

شبیه‌سازی و بهینه‌سازی جاذب‌های آکوستیکی آلبریخ در زیر آب با حفره‌های استوانه‌ای و مخروطی

سید حسن عصایی*

استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک و هوافضا، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

سعید کشت‌کار

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک و هوافضا، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

محمدامین مکارم

دانشجوی دکتری، دانشکده نفت گاز پتروشیمی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

مهدی عابدی

دانشجوی دکتری، دانشکده علوم پایه، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

چکیده

به منظور جذب امواج آکوستیکی در زیر آب از پوشش‌هایی با نام جاذب‌های آلبریخ استفاده می‌گردد. مکانیزم این پوشش‌ها تبدیل انرژی امواج به گرما از طریق ارتعاش حفره‌های موجود در آن‌ها می‌باشد. در این مقاله ارزیابی عملکرد نوع خاصی از جاذب‌های آلبریخ از جنس پلی‌یورتان با استفاده از نرم‌افزار کامسول انجام پذیرفته و تاثیر پارامترهای مختلف هندسی به صورت مجزا بررسی گردیده است. بر اساس نتایج، افزایش ارتفاع و شعاع استوانه‌های هوا و همچنین تبدیل آن‌ها به مخروط ناقص، میزان ضریب جذب را افزایش و ضرایب عبور و بازتاب را کاهش می‌دهد. همچنین قرار دادن حفره‌ها در ردیف‌های میانی با شعاع‌های مختلف، محدوده فرکانس بهینه جاذب را افزایش داده و آن را اصطلاحاً پهن‌بند می‌نماید. در انتها جاذب پهن‌بند برای دست‌یابی به بیشترین میزان ضریب جذب بهینه شده است. در مدل بهینه، حفره‌ها به صورت مخروط ناقص با زاویه راس ۵ درجه و قطر آن‌ها در ردیف‌های اصلی و میانی به ترتیب برابر ۰/۸cm و ۱/۲cm می‌باشند. مطالعه پارامتری و بهینه‌سازی جاذب‌های آلبریخ برای اولین بار در این پژوهش صورت گرفته و می‌تواند مورد استفاده صنعتگران و پژوهشگران قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: آکوستیک، جاذب صوت، آلبریخ، زیر آب.

Simulation and Optimization of Underwater Acoustic Alberich Absorbers with Cylindrical and Conical Cavities

S. H. Assaee

Department of Mechanical Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran

S. Keshtkar

Department of Mechanical Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran

M. A. Makarem

Department of Chemical Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran

M. Abedi

Department of Science, Yasuj University, Yasuj, Iran

Abstract

In order to absorb underwater acoustics waves, special coatings named "Alberich" are used. The mechanism of these coatings is to transform the wave energy to heat by vibration through holes in them. In this study, the performance of a particular type of anechoic absorber called Alberich and made of polyurethane were evaluated by using Comsol software and the impact of various geometrical parameters were investigated, individually. The results showed that the absorption coefficient increases, while the reflection and transmission coefficients decrease, by increasing the height and radius of the air cylinders. Besides, putting cavities in the middle rows with different radii, increases the frequency range and makes the absorber wideband. Finally, the absorber was optimized to maximize the absorption coefficient. In the optimized model the cavities are in the shape of frustums with 5 degree head angle. Their radiuses in the main and middle rows are 0.8 cm and 1.2 cm, respectively. The Parametric study and optimization of the Alberich absorbers were done for the first time in the current research and it can be used by engineers and researchers.

Keywords : Acoustic, Sound Absorber, Alberich, Underwater.

آن‌ها به انرژی گرمایی، از انتقال یا انعکاس آن‌ها جلوگیری می‌کند [۲]. از جمله کاربردهای این جاذب‌ها عایق‌بندی محفظه‌های آزمایش آکوستیکی، جلوگیری از انتشار امواج در یک جهت خاص (جهت‌دهی به امواج) و ... می‌باشد.

از ابتدایی‌ترین پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه‌ی جاذب‌های آکوستیکی می‌توان به پژوهش ماسون و هیبارد [۳] در سال ۱۹۴۸

۱-مقدمه

یکی از پوشش‌های پرکاربرد در صنایع دریایی، پوشش‌های ضد انعکاس است که اصطلاحاً به آن‌ها جاذب گفته می‌شود و نوع خاصی از آن آلبریخ نام دارد [۱]. جاذب آلبریخ از جنس لاستیک با حفره‌های هوا است و عملکرد آن به گونه‌ایست که با دریافت انرژی امواج و تبدیل

این ماده شده است [۱۵]. به طور مثال دو روش از جنس پلی‌یورتان سخت و نرم در جاذب‌های ارائه شده توسط جیانگ و همکاران [۱۶] و هنگ و همکاران [۱۷] استفاده گردیده است.

در تحقیقات ذکر شده، عمدتاً به ارائه‌ی مدل، روش حل و اعتبارسنجی بسنده شده و هیچگونه بهینه‌سازی صورت نپذیرفته است. بنابراین ضروریست که تاثیر پارامترهای مختلف بر روی عملکرد جاذب‌های آکوستیکی به دقت بررسی و حالت بهینه استخراج گردد. در این پژوهش با تاکید بر امر بهینه‌سازی، جاذب آلبریخ ارائه شده توسط هنیون و دیکارپیگنی [۱۴] از جنس پلی‌یورتان و حاوی استوانه‌های هوا با استفاده از نرم‌افزار کامسول^۴ [۱۸] و با روش اجزا محدود شبیه‌سازی و اعتبارسنجی گردیده است. همچنین تاثیر پارامترهای مهم و تاثیرگذار بر روی عملکرد این جاذب‌ها مطالعه و نتایج ارائه شده‌اند. این پارامترها عبارتند از ارتفاع و قطر حفره‌های هوا و ضخامت جاذب. از طرف دیگر، تاثیر حضور استوانه‌های هوا با ابعاد مختلف در ردیف‌های میانی مورد مطالعه و تحلیل قرار گرفته است. در گام بعد با تبدیل شکل‌های استوانه‌ای به مخروط‌های ناقص و کامل، تغییرات ضرایب جذب و عبور بررسی گردیده است. در نهایت با توجه به نتایج به‌دست آمده، حالت بهینه برای جاذب‌های آلبریخ، بر مبنای بالا بودن ضریب جذب و پایین بودن ضریب بازتاب در محدوده‌ی وسیعی از فرکانس‌ها (جاذب پهن‌بند)، ارائه شده است. تحلیل پارامتری جاذب‌های آلبریخ و فرایند بهینه‌سازی آن‌ها برای اولین بار در این پژوهش صورت گرفته و نتایج آن می‌تواند در طراحی، ساخت و تحلیل عملکرد جاذب‌های آکوستیکی مورد استفاده صنعتگران و پژوهشگران قرار گیرد.

۲- شبیه‌سازی جاذب‌های آکوستیکی

۱-۲- معادلات حاکم

برای تحلیل جذب صوت توسط جاذب‌های آلبریخ، باید مسئله را به دو بخش مجزا تفکیک نمود. این دو بخش عبارتند از ناحیه‌ی سیال (آب و حفره‌های هوا) و ناحیه جامد (جاذب). در ناحیه‌ی سیال، معادلات ممنتوم (اولر) و پیوستگی در روابط (۱) و (۲) بیان شده‌اند. ذکر این نکته حائز اهمیت است که در این معادلات، از اثر رسانش گرما و لزجت صرف نظر و فرایند به صورت آدیاباتیک برگشت‌پذیر در نظر گرفته شده است.

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho_f} \nabla p \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \mathbf{u}) = 0 \quad (2)$$

در این روابط ρ_f چگالی سیال، \mathbf{u} بردار سرعت و P فشار کل می‌باشد. با مشتق‌گیری از معادله‌ی ممنتوم و جایگذاری در معادله‌ی پیوستگی و بازنویسی دوباره‌ی معادلات، معادله‌ی موج در رابطه‌ی (۳) به‌دست می‌آید. نحوه‌ی استخراج این معادلات به تفصیل در مرجع [۱۹] ذکر شده است.

$$\frac{1}{\rho_f c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} + \nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho} (\nabla p - \mathbf{q}_a) \right) = Q_m \quad (3)$$

اشاره کرد. آن‌ها با قراردادن صفحه‌ای مشبک از جنس مس در یک سیال لزج اقدام به عایق‌بندی صوتی محفظه‌ای برای انجام آزمایش‌های آکوستیکی نمودند. در سال ۱۹۵۶ کرامر و همکاران ساختاری برای جاذب‌های آکوستیکی معرفی کردند [۴]. آن‌ها اذعان داشتند با ایجاد حفره‌های استوانه‌ای شکل از جنس هوا درون موادی لاستیکی می‌توان امواج صوتی ورودی را جذب نمود. این جاذب‌ها اصطلاحاً آلبریخ^۱ نامیده می‌شوند [۲].

مدل یک‌بعدی تحلیل جاذب‌های آلبریخ با حفره‌های استوانه‌ای توسط گانارد [۵] در سال ۱۹۷۷ مطرح شد. در پژوهشی دیگر، ما و همکاران با استفاده از روش تفاضل محدود به تحلیل این‌گونه جاذب‌ها پرداختند [۶]. در مدل‌های کمی پیچیده‌تر، بای و همکاران [۷] با در نظر گرفتن المانی مکعبی شکل از سیالی از جنس گاز یا مایع دارای حفره‌های کروی شکل معادلات فشار را ساده نموده و معادله و دیفرانسیل معمولی^۲ به دست آوردند. سپس با روش اختلال^۳ و سایر روش‌های عددی مسئله را حل نمودند. جزئیات بیشتری از روش اجزا محدود در تحلیل جاذب‌های آکوستیکی در مواجهه با موج فرودی توسط ایسواران و مونجال در سال ۱۹۹۳ ارائه شد [۸]. در این مدل برای انتقال موج از ناحیه‌ی آب به جاذب از ماتریس‌های انتقال [۹] استفاده گردیده است. پژوهش مشابهی در سال ۱۹۹۹ توسط بیرد و همکاران [۱۰] صورت پذیرفت. در این پژوهش ابعاد حفره‌های کروی به میکرومتر کاهش یافت و حجم آن‌ها، تا ۱۷٪ کل جاذب را دربرگرفت. در مقایسه‌ی مدلسازی تحلیلی-ماتریسی آن‌ها با نتایج تجربی، تطابق خوبی مشاهده گردید. در پژوهش‌های دیگر جایاگوماری و همکاران [۱۱] به مدلسازی و اعتبارسنجی جاذب‌های پلی‌یورتان پرداختند و مینگ و همکاران در سال ۲۰۱۴ [۱۲] مدلی تحلیلی اما کارآمد برای تحلیل رفتار جاذب‌های آلبریخ با حفره‌های استوانه‌ای یا مخروطی شکل ارائه نمودند.

پژوهش‌های مهمی در حوزه‌ی جاذب‌های آکوستیکی توسط هنیون و همکاران صورت گرفته است. ابتدا در سال ۱۹۹۰ آن‌ها انتشار موج تخت بر روی شبکه‌ای لوله‌ای شکل را مطالعه کردند و معادلات حاکم را با روش اجزا محدود حل نمودند [۱۳]. نتایج مدل‌سازی آن‌ها دارای تطابق خوبی با داده‌های تجربی بودند. در سال بعد این گروه، پژوهشی مشابه برای جاذب‌های آلبریخ انجام دادند [۱۴]. آن‌ها نتایج مدلسازی خود را برای دو جاذب از جنس‌های پلی‌یورتان و سیلیکن اعتبار سنجی نمودند و در هر دو مورد تطابق بسیار خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و مدلسازی حاصل شد. در سال‌های اخیر نیز مروری بر جاذب‌های آکوستیکی به همراه شبیه‌سازی دو بعدی و سه بعدی این جاذب‌ها توسط این محققین به چاپ رسیده است [۱].

علاوه بر هنیون و همکاران محققان دیگری نیز از پلی‌یورتان در ساختار جاذب‌های خود استفاده نموده‌اند. علت این مسئله تطابق‌پذیری خوب این جنس با شرایط مختلف (مانند زیر آب) به وسیله تغییر ترکیب و شرایط تولید آن می‌باشد که موجب پیدایش خانواده‌ی بزرگی از

^۱ Alberich

^۲ Ordinary differential equations (ODE)

^۳ Perturbation

^۴ Comsol multiphysics

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.

$$-\mathbf{n} \cdot \left(-\frac{1}{\rho_0} (\nabla P - \mathbf{q}_d) \right) = 0 \quad (12)$$

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.

$$-\mathbf{n} \cdot \left(-\frac{1}{\rho_0} (\nabla P - \mathbf{q}_d) \right) + i \frac{k_{eq}}{\rho} P + \frac{i}{2k_{eq}\rho} \Delta_{\Gamma} P = Q_i \quad (13)$$

در قسمت جامد می‌توان از دو شرط مرزی آزاد و قید ثابت استفاده نمود. شرط مرزی آزاد به معنی رها بودن مولکول‌های سطحی بوده و شرط مرزی قید ثابت بیانگر بردار جابجایی برابر صفر می‌باشد که در رابطه‌ی (۱۴) آمده است.

$$\mathbf{u} = 0 \quad (14)$$

برای محاسبه عملکرد جاذب از ضرایب عبور (Tr)، نسبت فشار (tr)، بازتاب (R) و جذب (α) استفاده می‌شود که به ترتیب در روابط (۱۵) الی (۱۸) ارائه شده‌اند. باید توجه داشت که گرچه رابطه (۱۵) بدون بعد می‌باشد ولی واحد معادلات لگاریتمی مولفه‌های صوت به افتخار الکساندر گراهام بل، به طور قراردادی بل نامگذاری شده است که به علت بزرگ بودن این واحد، معمولاً از دسی بل استفاده می‌گردد [۲۰، ۲۱]. واحد ضریب عبور در این معادلات دسی بل (dB) بوده و ضریب بازتاب و جذب بدون واحد می‌باشند.

$$Tr = 20 \log_{10}(tr) \quad (15)$$

$$tr = \left| \frac{P_{out}}{P_{in}} \right| \quad (16)$$

$$R = \left| \frac{P_{scat}}{P_{in}} \right| \quad (17)$$

$$\alpha = 1 - R^2 - tr^2 \quad (18)$$

در روابط بالا P_{in} فشار ورودی بر روی سطح جاذب، P_{out} فشار خروجی از انتهای جاذب و P_{scat} فشار بازتاب شده از سطح جاذب می‌باشد. باید توجه داشت که در برخی متون علمی، ضریب جذب برای یک سطح تحت عنوان "پارامتر جذب" مطرح می‌گردد که عبارت است از حاصل ضرب ضریب جذب در مساحت. در این حالت واحد پارامتر جذب m^2 یا سابین (sabin) می‌باشد [23]. هرچه قدرمطلق ضریب عبور (Tr) بیشتر باشد، مقدار نسبت فشار (tr) کمتر بوده و میزان کمتری از امواج آکوستیک از جاذب عبور می‌کند.

۲-۳- حل عددی

ترکیب معادلات و شرایط مرزی ذکر شده در قسمت‌های قبل، غیر خطی بوده و نمی‌توان از روش‌های تحلیلی برای حل آن‌ها استفاده نمود. 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 اجزا

که در آن $\rho_f c^2$ مدول بالک، \mathbf{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) تعریف می‌شود.

$$P(\mathbf{x}, t) = P(\mathbf{x})e^{i\omega t} \quad (4)$$

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

$$-\frac{\omega^2 P}{\rho_f c^2} + \nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho_f} (\nabla P - \mathbf{q}_d) \right) = Q_m \quad (5)$$

با جایگذاری معادله عدد موج ($k_{eq} = \omega/c$) در رابطه (۵)، رابطه (۶) استخراج می‌گردد. با حل این معادله نحوه‌ی انتشار امواج در ناحیه سیال بدست می‌آید.

$$-\frac{k_{eq}^2 P}{\rho_f} + \nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho_f} (\nabla P - \mathbf{q}_d) \right) = Q_m \quad (6)$$

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

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (7)$$

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

$$\varepsilon(\mathbf{u}) = \frac{1}{2} (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T) \quad (8)$$

$$\rho_s \frac{\partial^2}{\partial t^2} \mathbf{u} - \nabla \cdot (\sigma(\mathbf{u}) - \mathbf{s}_0) = \mathbf{F} \quad (9)$$

در این روابط ρ_s چگالی جاذب، \mathbf{F} و \mathbf{s}_0 مولفه‌های منبع نیرو و بردار جابجایی است. یک حالت مهم موج هارمونیک با زمان می‌باشد که توسط رابطه (۱۰) ارائه می‌شود.

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}, t) = \mathbf{u}(\mathbf{x})e^{i\omega t} \quad (10)$$

با در نظر گرفتن وابستگی هارمونیک مشابه برای مولفه‌های منبع، معادله‌ی امواج الاستیک خطی به معادله‌ی ناهمگن هلمهولتز کاهش می‌یابد که در رابطه (۱۱) ارائه شده است.

$$-\rho_s \omega^2 \mathbf{u} - \nabla \cdot (\sigma(\mathbf{u}) - \mathbf{s}_0) = \mathbf{F} \quad (11)$$

با توجه به این معادله به عنوان معادله‌ی مقدار ویژه با مشتقات جزئی و حل آن، مودها و فرکانس‌های ویژه بدست می‌آیند که با استفاده از آن پروفایل جابجایی و در نتیجه، نحوه انتشار امواج در ناحیه جامد حاصل می‌گردد.

۲-۲- شرایط مرزی

شرایط مرزی مختلفی را می‌توان برای معادلات حاکم ذکر شده در قسمت قبل در نظر گرفت. در ناحیه سیال، یکی از مهمترین شرایط

⁵ Cauchy stress tensor

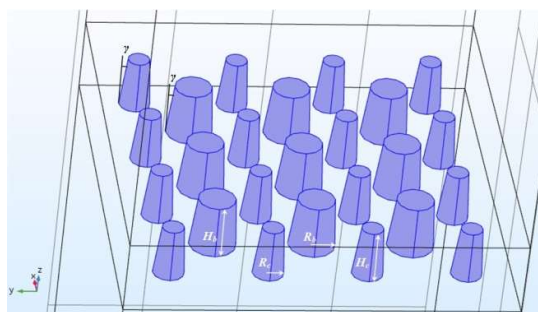
⁶ Partial differential equation (PDE)

فرکانسی ۷kHz الی ۲۰kHz صورت پذیرفته است. علت این موضوع اهمیت ویژه آن‌ها در تبیین میزان حذف امواج می‌باشد. باید توجه داشت که ضریب جذب وابسته به هر دو ضریب عبور و بازتاب بوده و مقدار آن به طور ضمنی دربرگیرنده مقادیر این دو ضریب می‌باشد.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی جاذب ارائه شده توسط هنیون و

دیکارپیگنی [۱۴]

| نام | مقدار | واحد |
|----------------------------------|----------|--------------------|
| چگالی آب (ρ_w) | ۱۰۰۰ | kg.m^{-3} |
| چگالی پلی‌یورتان (ρ_{pu}) | ۱۱۰۰ | kg.m^{-3} |
| سرعت صوت در آب (c_0) | ۱۴۸۹ | m.s^{-1} |
| فرکانس محرک (f_0) | ۷ الی ۲۰ | kHz |
| ارتفاع حفره‌های هوا (H_c) | ۲ | cm |
| شعاع حفره‌های هوا (R_c) | ۰/۷۵ | cm |
| ضخامت جاذب (H_a) | ۴ | cm |
| عرض جاذب (W_a) | ۲۰ | cm |



شکل ۲- ساختار هندسی جاذب با ردیف میانی و شعاع متفاوت

با استفاده از نتایج حاصل از مطالعات تک پارامتری، حالت‌های مختلف با ترکیب پارامترهای گوناگون استخراج شده و پس از انجام شبه‌سازی، بهترین ساختار پیشنهاد گردیده است. این ساختار بهینه باید دارای بیشترین میزان ضریب جذب و کمترین میزان ضرایب عبور و بازتاب در تمامی فرکانس‌ها باشد. همچنین جاذب مذکور باید در محدوده وسیعی از فرکانس‌ها ضریب جذب بالایی (بیش از ۰/۸۰) داشته باشد (جاذب پهن‌بند باشد).

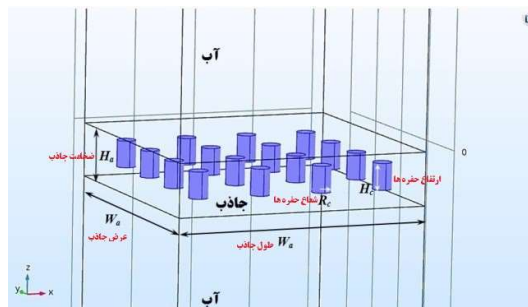
۳- نتایج و بحث

برای اطمینان از صحت فرایند شبه‌سازی، نتایج حاصل از نرم افزار اجزا محدود کامسول با نتایج آزمایشگاهی و مدلسازی مرجع [۱۴] مقایسه و در شکل ۳ (الف) نشان داده شده‌اند. با توجه به این شکل، تطابق خوبی بین نتایج به‌دست آمده در پژوهش جاری و مرجع [۱۴] مشهود است. باید توجه داشت که نرم افزار کامسول محاسبات را در هر فرکانس به صورت مجزا انجام می‌دهد. همچنین، همان‌طور که ذکر شد، ابعاد ناحیه سیال آب متناسب با طول موج تغییر می‌کند. با توجه

محدود برای حل معادلات انتخاب شده و از نرم‌افزار کامسول برای انجام شبه‌سازی استفاده گردیده است.

۴-۲- هندسه‌ی مورد مطالعه

هندسه مورد مطالعه در تحقیق جاری، جاذب ارائه شده توسط هنیون و دیکارپیگنی [۱۴] می‌باشد. شمای این جاذب در شکل ۱ ارائه شده است. جاذب از جنس پلی‌یورتان با ضخامت ۴cm ساخته شده که با دو ناحیه آب احاطه شده است. ضخامت لایه‌های آب در هر فرکانس متغیر و ضریبی از طول موج در نظر گرفته شده است. علت این پدیده لزوم قرارگیری حداقل یک طول موج کامل در ناحیه مربوطه می‌باشد [۲۰]. موج تخت از بالا به صورت عمود بر سطح جاذب تابیده می‌شود و پس از عبور از جاذب و برخورد با استوانه‌های هوا، از انتهای قطعه خارج می‌گردد. ابعاد جاذب و حفره‌های هوا، و خصوصیات فیزیکی آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. ذکر این نکته ضروریست که مدول یانگ^۷ و ضریب پواسون^۸ جنس پلی‌یورتان تابع فرکانس بوده و در پژوهش جاری از مقادیر گزارش شده توسط هنیون و دیکارپیگنی [۱۴] استفاده گردیده است. همان‌طور که در این مرجع ذکر شده، تطابق نتایج مدلسازی و آزمایشگاهی با در نظر گرفتن ۲۵٪ خطا در پارامترهای فیزیکی میسر گردیده است. علت این موضوع عدم دقت کافی در داده‌های ارائه شده توسط سازندگان لاستیک ذکر شده است [۱۴]. این هندسه به منظور اعتبارسنجی و به عنوان مبنا جهت مطالعات پارامتری و بهینه‌سازی در بخش‌های بعد در نظر گرفته شده است.



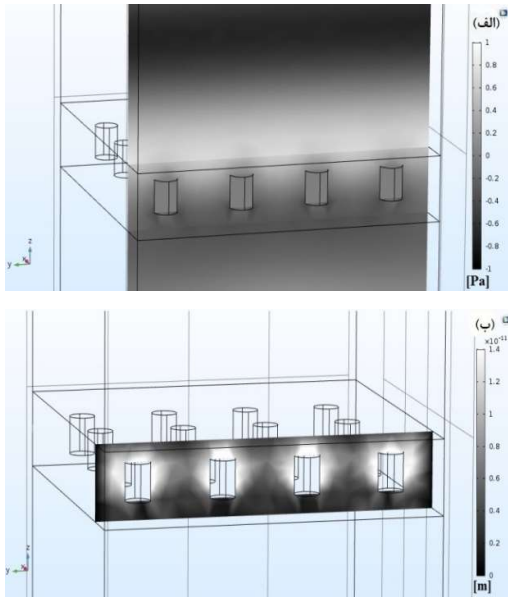
شکل ۱- هندسه جاذب ارائه شده توسط هنیون و دیکارپیگنی [۱۴]

۵-۲- مطالعات پارامتری و روند بهینه‌سازی

به منظور انجام مطالعات پارامتری و انجام فرایند بهینه‌سازی، جاذب معرفی شده در قسمت قبل به عنوان مبنا در نظر گرفته شده و تاثیر پارامترهای مختلف به تنهایی، در حالی که سایر پارامترها ثابت فرض شده‌اند، مطالعه گردیده است. این پارامترها عبارتند از ارتفاع، شعاع و زاویه راس استوانه‌ها، و ضخامت جاذب. همچنین تاثیر افزودن حفره‌های هوا در ردیف‌های میانی مورد بررسی قرار گرفته است. این پارامترها در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده‌اند. فرایند بهینه‌سازی بر مبنای بیشینه‌کردن ضریب جذب و کاهش میزان بازتاب در محدوده

⁷ Young modulus

⁸ Poisson coefficient



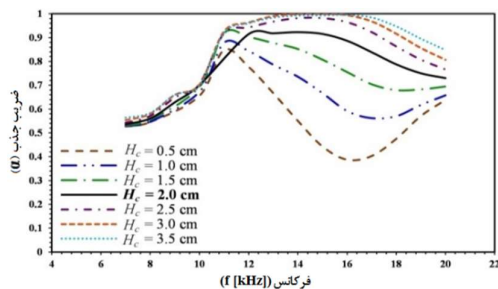
شکل ۴- پروفایل فشار و جابجایی در حالت پایه ($R_c=0.75\text{cm}$)
 ($f_0=10\text{kHz}$ و $H_a=4\text{cm}$, $H_c=2\text{cm}$)

۳-۱- مطالعات پارامتری

همان‌طور که در بخش ۲ ذکر شد، جاذب آکوستیکی ارائه شده در مرجع [۱۴] جهت اعتبارسنجی به عنوان مبنای مطالعات در نظر گرفته شده و تاثیر پارامترهای مختلف هندسی به تنهایی مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای نمایش بهتر تغییرات، در تمامی نمودارهای ارائه شده در این بخش حالت مینا با رنگ مشکی ممتد نشان داده شده است. همچنین، منظور از محدوده پهن‌بند، محدوده فرکانسی است که ضریب جذب به‌طور تقریبی بالاتر از ۰.۸۰ می‌باشد. در شکل ۵ تاثیر افزایش ارتفاع استوانه‌ها بر روی نمودار ضریب جذب، در حالی که سایر پارامترها ثابت در نظر گرفته شده‌اند، بررسی گردیده است.

۳-۱-۱- تاثیر تغییر ارتفاع استوانه‌ها

در شکل ۵ تاثیر افزایش ارتفاع استوانه‌ها بر روی نمودار ضریب جذب، در حالی که سایر پارامترها ثابت در نظر گرفته شده‌اند، بررسی گردیده است.



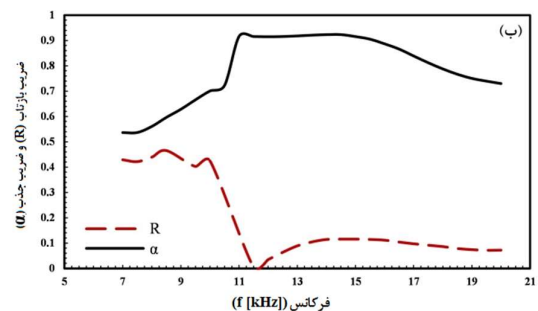
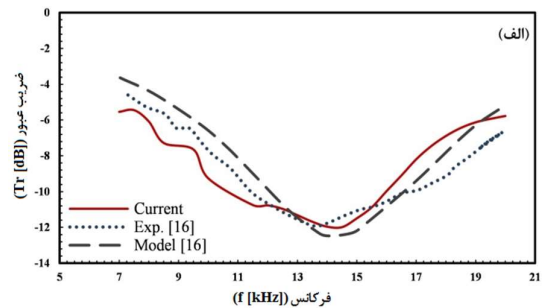
شکل ۵- تاثیر تغییر ارتفاع حفره‌ها بر ضریب جذب ($R_c=0.75\text{cm}$ و $H_a=4\text{cm}$)

به گزارش نتایج در مختصات لگاریتمی، خطاهای حاصل شده از این تغییرات منجر به ایجاد نوسانات کوچکی در نمودار ضریب جذب و اختلاف اندکی با نتایج مرجع [۱۴] گردیده است. برای مشاهده بهتر عملکرد این جاذب، ضرایب بازتاب و جذب امواج آکوستیک با استفاده از نرم‌افزار کامسول محاسبه و در شکل ۳ (ب) ارائه شده‌اند. همان‌طور که مشهود است جاذب ارائه شده در محدوده تقریبی فرکانس ۱۱kHz الی ۱۷kHz ضریب جذب بالای ۰.۸۰ را از خود نشان می‌دهد. پروفایل فشار و جابجایی این جاذب در شکل‌های ۴ (الف) و (ب) نشان داده شده‌اند. با توجه به این دو پروفایل می‌توان دریافت که موج ورودی به جاذب در بر خورد با سطح رویین استوانه‌های هوا، به علت اختلاف زیاد امپدانس آب و هوا، بازتاب می‌شود. یکی از پارامترهای بسیار مهم که در بحث انتقال امواج آکوستیک اهمیت دارد، امپدانس مکانیکی (Z) می‌باشد که در رابطه (۲۱) معرفی شده است. این پارامتر در واقع مقاومت در برابر نفوذ امواج صوت و معیاری از انتقال موج از یک محیط به محیط دیگر می‌باشد، به طوری که اگر امپدانس دو محیط به یکدیگر نزدیک باشد، موج به راحتی انتقال می‌یابد. در غیر این صورت موج بازتاب می‌شود.

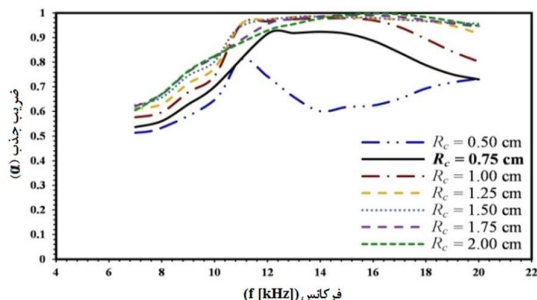
$$Z = \rho c \quad (19)$$

که در آن ρ چگالی و c سرعت صوت است.

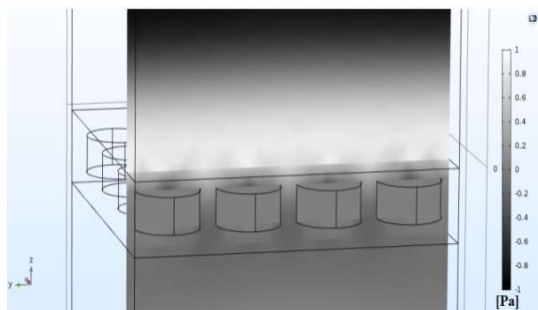
همچنین در اثر برخورد موج، استوانه‌ها ارتعاش کرده و انرژی موج را به انرژی جنبشی و سپس در اثر اصطکاک به انرژی حرارتی تبدیل می‌نمایند.



شکل ۳- نتایج شبیه‌سازی حالت پایه: (الف) اعتبارسنجی نتایج با مرجع [۱۴] بر حسب ضریب عبور و (ب) ضریب بازتاب و جذب امواج آکوستیک



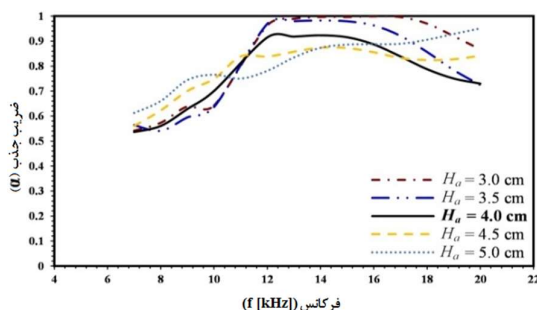
شکل ۷- تاثیر تغییر شعاع حفره‌ها بر ضریب جذب ($H_c=2\text{cm}$) و ($H_a=4\text{cm}$)



شکل ۸- پروفایل فشار جاذب استوانه‌ای با شعاع بیشینه ($R_c=2\text{cm}$) ($f_0=10\text{kHz}$ و $H_a=4\text{cm}$, $H_c=2\text{cm}$)

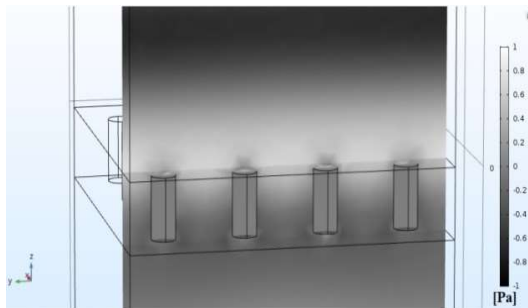
۳-۱-۳- تاثیر تغییر ضخامت جاذب

ضخیم‌تر کردن جاذب به منظور افزایش آستانه مقاومت و بهبود عملکرد آن، در فرکانس‌های پایین‌تر بدست می‌آید. به عبارت دیگر، با افزایش ضخامت، میزان جذب جاذب در فرکانس‌های پایین‌تر افزایش می‌یابد [۲]. شکل ۹ نمودار ضریب جذب امواج آکوستیک را بر اساس ضخامت جاذب به نمایش می‌گذارد. با توجه به این شکل، افزایش ضخامت، علاوه بر بهبود میزان جذب در فرکانس‌های پایین‌تر، موجب افت این پارامتر در فرکانس‌های بالاتر شده است که علت این اتفاق خاصیت رزونانسی این گونه پوشش‌ها می‌باشد که در بخش ۳-۲-۱ به صورت مختصر اشاره شد. در ضخامت جاذب معادل ۵cm، روند تغییرات ضریب جذب با افزایش فرکانس تقریباً به صورت خطی با شیب مثبت گردیده است. این در حالیست که در ضخامت‌های کمتر، نمودار به صورت سهمی‌گون و دارای بیشینه می‌باشد.



شکل ۹- تاثیر تغییر ضخامت جاذب بر ضریب جذب ($R_c=0.75\text{cm}$) ($H_c=2\text{cm}$)

با توجه به شکل ۵، با افزایش ارتفاع استوانه‌ها میزان ضریب جذب بیشتر شده و محدوده پهن‌بند افزایش می‌یابد. با بررسی پروفایل فشار، همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، علت این موضوع روشن می‌گردد. هرچه ارتفاع استوانه‌ها بلندتر باشد، سطح جانبی حفره‌های هوا بیشتر و در نتیجه دامنه ارتعاشات گسترده‌تر می‌گردد. با افزایش ارتعاش و دامنه جابجایی حفره‌های هوا، میزان تبدیل انرژی صوت به انرژی حرارتی افزایش یافته و میزان جذب امواج آکوستیک بیشتر می‌گردد. بنابراین افزایش ارتفاع جاذب تا میزان مشخصی موثر است.

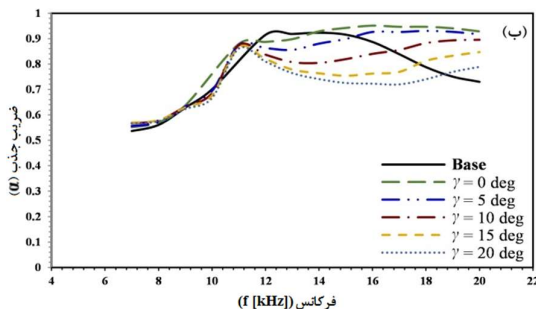
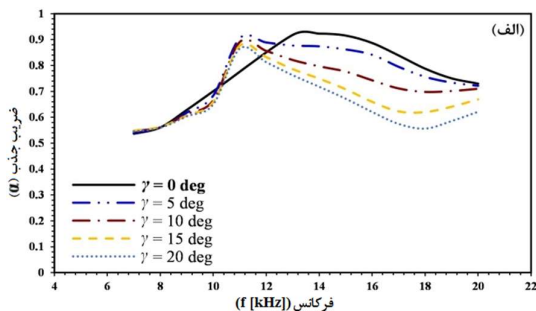


شکل ۶- پروفایل فشار جاذب استوانه‌ای با ارتفاع بیشینه ($f_0=10\text{kHz}$ و $H_a=4\text{cm}$, $H_c=3.5\text{cm}$, $R_c=0.75\text{cm}$)

۳-۱-۲- تاثیر تغییر شعاع استوانه‌ها

پارامتر مهم دیگر، شعاع استوانه‌های هوا می‌باشد. روند تغییرات ضریب جذب با تغییر این پارامتر در شکل ۷ نشان داده شده است. با افزایش شعاع، سطح جانبی حفره‌های هوا زیاد شده و در نتیجه ضریب جذب افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، با بیشتر کردن شعاع، سطح روبین استوانه‌های هوا افزایش یافته و به علت افزایش نواحی با امپدانس متفاوت، میزان بازتاب امواج بیشتر می‌گردد. البته این نکته شایان ذکر است که این نوع پوشش‌های آکوستیک "رزونانسی" نیز نامیده می‌شوند. بدین معنی که در یک محدوده فرکانس میزان جذب بالایی دارند و جاذب نامیده می‌شوند و در بازه فرکانسی دیگر بازتاب‌کننده بهتر امواج آکوستیک هستند. به عبارت دیگر افزایش شعاع حفره‌های هوا دارای دو تاثیر متقابل بر ضریب جذب است. از یک سو سطح جانبی حفره‌ها در تماس با امواج آکوستیکی افزایش یافته و ضریب جذب بیشتر می‌شود. از سوی دیگر سطح فوقانی حفره‌ها بزرگتر شده و ناحیه اختلاف امپدانس بیشتر می‌گردد و این پدیده موجب افزایش میزان بازتاب می‌شود. با توجه به شکل ۷ تاثیر افزایش شعاع بر ضریب جذب در بازه فرکانسی محاسبه شده، به خصوص در فرکانس‌های بیشتر از ۱۴kHz چشم‌گیر بوده و مقدار آن را از حدود ۰/۶ الی ۱ (مقدار بیشینه) تغییر داده است. شکل ۸ پروفایل فشار را در جاذب با شعاع بیشینه به نمایش می‌گذارد. این شکل افزایش میزان بازتاب امواج آکوستیک در اثر افزایش شعاع حفره‌ها را نشان می‌دهد.

میانی، همانند حالت استوانه‌ای، جاذب پهن‌بند می‌شود. افزایش زاویه راس در هر دو حالت، باعث کاهش میزان جذب در فرکانس‌های بالاتر شده است.

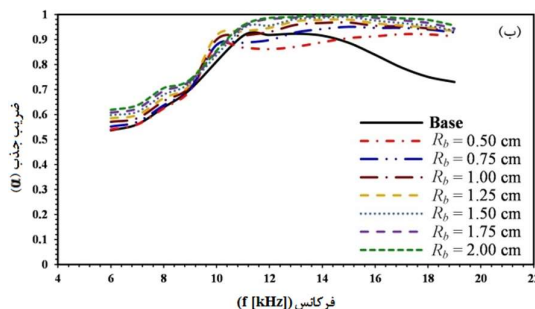
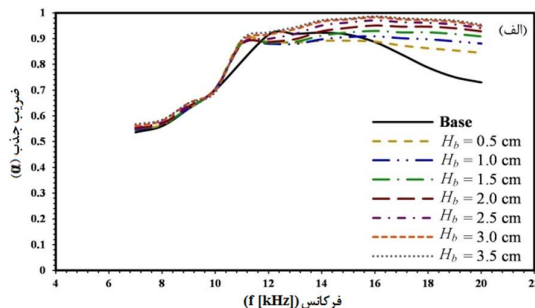


شکل ۱۱- تاثیر تغییر زاویه راس مخروطها بر ضریب جذب میانی، (ب) با ردیف میانی (الف): بدون ردیف

برای تفسیر بهتر نمودارهای شکل ۱۱ لازم است نمودارهای ضریب عبور و پروفایل‌های فشار و جابجایی را در حالت‌های مختلف بررسی نمود. شکل ۱۲ نمودار ضریب عبور جاذب را با افزایش γ نشان می‌دهد. با توجه به نمودارهای ارائه شده مشاهده می‌شود که به علت کاهش سطح مقطع حفره‌های هوا در راس آنها، امواج آکوستیکی به میزان بیشتری به جاذب وارد می‌شوند و این موضوع باعث افزایش ضریب عبور و در نتیجه طبق رابطه (۱۵) موجب افزایش میزان عبور امواج آکوستیک می‌گردد. طبق رابطه (۱۸) با افزایش میزان عبور امواج بخصوص در فرکانس‌های بالا، میزان جذب امواج آکوستیک کاهش می‌یابد که در شکل ۱۱ مشخص است. با مقایسه شکل ۱۲ (الف) با شکل ۳ (الف) نتیجه می‌شود که تبدیل استوانه‌ها به مخروط باعث افزایش میزان عبور امواج آکوستیک می‌گردد. این افزایش عبور در فرکانس‌های بالاتر و در ناحیه‌ی کمینه‌ی ضریب عبور مشهودتر است. با افزودن حفره‌های مخروطی شکل در ردیف‌های میانی در شکل ۱۲ (ب)، میزان ضریب عبور امواج نسبت به شکل ۱۲ (الف) کمتر و جاذب پهن‌بندتر شده است.

۳-۱-۴- تاثیر افزودن استوانه در ردیف‌های میانی

افزودن استوانه در ردیف میانی تاثیر چشمگیری بر عملکرد جاذب می‌گذارد. شکل ۱۰ تغییرات ضریب جذب را با تغییر ارتفاع و شعاع استوانه‌های میانی نشان می‌دهد. به طور کلی، با افزایش شعاع ارتفاع استوانه‌های ردیف میانی میزان ضریب جذب افزایش یافته و جاذب پهن‌بند می‌گردد. در بازه فرکانسی 1 kHz تا 20 kHz ، تغییر H_b تاثیر چندانی بر روی ضریب جذب نمی‌گذارد. این در حالیست که روند افزایش جذب امواج با افزایش R_b در تمامی فرکانس‌ها محسوس است.

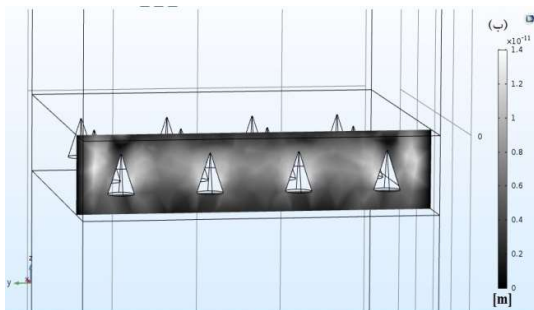
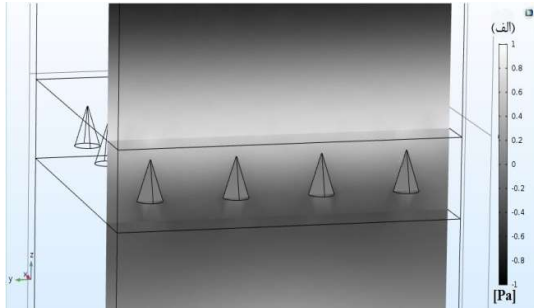


شکل ۱۰- تاثیر تغییر ابعاد استوانه‌های میانی بر ضریب جذب (الف): تغییر ارتفاع ($H_b=4\text{cm}$ و $R_b=0.75\text{cm}$ ، $H_c=2\text{cm}$ ، $R_b=0.75\text{cm}$). (ب) تغییر شعاع ($H_b=2\text{cm}$)

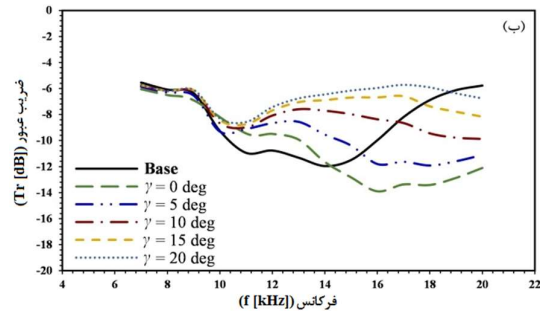
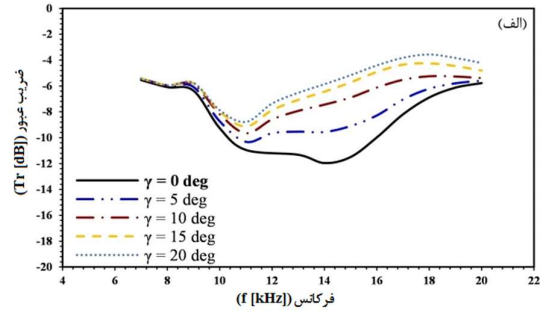
ذکر این نکته لازم است که فرایند ساخت جاذب‌ها با استوانه‌هایی با ارتفاع متغیر دشوارتر از شعاع متغیر می‌باشد. به عبارت دیگر، فرایند ساخت جاذب با ارتفاع‌های متغیر نیازمند چندین لایه ریخته‌گری به صورت مجزا بوده در حالی که اگر ارتفاع استوانه‌ها ثابت در نظر گرفته شوند این فرایند در مراحل کمتری انجام‌پذیر است. بر اساس این دو دلیل، در ادامه این پژوهش ارتفاع استوانه‌ها (و مخروط‌ها) یکسان فرض شده‌اند.

۳-۱-۵- تغییر استوانه‌ها به مخروط

شکل ۱۱ تاثیر تغییر زاویه راس استوانه‌ها (γ) و تبدیل آنها به مخروط ناقص و کامل را نشان می‌دهد. در قسمت الف مخروط‌ها تنها در ردیف‌های اصلی قرار گرفته و در قسمت ب، ردیف‌های میانی با مخروط‌هایی مشابه ردیف‌های اصلی پر شده‌اند (شکل ۲). بر اساس نمودارهای شکل ۱۱ و با تغییر γ ، فرکانس بیشینه جذب به سمت فرکانس‌های پایین‌تر سوق می‌یابد. با افزودن مخروط در ردیف‌های



شکل ۱۳- پروفایل فشار و جایجایی در جاذب با حفره‌های مخروطی کامل ($f_0=10\text{kHz}$ و $H_a=4\text{cm}$, $H_c=2\text{cm}$, $R_c=0.75\text{cm}$)



شکل ۱۲- تاثیر تغییر زاویه راس مخروطها بر ضریب عبور میانی، (ب) با ردیف میانی بدون ردیف

۲-۳- بهینه‌سازی

در بخش قبل تاثیر تغییر پارامترهای مختلف هندسی بر عملکرد جاذب به تنهایی و در حالتی که سایر پارامترها ثابت فرض شده بودند مطالعه گردیدند. با توجه به نتایج به دست آمده ترکیبی از پارامترهای مذکور اتخاذ و حالت‌های مختلف با هم مقایسه شده‌اند. این حالت‌ها در دو ضخامت ۴cm (هینیون و دیکارپیگنی [۱۴]) و ۵cm (بر اساس یک چهارم طول موج کمینه [۲]) برای جاذب محاسبه و نتایج به صورت ضریب جذب و بازتاب میانگین (در محدوده‌ی فرکانسی ۷kHz الی ۲۰kHz) در جداول ۲ و ۳ گزارش گردیده‌اند. گام شعاع و ارتفاع حفره‌ها برابر ۲mm و اندازه‌ی زاویه راس آن‌ها برابر ۵ درجه فرض شده‌اند.

با توجه به نتایج به دست آمده، اگر بالاترین میزان ضریب جذب به عنوان مبنای انتخاب جاذب بهینه در نظر گرفته شود، دو مدل A-۷ و B-۷ با ضرایب جذب میانگین به ترتیب برابر ۰.۸۸/۱۸٪ و ۰.۹۰/۲۳٪ بهترین مدل می‌باشند. در این دو مدل زاویه راس حفره‌ها ۵ درجه و شعاع حفره‌های ردیف اصلی و میانی به ترتیب ۰.۸cm و ۱.۲cm در نظر گرفته شده است. ارتفاع حفره‌ها و ضخامت جاذب در مدل A-۷ به ترتیب برابر ۲/۶cm و ۴cm و در مدل B-۷ به ترتیب ۳/۲cm و ۵cm لحاظ گردیده است (مطابق جدول ۲ و ۳). در حالتی که مینا کمترین میزان بازتاب فرض شود، با تغییر زاویه γ به ۸ درجه، دو مدل A-۲۰ و B-۲۶ با ضرایب بازتاب میانگین برابر ۰.۱۴/۵۷٪ و ۰.۱۶/۲۱٪ جاذب‌های بهتری هستند.

شکل ۱۳ پروفایل فشار و جایجایی را برای جاذبی با حفره-های مخروطی کامل به نمایش می‌گذارد. با توجه به شکل ۱۳ (الف) و مقایسه آن با شکل ۴ (الف) به وضوح دیده می‌شود که با تغییر استوانه‌ها به مخروط و حذف سطح رویین استوانه‌ها، موج به میزان بسیار بیشتری به جاذب وارد شده و بازتاب کاهش می‌یابد. افزایش موج ورودی باعث افزایش میزان موج خروجی و در نتیجه افزایش ضریب جذب می‌گردد. از طرف دیگر انتظار می‌رود که با افزایش موج ورودی و تماس بیشتر موج با حفره‌های هوا، میزان تبدیل انرژی بیشتر و ضریب جذب افزایش یابد ولی باید توجه داشت که با مخروطی شدن استوانه‌ها، سطح تماس آن‌ها با امواج کاهش یافته و در نتیجه از میزان کلی تبدیل انرژی صوت به حرارت کاسته و میزان جذب امواج کاهش می‌یابد. این موضوع با مقایسه شکل ۱۳ (ب) با شکل ۴ (ب) بهتر تبیین می‌گردد. در حالت مخروطی، در نتیجه ورود بیشتر امواج به جاذب و کاهش سطح تماس حفره‌ها با امواج ورودی، شدت جایجایی و ارتعاش حفره‌ها نسبت به حالت استوانه‌ای کاهش یافته است. با در نظر گرفتن آنچه در این بخش ذکر گردید، هر پارامتر هندسی تاثیر قابل توجهی بر روی عملکرد جاذب می‌گذارد. بنابراین برای دستیابی به حالت بهینه باید ترکیبی از این پارامترها اتخاذ گردد.

جدول ۳- حالت‌های مورد مطالعه جهت یافتن ابعاد بهینه ($H_b=5cm$)

| مدل | γ [deg] | R_c [cm] | R_b [cm] | $H_{b,c}$ [cm] | R_{av} % | α_{av} % |
|------|----------------|------------|------------|----------------|------------|-----------------|
| B-۱ | ۵ | ۰/۸ | ۱/۲ | ۲/۸ | ۱۸/۳۰ | ۹۰/۱۰ |
| B-۲ | ۵ | ۰/۶ | ۱/۴ | ۲/۸ | ۱۷/۷۷ | ۸۸/۸۰ |
| B-۳ | ۵ | ۰/۴ | ۱/۶ | ۲/۸ | ۱۷/۹۸ | ۸۶/۶۳ |
| B-۴ | ۵ | ۰/۸ | ۱/۲ | ۳/۰ | ۱۷/۸۲ | ۹۰/۱۵ |
| B-۵ | ۵ | ۰/۶ | ۱/۴ | ۳/۰ | ۱۶/۸۴ | ۸۹/۰۴ |
| B-۶ | ۵ | ۰/۴ | ۱/۶ | ۳/۰ | ۱۷/۲۳ | ۸۶/۹۴ |
| B-۷ | ۵ | ۰/۸ | ۱/۲ | ۳/۲ | ۱۷/۶۷ | ۹۰/۲۳ |
| B-۸ | ۵ | ۰/۶ | ۱/۴ | ۳/۲ | ۱۶/۳۰ | ۸۹/۰۰ |
| B-۹ | ۵ | ۰/۴ | ۱/۶ | ۳/۲ | ۱۶/۸۷ | ۸۷/۱۱ |
| B-۱۰ | ۵ | ۰/۸ | ۱/۲ | ۳/۴ | ۱۸/۱۷ | ۹۰/۱۸ |
| B-۱۱ | ۵ | ۰/۶ | ۱/۴ | ۳/۴ | ۱۶/۶۱ | ۸۹/۱۴ |
| B-۱۲ | ۵ | ۰/۴ | ۱/۶ | ۳/۴ | ۱۷/۱۰ | ۸۷/۲۴ |
| B-۱۳ | ۵ | ۰/۸ | ۱/۲ | ۳/۶ | ۱۹/۵۴ | ۸۹/۸۷ |
| B-۱۴ | ۵ | ۰/۶ | ۱/۴ | ۳/۶ | ۱۸/۲۲ | ۸۹/۴۴ |
| B-۱۵ | ۵ | ۰/۴ | ۱/۶ | ۳/۶ | ۱۸/۳۵ | ۸۷/۲۱ |
| B-۱۶ | ۵ | ۰/۸ | ۱/۲ | ۳/۸ | ۲۰/۷۴ | ۸۹/۶۶ |
| B-۱۷ | ۵ | ۰/۶ | ۱/۴ | ۳/۸ | ۱۹/۴۳ | ۸۹/۱۷ |
| B-۱۸ | ۵ | ۰/۴ | ۱/۶ | ۳/۸ | ۲۰/۱۸ | ۸۷/۰۷ |
| B-۱۹ | ۵ | ۰/۸ | ۱/۲ | ۴/۰ | ۲۲/۸ | ۸۹/۲۸ |
| B-۲۰ | ۵ | ۰/۶ | ۱/۴ | ۴/۰ | ۲۱/۳ | ۸۸/۷۴ |
| B-۲۱ | ۵ | ۰/۴ | ۱/۶ | ۴/۰ | ۲۲/۱۹ | ۸۶/۹۰ |
| B-۲۲ | ۵ | ۰/۸ | ۱/۲ | ۴/۲ | ۲۴/۷ | ۸۸/۸۶ |
| B-۲۳ | ۵ | ۰/۶ | ۱/۴ | ۴/۲ | ۲۳/۱۲ | ۸۸/۴۷ |
| B-۲۴ | ۵ | ۰/۴ | ۱/۶ | ۴/۲ | ۲۴/۱۴ | ۸۶/۴۰ |
| B-۲۵ | ۲ | ۰/۸ | ۱/۲ | ۳/۲ | ۲۰/۰۰ | ۹۰/۰۵ |
| B-۲۶ | ۸ | ۰/۸ | ۱/۲ | ۳/۲ | ۱۶/۲۱ | ۸۹/۷۴ |

۴- نتیجه‌گیری

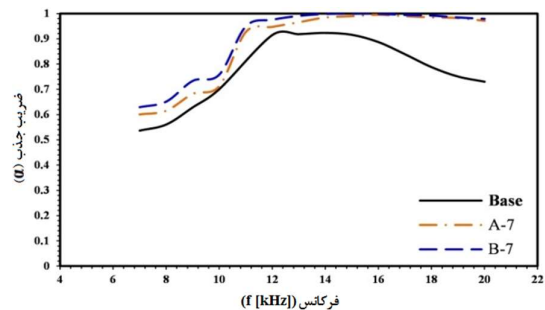
در پژوهش جاری شبیه‌سازی، مطالعات پارامتری و بهینه‌سازی جاذب‌های آلبریک با حفره‌های استوانه‌ای و مخروطی انجام پذیرفت. نتیجه شد که با افزایش ارتفاع و شعاع حفره‌های هوا تا حد مشخصی، میزان ضریب جذب افزایش می‌یابد. از طرف دیگر با افزودن حفره‌های هوا در ردیف‌های میانی و به خصوص با تغییر ابعاد آن‌ها، جاذب پهن‌بند می‌گردد. همچنین نتیجه شد که برای افزایش میزان جذب در فرکانس‌های پایین‌تر می‌بایست ضخامت جاذب را افزایش داد؛ ولی این موضوع موجب کاهش ضریب جذب در فرکانس‌ها بالاتر می‌گردد. از طرف دیگر، می‌توان برای انتقال فرکانس بیشینه به سمت فرکانس‌های پایین‌تر استوانه‌ها را به مخروط تبدیل نمود.

با در نظر گرفتن نتایج مطالعات پارامتری و انجام شبیه‌سازی در حالت‌های مختلف، حالت بهینه در ضخامت‌های مختلف استخراج گردید. در این حالت حفره‌ها به صورت مخروط ناقص با زاویه راس ۵ درجه در نظر گرفته شده و قطر آن‌ها در ردیف‌های اصلی و میانی به ترتیب برابر ۰/۸cm و ۱/۲cm می‌باشد. نتایج این پژوهش می‌تواند مورد توجه صنعتگران و پژوهشگران در حوزه‌ی آکوستیک زیرآبی قرار گیرد

جدول ۲- حالت‌های مورد مطالعه جهت یافتن ابعاد بهینه ($H_b=4cm$)

| مدل | γ [deg] | R_c [cm] | R_b [cm] | $H_{b,c}$ [cm] | R_{av} % | α_{av} % |
|------|----------------|------------|------------|----------------|------------|-----------------|
| A-۱ | ۵ | ۰/۸ | ۱/۲ | ۲/۲ | ۱۶/۲۹ | ۸۷/۰۳ |
| A-۲ | ۵ | ۰/۶ | ۱/۴ | ۲/۲ | ۱۶/۴۵ | ۸۵/۰۹ |
| A-۳ | ۵ | ۰/۴ | ۱/۶ | ۲/۲ | ۱۷/۵۴ | ۸۲/۲۱ |
| A-۴ | ۵ | ۰/۸ | ۱/۲ | ۲/۴ | ۱۵/۴۰ | ۸۷/۶۴ |
| A-۵ | ۵ | ۰/۶ | ۱/۴ | ۲/۴ | ۱۵/۹۲ | ۸۵/۶۴ |
| A-۶ | ۵ | ۰/۴ | ۱/۶ | ۲/۴ | ۱۷/۸۳ | ۸۳/۰۰ |
| A-۷ | ۵ | ۰/۸ | ۱/۲ | ۲/۶ | ۱۶/۶۳ | ۸۸/۱۸ |
| A-۸ | ۵ | ۰/۶ | ۱/۴ | ۲/۶ | ۱۶/۷۰ | ۸۶/۱۴ |
| A-۹ | ۵ | ۰/۴ | ۱/۶ | ۲/۶ | ۱۸/۴۳ | ۸۳/۷۰ |
| A-۱۰ | ۵ | ۰/۸ | ۱/۲ | ۲/۸ | ۱۹/۵۵ | ۸۸/۰۱ |
| A-۱۱ | ۵ | ۰/۶ | ۱/۴ | ۲/۸ | ۱۸/۷۳ | ۸۶/۷۸ |
| A-۱۲ | ۵ | ۰/۴ | ۱/۶ | ۲/۸ | ۱۹/۴۹ | ۸۳/۹۷ |
| A-۱۳ | ۵ | ۰/۸ | ۱/۲ | ۳/۰ | ۲۱/۷۳ | ۸۷/۹۴ |
| A-۱۴ | ۵ | ۰/۶ | ۱/۴ | ۳/۰ | ۲۱/۰۸ | ۸۶/۷۶ |
| A-۱۵ | ۵ | ۰/۴ | ۱/۶ | ۳/۰ | ۲۱/۷۹ | ۸۳/۹۵ |
| A-۱۶ | ۵ | ۰/۸ | ۱/۲ | ۳/۲ | ۲۴/۶۹ | ۸۷/۳۶ |
| A-۱۷ | ۵ | ۰/۶ | ۱/۴ | ۳/۲ | ۲۳/۶۸ | ۸۶/۳۰ |
| A-۱۸ | ۵ | ۰/۴ | ۱/۶ | ۳/۲ | ۲۴/۲۶ | ۸۳/۷۷ |
| A-۱۹ | ۲ | ۰/۸ | ۱/۲ | ۲/۶ | ۲۰/۳۵ | ۸۷/۵۵ |
| A-۲۰ | ۸ | ۰/۸ | ۱/۲ | ۲/۶ | ۱۴/۵۷ | ۸۷/۸۱ |

مقایسه نمودار ضریب جذب حالت مینا با دو حالت بهینه‌ی A-۷ و B-۷ در شکل ۱۴ ارائه شده است. با توجه به این شکل، ضریب جذب نسبت به حالت پایه افزایش یافته و جاذب پهن‌بند گردیده است. همچنین همان‌طور که انتظار می‌رفت، عملکرد جاذب با ضخامت بیشتر در فرکانس‌های پایین‌تر بهتر می‌باشد. با توجه به نمودار کمترین میزان جذب در مدل B-۷ به عنوان جاذب بهینه، در حدود ۰/۶ بوده و از فرکانس ۱۱kHz مقدار ضریب جذب بالاتر از ۹۵٪ می‌گردد.



شکل ۱۴- حالت‌های بهینه‌ی A-۷، B-۷ و حالت پایه

[16] Jiang H., Wang Y., Zhang M., Hu Y., Lan D., Zhang Y., Wei B., Locally resonant phononic woodpile: A wide band anomalous underwater acoustic absorbing material, *Applied Physics Letters*, Vol. 95, No. 10, pp. 104101, 2009 .

[17] Heng J., Yu-Ren W., Mi-Lin Z., Yan-Ping H., Ding L., Qun-Li W., Huan-Tong L., Wide-band underwater acoustic absorption based on locally resonant unit and interpenetrating network structure, *Chinese Physics B*, Vol. 19, No. 2, pp. 026202, 2010 .

[18] Comsol Multiphysics, COMSOL-Inc., Burlington USA, 2016, v5.2a

[19] Carcangiu S., Montisci A., Usai M., *Waves Propagation*, in: P. Burrascano, S. Callegari, A. Montisci, M. Ricci, M. Versaci, *Ultrasonic Nondestructive Evaluation Systems: Industrial Application Issues*, Eds., Switzerland: Springer International Publishing, 2015 .

[20] Everest F. A., Pohlmann K. C., *Master Handbook of Acoustics*, USA: McGraw-Hill Education, 2015 .

[21] Moser M., Muller G., *Fundamentals*, in: G. Muller, M. Moser, *Handbook of Engineering Acoustics*, Eds., Heidelberg: Springer International Publishing, 2013 .

[22] Reddy J., *An Introduction to the Finite Element Method*: McGraw-Hill Education, 2005 .

و در فرایند طراحی، ساخت و بهینه‌سازی جاذب‌های آلبریخ استفاده گردد.

۵-مراجع

[1] Méresse P., Audoly C., Croëne C., A.-C. Hladky-Hennion, Acoustic coatings for maritime systems applications using resonant phenomena, *Comptes Rendus Mécanique*, Vol. 343, No. 12, pp. 645-655, 2015 .

[2] Loeser H. T., *Principles of Sonar Installation* :Naval Underwater Systems Center-New London Lab, 1982 .

[3] W. P. Mason, F. H. Hibbard, Absorbing Media for Underwater Sound Measuring Tanks and Baffles, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 20, No. 4, pp. 476-482, 1948 .

[4] Cramer ,W. S., Johnston T. F., Underwater Sound Absorbing Structures, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 28, No. 3, pp. 501-502, 1956 .

[5] Gaunaud G., One-dimensional model for acoustic absorption in a viscoelastic medium containing short cylindrical cavities, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 62, No. 2, pp. 298-307, 1977 .

[6] Ma T.-C., Scott R., Yang W. H., Harmonic wave propagation in an infinite viscoelastic medium with a periodic array of cylindrical elastic fibers, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 69, No. 2, pp. 257-264, 1980 .

[7] Bai D., Keller J. B., Sound waves in a periodic medium containing rigid spheres, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 82, No. 4, pp. 1436-1441, 1987 .

[8] Easwaran V., Munjal M., Analysis of reflection characteristics of a normal incidence plane wave on resonant sound absorbers: A finite element approach, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 93, No. 3, pp. 1308-1318, 1993 .

[9] Sastry J., Munjal M., A transfer matrix approach for evaluation of the response of a multi-layer infinite plate to a two-dimensional pressure excitation, *Journal of sound and vibration*, Vol. 182, No. 1, pp. 109-128, 1995 .

[10] Baird A., Kerr F., Townend D., Wave propagation in a viscoelastic medium containing fluid-filled microspheres, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 105, No. 3, pp. 1527-1538, 1999 .

[11] Jayakumari V. G., Shamsudeen R. K., Ramesh R., Mukundan T., Modeling and validation of polyurethane based passive underwater acoustic absorber, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 130, No. 2, pp. 724-730, 2011 .

[12] Meng T., Simplified model for predicting acoustic performance of an underwater sound absorption coating, *Journal of Vibration and Control*, Vol. 20, No. 3, pp. 339-354, 2014 .

[13] Hennion A., Bossut R., Decarpigny J., Audoly C., Analysis of the scattering of a plane acoustic wave by a periodic elastic structure using the finite element method: Application to compliant tube gratings, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 87, No. 5, pp. 1861-1870, 1990 .

[14] Hladky-Hennion A. C., Decarpigny J. N., Analysis of the scattering of a plane acoustic wave by a doubly periodic structure using the finite element method: Application to Alberich anechoic coatings, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 90, No. 6, pp. 3356-3367, 1991 .

[15] Oertel G., Abele L., *Polyurethane handbook: chemistry, raw materials, processing, application, properties*: Hanser Publishers. Distributed in USA by Scientific and Technical Books, Macmillan, 1985 .