

(Research Article)

Design and simulation of a nonlinear acoustic rectifier based on phononic method crystals

B. Barahimi¹, M. Fallah^{*2}

ECE Department, Tarbiat Modares University
Faculty of Sciences, University of Mazandaran

Received: 2023/07/11, Accepted: 2024/02/18

Abstract

Rectification has been one of the revolutionary topics in electronics and electromagnetics. The emergence of rectification in acoustics can also lead to tremendous changes in technological applications. Phononic crystals are one of the new topics in acoustics, and by employing this tool, unusual properties including sound insulation in acoustic applications have emerged. In this article, to achieve the initial design, a linear sound insulation structure based on phononic crystals is presented, exhibiting acoustic insulation properties. In the following, by adding a non-linear environment to the linear section, the possibility of rectification of that system at different frequencies has been investigated and analyzed. In the investigations, it was shown that the one-way passage of sound waves is possible by nearly 100% by adding a non-linear medium, so that sound waves with a certain frequency radiated from the side of the non-linear medium have the ability to completely pass through the rectifier, but with the entry of these sound waves in the same frequency from the linear side, are completely rectified. The rectification capability presented in this research can open the way for laboratory scientists to provide new technological applications by constructing and conducting research in such an efficient and simple environment.

Keywords: Nonlinear acoustic rectifier, Linear sound insulator, Phononic crystal, Band gap.

pp. 41-47 (In Persian)

* Corresponding author E-mail: mfphysics@hotmail.com

طراحی و شبیه‌سازی یک‌سوساز غیرخطی صوتی مبتنی بر بلورهای فونونی

بهداد براهیمی^۱، مهدی فلاح^{۲*}

۱. دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس

۲. دانشکده علوم پایه، دانشگاه مازندران

دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۲۰، پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۲۹

چکیده

یک‌سوسازی از جمله مباحث تحول‌آفرین در علم الکترونیک و پس از آن در علم الکترومغناطیس بوده است. ظهور و بروز مبحث یک‌سوسازی در صوتیات نیز می‌تواند تحولات شگرفی را در کاربردهای فن‌اورانه رقم بزند. بلورهای فونونی از جمله مباحث نوین در حوزه صوتیات هستند که می‌توان با بکارگیری این ابزار، خواص غیرعادی از جمله عایق‌سازی صوتی در کاربردهای صوتی مشاهده نمود. در این مقاله به منظور دست‌یابی به چپ‌نشین اولیه، ابتدا یک ساختار عایق صوتی خطی بر پایه بلورهای فونونی ارائه شده که خواص عبور نامتقارن را به نمایش گذاشته است. در ادامه با افزودن محیطی غیرخطی به عایق صوتی خطی متشکل از بلور فونونی، امکان یک‌سوسازی آن سامانه در بسامدهای مختلف مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. در بررسی‌ها نشان داده شد که عبور یک‌سویه امواج صوتی به طور نزدیک به ۱۰۰ درصد از راه اضافه‌کردن محیط غیرخطی میسر شده، به طوری که امواج صوتی با بسامد معین با تابش از سمت محیط غیرخطی قابلیت عبور کامل از یک‌سوساز را داشته اما با ورود همین امواج صوتی در بسامد کاملاً مشابه حالت قبل اما از سمت عایق صوتی، به طور کامل مسدود می‌شوند. قابلیت یک‌سوسازی ارائه‌شده در این پژوهش می‌تواند راه‌گشای دانشمندان آزمایشگاهی باشد تا با ساخت و انجام تحقیق بر چپ‌نشین محیطی، کاربردهای فن‌اورانه نوینی را ارائه دهند.

کلیدواژه‌ها: یک‌سوساز صوتی غیرخطی، عایق صدای خطی، بلور فونونی، شکاف نواری.

۱. مقدمه

و یا بازتابش‌های ناخواسته شار انرژی صوتی صورت گرفته است. تلاش‌های محققان در این زمینه می‌تواند کاربردهای متعددی در زمینه‌هایی از جمله کنترل انرژی صوتی انتقالی در کاربردهای پزشکی موج فراصدا [۱]، تولید انرژی [۵] و رایانه‌های کوانتومی [۶] داشته باشد. به منظور دستیابی به این اهداف، محققان با الهام از ساختارهای برگرفته از حوزه الکترومغناطیس و الکترونیک سعی در تحقق آن‌ها در یک‌سوسازی صوتی داشته‌اند. مفهوم بلور فونونی برای نخستین بار در حوزه الکترومغناطیس با نام بلور فوتونی^۳ معرفی شد [۷]. بلورهای فونونی محیط‌های کشسان ناهمگنی هستند که به صورت آرایه دوره‌ای از اجزای جایگزیده در یک محیط دربرگیرنده آن‌ها ساخته شده‌اند. مشخصه اصلی چنین

مفهوم یک‌سوسازی از جمله مباحث پایه‌ای است که برای اولین بار در علم الکترونیک توسط براون^۱ فیزیک‌دان آلمانی در سال ۱۸۷۴ میلادی معرفی شد [۱]. این کشف منجر به اختراع ترانزیستور و آی‌سی شده که به انقلاب در علم الکترونیک انجامید. در سال ۲۰۱۱ میلادی، شادریوف^۲ و همکاران موفق به ساخت دیودی با قابلیت یک‌سوسازی امواج مایکروویو در طیف الکترومغناطیسی شدند [۲]، که مورد استقبال گسترده جوامع علمی قرار گرفت و پیشرفت در حوزه یک‌سوسازهای مایکروویو را در پی داشت [۳-۴]. با الگوگیری از یک‌سوسازی برقی و الکترومغناطیسی تلاش‌های بسیاری در زمینه حذف تابش

* نویسنده پاسخگو: mfphysics@hotmail.com

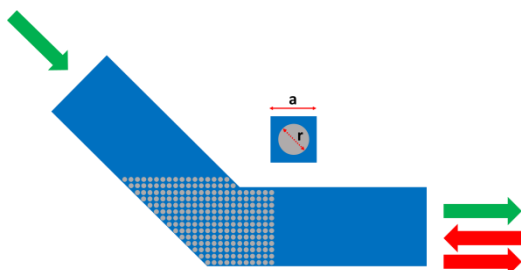
^۱ Braun^۲ Shadrivov^۳ Photonic crystal

جفت محیط تلفاتی است که بین آن‌ها ماده‌ای غیرخطی قرار گرفته است. وجود اثرات تلفاتی امکان دست‌کاری نامتقارن دامنه‌ی موج فرودی از دو راستای مخالف هم را فراهم می‌سازد. از سوی دیگر، با بکارگیری ماده غیرخطی امکان پاسخ وابسته به فشار موج فرودی فراهم می‌شود. در پژوهش‌های قبلی انجام‌شده در زمینه یک‌سوسازهای صوتی غیرخطی، علاوه بر عدم انجام یک‌سویتی کامل، یک‌سویتی تنها در جهت‌های خاصی محقق شده و از نظر سادگی طراحی و امکان ساخت تجربی قابلیت پیاده‌سازی آن‌ها میسر نبوده است.

بنابراین با توجه به پیچیدگی طرح‌های مختلف یک‌سوسازهای صوتی غیرخطی و مسائل مرتبط با طراحی آن‌ها نیاز به ساده‌سازی طراحی و افزایش قابلیت‌های یک‌سوسازی (انعکاس و عبور کامل امواج) در پژوهش‌های مرتبط با این حوزه به‌شدت احساس می‌شود. بنابراین این پژوهش با هدف ارائه طرحی ساده با بازه بسامد کاری دلخواه جهت عایق‌سازی صوتی مطلوب انجام و تمامی جوانب آن مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت.

۲. تشریح مسأله

بررسی انتشار موج تخت در موج‌بر صوتی خمیده تحت زاویه خمش θ در شکل ۱ مورد بررسی قرار گرفته است. در زانوی این موج‌بر بلور فونونی دوبعدی قرار گرفته و محیط آن با آب پر شده است همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، ساختار بلور فونونی تعبیه شده از آرایه‌ای از میله‌های فولادی با شعاع R و چیدمان مربعی با ثابت شبکه a ساخته شده است.



شکل ۱ طرح‌واره الگوی دوبعدی موج‌بر سمتی؛ انتشار موج صوتی فرودی در راستای مثبت (منفی) با پیکان سبز (قرمز) نشان داده شده است.

محیط مرکبی داشتن شکاف نوارهای ممنوعه در طیف انتقالی خود است که مانع از انتشار موج صوتی در بازه بسامدی مورد نظر می‌شود. به‌طور معادل، در بلورهای فونونی که معادل صوتی بلورهای فوتونی در حوزه صوتیات است برای داشتن شکاف نوری صوتی پهن لازم است که اجزا متناوب تشکیل دهنده و محیط دربرگیرنده آن اجزا در بلور فونونی، اختلاف زیادی در چگالی و سرعت صوتی داشته باشند [۸]. از جمله ساختارهای ارائه‌شده در این حوزه می‌توان به غشای صوتی^۱ [۹]، وراقفس صوتی^۲ [۱۰]، وراجاذب صوتی^۳ [۱۱] و وراسطوح صوتی^۴ [۱۲] اشاره کرد.

یکی از راه‌های ایجاد شکاف نوری در بلورهای فونونی استفاده از محیط غیرخطی صوتی است. ایجاد خاصیت غیرخطی شامل طراحی یک‌بعدی ساختار ابرشبکه جفت‌شده با محیط کشسان غیرخطی است [۱۳]. در نخستین پژوهش‌های انجام‌شده برای ایجاد خاصیت غیرخطی از عامل تباین سوسپانسیون ریزحباب [۱۴] برای تبدیل انرژی از بسامد پایه به هماهنگ‌های بالاتر استفاده شده است. پس از این پژوهش پیاده‌سازی عملی دیودهای صوتی براساس کارکردهای مختلف، مانند انتقال یک‌سویه به‌وسیله تبدیل حالت با استفاده از بلور آوایی به‌جای مواد غیرخطی کشسان [۱۵]، کلید و ترانزیستور انرژی مکانیکی با استفاده از اثرات دینامیکی غیرخطی و زنجیره بلور دانه‌ای [۱۶] انجام شده است.

برای برهم‌زدن تقارن انتقالی، گه و همکاران با استفاده از کاواک حلقوی بازآوایشی در حال چرخش در محیط آبگون، حالت‌های بازآوایش زاویه‌ای تبهگن را از هم جدا کردند [۱۷]. لی و همکاران یک صفحه نازک برنز که یک سمت آن به‌صورت دورهای توری‌شکل است را درون آب قرار دادند تا امکان عبور یک‌سویه بازه وسیعی از بسامد را فراهم سازند [۱۸].

جیانگ و همکاران به‌صورت نظری و عملی امکان طراحی دیودهای صوتی، معادل دیود در الکترونیک را بررسی کرده‌اند [۱۲]. الگوی پیشنهادی آن‌ها ساختاری شامل یک

¹ Acoustic membrane

² Meta-cage

³ Meta-absorber

⁴ Meta-surface

تنظیم‌پذیری بسامد مرکزی شکاف نواری را فراهم می‌کنند. توجه به این موارد در کنار انتخاب ماده آنگون و جامد مناسب امکان طراحی ساختارهای یک‌سوساز صوتی مد نظر کاربر را فراهم می‌سازد.

جهت طراحی ساختار دیود صوتی غیرخطی مطلوب، علاوه بر محیط خطی متشکل از بلور فونونی طراحی شده، لازم است یک محیط غیرخطی نیز به آن افزوده شود. محیط خطی پیشتر طراحی شده اجازه عبور از ساختار را به موج تابشی با بسامد ω (بسامدی از نوار شکاف باند بلور فونونی) نمی‌دهد. محیط غیرخطی افزوده شده باید به گونه‌ای عمل کند که با تابش موج فرودی با بسامد ω از سوی محیط غیرخطی، بسامدهای بالاتر تولید کرده و این بسامدها در صورت قرار گرفتن خارج از نوار شکاف باند محیط خطی، با عبور از محیط خطی از سوی دیگر ساختار خارج شود.

مطابق شکل ۳ (الف) در ساختار دیود صوتی غیرخطی، با تابش موج فرودی از سمت محیط خطی با بسامد ω موجی از آن ناحیه عبور نکرده، تا به محیط غیرخطی برسد و در نتیجه در سمت دیگر ساختار خروج صدا میسر نیست. از طرفی، موج فرودی از سمت محیط غیرخطی با بسامد ω قادر به ورود به محیط خطی با همان بسامد نبوده، در حالی‌که بسامدهای بالاتر آن که در گذر از محیط غیرخطی شکل گرفته‌اند امکان انتشار در محیط خطی را یافته و از سمت دیگر ساختار خارج می‌شوند (شکل ۳-ب).

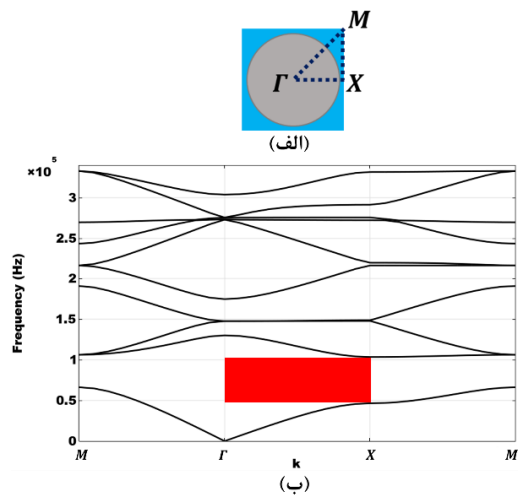


شکل ۳ ساختار کامل دیود صوتی غیرخطی پیشنهادی با نمایش روند تابش موج از (الف) سمت محیط خطی و (ب) محیط غیرخطی.

۳. معادلات حاکم

با توجه به آن‌که پدیده غیرخطی اعوجاج موج، هم ناشی از اثرات محلی انتشار جبهه موج در محیط غیرخطی و هم

برای رسم منحنی پاشندگی، همان‌طور که در شکل ۲ (الف) نشان داده شده است، یک یاخته واحد اولیه از شبکه را انتخاب کرده و با گذر از نقاط پرتقارن آن، محاسبه منحنی پاشندگی انجام شده است. همان‌طور که در شکل ۲ (ب) مشاهده می‌شود، در راستای $\Gamma \rightarrow X$ ناحیه کاهش‌ناپذیر بریلوئین، شکاف نواری جزئی وجود دارد. بنابراین در صورت تابش موج صوتی در راستای $\Gamma \rightarrow X$ به بلور فونونی، شاخه افقی موج‌بر، در بازه بسامدی هاشور زده شده، موج قادر به عبور از ساختار نخواهد بود؛ این در حالی است که تابش موج در همین بازه بسامدی در راستای $M \rightarrow \Gamma$ ، از شاخه خمیده موج‌بر با زاویه θ برابر 45° درجه، از ساختار عبور می‌کند.



شکل ۲ (الف) یاخته یکه اولیه برای محاسبه منحنی پاشندگی ساختار، (ب) منحنی پاشندگی الگوی بلور فونونی دوبعدی.

چنانچه نسبت پرشوندگی ساختار بلور فونونی، یعنی نسبت سطح مقطع میله فولادی به سطح مقطع یاخته یکه، تغییر کند می‌توان پهنا و بسامد مرکزی شکاف نواری را جابه‌جا و در بازه بسامدی دلخواه تنظیم کرد. آن‌چه مشخص می‌باشد، این است که می‌توان با انتخاب شعاع مناسبی از میله‌های درون ساختار یا ترکیبی از آن‌ها، عبور یا عدم عبور موج صوتی در راستاهای تابشی متفاوت را تعیین نمود.

همانند اثر تغییر نسبت پرشوندگی ساختار بلور فونونی بر پهنا و بسامد مرکزی شکاف نواری آن، نوع چیدمان شبکه و ساختار هندسی اجزای داخلی آن نیز امکان

سری زیر است:

$$p(x, t) = p. \sum_{n=1}^{\infty} B_n(\sigma) \sin\left(n\omega\left(t - \frac{x}{c}\right)\right) \quad (3)$$

در این رابطه $\sigma = x/x_{sh}$ مختصات فضایی بدون بعد بوده و $p. = \rho. c. u.$ دامنه فشار منبع است. روش حل فوبینی^۲ تا مسافت $(\sigma \leq 1)$ x_{sh} معتبر است [۱۹]. دامنه هماهنگ‌های B_n به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$B_n(\sigma) = \frac{2}{n\sigma} J_n(n\sigma) \quad (4)$$

و J_n تابع بسل نوع یک از مرتبه n است. روش حل دوم به نام حل فی^۳ به ازای $\sigma \geq 3/5$ برقرار است. دامنه هماهنگ‌ها برابر است با:

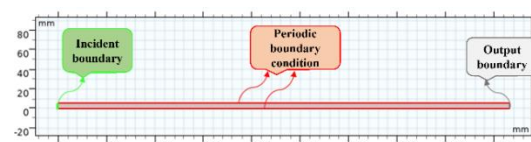
$$B_n(\sigma) = \frac{2}{\Psi \sinh\left[n\left(1 + \sigma\right)/\Gamma\right]} \quad (5)$$

در این رابطه $\Psi = 2\beta u. / \omega \delta$ با نام عدد گلدبرگ شناخته می‌شود و بیانگر قدرت غیرخطی بودن نسبت به تلفات است. با توجه به توضیحات داده شده، در شکل ۲ ناحیه خطی متشکل از محیط تشکیل دهنده آبی با میله‌های فلزی درون آن و ناحیه غیرخطی متشکل از آب با مشخصات ارائه شده در جدول ۱ در نظر گرفته شده است. طبق مقادیر ارائه شده، توزیع شونده‌گی صوتی ناشی از لزجت به صورت $\delta = 4\mu/3p$ بیان می‌شود که معادل اعوجاج صوتی $Np/m = 10^{-5} \times 8/1$ است.

در طراحی محیط خطی، با توجه به ویژگی‌های مورد نیاز بیان شده، از ساختار بلور فونونی با شکاف نواری فونونی حول بسامد ۱۰۰ کیلوهرتز کمک گرفته می‌شود، شکل ۲، ساختار طراحی شده متشکل از میله‌های استوانه‌ای شکل از جنس فولاد و فضای پس‌زمینه از جنس آب است. با طراحی دقیق شعاع میله‌های فولادی، شکاف نواری عبور در راستای $\Gamma \rightarrow X$ را به بازه ۱۰۰ کیلوهرتز منتقل کرده، به گونه‌ای که شامل بسامد ۲۰۰ کیلوهرتز نباشد (شکل ۲) و بتواند هماهنگ‌های بالاتر به دست آمده در ناحیه غیرخطی را از خود عبور داده و ساختار یکسوساز غیرخطی محقق شود.

ناشی از اثر تجمعی تغییرات سرعت انتشار شکل موج است، با عبور موج از درون محیط غیرخطی، اعوجاج شکل موج به صورت تجمعی و پس از طی مسافتی حداقلی در آن محیط پدیدار می‌شود [۱۹]. می‌توان اثر محلی را که معمولاً نسبت به اثر تجمعی کوچک است در مسافت‌های بیش از یک طول موج نادیده گرفت. بنابراین تحلیل گذرا برای الگوسازی اعوجاج تجمعی طی انتشار موج ضروری است [۱۹].

جهت در نظر گرفتن معادله موج خطی به صورت غیرخطی، از معادله وسترولت^۱ برای تخمین کامل معادله موج مرتبه دوم در مواقعی که اثرات غیرخطی تجمعی بر اثرات غیرخطی محلی غالب است استفاده شده است [۱۹]. هم‌چنین انتشار موج را در بازه‌ای بزرگ‌تر از فاصله تشکیل شوک (x_{sh}) در نظر گرفته شده است (شکل ۴).



شکل ۴ یاخته واحد انتخاب شده از محیط غیرخطی به طول $x_{sh} \times 4/5$ عرض $x_{sh} \times 0.5$ ، با شرط مرزی دوره‌ای در طول ساختار و تابش از مرز سمت چپ شکل نمایش داده شده است.

معادله کامل وسترولت به صورت زیر است [۲۰]:

$$\frac{1}{\rho_0 c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho_0} \left(\nabla p + \frac{\delta}{c_0^2} \frac{\partial(\nabla p)}{\partial t} \right) \right) = \frac{\beta}{\rho_0 c_0^2} \frac{\partial^2 p^2}{\partial t^2} \quad (1)$$

در این معادله p فشار صوتی کل، ρ_0 و c_0 به ترتیب چگالی و سرعت صدا، $\beta = 1 + B/2A$ ضریب غیرخطی، و δ توزیع شونده‌گی صوتی است.

چنانچه سرعت نوسان صوتی برابر $u(t) = u. \sin \omega t$ باشد، فاصله تشکیل شوک برابر است با:

$$x_{sh} = \frac{1}{\beta \epsilon k} = \frac{c^2}{\omega \beta u} \quad (2)$$

پاسخ معادله (۱) به دو روش کلاسیک بیان شده به صورت

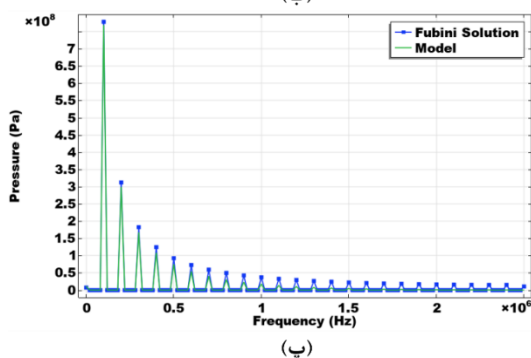
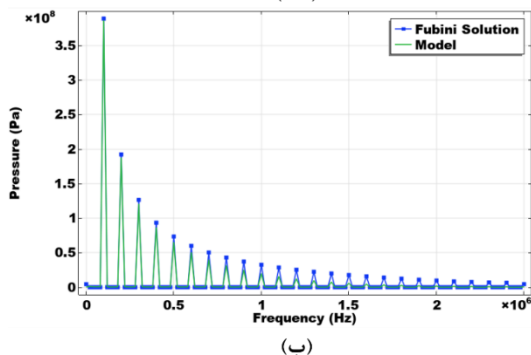
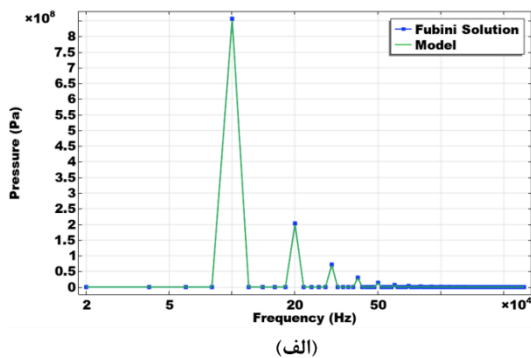
^۲ Fubini

^۳ Fey

^۱ Westervelt

دچار کاهش دامنه موج می‌شود.

اعوجاج شکل موج، منجر به تولید مولفه‌های هماهنگی مرتبه بالاتر شده و با طی مسافت بیشتر، انرژی بیش‌تری از علامت هماهنگی منبع، تبدیل به مولفه‌های هماهنگی مرتبه بالاتر می‌شود. در شکل ۶ حل الگوی فوبینی (آبی رنگ) با حل تحلیلی (سبز رنگ) برای هر دو شکل موج و طیف بسامدی به ازای $X=0.5 X_{sh}$ ، X_{sh} ، $3/5 X_{sh}$ رسم شده است.



شکل ۶ طیف بسامدی حل الگو (آبی رنگ) و حل تحلیلی غیرخطی (سبز رنگ) در (الف) $X=0.5 X_{sh}$ ، (ب) $X=X_{sh}$ ، (پ) $X=3/5 X_{sh}$.

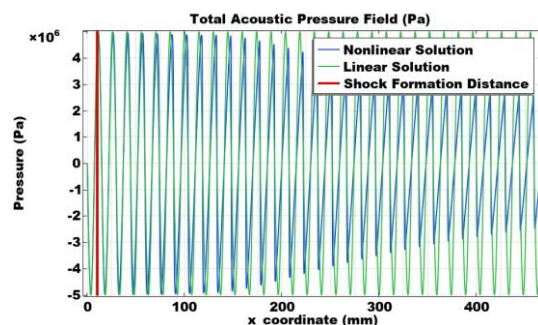
در شکل ۶ (الف)، $X=0.5 X_{sh}$ مشاهده می‌شود که مولفه‌های هماهنگی دوم و سوم در نتیجه حل الگوی فوبینی پدیدار شده‌اند؛ در شکل ۶ (ب) به ازای $X=X_{sh}$

جدول ۱ مشخصات و برخی متغیرهای اساسی الگو.

نام	مقدار	توضیحات
ρ .	۹۹۹/۶ کیلوگرم بر مترمکعب	چگالی در دمای ۲۰ درجه و فشار ۱ اتمسفر
c .	۱۴۸۱/۴۴ متر بر ثانیه	سرعت صوتی در دمای ۲۰ درجه و فشار ۱ اتمسفر
μ .	1.0016×10^{-3} پاسکال.ثانیه	گرانروی در دمای ۲۰ درجه و فشار ۱ اتمسفر
β	۱۰ (بدون واحد)	ضریب غیرخطی
f .	۰/۱ مگاهرتز	بسامد تحریک منبع
p .	۵ مگاپاسکال	دامنه فشار منبع
T .	۸	تعداد هماهنگ‌های حل شده

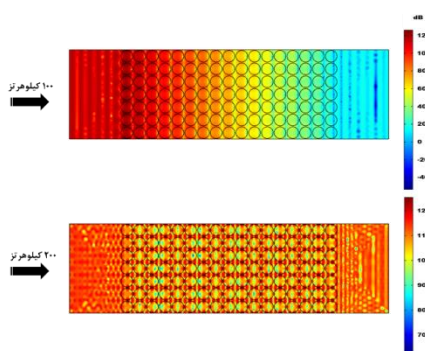
۴. نتایج عددی

اساساً در این ساختار، اعوجاج شکل موج ناشی از وابستگی سرعت انتشار به فشار یا سرعت ذره است. قلّه‌های موج نسبت به دره‌ها سریعتر حرکت می‌کنند و شکل موج به تدریج به شکل دندان‌اره‌ای تبدیل می‌شود، شکل ۵. پس از ناحیه تشکیل شوک (خط قرمز رنگ عمودی در شکل ۵) تلفات صوتی افزایش می‌یابد.



شکل ۵ مقایسه حل عددی غیرخطی (آبی) با حل تحلیلی خطی (سبز) در کل دامنه انتشار؛ خط قرمز رنگ عمودی نشان‌گر فاصله تشکیل شوک است.

این موضوع ناشی از وابستگی ذاتی اعوجاج به بسامد است و با توان دوم بسامد ارتباط دارد. به همین دلیل، همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، پاسخ غیرخطی فوبینی (آبی رنگ) نسبت به پاسخ خطی (سبز رنگ) پس از ناحیه تشکیل شوک هم دچار اعوجاج (به‌ویژه در قلّه‌ها و هم



شکل ۸ فشار صوتی عبوری از ساختار بلور فونونی طراحی شده در دو بسامد ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوهرتز.

۶. نتیجه‌گیری

یک‌سوسازی از جمله مفاهیم پایه‌ای است که می‌تواند زمینه‌ساز توسعه در زمینه ترانزیستور و دیگر ادوات مشابه در مبحث علوم صوتی شود. درک و شناخت سازوکار انجام آن در مبحث صوتی می‌تواند موجب جهش کاربردهای فن‌اورانه در این حوزه شود. در این پژوهش، ابتدا عایق صوتی بر مبنای بلور فونونی مورد بررسی قرار گرفت. عایق ارائه‌شده، قابلیت حذف موج صدای فرودی در جهت‌های معینی را دارد که در نمودار پاشندگی طیف فونونی جهت‌مندی و قابلیت تنظیم‌پذیری بسامدی آن تحلیل شد. با اضافه کردن محیط غیرخطی آبگون، عدم تقارن موج صوتی تابیده‌شده و بازتاب آن مورد بررسی قرار گرفت. بررسی‌ها نشان دادند که ساختار ارائه‌شده قابلیت حذف امواج را در بسامدهای بالا دارد و می‌تواند با ایجاد هماهنگی‌های بالاتر، یک‌سوسازی کامل را نیز میسر کند. با توجه به اهمیت ویژه یک‌سوسازهای صوتی، نتایج شبیه‌سازی انجام‌شده از عملی بودن ساختار ارائه‌شده به‌منظور دستیابی به آن حکایت دارد. طرح پیشنهادی ضمن قابلیت تنظیم شکاف نواری ناحیه خطی برای برآورده کردن بازه کاری دلخواه، ساختار و مواد تشکیل‌دهنده رایجی نیز داشته که امکان پیاده‌سازی آن را در محیط آزمایشگاهی فراهم می‌سازد.

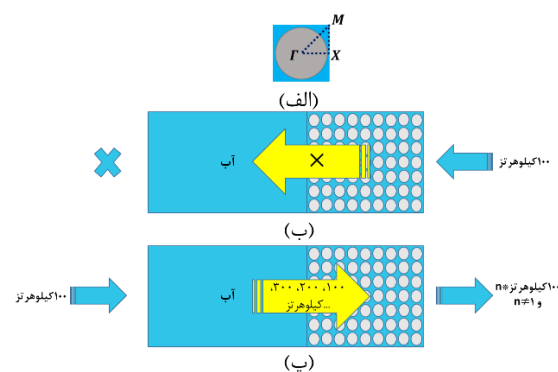
تقدیر و تشکر

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از داوران محترم مجله انجمن مهندسی صوتیات ایران برای مطالعه و کمک به پروراندن متن تشکر کنند.

مشاهده می‌شود که بیش‌تر از ده هماهنگ در طیف بسامدی حل فویینی ظاهر شده‌اند. با افزایش فاصله به x_{SH} شکل ۶ (پ)، سهم دامنه هر یک از این طیف‌های بسامدی در حل فویینی افزایش می‌یابد. بنابراین با انتخاب طول مناسب ناحیه غیرخطی به نسبت فاصله تشکیل شوک، می‌توان در انتهای این ناحیه مولفه‌های هماهنگی مرتبه بالاتر با سهم شدت بیش‌تر در دسترس داشت.

۵. بحث

ساختار کلی دیود صوتی غیرخطی مطلوب متشکل از دو ناحیه خطی و غیرخطی به صورت شکل ۷ در خواهد آمد. با توجه به شکاف نواری ناحیه خطی در بازه ۱۰۰ کیلوهرتز، در صورتی که موج صوتی فرودی با بسامد ۱۰۰ کیلوهرتز ابتدا از سمت ناحیه خطی تابانده شود، به داخل ساختار نفوذ نکرده و عبور وجود نخواهد داشت. در صورت تابش همین موج صوتی فرودی از سمت ناحیه غیرخطی، پس از عبور از آن، به هنگام ورود به ناحیه خطی، بسامدهای ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوهرتز و هماهنگ‌های بالاتر اعمال خواهند شد. بسامد ۱۰۰ کیلوهرتز به دلیل قرار گرفتن در شکاف نواری این ناحیه امکان عبور از ناحیه خطی را نداشته اما مطابق شکل ۷ هماهنگ‌های بالاتر از ساختار عبور کرده و در خروجی پدیدار می‌شوند.



شکل ۷ ساختار کامل دیود صوتی غیرخطی پیشنهادی با اجزای تشکیل‌دهنده (الف) در قسمت خطی و نمایش روند تابش موج از (ب) سمت راست و (پ) سمت چپ.

این مطلب را می‌توان در شکل ۸ به‌طور واضح مشاهده کرد که موج با بسامد ۲۰۰ کیلوهرتز از بلور عبور می‌کند اما موج ۱۰۰ کیلوهرتزی نمی‌تواند از ساختار عبور کند.

- [12] X. Jiang, B. Liang, X.-Y. Zou, J. Yang, L.-L. Yin, J. Yang, J.-C. Cheng, "Acoustic one-way metasurfaces: Asymmetric phase modulation of sound by subwavelength layer," *Scientific Reports*, vol. 6, pp. 28023, 2016.
- [13] A.D. Pierce, "Nonlinear Effects in Sound Propagation," in *Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications*. Cham: Springer International Publishing, pp. 649-709, 2019.
- [14] E.H. El Boudouti, B. Djafari-Rouhani, A. Akjouj, L. Dobrzynski, "Acoustic waves in solid and fluid layered materials," *Surface Science Reports*, vol. 64, no. 11, pp. 471-594, 2009.
- [15] K.L. Rappa, H.F. Rodriguez, G.C. Hakkarainen, R.M. Anchan, G.L. Mutter, W. Asghar, "Sperm processing for advanced reproductive technologies: Where are we today?," *Biotechnology advances*, vol. 34, no. 5, pp. 578-587, 2016.
- [16] Y.-L. Huang, H.-X. Sun, J.-P. Xia, S.-Q. Yuan, X.-L. Ding, "Multi-band asymmetric acoustic transmission in a bended waveguide with multiple mechanisms," *Applied Physics Letters*, vol. 109, no. 1, pp. 013501, 2016.
- [17] Y. Ge, H.-X. Sun, S.-Q. Yuan, Y. Lai, "Broadband unidirectional and omnidirectional bidirectional acoustic insulation through an open window structure with a metasurface of ultrathin hooklike meta-atoms," *Applied Physics Letters*, vol. 112, no. 24, pp. 243502, 2018.
- [18] Y. Li, B. Liang, Z.-M. Gu, X.-Y. Zou, and J.-C. Cheng, "Unidirectional acoustic transmission through a prism with near-zero refractive index," *Applied Physics Letters*, vol. 103, no. 5, pp. 053505, 2013.
- [19] M.F. Hamilton D.T. Blackstock, "Nonlinear Acoustics," Academic press San Diego, 1998.
- [20] D.T. Blackstock, "Fundamentals of physical acoustics," Acoustical Society of America, 2001.

تضاد منافع

همه نویسندگان اعلام می‌کنند که مقاله حاضر هیچ تضاد منافی ندارد.

فهرست منابع

- [1] F. Braun, "Ueber die stromleitung durch schwefelmetalle," *Annalen der Physik*, vol. 229, no. 12, pp. 556-563, 1875.
- [2] I.V. Shadrivov, V.A. Fedotov, D.A. Powell, Y.S. Kivshar, N.I. Zheludev, "Electromagnetic wave analogue of an electronic diode," *New Journal of Physics*, vol. 13, no. 3, 2011.
- [3] D. Mencarelli, G.M. Zampa, L. Pierantoni, "Current-voltage characterization of multi-port graphene based geometric diodes for high-frequency electromagnetic harvesting," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 123251-123258, 2022.
- [4] L. Chen, Q. Ma, S.S. Luo, F.J. Ye, H.Y. Cui, T.J. Cui, "Touch-programmable metasurface for various electromagnetic manipulations and encryptions," *Small*, vol. 18, no. 45, 2022.
- [5] G. Lee, D. Lee, J. Park, Y. Jang, M. Kim, J. Rho, "Piezoelectric energy harvesting using mechanical metamaterials and phononic crystals," *Communications Physics*, vol. 5, no. 1, pp. 94, 2022.
- [6] X.-B. Xu, W.-T. Wang, L.-Y. Sun, C.-L. Zou, "Hybrid superconducting photonic-phononic chip for quantum information processing," *Chip*, vol. 1, no. 3, pp. 100016, 2022.
- [7] E. Yablonovitch, "Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics," *Physical Review Letters*, vol. 58, no. 20, pp. 2059-2062, 05/18/ 1987.
- [8] A.A. Abdelkrim Khelif, A.A. Abdelkrim Khelif, "Phononic Crystals (Nanotechnology and Microengineering)," Springer Science+Business Media New York: Springer-Verlag New York, pp. 7-245, 2016.
- [9] G. Ciaburro, G. Iannace, "Membrane-type acoustic metamaterial using cork sheets and attached masses based on reused materials," *Applied Acoustics*, vol. 189, pp. 108605, 2022.
- [10] C. Liu, J. Shi, W. Zhao, X. Zhou, C. Ma, P. Ma, et al., "Three-Dimensional Soundproof Acoustic Metacage," *Physical Review Letters*, vol. 127, no. 8, pp. 084301, 2021.
- [11] Y. Zhang, L. Cheng, "Ultra-thin and broadband low-frequency underwater acoustic meta-absorber," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 210, pp. 106732, 2021.