

## فیلتر اولتراسونیک فزود-فروزد بر پایه بلورهای فونونی جامد/سیال دوبعدی

مهران علی نژاد نائینی<sup>۱</sup>، دانشجو؛ علی بهرامی<sup>۲</sup>، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی سهند - تبریز - ایران - me\_alinejad@sut.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی سهند - تبریز - ایران - bahrami@sut.ac.ir

**چکیده:** در این مقاله، یک ساختار بلور فونونی از نوع جامد/سیال در مقیاس مگاهرتز مورد بررسی قرار گرفته است. شبکه مربعی با ساختاری از جنس سرامیک بوده و میله‌هایی که با اتانول پر شده درون شبکه چیده شده‌اند. محاسبات ساختار باند به روش بسط به امواج تخت انجام شده است که با روش المان محدود هم منطبق شده تا در ادامه برای محاسبات انتشار امواج و سطح فشار مورد استفاده قرار گیرد. پس از محاسبه ساختار باند، باندهای ممنوعه با پهنای باند قابل قبول به دست آمده است و با ایجاد نقص مناسب و معرفی متیل نانوفلوروبوتیل اتر به عنوان ماده پرکننده میله‌های نقص دار مدهای مناسبی در باند ممنوعه منتشر شدند. سپس با طراحی یک ساختار شبه‌متقارن و ایجاد کاواک‌های منسجم، یک فرکانس مجزا به دست آمد. بنابراین با ترکیب موج‌برهای طراحی شده حاصل از چیدمان میله‌های نقص دار شده و ساختار شبه‌متقارن طراحی شده، یک فیلتر اولتراسونیک از نوع فزود-فروزد طراحی و شبیه‌سازی شده است. فیلتر طراحی شده بازه فرکانس‌های  $f=1.47\text{MHz}$  تا  $f=1.51\text{MHz}$  را از ورودی دریافت کرده و به خروجی منتقل می‌کند و فرکانس  $f=1.498\text{MHz}$  به عنوان فرکانس فزود و فرود مورد استفاده قرار می‌گیرد.

**واژه‌های کلیدی:** بلور فونونی، خواص الاستیک، روش المان محدود، فیلتر اولتراسونیک، ناحیه بریلیون.

## Ultrasonic Add/Drop Filter based on Two-Dimensional Solid/Fluid Phononic Crystals

M. Alinejad<sup>1</sup>, student, A. Bahrami<sup>2</sup>, Assistant Professor

1- Department of Electrical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran, Email: me\_alinejad@sut.ac.ir

2- Department of Electrical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran, Email: bahrami@sut.ac.ir

**Abstract:** In this paper, we focus on two-dimensional solid/fluid phononic crystal in megahertz range. The case of Ethanol rods embedded in a ceramic lattice has been computed. The plane wave expansion method is used to calculate the dispersion relations which are in good agreement with the transmitted sound pressure level spectra established by the finite element method. Results show that this structure exhibit some absolute bandgaps with suitable bandwidth. So with the help of adding suitable defects, and by introducing methyl nonafluorobutyl ether as a defect inclusion, perfect modes were obtained among bandgaps region. Also, by designing a quasi-periodic structure and with the help of coherent cavities, a distinct frequency was obtained. So, by combining a row of defect rods as a moderate waveguides and designed quasi-periodic structure, we led to the design of acoustic add/drop filter. The designed filter receives the frequencies range from  $f=1.47\text{MHz}$  to  $f=1.51\text{MHz}$  and send them in to one distinct output with high confinement and due to the quasi-periodic structure frequency  $f=1.498\text{MHz}$  is use as the add-drop frequency.

**Keywords:** Phononic crystal, elastic properties, finite element method, ultrasonic filter, brillouin zone.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۹/۷

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۲/۱۹ و ۱۳۹۷/۲/۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۳/۱۹

نام نویسنده مسئول: علی بهرامی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تبریز - شهر جدید سهند - دانشگاه صنعتی سهند - دانشکده مهندسی برق.

## ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر توجهات زیادی نسبت به شبکه‌های بلور فونونی ایجاد شده است و در تعابیر جدید از فونون‌ها به‌عنوان موج‌های آینده یاد می‌کنند و دور از انتظار نیست که در آینده‌ای نه‌چندان دور در بسیاری از کاربردها جایگزین دستگاه‌های نوری و فوتونی شوند. شبکه‌های بلور فونونی<sup>۱</sup> در کنار شباهت‌هایی که به شبکه‌های بلور فوتونی دارند تفاوت‌هایی هم در خواص و نحوه انتشار دارند که منجر به متمایز شدن آن‌ها شده است و قدرت عملکرد و مانور بالاتری را در زمینه‌های مختلف برای کاربر قرار داده است. افزاره‌های نوری گوناگونی بر پایه بلورهای فوتونی طراحی گشته است. این افزاره‌ها با استفاده از نظم موجود در بلورهای فوتونی و طراحی ویژه‌ای در این ساختارها به وجود آمدند و هریک عملکرد متفاوتی متناسب با افزاره موردنظر داشتند که نسبت به افزاره‌های مشابه عملکرد بهتری داشتند و منجر به بهبود پاسخ نهایی در این افزاره‌ها شده بودند [۱،۲].

با معرفی بلورهای فوتونی، افزاره‌های صوتی گوناگون بر پایه این بلورها طراحی و معرفی شدند که در بیشتر موارد نسبت به نوع نوری برتری‌های قابل‌توجهی را دارا بودند. بلورهای فوتونی موادی مصنوعی هستند که از ارتعاشات پریودیک اجزای درون ساختار شبکه خود تشکیل شده‌اند و قابلیت تنظیم ساختار باندهای آن‌ها وجود دارد. بلورهای فوتونی شامل مواد مختلفی هستند که در اجزا و خواص الاستیک تفاوت‌های زیادی دارند. بنابراین انتخاب مواد مناسب برای طراحی یک بلور فونونی بسیار بااهمیت است [۳]. از دیگر ویژگی‌های بلورهای فوتونی جذب الاستیک بالا و شامل شدن ترکیبات مختلف جامد و یا سیال است که استفاده‌های ویژه‌ای در ساختارهای میکروسکوپی در مقیاس فرکانس‌های سونیک و اولتراسونیک دارند. اصلی‌ترین ویژگی یک بلور فونونی قابلیت ایجاد شکاف باند فرکانسی در طیف انتشار است.

با توجه به مشخصات ذاتی ساختارهای بلور فونونی، در صورتی که مواد مناسبی در طراحی ساختار بلور فونونی استفاده شود و نسبت مناسبی نیز برای ابعاد ساختار در نظر گرفته شود، می‌توان انتظار داشت که یک یا چند شکاف باند کامل در ساختار باند بلور فونونی ایجاد شود که این شکاف باندها با توجه به دوره تناوب و جنس مواد استفاده شده قابل تغییر می‌باشند. به بیانی دیگر می‌توان این‌گونه گفت که در بلورهای فونونی تراکم و ثابت الاستیک ساختار به‌صورت متناوب تغییر می‌کند و این تغییر منجر به تغییر سرعت صوت درون بلور می‌گردد و در نتیجه منجر به شکل‌گیری این شکاف باند می‌شود. همان‌گونه که می‌دانیم این موضوع به این معناست که یک بازه فرکانسی مشخص اجازه عبور ندارد ولی فرکانس‌های بالا و پایین آن اجازه عبور خواهند داشت. بدون یک ساختار متناوب سرعت صوتی یک سرعت تعریف شده به‌وسیله عدد پواسن و ماژول یانگ است ولی باوجود ساختار متناوب، فونون‌ها در نزدیکی شکاف باند سرعت کمی پیدا می‌کنند و در نهایت این سرعت به صفر می‌رسد و لذا در شکاف باند

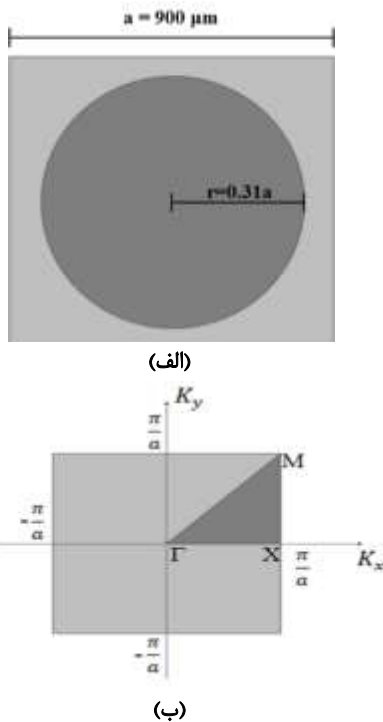
فونونی منتشر نمی‌شود. بنابراین دو شرط کلی برای ایجاد یک شکاف باند تفاوت فیزیکی بالا بین اجزا و شبکه و همچنین درصد تخلخل مناسب برای اجزای درون شبکه است [۴].

بسیاری از کاربردهای بلورهای فوتونی بر پایه قطعات صوتی از پارامتر کیفیت بالای این ماده بهره می‌برند. کاربردها و استفاده‌های مختلف از بلورهای فوتونی که بستگی به نیاز یک پروژه در طراحی مورد استفاده قرار می‌گیرد شامل موارد متفاوتی است. در واقع وجود شکاف باند و توانایی سازمان‌دهی خواص صوتی کمک به ایجاد کاربردهای مختلف می‌کند و لذا کاربردهای متنوعی را می‌توان برای بلورهای فوتونی در نظر گرفت که از آن جمله می‌توان به ایجاد موج‌بر و ایجاد خمش برای هدایت موج [۵]، شکافتن یک موج و تقسیم آن به چند موج [۶]، فیلتر کردن فرکانس‌های مورد نیاز در یک طیف [۷]، تفکیک طول‌موج‌های یک طیف [۸]، آینه‌های صوتی [۹]، عملیات سوئیچ‌زنی [۱۰] و کاربردهایی از این قبیل اشاره کرد.

در این مقاله به‌طور مشخص یک تحقیق تئوری پیرامون یک فیلتر از نوع فزود-فرود<sup>۲</sup> ارائه شده و به بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی پرداخته شده است. در زمینه فیلترهای نوری تحقیقات متفاوتی انجام شده و مقالات گوناگونی نیز ارائه شده است. در زمینه فیلترهای صوتی نیز چند کار صورت گرفته است که اولین نمونه حاصل از تحقیقات فرانک ورمان و همکارانش است که در آن به طراحی یک مالتی پلکسر ۲×۲ در مقیاس مگاهرتز اشاره شده است که می‌تواند به‌صورت یک فیلتر فزود-فرود نیز مورد استفاده قرار گیرد [۱۱]. سپس در سال ۲۰۰۴ یان پنک و همکاران یک فیلتر صوتی بر پایه بلورهای فوتونی با استفاده از آب و استیل طراحی کردند که در مقیاس کیلوهرتز عمل می‌کرد، فیلتر مذکور از نوع فزود-فرود نبود و تنها سازوکار یک فیلتر ساده را دارا بود [۱۲]. سپس در سال ۲۰۰۷ توسط نایدیل لائزیلوتی و همکاران فیلتر صوتی دیگری طراحی شد که بر اساس بلورهای فوتونی نبود و بر پایه ساختارهای لایه‌ای با فیلم نازک طراحی شده بود و در مقیاس تراهرتز عملیات فیلترینگ را انجام می‌داد [۱۳]. در سال ۲۰۱۲ نمونه دیگری از فیلترهای صوتی بر پایه بلورهای فوتونی توسط بابک رستمی و محمد کاظم مروج با استفاده از تنگستن و رزین طراحی شد که نمونه یک فیلتر صوتی با عملکردی مناسب در مقیاس کیلوهرتز بود [۱۴]. تنها نمونه فیلتر صوتی از نوع فزود-فرود بر پایه بلورهای فوتونی در سال ۲۰۱۶ توسط بابک رستمی و محمد کاظم مروج ارائه شد که این فیلتر بر اساس سازوکار عملکرد رزوناتورهای حلقوی طراحی شده بود و در طراحی آن از جیوه و آب استفاده شده بود که عملکرد مناسب خود را در مقیاس کیلوهرتز داشت [۱۵].

لازم به ذکر است که نمونه‌های مشابه فیلترهای فزود-فرود نوری نیز معمولاً بر اساس مکانیزم رزوناتورهای حلقوی طراحی شده است و ساختارهای تقریباً مشابه یکدیگر دارند و تنها تفاوت آن‌ها انجام عملیات در مقیاس‌های متفاوت یا مواد استفاده شده در طراحی است. در این مقاله، ما مواد جدیدی را برای یک ساختار بلور فونونی معرفی شده است و به‌جای استفاده از یک رزوناتور حلقوی که پایه

به بررسی کل ساختار نیست و یک سلول واحد که از تکرار آن کل ساختار تشکیل می‌شود مورد مطالعه قرار می‌گیرد و نتایج حاصل به کل ساختار تعمیم داده می‌شود. شکل ۱ (الف) و (ب) نمایی از سلول واحد و ناحیه بریلیون اول<sup>۳</sup> ساختار بلور فونونی طراحی شده است.



شکل ۱: (الف) نمای کناری از سلول واحد یک بلوری فونونی دوبعدی، (ب) ناحیه بریلیون اول، ناحیه مثلث شکل بیانگر منطقه بریلیون کاهش یافته در نقاط  $\Gamma$ ،  $X$  و  $M$  است که محاسبات در آن صورت می‌گیرد.

با دقت در شکل ۱ (ب) نیز مشخص است که قسمت مثلثی شکل بیانگر ناحیه بریلیون کاهش یافته<sup>۴</sup> است که طبق تقارن چرخشی که ساختار ناحیه بریلیون داراست از تکرار آن کل ناحیه بریلیون ساخته می‌شود. لذا برای حذف جواب‌های تکراری و جلوگیری از حجیم شدن محاسبات، کلیه محاسبات مربوط به ساختار باند پیرامون ناحیه بریلیون کاهش یافته انجام می‌گیرد. با توجه به استفاده از اتانول به عنوان ماده پرکننده میله‌ها که سیال است و همچنین استفاده از باریوم استرانتیوم تایتان برای ساختار شبکه که در حالت جامد است، ساختار بلور فونونی از نوع جامد/سیال محسوب می‌شود و کلیه مدهای حاصل از نوسان (طولی و عرضی) اجازه انتشار خواهند یافت. در واقع برای ساختار جامد/سیال مدهای پیچیده زیادی از ارتعاشات منتشر می‌شود که بخش سیال دارای مد طولی و بخش جامد دارای مد عرضی و طولی است. لذا بهترین روش برای محاسبات مربوط به ساختار باند روش بسط به امواج تخت<sup>۵</sup> (plane wave expansion) است که اجازه‌ی تعریف هر دو مد جامد و سیال را می‌دهد و در ادامه برای شبیه‌سازی و محاسبات مربوط به انتشار امواج صوتی از روش المان محدود<sup>۶</sup> استفاده می‌گردد [۱۶].

اکنون با توجه به مطالب گفته شده، با استفاده از روش بسط به امواج تخت به محاسبه مقادیر ویژه حاصل از برخورد امواج صوتی به

فیلترهای فزود-فرود نوری نیز هست از یک ساختار شبه‌متمقارن برای تقویت و جداسازی یک فرکانس مشخص در محدوده فرکانسی خود استفاده شده است. سپس با استفاده از این ساختار یک فیلتر اولتراسونیک فزود-فرود را طراحی و شبیه‌سازی می‌کنیم که برخلاف فیلترهای قبلی در محدوده مگاهرتز عمل خواهد کرد و حس‌شدگی قوی‌تری دارا است.

## ۲ فرآیند طراحی

با توجه به مفهوم بلورهای فونونی و شرایط مورد نیاز برای ساختاری که بتواند یک باند ممنوعه بزرگ داشته باشد، در این مقاله یک ساختار بلور فونونی دوبعدی و متناوب با چیدمان اجزای  $19 \times 15$  طراحی شده است. بدنه این ساختار یک شبکه مربعی از جنس باریوم استرانتیوم تایتان است که یک نوع سرامیک فرو الکتریک بوده و درون آن چیدمانی از میله‌ها به حالت حبس شده قرار دارد که این میله‌ها نیز با اتانول پر شده است. در این ساختار، ثابت شبکه مقداری برابر با  $970 \mu\text{m}$  دارد و شعاع میله‌ها نیز برابر با  $307 \mu\text{m}$  است. با توجه به انتخاب پارامترهای ساختار در ابعاد میکرومتر، ساختار در نهایت در مقیاس مگاهرتز عمل خواهد کرد. لازم به ذکر است که انتخاب مقیاس ابعاد رابطه مستقیمی با فرکانس‌های نهایی حاصل از ساختار باند دارد و در صورت نیاز به طراحی ساختاری در مقیاس مگاهرتز باید حتماً ابعاد بلور فونونی طراحی شده را در مقیاس میکرومتر تنظیم و طراحی کرد. همچنین با توجه به محدودیت‌های موجود در فرآیند ساخت، امکان طراحی ساختارهای بلور فونونی سیال/سیال در مقیاس گیگاهرتز وجود ندارد.

ابعاد این ساختارها باید در مقیاس میکرومتر و یا میلی‌متر طراحی شود. در رابطه با ساختارهای بلور فونونی جامد/سیال نیز در رابطه با شبکه محدودیتی نیست اما با توجه به این که درون میله‌ها ماده سیال قرار می‌گیرد انتخاب و تنظیم ابعاد محدود می‌شود. به این ترتیب اگر هدف طراحی یک افزاره خاص بر پایه بلور فونونی باشد که در مقیاس گیگاهرتز عملکرد داشته باشد، ساختار طراحی شده باید از نوع جامد/جامد باشد تا با توجه به فرآیندهای ساخت محدودیتی برای طراحی ابعاد ابتدایی آن در مقیاس نانومتر وجود نداشته باشد [۳]. بنابراین ساختارهای جامد/سیال نیز امکان طراحی در مقیاس عملکرد گیگاهرتز را دارا نمی‌باشند. تنها حالت خاص در ساختارهای جامد/سیال که در مقیاس گیگاهرتز امکان طراحی را به کاربر می‌دهند، ساختاری است که یا سوراخ‌های هوایی طراحی گردد و سیال استفاده شده هوا باشد.

با توجه به بلور فونونی طراحی شده، رابطه  $ff = \pi r^2 / a^2$  بیانگر درصد تخلخل است. در این ساختار درصد تخلخل مقداری برابر با  $ff = 0.30$  دارد که این مقدار با تمامی روش‌های ساخت نیز مطابق است. با توجه به متناوب بودن ساختار برای بررسی ساختار باند، نیازی

که در این روابط  $C_{e1}$ ،  $C_{e2}$ ،  $C_{e3}$  و  $C_{B1}$  به ترتیب بیانگر ثابت الاستیک طولی و سرعت صوتی در اتانول و باریوم استرانتیوم تایتان می‌باشند. مشابه با ساختارهای بلور فوتونی، در این حالت انتشار امواج صوتی در ساختارهای بلور فوتونی بر پایه تئوری بلوخ است. لذا با اعمال تئوری بلوخ معادله مقادیر ویژه به صورت رابطه (۹) است.

$$\sum_{G' \neq G} [\Delta \rho^{-1} (K + G) \cdot (K + G') - \Delta (C_{11}^{-1}) \omega^2] \times [F(G - G') P_K(G')] + [\rho^{-1} |K + G|^2 - (C_{11}^{-1}) \omega^2] P_K + (G') = 0 \quad (9)$$

لذا با توجه به بردارهای ویژه  $P_K$  و مقادیر ویژه  $\omega(K)$  دسته‌ای از مقادیر ویژه خطی و همگن به دست می‌آید. لذا ساختار باند بلور فوتونی با اسکن شدن بردار موج  $K$  بر روی لبه‌های ناحیه بریلین کاهش یافته که همان نقاط با تقارن بالا ( $\Gamma, X, M$ ) می‌باشند و همچنین حل معادله (۹) توسط روش بسط به امواج تخت به دست می‌آید [۱۶].

تلفات ساختار بلور فوتونی جامد/سیال طراحی شده که مربوط به تلفات حاصل از پاشندگی و پخش‌شدگی موج پس از برخورد به شبکه جامد بلور فوتونی است با روابط زیر مدل می‌شود [۱۷]:

$$C_c = \omega/k \quad (10)$$

$$k = \omega/c - i \ln(10) \frac{a}{20} \quad (11)$$

$$\rho_c = \rho c^2 / c_c^2 \quad (12)$$

با توجه به روابط (۱۰) تا (۱۲)،  $a$  بیانگر ضریب تلفات ساختار است که مقداری برابر با  $a = 1.23 \text{ dB/m}$  دارد [۱۸]. همچنین در این روابط،  $c_c$  و  $\rho_c$  به ترتیب بیانگر سرعت صوتی و چگالی جرمی ماده سازنده شبکه می‌باشند. در رابطه (۱۱)،  $k$  بیانگر بردار موج است و  $\omega$  نیز بیانگر مقادیر ویژه حاصل شده است. همچنین  $c$  بیانگر سرعت صوتی سیال موجود در میله‌ها است.

معادلات مربوط به انتخاب یک فرکانس برای فیلتر شدن مانند معادلات روابط پارابولیک در انتشار امواج در یک موجر با دیوارهای منعکس‌کننده است [۱۷].

$$f^2 = f_T^2 + c_B^2 (K/2\pi)^2 \quad (13)$$

لازم به ذکر است که معادلات گفته شده پیرو تغییرات مکانی شبکه در اثر ارتعاشات در یک محیط خطی می‌باشند. طبق معادله (۱۰)،  $f$  بیانگر فرکانس صوت و  $k$  بیانگر بردار موج است. همچنین  $CB$  بیانگر سرعت صوت در باریوم استرانتیوم تایتان است. بر این اساس فرکانس جدا شده در شکاف باند نیز از رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود.

$$f_T = c_B / 2d \quad (14)$$

در این رابطه  $d$  بیانگر عرض مؤثر موجر است. با توجه به شکل ۲، مقدار ویژه اولیه ساختار باند، حاصل از برخورد امواج صوتی به ساختار بلور فوتونی باریوم استرانتیوم تایتان/اتانول در دمای اتاق مشخص شده

ساختار بلور فوتونی طراحی شده پرداخته شده. این روش مطابق با ساختار طراحی شده متشکل از میله‌های نامحدود موازی با محور  $z$  است که انتشار امواج را در صفحه  $x$ - $y$  به صورت عادی بررسی می‌کند. کلیه محاسبات انجام شده و شبیه‌سازی‌های صورت گرفته در تعیین نمودارهای ساختار باند با استفاده از نرم‌افزار کامسول صورت گرفته است. همان‌طور که گفته شد، برای ساختار جامد/سیال مدهای پیچیده زیادی از ارتعاشات منتشر می‌شود که بخش سیال دارای مد طولی و بخش جامد دارای مد عرضی و طولی است. با توجه به این که در طراحی ساختار میله‌ای حذف نشده است، لذا امواج صوتی در میله‌ها حبس شده و منتشر می‌شوند. بنابراین با توجه به انتشار امواج طولی در میله‌ها که دارای ماده سیال می‌باشند، روابط پراکندگی صوتی در یک محیط جامد با معادلات حرکت مدل‌سازی شده و نمودار پراکندگی بر اساس مقادیر ویژه محاسبه می‌شود [۱۱]. انتشار امواج در یک ساختار بلور فوتونی دوبعدی بر اساس روابط زیر است [۱۶]:

$$C_{11}^{-1}(r) \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = \nabla \cdot [\rho^{-1}(r) \nabla P], \quad r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (1)$$

طبق معادله (۱)،  $t$  بیانگر زمان،  $\rho$  بیانگر چگالی جرمی و  $C_{11}$  بیانگر ثابت الاستیک طولی است. همچنین  $C_i$  بیانگر سرعت صوتی برای ماده شبکه بوده و  $p$  بیانگر واحد فشار است. با توجه به رابطه (۱) میزان  $\nabla = i \frac{\partial}{\partial x} + j \frac{\partial}{\partial y}$  است. با توجه به متناوب بودن ساختار بلور فوتونی

طراحی شده و معادله بیان شده،  $\rho^{-1}(r)$  و  $C_{11}^{-1}(r)$  به صورت سری فوریه بسط داده می‌شوند و روابط حاصل به صورت روابط (۲) و (۳) می‌شود.

$$\rho^{-1}(r) = \sum_G \rho(G) e^{iG \cdot r} \quad (2)$$

$$C_{11}^{-1}(r) = \sum_G C(G) e^{iG \cdot r} \quad (3)$$

طبق روابط (۲) و (۳)  $G$  بیانگر بردار متقابل شبکه است. با توجه به مواد انتخاب شده برای ساختار بلور فوتونی،  $\rho_B$  و  $\rho_E$  به ترتیب بیانگر چگالی جرمی باریوم استرانتیوم تایتان و اتانول می‌باشند و سری فوریه آن‌ها به شکل روابط (۴) و (۵) است.

$$(G) \equiv \bar{\rho} \equiv [ff \cdot \rho_E^{-1} + (1-ff) \cdot \rho_B^{-1}] \quad \text{for } G = 0 \quad (4)$$

$$\Delta(\rho_E^{-1})F(G) \equiv (\rho_E^{-1} - \rho_B^{-1})F(G) \quad \text{for } G \neq 0 \quad (5)$$

با توجه به میله‌های طراحی شده در ساختار با شعاع  $r = 0.31a$  ثابت ساختار  $F(G)$  به صورت رابطه (۶) نمایش داده می‌شود.

$$F(G) = 2ff \frac{J_1(G_r)}{G_r} \quad (6)$$

در این رابطه  $ff = \pi r^2 / a^2$  بیانگر درصد تخلخل بوده و  $J_1$  تابع توزیع اول بسل است. مشابه با ضرایب فوریه برای چگالی جرمی باریوم استرانتیوم تایتان و اتانول، روابط  $\tau(G)$  بر اساس  $C_{11}^{-1}$  و  $C_{11}^{-1}$  بازنویسی می‌شوند.

$$(G) \equiv \bar{\tau} \equiv [ff \cdot \rho_E^{-1} + (1-ff) \cdot \rho_B^{-1}] \quad \text{for } G = 0 \quad (7)$$

$$\Delta(\rho_E^{-1})F(G) \equiv (\rho_E^{-1} - \rho_B^{-1})F(G) \quad \text{for } G \neq 0 \quad (8)$$

مواد تشکیل‌دهنده ساختار بلور فونونی طراحی شده در این مقاله است [۲۱،۲۲].

جدول ۱: خواص مواد تشکیل‌دهنده ساختار بلور فونونی

دما (°C)	باريوم استرانتيوم تاپتان		اتانول	
	چگالی جرمی ( $\frac{kg}{m^{-3}}$ )	سرعت صوت ( $\frac{m}{s}$ )	چگالی جرمی ( $\frac{kg}{m^{-3}}$ )	سرعت صوت ( $\frac{m}{s}$ )
۲۵	۳۰۵۰	۵۱۳۳	۷۸۵/۲۳	۱۱۱۴/۶۸

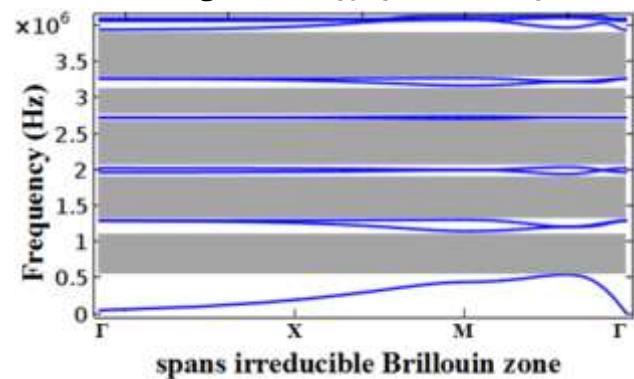
جدول ۲: خواص ماده تشکیل‌دهنده میله نقص‌دار شده

دما (°C)	متیل نانوفلوروبوتیل اتر	
	چگالی جرمی ( $\frac{kg}{m^{-3}}$ )	سرعت صوت ( $\frac{m}{s}$ )
۲۵	۱۵۱۵	۶۰۰/۲

با توجه به جدول ۱ برای یک ساختار بلور فونونی که در حالت جامد/سیال است، چگالی جرمی و سرعت صوت پارامترهای تعیین‌کننده در محاسبات می‌باشند که در صورت وجود اختلاف مناسب بین مقادیر آن‌ها، از ساختار باندهای ممنوعه مناسبی به دست خواهد آمد. البته لازم به ذکر است که هندسه ساختار و انتخاب مقادیر مناسب برای ثابت شبکه و شعاع میله‌های سازنده ساختار نیز در این موضوع مؤثر است. بر اساس ساختار باند بلور فونونی طراحی شده که در شکل ۲ دیده می‌شود، با توجه به این که باند ممنوعه دوم پهنای مناسبی را دارا است، نیاز به یک مد نقص است که اجازه انتشار درون شکاف باند موردنظر ما را داشته باشد. این کار از طریق ایجاد نقص در ساختار بلور فونونی صورت می‌گیرد. این نقص می‌تواند از طریق تغییر ماده، تغییر شعاع میله‌ها، حذف میله‌ها و غیره صورت بگیرد. در این ساختار با تغییر شعاع یکی از میله‌ها به صورت  $r_i = 0.83r$  و همچنین تغییر ماده تشکیل‌دهنده آن میله، یک مد نقص در باند ممنوعه دوم ایجاد شده است. برای ایجاد نقص می‌توان ماده تشکیل‌دهنده میله‌ها را تغییر داد. این ماده باید طوری انتخاب شود که خواص الاستیک آن مثل چگالی جرمی و سرعت صوت، با خواص الاستیک ساختار بلور فونونی تفاوت زیادی داشته باشد، بنابراین در این مقاله متیل نانوفلوروبوتیل اتر انتخاب شده است. اطلاعات این ماده در جدول ۲ جمع‌آوری شده است [۲۳]. به این ترتیب با بررسی ابر سلول واحد طراحی شده با شعاع  $r_i = 0.83r$  و جایگذاری ماده معرفی شده، یک مد نقص متفاوت در باند ممنوعه دوم منتشر می‌شود که ناشی از ایجاد اختلال در نظم ساختار متناوب بلور فونونی طراحی شده است و در شکاف باند موردنظر منتشر می‌شود.

لذا بر اساس مقادیر نشان داده شده در جدول‌های ۱ و ۲ مشخص است که بین خواص الاستیک مواد تشکیل‌دهنده ساختار بلور فونونی و ماده انتخابی به‌عنوان ماده نقص اختلاف عددی زیادی برقرار است که

لازم به ذکر است که محور افقی در نمودار بیانگر نقاط با تقارن بالا یا همان لبه‌های ناحیه بریلیون ( $\Gamma, X, M$ ) می‌باشند.



شکل ۲: ساختار باند محاسبه شده (نمودار پراکندگی) برای ساختار دوبعدی بلور فونونی طراحی شده با ثابت شبکه به مقدار  $a=900\mu m$  و شعاع میله‌ها به مقدار  $r=0.31a$  در دمای اتاق.

همان‌طور که در شکل ۲ دیده می‌شود، تعداد ۵ باند ممنوعه در محدوده مگاهرتز تشکیل شده است که باند سوم دارای پهنای باند بزرگ‌تری نسبت به بقیه باندها است و برای کاربردهای مختلفی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. اصلی‌ترین دلیل شکل‌گیری این باندها، اختلاف زیاد بین خواص الاستیک مواد تشکیل‌دهنده ساختار است. ماده یک سرامیک فرو الکتریک است و در دماهای خاص دچار تغییر فاز در ساختار شبکه شده و این تغییر درجه حرارت منجر به تغییر سرعت امواج صوتی طولی و عرضی و در نهایت تغییر ساختار باند می‌شود. خواص این ماده شدیداً به کسر مولی باریوم وابسته است و این که از چه آلیاژی و چه نسبتی از این سرامیک استفاده شود در میزان عددی مقادیر الاستیک آن تأثیرگذار است. اما ایجاد تغییر در ساختار باند با افزایش درجه حرارت نیازمند شرایط دیگری نیز است.

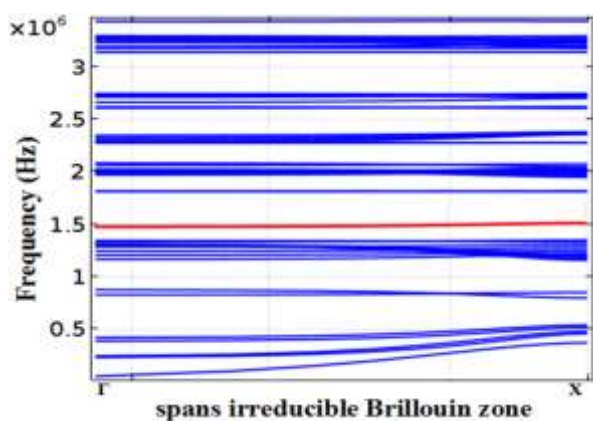
در کاربردهای گوناگونی در بلورهای فونونی در بحث تغییر ساختار باند با تغییر درجه حرارت از این ماده استفاده شده است [۱۸-۱۹]. نکته قابل توجه این است که این تغییرات در ساختار باند زمانی رخ می‌دهد که مواد دیگری که در ساختار بلور فونونی استفاده می‌شوند مثل این ماده تأثیرپذیری از دما داشته باشند و نرخ تأثیرپذیری آن‌ها با دما نیز نسبت به ماده شبکه متفاوت باشد. همچنین این تغییرات به‌ازای افزایش ۱۰ درجه‌ای دما و در دماهای ۳۵ تا ۴۵ درجه سانتی پایه قابل مشاهده است و در دمای اتاق تغییرات خاصی در ساختار باند ایجاد نمی‌کند، لذا با توجه به ماده استفاده شده در کنار این سرامیک در ساختار این مقاله و همچنین طراحی در دمای اتاق، مشکلی در نحوه عملکرد ساختار ایجاد نمی‌شود [۲۰].

در این مقاله با توجه به خواص مشخصی که نیاز بوده است از آلیاژ این سرامیک به نسبت  $Ba_{0.7}Sr_{0.3}TiO_3$  استفاده شده است و مقادیر عنوان شده برای خواص الاستیک این ماده در این مقاله برای این ترکیب مشخص از این سرامیک است. جدول ۱ بیانگر خواص الاستیک

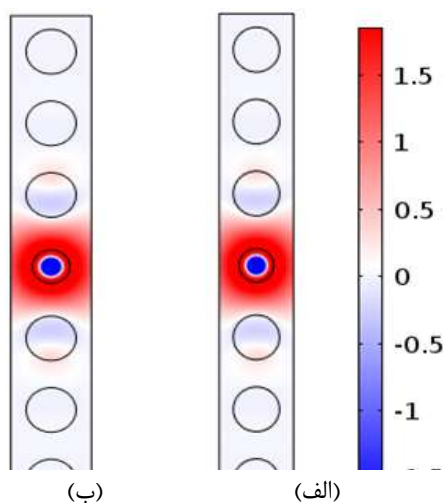
انتخاب شده برای پر کردن میله نقص دار شده، مشاهده می شود که حداکثر توان صوتی در میله نقص دار شده حبس شده است که این شرایط برای طراحی یک فیلتر صوتی بسیار مناسب است.



شکل ۳: ابر سلول واحد طراحی شده برای ساختار بلور فونونی دوبعدی با نقص ایجاد شده در میله مرکزی.



شکل ۴: ساختار باند و مد نقص منتشر شده در باند ممنوعه دوم به ازای افزودن متیل نانوفلوپوتیل اتر برای مد  $k=0$  در فرکانس  $f=1.470\text{MHz}$



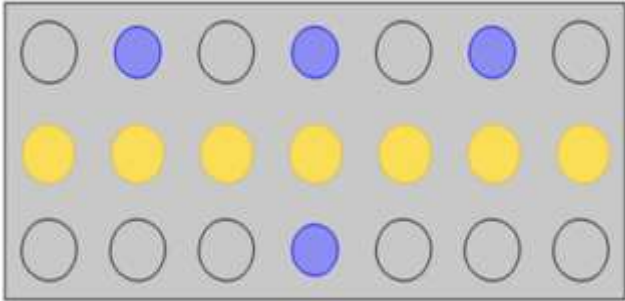
منجر به ایجاد مد نقص می گردد. این موضوع بر اساس تئوری براگ برای بلورهای فونونی مطرح می شود. لذا دو ماده که بین خواص الاستیک آن ها اختلاف قابل توجهی است برای ساختار انتخاب شده اند و ماده انتخابی برای ایجاد نقص نیز باید این ویژگی را شامل شود. بنابراین کارهای قبلی که در این زمینه صورت گرفته نشان می دهد که این اختلاف برای هردو خاصیت تقریباً باید مقداری با ضریب ۲ از دیگری باشد. به همین دلیل از متیل نانوفلوپوتیل اتر استفاده شده است که به صورت تقریبی این شرایط را فراهم می کند. با توجه به خواص این ماده که در جدول ۲ نیز نمایش داده شده است، میزان سرعت صوتی آن نسبت به اتانول تقریباً نصف است و میزان چگالی جرمی آن تقریباً دو برابر مقدار عددی چگالی جرمی اتانول است. با رعایت این موارد، ترکیب مواد انتخاب شده و استفاده شده در طراحی ساختار نیازهای ما از طراحی این پروژه را فراهم کردند. شکل ۳ نشان دهنده ابر سلول واحد طراحی شده با اعمال نقص در میله مرکزی است که در این حالت شعاع میله مرکزی  $r_1 = 0.83r$  است و میله مرکزی با متیل نانوفلوپوتیل اتر پر شده است. انتخاب میله مرکزی برای اعمال نقص، با توجه به نتایج حاصل از تحقیقات مختلف پیرامون ایجاد نقص صورت گرفته شده است که در ادامه به تفصیل بیان می شود [۳].

اکنون با توجه به مواردی که مطرح شد، انتظار می رود که یک مد نقص که حاصل از ایجاد یک نقص در تناوب ساختار است در محدوده باند دوم منتشر بشود. با توجه به بررسی های صورت گرفته پیرامون نتایج حاصل از ایجاد نقص به روش های متفاوت و گوناگون در تناوب شبکه و با توجه به این نکته که این نقص از طریق تغییر در میله مرکزی ساختار طراحی شده برای یک بلور فونونی دوبعدی است، مد حاصل که در شکل ۴ نیز نمایش داده شده است تقریباً در مرکز این باند قرار دارد و به اندازه کافی ایزوله است. لذا این شرایط برای مد انتشار یافته در باند ممنوعه دوم که حاصل از نقص ایجاد شده است، امکان حبس صوت درون میله نقص را به خوبی فراهم می کند و مد مشخص با کمترین نشتی در میله نقص حبس می گردد. به این ترتیب این ویژگی امکان استفاده از این مد برای طراحی کاربردهای مختلف را ممکن می سازد.

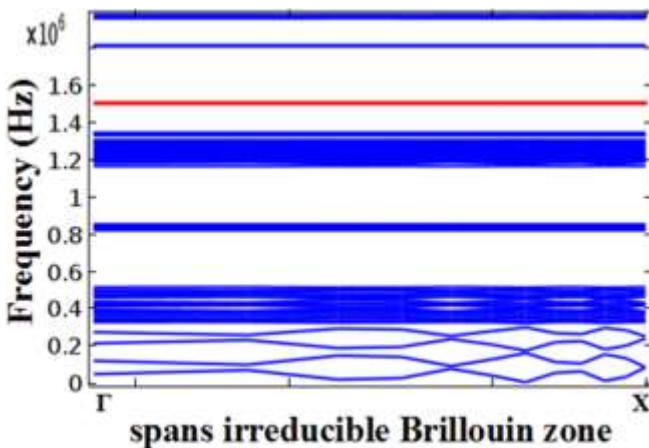
همان طور که در شکل ۴ مشخص است، مد نقص در باند دوم در محدوده فرکانسی  $f=1.47\text{MHz}$  تا  $f=1.51\text{MHz}$  انتشار یافته است و شرایط مناسب برای حبس کامل در میله نقص دار شده را دارا است. همان طور که از نتایج حاصل از ساختار باند نیز مشخص شده بود، مدها به خوبی حبس و هدایت می شوند. شکل ۵ نمایشگر حبس کامل و بدون نشت مد مرکزی حاصل از نقص ایجاد شده با دو ماده استفاده شده است. نتیجه قابل توجه در بررسی مدهای نقص منتشر شده این است که این مدها با یکدیگر همپوشانی ندارند و در بازه های فرکانسی متفاوتی منتشر می شوند. همچنین با توجه به مواد انتخابی برای ساختار و ماده



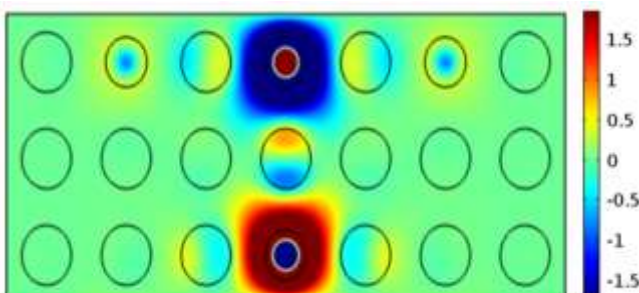
با دقت در شکل ۸ نیز مشخص است که پس از اثر برخورد یک موج اولتراسونیک با فرکانس  $f=1.498\text{MHz}$  به ساختار شبه‌متمقارن طراحی‌شده، این فرکانس در ساختار به‌خوبی حبس می‌شود و میله‌های طراحی‌شده به شکل یک کاواک عمل می‌کنند.



شکل ۵: ساختار بلور فونونی شبه‌متمقارن طراحی‌شده، میله‌های آبی‌رنگ حاوی متیل نانوفلوروبوتیل اتر و با شعاع  $r_{d1} = 0.83r$  می‌باشند. میله‌های زردرنگ حاوی اتانول و با شعاع  $r_{d2} = 0.93r$  می‌باشند.



شکل ۶: نمایش ساختار باند برای ساختار بلور فونونی شبه‌متمقارن طراحی‌شده، یک مد ایزوله و تخت در فرکانس  $f=1.498\text{MHz}$  در شکاف باند سوم انتشار می‌یابد.



شکل ۷: حبس شدگی کامل فرکانس  $f=1.498\text{MHz}$  در ساختار شبه‌متمقارن طراحی‌شده

شکل ۵: حبس‌شدگی کامل مد نقص در میله مرکزی به‌ازای استفاده از اتیل نانوفلوروبوتیل اتر برای (الف) مد  $k=0.5$  در فرکانس مرکزی  $f=1.48\text{MHz}$ ، (ب) مد  $k=0.9$  برای فرکانس  $f=1.51\text{MHz}$

### ۳- طراحی یک ساختار شبه‌متمقارن

ساختارهای شبه‌متمقارن<sup>۷</sup> ساختارهایی هستند که به ساختار بلورهای متمقارن شباهت دارند و خواص تقریباً یکسانی نیز در مقابل با این ساختارها دارند. این ساختارها از یک تناوب خاص در کل ساختار خود پیروی نمی‌کنند و دارای چند تناوب مشخص در یک ساختار منسجم است. یک از اصلی‌ترین ویژگی این ساختارها این است که با یک طراحی مناسب می‌توانند شکاف باندهای با پهنای بزرگ و مدهای نقص بسیار تخت داشته باشند [۲۴]. لذا با انتخاب صحیح مواد سازنده این ساختارها و همچنین طراحی مناسبی از تقارن‌های مختلف، می‌توان یک یا چند مد نقص تخت با قابلیت حبس بالا به دست آورد. با توجه به توضیحاتی که ارائه شد، یک ساختار بلور فونونی دوبعدی با چیدمان اجزای  $3 \times 9$  طراحی‌شده است که در شکل ۶ نمایش داده‌شده است. مقدار ثابت شبکه برابر با مقدار ثابت شبکه ساختار بلور فونونی است که در بخش قبل توضیح داده‌شده است.

بستر این شبکه از باریوم استرانتیوم تایتان است و درون میله‌ها نیز با اتانول و متیل نانوفلوروبوتیل اتر پر شده است. همان‌طور که در شکل ۷ مشخص است، میله‌های آبی با متیل نانوفلوروبوتیل اتر پر شده‌اند و باقی میله‌ها با اتانول پر شده‌اند. شعاع میله‌های اصلی ساختار مقداری برابر با  $r = 300\ \mu\text{m}$  دارد. در این ساختار اولین تقارن به‌صورت خطی در ردیف دوم است که شعاع تمامی میله‌ها (میله‌های زردرنگ) برابر یا  $r_{d2} = 0.93r$  است. همچنین شعاع میله‌های آبی‌رنگ نیز مقداری برابر با  $r_{d1} = 0.83r$  دارا است.

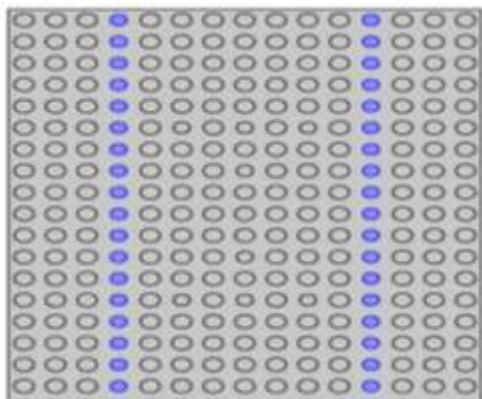
با توجه به مواردی که در طراحی ساختار شبه‌متمقارن لحاظ شد، ساختار باند این ساختار در اثر برخورد با امواج صوتی موردبررسی قرار می‌گیرد که در شکل ۷ نمایش داده‌شده است.

با توجه به شکل ۷، دیده می‌شود که پس از برخورد امواج صوتی با ساختار بلور فونونی طراحی‌شده ۴ باند ممنوعه با پهنای باند مناسب تشکیل شده است که در باند ممنوعه سوم یک مد بسیار تخت و ایزوله در فرکانس  $f=1.498\text{MHz}$  منتشر شده است که دارای کیفیت بالایی نیز است. کیفیت بالای این مد و تخت‌بودن آن منجر به حبس‌شدگی امواج با توان بالا در میله‌های طراحی‌شده می‌شود. این ویژگی برای طراحی یک فیلتر بسیار مفید است و به مقدار زیادی میزان پاشندگی را کاهش داده و منجر به حبس دقیق و انتشار خوب امواج می‌گردد.

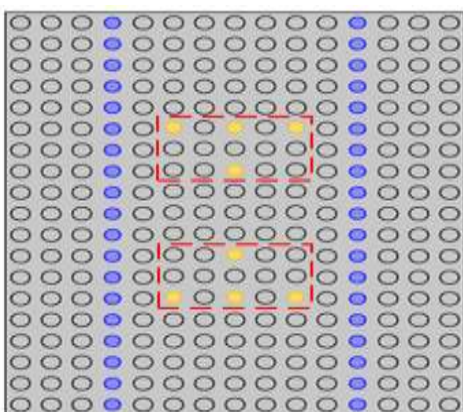
شکل ۸ حبس‌شدگی امواج حاصل از برخورد فرکانس  $f=1.498\text{MHz}$  به ساختار شبه‌متمقارن طراحی‌شده را نمایش می‌دهد.

#### ۴- سازوکار فیلترینگ

بدین ترتیب در ساختار فرکانسی که بر اساس اعمال تئوری بلوخ ۷ و حل معادله (۹) به دست آمده بود چند شکاف باند ایجاد می شود که بر مبنای اصل براگ حاصل شدند. اکنون با اعمال نقص مدهای حاصل از نقص در شکاف باند سوم اجازه عبور پیدا می کنند که با چیدمان این نقص و طراحی یک موج بر فرکانس های متناظر در موج بر طراحی شده منتشر شوند. ساختار موج برهای طراحی شده در شکل ۹ نمایش داده شده است.



شکل ۹: موج برهای طراحی شده در ساختار بلور فونونی برای طراحی یک فیلتر صوتی فزود-فرود (میله های آبی رنگ حاوی متیل نانوفلوروتیل اتر بوده و شعاعی برابر دارند).



شکل ۱۰: ساختار کلی فیلتر صوتی، ناحیه خط چین بیانگر ساختار شبه متقارن طراحی شده است.

شکل ۹ موج برهای طراحی شده در ساختار بلور فونونی را نمایش می دهد، موج برها در ورودی به نحوی طراحی شده اند که تعداد میله های مشخصی بین آن ها قرار داشته باشد تا هم انتشار به خوبی صورت بگیرد و پاشندگی نداشته باشد و هم فضا برای افزودن قسمت های بعدی به ساختار فراهم باشد.

#### ۴-۲- افزودن ساختار شبه متقارن به موج برها

اکنون برای تکمیل طراحی فیلتر مورد نظر، باید ساختار شبه متقارن در مکانی بین دو موج بر طراحی شده قرار گیرد تا پس از این که فرکانس  $f=1.498\text{MH}$  انتشار یافت آن را در کاواک خود حبس کرده و با تقویت این فرکانس، آن را به موج بر کناری کوپل کنند. لذا همان طور

پس از طراحی یک ساختار بلور فونونی با موادی مناسب و به دست آوردن یک مد ایزوله حاصل از ایجاد نقصی مناسب، برای طراحی یک فیلتر نیاز به ساختاری است که از طیف مد حاصل از نقص به وجود آمده یک فرکانس مشخص را جدا کند و باقی فرکانس های آن طیف را عبور دهد. این کار با طراحی یک ساختار شبه متقارن انجام شد و ساختاری طراحی شد که فرکانس  $f=1.498\text{MHz}$  را از میان طیف فرکانس حاصل از نقص ساختار بلور فونونی طراحی شده جدا می کند. لذا برای طراحی یک فیلتر اولتراسونیک فزود-فرود باید ساختار بلور فونونی طراحی شده و ساختار شبه متقارن طراحی شده در قالب یک ساختار واحد طراحی بشوند. این ساختار باید شامل دو موج بر باشد که ورودی یکی از آن ها به عنوان ورودی ساختار فیلتر و خروجی همان موج بر به عنوان خروجی ساختار فیلتر استفاده شود. موج بر دوم هم برای انجام عملیات فزود و فرود مورد استفاده قرار می گیرد.

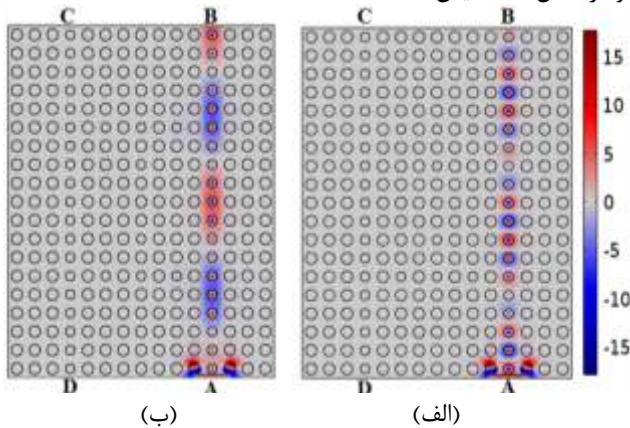
بخش دیگری که در این ساختار وجود دارد بخش ساختار بلور فونونی شبه متقارن طراحی شده است که باید در قسمت مناسبی بین دو موج بر طراحی شده قرار گیرد. محل قرارگیری این بخش در ساختار باید به نحوی انتخاب شود که پس از ورود فرکانس  $f=1.498\text{MHz}$  از ورودی به ساختار اجازه خروج آن از موج بر و خروجی ساختار فیلتر را ندهد و با تقویت این فرکانس، آن را به موج بر کناری کوپل کند و از خروجی بخش موسوم به فرود خارج کند. همچنین باید در سمت دیگر ساختار فیلتر طراحی شده، ساختار شبه متقارن به نحوی قرار بگیرد که در صورت ورود فرکانس  $f=1.498\text{MH}$  به موج بر دوم، اجازه انتشار به این فرکانس را ندهد و پس از مقداری انتشار آن را تقویت کند و به موج بر کناری کوپل کند تا از خروجی اصلی فیلتر خارج شود که این عملیات نیز به اصطلاح عملیات فزود گفته می شود.

#### ۴-۱- طراحی موج بر

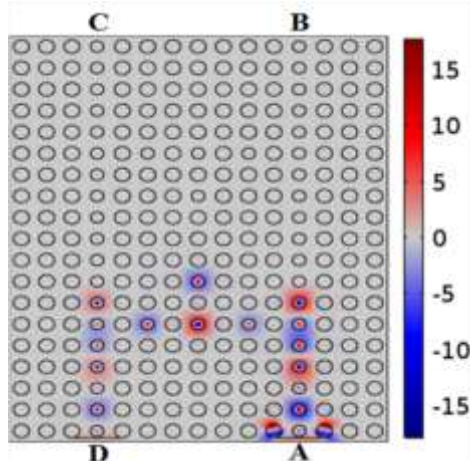
یکی از کاربردهای اصلی یک بلور فونونی ایجاد موج بر به منظور هدایت موج است که در برخی مواقع و کاربردهای خاص برای هدایت موج نیاز به ایجاد خمش نیز وجود دارد. لذا مشخص است که باید نقصی در شبکه بلوری صورت بگیرد تا مد مورد نظر در میان باند ممنوعه انتشار یابد. با توجه به این که هدف این مقاله طراحی یک فیلتر اولتراسونیک است، لذا برای بخش اول ساختار نیاز به موج بری است که امواج ورودی را به خروجی مشخص هدایت کند. این موج بر باید این قابلیت را داشته باشد تا تمام فرکانس های طیف فرکانسی که در ساختار بلور فونونی طراحی شده ما به دست آمده است را به خوبی عبور دهد بنابراین این ویژگی باید از طریق ایجاد یک نقص مناسب در ساختار صورت بگیرد. لذا ساده ترین روش این است که چیدمانی از همان نقصی که در ساختار بلور فونونی باریوم استرانتیوم تایتان/اتانول به دست آمده بود پیاده سازی شود.



فیلتر فزود-فزود وجود دارد، و با توجه به ویژگی ساختار شبه‌مستقران و جدا کردن فرکانس  $f=1.498\text{MHz}$  انتظار می‌رود تا در صورت تحریک این فرکانس در ورودی فیلتر اولتراسونیک طراحی شده (A)، این فرکانس تا انتهای موج‌بر منتشر نشود و به‌جای خروج از خروجی ساختار فیلتر (B)، به موج‌بر کناری کوپل شده و از آن (D) خارج شود. این مرحله بیانگر بخش فزود برای فیلتر اولتراسونیک طراحی شده است و در شکل ۱۲ نمایش داده است.



شکل ۱۱: ساختار کلی فیلتر صوتی و نمایش انتشار فرکانس (الف)  $f=1.47\text{MHz}$ ، (ب)  $f=1.51\text{MHz}$  وقتی ورودی A تحریک می‌شود.



شکل ۱۲: نمایش انتشار موج اولتراسونیک پس از تحریک فرکانس  $f=1.498\text{MHz}$  در ورودی (A) که منجر به کوپل شدن آن به موج‌بر کناری و خروجی آن از قسمت (D) خارج می‌شود.

همان‌طور که انتظار می‌رفت و در شکل ۱۲ نیز مشاهده شد، با تحریک فرکانس  $f=1.498\text{MHz}$  در ورودی (A)، ساختار شبه‌مستقران نقش خود را به‌خوبی ایفا کرد و با جلوگیری از انتشار این فرکانس در طول موج‌بر اول، آن را به موج‌بر کناری کوپل کرد و فرکانس  $f=1.498\text{MHz}$  با شدت مناسبی از بخش (D) خارج شد. اکنون اگر همین فرکانس در بخش (C) تحریک شود توسط ساختار شبه‌مستقران به موج‌بر کناری کوپل شده و از بخش (B) خارج می‌شود که این عملیات بیانگر مرحله فزود در ساختار فیلتر طراحی شده است و در شکل ۱۳ نمایش داده شده است.

که در شکل ۱۰ نیز مشخص شده است، ساختارهای شبه‌مستقران با کمی ارتفاع از دیواره افقی ساختار و قرار دادن سه ردیف میله، در قسمت بالا و پایین ساختار فیلتر صوتی بین دو موج‌بر طراحی شده قرار داده شدند. با توجه به شکل ۱۰ نیز مشاهده می‌شود که ساختار کلی فیلتر صوتی طراحی شده شامل دو موج‌بر است که با میله‌های آبی‌رنگ در تصویر نمایش داده شده‌اند و ساختار شبه‌مستقران طراحی شده نیز در دو قسمت از ساختار نهایی فیلتر جایگذاری شده است. قرارگیری ساختارهای شبه‌مستقران با ۵ ردیف میله فاصله نسبت به دیواره افقی ساختار صورت گرفته است که دلیل آن جلوگیری از پخش‌شدگی و کمک به کوپل مناسب موج در هنگام عملیات فزود و فرود است. انتخاب تعداد میله‌ها مابین دو موج‌بر و همچنین مابین سطح افقی و ساختار، متناسب با دریافت و ارسال مناسب موج با کیفیت بالا و همچنین محدودیت‌های شبیه‌سازی محاسبه شده است.

## ۵- نتایج شبیه‌سازی

با توجه به ساختار کلی که در شکل ۱۰ نمایش داده شده است به بررسی نتایج شبیه‌سازی انتشار امواج پرداخته می‌شود. کلیه محاسبات مربوط به انتشار سطوح فشار امواج منطبق با روش المان محدود است و شبیه‌سازی‌های صورت گرفته با استفاده از نرم‌افزار کامسول انجام شده است. بر اساس این روش دامنه محاسبه شده به تعداد عناصر ساختار بلور فونونی دوبعدی طراحی شده تقسیم می‌شود و سپس مقادیر فشار صوتی بر اساس مقادیر نودال المان‌های طراحی شده در ساختار محاسبه می‌گردد. با توجه به ساختار طراحی شده برای یک فیلتر اولتراسونیک و همچنین با توجه به عملکرد یک فیلتر صوتی از نوع فزود-فزود ورودی موج‌بر سمت راست به‌عنوان ورودی فیلتر انتخاب شده و با حرف A نمایش داده شده است. همچنین خروجی همین موج‌بر نیز به‌عنوان خروجی نهایی فیلتر انتخاب می‌شود که با حرف B نمایش داده شده است. این نام‌گذاری‌ها در شکل ۱۱ مشخص شده است.

با توجه به ساختار فیلتر صوتی طراحی شده و طراحی که برای بلور فونونی صوتی صورت گرفت، در صورتی که ورودی ساختار (A) با فرکانسی در بازه فرکانسی  $f=1.47\text{MHz}$  تا  $f=1.51\text{MHz}$  تحریک شود، موج به خروجی ساختار (B) منتقل می‌شود. برای اثبات این که طراحی بلور فونونی به‌نحوی بوده که انتشار در طول بازه مشخص شده با حبس‌شدگی بالا و بدون تلفات و پاشندگی صورت می‌گیرد، در شکل ۱۱ نحوه انتشار دو فرکانس ابتدا و انتهای بازه فرکانسی موردنظر نمایش داده شده است. در شکل ۱۱ (الف) فرکانس  $f=1.47\text{MHz}$  به‌ازای بردار موج  $k=0$  نمایش داده شده است و در شکل ۱۱ (ب) فرکانس  $f=1.51\text{MHz}$  به‌ازای بردار موج  $k=1$  نمایش داده شده است.

همان‌طور که مشخص شده است هر دو فرکانس از حبس‌شدگی بالایی برخوردار هستند و پاشندگی در مسیر مشاهده نمی‌شود. با توجه به طراحی ساختار شبه‌مستقران، و همچنین شناختی که از عملکرد یک

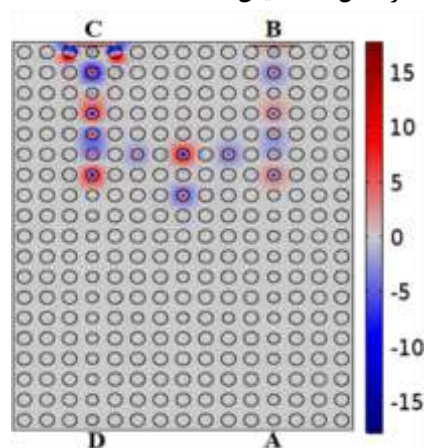
طیف‌های قسمت‌های (C) و (D) نیز مشخص است که فرکانس  $f=1.498\text{MHz}$  به‌عنوان فرکانس فزود از قسمت (C) وارد ساختار می‌شود.

طراحی افزاره‌های گوناگون بر پایه ساختار بلورهای فونونی با تغییر ماده سازنده ساختار که عمدتاً به‌صورت سیال است در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است و این روش که یکی از روش‌های رایج ایجاد نقص در شبکه بلوری است برای تغییر ساختار باند یک بلور که منجر به جابجایی فرکانسی است بسیار مناسب است. بنابراین با توجه به ساختار طراحی شده و انتخاب دو ماده سیال مناسب یک فیلتر صوتی فزود-فرود در دمای اتاق طراحی شد که با توجه شبیه‌سازی‌های صورت گرفته نشستی و پاشندگی ندارد و دارای کیفیت مناسبی است. به‌عنوان کاربرد ویژه این افزاره نیز در کنار مدارات مجتمع که به‌شدت در طراحی آن‌ها از فیلترهای صوتی استفاده می‌شود، یکی از کاربردهایی که امروزه توسط فیلتر اولتراسونیک مورد بهبود واقع شده است کاربرد آزمون کیفیت قطعات بر اساس ساختارهای غیر مخرب (Nondestructive testing) است. آزمون‌هایی که بدون این‌که به قطعات آسیبی برسانند میزان کیفیت آن‌ها را برای کاربر معین می‌کنند. دسته‌ای از این دستگاه‌ها بر پایه امواج اولتراسونیک است و از سوئیچ‌ها و فیلترهای صوتی در آن‌ها استفاده زیادی می‌گردد.

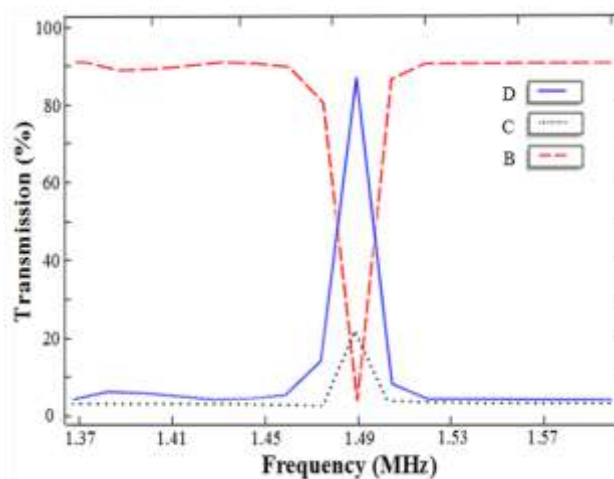
## ۶ نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از موادی مناسب که اختلاف بالایی در خواص الاستیک خود داشتند، یک ساختار بلور فونونی دوبعدی طراحی شده است و ساختار باندی حاوی باندهای ممنوعه مطلق و با پهنای باند مناسب در مقیاس مگاهرتز به‌دست آمده است. سپس با ایجاد نقص‌های مناسب در ساختار بلور فونونی طراحی شده که از طریق تغییر ماده تشکیل‌دهنده میله مرکزی و شعاع آن میله صورت گرفت، مدهایی در یکی از باندهای ممنوعه عبور داده شده است که با درصد مناسبی در میله مرکزی حبس‌شدگی داشتند و دچار پاشندگی و نشستی نشدند. سپس با طراحی یک ساختار شبه‌متقارن با خواص و ساختمانی نزدیک به بلور فونونی طراحی شده، یک مد تخت به‌دست آمده است. با استفاده از خاصیت جذب بالای ساختار شبه‌متقارن و تلفیق ساختارهای ارائه شده در یک ساختار واحد، یک فیلتر صوتی اولتراسونیک از نوع فزود-فرود برای بازه فرکانسی  $f=1.47\text{MHz}$  تا  $f=1.51\text{MHz}$  گزارش شده است که در این بازه فرکانس  $f=1.498\text{MHz}$  نیز به‌عنوان فرکانس مشخص برای عملیات فزود و فرود مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین با طراحی یک ساختار دوبعدی بلور فونونی یک فیلتر صوتی اولتراسونیک از نوع فزود-فرود در مقیاس مگاهرتز ارائه شده است که در دمای اتاق عملکرد مناسبی دارد.

همان‌گونه که انتظار می‌رفت و در شکل ۱۳ نیز مشاهده شد، با تحریک فرکانس  $f=1.498\text{MHz}$  در ورودی (C)، ساختار شبه‌متقارن نقش خود را به‌خوبی ایفا کرد و با جلوگیری از انتشار این فرکانس در طول موج‌بر دوم، آن را به موج‌بر کناری کوپل کرد و فرکانس  $f=1.498\text{MHz}$  با شدت مناسبی از بخش (B) خارج می‌شود که این عملیات بیانگر مرحله فزود در ساختار فیلتر طراحی شده است. نمودار طیف عبوری بخش‌های مختلف در ساختار بلور فونونی دوبعدی طراحی شده در شکل ۱۴ نمایش داده شده است.



شکل ۱۳: نمایش انتشار موج اولتراسونیک پس از تحریک فرکانس  $f=1.498\text{MHz}$  در ورودی (C) که منجر به کوپل شدن آن به موج‌بر کناری و خروجی آن از قسمت (B) خارج می‌شود.



شکل ۱۴: نمایش نمودار انتشار موج اولتراسونیک برای قسمت‌های B، C و D (پورت فرود) برای فیلتر فزود-فرود طراحی شده بر پایه بلور فونونی دوبعدی.

طیف‌های رسم شده برای قسمت‌های مختلف ساختار در شکل ۱۴ نمایش داده شده است. در صورتی که ورودی ساختار (A) با فرکانسی بازه فرکانسی  $f=1.47\text{MHz}$  تا  $f=1.51\text{MHz}$  تحریک شود، در طیف قسمت خروجی (B) یک پیک در فرکانس  $f=1.498\text{MHz}$  ایجاد می‌شود که بیانگر این موضوع است که این فرکانس در قسمت خروجی (B) منتشر نشده و فیلتر شده است و مطابق با طیف عبور قسمت (D) به‌عنوان فرکانس فرود از قسمت (D) خارج می‌شود. با توجه به

مراجع

- [1] سعید سید طاهری و علی‌رضا عندلیب، «طراحی و ایتافتگرهای مبتنی بر بلورهای فوتونی با قابلیت تواناسازی مناسب برای سامانه‌های مخابرات نوری»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۷، شماره ۲، ۱۳۹۶.
- [۲] اشکان قنبری، علی صدر و مهران نیکو، «بیشینه‌سازی ضریب فشردگی و پهنای باند پالس‌های نوری با استفاده از چرپ فرکانسی در فیبرهای فوتونیک کریستال»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۳، شماره ۲، ۱۳۹۲.
- [3] A. Khelif and A. Adibi, "Phononic Crystals" Springer, New York, 2016.
- [4] M S. Mohammadi, A. A. Eftekhar, A. Khelif, W. D. Hunt and A. Adibi, "Evidence of large high frequency complete phononic band gaps in silicon phononic crystal plates," *Applied Physics Letters*, vol.92, no.22, pp. 221905-3, 2008.
- [5] J A. Khelif, A. Choujaa, S. Benchabane, B. Djafari-Rouhani and V. Laude, "Guiding and bending of acoustic waves in highly confined phononic crystal waveguides," *Applied Physics Letters*, vol. 84, no. 22, pp. 4400-4402, 2004.
- [6] Q. Zou, T. Yu, T. Wang, N. Liu, Q. Liao and X. Xu, "Novel 1x N ultrasonic power splitters based on self-imaging effect of phononic crystal waveguide arrays," *Journal of Applied Physics*, vol. 119, no. 8, pp. 084509-7, 2016.
- [7] C. Qiu, Z. Liu, J. Mei and J. Shi, "Mode-selecting acoustic filter by using resonant tunneling of two-dimensional double phononic crystals," *Applied Physics Letters*, vol. 87, no. 10, pp. 104101-3, 2005.
- [8] Y. Pennec, B. Djafari-Rouhani, J. O. Vasseur, A. Khelif and P. A. Deymier, "Tunable filtering and demultiplexing in phononic crystals with hollow cylinders," *Physical Review E*, vol. 69, no. 4, pp. 046608-6, 2004.
- [9] A. C. Hladky-Hennion, J. O. Vasseur, S. Degraeve, C. Granger and M. De Billy, "Acoustic wave localization in one-dimensional Fibonacci phononic structures with mirror symmetry," *Journal of Applied Physics*, vol. 113, no. 15, pp. 154901-7, 2013.
- [10] R. Ganesh and S. Gonella, "From modal mixing to tunable functional switches in nonlinear phononic crystals," *Physical review letters*, vol. 114, no. 5, pp. 302-307, 2015.
- [11] F. Wehrmann, C. Harizi, H. Herrmann, U. Rust, W. Sohler, and S. Westenhofer, "Integrated optical, wavelength selective, acoustically tunable 2/spl times/2 switches (add-drop multiplexers) in LiNbO/sub 3," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 2, no. 2, pp. 263-269, 1996.
- [12] Y. Pennec, B. Djafari-Rouhani, J. O. Vasseur, A. Khelif and P. A. Deymier, "Tunable filtering and demultiplexing in phononic crystals with hollow cylinders," *Physical Review E*, vol. 69(4), pp. 608-614, 2004.
- [13] N. D. Lanzillotti-Kimura, A. Fainstein, B. Jusserand, A. Lemaitre, O. Mauguin and L. Largeau, "A periodic thin film filters for acoustic phonons," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 92(1), pp. 121-125, 2007.
- [14] B. R. Dogolsara, A. Abdollahi and M. K. Moravvej-Farshi, "Designing Acoustic Filters on 2D Phononic Crystal Platforms," In *The 2th International Conference on Acoustic and Vibration*, pp. 26-27, 2012.
- [15] B. Rostami-Dogolsara, M. K. Moravvej-Farshi, and F. Nazari, "Acoustic add-drop filters based on phononic crystal ring resonators," *Physical Review B*, vol. 93, no. 1, pp. 1468-1473, 2016.
- [16] M. S. Kushwaha and P. Halevi, "Giant acoustic stop bands in two-dimensional periodic arrays of liquid cylinders," *Applied Physics Letters*, vol. 69(1), pp. 31-33, 1996.
- [17] D. T. Blackstock, "Fundamentals of physical acoustics" Wiley, New Jersey, 2000.
- [18] V. A. Moreno-Gobbi, D. Garcia, J. A. phase Eiras and A. S. Bhalla, "Study by ultrasonic techniques of the diagram of BST ceramic family mainly for high Sr concentrations," *Ferroelectrics*, vol. 337(1), pp. 197-206, 2006.
- [19] A. Khelif, B. Djafari-Rouhani, J. O. Vasseur, P. A. Deymier, P. Lambin and L. Dobrzynski, "Transmittivity through straight and stublike waveguides in a two-dimensional phononic crystal," *Physical Review B*, vol. 65(17), pp. 163-168, 2002.
- [20] V. Rajenderan, N. Palanivelu, P. Palanichamy, T. Jayakumar, B. Raj and B. K. Chaudhuri, "Ultrasonic characterisation of ferroelectric BaTiO3 doped lead bismuth oxide semiconducting glasses," *Journal of non-crystalline solids*, vol. 296(12), pp. 39-49, 2001.
- [21] K. L. Jim, C. W. Leung, S. T. Lau, S. H. Choy and H. L. W. Chan, "Thermal tuning of phononic bandstructure in ferroelectric ceramic/epoxy phononic crystal," *Applied Physics Letters*, vol. 94(19), pp. 350-352, 2009.
- [22] W. Wilson, and D. Bradley, "Speed of sound in four primary alcohols as a function of temperature and pressure," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 36, no. 2, pp. 333-337, 1964.
- [23] M. M. Pineiro, F. Plantier, D. Bessieres, J. L. Legido and J. L. Daridon, "High-pressure speed of sound measurements in methyl nonafluorobutyl ether and ethyl nonafluorobutyl ether," *Fluid phase equilibria*, vol. 36, no. 15, pp. 297-302, 2004.
- [24] A. L. Chen, Y. S. Wang, Y. F. Guo and Z. D. Wang, "Band structures of Fibonacci phononic quasicrystals," *Solid State Communications*, vol. 145(3), pp. 103-108, 2008.

زیرنویس‌ها

- <sup>۱</sup> Phononic crystal  
<sup>۲</sup> Add-Drop  
<sup>۳</sup> Brillouin zone  
<sup>۴</sup> Irreducible Brillouin zone  
<sup>۵</sup> Plane Wave expansion  
<sup>۶</sup> Finite element  
<sup>۷</sup> Bloch -theorem