80." *Appl. Physics*, vol. 80, 1996, pp. 2009-2012.
- [10] Mechel, F. P. "Design charts for sound absorber layers." *Acoust. Soc. Am.*, vol. 83, 1988, pp. 1002-1013.

## پی‌نوشت

1. WINFLAG
2. echo reduction
3. transmitted waves
4. energy spreading
5. sound absorption
6. slotted/regular slots

7. slotted/conical slots
8. perforated/regular holes
9. perforated/conical holes
10. perforated/microperf