Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 57(1) (2025) 43-68
DOI: 10.22060/mej.2025.23777.7811

Numerical Investigation of the Effect of Mechanical Properties of Impedance-matched Materials with the Underwater Environment on Acoustic Absorption Using the Finite Element Method

Amir Hosein Moradi, Abolfazl Hasani Baferani*

Department of Mechanical Engineering, Tafresh University, Tafresh, Iran.

ABSTRACT: In this study, five materials used for the design and manufacture of acoustic absorbers have been investigated. The finite element method has been used with the help of COMSOL software to measure the underwater sound absorption coefficient. The method of creating an axisymmetric simulation to reduce the volume of calculations has been explained; the application of boundary conditions and the generation of acoustic waves have also been investigated, and the effect of the mechanical properties of the materials, including Young's modulus, density, and loss coefficient, on the underwater sound absorption coefficient has been analyzed. The results show that with the increase in the Young's modulus of materials such as nitrile butadiene rubber, which inherently has a low Young's modulus; the sound absorption coefficient in the frequency range of 0.2 to 10 kHz increases significantly compared to other materials. Materials with a high loss coefficient increase the sound absorption coefficient at frequencies below 1 kHz compared to other materials. Materials such as styrene-butadiene rubber, which has a density close to that of water, have a good impedance match with the underwater environment and have excellent sound absorption coefficients in the frequency range of 2 to 10 kHz, which also depends on other material properties.

Review History:

Received: Dec. 27, 2024
Revised: Apr. 12, 2025
Accepted: Apr. 22, 2025
Available Online: Apr. 26, 2025

Keywords:

Underwater Sound Absorption
Young's Modulus
Density
Loss Coefficient
Impedance Matching

1- Introduction

Sonar is a technology that uses sound emission or absorption of sound emitted underwater to identify other ships, vessels, and underwater objects[1, 2]. Sound-absorbing layers are used to cover a moving vehicle in an underwater environment to prevent detection by sonar systems[3-6]. In order to effectively design sound-absorbing layers, several important issues must be considered to achieve better results, the most important of which is impedance matching with the underwater environment so that the waves radiated to the absorbing layer enter the absorbing layer with minimal reflection [7]. Researchers have used various materials that have the property of impedance matching with the underwater environment, such as polymeric materials [8, 9], etc., in designing underwater sound absorbers.

In the present study, the effect of mechanical properties on the underwater sound absorption coefficient of several conventional materials used to design and manufacture acoustic absorbers for underwater environments[7] has been investigated.. The results of this study show that the mechanical properties of each material can affect the sound absorption coefficient at different points in the frequency range. Therefore, investigating these properties on the underwater sound absorption coefficient is of great importance in the design and manufacture of acoustic coatings in underwater environments.

2- Materials and Finite Element Method

In this study, five materials, epoxy, thermoplastic polyurethane, styrene-butadiene rubber, chlorinated polyethylene rubber, and nitrile butadiene rubber, which are used in most references as the base material for designing acoustic absorbers in underwater environments, have been investigated, and the effect of their mechanical properties on the underwater sound absorption coefficient has been considered.

COMSOL software has been used to calculate the sound absorption coefficient. A quadrilateral section has been selected as the cross-section of a cell of the absorber. This problem is solved in three dimensions and by considering the physics of sound pressure in the frequency domain and the mechanics of solids. Above the water space, a completely uniform layer has been placed to prevent the interference of radiated sound waves with the reflected waves of the

*Corresponding author's email: baferani@tafreshu.ac.ir

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

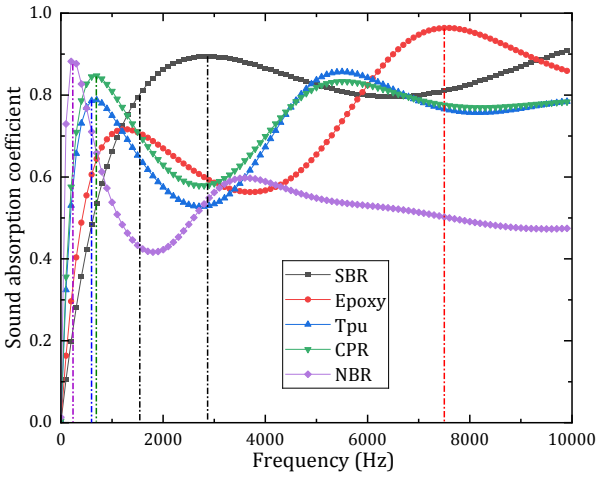


Fig. 1. Sound absorption coefficient diagram of the presented materials

absorber surface and to transmit the reflected waves to the outside environment[28]. It should be noted that a solid-fluid interface is set up at the interface between the water and the absorber structure. The occurrence of the sound wave is achieved by setting a background pressure field in the water layer. By setting periodic boundary conditions on the four sides of the periodic cell in COMSOL, the periodic cell can be considered as an infinite number, and with this condition the lateral dimension of the absorber is assumed to be infinite and it is formed from a periodic arrangement of quadrilateral cells and such periodic cells arranged in the horizontal direction form an infinite sound absorbing superstructure[10].

3- Results and Discussion

The fluctuation in the acoustic absorption coefficient of underwater samples is due to the natural frequencies of solids and fluids and their dependence on the mechanical and non-acoustic properties of the material. Materials with high Young's modulus deform less due to their greater stiffness and show a higher sound absorption coefficient, but a further increase in the modulus does not have a significant effect on them. In contrast, in materials such as nitrile butadiene rubber with low Young's modulus, with increasing stiffness, sound absorption increases significantly at frequencies of 2–10 kHz. The high loss factor ensures optimal conversion of the mechanical energy of the sound wave into heat through internal viscosity and elastic damping and is especially effective at low frequencies and in water (due to high impedance). The impedance matching between the material and water improves the transmission and absorption of acoustic energy by exploiting the viscoelastic property of lossy materials and adjusting the density close to that of water. Consequently, a balanced selection of Young's modulus, loss coefficient, and density is essential to achieve effective underwater sound absorption. These results are evident in Figure 1.

4- Conclusion

In this study, the effect of the mechanical properties of five common water-impedance-matched polymeric materials on the sound absorption coefficient has been investigated using the finite element method. Parameters such as Young's modulus, density, and loss factor have been analyzed for each material. The results show that these properties have different effects on the sound absorption performance depending on the frequency. In some materials such as epoxy and thermoplastic polyurethane, changes in Young's modulus and density directly affect the absorption, while in materials such as nitrile butadiene rubber and chlorinated polyethylene, the loss factor plays a more key role. The results of this study are of great help in the design and manufacture of acoustic absorbers.

References

[1] s.a.A. Sayadi, Classification and identification of underwater targets based on diffuse sounds, arine Engineering Scientific-Research Journal (2018 in Persian).

[2] S.a. Saghayi, Investigation identification and design of required signals in active sonar transmitter., 16th Maritime Industry Conference, (2014) (in Persian).

[3] C. Daniels, N. Perera, Investigation of Alberich Coating to Optimise Acoustic Stealth of Submarines, Acoustics, 4(2) (2022) 362-381.

[4] S. Zhou, Z. Fang, Optimization design of acoustic performance of underwater anechoic coatings, Acoustics Australia, 50(3) (2022) 297-313.

[5] Y. Fu, H. Wang, P. Cao, Numerical design and optimization of metamaterials for underwater sound absorption at various hydrostatic pressures, Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, 42(3) (2023) 1434-1450.

[6] H. Weeratunge, Z. Shireen, S. Iyer, A. Menzel, A.W. Phillips, S. Halgamuge, R. Sandberg, E. Hajizadeh, A machine learning accelerated inverse design of underwater acoustic polyurethane coatings, Structural and Multidisciplinary Optimization, 65(8) (2022) 213.

[7] M. Ranjbar, M.U. Bayer, Design of acoustic coating for underwater stealth in low-frequency ranges, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 46(3) (2024) 140.

[8] S. Qu, N. Gao, A. Tinel, B. Morvan, V. Romero-García, J.-P. Groby, P. Sheng, Underwater metamaterial absorber with impedance-matched composite, Science Advances, 8(20) (2022) 4206.

[9] X. Fang, X. Yin, J. Wu, Y. Li, H. Li, W. Wang, Y. Li, W. Wu, Underwater metagratings for sub-kilohertz low frequency and broadband sound absorption, International

Journal of Mechanical Sciences, 260 (2023) 108630.

[10] J. Hu, Y. Lin, Z. Zhou, X. Cao, Q. Chi, W. Wu, Study on the low-frequency and broadband sound absorption performance of an underwater anechoic layer with novel design, Journal of Marine Science and Engineering, 11(2) (2023) 409.

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۷، شماره ۱، سال ۱۴۰۴، صفحات ۴۳ تا ۶۸
DOI: 10.22060/mej.2025.23777.7811

بررسی عددی تأثیر خواص مکانیکی مواد دارای تطبیق امپدانس با محیط زیر آب بر ضریب جذب صوت با روش اجزای محدود

امیرحسین مرادی، ابوالفضل حسنی بافرانی *

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش، تفرش، ایران.

خلاصه: در این مطالعه، پنج ماده که برای طراحی و ساخت جاذب‌های آکوستیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. از روش اجزای محدود به کمک نرم‌افزار کامسول برای اندازه‌گیری ضریب جذب صوت زیر آب استفاده شده است. نحوه ایجاد شبیه‌سازی به صورت متقارن محوری برای کاهش حجم محاسبات، توضیح داده شده است؛ همچنین اعمال شرایط مرزی و تولید امواج آکوستیکی نیز مورد بررسی قرار گرفته است و تأثیر خواص مکانیکی مواد، از جمله مدول یانگ، چگالی و ضریب تلفات، بر ضریب جذب صوت زیر آب تحلیل شده است. نتایج نشان می‌دهد با بیشتر شدن مدول یانگ موادی همچون لاستیک بوتادین نیتریل که ذاتا مدول یانگ پایینی دارند؛ ضریب جذب صوت در محدوده فرکانسی ۰٫۲ تا ۱۰ کیلوهرتز به صورت چشمگیری نسبت به سایر مواد افزایش می‌یابد. مواد دارای ضریب تلفات بالا نسبت به سایر مواد ضریب جذب صوت را در فرکانس‌های زیر ۱ کیلوهرتز افزایش می‌دهند. موادی همچون لاستیک استایرون بوتادین که چگالی نزدیک به چگالی آب را دارند، تطبیق امپدانس مناسبی با محیط زیر آب را دارند و ضریب جذب صوت در حد عالی در بازه فرکانسی ۲ تا ۱۰ کیلوهرتز را دارند که این امر به سایر خواص مواد هم وابسته است.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۰۷
بازنگری: ۱۴۰۴/۰۱/۲۳
پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۰۲
ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۲/۰۶

کلمات کلیدی:
جذب صوت زیر آب
مدول یانگ
چگالی
ضریب تلفات
تطبیق امپدانس

۱- مقدمه

سونار[1] تکنولوژی است که با استفاده از انتشار صدا یا جذب صدا های انتشار یافته در زیر آب قادر به شناسایی دیگر ناوها، کشتی‌ها و اجسام زیرآب است[۱, ۲]. از لایه های جاذب صوت به‌منظور پوشاندن یک وسیله متحرک در محیط زیر آب برای مقابله با ردیابی شدن توسط سامانه های سونار استفاده می‌شود[۳-۶]. به‌منظور طراحی مؤثر لایه‌های جاذب صوت چند امر مهم را باید بررسی کرد تا نتایج بهتری حاصل شود که مهم ترین آن تطبیق امپدانس با محیط زیر آب است که امواج تابشی به لایه جاذب با کمترین انعکاس وارد لایه جاذب شوند[۷]. محققان در طراحی جاذب‌های صوت زیر آب از مواد مختلف که خاصیت تطبیق امپدانس را با محیط زیر آب را دارند مانند مواد پلیمری [۸, ۹] و غیره استفاده کرده اند. چالش بعدی که محققان در طراحی های خود در نظر گرفته اند فشار هیدرواستاتیکی است و متوجه شدند که افزودن اجسام فلزی با چگالی بالا به یک ماده زمینه لاستیکی می‌تواند مقاومت لاستیک را بالابرده و در فشار های بالا هم همچنان همان مقدار ضریب جذب را داشته باشد[۱۰-۱۲].

گائو[2] و ژانگ[3][۱۳, ۱۴] در سال ۲۰۱۹ یک فراماده جاذب صوت برای محیط زیر آب را طراحی کردند که از ماده زمینه لاستیکی و نوسانگر مارپیچی تشکیل شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که هرچقدر چگالی نوسانگر مارپیچی بیشتر می‌شود و جنس این نوسانگر از مواد با چگالی بالا تشکیل شود؛ ضریب جذب صوت زیر آب در محدوده فرکانسی ۱ تا ۱۰۰۰ هرتز افزایش می‌یابد. شی[4] و همکاران[۱۵, ۱۶] در سال ۲۰۱۹ فراماده کامپوزیتی[5] ارائه کردند که از چندلایه لاستیک ویسکوالاستیک[6] و اپوکسی تشکیل شده است. در این مطالعه تأثیرات مدول یانگ[7] و چگالی ماده زمینه بر ضریب جذب صوت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش مدول یانگ و چگالی ماده ترکیبی زمینه، ضریب جذب صوت در

1. Sound Navigation And Ranging (SONAR)

2. Nansha Gao
3. Yanni Zhang
4. Kangkang Shi
5. Composite
6. Viscoelastic
7. Young's modulus

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: moaven@um.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

محدوده ۵ تا ۲۰ کیلوهرتز افزایش می‌یابد.

وانگ[1] و همکاران[۱۷] در سال ۲۰۲۱ یک ساختار جاذب صوت زیر آب با چند نوسانگر فلزی را طراحی کردند. نتایج روش اجزای محدود[2] و تابع انتقال در این مطالعه نشان می‌دهد با بیشتر شدن ضریب تلفات ماده زمینه، قله‌های جذب به نقاط با فرکانس بالاتر انتقال می‌یابد و به دنبال آن پهنای باند در محدوده فرکانسی ۱تا ۸ کیلوهرتز به بالای ۸۰ درصد می‌رسد.

ژانگ[3] و همکاران[۱۸] در سال ۲۰۲۲ یک ساختار جاذب صوت زیر آب را ارئه کردند که از لاستیک استایرون بوتادین، لاستیک پلی‌اتیلن کلردار و لاستیک بوتادین نیتریل دارای حفره هوا تشکیل شده است. نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود در این مطالعه نشان می‌دهد که با افزایش مدول یانگ در استایرون بوتادین ضریب جذب صوت را در فرکانس‌های بالا احیا می‌شود و با افزایش مدول یانگ در پلی‌اتیلن کلردار و بوتادین نیتریل ضریب جذب در فرکانس‌های متوسط اندکی بهبود می‌یابد. افزایش ضریب تلفات در پلی‌اتیلن کلردار و بوتادین نیتریل قله جذب را در فرکانس‌های پایین بهبود می‌بخشد و در استایرون بوتادین باعث افزایش ضریب جذب در فرکانس‌های بالا می‌شود. این نتایج در شرایطی ارائه شده است که مواد زمینه دارای حفره های هوا استوانه‌ای و مخروطی هستند.

یین[4] و همکاران[۱۹] در سال ۲۰۲۲ با روش اجزای محدود به بررسی تأثیر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های بر پایهٔ پلی‌یورتان[5] پرداختند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد مدول یانگ تأثیر چشمگیری را در ضریب جذب صوت زیر آب در محدوده فرکانسی ۱ تا ۱۰ کیلوهرتز ایجاد می‌کند. با تغییرات چگالی نتایج به‌صورت جزئی تغییر می‌کند که این تغییر قابل‌چشم‌پوشی است.

ژو[6] و همکاران[۲۰] در سال ۲۰۲۲ فراماده کامپوزیتی را طراحی کردند و تأثیر ضریب تلفات ماده زمینه را بر ضریب جذب صوت زیر آب را مورد بررسی قرار دادند. نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود در این مطالعه نشان می‌دهد با بیشتر شدن ضریب تلفات ماده زمینه، پهنای باند در محدوده فرکانسی ۱ تا ۱۰ کیلوهرتز احیا می‌شود.

لی[7] و همکاران[۲۱] در سال ۲۰۲۳ فراماده متشکل از چند حفره هوا مخروطی در یک ماده زمینه لاستیکی را طراحی کردند و رابطه بین مدول یانگ و فشار هیدرواستاتیکی[8] را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که با افزایش مدول یانگ فراماده جاذب صوت در فشار های هیدرواستاتیکی بالا ضریب جذب صوت خود را کمتر از دست می‌دهد. لین[9] و همکاران[۲۲] در سال ۲۰۲۳ یک فراماده جاذب صوت زیر آب دارای حفره هوا و ورق سوراخ دار فلزی که در ماده زمینه لاستیکی قرار گرفته را طراحی کردند. نتایج تئوری تابع انتقال در این مطالعه نشان می‌دهد افزایش ضریب تلفات این ساختار باعث بهبود پهنای باند جذب صوت در فرکانس‌های متوسط وبالا در محدوده جذب ۸۰ درصد می‌شود. افزایش چگالی و مدول یانگ ماده زمینه در این ساختار تغییرات اندکی را در ضریب جذب صوت زیر آب ایجاد می‌کند.

پن[10] و همکاران[۲۳] در سال ۲۰۲۴ به بررسی تأثیر حفره های هوا در یک یک ماده زمینه لاستیکی پرداختند و نتایج را با شبیه‌سازی و تئوری تابع انتقال مورد بررسی قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد با افزایش ضریب تلفات ماده زمینه ضریب جذب در فرکانس‌های پایین ترمیم می‌شود و پهنای باند در محدوده فرکانسی ۱ تا ۱۰ کیلوهرتز به بالای ۹۵ درصد می‌رسد. دونگ[11][۲۴] و همکاران در سال۲۰۲۴ به بررسی تأثیر هندسه نوسانگر فلزی و خواص مکانیکی ماده زمینه فراماده جاذب صوت دارای نوسانگر فلزی پرداختند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که با افزایش مدول یانگ قله‌های جذب به فرکانس‌های بالاتر انتقال می‌یابد و با افزایش ضریب تلفات پهنای باند جذب صوت زیر آب احیا می‌شود. ژیا[12] و همکاران[۲۵] در سال ۲۰۲۴ یک فرماده جاذب صوت زیر آب متشکل از لاستیک و حفره هوا و صفحات سوراخ‌دار مشبک را ارائه کردند و تأثیر های خواص مکانیکی ماده زمینه دارای حفره هوا را بر ضریب جذب مورد بررسی قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد با افزایش مدول یانگ ماده زمینه قله‌های جذب در فرکانس‌های پایین به فرکانس‌های بالاتر هدایت می‌شود و ضریب جذب در محدوده فرکانسی ۴ تا ۱۰ کیلوهرتز افزایش می‌یابد. با افزایش چگالی و ضریب تلفات ماده زمینه ضریب جذب صوت زیر آب در فرکانس‌های متوسط به صورت محسوس افزایش می‌یابد. ژو[13] و همکاران[۱۲] در سال ۲۰۲۴ فراماده جاذب صوت برای محیط زیر آب را ارائه کردند که دارای نوسانگر فلزی با هندسه استوانه ای و مارپیچ است. در این مطالعه تأثیر افزایش

1. Ting Wang
2. Finite element
3. Zhifu Zhang
4. Dexian Yin
5. Polyurethane
6. Yi Zhu
7. Dongwoo Lee
8. Hydrostatic
9. Han-Chun Lin
10. Pen
11. Kaiyuan Dong
12. Xinyu Jia
13. Han Zou

مدول یانگ و ضریب تلفات ماده زمینه پلی‌یورتان همگام با افزایش فشار هدرواستاتیک مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی و تجربی نشان می‌دهد افزایش مدول یانگ و ضریب تلفات ماده زمینه تا حدی می‌توانند از کاستن ضریب جذب صوت زیر آب جلوگیری کنند.

در مطالعه حاضر به بررسی تأثیر خواص مکانیکی بر ضریب جذب صوت زیر آب چند مواد مرسوم که از آنها برای طراحی ساخت جاذب‌های آکوستیکی برای محیط زیر آب استفاده می‌شود[۷]؛ پرداخته شده است. برای ارائه نتایج از روش اجزای محدود به کمک نرم‌افزار کامسول[1] استفاده شده است. تاثیر خواص مکانیکی از جمله مدول یانگ، چگالی و ضریب تلفات بر ضریب جذب صوت زیر آب مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد خواص مکانیکی در هر ماده می‌تواند در نقاط مختلفی از محدوده‌های فرکانسی بر ضریب جذب صوت تاثیرگزار باشد. از این رو بررسی این خواص بر ضریب جذب صوت زیر آب دارای اهمیت زیادی در طراحی و ساخت پوشش‌های آکوستیکی در محیط زیر آب است.

۲- شبیه‌سازی جذب صوت زیر آب

۲- ۱- معادلات حاکم

به منظور اندازه‌گیری ضریب جذب مواد مختلف در محیط زیر آب مسئله به دو قسمت تقسیم می‌شود. این دو قسمت عبارتند از قسمت آب و قسمت ماده جاذب. برای قسمت آب، معادلات ممنتوم و پیوستگی در روابط (۱ و ۲) بیان شده‌اند. در این روابط از تاثیر گرما و گرانروی صرف‌نظر و فرایند به صورت بی‌دررو و برگشت‌پذیر درنظر گرفته شده است.

$$\frac{\partial u}{\partial t}+(u\cdot\nabla)u=\frac{1}{\rho_f}\nabla P \qquad (۱)$$

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho_f u)=0 \qquad (۲)$$

در این روابط ρ_f چگالی سیال، u بردار سرعت و P فشار کل می‌باشد. مشتق‌گیری از رابطه (۱) و جایگذاری در رابطه (۲) و بازنویسی مجدد روابط، معادله موج به‌دست می‌آید که در رابطه (۳) بیان شده است. چگونگی استخراج این روابط در مرجع[۲۶] بیان شده است.

$$\frac{1}{\rho_f c^2}\frac{\partial^2 P}{\partial t^2}+\nabla\cdot\left(-\frac{1}{P}(\nabla P-q_d)\right)=Q_m \qquad (۳)$$

که در آن $\rho_f c^2$ مدول حجمی، q_d منبع انتقال موج در دو جهت مخالف (منبع دو قطبی) و Q_m منبع انتقال موج در تمام جهات (منبع تک قطبی) است. یک حالت خاص موج هارمونیک زمانی است که فشار تابعی از زمان باشد که این حالت در رابطه ۴ بیان شده است.

$$P(x,t)=P(x)e^{i\omega t} \qquad (۴)$$

با جایگذاری رابطه‌ی (۴) در رابطه (۳) معادله هلمهولتز به‌دست می‌آید که در رابطه (۵) ارائه شده است. در این رابطه $\omega=2\pi f$ بیانگر سرعت زاویه‌ای و f فرکانس موج می‌باشد.

$$\frac{\omega^2 P}{\rho_f c^2}+\nabla\cdot\left(-\frac{1}{\rho_f}(\nabla P-q_d)\right)=Q_m \qquad (۵)$$

با جایگذاری معادله عدد موج $(k_{eq}=\frac{\omega}{c})$ در رابطه (۵)، رابطه (۶) استخراج می‌شود. با حل این رابطه نحوه‌ی انتشار امواج در ناحیه آب به‌دست می‌آید.

$$\frac{k_{eq}^2 P}{\rho_f}+\nabla\cdot\left(-\frac{1}{\rho_f}(\nabla P-q_d)\right)=Q_m \qquad (۶)$$

در ناحیه جامد که همان مواد جاذب است، می‌توان رابطه خطی بین تانسورهای تنش و کرنش را به صورت رابطه‌ی (۷) نوشت.

$$\sigma_{ij}=c_{ijkl}\varepsilon_{kl} \qquad (۷)$$

در این رابطه C تانسور تنش کوشی، ε تانسور کرنش و C_{ijkl} تانسور الاستیسیته مرتبه چهارم است. برای جابجایی‌های کوچک، تانسور کرنش به صورت رابطه‌ی (۸) تعریف شده و رابطه الاستیک موج که از قانون دوم نیوتن استخراج شده است، از رابطه (۹) محاسبه می‌گردد.

1. COMSOL

$$\varepsilon(u)=\frac{1}{2}(\nabla u+\nabla u^{T}) \quad (۸)$$

$$\rho_s \frac{\partial^2}{\partial t^2}u-\nabla\cdot(\sigma(u)-s_0)=F \quad (۹)$$

در این روابط ρ_s چگالی جاذب، S_0 و F مولفه‌های منبع نیرو و u بردار جابجایی است. یک حالت مهم موج هارمونیک با زمان می‌باشد که توسط رابطهٔ (۱۰) ارائه می‌شود.

$$u(x,t)=u(x)e^{i\omega t} \quad (۱۰)$$

با در نظرگرفتن وابستگی هارمونیک مشابه برای مولفه‌های منبع، معادله‌ی امواج الاستیک خطی به معادله‌ی ناهمگن هلهولتز کاهش می‌یابد که در رابطهٔ (۱۱) ارائه شده است.

$$-\rho_s\omega^2 u-\nabla\cdot(\sigma(u)-s_0)=F \quad (۱۱)$$

با توجه به این معادله به عنوان معادله‌ی مقدار ویژه با مشتقات جزئی و حل آن، مودها و فرکانس های ویژه بدست می‌آیند که با استفاده از آن نمایه جابجایی و در نتیجه، نحوهٔ انتشار امواج در ناحیهٔ جامد حاصل می‌گردد.

۲- ۲- شرایط مرزی

شرایط مرزی مختلفی را می‌توان برای معادلات حاکم ذکر شده در قسمت قبل در نظر گرفت. در ناحیهٔ سیال، یکی از مهمترین شرایط مرزی، شرط مرزی تقارن یا تناوبی می‌باشد. با استفاده از این شرط و با حذف نواحی متقارن، حجم محاسبات کاهش می‌یابد. این شرط معادل شرط مرزی دیوار سخت بوده و به معنی صفر بودن گرادیان فشار در مرز می‌باشد و در رابطه (۱۲) ارائه شده است. از این شرط مرزی در قسمت جامد هم استفاده شده است.

$$-n\cdot\left(-\frac{1}{\rho_0}(\nabla P-q_d)\right)=0 \quad (۱۲)$$

شرط مرزی انتشار موج تخت از جمله شرایط مرزیست که می‌توان از آن برای خاتمه دادن به یک ناحیه سیالی استفاده نمود. این شرط در رابطه (۱۳) داده شده است.

$$-n\cdot\left(-\frac{1}{\rho_0}(\nabla P-q_d)\right)+i\frac{k_{eq}}{\rho}P+\frac{i}{2k_{eq}\rho}\Delta_T P=Q_i \quad (۱۳)$$

قسمت انتهایی جامد شرط مرزی قید ثابت درنظر گرفته شده که در این قید بردار جابجایی برابر صفر می‌باشد که در رابطه‌ی (۱۴) آمده است.

$$u=0 \quad (۱۴)$$

۲- ۳- رابط چندفیزیکی(تداخل سیال و جاذب)

به منظور ایجاد پیوستگی بین سطح تماس جاذب با سیال از شرط مرزی میانی که در روابط (۱۵ تا ۱۸) بیان شده، استفاده گردیده است. رابطه (۱۵) بیانگر شتاب نرمال مرز آب با جاذب و روابط (۱۶ و ۱۷) بیانگر شتاب نرمال مرز جاذب با آب می‌باشد. همچنین رابطه (۱۸) برایند نیروهای درونی سطح تماس را بیان می‌کند. که در آن u_{tt} شتاب سازه، n نرمال سطح ، P_t فشار آکوستیک کل و F_A بار (نیرو در واحد سطح) است که توسط سازه جاذب تجربه می‌شود.

$$-n\left(\frac{1}{\rho_c}(\nabla\rho_t-q_d)\right)=-n\cdot u_{tt} \quad (۱۵)$$

$$-n\left(\frac{1}{\rho_c}(\nabla\rho_t-q_d)\right)_1=-n\cdot u_{tt} \quad (۱۶)$$

$$-n\left(\frac{1}{\rho_c}(\nabla\rho_t-q_d)\right)_2=-n\cdot u_{tt} \quad (۱۷)$$

$$F_A=(P)_1 n-(P)_2 n \quad (۱۸)$$

جدول ۱. مقادیر خواص مکانیکی مواد [۱۲, ۱۸, ۲۷]

Table 1. Values of mechanical properties of materials [12, 18, 27].

نام ماده	مدول یانگ (Kpa)	چگالی (Kg/m^3)	ضریب پواسون	ضریب تلفات
اپوکسی	۲۷۰۰۰	۱۱۰۰	۰/۴۹	۰/۶
ترموپلاستیک پلی‌یورتان	۲۰۰۰۰	۱۱۵۰	۰/۴۸۵	۰/۸
لاستیک استایرون بوتادین	۹۶۰۰۰	۱۰۳۹	۰/۴۸	۱
لاستیک پلی‌اتیلن کلردار	۹۸۹۰۰	۱۲۱۰	۰/۴	۱
لاستیک بوتادین نیتریل	۱۴۵۰۰	۱۰۵۶	۰/۴۶	۱/۳
فولاد	۲۰۰۰۰۰۰۰۰	۷۸۵۰	۰/۳	۰/۰۰۰۲

۲- ۴- ضریب جذب و انعکاس

برای محاسبهٔ عملکرد جاذب از ضرایب بازتاب R و جذب (α) استفاده می‌شود که به ترتیب در روابط (۱۹ و ۲۰) ارائه شده‌اند.

$$R = \left| \frac{P_{out}}{P_{in}} \right| \quad (۱۹)$$

$$\alpha = 1 - R^2 \quad (۲۰)$$

در روابط بالا P_{in} فشار ورودی بر روی سطح جاذب، P_{out} فشار بازتاب شده از سطح جاذب می‌باشد.

ترکیب معادلات و شرایط مرزی ذکر شده در بخش قبل، غیر خطی بوده و نمی‌توان از روش‌های تحلیلی برای حل آن‌ها استفاده کرد. از طرف دیگر، به علت دخیل بودن پارامترهای مختلف فیزیکی در سیستم معادلات و حساسیت دستگاه به هر کدام، باید از روشی قدرتمند برای حل معادلات استفاده نمود. بنابراین روش عددی اجزای محدود برای حل معادلات انتخاب شده و از نرم‌افزار کامسول برای انجام شبیه‌سازی استفاده گردیده است.

۲- ۵- حل عددی

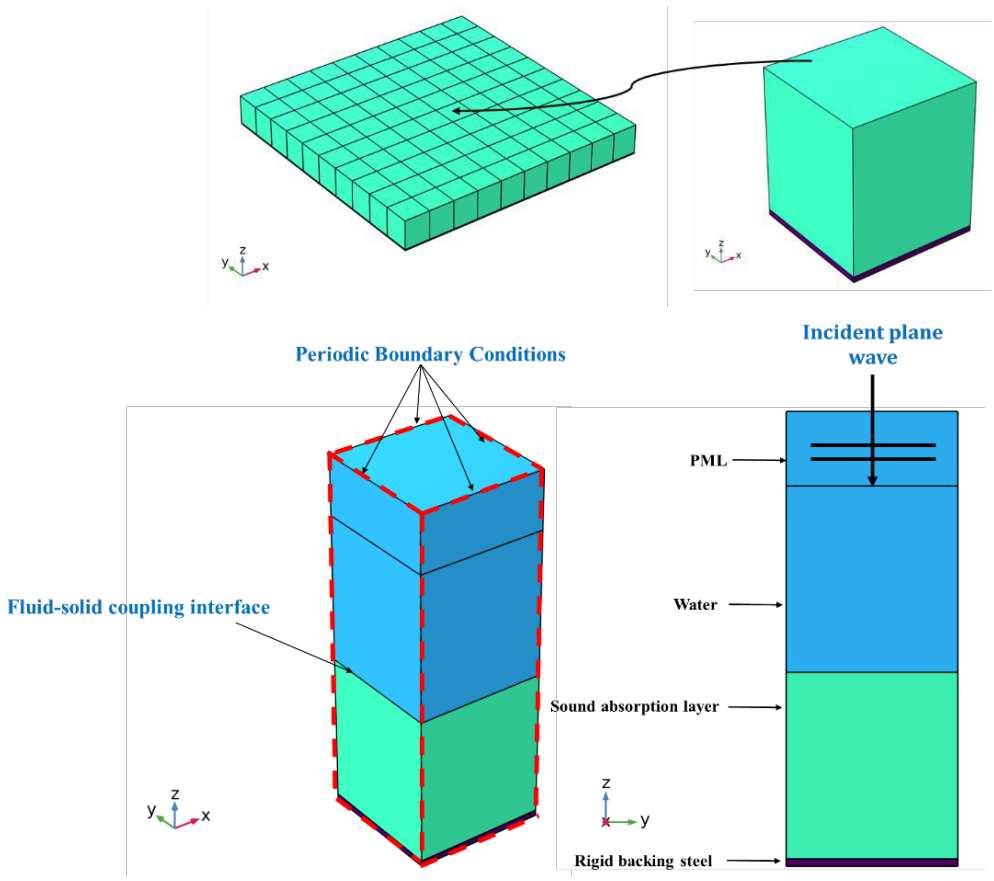
۲- ۵- ۱- مواد

در این مطالعه پنج ماده اپوکسی[1]، ترموپلاستیک پلی‌یورتان[2]، لاستیک استایرون بوتادین[3]، لاستیک پلی‌اتیلن کلردار[4] و لاستیک بوتادین نیتریل[5] که در اکثر مراجع از آن‌ها به‌عنوان ماده زمینه جهت طراحی جاذب‌های آکوستیکی در محیط زیر آب به کار می‌رود مورد بررسی قرار گرفته است و تأثیر خواص مکانیکی آن‌ها بر ضریب جذب صوت زیر آب در نظر گرفته شده که مقادیر این خواص در جدول ۱ آمده است.

۲- ۵- ۲- روش اجزای محدود

در این تحقیق، برای محاسبه ضریب جذب صدا از نرم‌افزار کامسول استفاده شده است. این نرم‌افزار، که به عنوان یک ابزار شبیه‌سازی در زمینه‌های مختلف شناخته می‌شود، با بهره‌گیری از روش اجزای محدود به حل مسائل می‌پردازد. کامسول در شبیه‌سازی‌های آکوستیکی نتایج قابل قبولی ارائه داده است[۱۲, ۱۸, ۲۷]. به همین منظور، در این مطالعه از این نرم‌افزار برای شبیه‌سازی نمونه‌ها بهره گرفته شده است. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، مقطع چهار ضلعی به عنوان سطح مقطع یک سلول از جاذب انتخاب شده

1. Epoxy
2. Polyurethane thermoplastic (Tpu)
3. Styrene butadiene rubber (SBR)
4. Chlorinated polyethylene rubber (CPR)
5. Nitrile butadiene rubber (NBR)



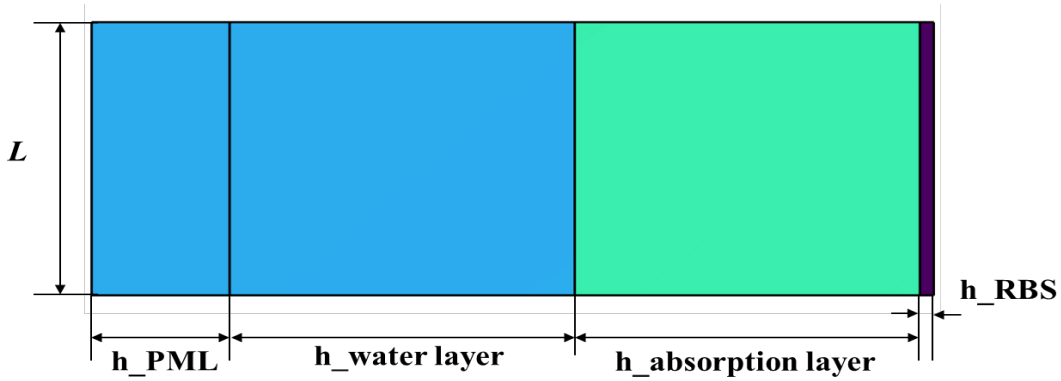
شکل ۱. شماتیک جداسازی یک سلول از جاذب، شرایط شبیه‌سازی و شرایط مرزی.

Fig. 1. Schematic of the separation of a cell from the adsorbent, simulation conditions, and boundary conditions

است. این مسئله به صورت سه‌بعدی و با در نظر گرفتن فیزیک‌های فشار صوتی در دامنه فرکانس و مکانیک جامدات حل می‌شود. در بالای فضای آب، یک لایه کاملاً همسان قرار داده شده است تا از تداخل امواج صوتی تابشی با امواج انعکاسی سطح جاذب جلوگیری کرده و امواج انعکاسی را به محیط بیرون منتقل کند[۲۷]. مدل اجزای محدود از بالا به پایین به ترتیب از لایه کاملا منطبق(۲۰ میلی متر)، لایه آب (۵۰ میلی متر)، لایه جاذب صدا (۵۰ میلی متر) و فولاد پشتیبان صلب (۲ میلی متر) است. لازم به ذکر است که یک رابط جفت جامد- سیال در سطح تماس بین آب و ساختار جاذب تنظیم شده است. بروز موج صوتی با تنظیم یک میدان فشار پس زمینه در لایه آب به دست می آید. با تنظیم شرایط مرزی تناوبی در چهار ضلع سلول تناوبی در کامسول، سلول تناوبی را می توان به‌عنوان یک عدد بی نهایت در نظر گرفت و با این شرایط بعد جانبی جاذب بی نهایت فرض می شود و از آرایش دوره‌ای از سلول‌های چهارضلعی تشکیل می‌شود و چنین سلول‌های تناوبی مطابق شکل ۱ که در جهت افقی مرتب شده‌اند یک فراساختار جذب کننده صدا بی‌نهایت را تشکیل می‌دهند[۲۷]. در شکل ۲، پارامتر های هندسی قسمت های مختلف مدل اجزای محدود نشان‌داده‌شده و در جدول ۲ مقادیر این پارامتر ها آمده است.

۲- ۵- ۳- مش‌بندی

به منظور ارزیابی استقلال نتایج حاصل از مش‌بندی، برای ماده اپوکسی با خواص مکانیکی ذکر شده در جدول ۱ و شرایط هندسی ارائه شده در بخش قبلی، پنج نوع شبکه‌بندی مختلف به کار گرفته شده است که جزئیات آن‌ها به همراه تعداد و اندازه المان‌ها در جدول ۳ آورده شده است. نتایج نشان داده شده در شکل ۳ حاکی از آن است که نوع شبکه‌بندی تأثیر قابل توجهی بر



شکل ۲. پارامتر های هندسی قسمت های مختلف مدل اجزای محدود.

Fig. 2. Geometric parameters of different parts of the finite element model.

جدول ۲. مقادیر پارامترهای هندسی ارائه شده در شکل ۲

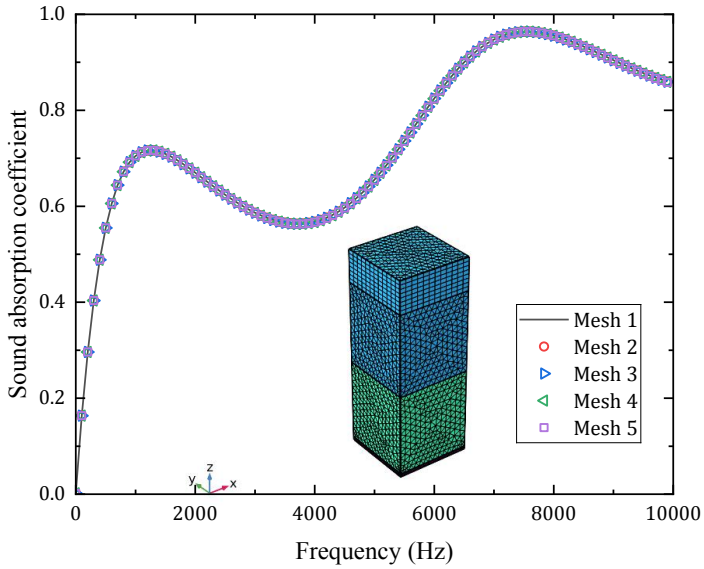
Table 2. Values of geometric parameters presented in Fig. 2.

عنوان	مقدار (mm)
طول اضلاع مقطع مربعی	۴۵
ضخامت لایه کاملاً همسان	۲۰
ضخامت لایه آب	۵۰
ضخامت لایه جاذب صوت	۵۰
ضخامت لایه فولاد پشتیبان	۲

جدول ۳. اطلاعات مش‌بندی‌های مورد بررسی

Table 3. Information on the meshes under study.

عنوان	تعداد المان‌ها	مینیموم اندازه المان‌ها (mm)	ماکسیموم اندازه المان‌ها (mm)
مش ۱	۸۴۹۸۷	۳	۳/۵
مش۲	۱۳۳۶۴۷	۲/۵	۳
مش۳	۲۲۸۲۲۶	۲	۲/۵
مش ۴	۴۴۹۰۵۳	۱/۵	۲
مش ۵	۱۰۶۳۶۵۹	۱	۱/۵



شکل ۳. نمودار ضریب جذب پنج نمونه مش‌بندی برای ماده اپوکسی.

Fig. 3. Absorption coefficient Diagram of five mesh samples for epoxy material

استخراج نتایج نداشته است و به منظور افزایش دقت در نتایج، در بخش بعدی از مش ۴ استفاده شده است. عدم تأثیر مش‌بندی بر نتایج به سادگی هندسه مورد بررسی مربوط می‌شود و در هندسه‌های پیچیده‌تر، مش‌بندی تأثیر بیشتری بر نتایج خواهد داشت.

۳- نتایج

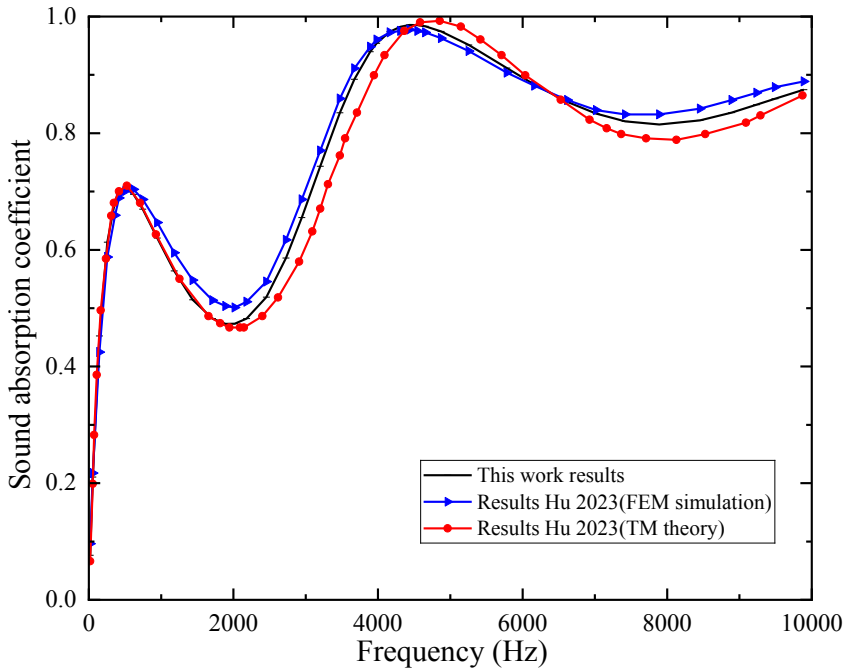
۳- ۱- اعتبارسنجی

در این تحقیق، به منظور اعتبارسنجی داده‌های حاصل از نرم‌افزار کامسول، ابتدا نتایج ضریب جذب صوت زیر آب در ساختارهای یک مقاله مشابه مورد بررسی قرار گرفته است. این مقاله شامل نتایجی هستند که شبیه‌سازی‌های آن‌ها با نتایج تئوری و اجزای محدود تطابق داشته و همگرایی نشان داده‌اند. سپس این نتایج با داده‌های به‌دست‌آمده از پژوهش‌های مذکور مقایسه شده است. [۲۷]. نتایج نمایش داده شده در شکل ۴ مربوط به یک لایه اپوکسی با خواص مکانیکی ذکر شده در جدول ۱ است که دارای یک حفره هوای استوانه‌ای می‌باشد. ضخامت لایه جاذب برابر با ۴۵ میلی‌متر است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در شکل ۴ نشان می‌دهد که این شبیه‌سازی در این مطالعه قابل اعتماد بوده و نتایج آن با یافته‌های پژوهش‌های قبلی همخوانی دارد. نتایج بدست آمده در این مطالعه با نتایج روش اجزای محدود مرجع مورد بررسی، کمتر از یک درصد اختلاف دارد که این اختلاف می‌تواند مربوط به مش‌بندی یا مسائل متعدد دیگر باشد که در مرجع مورد مطالعه ذکر نشده است. همچنین نتایج این مطالعه با نتایج تئوری ماتریس انتقال ۲ درصد اختلاف دارد که این اختلاف ناشی از نحوه طراحی است. در تئوری ماتریس انتقال ساختار مورد بررسی دوبعدی درنظر گرفته شده است، این درحالی است که نتایج در این مطالعه با مدل‌سازی سه‌بعدی ارائه شده است که این اختلافات ناچیز بوده و قابل چشم‌پوشی هستند.

۳- ۲- اپوکسی

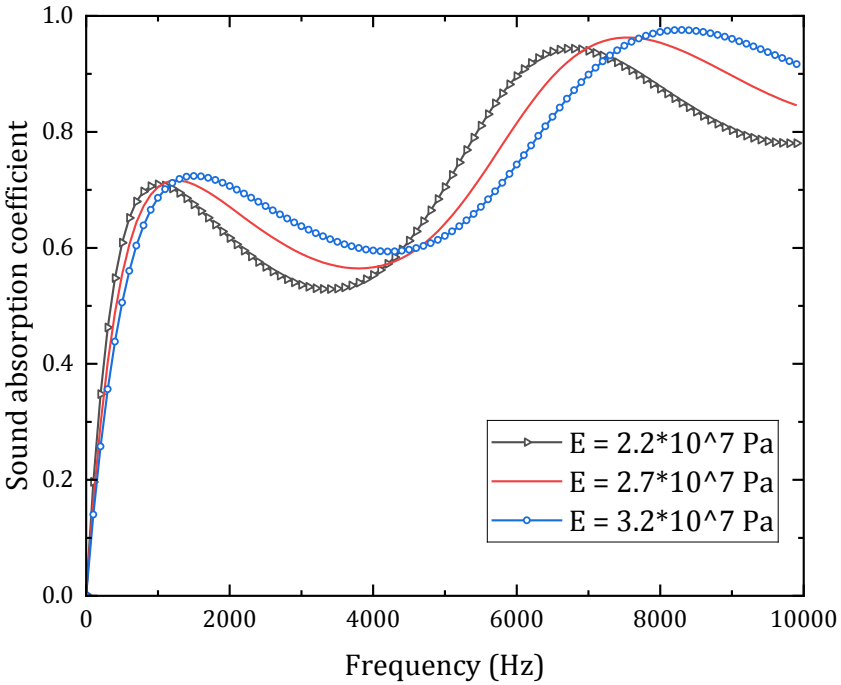
۳- ۲- ۱- مدول یانگ

مدول یانگ یکی از پارامترهای کلیدی در ساختار هر ماده به شمار می‌آید و بر ضریب جذب صوت زیر آب نیز تأثیرگذار است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده برای ماده اپوکسی در شکل ۵، تغییرات قابل توجهی در ضریب جذب صوت با تغییر مدول یانگ مشاهده می‌شود. در بازه فرکانسی ۱ تا ۵ کیلوهرتز، با افزایش مدول یانگ اپوکسی، ضریب جذب صوت زیر آب افزایش می‌یابد. اما در بازه فرکانسی ۵ تا ۷ کیلوهرتز، این روند معکوس است و با افزایش مدول یانگ، ضریب جذب کاهش می‌یابد. در فرکانس‌های ۸ تا ۱۰ کیلوهرتز نیز مشابه فرکانس‌های پایین، با افزایش مدول یانگ، ضریب جذب صوت افزایش می‌یابد. مدول یانگ نشان‌دهنده سختی یا مقاومت یک ماده به تغییر شکل الاستیک است. به عبارت دیگر، هرچه مدول یانگ یک



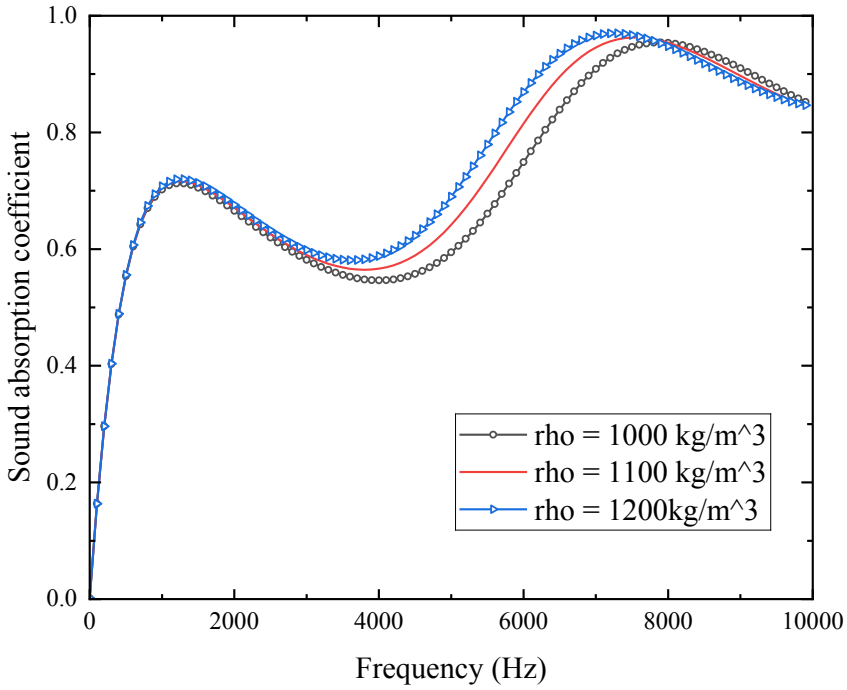
شکل ۴. نمودار اعتبار سنجی نتایج این مطالعه برای مرجع [۲۷] .

Fig. 4. Validation diagram of the results of this study for reference [28].



شکل ۵. نمودار تأثیر مدول یانگ برضریب جذب صوت زیرآب اپوکسی

Fig. 5. Diagram of the effect of Young's modulus on the underwater sound absorption coefficient of epoxy



شکل ۶. نمودار تأثیر چگالی بر ضریب جذب صوت زیرآب اپوکسی

Fig. 6. Diagram of the effect of density on the underwater sound absorption coefficient of epoxy

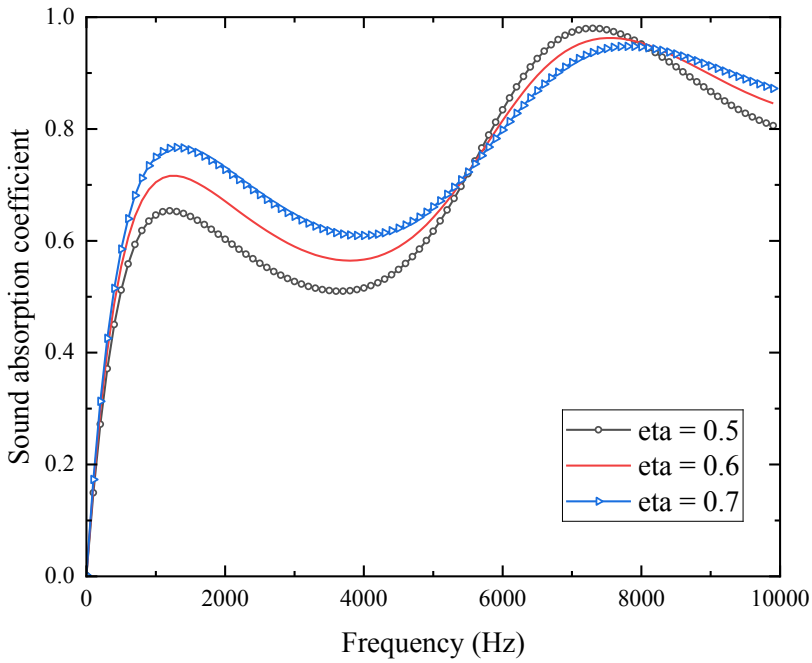
ماده بیشتر باشد، این ماده سخت‌تر است و برای تغییر شکل نیاز به نیروی بیشتری دارد. این ویژگی بر رفتار ارتعاشی ماده در مقابل امواج صوتی تاثیر می‌گذارد. وقتی مدول یانگ ماده افزایش می‌یابد، این ماده قادر به تغییر شکل کمتری است. در نتیجه، هنگامی که امواج صوتی (که معمولاً به شکل امواج فشاری یا کششی هستند) به سطح ماده برخورد می‌کنند، ماده کمتر تغییر شکل می‌دهد و بیشتر انرژی صوتی را در خود جذب می‌کند. در نهایت، با افزایش مدول یانگ اپوکسی، این ماده سخت‌تر و مقاوم‌تر می‌شود، که باعث می‌شود امواج صوتی بیشتری را جذب کند و کمتر آن‌ها را از خود عبور دهد. این تغییرات در جذب صوت به دلیل تغییرات در نحوه ارتعاشات داخلی ماده و تعامل آن با امواج صوتی در محیط آب است.

۳- ۲- ۲- چگالی

در محیط زیر آب، چگالی مواد تأثیر مستقیمی بر رفتار صوتی آن‌ها دارد. مواد با چگالی بالاتر ممکن است صدا را بیشتر جذب کنند و در نتیجه، انعکاس و انتقال صوت را کاهش دهند. همچنین، ترکیب چگالی با دیگر ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی مواد، مانند مدول یانگ، بر ضریب جذب صوت تأثیرگذار است. چگالی یک عامل بسیار مهم در طراحی جاذب‌های آکوستیکی زیر آب است؛ هرچه این مقدار به چگالی آب نزدیک‌تر باشد، جاذب آکوستیکی از نظر وزن بهینه‌تر خواهد بود. چگالی بالاتر معمولاً به معنای توانایی بیشتر در انتقال انرژی صوتی است. در مواد متراکم‌تر، مولکول‌ها به یکدیگر نزدیک‌تر هستند که این امر می‌تواند منجر به انتقال سریع‌تر و مؤثرتر ارتعاشات صوتی شود. نتایج شکل ۶ نشان می‌دهد که با افزایش چگالی در ماده اپوکسی، ضریب جذب صوت در بازه فرکانسی ۳٫۵ تا ۷٫۵ کیلوهرتز افزایش می‌یابد و با توجه به طراحی ساختارهای جاذب صوت زیر آب، این مقدار تا حدی قابل تنظیم است..

۳- ۲- ۳- ضریب تلفات

ضریب تلفات معیاری است که توانایی یک ماده را در تبدیل انرژی صوتی به انرژی حرارتی و در نتیجه کاهش شدت صدا نشان می‌دهد. این ضریب به طور مستقیم با رفتار صوتی مواد در برابر امواج صوتی مرتبط است. هرچه ضریب تلفات بالاتر باشد، ماده قادر است توان اتلاف را در فرکانس‌های خاص افزایش دهد و انعکاس صدا را کاهش دهد. با توجه به شکل ۷، در ماده اپوکسی، با افزایش ضریب تلفات، ضریب جذب صوت در محدوده فرکانسی ۸۰۰ تا ۶۰۰۰ هرتز افزایش می‌یابد، در حالی که در فرکانس‌های



شکل ۷. نمودار تاثیر ضریب تلفات برضریب جذب صوت زیر آب ماده اپوکسی.

Fig. 7. Diagram of the effect of the loss coefficient on the underwater sound absorption coefficient of epoxy material.

۶ تا ۸ کیلوهرتز کاهش و در محدوده فرکانسی ۸ تا ۱۰ کیلوهرتز به طور جزئی افزایش می‌یابد.

باتوجه‌به نتایج به‌دست‌آمده می‌توان گفت خواص مکانیک مواد تأثیر مستقیم روی جذب امواج آکوستیکی در محیط زیر آب را دارند و تا حدی می‌توان این پارامتر هارا تنظیم نمود.

۳- ۳- ترموپلاستیک پلی‌یورتان

۳- ۳- ۱- مدول یانگ

در لاستیک پلی‌یورتان، همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، با افزایش مدول یانگ، ضریب جذب صوت زیر آب در بازه فرکانسی ۱ تا ۳,۵ کیلوهرتز افزایش می‌یابد و در محدوده ۳,۵ تا ۵ کیلوهرتز به طور جزئی کاهش می‌یابد. همچنین، در بازه فرکانسی ۵ تا ۱۰ کیلوهرتز، افزایش مدول یانگ تغییرات قابل توجهی در ضریب جذب صوت زیر آب ایجاد می‌کند که منجر به افزایش جذب در این محدوده می‌شود..

۳- ۳- ۲- چگالی و ضریب تلفات

با توجه به شکل ۹، در ماده ترموپلاستیک پلی‌یورتان، با افزایش چگالی در بازه فرکانسی ۲ تا ۱۰ کیلوهرتز، ضریب جذب به طور نسبی افزایش می‌یابد. نتایج ارائه شده در شکل ۱۰ نشان می‌دهد که ضریب تلفات در ترموپلاستیک پلی‌یورتان در فرکانس‌های پایین و متوسط بر ضریب جذب تأثیرگذار است. به‌طوری‌که با افزایش این پارامتر، ضریب جذب صوت زیر آب در بازه فرکانسی ۳۰۰ تا ۴۰۰۰ هرتز افزایش می‌یابد. همچنین، در فرکانس‌های متوسط، این افزایش باعث کاهش ضریب جذب و در فرکانس‌های بالا منجر به افزایش آن می‌شود.

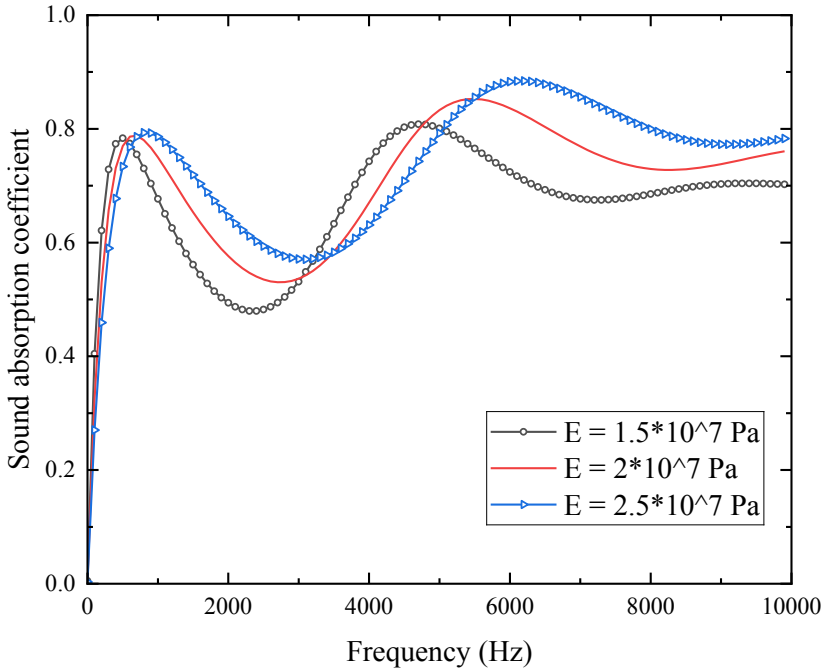
۳- ۴- لاستیک بوتادین نیتریل

۳- ۴- ۱- مدول یانگ

با توجه به شکل ۱۱، در لاستیک بوتادین نیتریل به دلیل مدول یانگ پایین، با افزایش این خاصیت، ضریب جذب در یک پهنای باند ۱۰ کیلوهرتزی نیز افزایش می‌یابد. این نوع لاستیک در فرکانس‌های پایین دارای یک قله جذب ۹۰ درصدی است که کاربردهای زیادی در طراحی و ساخت جاذب‌های آکوستیکی مخصوص فرکانس‌های پایین دارد.

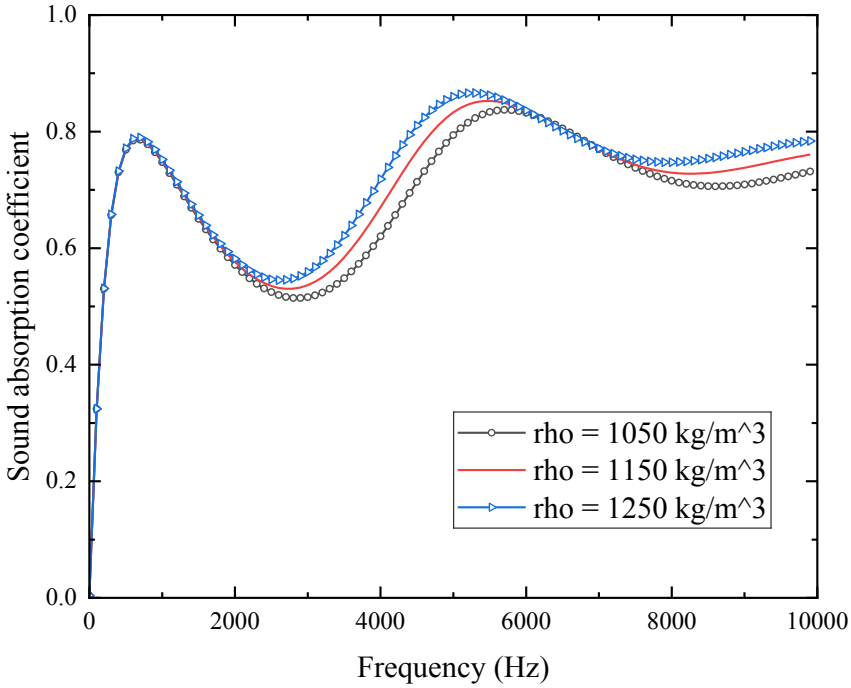
۳- ۴- ۲- چگالی و ضریب تلفات

همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، با افزایش چگالی این ماده، ضریب جذب صوت زیر آب در محدوده فرکانس‌های متوسط و بالا افزایش



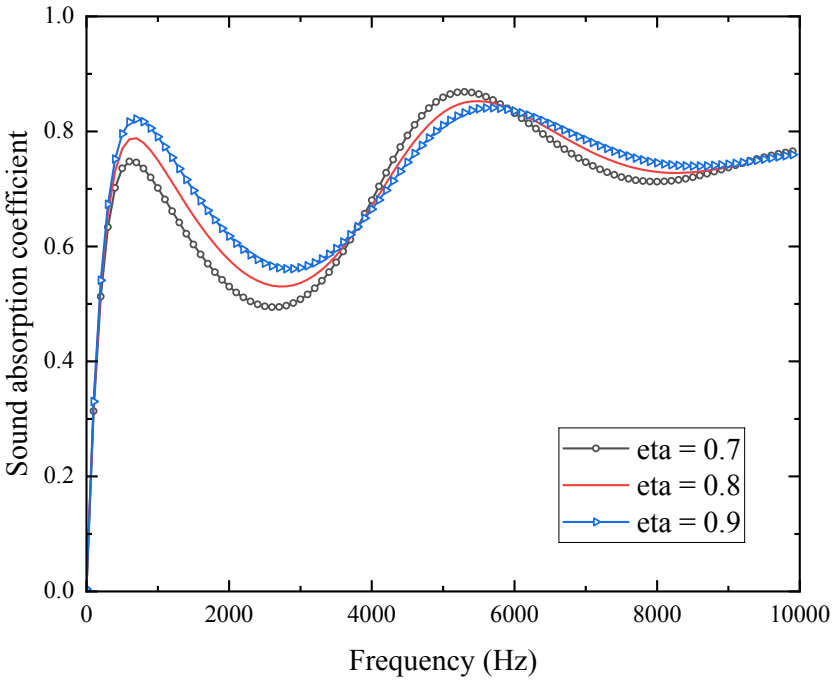
شکل ۸. نمودار تاثیر مدول یانگ بر ضریب جذب صوت زیر آب ترموپلاستیک پلی‌یورتان.

Fig. 8. Diagram of the effect of Young's modulus on the underwater sound absorption coefficient of thermoplastic polyurethane.



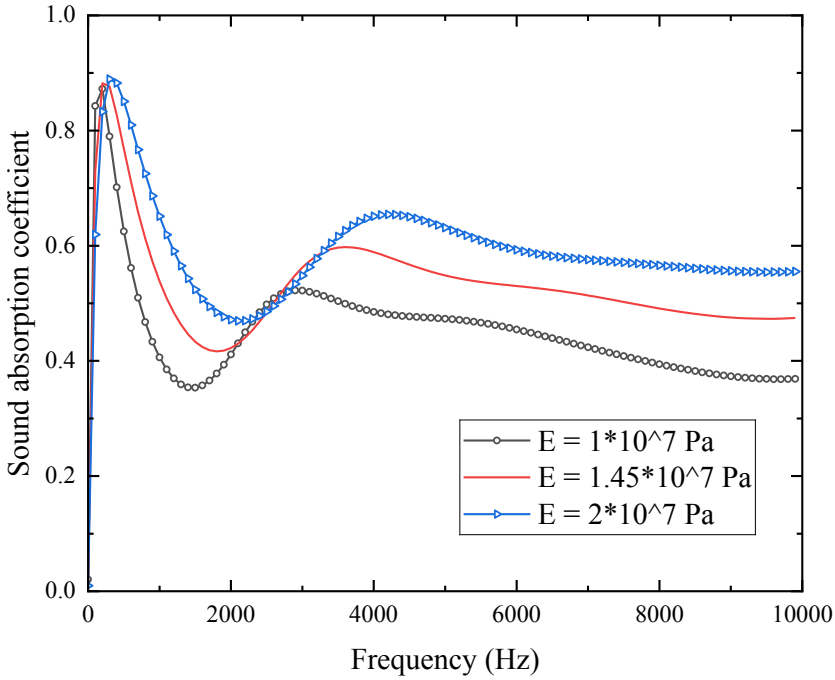
شکل ۹. نمودار تاثیر چگالی بر ضریب جذب صوت زیر آب ترموپلاستیک پلی‌یورتان.

Fig. 9. Diagram of the effect of density on the underwater sound absorption coefficient of thermoplastic polyurethane.



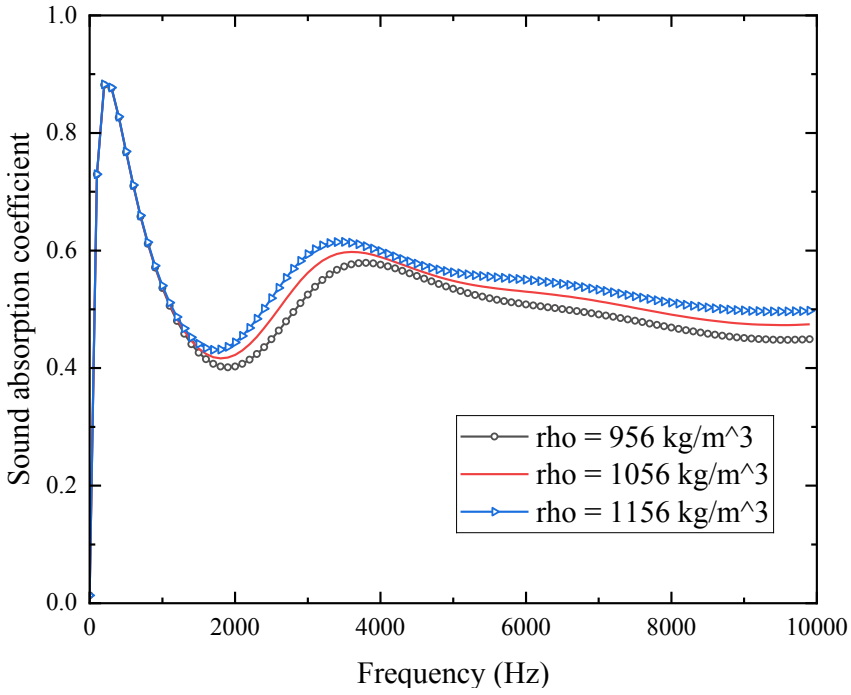
شکل ۱۰. نمودار تاثیر ضریب تلفات بر ضریب جذب صوت زیر آب ترموپلاستیک پلی‌یورتان.

Fig. 10. Diagram of the effect of loss coefficient on the underwater sound absorption coefficient of thermo-plastic polyurethane.



شکل ۱۱. نمودار تاثیر مدول یانگ بر ضریب جذب صوت زیر آب برای ماده بوتادین نیتریل.

Fig. 11. Diagram of the effect of Young's modulus on the underwater sound absorption coefficient for butadi-ene nitrile material.



شکل ۱۲. نمودار تاثیر چگالی بر ضریب جذب صوت زیر آب برای ماده بوتادین نیتریل.

Fig. 12. Diagram of the effect of density on the underwater sound absorption coefficient for butadiene nitrile material.

می‌یابد. این افزایش در ضریب جذب به اندازه تأثیر مدول یانگ نیست، اما می‌تواند تا حدی مؤثر باشد. به دلیل بالابودن ذاتی ضریب تلفات ماده بوتادین نیتریل، افزایش این ضریب تأثیر چندانی بر ضریب جذب صوت زیر آب ندارد. با این حال، با توجه به شکل ۱۳ می‌توان نتیجه‌گیری کرد که با کاهش این پارامتر، قله جذب ۹۰ درصد در فرکانس‌های پایین به ۸۰ درصد کاهش می‌یابد.

۳- ۵- لاستیک استایرون بوتادین

۳- ۵- ۱- مدول یانگ

لاستیک استایرون بوتادین به واسطه داشتن خواص مکانیکی مناسب، تطبیق امپدانس خوبی را با محیط زیر آب دارد و امواج آکوستیکی را با کم‌ترین انعکاس جذب می‌کند و در طراحی جاذب‌های آکوستیکی در محیط زیر آب کاربردهای زیادی دارد. در لاستیک استایرون بوتادین به دلیل بالابودن ذاتی مدول یانگ این ماده باتوجه‌به شکل ۱۴ افزایش این پارامتر تغییرات جزئی در ضریب جذب صوت زیر آب ایجاد می‌شود که قابل‌چشم‌پوشی است.

۳- ۵- ۲- چگالی و ضریب تلفات

با افزایش چگالی لاستیک استایرون بوتادین که در شکل ۱۵ نمایش داده شده است، ضریب جذب صوت در بازه فرکانسی ۶ تا ۱۰ کیلوهرتز افزایش می‌یابد. همچنین، بر اساس شکل ۱۶، می‌توان نتیجه گرفت که ضریب تلفات در ماده تأثیر قابل توجهی بر ضریب جذب صوت زیر آب دارد؛ به‌طوری‌که با افزایش این پارامتر، ضریب جذب صوت زیر آب در محدوده فرکانسی ۲ تا ۸ کیلوهرتز نیز افزایش می‌یابد.

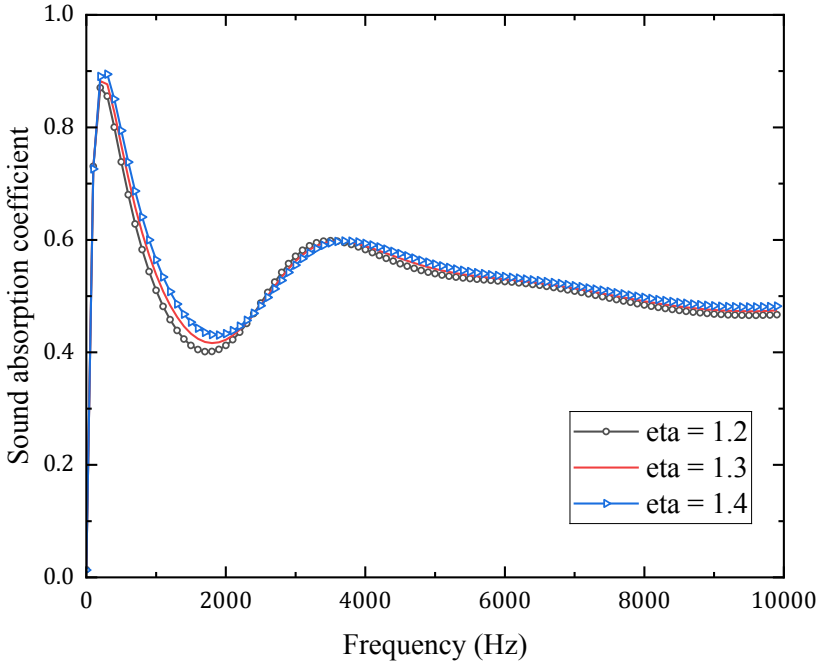
۳- ۶- لاستیک پلی‌اتیلن کلردار

۳- ۶- ۱- مدول یانگ

لاستیک پلی‌اتیلن کلردار همانند لاستیک استایرون بوتادین دارای مدول یانگ بالا است و باتوجه‌به شکل ۱۷ با افزایش مدول یانگ در این ماده تأثیر چندانی بر ضریب جذب صوت زیر آب نمی‌گذارد.

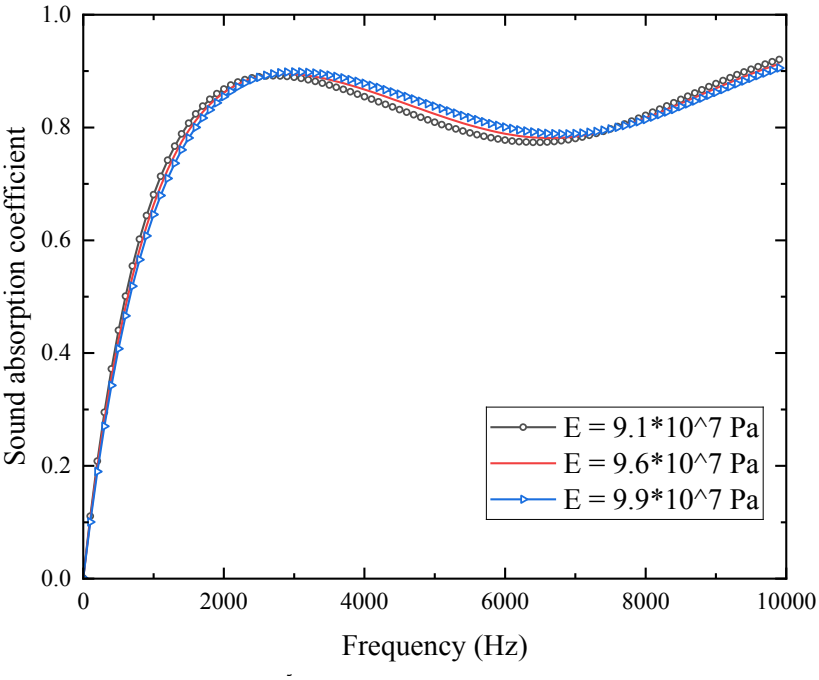
۳- ۶- ۲- چگالی و ضریب تلفات

با توجه به شکل ۱۸، افزایش چگالی این ماده باعث افزایش ضریب



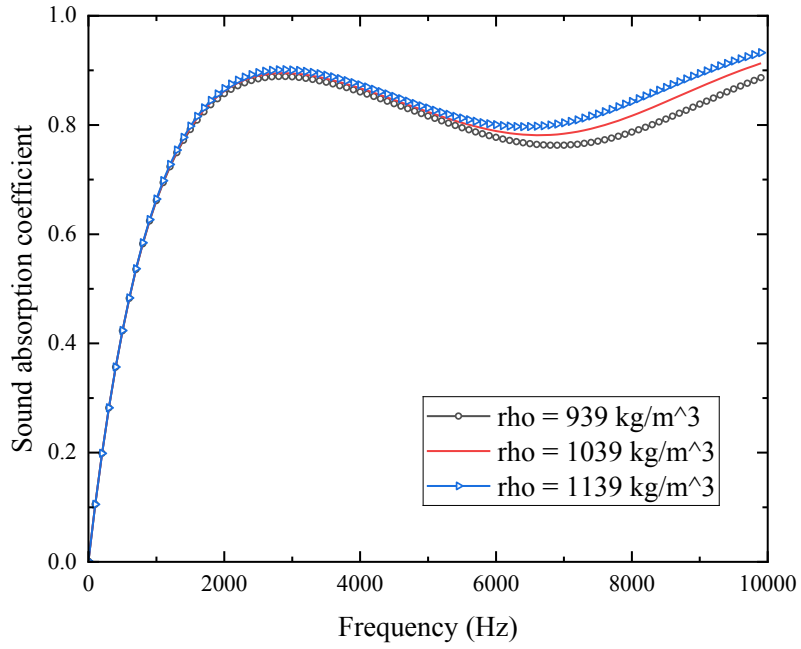
شکل ۱۳. نمودار تاثیر ضریب تلفات بر ضریب جذب صوت زیر آب برای ماده بوتادین نیتریل.

Fig. 13. Diagram of the effect of the loss coefficient on the underwater sound absorption coefficient for butadiene nitrile material.



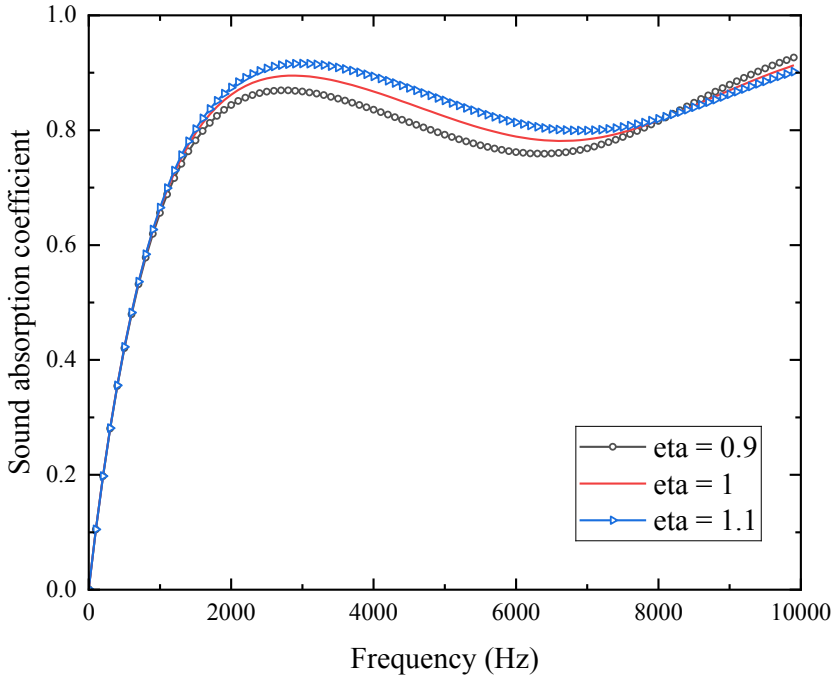
شکل ۱۴. نمودار تاثیر مدول یانگ بر ضریب جذب صوت زیر آب لاستیک استایرون بوتادین.

Fig. 14. Diagram of the effect of Young's modulus on the underwater sound absorption coefficient of styrene butadiene rubber.



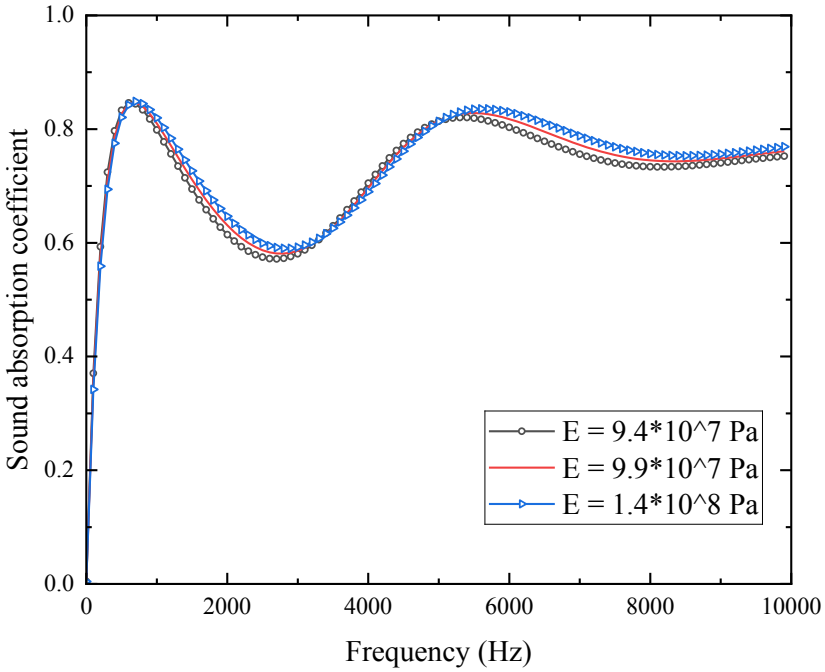
شکل ۱۵. نمودار تاثیر چگالی بر ضریب جذب صوت زیر آب لاستیک استایرون بوتادین.

Fig. 15. Diagram of the effect of density on the underwater sound absorption coefficient of styrene butadiene rubber.



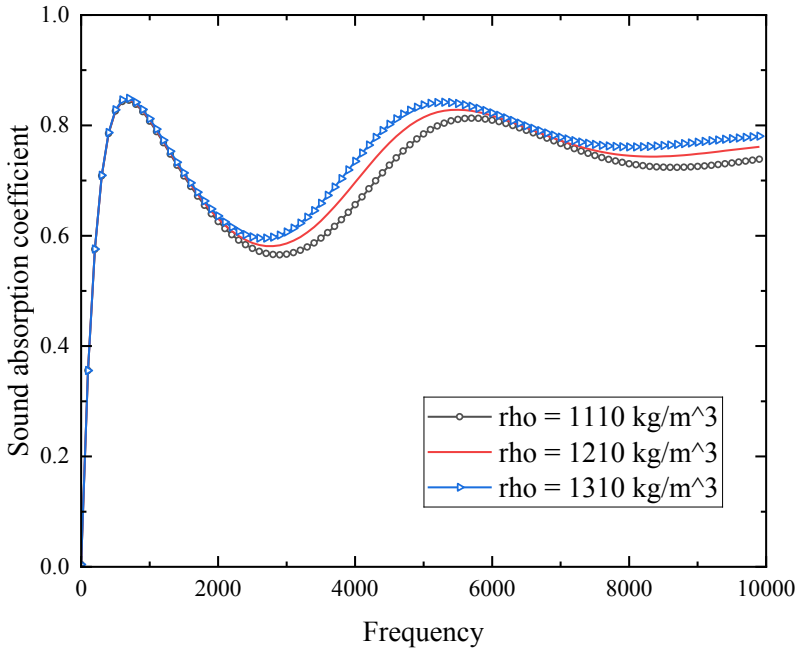
شکل ۱۶. نمودار تاثیر ضریب تلفات بر ضریب جذب صوت زیر آب لاستیک استایرون بوتادین.

Fig. 16. Diagram of the effect of the loss coefficient on the underwater sound absorption coefficient of styrene butadiene rubber.



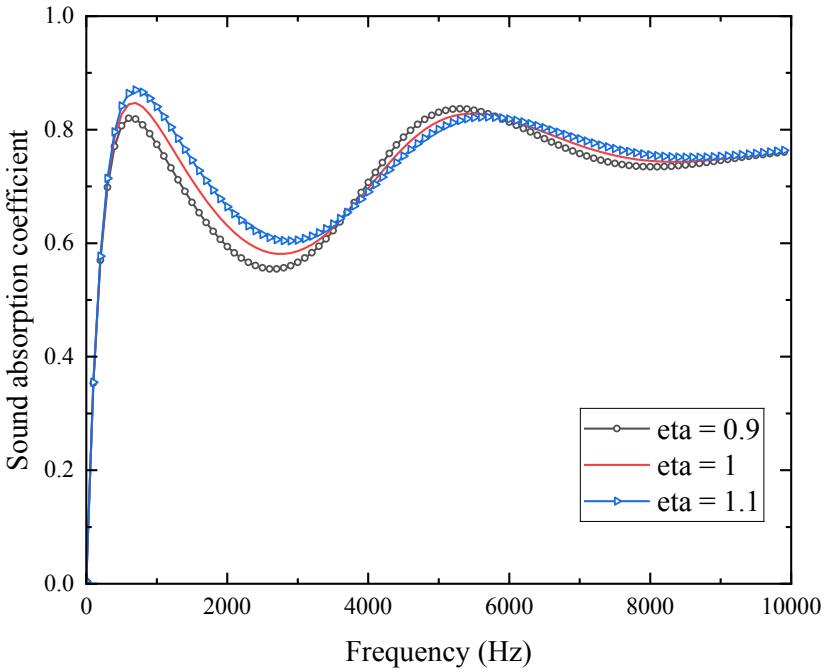
شکل ۱۷. نمودار تاثیر مدول یانگ بر ضریب جذب صوت زیر آب لاستیک پلیاتیلن کلردار.

Fig. 17. Diagram of the effect of Young's modulus on the underwater sound absorption coefficient of chlorinated polyethylene rubber.



شکل ۱۸. نمودار تاثیر چگالی بر ضریب جذب صوت زیر آب لاستیک لاستیک پلی‌اتیلن کلردار.

Fig. 18. Diagram of the effect of density on the underwater sound absorption coefficient of chlorinated polyethylene rubber.



شکل ۱۹. نمودار تاثیر ضریب تلفات بر ضریب جذب صوت زیر آب لاستیک پلی‌اتیلن کلردار.

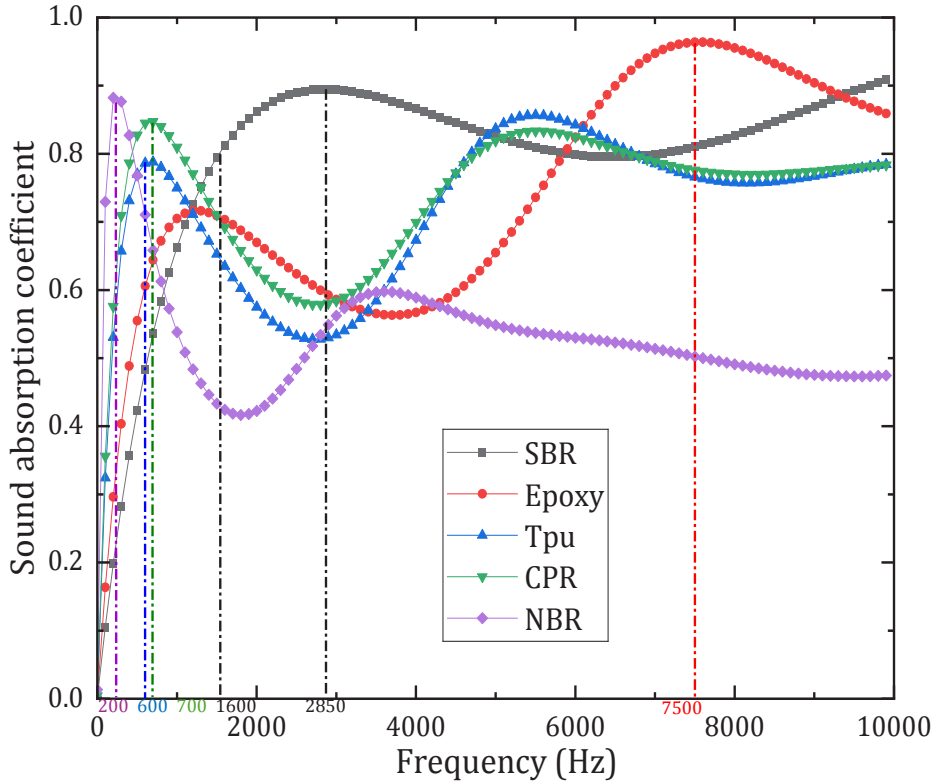
Fig. 19. Diagram of the effect of the loss coefficient on the underwater sound absorption coefficient of chlorinated polyethylene rubber

جذب صوت در محدوده‌های فرکانسی ۳ تا ۶ کیلوهرتز و ۷٫۵ تا ۱۰ کیلوهرتز می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱۹ مشاهده می‌شود، لاستیک پلی‌اتیلن کلردار در فرکانس‌های پایین دارای یک قله جذب ۸۰ درصدی است که با افزایش ضریب تلفات در این ماده، این قله به ۹۰ درصد نیز می‌رسد. به دنبال این تغییر، ضریب جذب صوت زیر آب در محدوده فرکانسی ۴۰۰ تا ۴۰۰۰ هرتز افزایش می‌یابد که این موضوع در طراحی جاذب‌های آکوستیک فرکانس پایین بسیار حائز اهمیت است.

۳- ۷- مقایسه ضریب جذب صوت مواد

در شکل ۲۰، نمودار ضریب جذب صوت برای پنج ماده مورد بررسی، بر اساس خواص مکانیکی ارائه شده در جدول ۱، نمایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که لاستیک استایرون بوتادین در یک پهنای باند ۸/۵ کیلوهرتزی، ضریب جذب بالای ۸۰ درصد را به خود اختصاص داده و پتانسیل بالایی برای جذب صوت در محیط زیر آب دارد. این ویژگی‌ها امکان استفاده از آن را در طراحی و ساخت جاذب‌های آکوستیکی فراهم می‌کند. ترموپلاستیک پلی‌یورتان و لاستیک پلی‌اتیلن کلردار نیز با اختلاف جزئی در محدوده فرکانسی متوسط و پایین، ضریب جذب صوت مشابهی دارند. این دو ماده در فرکانس‌های پایین دو قله جذب بالای ۸۰ درصد را نشان می‌دهند که می‌توان از این ویژگی برای افزایش ضریب جذب صوت در فرکانس‌های پایین بهره برد. اپوکسی بیشتر در فرکانس‌های بالا مؤثر است و در فرکانس ۷/۵ کیلوهرتز، قله جذب نزدیک به ۱۰۰ درصد را ثبت کرده است. لاستیک بوتادین نیتریل به دلیل داشتن ضریب تلفات بالا نسبت به سایر مواد، در فرکانس‌های زیر ۵۰۰ هرتز مؤثر واقع شده و در فرکانس ۲۰۰ هرتز، قله جذب ۹۰ درصدی را به نمایش گذاشته است. این ماده نیز می‌تواند در ساخت پوشش‌های آکوستیکی مؤثر در فرکانس‌های پایین مورد استفاده قرار گیرد.

دلیل افت و خیز حاصل شده در تغییرات ضریب جذب آکوستیکی نمونه های زیر آب، وجود مشخصات ذاتی همچون فرکانس های طبیعی جامد و سیال می باشد. البته اشاره به این نکته ضروری است که این مشخصه های ذاتی نیز به نوعی وابسته به مشخصه های مکانیکی و غیرآکوستیکی نمونه های در نظر گرفته شده می باشد. با توجه به نتایج ارائه شده در بخش‌های پیشین، مواد با مدول یانگ بالاتر به‌واسطه سختی بیشتر، در مواجهه با امواج



شکل ۲۰. نمودار ضریب جذب صوت مواد ارائه شده در جدول ۱.

Fig. 20. Sound absorption coefficient diagram of the materials presented in Table 1.

آکوستیکی تغییر شکل کمتری را دارند و به دنبال آن ضریب جذب صوت بیشتری هم دارند. موادی که ذاتا مدول یانگ بالایی دارند، بیشتر شدن این پارامتر تغییرات چشمگیری در ضریب جذب صوت ایجاد نمی‌کند که این امر را می‌توان در رفتار لاستیک استایرون بوتادین مشاهده کرد. همچنین موادی همچون لاستیک بوتادین نیتریل که ذاتا مدول یانگ پایین‌تری نسبت به مواد مشابه را دارد، با بیشتر شدن مدول یانگ ضریب جذب صوت به صورت چشمگیری در محدوده فرکانسی ۲ تا ۱۰ کیلوهرتز افزایش می‌یابد و دلیل این رفتار در این مواد بیشتر شدن سختی مواد و تغییر شکل پذیری کمتر در مواجهه با امواج آکوستیکی است.

مواد با ضریب تلفات بالا دارای قابلیت بالایی در تبدیل انرژی مکانیکی حاصل از موج صوتی به انرژی حرارتی یا دیگر اشکال انرژی تلف‌شونده هستند. در فرکانس‌های پایین، که رزونانس‌های ساختاری به‌دلیل ابعاد بزرگ مورد نیاز به سختی قابل دستیابی هستند، جذب انرژی آکوستیکی عمدتاً از طریق مکانیزم‌های اتلافی درون‌ماده‌ای (از جمله ویسکوزیته داخلی، میرایی الاستیک، و اتلاف حرارتی) صورت می‌گیرد. این مکانیزم‌ها مستقل از تطابق فرکانسی با موج ورودی عمل می‌کنند، و بنابراین استفاده از مواد با تلفات بالا به افزایش بازده جذب در محدوده فرکانسی پایین کمک شایانی می‌کند. افزون بر این، در محیط آبی که چگالی و سرعت صوت بالا بوده و به‌تبع آن امپدانس آکوستیکی محیط نیز زیاد است، ورود انرژی صوتی به جاذب مستلزم وجود تطابق امپدانسی مناسب میان محیط و ماده‌ی جاذب است. مواد با ضریب تلفات بالا معمولاً با داشتن خاصیت ویسکوالاستیک، امکان تطابق مؤثرتری با امپدانس محیط را فراهم کرده و از این طریق به افزایش انتقال انرژی و در نتیجه جذب بیشتر کمک می‌کنند. در شکل ۲۰ این امر کاملا مشهود است و موادی همچون لاستیک بوتادین نیتریل که ضریب تلفات بالایی دارد؛ یک قله جذب ۹۰ درصدی در فرکانس‌های زیر ۵۰۰ هرتز را ایجاد کرده است.

چگالی ماده یکی از پارامترهای کلیدی در تعیین ضریب جذب صوت در محیط زیرآب محسوب می‌شود، زیرا به‌طور مستقیم بر امپدانس آکوستیکی ماده تأثیر می‌گذارد. تطابق امپدانسی میان ماده جاذب و محیط آبی، که خود دارای امپدانس بالایی است، شرط لازم برای انتقال مؤثر انرژی صوتی به

داخل ماده و کاهش بازتاب سطحی محسوب می‌شود. چنانچه چگالی ماده به‌گونه‌ای تنظیم شود که امپدانس آکوستیکی آن به مقدار امپدانس آب نزدیک شود، امکان ورود انرژی صوتی به ماده افزایش یافته و در نتیجه جذب نیز بهبود می‌یابد. با این حال، چگالی بسیار پایین یا بسیار بالا می‌تواند باعث عدم تطابق امپدانسی و کاهش بهره‌وری جذب شود. بنابراین، انتخاب چگالی مناسب باید در توازن با سایر خواص مکانیکی ماده مانند مدول یانگ صورت گیرد تا جذب صوتی مؤثر، به‌ویژه در فرکانس‌های پایین، حاصل شود و هرچقدر چگالی ماده به چگالی آب نزدیک‌تر باشد، ضریب جذب بهتری صورت می‌گیرد که این امر در نتایج حاصل شده برای لاستیک استایرون بوتاد مشهود است.

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه با استفاده از روش اجزای محدود به تأثیر خواص مکانیکی مواد دارای تطبیق امپدانس با محیط زیر آب بر ضریب جذب صوت مورد بررسی قرار گرفته است. پنج ماده مرسوم اپوکسی، ترموپلاستیک پلی‌یورتان، لاستیک بوتادین نیتریل، لاستیک استایرون بوتادین و لاستیک پلی‌اتیلن کلردار که از آن‌ها در طراحی و ساخت جاذب‌های آکوستیکی برای محیط زیر آب استفاده می‌شود؛ در نظر گرفته شده است. تاثیر خواص مکانیکی از جمله مدول یانگ، چگالی و ضریب تلفات بر ضریب جذب صوت زیر آب مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت نتایج مواد ارائه شده با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج روش اجزای محدود نشان می‌دهد:

۱. در ماده اپوکسی، در فرکانس‌های ۱ تا ۵ کیلوهرتز، با افزایش مدول یانگ، ضریب جذب صوت افزایش می‌یابد. اما در فرکانس‌های ۵ تا ۷ کیلوهرتز، این روند معکوس است. در فرکانس‌های ۸ تا ۱۰ کیلوهرتز نیز مشابه فرکانس‌های پایین، ضریب جذب افزایش می‌یابد. همچنین، با افزایش چگالی، ضریب جذب صوت در بازه ۳,۵ تا ۷,۵ کیلوهرتز افزایش می‌کند. افزایش ضریب تلفات نیز منجر به افزایش ضریب جذب در محدوده ۸۰۰ تا ۶۰۰۰ هرتز می‌شود، در حالی که در فرکانس‌های ۶ تا ۸ کیلوهرتز کاهش و در ۸ تا ۱۰ کیلوهرتز به طور جزئی افزایش مشاهده می‌شود.

۲. در ترموپلاستیک پلی‌یورتان با افزایش مدول یانگ، ضریب جذب صوت زیر آب در فرکانس‌های ۱ تا ۳,۵ کیلوهرتز افزایش و در ۳,۵ تا ۵ کیلوهرتز به طور جزئی کاهش می‌یابد. در فرکانس‌های ۵ تا ۱۰ کیلوهرتز، افزایش مدول یانگ باعث افزایش جذب می‌شود. همچنین، با افزایش چگالی در بازه ۲ تا ۱۰ کیلوهرتز، ضریب جذب به طور نسبی افزایش می‌یابد. ضریب تلفات در ترموپلاستیک پلی‌یورتان نیز بر ضریب جذب تأثیر دارد؛ به‌طوری‌که با افزایش این پارامتر، ضریب جذب در فرکانس‌های ۳۰۰ تا ۴۰۰۰ هرتز افزایش می‌یابد، اما در فرکانس‌های متوسط باعث کاهش و در فرکانس‌های بالا منجر به افزایش آن می‌شود.

۳. در لاستیک بوتادین نیتریل، با افزایش مدول یانگ، ضریب جذب در فرکانس‌های پایین افزایش می‌یابد و این نوع لاستیک دارای قله جذب ۹۰ درصدی در این فرکانس‌های زیر ۵۰۰ هرتز است. همچنین، با افزایش چگالی، ضریب جذب صوت زیر آب در فرکانس‌های متوسط و بالا نیز افزایش می‌یابد، هرچند این افزایش به اندازه تأثیر مدول یانگ نیست. به دلیل بالابودن ضریب تلفات این ماده، تأثیر چگالی بر ضریب جذب صوت زیر آب محدود است. در نهایت، کاهش پارامترهای خاص می‌تواند قله جذب ۹۰ درصدی را در فرکانس‌های پایین به ۸۰ درصد کاهش دهد.

۴. در لاستیک استایرون بوتادین، به دلیل بالا بودن مدول یانگ، تغییرات در این پارامتر به صورت جزئی در ضریب جذب صوت زیر آب تاثیر می‌گذارد که قابل‌چشم‌پوشی است. با افزایش چگالی، ضریب جذب صوت در فرکانس‌های ۶ تا ۱۰ کیلوهرتز افزایش می‌یابد. همچنین، ضریب تلفات این ماده تأثیر قابل توجهی بر ضریب جذب صوت زیر آب دارد و با افزایش آن، ضریب جذب صوت در محدوده فرکانسی ۲ تا ۸ کیلوهرتز نیز افزایش می‌یابد.

۵. لاستیک پلی‌اتیلن کلردار دارای مدول یانگ بالایی مشابه لاستیک استایرون بوتادین است و تغییرات مدول یانگ تأثیری بر ضریب جذب صوت زیر آب این ماده ندارد. افزایش چگالی این ماده موجب افزایش ضریب جذب صوت در فرکانس‌های ۳ تا ۶ کیلوهرتز و ۷,۵ تا ۱۰ کیلوهرتز می‌شود. در فرکانس‌های پایین، این لاستیک دارای قله جذب ۸۰ درصدی است که با افزایش ضریب تلفات به ۹۰ درصد می‌رسد. این تغییرات باعث افزایش ضریب جذب صوت زیر آب در محدوده فرکانسی ۴۰۰ تا ۴۰۰۰ هرتز می‌شود که برای طراحی جاذب‌های آکوستیک فرکانس پایین اهمیت دارد.

۶. لاستیک استایرون بوتادین در فرکانس ۸/۵ کیلوهرتز ضریب جذب بالای ۸۰ درصد دارد و پتانسیل خوبی برای جذب صوت در زیر آب ارائه می‌دهد، که آن را برای طراحی جاذب‌های آکوستیکی مناسب می‌سازد. ترموپلاستیک پلی‌یورتان و لاستیک پلی‌اتیلن کلردار نیز در فرکانس‌های متوسط و پایین ضریب جذب مشابهی دارند و در فرکانس‌های پایین دو قله جذب بالای ۸۰ درصد را نشان می‌دهند. اپوکسی در فرکانس‌های بالا مؤثر است و در ۷/۵ کیلوهرتز قله جذب نزدیک به ۱۰۰ درصد دارد. لاستیک

بوتادین نیتریل به دلیل ضریب تلفات بالا در فرکانس‌های زیر ۵۰۰ هرتز مؤثر است و در ۲۰۰ هرتز قله جذب ۹۰ درصدی را ثبت کرده است، که می‌تواند در ساخت پوشش‌های آکوستیکی در فرکانس‌های پایین کاربرد داشته باشد.

۵- فهرست علائم

علائم انگلیسی

Incident plane wave	موج صفحه‌ای تابشی
Pressure Acoustic(water)	فیزیک فشار آکوستیک در دامنه فرکانس برای لایه آب و لایه کاملاً همسان
Solid mechanic	فیزیک مکانیک جامدات برای لایه جاذب فولاد پشتیبان
Perfectly Matched Layer (PML)	لایه کاملاً همسان
Water	آب
Sound absorption layer	لایه جاذب صوت
Rigid backing steel (RBS)	فولاد پشتیبان صلب
Periodic Boundary Conditions	شرایط مرزی تناوبی
Fluid-solid coupling interface	مرز مشترک سیال و جامد
L	طول ضلع سطح مقطع مربعی، mm
h_PML	ضخامت لایه کاملاً همسان، mm
h_water layer	ضخامت لایه آب، mm
h_absorption layer	ضخامت لایه جاذب، mm
h_RBS	ضخامت لایه فولاد پشتیبان صلب، mm
E	مدول یانگ، Pa
rho	چگالی، kg/m^3
eta	ضریب تلفات
Frequency	فرکانس، Hz
Sound absorption coefficient	ضریب جذب صوت
FEM Simulation	شبیه‌سازی اجزای محدود
TM Theory	تئوری تابع انتقال

منابع

[1] Sayadi, seyf, Abniki, Classification and identification of underwater targets based on diffuse sounds, arine Engineering Scientific-Research Journal, 13(26) (2018) 71-81 (in Persian).

[2] Saadatiyan, Saghayi, Investigation, identification and design of required signals in active sonar transmitter, 16th Maritime Industry Conference, (2014) (in Persian).

[3] C. Daniels, N. Perera, Investigation of Alberich Coating to Optimise Acoustic Stealth of Submarines, Acoustics, 4(2) (2022) 362-381.

[4] Y. Fu, H. Wang, P. Cao, Numerical design and optimization of metamaterials for underwater sound absorption at various hydrostatic pressures, Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, 42(3) (2023) 1434-1450.

[5] H. Weeratunge, Z. Shireen, S. Iyer, A. Menzel, A.W. Phillips, S. Halgamuge, R. Sandberg, E. Hajizadeh, A machine learning accelerated inverse design of underwater acoustic polyurethane coatings, Structural and Multidisciplinary Optimization, 65(8) (2022) 213.

[6] S. Zhou, Z. Fang, Optimization design of acoustic performance of underwater anechoic coatings, Acoustics Australia, 50(3) (2022) 297-313.

[7] M. Ranjbar, M.U. Bayer, Design of acoustic coating for underwater stealth in low-frequency ranges, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 46(3) (2024) 140.

[8] S. Qu, N. Gao, A. Tinel, B. Morvan, V. Romero-García, J.-P. Groby, P. Sheng, Underwater metamaterial absorber with impedance-matched composite, Science Advances, 8(20) (2022) 4206.

[9] X. Fang, X. Yin, J. Wu, Y. Li, H. Li, W. Wang, Y. Li, W. Wu, Underwater metagratings for sub-kilohertz low frequency and broadband sound absorption, International Journal of Mechanical Sciences, 260 (2023) 108630.

[10] N. Gao, H. Yu, J. Liu, J. Deng, Q. Huang, D. Chen,

G. Pan, Experimental investigation of composite metamaterial for underwater sound absorption, Applied Acoustics, 211 (2023) 109466.

[11] Y. Gu, H. Zhong, B. Bao, Q. Wang, J. Wu, Experimental investigation of underwater locally multi-resonant metamaterials under high hydrostatic pressure for low frequency sound absorption, Applied Acoustics, 172 (2021) 107605.

[12] H. Zou, L. Su, Y. Zhang, M. Zhang, W. Yu, X. Wang, X. Xia, H. Chen, X. Zhang, A. Zhao, A novel broadband underwater sound absorption metastructure with multi-oscillators, International Journal of Mechanical Sciences, 271 (2024) 109137.

[13] N. Gao, Y. Zhang, A low frequency underwater metastructure composed by helix metal and viscoelastic damping rubber, Journal of Vibration and Control, 25(3) (2019) 538-548.

[14] R. Zhang, A low frequency underwater meta structure composed by helix metal and viscoelastic damping rubber, The Journal of the Acoustical Society of America, 144(3_Supplement) (2018) 1763-1763.

[15] K. Shi, G. Jin, R. Liu, T. Ye, Y. Xue, Underwater sound absorption performance of acoustic metamaterials with multilayered locally resonant scatterers, Results in Physics, 12 (2019) 132-142.

[16] K. Shi, G. Jin, T. Ye, Y. Zhang, M. Chen, Y. Xue, Underwater sound absorption characteristics of metamaterials with steel plate backing, Applied Acoustics, 153 (2019) 147-156.

[17] T. Wang, J. Liu, M. Chen, Underwater sound absorption of a meta-absorption layer with double negativity, Applied Acoustics, 181 (2021) 108182.

[18] Z. Zhang, Y. Huang, J. Wang, Z. Li, S. Zhang, X. Zhang, Global Sound Absorption Prediction for a Composite Coating Laid on an Underwater Submersible in Debonding States, Journal of Marine Science and Engineering, 11(9) (2023) 1671.

[19] D. Yin, Y. Liu, Y. Wang, Y. Gao, S. Hu, L. Liu, X. Zhao, Finite Element Solution for Dynamic Mechanical Parameter Influence on Underwater Sound Absorption of Polyurethane-Based Composite, International Journal of Molecular Sciences, 23(23) (2022) 14760.

[20] Y. Zhu, X. Zhao, Z. Mei, H. Li, D. Wu, Investigation of the underwater absorption and reflection characteristics by using a double-layer composite metamaterial, Materials, 16(1) (2022) 49.

[21] K. Li, Z. Zhou, Z. Huang, Y. Lin, M. Chen, P. Yang, Y. Li, Underwater sound absorption characteristic of the rubber core sandwich structure with funnel-shaped cavities reinforced by carbon fiber columns, Applied Acoustics, 208 (2023) 109375.

[22] H.-C. Lin, S.-C. Lu, H.-H. Huang, Evaluation of a Hybrid Underwater Sound-Absorbing Metastructure by Using the Transfer Matrix Method, Materials, 16(4) (2023) 1718.

[23] X. Pan, X. Fang, X. Yin, Y. Li, Y. Pan, Y. Jin, Gradient index metamaterials for broadband underwater sound absorption, APL Materials, 12(3) (2024) 031000.

[24] K. Dong, Y. Lv, P. Wang, W. Cheng, H. Li, Acoustic properties of underwater acoustic metamaterials based on multi-physical field coupling model, in: Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing, 2024, pp. 012006.

[25] X. Jia, G. Jin, T. Ye, X. Ma, An efficient underwater absorber using pentamode metamaterials for broadband frequency, Journal of Vibration and Control, 30(7-8) (2024) 1759-1771.

[26] S. Carcangiu, A. Montisci, M. Usai, Modeling ultrasounds for nondestructive testing applications, Springer, 2015.

[27] J. Hu, Y. Lin, Z. Zhou, X. Cao, Q. Chi, W. Wu, Study on the low-frequency and broadband sound absorption performance of an underwater anechoic layer with novel design, Journal of Marine Science and Engineering, 11(2) (2023) 409.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A.H. Moradia, A. Hasani Baferani, Numerical investigation of the effect of mechanical properties of impedance-matched materials with the underwater environment on acoustic absorption using the finite element method, Amirkabir J. Mech Eng., 57(1) (2025) 43-68.

DOI: 10.22060/mej.2025.23777.7811