



ناهرنی سازی در برابر امواج صوتی

سفران: دکتر صدیقه بصیرجعفری

دانشیار فیزیک (آکوستیک) دانشگاه صداوسیما

دکترای فیزیک (آکوستیک) از دانشگاه تربیت مدرس

basirjafari@gmail.com

basirjafari@iribu.ac.ir

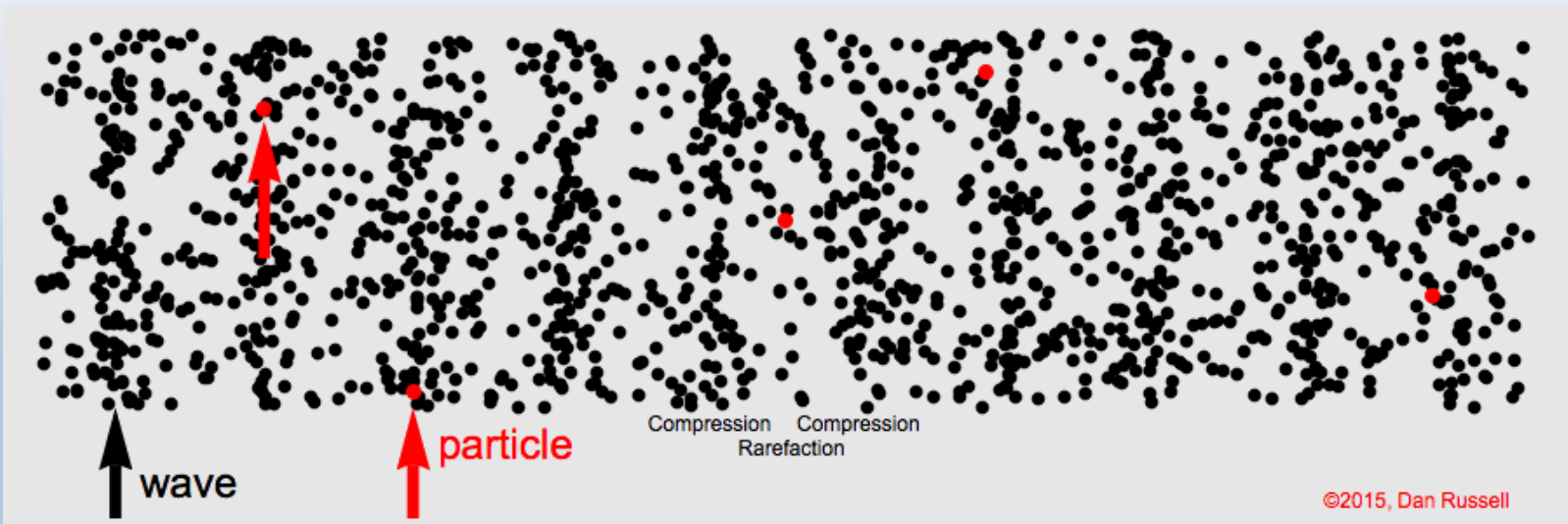
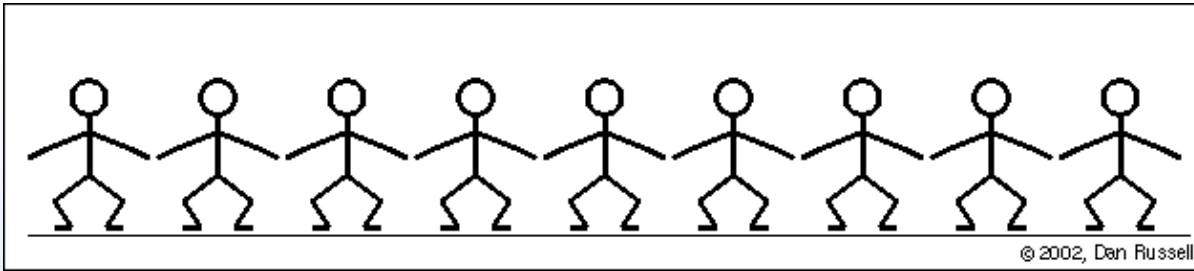
آبان ۱۴۰۳

عنوان مطالب

- تعریف موج صوتی و آکوستیک
- مفهوم نامرئی‌سازی
- نامرئی‌سازی از دیدگاه هندسی
- کاربردهای نامرئی‌سازی آکوستیکی
- نامرئی‌سازی اپتیکی به عنوان مقدمه‌ای بر نامرئی‌سازی آکوستیکی
- تعمیم نامرئی‌سازی اپتیکی به نامرئی‌سازی آکوستیکی
- مروری بر تاریخچه نامرئی‌سازی
- مطالعات انجام شده در نامرئی‌سازی آکوستیکی
- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی
- پیشنهاداتی برای مطالعات آتی
- مراجع

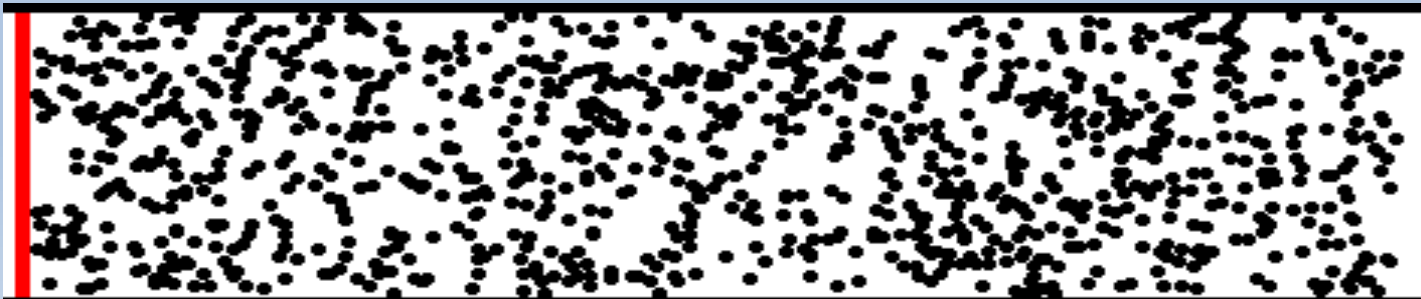
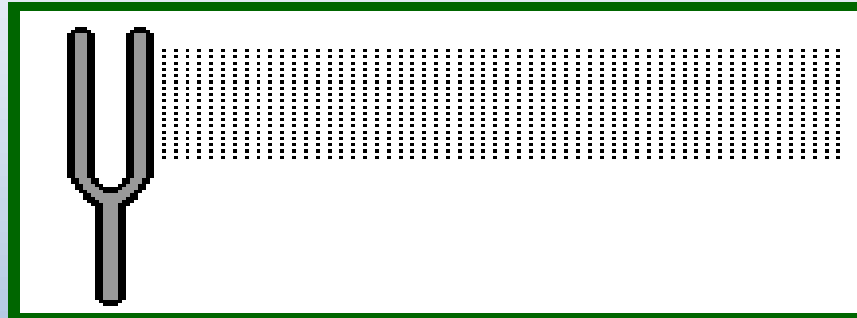
موج صوتی

○ موج صوتی، ناشی از ارتعاش ذرات محیط حول موقعیت تعادل آنها است.



موج صوتی

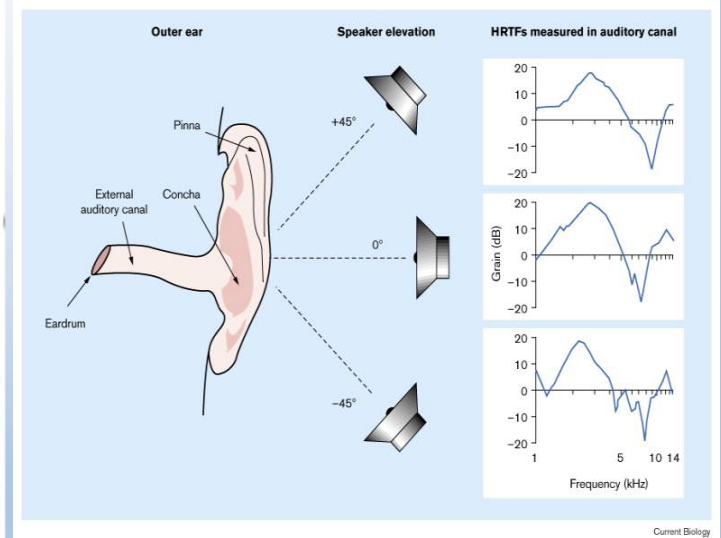
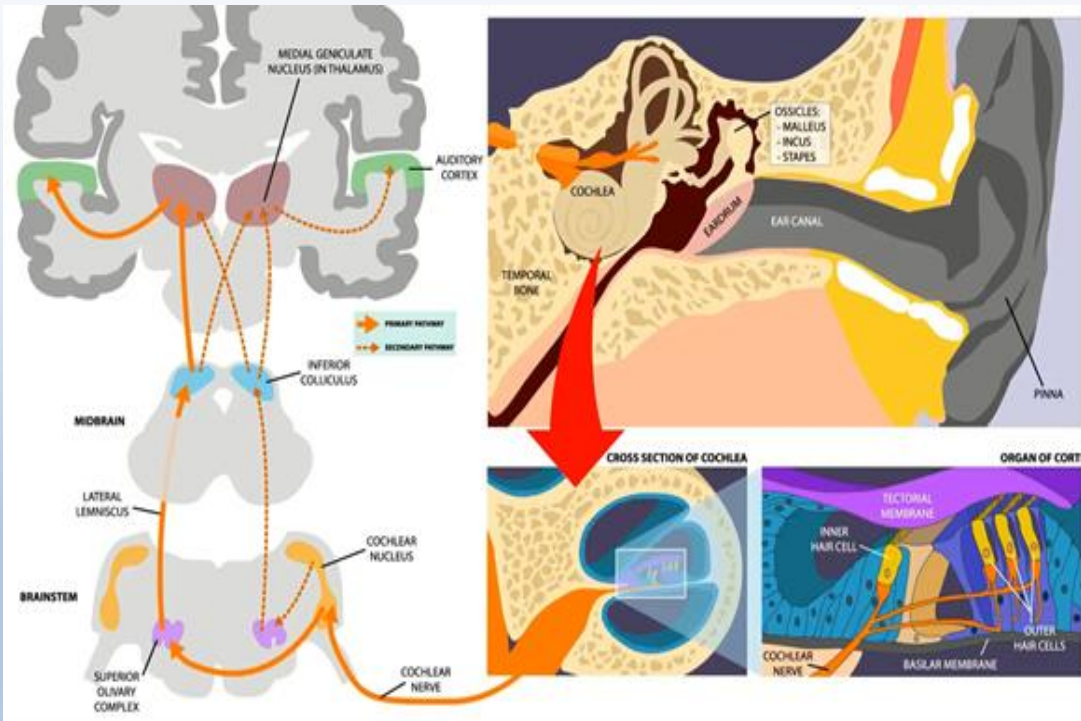
- سیالاتی مانند هوا، دارای چگالی جرمی و خاصیت کشسانی حجمی هستند و بنابراین این ویژگی‌ها مانند سیستم جرم و فنر رفتار می‌کنند.
- حرکت به وجود آمده را ناشی از دو عامل می‌توان دانست، **نیروی بازگرداننده** و **لختی**.
- برای موج صوتی در هوا، نیروی بازگرداننده ناشی از خاصیت کشسانی هواست که از فشرده شدن جلوگیری می‌کند و لختی ناشی از چگالی جرمی است.



تعریف آکوستیک

مطالعه علمی پدیده‌ی صدا، با نام **آکوستیک** (Acoustics) شناخته می‌شود.

علم مطالعه‌ی نحوه‌ی **تولید**، **انتشار** و **دریافت** امواج صدا را آکوستیک گویند.



شاخه‌های مختلف آکوستیک:

زمینه‌ی گسترده‌ی بین رشته‌ای - فیزیک، مهندسی، روانشناسی، گفتار، موسیقی، فیزیولوژی، علوم اعصاب، معماری و غیره.

آکوستیک فیزیکی (*physical acoustics*)

آکوستیک موسیقی (*musical acoustics*)

آکوستیک روانی (*psychoacoustics*)

الکتروآکوستیک (*electroacoustics*)

کنترل نوفه (*noise control*)

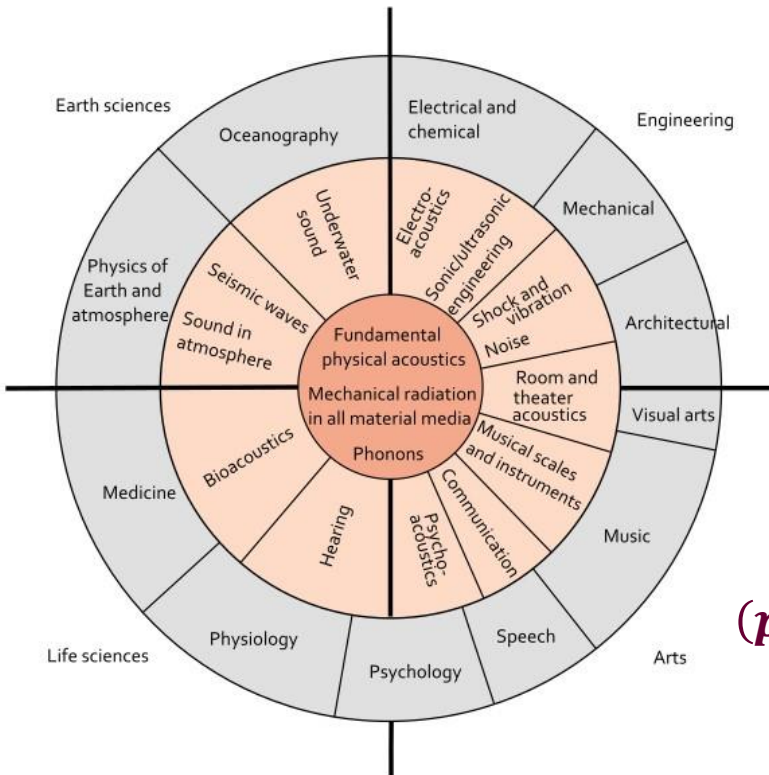
شوک و ارتعاش (*shock and vibration*)

گفتار (*speech*)

آکوستیک زیر آبی (*underwater acoustics*)

آکوستیک فیزیولوژیکی (*physiological acoustics*)

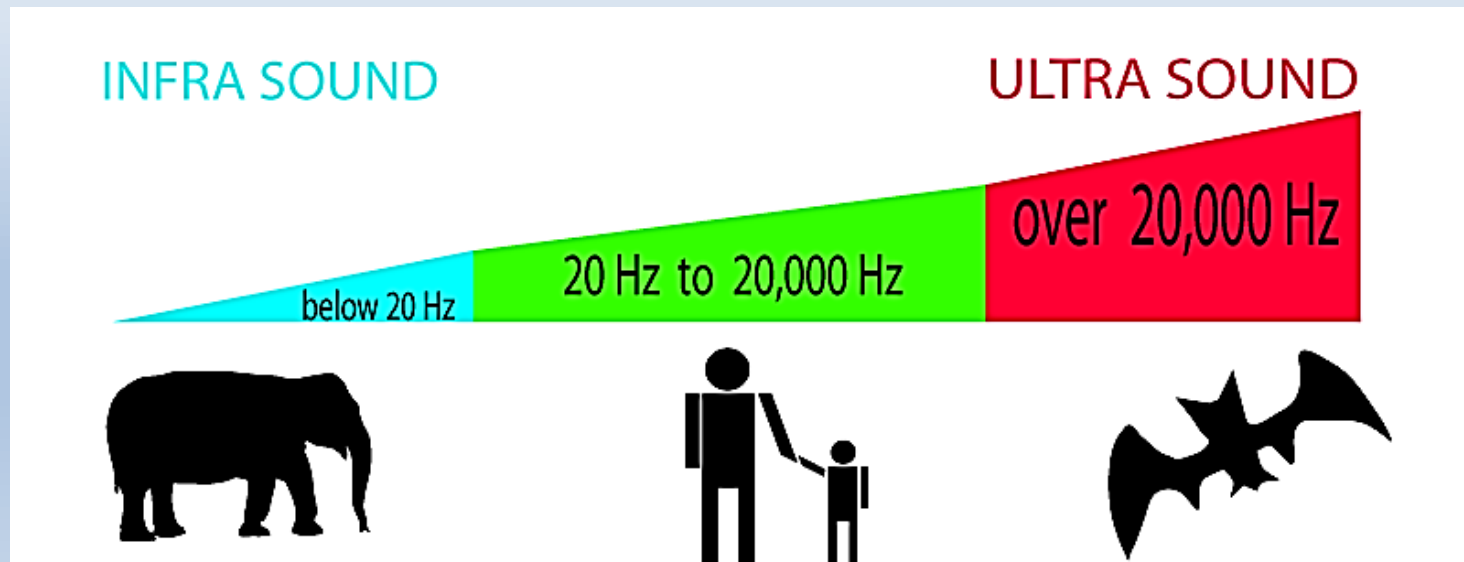
آکوستیک معماری (*architectural acoustics*)



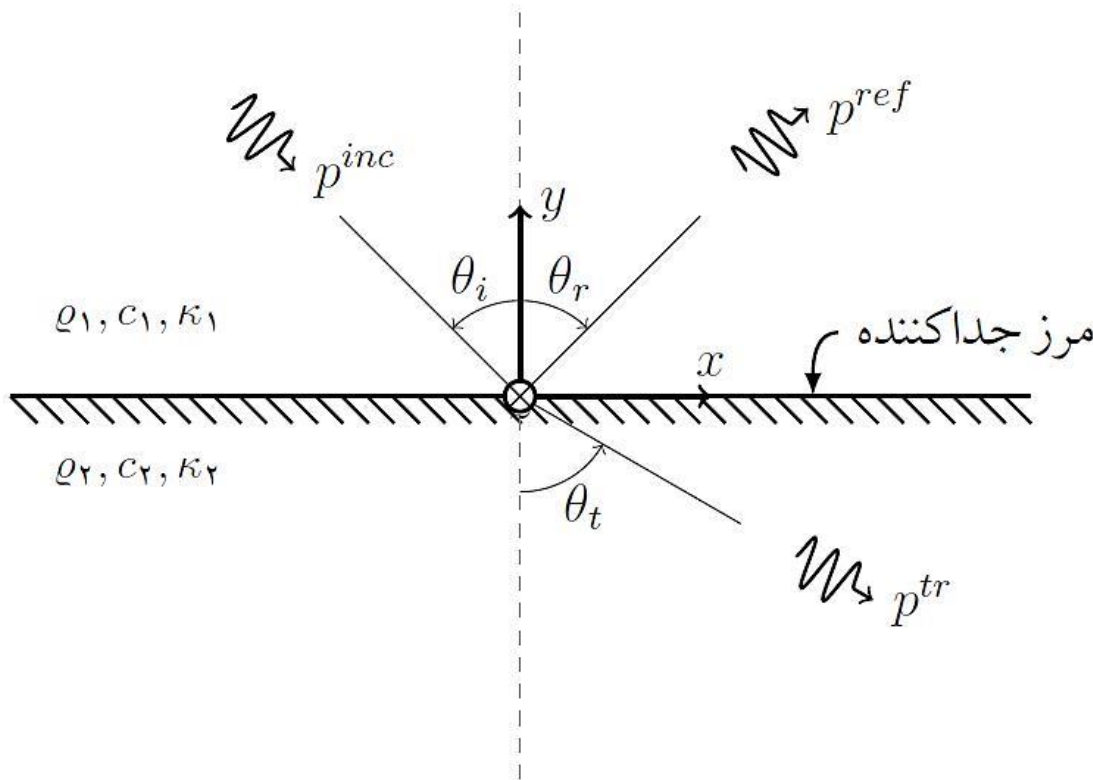
و غیره....

انواع امواج آکوستیکی بر اساس توانایی ادراک بسامدی انسان

- فروصوت (INFRASONIC) $f < 20 \text{ Hz}$
- شنیداری (SOUND) $20 \text{ Hz} < f < 20 \text{ kHz}$
- فراصوت (ULTRASONIC) $20 \text{ kHz} < f < 1 \text{ GHz}$
- ابرصوت (HYPERSONIC) $f > 1 \text{ GHz}$



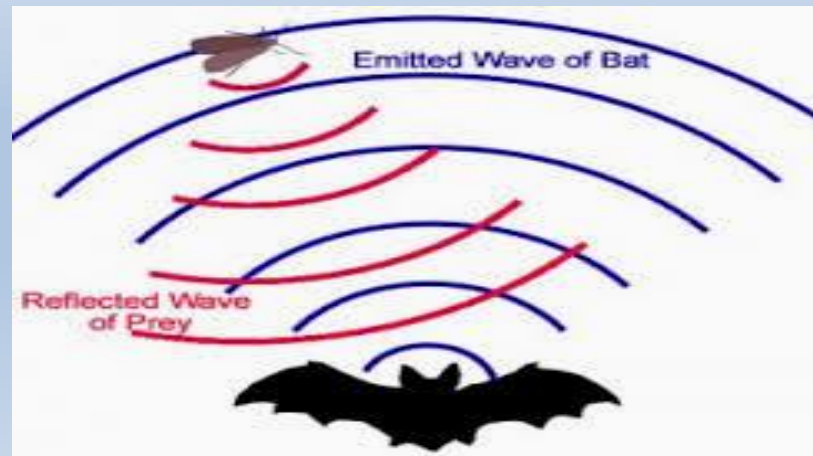
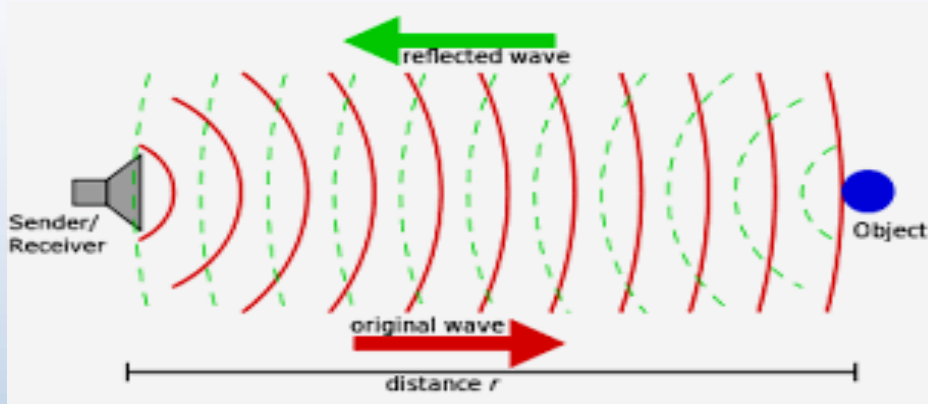
برخورد موج به مرز بین دو محیط



- بازتاب و انتقال موج صوتی تحت فرودی بر مرز جداکننده دو محیط با مشخصه‌های آکوستیکی متفاوت

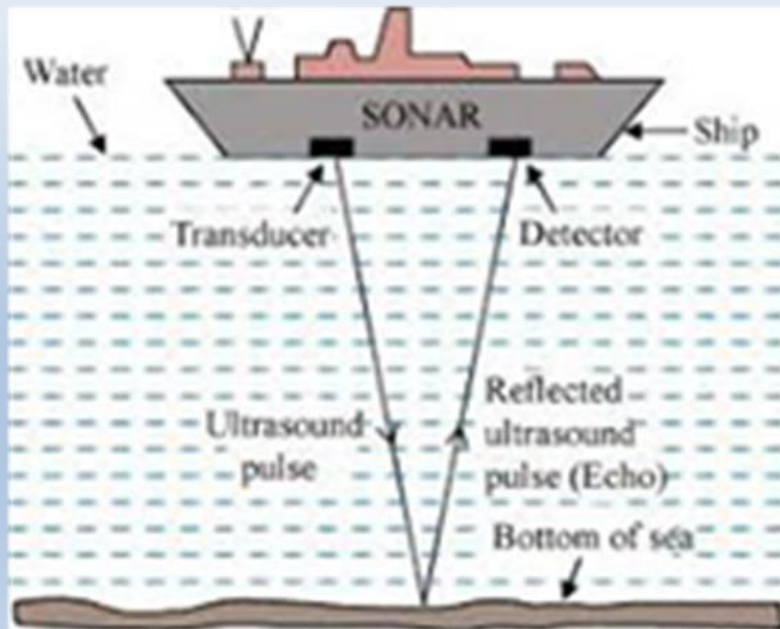
مفهوم نامرئی‌سازی

- به طور کلی، یک جسم را می‌توان به کمک امواج **بازتابی** از آن شناسایی و آشکارسازی کرد.
- این امواج می‌توانند الکترومغناطیس، آکوستیکی، کشسان و یا هر موج دیگری باشند.



کاربرد هوش مصنوعی در تشخیص مانع

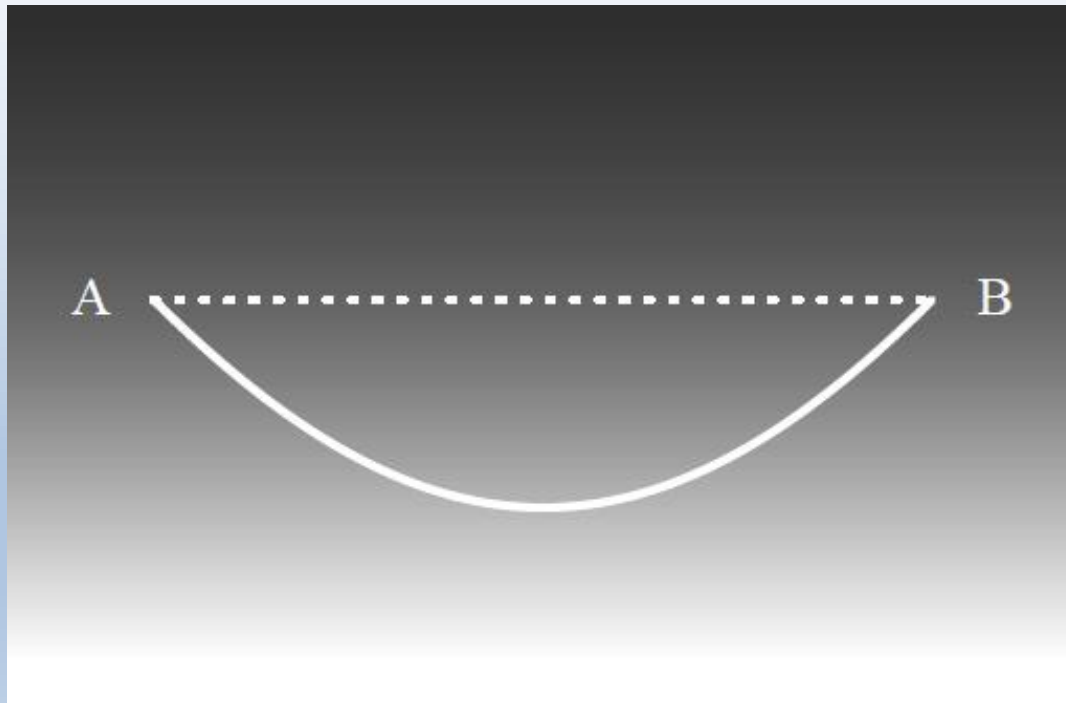
استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین در تهیه و تحلیل بانک اطلاعاتی مناسب برای تشخیص جنس مواد مختلف بر اساس مشخصات موج صوتی بازگشتی همچون **دامنه** و **بسامد**، می‌تواند یکی از موضوعات کاربردی آکوستیک در **سونار** و نیز طراحی **روبات‌های یابنده اجسام** و یا کمک به **نابینایان** باشد.



نامرئی‌سازی از دیدگاه هندسی

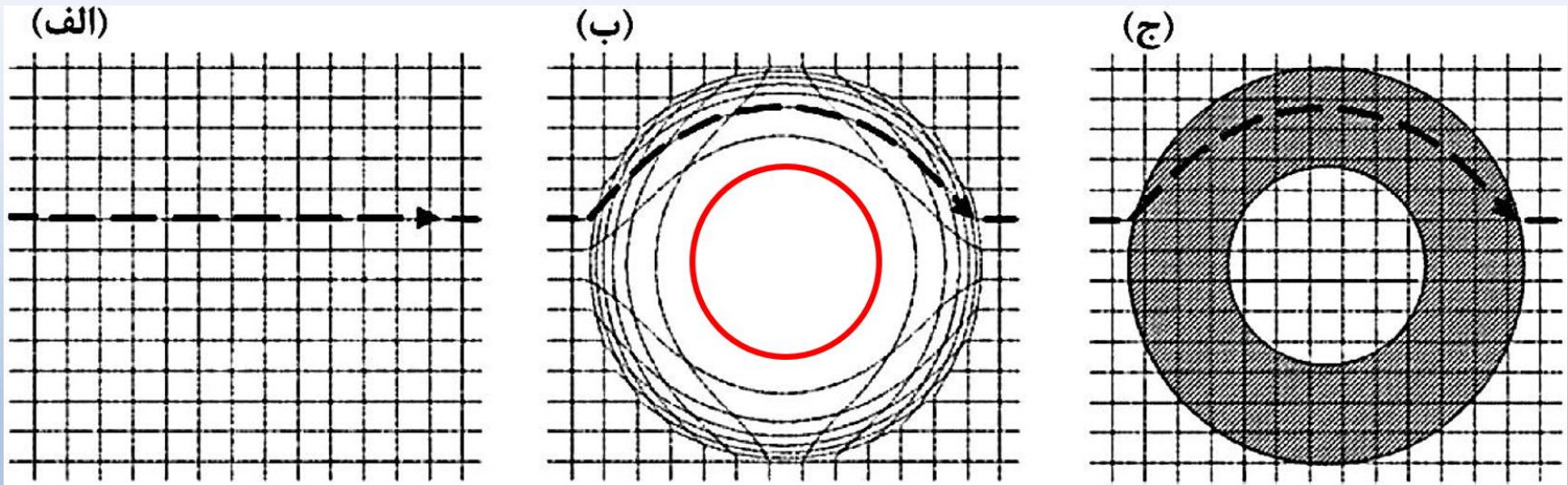
○ موج کوتاهترین فاصله میان دو نقطه را دنبال می‌کند. این فاصله را اصطلاحاً **ژئودزی** می‌نامند [۱].

○ کوتاهترین فاصله‌ای که موج طی می‌کند تابع **مشخصات محیط** است.



نظریه تبدیل محیط

- نظریه تبدیل محیط، این امکان را به وجود می‌آورد تا با کمک **تبدیل مختصات**، بتوان موادی با ویژگی‌های جالب توجه را طراحی کرد.
- نظریه تبدیل محیط برای مسائلی که محادلات اساسی ماکم بر آن مسئله، تحت تبدیلات مکانی **ناوردا** باشند، قابل استفاده است.



$$\varrho^{-1} = \frac{\Lambda \varrho'^{-1} \Lambda^T}{\det \Lambda}, \quad \kappa = \kappa' \det \Lambda$$

$$\Lambda = \left(\Lambda_{i'}^i \right) = \left(\frac{\partial x^i}{\partial x^{i'}} \right)$$

نامرئی‌سازی از دیدگاه هندسی-تبدیل محیط

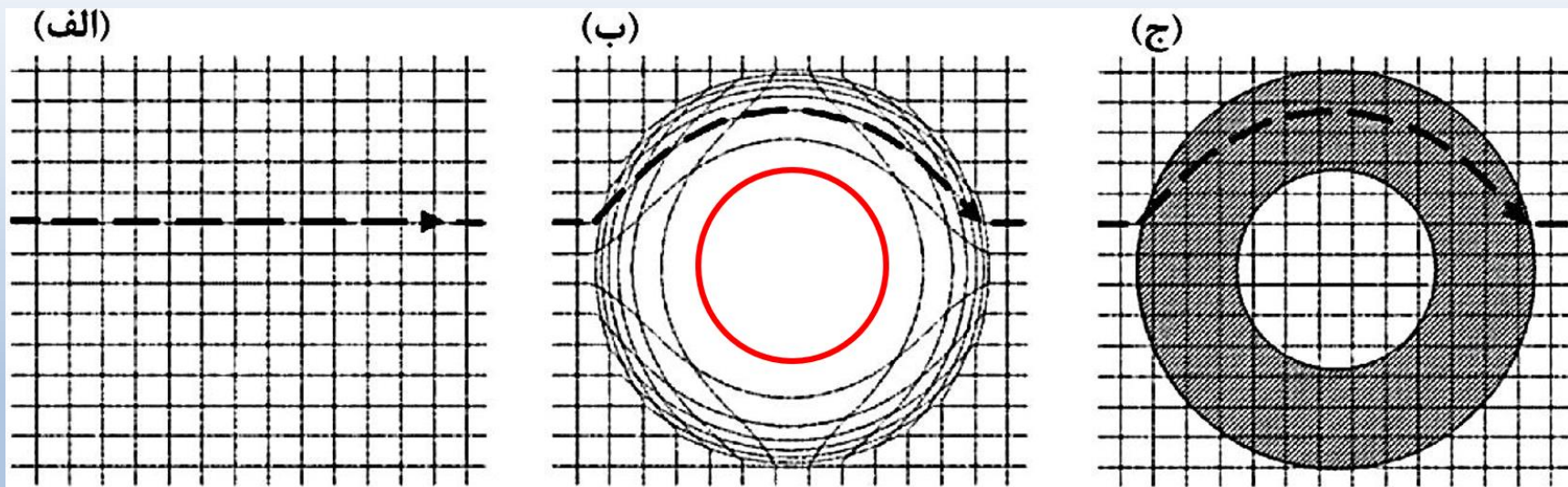
○ برای تحقق نامرئی‌سازی از نظریه **تبدیل محیط** استفاده می‌شود.

○ **هندسهٔ فضا** تابع مشخصه‌های ساختاری یک محیط است، بنابراین با نسبت دادن

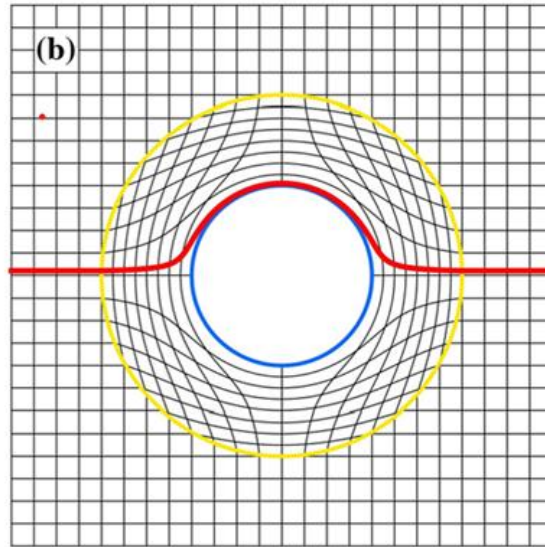
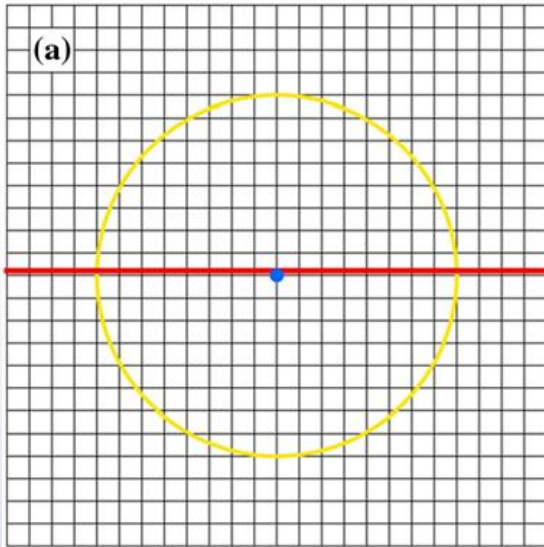
انحنای نشان داده شده در شکل (ب) به مشخصه‌های ساختاری محیط، می‌توان

موج را در مسیر دلخواه طبق شکل (ج) هدایت کرد و به این ترتیب نامرئی‌سازی را

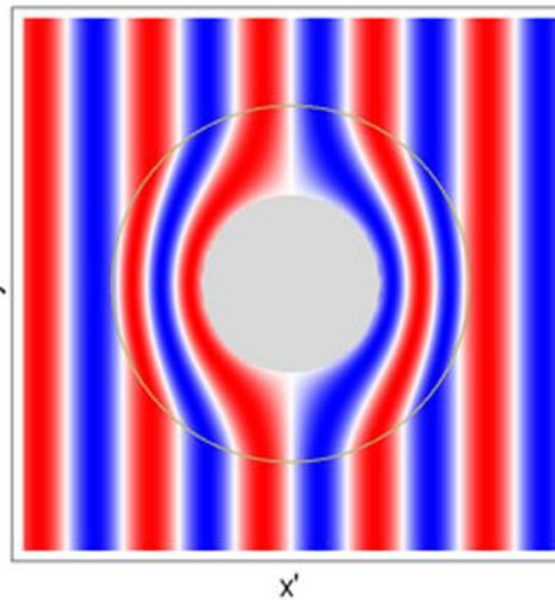
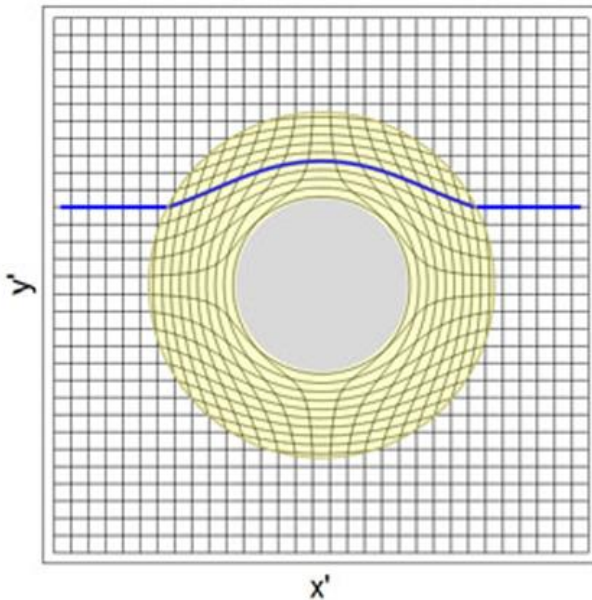
تحقق بخشید.



نمونه تغییر ژئودزی محیط برای نامرئی‌سازی

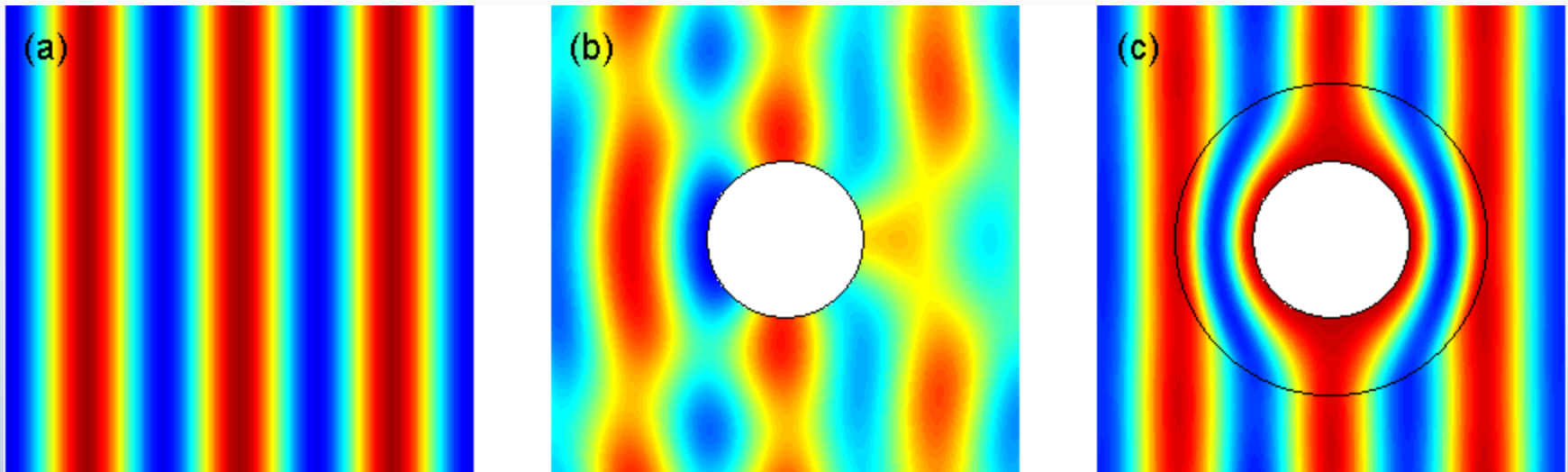


○ با تغییر مشخصات محیط، ژئودزی را می‌توان به گونه‌ای تغییر داد که موج از مسیر دلفواه بگذرد.



عملکرد نامرئی‌سازی در یک نگاه

منظور از نامرئی‌سازی، ایجاد ساختاری در اطراف جسم است که امواج برافورد کننده به آن جسم را به دور آن هدایت کرده و در طرف دیگر جسم، آنها را دوباره بازسازی کند.



محیط مرجع بدون مانع

مانع نامرئی‌نشده

مانع نامرئی‌شده

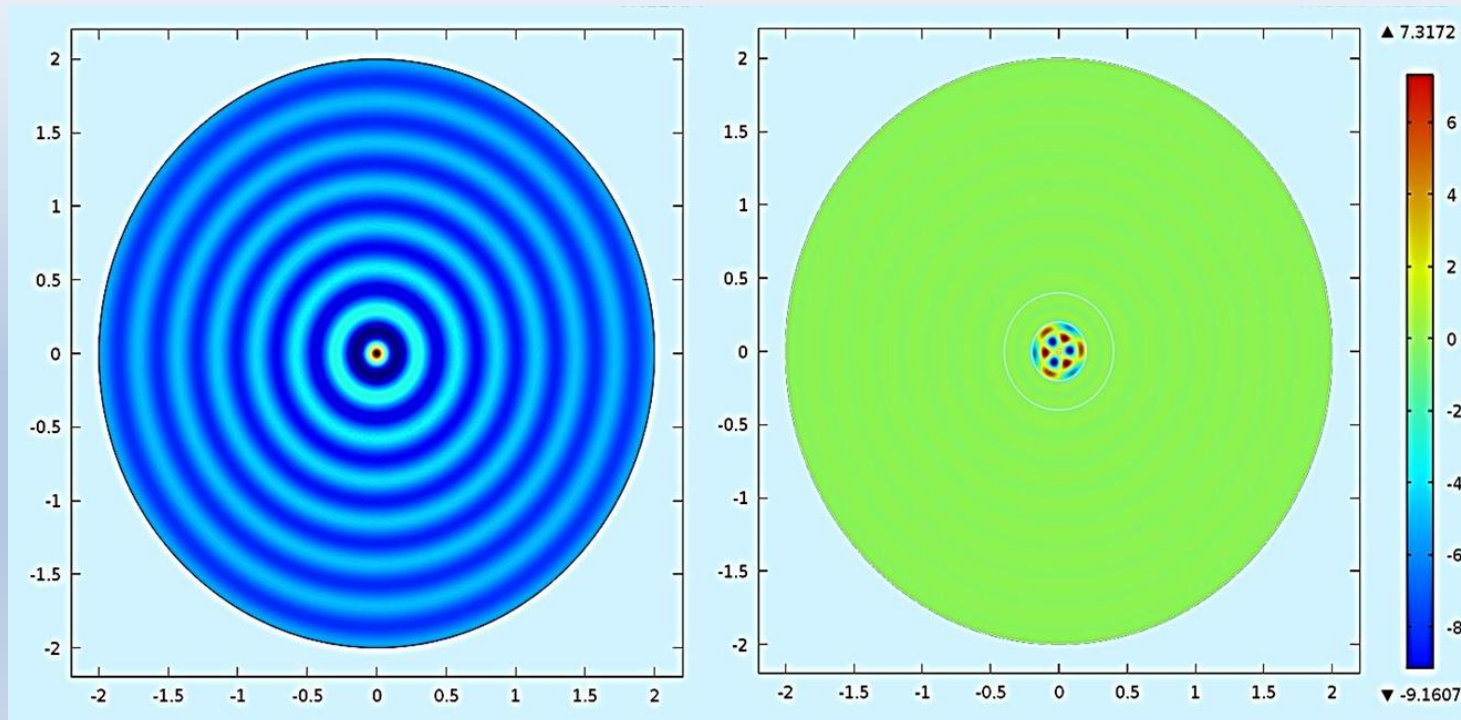
چون امواج از آن جسم منعکس نخواهند شد جسم در مقابل امواج فرودی، نامرئی می‌شود.

کاربردهای نامرئی‌سازی آکوستیکی

○ کنترل و حذف نوفه آکوستیکی در فضاهایی مانند آمفی‌تئاترها، سالن‌های نمایش،

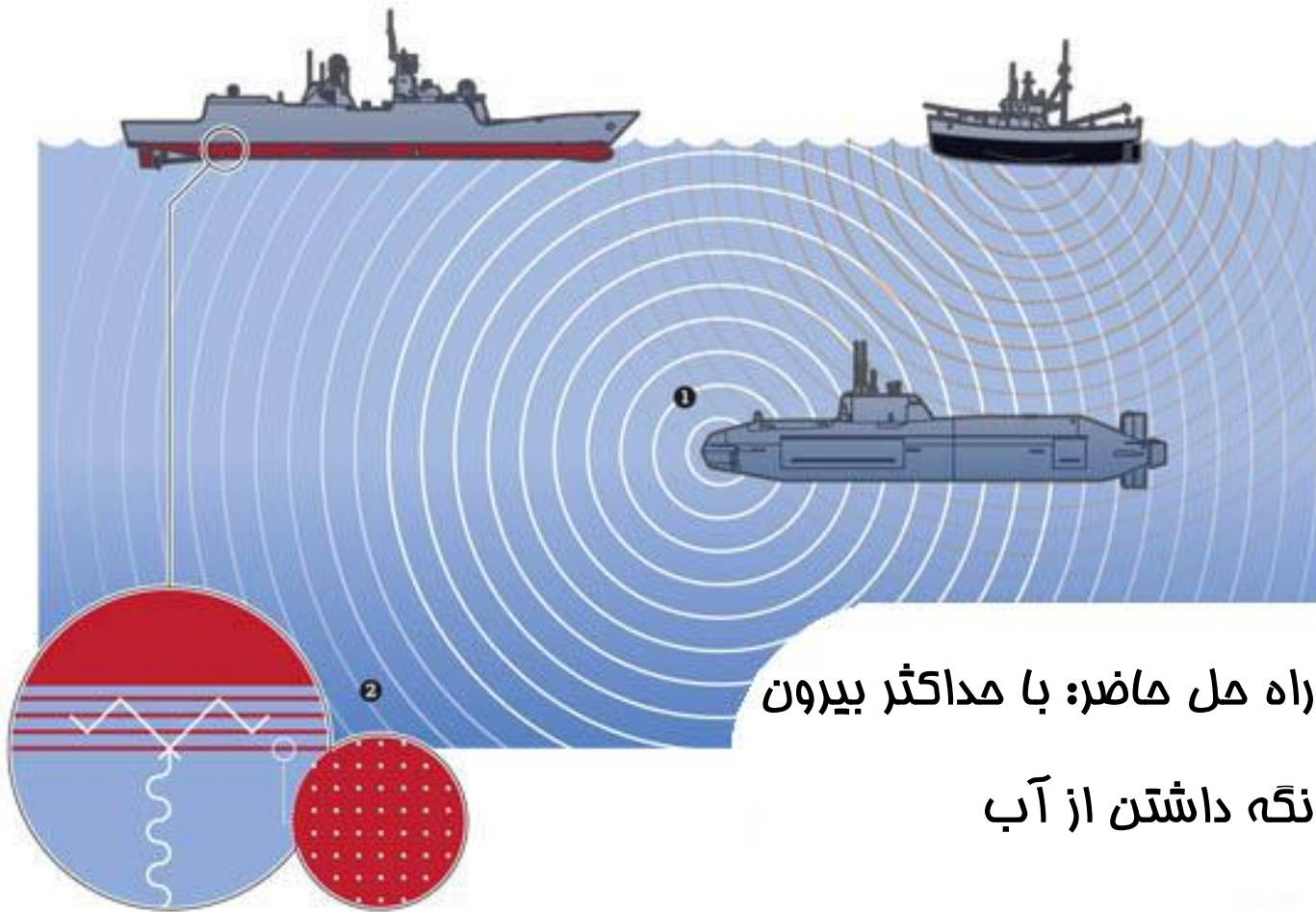
اتاق فرمان و استودیوها در صداوسیما، اتاق شنوایی‌سنجی، کابین تلفن، کابین هواپیما و هر فضایی که بخواهیم از صداهای مزاحم محفوظ بماند.

○ برای حذف صداهای مزاحم وارد شونده به ساختمان‌های نزدیک به بزرگ‌راهها و خیابان‌ها



کاربردهای نامرئی‌سازی آکوستیکی

مخفی کردن کشتی از دید سونار



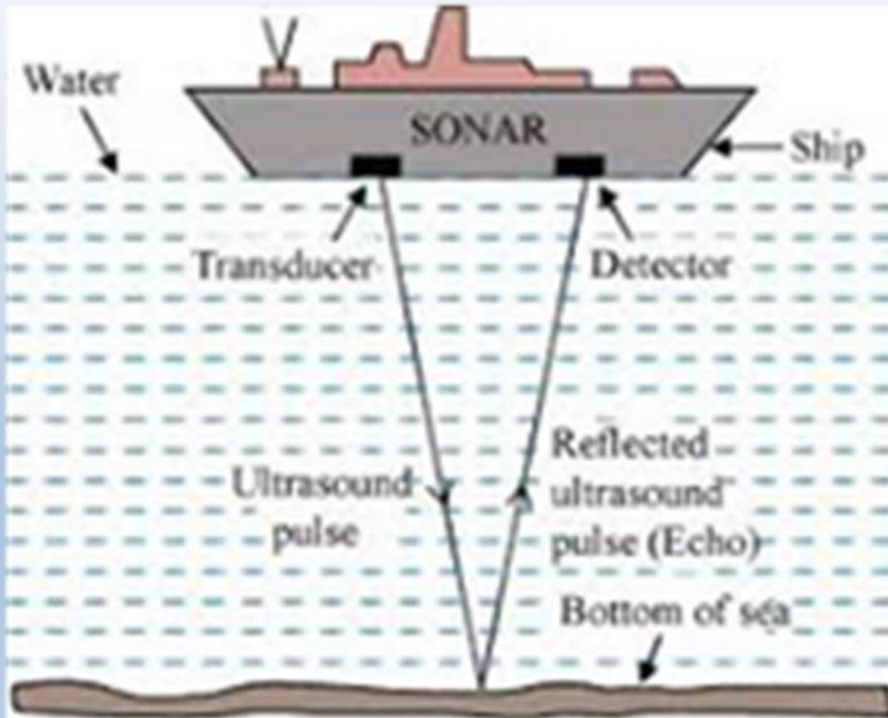
راه حل ماضی: با حداکثر بیرون

نگه داشتن از آب

کاربردهای نامرئی‌سازی آکوستیکی

مخفی کردن زیردریایی و ادوات زیر سطح آب از دید سونار

- در علوه دفاعی و نظامی برای مخفی‌سازی جنگ‌افزارها و تأسیسات حساس نظامی و غیر نظامی از دید سامانه‌های سوناری از نامرئی‌سازی آکوستیکی استفاده می‌شود.



مروری بر تاریخچه نامرئی‌سازی

نامرئی‌سازی، خیال‌پردازی یا واقعیت؟!؟



مروری بر تاریخچه نامرئی‌سازی

نامرئی‌سازی، خیال‌پردازی یا واقعیت؟!؟

- نامرئی‌سازی **اپتیکی** بدون شک یکی از آرزوهای دیرینه بشر است که تا چند دهه پیش به عنوان افسانه‌ای که فقط در رمان‌های علمی تخیلی وجود دارد، تلقی می‌شد.
- هر چند در حال حاضر نیز این کار به طور کامل، به گونه‌ای که در رمان‌ها پرداخته می‌شود، عملی نشده ولی با پیشرفت سریعی که در چند سال اخیر در این زمینه به وجود آمده، تصور تمحوقِ کاملِ آن در آینده نزدیک، دور از انتظار نیست.

مروری بر تاریخچه نامرئی‌سازی

- نامرئی‌سازی از طریق کنترل مسیر انتشار امواج، ابتدا برای امواج اپتیکی و با استفاده از شکل **ناوردایی معادلات ماکسول** مطرح شد.
- ماکسول در سال ۱۹۸۰ در مقاله «خطوط فیزیکی نیرو»، به صورت ضمنی نامرئی‌سازی الکترومغناطیسی را نتیجه گرفته بود [۲].
- به دلیل وجود شباهت‌های بسیار میان امواج آکوستیکی و امواج اپتیکی، همزمان با مطالعات نامرئی‌سازی اپتیکی، نامرئی‌سازی آکوستیکی نیز مورد توجه قرار گرفت و به موازات آن پیشرفت‌هایی در این زمینه حاصل شد.

نامرئی‌سازی اپتیکی به عنوان مقدمه‌ای بر نامرئی‌سازی آکوستیکی

- در سال ۱۹۶۲، پُست نشان داد که معادلات ماکسول تحت تبدیلات مکانی، ناوردا هستند [۳].
- کوهن و وُگولیوس در سال ۱۹۸۴ نشان دادند که می‌توان جسمی با شکل دلقواه در سه بعد را در میدان رسانایی طوری قرار داد که میدان دچار اغتشاش نشود [۴].
- در سال ۱۹۹۶، وارد و پندری از این ویژگی معادلات ماکسول در حل مسائل عددی الکترومغناطیس استفاده کردند [۵].

نامرئی‌سازی اپتیکى به عنوان مقدمه‌ای بر نامرئی‌سازی آکوستیکى

- در سال ۲۰۰۳، گرین‌لیف به کمک نوردایی معادله رسانایی، که خود نتیجه‌ای از نوردایی معادلات ماکسول است، نامرئی‌سازی رسانایی را تحقق بخشید [۶].
- در سال ۲۰۰۶، پندری و همکارش و لیون‌هارت به طور جداگانه نامرئی‌سازی اپتیکى را تحقق بخشیدند [۸ و ۷].

نامرئی‌سازی اپتیکی به عنوان مقدمه‌ای بر نامرئی‌سازی آکوستیکی

○ دستگاه مختصات و تانسور متریک

| دستگاه مختصات | تانسور متریک |
|----------------------------------|---|
| مختصات دکارتی (x, y, z) | $g_{ij} = \text{diag}[1, 1, 1]$ |
| مختصات استوانه‌ای (r, ϕ, z) | $g_{ij} = \text{diag}[1, r^2, 1]$ |
| مختصات کروی (r, θ, ϕ) | $g_{ij} = \text{diag}[1, r^2, r^2 \sin^2 \theta]$ |

○ روابط مورد نیاز در تبدیل آکوستیکی، به کمک تشابه موجود میان معادله موج آکوستیکی و معادله رسانایی بدست می‌آید. معادله رسانایی، خود نتیجه‌ای از معادلات ماکسول است.

نامرئی‌سازی اپتیکی به عنوان مقدمه‌ای بر نامرئی‌سازی آکوستیکی

- لاپلاسیان در یک دستگاه مختصات دلفواه با تانسور متریک g^{ij} ،

$$\nabla^2 \psi = \nabla \cdot (\nabla \psi) = \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\sqrt{g} g^{ij} \frac{\partial \psi}{\partial x_j} \right).$$

- g دترمینان تانسور متریک است.
- معادله رسانایی در یک مختصات دلفواه،

$$\nabla \cdot [\sigma \nabla V] = f \Rightarrow \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\sqrt{g} \sigma g^{ij} \frac{\partial V}{\partial x_j} \right) = f$$

که در آن V پتانسیل الکتریکی، σ ضریب هدایت الکتریکی و f جمله توصیف کننده منبع است.

نامرئی‌سازی اپتیکی به عنوان مقدمه‌ای بر نامرئی‌سازی آکوستیکی

| | | |
|---|--|-----------------------|
| فضای فیزیکی | فضای مجازی | فضا |
| (x^1, x^2, x^3) | $(x^{1'}, x^{2'}, x^{3'})$ | مولفه‌های مختصات |
| $\Gamma = (\gamma_{ij})$ | $G' = (g'_{ij'})$ | تانسور متریک |
| $\gamma = \det \Gamma$ | $g' = \det G'$ | دترمینان تانسور متریک |
| $\frac{1}{\sqrt{\gamma}} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\sqrt{\gamma} \sigma \gamma^{ij} \frac{\partial V}{\partial x_j} \right) = f$ | $\frac{1}{\sqrt{g'}} \frac{\partial}{\partial x_{i'}} \left(\sqrt{g'} \sigma' g'^{ij'} \frac{\partial V}{\partial x_{j'}} \right) = f'$ | معادله رسانایی |

نامرئی‌سازی اپتیکی به عنوان مقدمه‌ای بر نامرئی‌سازی آکوستیکی

- با انتقال معادله رسانایی از فضای مجازی به فضای فیزیکی و بازنویسی آن، نتیجه زیر حاصل می‌شود:

$$\frac{1}{\sqrt{\gamma}} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\sqrt{\gamma} \sigma \gamma^{ij} \frac{\partial V}{\partial x_j} \right) = f,$$

$$\Lambda = (\Lambda_{i'}^i) = \left(\frac{\partial x^i}{\partial x^{i'}} \right)$$

$$\sigma = \frac{\sqrt{g'}}{\sqrt{\gamma}} \frac{\Lambda \mathbf{G}'^{-1} \sigma' \Lambda^T}{\det \Lambda} \Gamma,$$

$$f = \frac{\sqrt{g'}}{\sqrt{\gamma}} \frac{f'}{\det \Lambda}.$$

تعمیم نامرئی‌سازی اپتیکی به نامرئی‌سازی آکوستیکی

○ شباهت معادله رسانایی و معادله موج آکوستیکی

$$\nabla \cdot [\sigma \nabla V] = f \qquad \nabla \cdot (\rho^{-1} \nabla p) + \frac{\omega^2}{\kappa} p = 0$$

$$[V, \sigma, f] \leftrightarrow [p, \rho^{-1}, -(\omega^2/\kappa)]$$

○ چگالی جرمی و مدول حجمی نامرئی‌ساز آکوستیکی

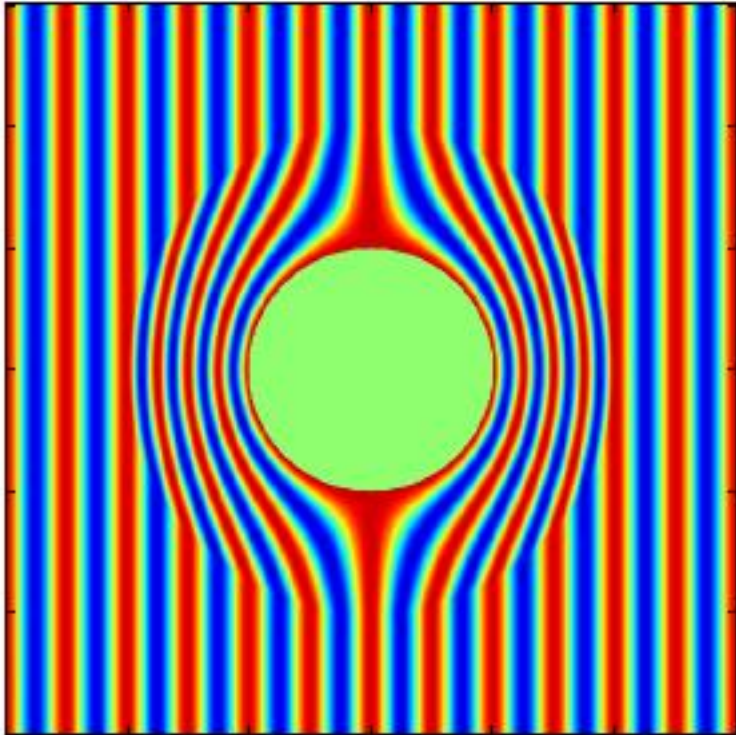
$$\rho^{-1} = \frac{\sqrt{g'}}{\sqrt{\gamma}} \frac{\Lambda \mathbf{G}'^{-1} \rho'^{-1} \Lambda^T}{\det \Lambda} \Gamma,$$
$$\kappa = \kappa' \frac{\sqrt{\gamma}}{\sqrt{g'}} \det \Lambda .$$

نامرئی‌سازی آکوستیکی

- میل به تحقق نامرئی‌سازی آکوستیکی در یک دههٔ اخیر به طور قابل ملاحظه‌ای در میان محققان رشته‌های مختلف گسترش یافته است.
- دلیل این افزایش توجه را می‌توان در پیشرفت‌های بدست آمده در این زمینه، جستجو کرد.
- از جملهٔ این پیشرفت‌ها می‌توان به فرمول‌بندی تئوری ماکم در این حوزه و اثبات درستی آن به کمک روش‌های عددی و همچنین به پیشرفت سریع **فرامواد** اشاره کرد.
- یک نامیه را می‌توان با پوشاندن آن با فرامواد، که توانایی تغییر مسیر انتشار امواج آکوستیکی را دارند، از نظر آکوستیکی نامرئی ساخت.

انواع نامرئی‌سازی

- نوع اول که در آن، جسم مورد نظر در فضای آزاد قرار می‌گیرد و موج از همه جهتها می‌تواند به آن برخورد کند. به این نوع نامرئی‌سازی، **تمام‌فضا** گفته می‌شود.



- جالب‌ترین ویژگی پوشش‌های نامرئی‌سازی، مخفی شدن جسم از دید ناظر خارجی در تمام جهات است.

Full space invisibility

انواع نامرئی‌سازی

○ در نوع دوم که به آن **نیم‌فضا** گفته می‌شود، جسم مورد نظر بر روی یک سطح قرار

می‌گیرد و تابش موج فقط از بالای جسم است.

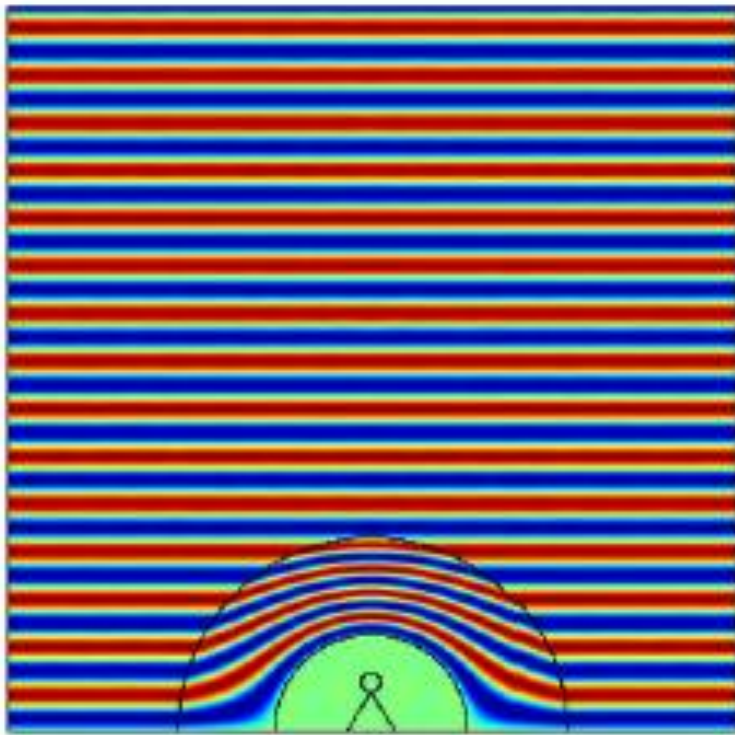
○ بیش‌ترین کاربرد این نامرئی‌سازها برای اجسام

قرار گرفته روی سطح هستند.

○ نامرئی‌ساز نیم‌فضا باید بتواند پراکندگی امواج

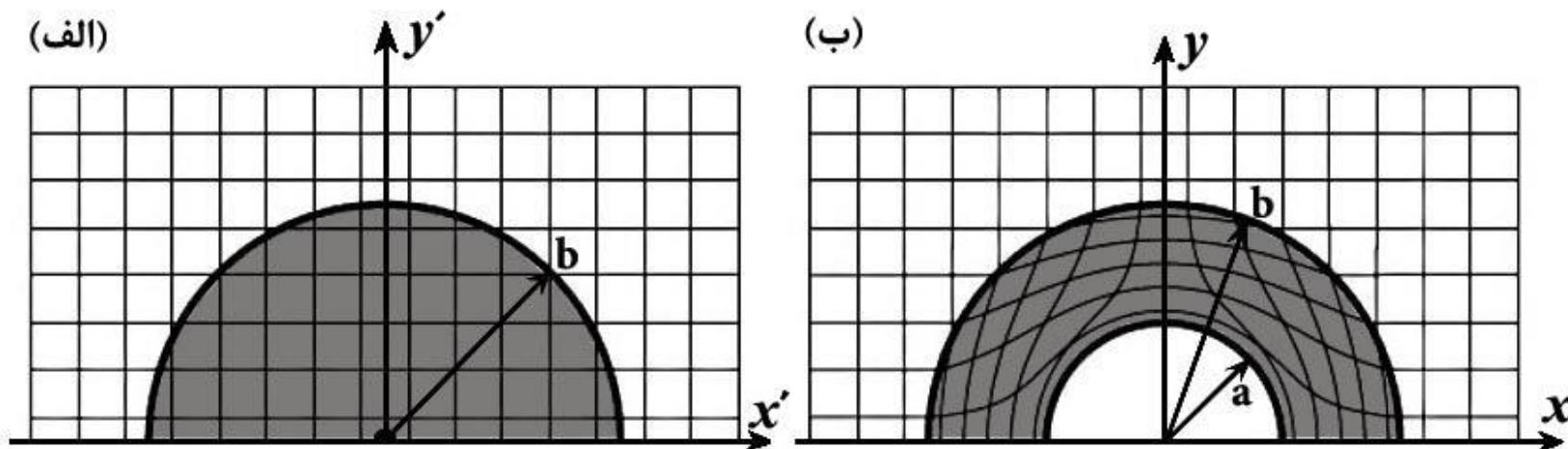
از جسم را حذف کند به گونه‌ای که گویا جسمی

روی سطح قرار نگرفته است.

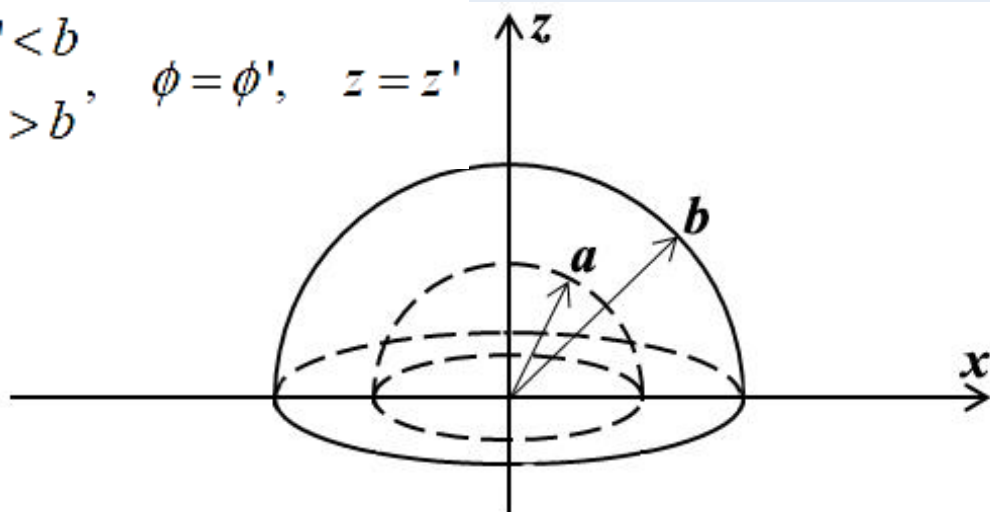


Half space invisibility

مطالعات انجام شده در نامرئی‌سازی آکوستیکی- نامرئی‌ساز نیم‌فضای نیم‌کروی

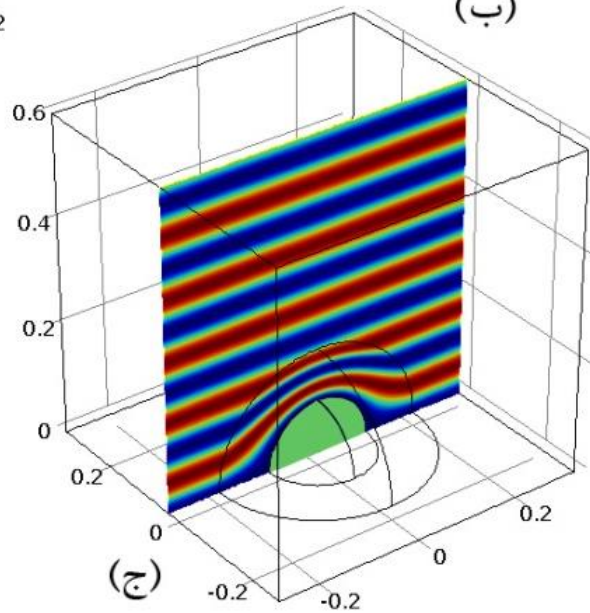
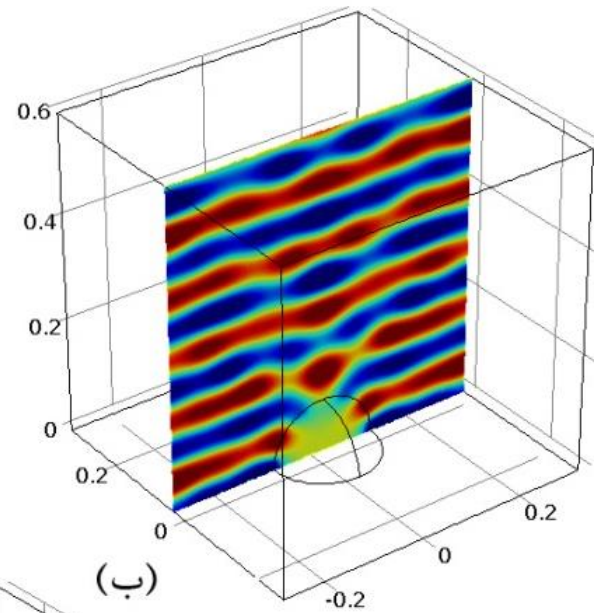
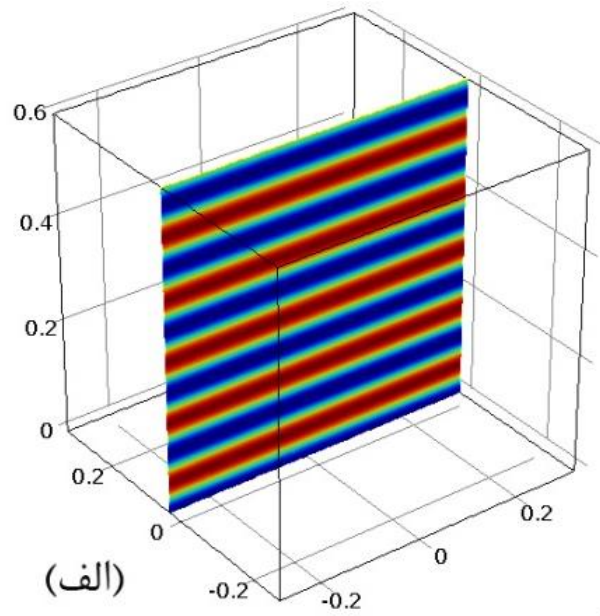


$$r = \begin{cases} r'(b-a)/b+a, & r' < b \\ r', & r' > b \end{cases}, \quad \phi = \phi', \quad z = z'$$



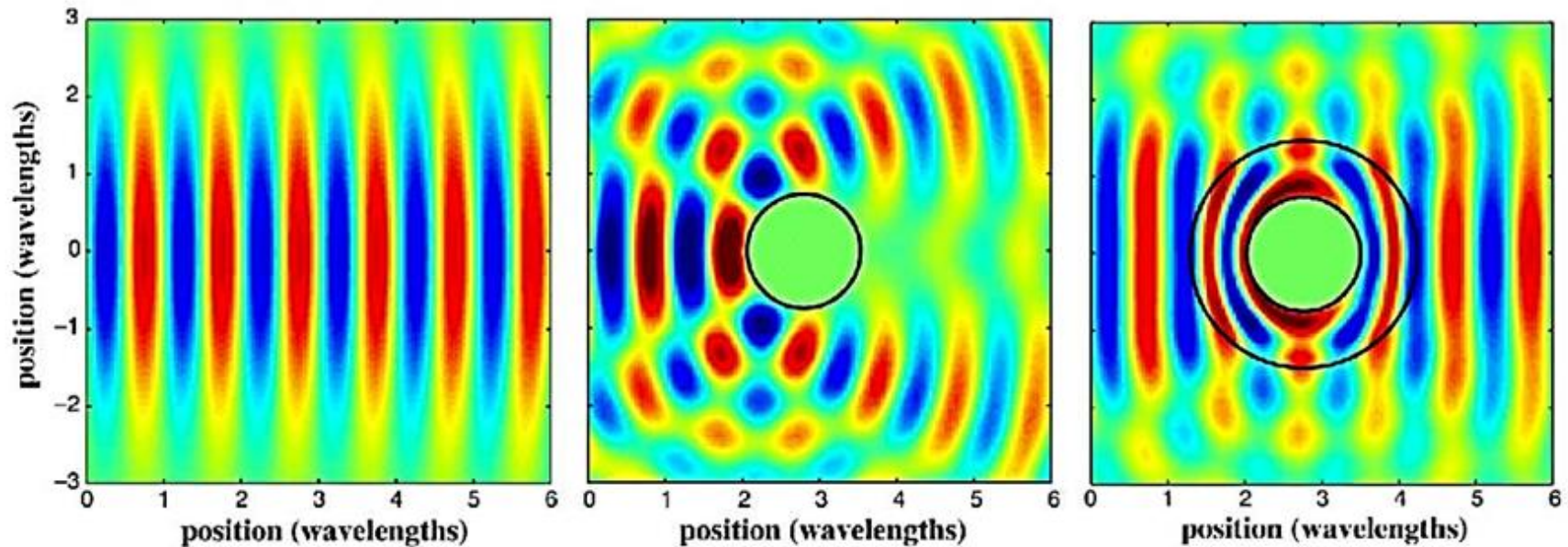
$$\bar{\rho} = \frac{b-a}{b} \text{diag} \left[\left(\frac{r}{r-a} \right)^2, 1, 1 \right] \rho_b, \quad \bar{\kappa} = \left(\frac{b-a}{b} \right)^2 \left(\frac{r}{r-a} \right)^2 \kappa_b$$

عملکرد نامرئی ساز نیم کره‌ی



مطالعات انجام شده در نامرئی‌سازی آکوستیکی

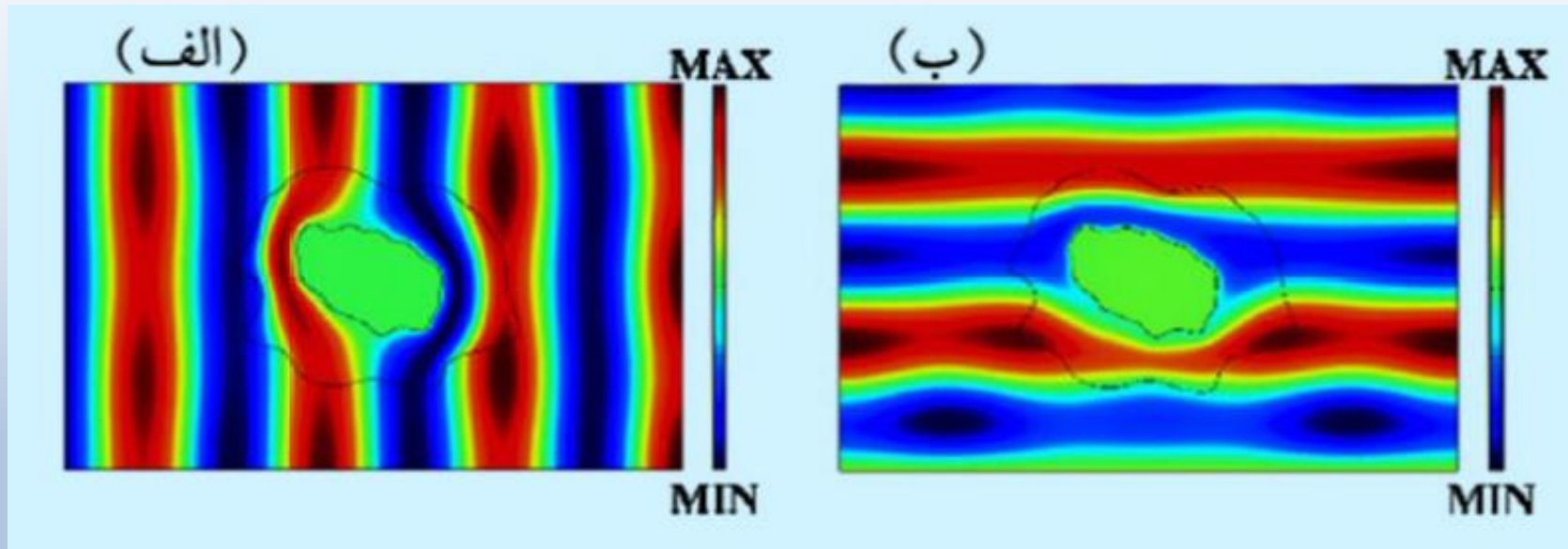
- کامر و همکارانش با استفاده از تشابه امواج آکوستیکی و امواج الکترومغناطیسی، رابطه‌ای برای تبدیل آکوستیکی در هندسه دو بعدی پیشنهاد دادند [۹].



مطالعات انجام شده در نامرئی‌سازی آکوستیکی

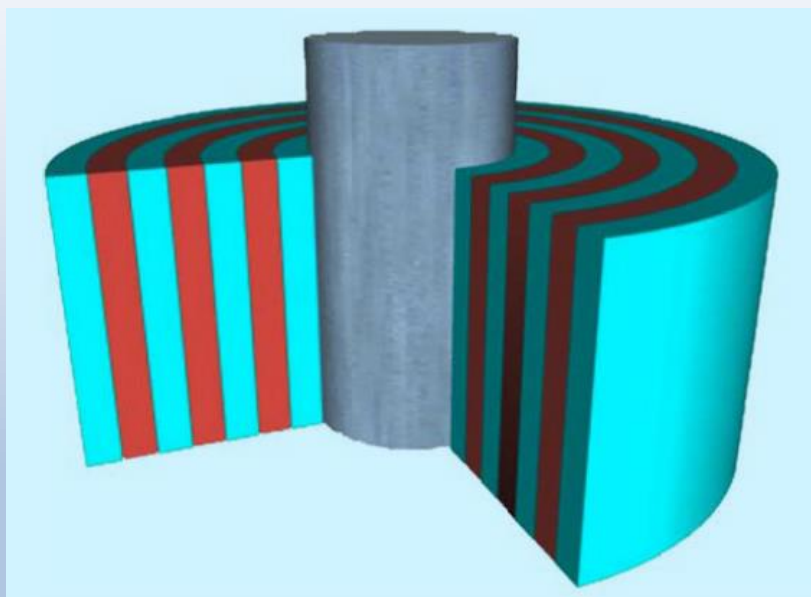
○ پوشش نامرئی‌سازی با شکل دلخواه به کمک روش‌های عددی [۱۰]

$$\frac{\partial^2 x'_i}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 x'_i}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 x'_i}{\partial x_3^2} = 0, \quad i = 1, 2, 3; \quad x'_1, x'_2, x'_3 \in \Omega$$

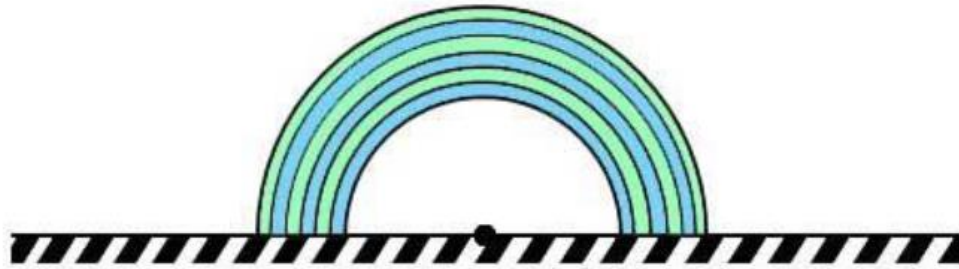


مطالعات انجام شده در نامرئی‌سازی آکوستیکی

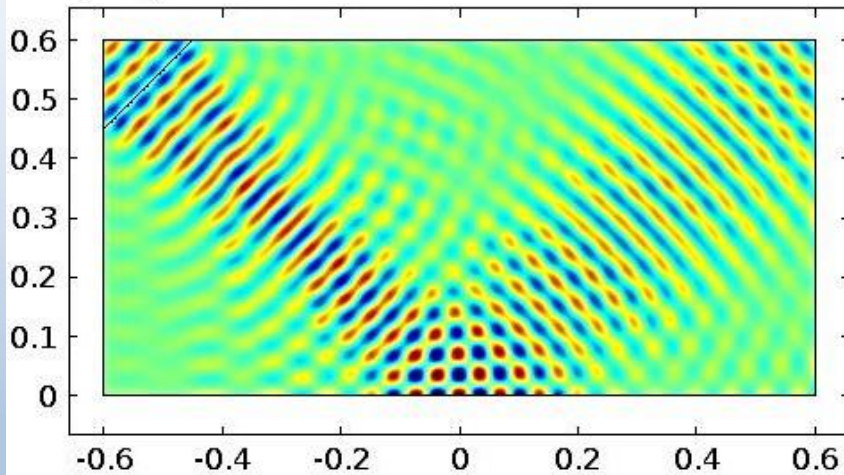
- تورنت و همکارش براساس مدل ارائه شده توسط کامر ساختاری از کامپوزیت چندلایه و ساخته شده از دو نوع فراماده آکوستیکی همسانگرد پیشنهاد دادند که شرایط لازم برای نامرئی‌سازی آکوستیکی را دقیقاً برآورده می‌سازد [۱۱].



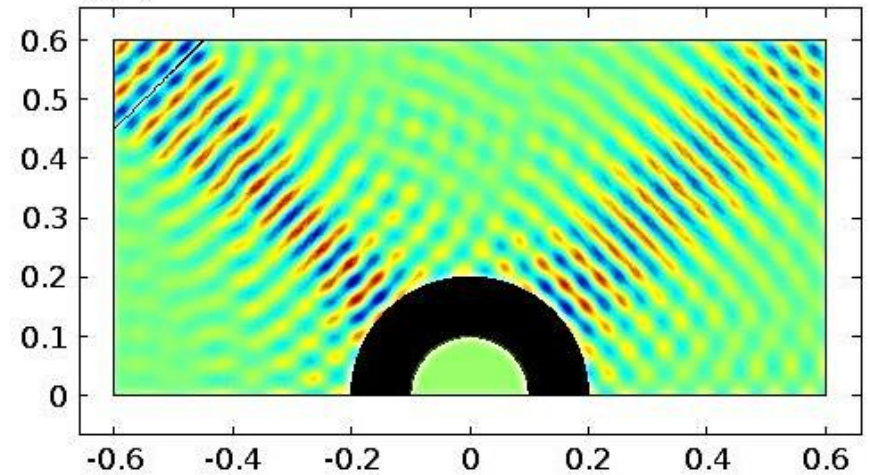
عملکرد نامرئی‌سازی نیم‌دایره‌ای



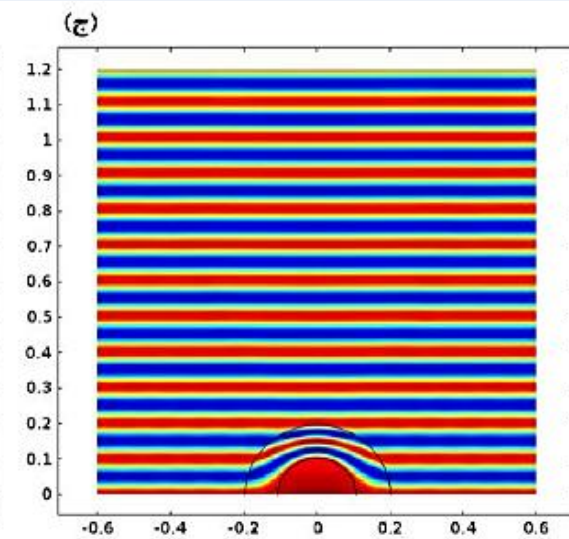
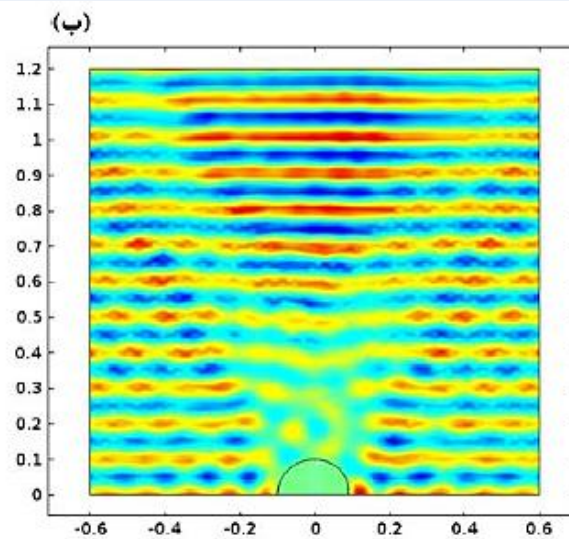
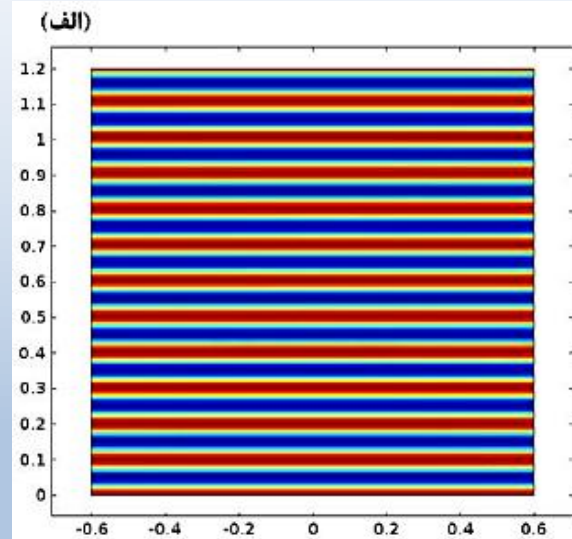
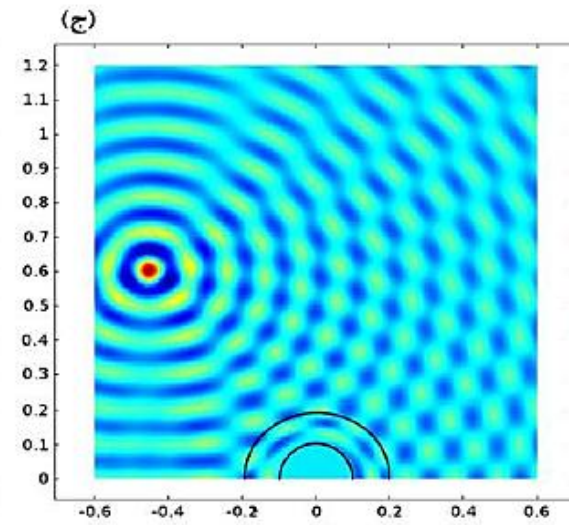
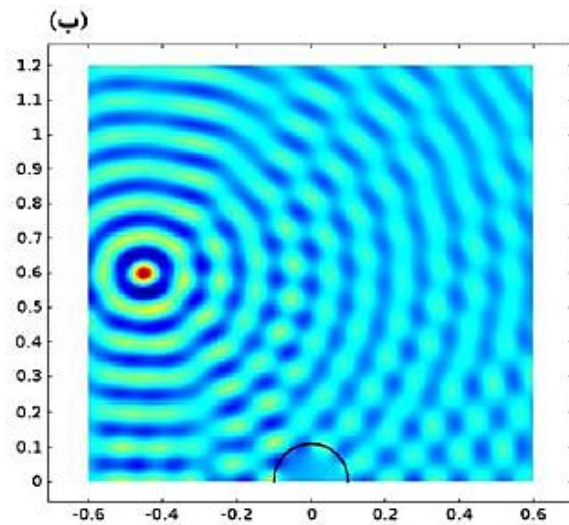
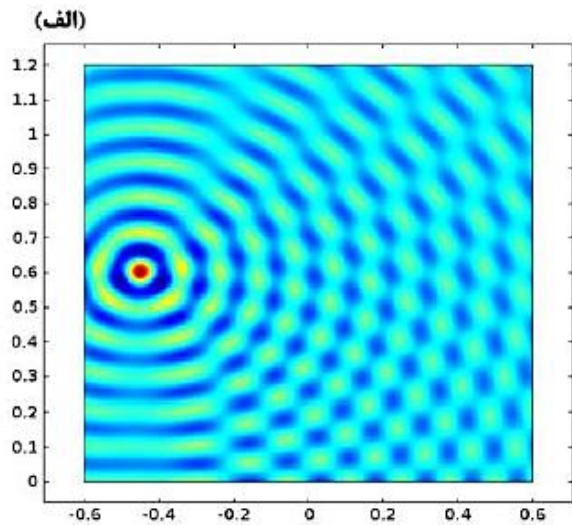
(الف)



(ب)

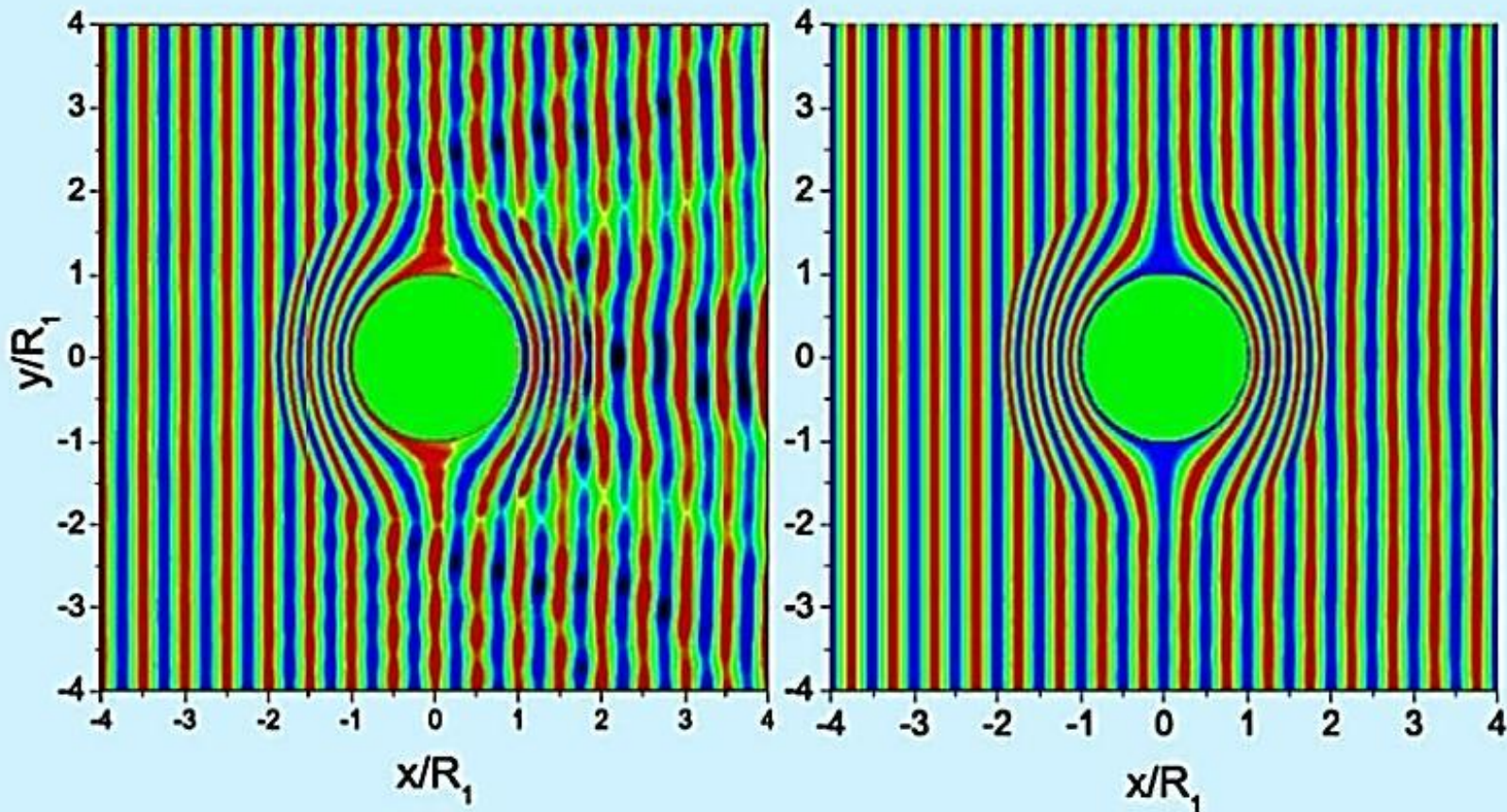


○ بررسی عملکرد نامرئی‌سازی نیم‌دایره‌ای تشکیل شده از ۸۰ لایه برای موج فرودی مایل.



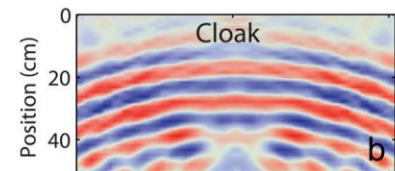
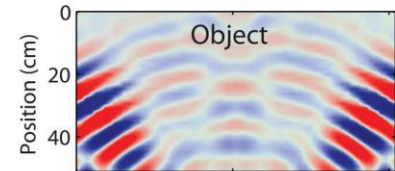
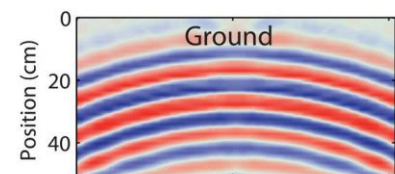
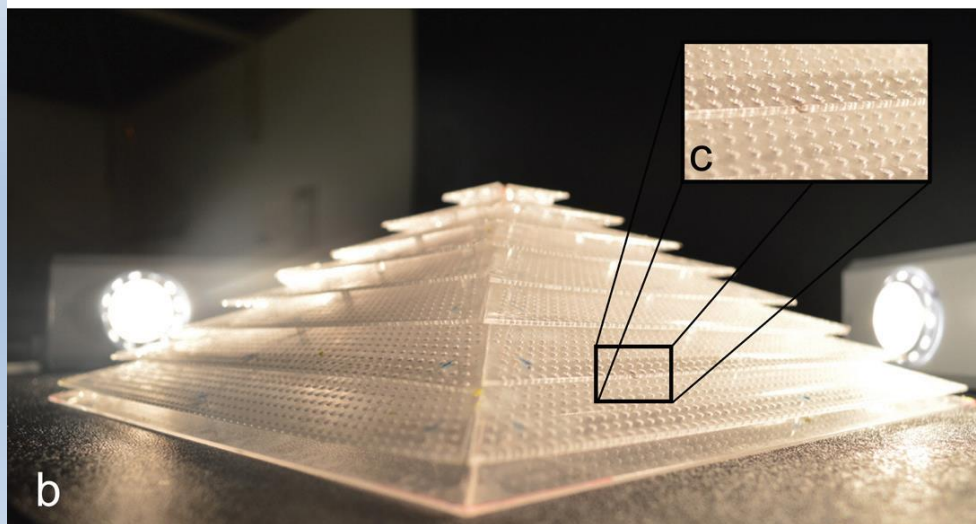
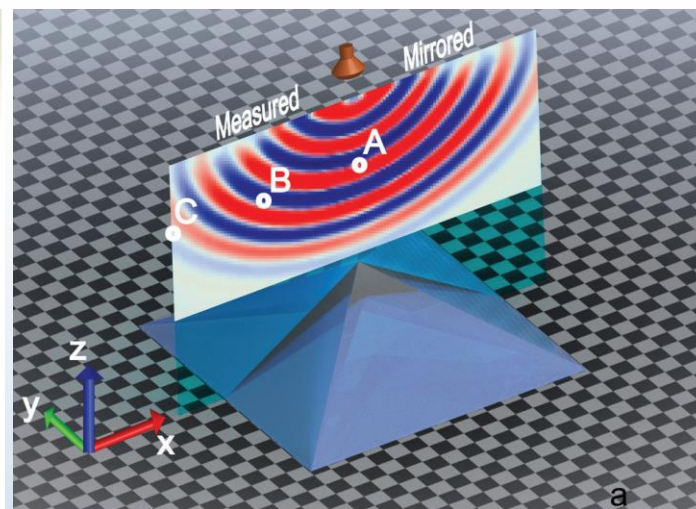
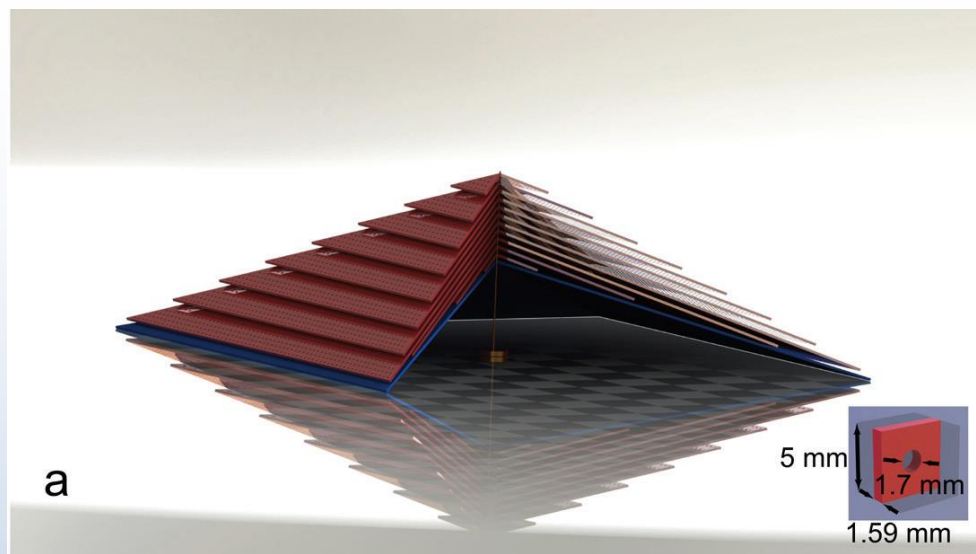
مطالعات انجام شده در نامرئی‌سازی آکوستیکی

○ بهتر شدن عملکرد نامرئی‌ساز چندلایه با افزایش تعداد لایه‌ها



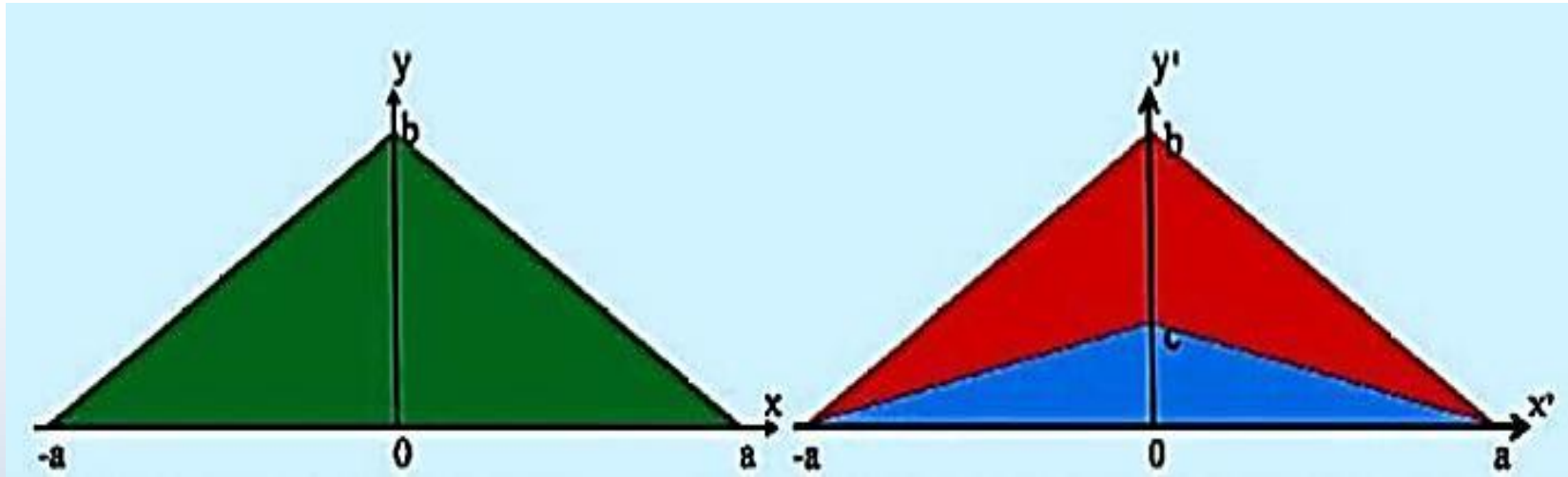
مطالعات انجام شده در نامرئی‌سازی آکوستیکی

○ فرش نامرئی‌ساز آکوستیکی [۱۲]



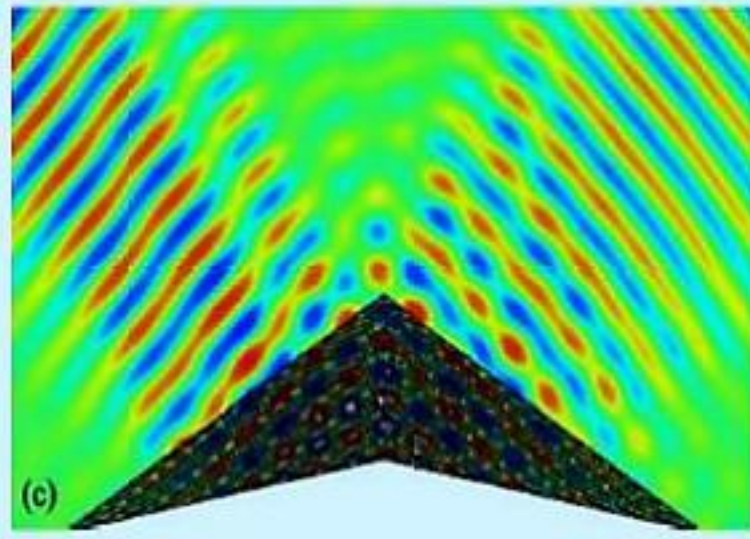
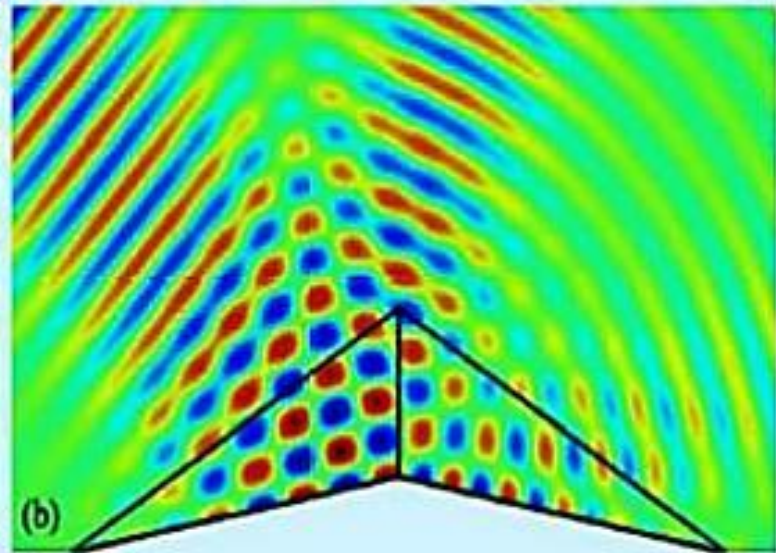
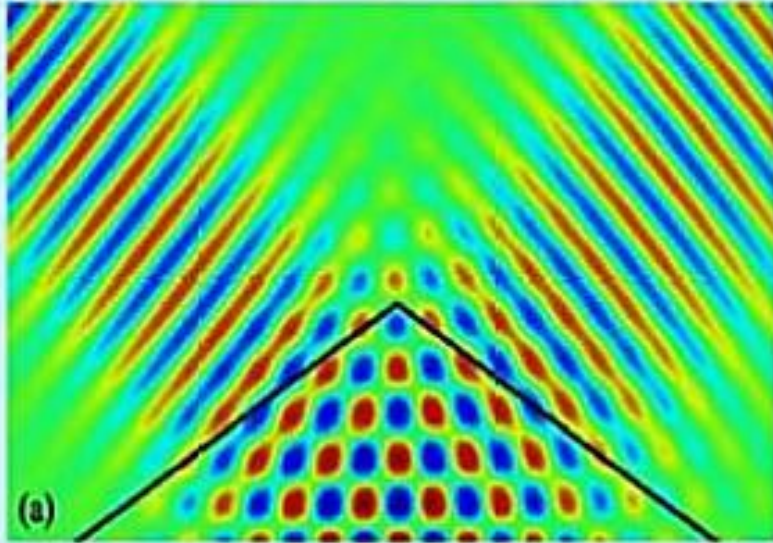
مطالعات انجام شده در نامرئی‌سازی آکوستیکی

○ فرش نامرئی‌ساز آکوستیکی [۱۲]



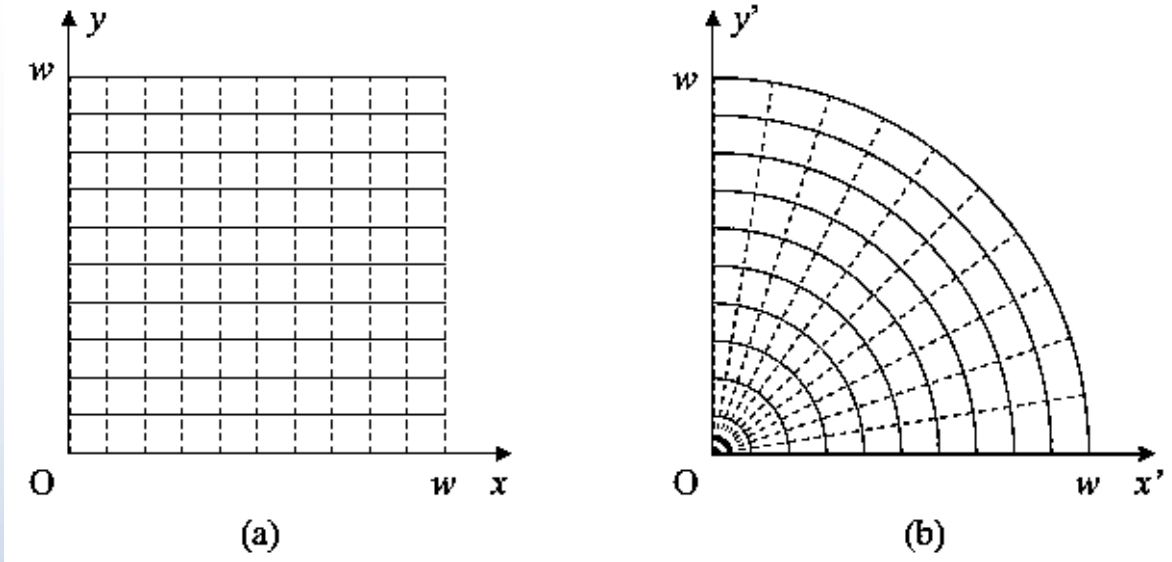
$$x = x', \quad y = \frac{b-c}{b} y' + \frac{a-x \operatorname{sgn}(x)}{a} c, \quad z = z'$$

مطالعات انجام شده در نامرئی‌سازی آکوستیکی



مطالعات انجام شده در نامرئی‌سازی آکوستیکی

○ تبدیلات غیرخطی [۱۳]

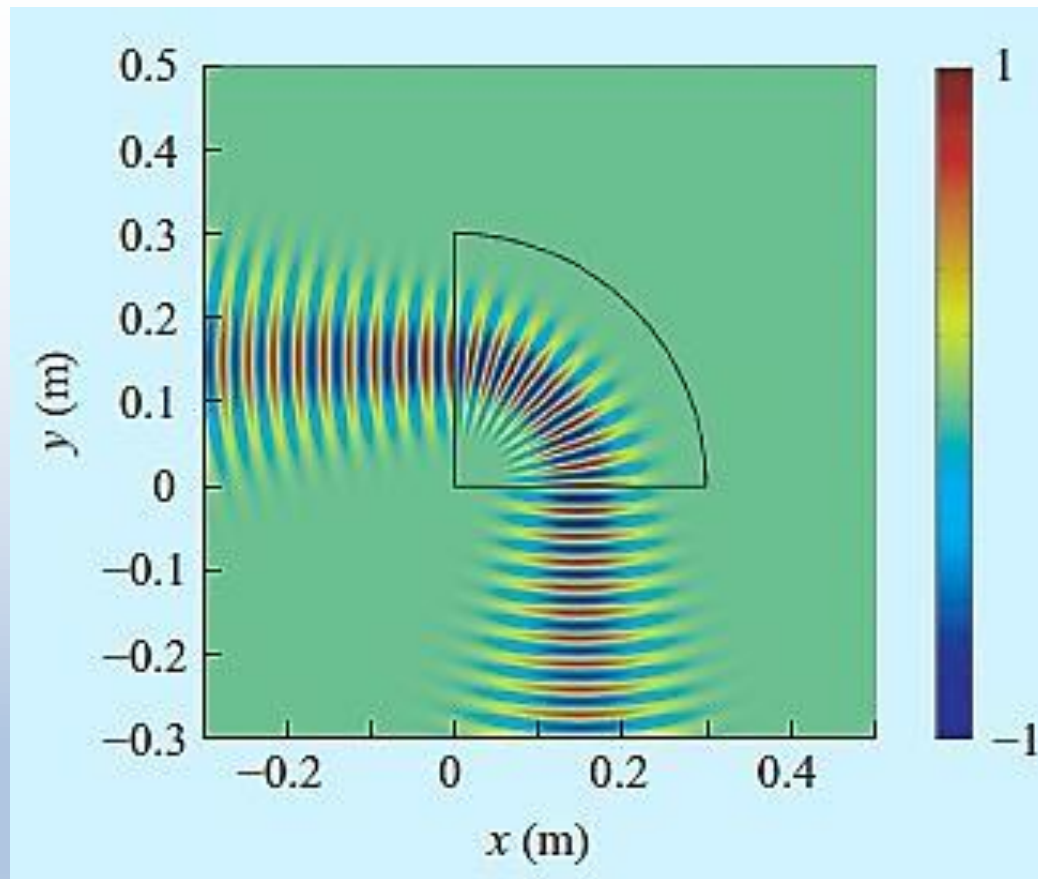


$$\rho' = y,$$

$$\phi' = \frac{\pi}{2w}(w - x),$$

$$z' = z,$$

○ تبدیلات غیرقطبی



مطالعات انجام شده در نامرئی‌سازی آکوستیکی

شنل نامرئی‌ساز فعال

یک شنل فعال شامل مجموعه‌ای از منابع چند قطبی گسسته است که در فضا توزیع شده‌اند. هنگامی که موقعیت‌ها و دامنه‌های منبع به دقت مشخص می‌شوند، میدان فعال به طور ویرانگر با موج هارمونیک فرودی تداخل می‌کند، به طوری که میدان کل را در دامنه محدودی از فضا حذف می‌کند طوری‌که در میدان دور فقط موج فرودی وجود دارد [۱۴].

مطالعات انجام شده در نامرئی‌سازی آکوستیکی

پوشش فعال، ارتباط نزدیکی با **کنترل نویز فعال** دارد، که به نظر می‌رسد مفهوم آن برای اولین بار سال ۱۹۳۶ توسط PAUL LUEG منتشر شد. تمرکز ضد صدا یا ضد ارتعاش، کاهش بزرگی میدان تابشی یا ایجاد مناطق به اصطلاح ساکت در حوزه‌های بسته، مانند کابین هواپیما با استفاده از منابع ساده است.

مطالعات انجام شده در نامرئی‌سازی آکوستیکی

برخلاف روش‌های **غیرفعال (PASSIVE)**، شنل **فعال (ACTIVE)** از منابع صوتی برای دستیابی به حذف موج استفاده می‌کند. این روش، شامل مواد غیرعادی یا تغییرات ساختاری در محیط انتشار نیست یا نیازی به آنها ندارد. با این حال، پنهان‌سازی فعال به اطلاعاتی از میدان برافورد موج نیاز دارد تا منابع موجی را فعال کند که کل میدان را در یک منطقه مشخص حذف کند. مهمتر از همه، منابع باید غیر تابشی باشند.

میلر [۱۵] برای اولین بار، مفهوم پوشاندن فعال یک نامیه را اینگونه مطرح کرد که همزمان با تمریک منابع سطحی، حرکت ذرات نزدیک سطح نامیه پوشانده شده را اندازه‌گیری کرد و دریافت که دامنه هر منبع به اندازه‌گیری‌ها در تمام نقاط مسگر بستگی دارد، و بدین صورت دامنه هر منبع صوتی را برای حذف فعال موج پیشنهاد داد.

مطالعات انجام شده در نامرئی‌سازی آکوستیکی

شنل‌های صوتی با دستکاری امواج صوتی امکان پنهان کردن اشیاء هیجان‌انگیز را فراهم می‌کنند ولی چالش هنوز در اجرای عملی آن دسته از شنل‌هایی است که به طراحی مواد پیچیده نیاز دارند.

زو و ژنگ در سال ۲۰۲۱ نشان دادند که با تغییر شکل خودکار فرامواد مکانیکی نرهمی‌توان به شنل صوتی برای استفاده در زیر آب دست یافت.

چنین پوشش آکوستیکی خود تطبیق‌گری، دارای فرکانس و پهنای باند زاویه‌ای وسیع است که راه را برای طراحی راحت انواع مختلف فرامواد صوتی باز می‌کند

[۱۶].

مطالعات انجام شده در نامرئی‌سازی آکوستیکی

آنها یک شنل آکوستیک **خود تطبیق‌پذیر** را گزارش کردند که به‌طور خودکار با تغییر شکل الاستیک فرامواد مکانیکی نرم در آب عمل می‌کرد.

این فراماده بر اساس مواد نرمی مانند **الاستومر سیلیکونی** یا **PDMS** ساخته شد که این مزیت را دارد که برای مطابقت با امپدانس صوتی آب تنظیم شود [۱۷].

با توجه به مشخصات مواد، طراحی چنین شنل خودتطبیق‌پذیری، به سختی در هوا قابل تحقق است زیرا هوا از قبل تقریباً حداقل مدول حجمی را دارد در حالی که طراحی چنین شنلی به مدول حجمی کاهش یافته تری نسبت به پس زمینه نیاز دارد.

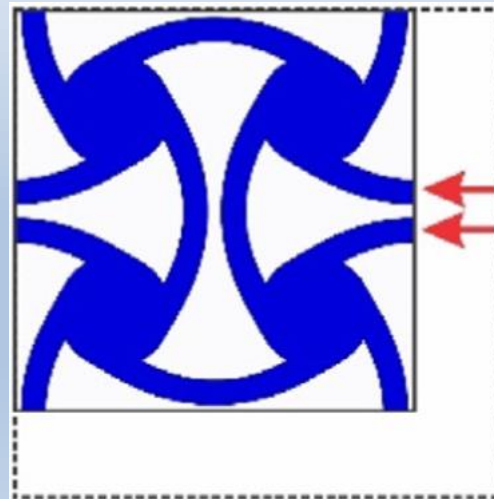
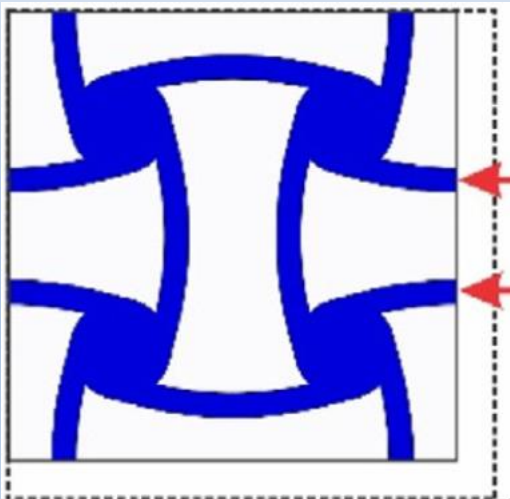
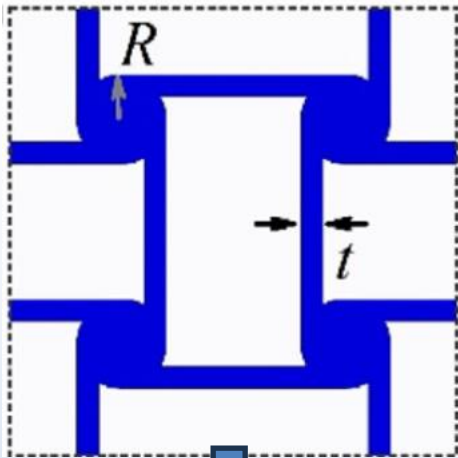
مطالعات انجام شده در نامرئی‌سازی آکوستیکی

در عوض، ایجاد مقدار کمی از حباب‌های هوا در آب به طور قابل توجهی، مدول حجمی آب را کاهش می‌دهد اما به طور ناچیزی بر چگالی موثر آن تأثیر می‌گذارد. این امر، سافت شنل آکوستیکی مذکور را در آب امکانپذیر می‌کند. برای کنترل موقعیت حباب‌های هوا، می‌توان از یک ماتریس جامد با ویژگی‌های صوتی آب-مانند به عنوان میزبان استفاده کرد [۱۸].

ساختارهایی مانند **ANTI-TETRACHIRAL HONEYCOMBS** که می‌توانند با چاپ سه بعدی یا قالب‌سازی به دست آیند، برای استفاده مناسب هستند.

مطالعات انجام شده در نامرئی‌سازی آکوستیکی

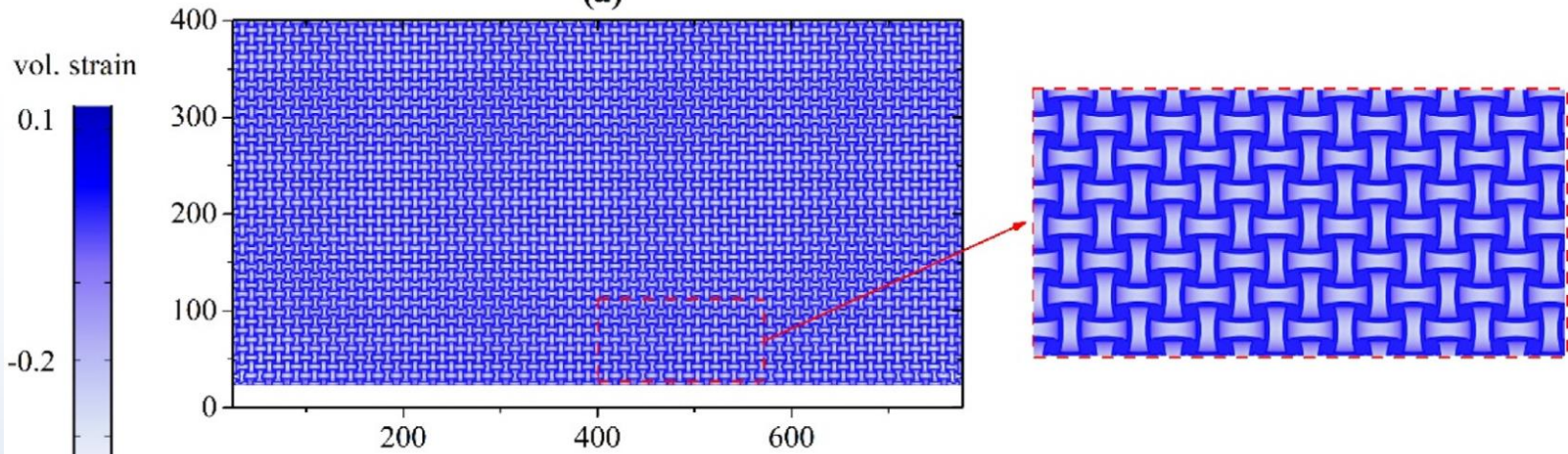
anti-tetrachiral honeycombs



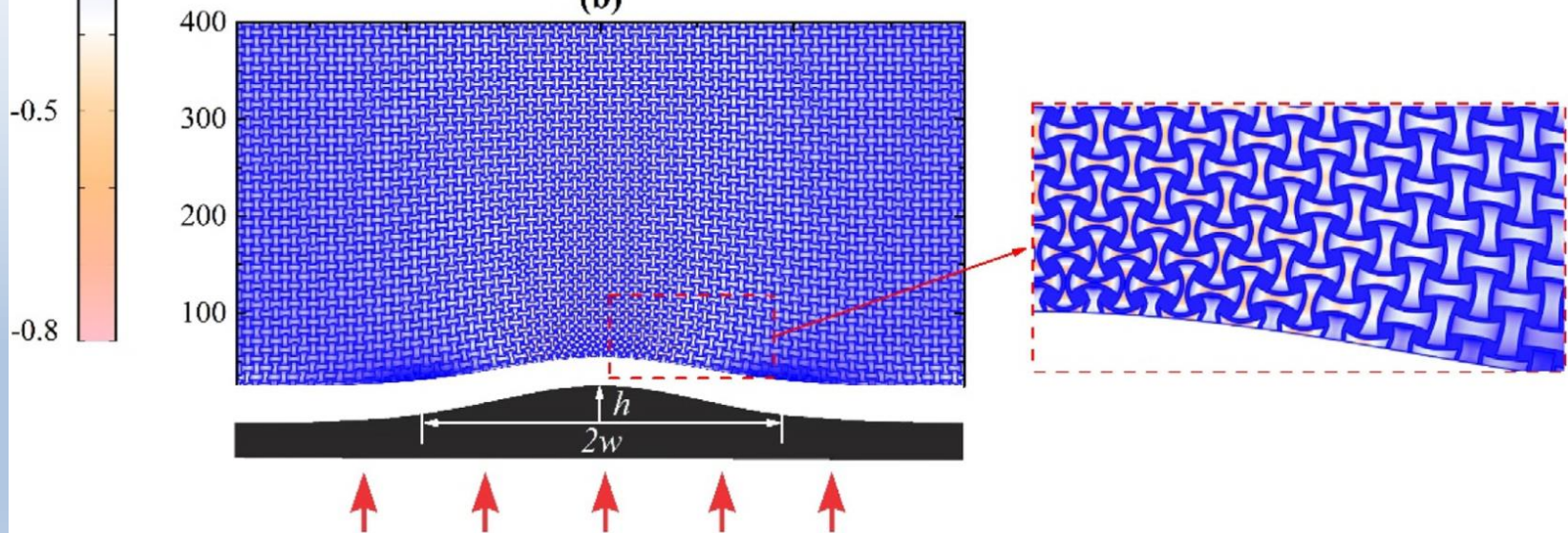
طول هر سلول ۲۰ میلیمتر
شعاع دایره ۲ میلیمتر
ضخامت دیواره سلول ۱ میلیمتر

مطالعات انجام شده در نامرئی‌سازی آکوستیکی

(a)

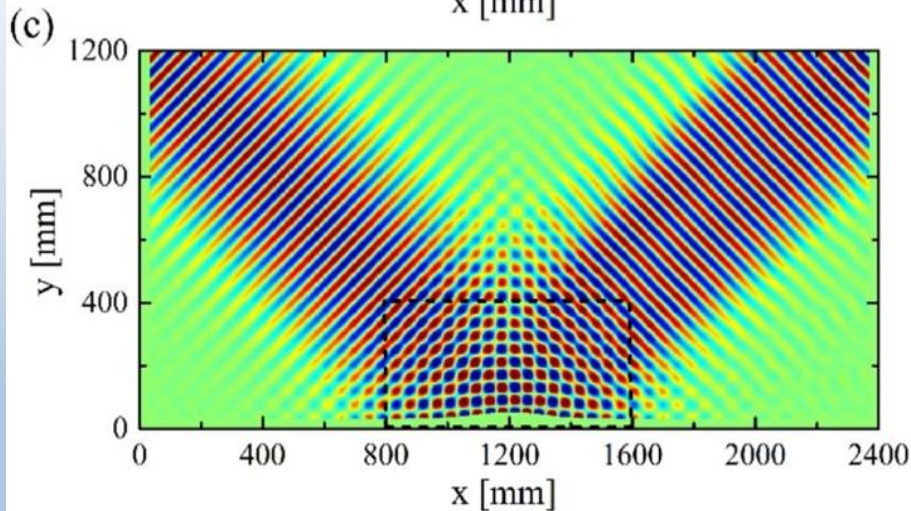
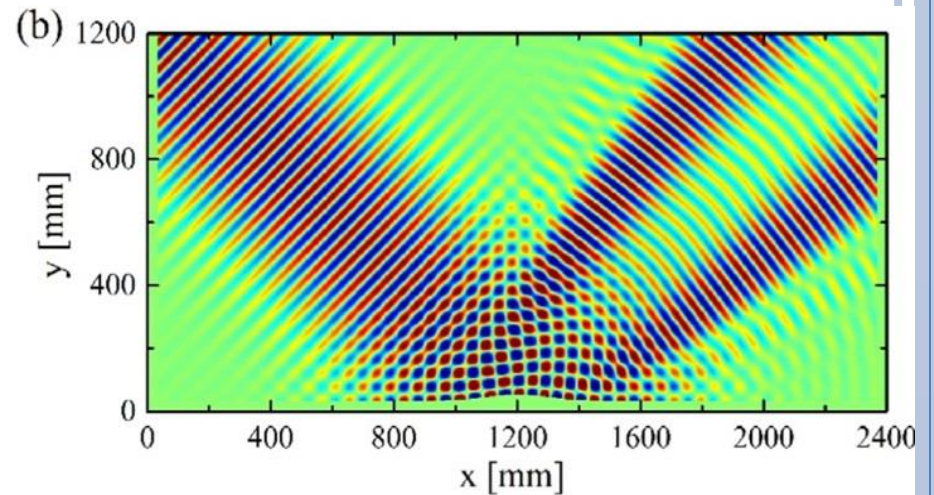
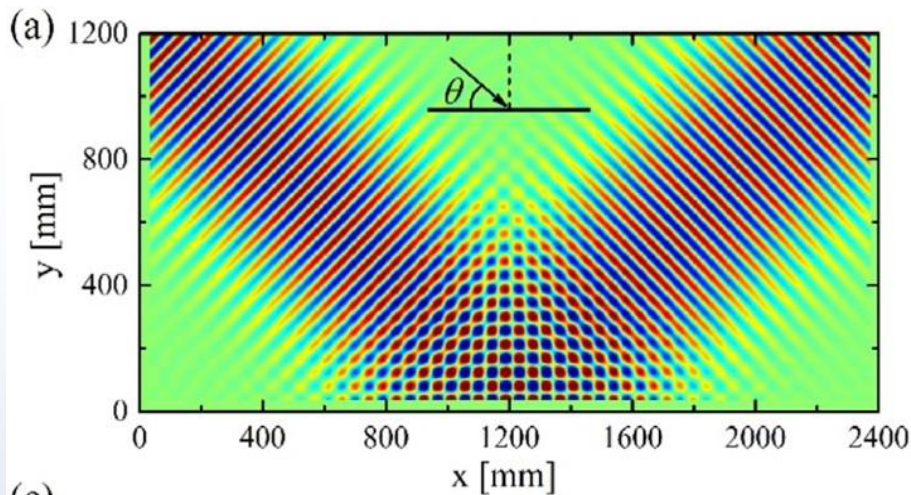


(b)



شکل آکوستیک خود تطبیق‌گر توسط تغییر شکل ساختار فعال می‌شود.

مطالعات انجام شده در نامرئی‌سازی آکوستیکی



توزیع فشار صوتی میدان نزدیک و میدان دور.

الگوهای موج میدان نزدیک با برافورد پرتو گاوسی در

۴۵ درجه روی

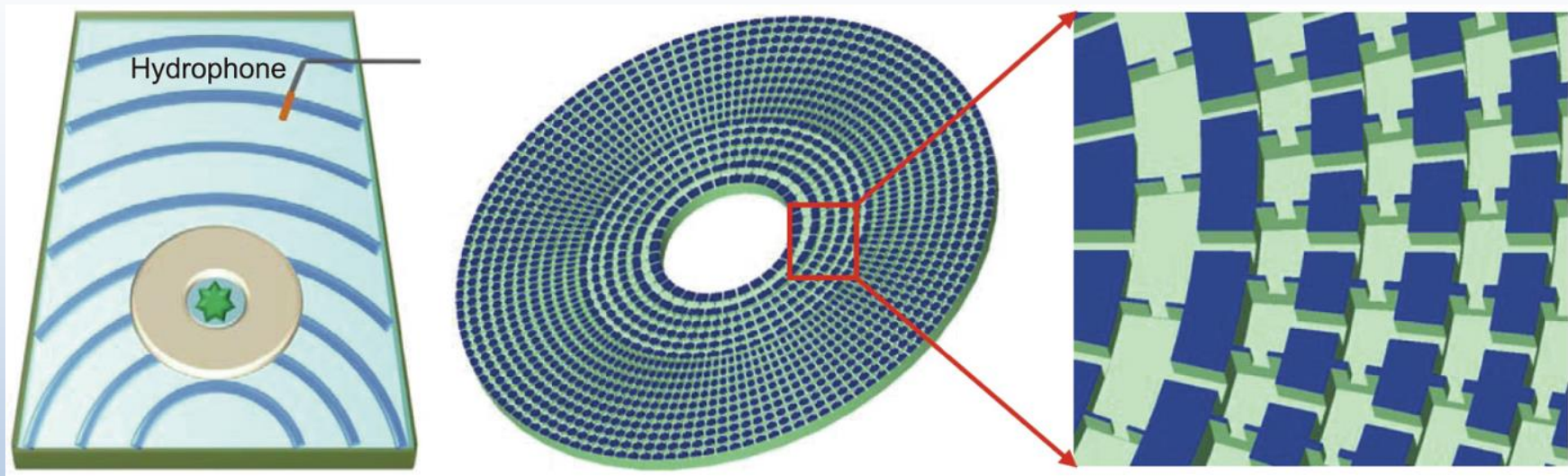
(الف) صفحه زمین،

(ب) برآمدگی صلب،

(ج) برآمدگی صلب پوشیده به دست می‌آیند.

مطالعات انجام شده در نامرئی‌سازی آکوستیکی

ژنگ و همکارانش در سال ۲۰۱۱ اولین اجرای عملی یک شنل آکوستیکی پهن-باند با ائتلاف کم برای امواج فراصوت در زیر آب ارائه دادند.

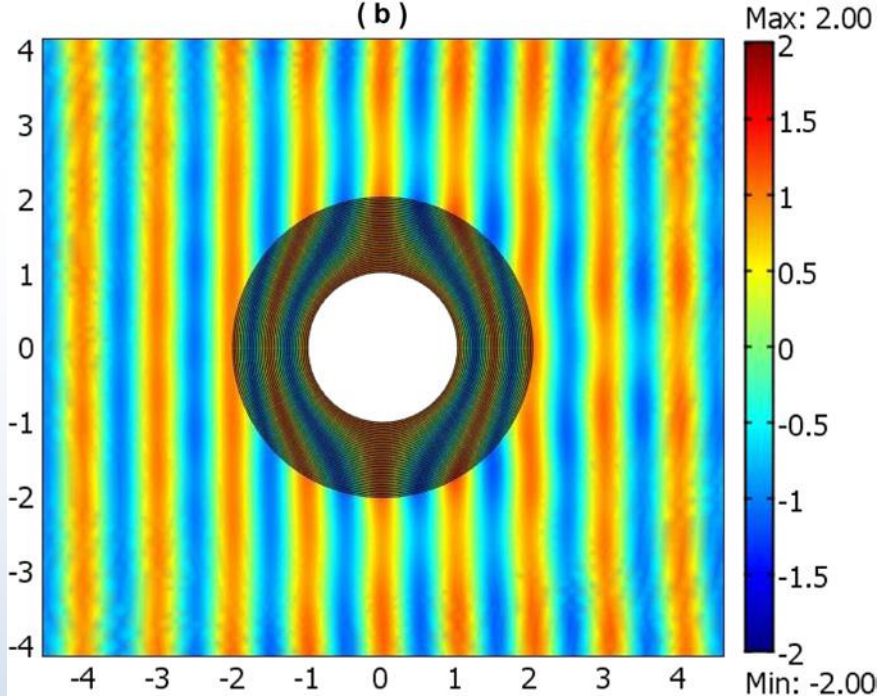


نمودار شماتیک پوشش آکوستیکی و پیکربندی یک شنل استوانه ای آکوستیک

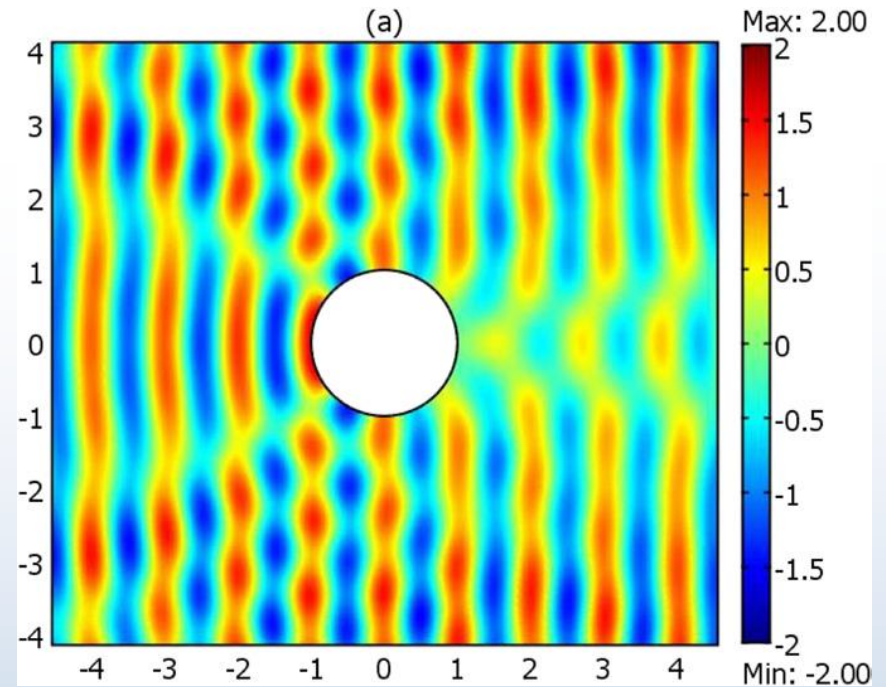
[۱۹].

مطالعات انجام شده در نامرئی‌سازی آکوستیکی

(b)



(a)



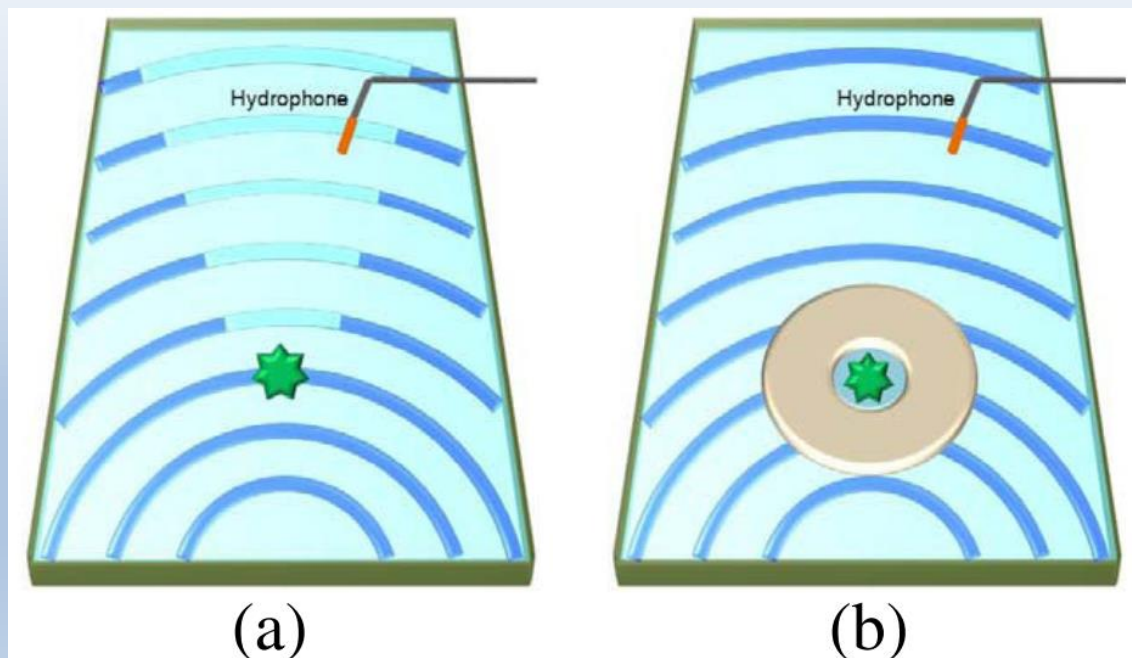
پوشاندن مانع با فرامواد و حذف انعکاس
امواج از آن و در نتیجه، نامرئی‌سازی مانع

مضور مانع در محیط و انعکاس امواج از آن

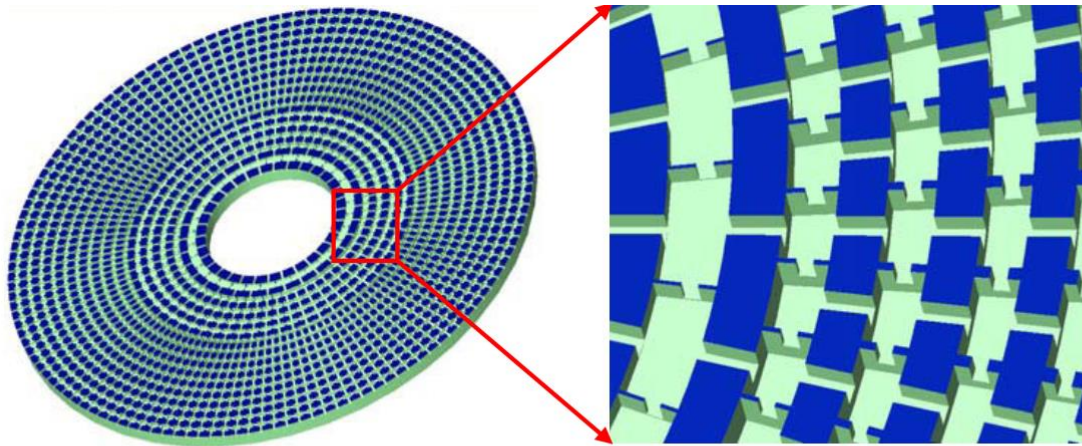


مطالعات انجام شده در نامرئی‌سازی آکوستیکی

آزمایش ایشان به وضوح نشان داد که شنل آکوستیکی، با کاهش پراکندگی و سایه می‌تواند به طور موثر، امواج فراصوت را در اطراف جسم پنهان، خم کند. به دلیل ماهیت غیر رزونانسی عناصر ساختار، این پوشش استوانه‌ای در محدوده فرکانسی وسیعی از ۵۲ تا ۶۴ کیلوهرتز، نامرئی‌سازی می‌کند [۲۰].

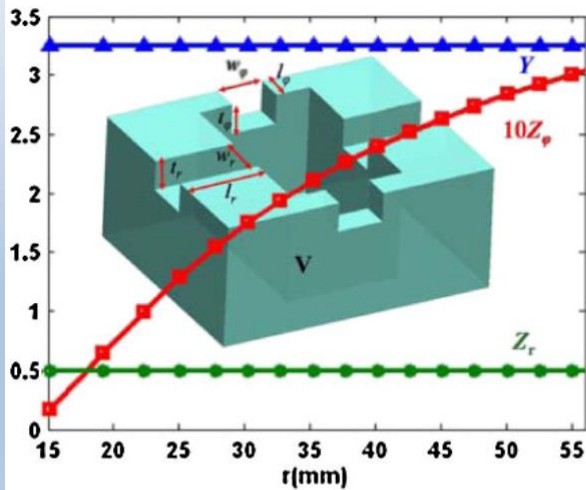


مطالعات انجام شده در نامرئی‌سازی آکوستیکی



(a)

هر سلول واحد، شامل یک حفره بزرگ در مرکز با کانال‌هایی است که به چهار بلوک مجاور متصل می‌شوند.



(b)

| Layer | l_r (mm) | l_ϕ (mm) | V (mm ³) |
|-------|------------|---------------|------------------------|
| 1 | 2.05 | 0.10 | 3.00 |
| 3 | 1.37 | 0.22 | 2.29 |
| 5 | 1.24 | 0.41 | 2.06 |
| 7 | 1.24 | 0.30 | 2.06 |
| 9 | 1.24 | 0.41 | 2.06 |
| 11 | 1.24 | 0.52 | 2.06 |
| 13 | 1.24 | 0.63 | 2.06 |
| 15 | 1.24 | 0.74 | 2.06 |

(c)

نتیجه‌گیری و جمع بندی

- ناوردایی معادله ماکس بر فیزیکی یک مسئله، شرط لازم برای تحقق نامرئی‌سازی است.
- نامرئی‌سازی آکوستیکی تمام فضا و نیمه فضا
- چگالی جرمی لازم برای طراحی فرامواد

پیشنهاداتی برای مطالعات آتی

- به کار بردن تبدیلات غیرخطی
- کاربرد نامرئی‌سازی در کنترل نوفه
- توسعه نامرئی‌سازی فعال
- توسعه فرامواد فعال
- افزایش پهنای باند بسامدی عملکرد نامرئی‌ساز

1. Leonhardt U. and Philbin. T. G., “Transformation Optics and the Geometry of Light.” *Prog. Opt.* 53, 69-152, 2009.(arxiv.org/pdf/0805.4778)
2. Maxwell J C, “On physical lines of force” *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell* ed W D Niven(Cambridge: Cambridge University Press) chapter 23, p477, 1980.
3. Post. E. J.; “Formal structure of electromagnetics: general covariance and electromagnetics.”, New York, NY: Interscience, 1962.
4. Kohn R V and Vogelius M “Inverse problems”, *Proc. Symp. Applied Mathematics of the American Mathematical Society and the Society for Industrial and Applied Mathematics* (New York, 12–13 April 1983) ed DW McLaughlin (Providence, RI: American Mathematical Society) pp 113–23, 1984.
5. Ward A. J. and Pendry J. B.; “Refraction and geometry in Maxwell’s equations.” *J. Mod. Opt.*43, 773–793, 1996. (doi:10.1080/09500349608232782)
6. Greenleaf A., Lassas, M. and Uhlmann, G. “Anisotropic conductivities that cannot be detected by EIT”, *Physiol. Meas.* 24, 413–419, 2003.
7. Pendry, J. B., Schurig, D. & Smith, D. R.; “Controlling electromagnetic fields. *Science*”, 312,1780–1782, 2006. (doi:10.1126/science.1125907)

8. Leonhardt, U.; “Optical conformal mapping.” *Science* 312, 1777–1780, 2006. (doi:10.1126/science.1126493)
9. Cummer, S. A. & Schurig, D. ; “One path to acoustic cloaking. “ *New J. Phys.* 9, 45, 2007. (doi:10.1088/1367-2630/9/3/045)
10. Hu J. , Zhou X. and Hu G.; “A numerical method for designing acoustic cloak with arbitrary shapes.” *Computational Materials Science* 46 708–712, 2009.
11. Torrent, D. and Sanchez D. J. ; “Acoustic cloaking in two dimensions: a feasible approach.” *New J. Phys.* 10, 063015, 2008.
12. Popa B., Zigoneanu L., Cummer S. A.; "Experimental Acoustic Ground Cloak in Air.", *Phys. Rev. Lett.* 106, 253901, 2011.
13. Kwon D-H., Werner D-H.; “Transformation optical designs for wave collimators, flat lenses and right-angle bends.” *New J. Phys.* 10 115023 (13pp), 2008.

14. Futhazar G., Parnell W.J., Norris A.N.; “Active cloaking of flexural waves in thin plates.”, *J. Sound Vib.* 356, 1–19, 2015.
15. Miller D.A.; “On perfect cloaking.”, *Optics Express*, 14, 12457–12466, 2006.
16. Xue Y., Zhang X.; “Self-adaptive acoustic cloak enabled by soft mechanical metamaterials.”, *Extreme Mechanics Letters*, 46 101347, 2021.
17. Guillermic R.M., Lanoy M., Strybulevych A., Page J.H.; *Ultrasonics* 94, 152–157, 2019.
18. Alderson A., Alderson K.L., Attard D., Evans K.E., Gatt R., Grima J.N., Miller W., Ravirala N., Smith C.W., Zied K.; *Compos. Sci. Technol.* 70, 1042–1048, 2010.
19. Lu Q., Li X., Zhang X., Lu M., Chen Y.; “Perspective: Acoustic Metamaterials in Future Engineering.”, *Engineering*, 17, 22–30, 2022.
20. Zhang Sh., Xia Ch., and Fang N.; “Broadband Acoustic Cloak for Ultrasound Waves.”, *Physical Review Letters*, 106, 024301, 2011.

با تشکر از توجه شما

basirjafari@gmail.com

basirjafari@iribu.ac.ir