

## اثر تقارن بر ساختار نواری بلور فونونی دو-بعدي

حمداالله صالحی\*، محمد صباييان، سيده فردوس شجاعی نژاد

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه شهید چمران اهواز

### چکیده

در این مطالعه، سه نوع بلور فونونی دو-بعدي شامل میله‌های فولادی با سطح-مقطع دایره‌ای، مربعی و مثلثی در ماده زمينه-آب، بررسی شدند. ساختار نوار بسامدی برای مد  $x-y$ ، با به کارگیری شیوه عنصر متناهی محاسبه شد. آنچه نتایج نشان دادند این است که برای بلورهای فونونی با سطح-مقطع دایره‌ای و مثلثی گاف کامل و جزئی، و برای سطح-مقطع مربعی تنها گاف جزئی ظاهر شدند. بیشترین شدت نقطه کانونی برای بلور فونونی با انواع سطح-مقطع‌های استوانه، به ترتیب در بسامدهای ۱/۱۵، ۱/۱۱ و ۱/۲۶ مگاهرتز اتفاق افتاد. اثر تغییر فاصله منبع نسبت به ورقه، اثر تغییر ضخامت ورقه بر شدت نقطه کانونی و فاصله نقطه کانونی نسبت به منبع تحت بررسی قرار گرفتند. در کل نتایج به دست آمده در این مطالعه با دیگر نتایج موجود سازگاری خوبی دارند.

**کلیدواژه‌ها:** بلورهای فونونی، گاف نواری، شبیه‌سازی.

### ۱. مقدمه

بلورهای فونونی، وجود گاف<sup>۱</sup> در ساختار نوار بسامدی امواج عبوری از آن‌ها است. گاف، محدوده‌ای از بسامد یا طول موج می‌باشد که در آن محدوده، امواج نمی‌توانند از ساختار عبور کنند. بلورهای فونونی که دارای گاف کامل هستند، برای امواج با بسامدی در بازه گاف، همانند آینه‌های کامل هستند. به عبارت دیگر امواجی که بسامد آن‌ها در محدوده گاف است، امکان نفوذ در بلور را ندارند [۳-۴]. بلورهای فونونی با توجه به خواص تناوبی آن و همچنین در بازه‌های بسامدی مختلف دارای کاربردهای متفاوتی هم‌چون صافی‌های (فیلترهای) صوتی، موج‌برها، عامل استهلاک امواج زمین‌لرزه، موج‌شکن در سواحل دریا و اقیانوس‌ها هستند. بلورهای فونونی در کاهش امواج فروصدا نیز کاربردهای فراوان دارند. این امواج با بسامدهایی کم‌تر از ۲۰ هرتز، شامل امواج زلزله، امواج دریا و اقیانوس‌ها می‌باشند. یک بلور فونونی با ابعادی مناسب حدود سانتی‌متر-متر، باعث استهلاک امواج فروصدا می‌شود. در واقع، تحقیق روی ساختار بلورهای فونونی در سال ۱۹۹۲ با کار نظری مایکل سیگالاس<sup>۲</sup> و همکاران شروع شد. آن‌ها گاف نواری کامل فونونی را

در سه دهه اخیر، انتشار امواج در ساختارهای تناوبی و مرکب به طور گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. این تحقیقات شامل ساختارهای متفاوتی از مواد جاسازی شده در زمینه‌های مختلف می‌باشند که با استفاده از روش‌های گوناگون مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. بلورهای فونونی ساختارهای مصنوعی جدیدی می‌باشند که دارای ساختار تناوبی هستند و انقیاد (کنترل) امواج مکانیکی مانند صدا و امواج کشسان را ممکن می‌سازند [۱-۲]. ابعاد در بلورهای فونونی، بسیار بزرگ هستند. ابعاد این ساختارها می‌توانند از چند متر تا چند صد نانومتر یا کم‌تر تغییر کنند. در این ابعاد، مواد به صورت پیوسته مطالعه می‌شوند و مکانیک کلاسیک برای مطالعه آن مناسب است. تفکر اصلی در بلورهای فونونی ساختن یک ساختار تناوبی مصنوعی (اصطناعی)، حداقل با به کارگیری دو ماده مختلف است. پایه‌ها در بلورهای فونونی دو-بعدي، استوانه‌هایی هستند که به صورت شبکه مربعی، مثلثی یا دیگر شبکه‌های دو-بعدي در ماده‌ای با ثابت‌های صوتی (یا کشسانی) متفاوت چیده شده‌اند. مهم‌ترین ویژگی

<sup>1</sup> Gap

<sup>2</sup> Michael Sigalas

\* نویسنده پاسخگو: salehi\_h@scu.ac.ir

اول و دوم با استفاده از روش بسط موج تخت، یک بلور فونونی دو-بعدی از شبکه مثلثی شامل استوانه‌های فولادی در ماده زمینه هوا را در نظر گرفتند، و وابستگی جهت شکست به بسامدها و زوایای برخوردی را محاسبه کردند [۱۲]. در سال ۲۰۰۹، ایوانسن محاسبات ساختار نواری بلورهای فونونی ورقه‌ای دو-بعدی را با استفاده از روش پراکندگی چندلایه انجام داد [۱۳].

هم‌چنین در سال ۲۰۱۲، ژانگ<sup>۶</sup> و همکاران، بلورهای فونونی دو-بعدی با تقارن‌های متفاوت را در نظر گرفتند. آن‌ها براساس اثر شکست منفی دوگانه صوتی محدوده شکست منفی برای بسامدهای ۰/۸ تا ۱/۰۵ هرتز را به دست آوردند [۱۴]. لذا، برای اطلاع بیشتر بر روی کارهای انجام شده در مورد بلورهای فونونی می‌توان به مراجع [۱۵-۱۸] مراجعه نمود. علاوه بر این، ساختار نواری؛ ضرائب جذب و تراگسیل بلورهای فونونی یک- و دو-بعدی با استفاده از روش بسط امواج تخت توسط صالحی و همکاران در سال ۲۰۱۸ مورد بررسی قرار گرفتند. آن‌ها نشان دادند که گاف‌های نواری پهن جزیی در بسامدهای پایین‌تر برای بلور فونونی دو-بعدی وجود دارند. این بلورها در بعضی جهت‌ها عایق‌های بسیار خوبی هستند و می‌توانند در عایق‌بندی استحکامات مورد استفاده قرار گیرند. اما، بلورهای فونونی یک-بعدی دارای گاف نواری کامل هستند. نتایج نشان دادند که در بلورهای فونونی یک-بعدی جذب صدا ضعیف و انتقال به‌خوبی انجام می‌شود، پس استفاده از آن‌ها به عنوان عایق مناسب نمی‌باشد [۱۹].

## ۲. مواد و روش‌ها

با فرض این‌که محیط‌های تناوبی مورد مطالعه در این کار، متشکل از دو ماده باشند؛ امواج در محیط‌های متناوب به علت شرایط مرزی، جفت شده هستند. محاسبات با استفاده از شیوه عنصر متناهی (ش‌ع‌م-اف‌ئی‌ام)<sup>۷</sup>، انجام شدند. اساس کار در این روش حذف کامل معادلات افتراقی (دیفرانسیل) یا ساده‌سازی آن‌ها به معادلات افتراقی (دیفرانسیل) معمولی است، که با روش‌های عددی

بررسی کردند و نشان دادند که ساختارهایی با شبکه متناوب سه-بعدی متشکل از کره‌های یکسان با چگالی بالاتر نسبت به ماده زمینه، گاف فونونی بالاتری دارند. این ساختار می‌تواند جامد-جامد یا سیال-سیال باشد. با توجه به این‌که موج صوتی درون سیالات فقط با یک نوع سرعت (سرعت طولی) منتشر می‌شود، سیگلاس و اکونومو<sup>۱</sup> پیش‌بینی کردند که گاف نواری کامل فونونی باید در هر دو مورد وجود داشته باشد. جدا از این‌کار، مانوویر کاشوواها<sup>۲</sup> و همکاران، در سال ۱۹۹۳ وجود گاف نواری فونونی برای موج کشسان قطبیده در سامانه کشسان دو-بعدی را تأیید کردند [۵]. اولین نمونه عملی که ویژگی‌های صوتی ساختارهای تناوبی را نشان داد، توسط فرانسیسکو مسجر<sup>۳</sup> و همکاران ساخته شد. این ساختار دارای آرایه تناوبی مربعی از استوانه‌های فولادی توخالی است و شدت عبور صدا را به‌عنوان تابعی از بسامد مطالعه کردند. آن‌ها متوجه شدند موج صوتی که در جهت عمود بر محورهای استوانه‌ها تابیده می‌شود، در بسامد ۱۶۷۰ هرتز به شدت بازتاب می‌شود. این اولین مشاهده تجربی وجود گاف در ساختارهای دوره‌ای بود [۶]. در سال ۲۰۰۵، لیو<sup>۴</sup> و همکاران، ساختار نوار بسامدی را در یک بلور فونونی دو-بعدی متشکل از شبکه شش‌گوشه (هگزگونال) شامل استوانه‌های فولادی در ماده زمینه هوا مورد بررسی قرار دادند [۷]. علاوه بر این، در سال ۲۰۰۶، فنگ و همکاران، با در نظر گرفتن یک بلور فونونی دو-بعدی متشکل از شبکه مثلثی شامل استوانه‌های فولادی در ماده زمینه هوا و با محاسبه ساختار نوار بسامدی و سطوح هم‌بسامد نوار دوم توانستند شکست منفی صوتی با اثر انتشار موج عقب‌سو<sup>۵</sup> را به‌طور نظری و تجربی مورد بررسی قرار دهند [۸-۱۰]. در سال ۲۰۰۷، لیو و همکاران با در نظر گرفتن یک بلور فونونی دو-بعدی متشکل از شبکه مربعی شامل استوانه‌های فولادی در ماده زمینه آب، ساختار نوار بسامدی را به دست آوردند [۱۱]. در سال ۲۰۰۸، چن و همکاران برای محاسبه سطح هم‌بسامد نوار

<sup>1</sup> Economou

<sup>2</sup> Kushwaha

<sup>3</sup> Francisco Meseguer

<sup>4</sup> Liu

<sup>5</sup> Backward

<sup>6</sup> Xiandong Zhang

<sup>7</sup> FEM; Finite Element Method

تکه‌ای<sup>۱</sup> نامیده می‌شوند. ضرائب توابع تکه‌ای براساس مقدار تابع روی نقاط شبکه نوشته می‌شوند و مجهول‌های مسئله را تشکیل می‌دهند. هم‌چنین با این نرم‌افزار، می‌توان با تغییر اندازه سامانه، شرایط عملیاتی و شرایط مرزی به تجزیه و تحلیل رفتار سامانه پرداخت و رفتار سامانه را برای حالت بهتر پیش‌بینی نمود. شبیه‌سازی به ما اجازه پیش‌بینی رفتار یک سامانه یا فرآیند را به وسیله روابط پایه‌ای مانند موازنه جرم، انرژی و اندازه حرکت، معادلات حرکت و شیمیایی می‌دهد.

### ۳. نتایج

در این مطالعه ساختار نوار بسامدی مربوط به مد  $x-y$  برای بلوری با شبکه مربعی و پایه‌هایی با هندسه‌های مختلف، شامل استوانه‌هایی با سطح-مقطع دایره، مربع و مثلث محاسبه و اثر تغییر تقارن بر پیدایش و پهنای گاف بررسی می‌شود. محاسبات با استفاده از نرم‌افزار کامسول مولتی‌فیزیک که اساس آن شیوه عنصر متناهی می‌باشد، انجام شده‌اند.

بلور فونونی شامل پایه‌های استوانه‌ای شکل فولادی در ماده زمینه آب است. فولاد با توجه به ویژگی‌های بسیار مفید آن مانند: فراوانی، ضد حریق، مقاوم در برابر خوردگی، میزان پایین زنگ‌زدگی پایین، شکل‌پذیری و غیره، این بلور را برای کاربردهای بسیاری مانند مهار نوفه و ارتعاش در سفینه‌ها، خودروها، ماشین‌ها و ساختمان‌ها قابل استفاده می‌کند. برای محاسبه ساختار نواری کافی است که ناحیه بریلوئن غیرقابل کاهش در نظر گرفته شود. هم‌چنین، باید توجه نمود که وجود استوانه‌هایی با هندسه‌های متفاوت سطح-مقطع با شبکه، باعث کاهش تقارن شده و بنابراین ممکن است که ناحیه بریلوئن غیرقابل کاهش با تغییر شکل این سطح-مقطع‌ها تغییر کند. ولی، در مورد سطح-مقطع مثلثی به علت این که دارای تقارنی متفاوت یا کم‌تر از شبکه مربعی است، ناحیه بریلوئن غیرقابل کاهش نیز تغییر می‌کند. البته، لازم به ذکر است که تقارن  $-k \rightarrow k$  به علت عدم تغییر معادله تحت وارونی زمان، حتی اگر خود بلور این تقارن نداشته

مثل اویلر حل می‌شوند [۲۰]. این روش می‌تواند در حل معادلات افتراقی (دیفرانسیل) جزئی روی دامنه‌های پیچیده و یا در حالت دامنه متغیر به کار آید. علاوه بر این، شیوه عنصر متناهی زمانی که دقت بالا در همه جای دامنه نیاز نباشد و یا در صورت عدم همبستگی و یکنواختی نتایج، بسیار مفید می‌باشد.

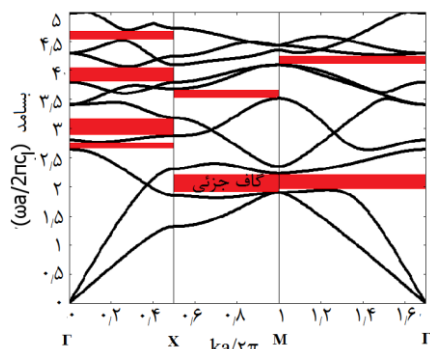
هم‌چنین، در محاسبات از نرم‌افزار کامسول و کامسول اسکریپت، که اساس آن شیوه عنصر متناهی می‌باشد، استفاده شده است. در اینجا با استفاده از این نرم‌افزار و تعریف منطقه اول بریلوئن، به دست آوردن یک مقدار ویژه از بسامد و سپس محاسبه ساختار نوار بسامدی مد نظر است، که با یافتن منطقه کاهش‌ناپذیر در فضای معکوس و طی کردن محیط این منطقه، این ساختار به دست می‌آید. با اعمال شرایط مرزی جدید و تعریف کدنویسی‌های مناسب، می‌توان ساختار نوار بسامدی را به دست آورد [۲۱]. هم‌چنین، در نرم‌افزار کامسول می‌توان الگوی فرآیند یا سامانه مورد نظر را شبیه‌سازی و با نتایج حاصله، رفتار سامانه را مورد بررسی قرار داد. در ساختار کامسول مولتی‌فیزیک الگوهای برای محدوده وسیعی از مسائل وجود دارند. برای این منظور، مدول‌هایی در نرم‌افزار طراحی شده‌اند. این مدول‌ها از اصطلاحات فنی و روش‌های خاصی برای ایجاد یک هماهنگی خاص در جهت ساده‌سازی و تجزیه و تحلیل الگوها استفاده می‌نمایند. نرم‌افزار کامسول شامل مدول‌های جریان مستقیم و متناوب، الگوی صوتی، مدول مهندسی شیمی، مدول علوم زمین، مدول انتقال حرارت، مدول بسامد رادیویی و مدول ساختار مکانیکی است. در این جا از مدول صوتی (که محیط مناسبی برای الگوسازی صدا در سیالات و جامدات فراهم می‌آورد) و مدول ساختار مکانیکی (که به حل مسائل در حیطه ساختار مکانیکی و مکانیک جامدات با اضافه نمودن عناصر خاص مانند عناصر پرتو، صفحه و پوسته برای ساده‌سازی در مهندسی می‌پردازد) استفاده شده است.

در واقع، شیوه عنصر متناهی براساس افراز دامنه مسئله به زیردامنه‌های کوچک‌تر به نام عنصر و تقریب‌زدن مقدار تابع روی این عنصرها به صورت یک تابع ساده که معمولاً خطی یا چندجمله‌ای است، می‌باشد. این توابع، توابع

<sup>1</sup> Piecewise

سوم و چهارم است. این نشان دهنده عایق صوتی بلور در تمام جهتها برای بازه بسامد گاف نواری کامل است که در این ساختار بین بسامد بهنجارشده ۱/۸۸۶۶ و ۲/۳۹۲۹ است، و همچنین پهناي آن ۰/۵۰۶۳ می باشد.

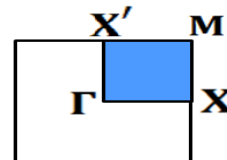
در شکل ۳ ساختار نواری بسامدی ۱۰ نوار اول برای استوانه‌هایی با سطح-مقطع مربعی در راستای خطوط با تقارن بالای X، M و  $\Gamma$ ، نشان داده شده است. در این ساختار فقط گاف‌های جزئی وجود دارند و گاف کاملی ظاهر نشده، زیرا گافی در تمام جهتها ندارد. همچنین، بیشینه بسامد در این ساختار نسبت به حالت قبل بالاتر است.



شکل ۳ نمایش ساختار نواری بسامدی همراه با گاف‌های جزئی برای استوانه‌هایی با سطح-مقطع مربع.

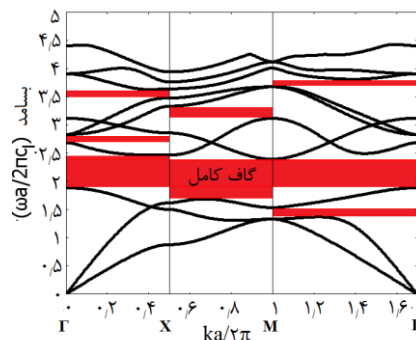
در شکل ۴ ساختار نواری بسامد ۱۰ نوار اول برای استوانه‌هایی با سطح-مقطع مثلث متساوی‌الساقین در راستای خطوط با تقارن بالای X، M و  $\Gamma$  به دست آمده‌اند، نشان داده شده است. این ساختار مانند حالت اول گاف‌های جزئی و کلی نیز دارد، گاف نواری کامل (در بازه بسامدی بین ۲ تا ۲/۵) بین نوار سوم و چهارم در این بلور وجود دارد. گاف نواری کامل در این ساختار بین بسامد بهنجارشده ۲/۱۷۲۱ و ۲/۵۲۸۶ است، و همچنین پهناي آن ۰/۳۵۶۵ می باشد. اکنون با در نظر گرفتن تقارن‌های شبکه مربعی، ساختارهایی با سطح-مقطع دایره و مربع از کل تقارن‌های شبکه پیروی می کنند. اما، ساختار با سطح-مقطع مثلثی از کل تقارن‌های شبکه پیروی نمی کند. از طرفی، اگر کسر پرشدگی در نظر گرفته شود، به علت این که سطح-مقطع مربعی می تواند کل یک شبکه مربعی را بپوشاند، بیشترین مقدار کسر پرشدگی برای این سطح-مقطع می تواند ۱ باشد.

باشد، همواره وجود دارد. بنابراین، ناحیه بریلون غیر قابل کاهش در این حالت طبق شکل ۱ بوده که در آن نقاط  $\Gamma = (0,0)$  و  $M = \frac{\pi}{a}(1,1)$ ،  $X = \frac{\pi}{a}(0,1)$  بالا در منطقه بریلون (نقاط فضای وارون) می باشند، لذا محاسبات در چهار جهت فوق انجام گرفتند.



شکل ۱ نمایش ناحیه بریلون غیرقابل کاهش در بلور با شبکه مربعی و حفره‌هایی با سطح-مقطع مثلثی.

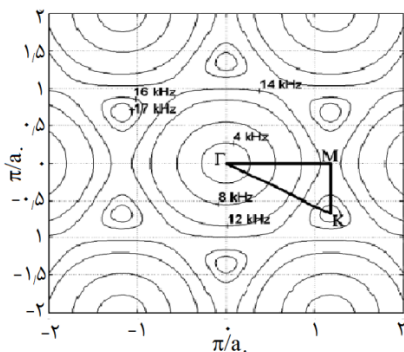
در شکل ۲ ساختار نواری بسامدی ۱۰ نوار اول برای استوانه‌هایی با سطح-مقطع دایره‌ای در راستای خطوط با تقارن بالای X، M و  $\Gamma$  به دست آمده‌اند. نشان داده شده است. همان طور که دیده می شود، منحنی‌های مشکی، نوارهای عبوری هستند که نشان می دهند اگر در این بازه‌های بسامدی و جهت‌های بلوری موردنظر، به بلور فونونی موج صوتی تابیده شود، موج از آن عبور می کند. همچنین، گاف‌های جزئی (گافی در جهت‌های خاص) و کلی (گافی در تمام جهتها) نیز دیده می شوند. گاف‌های جزئی نشان می دهند که اگر فقط در آن جهت موردنظر و در بازه بسامد آن گاف به بلور موج صوتی تابیده شود، بلور در آن جهت مانند یک مانع صوتی در مقابل موج عمل می کند.



شکل ۲ نمایش ساختار نواری بسامدی همراه با گاف‌های جزئی و کلی برای استوانه‌هایی با سطح-مقطع دایره.

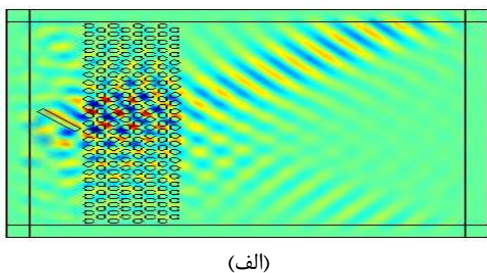
البته، نکته مهم و جالب این ساختار وجود گاف نواری کامل (در بازه بسامدی بین ۲/۵ تا حدود ۲/۷) بین نوار

۶۱۰۰ متر بر ثانیه، در ماده زمینه هوا: با چگالی ۱/۲ کیلوگرم بر مترمکعب و سرعت صدای ۳۴۳ متر بر ثانیه با ثابت شبکه ۱۰ میلی‌متر و شعاع سطح-مقطع ۳ میلی‌متر هستند. در این شبیه‌سازی در جهت x، ۸ لایه و در جهت y، ۲۴ لایه استوانه وجود دارند.

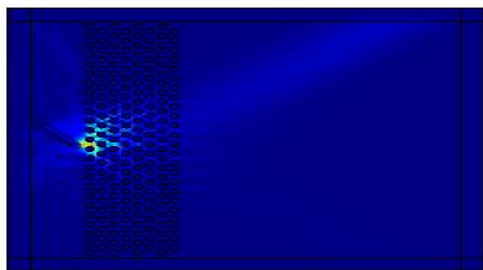


شکل ۵ نمایش سطوح هم‌بسامد مربوط به نوار اول ساختار نواری بسامد [۱۲].

طبق مطالب مرجع [۱۲]، شکست منفی برای بسامدهای اطراف نقطه M برای زوایای برخوردی بزرگ‌تر از ۴۰ درجه و محدوده بسامدی بین ۱۴/۷۴۹ کیلوهرتز تا ۱۷/۱۵۰ کیلوهرتز اتفاق می‌افتد، لذا بهترین شبیه‌سازی که انجام داده شد برای زاویه برخوردی ۴۵ درجه و بسامد ۱۷ کیلوهرتز بود. این شبیه‌سازی در شکل ۶ نشان داده شده است.

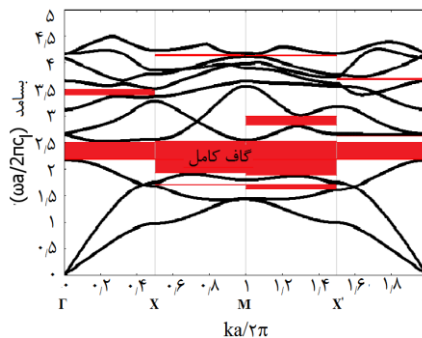


(الف)



(ب)

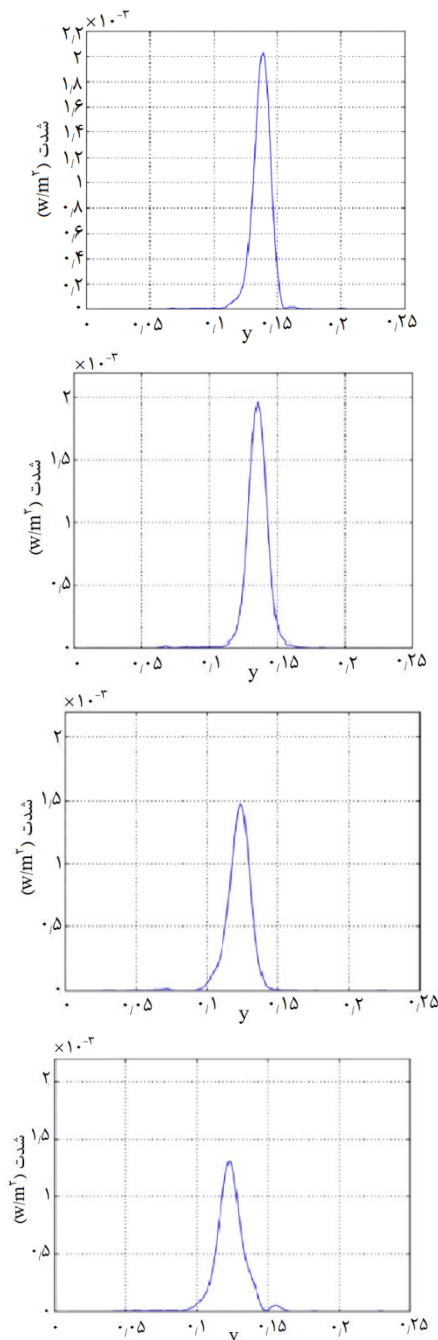
شکل ۶ نمایش اثر شکست مثبت و منفی بر اساس، (الف) شدت صوتی و (ب) فشار صوتی.



شکل ۴ نمایش ساختار نوار بسامدی همراه با گاف‌های جزئی و کلی برای استوانه‌های با سطح-مقطع مثلث.

بنابراین، از نظر تقارن‌ها، سطح-مقطع مربعی در درجه اول، سپس دایره و بعد از آن مثلث قرار دارند. اکنون، با کاهش تقارن‌ها انتظار می‌رود نوارهای تبهگن از هم‌دیگر جدا شوند و گاف نواری ظاهر شود. بنابراین، همان‌طور که نشان داده شده است، ساختار با سطح-مقطع مربعی بیش‌ترین تقارن را با شبکه حفظ می‌کند، و کم‌ترین مقدار گاف را دارد. بعد از آن، در سطح-مقطع دایره و سپس سطح-مقطع مثلث به ترتیب با کاهش تقارن‌ها در آن‌ها، گاف بیش‌تری ظاهر می‌شود. در ادامه، با شبیه‌سازی یک ورقه بلور فونونی با ضریب شکست مؤثر منفی، نشان داده می‌شود که از این پدیده می‌توان برای متمرکزسازی یا کانونی‌سازی موج صوتی منتشرشده از منبع در یک نقطه خاص با شدت صوتی بیش‌تر از منبع، استفاده کرد. برای اعتبارسنجی پژوهش حاضر از مرجع [۱۲] استفاده شده است. در این مرجع سطوح هم‌بسامد نوار اول و دوم در نظر گرفته شده‌اند، در نوار اول  $S.k > 0$ ، (یعنی سرعت گروه و سرعت فاز هم‌جهت‌اند) اما، به علت جرم مؤثر فونونی منفی در گوشه نوار، اثر بسیار ضعیفی از شکست منفی در نوار اول وجود دارد. اما، در نوار دوم  $S.k < 0$  است، و بیش‌ترین میزان شدت محدوده نقطه کانونی در این نوار است. برای سطوح هم‌بسامد نوار دوم به علت این‌که در هنگام دور شدن از مرکز، مقدار بسامد ثابت سطوح کاهش می‌یابد، سازوکار دوم شکست منفی در نوار دوم برقرار است. اکنون، با محاسبات و شبیه‌سازی که انجام شدند، نتایج این مقاله را تأیید و درستی آن‌ها تضمین می‌شود. سطوح هم‌بسامد نوار اول در شکل ۵ نشان داده شده‌اند. داده‌های مربوط به مقاله یک شبکه مثلثی متشکل از استوانه‌های فولادی: چگالی ۷۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و سرعت صدای

مثبت)، اندکی نمایان می‌شود که بیانگر توافق خوبی با نتایج مرجع [۱۲] است.

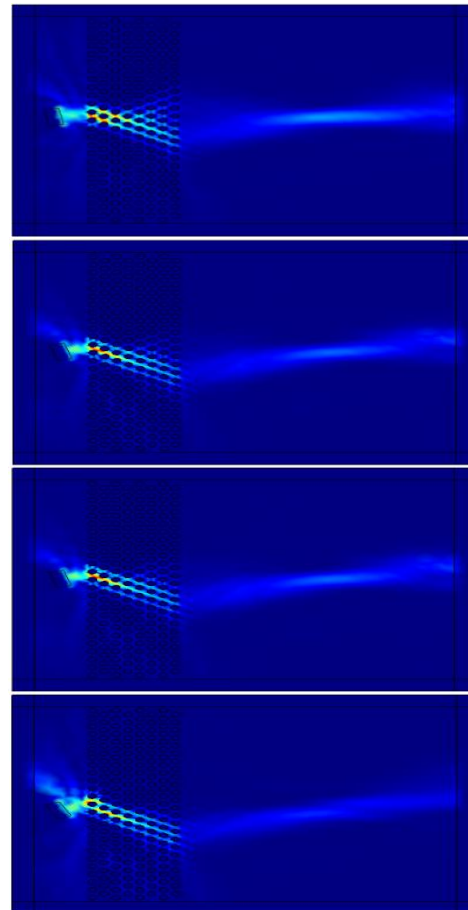


شکل ۸ نمودار شدت صوتی برحسب مکان  $y$ ، به ترتیب از بالا به پایین، برای زاویه برخوردی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درجه.

لذا برای هر ساختار، با تغییر فاصله منبع تا ورقه، بیش‌ترین شدت نقطه کانونی در آن طرف ورقه بلور فونونی تعیین و سپس به ازای فاصله موردنظر، اثر تغییر ضخامت ورقه بلور فونونی بر میزان شدت نقطه کانونی در

همان‌طور که دیده می‌شود، در مرکز منطقه وقتی حرکت به سمت خارج است، مقادیر بسامد ثابت کاهش پیدا می‌کنند. با در نظر گرفتن زاویه برخوردی به مقدار ۳۷ درجه و به کار بردن قانون اسنل، زاویه شکست ۶۹٫۴۲- درجه محاسبه شد. این مقدار بسیار نزدیک به مقدار اصلی (یعنی ۶۸٫۵- درجه) به دست آمد.

هم‌چنین، طبق مرجع [۱۲] بیش‌ترین شدت عبور موج، در بسامد ۲۴۰۱۰ هرتز و زاویه برخوردی ۵ درجه اتفاق می‌افتد. شبیه‌سازی انجام شده برای این بسامد در ۴ زاویه برخوردی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درجه می‌باشد. اثر شدت صوتی در شکل ۷ نشان داده شده است.

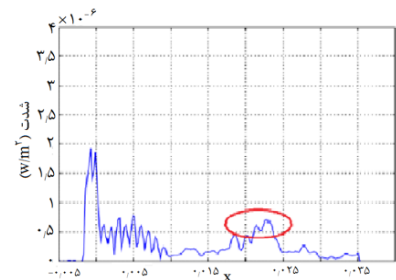
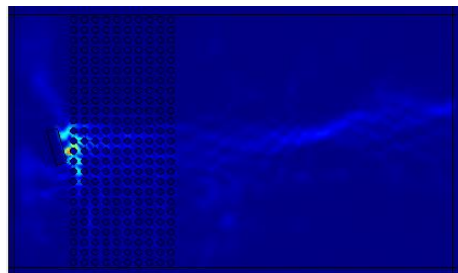
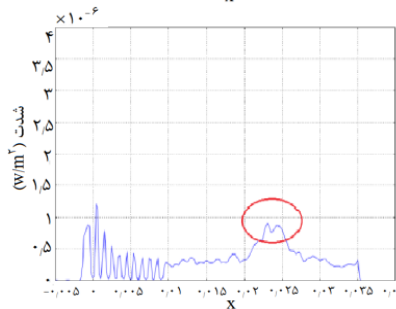
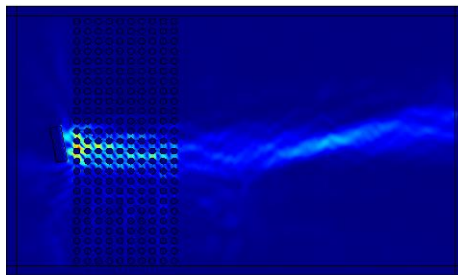
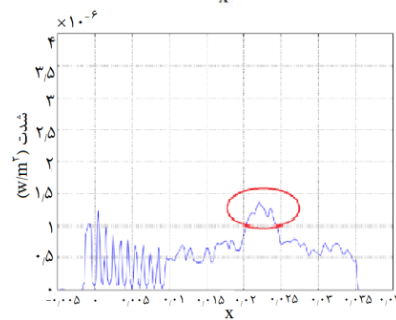
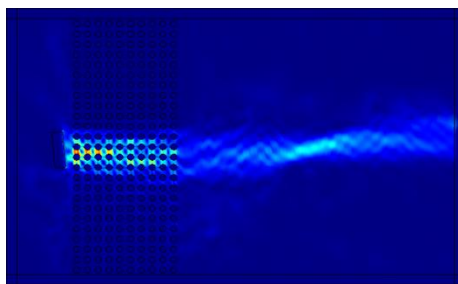
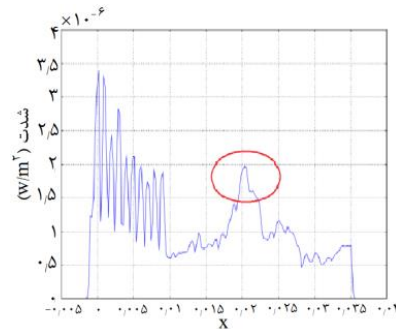
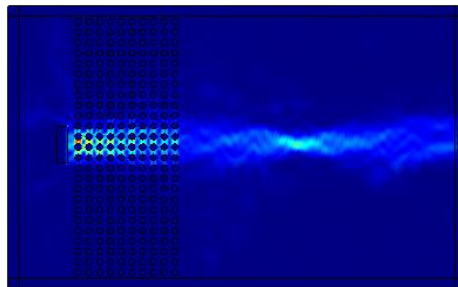


شکل ۷ نمایش اثر شدت صوتی به ترتیب از بالا به پایین، برای زاویه برخوردی، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درجه.

در شکل ۸ نمودار شدت صوتی برحسب مکان نشان داده شده است. همان‌طور که از این شکل پیداست، با افزایش زاویه برخوردی، شدت بازه نقطه کانونی (متمرکزسازی) در یک نقطه کاهش و اثر انحراف موج به سمت پایین (شکست

**الف:** بیشترین شدت برای سطح-مقطع دایره‌ای، فاصله منبع از ورقه ۱a (۱a)، مرکز منبع صوتی از مرکز اولین ردیف از میله‌ها) و ضخامت ورقه بلور فونونی ۹a اتفاق می‌افتد، که شبیه‌سازی انجام شده در شکل ۹ نشان داده شده است. مطابق شکل ۹ زاویه برخوردی افزایش پیدا کرده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، برای زاویه برخوردی صفر درجه، بیشترین اثر شدت بازه نقطه کانونی در این زاویه اتفاق می‌افتد.

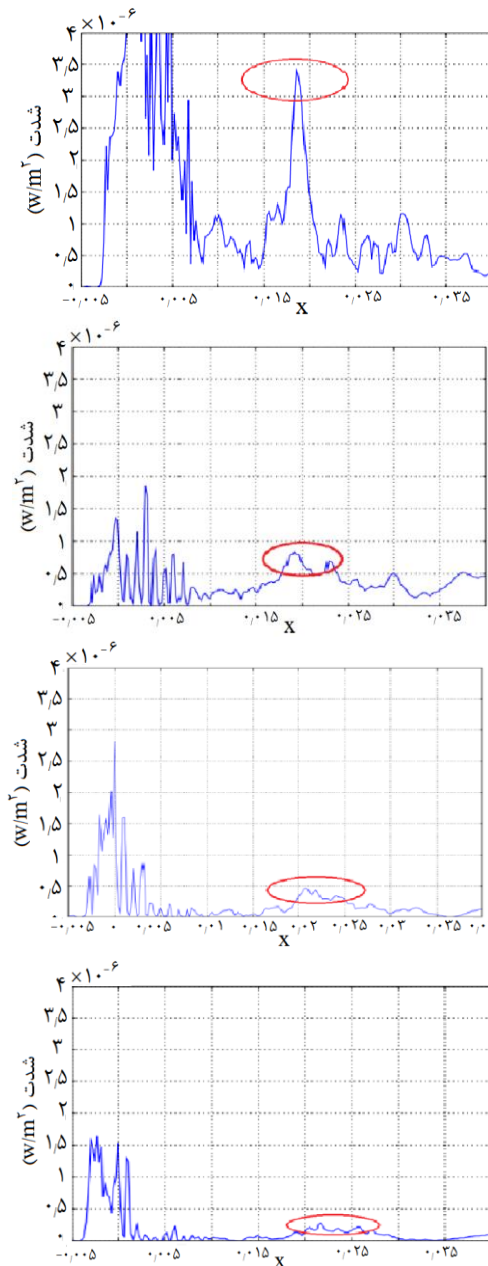
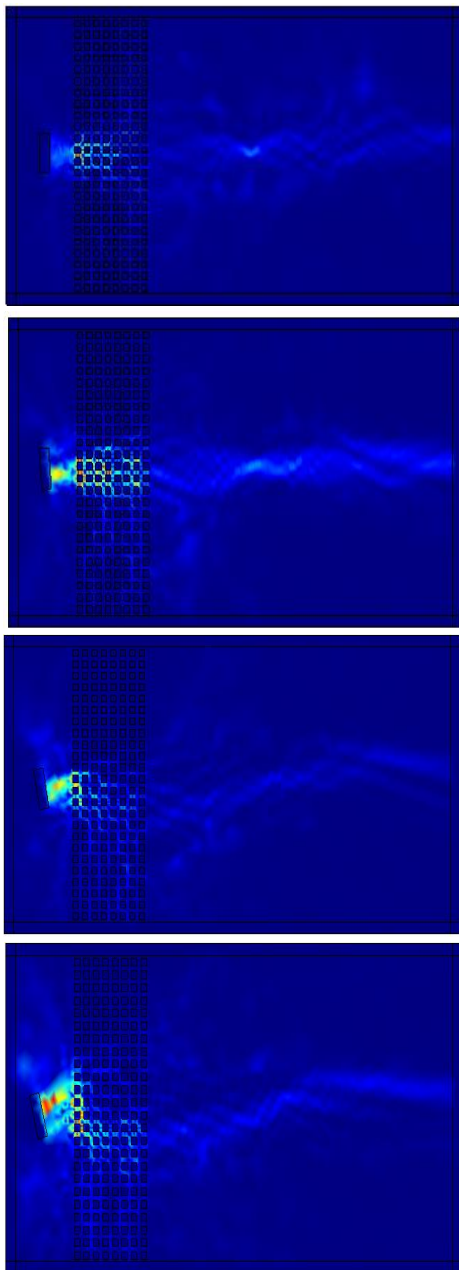
آن طرف ورقه تعیین می‌شود. در نهایت، با در نظر گرفتن ضخامت و فاصله منبع تا ورقه‌ای که به‌زای آن‌ها بیشترین شدت وجود داشت، اثر تغییر زاویه موج برخوردی نیز مورد بررسی قرار گرفت. اکنون، اثر تغییر زاویه بر شدت محدوده نقطه کانونی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این حالت برای هر سه ساختار، زاویه موج برخوردی با زاویه دادن به منبع موج، صفر، ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه در نظر گرفته شد، و شدت بازه نقطه کانونی مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۹ نمودار شبیه‌سازی اثر شدت موج صوتی در سمت چپ و نمودار شدت بر حسب مکان در جهت X در سمت راست.

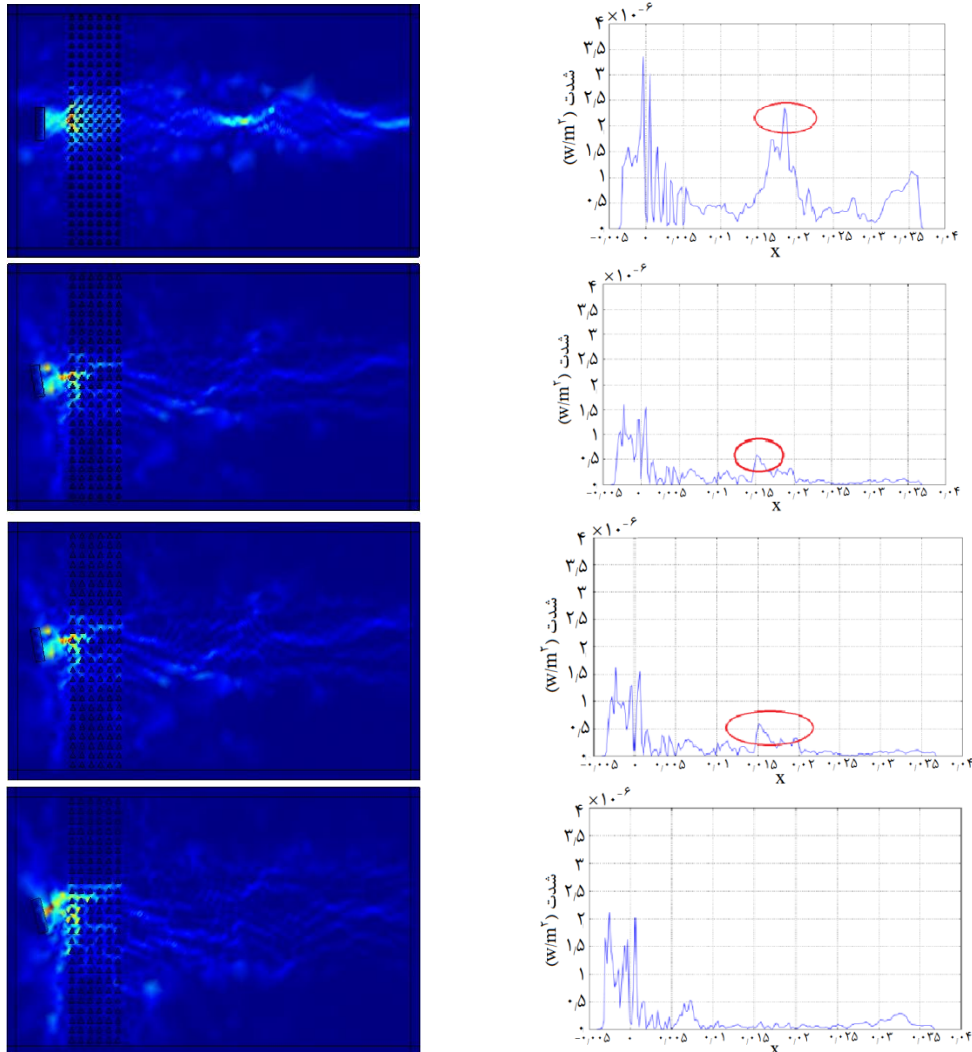
ج: بیشترین شدت برای سطح-مقطع مثلثی، فاصله منبع از ورقه ۳a و ضخامت ورقه بلور فونونی ۵a اتفاق می افتد، که شبیه سازی انجام شده در شکل ۱۱ نشان داده شده است. مطابق این شکل زاویه برخوردی به ترتیب افزایش پیدا کرده، که همانند نتیجه حالت های قبلی است.

ب: بیشترین شدت برای سطح-مقطع مربعی، فاصله منبع از ورقه ۳a (a ثابت شبکه مربعی) و ضخامت ورقه بلور فونونی ۷a اتفاق می افتد، که شبیه سازی انجام شده در شکل ۱۰ نشان داده شده است. مطابق این شکل زاویه برخوردی افزایش پیدا کرده، که همانند نتیجه حالت (الف) است.



شکل ۱۰ نمودار شبیه سازی اثر شدت موج صوتی در سمت چپ و نمودار شدت بر حسب مکان در جهت x در سمت راست.





شکل ۱۱ نمودار شبیه‌سازی اثر شدت موج صوتی در سمت چپ و نمودار شدت بر حسب مکان در جهت X درست راست.

کانونی و مکان آن، با تغییر فاصله منبع از ورقه، تغییر ضخامت ورقه بلور فونونی و تغییر زاویه برخوردی، مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج به دست آمده بیانگر این است که مکان محدوده نقطه کانونی، مستقل از مکان منبع موج هستند و این مکان به ضخامت ورقه بلور فونونی وابسته است. به علاوه، بیشترین شدت محدوده نقطه کانونی، برای ساختارهایی با سطح-مقطع دایره‌ای، مربعی و مثلثی به ترتیب برای فاصله منبع از ورقه ۱a، ۲a و ۳a و ضخامت ورقه بلور فونونی ۹a، ۷a و ۵a اتفاق می‌افتد.

#### فهرست منابع

- [1] E.N. Economou, R.S. Penciu, "Phonons and phononic gaps in continuous homogeneous media," Springer, vol. 630, pp.175-186, 2003.

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله، اثر تقارن بر ساختارهای نواری و گاف‌ها با استفاده از روش عنصر متناهی مورد بررسی قرار گرفت. ساختار نوار بسامدی و گاف‌های بسامدی برای سه نوع بلور فونونی شامل استوانه‌هایی از جنس فولاد با سطح-مقطع دایره‌ای، مربعی و مثلثی در ماده زمینه آب محاسبه شدند. نتایج به دست آمده بیانگر این هستند که در حالت سطح-مقطع دایره‌ای و مثلثی گاف کامل و برای حالت دایره‌ای گاف جزئی ظاهر شدند. همچنین، تقعر روبه پایین نوار بسامدی در گوشه منطقه اول بریلوئن، نشان‌دهنده جرم مؤثر فونونی منفی است، و جرم مؤثر فونونی منفی عاملی برای پیدایش شکست منفی موج صوتی در بلور فونونی است. علاوه بر این بیشترین اثر شدت محدوده نقطه

- [13] S.M. Ivansson, "Designing 2D phononic crystal slabs with transmission gaps for solid angle as well as frequency variation," *Advances in Acoustic and Vibration*, pp. 317890, 2009.
- [14] Y-Y. Wang, H. Zhang, Sh-Y. Zhang, L. Fan, "Effects of shapes and symmetries of scatterers on acoustic dual-negative refraction," *Journal of Acoustical Society of America*, pp. 132, 2012.
- [15] H. Salehi, M. Aryadoust, M. Zargar Shoushtari, "The generalization of structure factor for rods by polygon section in two-dimensional phononic crystals," *Iranian Journal of science*, vol. 37, no. 4, pp. 457-462, 2013.
- [16] M. Aryadoust, H. Salehi, "The calculation of the band structure in 3D phononic crystal with hexagonal lattice," *Zeitschrift für Naturforschung A*, vol. 70, no. 12, pp. 979-983, 2015.
- [17] I.A. Veres, T. Berer, O. Matsuda, "Complex band structures of two dimensional phononic crystals: Analysis by the finiteelement method," *Journal of Applied Physics*, vol. 114, pp. 083519, 2013.
- [18] H. salehi, M. Aryadoust, M. Zargar Shoushtari, "Investigation the effect of lattice angle on the band gap width in 3D phononic crystals with rhombohedral (I) lattice," *Applied physic A, Materials Science and processing*, vol. 116, no. 1, pp. 69-77, 2014.
- [19] H. Salehi, M. Aryadost, "Calculating Band structure, absorption and transmission coefficient of one- and two-dimensional phononic crystals," *Journal of Acoustical Society of Iran*, vol. 4, no. 2, 2017 (In Persian).
- [20] G. Mur, "Absorbing boundary conditions for the finite difference approximation of the time-domain electromagnetic - field equations," *IEEE Transaction Electromagnic Compat, EMC-23*, vol. 4, pp. 377-382, 1981.
- [21] S. AnanthaRamaktishna, T-M. Grzegorzcyk, "Physics and Applications of Negative Refraction Index Materials," *SPIE. Press*, 2009.
- [2] N. Jiménez, A. Mehrem, R. Picó, L.M.G. Raffi, Víctor, J. Sánchez-Morcillo, "Nonlinear propagation and control of acoustic waves in phononic superlattices," *Comptes Rendus Physique*, vol. 17, no. 5, pp. 543-544, 2016.
- [3] T. Miyashita, "Sonic crystals and sonic waveguides," *Measurement Science and Technology*, vol. 16, no. 5, pp.47-63, 2005.
- [4] S. Alagoz, "Sonic crystal acoustic switch device," *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 133, no. 6, pp. 485-490, 2013.
- [5] T. Gorishnyy, M. Maldovan, C. Ullaland, E. Thomas, "Sound ideas," *Physics World*, vol. 18, no. 12, pp. 2-7, 2005.
- [6] R. Martinez-sala, J. Sancho, J.V. Sanchez, V. Gomez, J. Llinares, F. Meseguer, "Sound attenuation by sculpture," *Nature*, vol. 378, pp. 241, 1995.
- [7] P.A. Deymier, B. Merheb, J.O. Vasseur, A. Sukhovich, J.H. Page, "Focusing of acoustic waves by flat lenses made from negatively refracting two-dimensional phononic crystals," *Revista Mexicana de Fisica*, vol. 54, no. 2, pp.74-81, 2008.
- [8] Zh. He, F. Cai, Y. Ding, Zh. Liu, "Subwavelength imaging of acoustic waves by a canalization mechanism in a two-dimensional phononic crystal," *Applied Physics Letter*, vol. 93, pp. 233503, 2008.
- [9] A. Sukhovich, B. Merheb, K. Muralidharan, J. O. Vasseur, Y. Pennec, P.A. Deymier, J.H. Page, "Experimental and theoretical evidence for subwavelength imaging in phononic crystals," *Physical Review Letters*, vol. 102, no. 15, pp. 154301, 2009.
- [10] A. Sukhovich, J.H. Page, J.O. Vasseur, J.F. Robillard, N. Swintek, and Pierre A. Deymier, "Acoustic Metamaterial And Phononic Crystal," *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, 2013.
- [11] Z. He, X. Li, J. Mei, Zh. Liu, "Improving imaging resolution of a phononic crystal lens by employing acoustic surface waves," *Applied Physics*, vol. 106, pp. 026105, 2009.
- [12] L-Y. Wu, L-W. Chen, R. Chen, R. Ching-Chang Wang, "Dispersion characteristics of negative refraction sonic crystals," *Applied Physics Letter B*, vol. 403, pp. 3599-3603, 2008.

## توجه

نویسندگان مقالات موظف به استفاده از نرم‌افزارهای دارای مجوز<sup>۱</sup> می‌باشند؛ لذا در صورت عدم رعایت این مهم،  
مجله انجمن مهندسی صوتیات ایران از هر گونه مسئولیتی مبرا است.

<sup>1</sup> Licence

## The effect of symmetry on the band structure of two-dimensional phononic crystal

H. Salehi\*, M. Sabaeian, S.F. Shojaienezhad

Department of Physics, Faculty of Science, Shahid Chamran University of Ahvaz

### Abstract

In this paper, three types of two-dimensional phononic crystals comprising of steel rods (with circular, square, and triangular cross-sections) in water-ground matter were investigated. The frequency band structure for the x-y mode was calculated using Finite Element Method. What the results show complete and incomplete gaps for phononic crystals with a circular and triangular cross-sections and for the square cross-section an incomplete gap appeared. The results show the maximum intensity for phononic crystal with circle, square and triangle cross section, 1.15 MHz, 1.11 MHz and 1.27 MHz, respectively. The effect of change of source distance to sheet, effect of sheet thickness change on focal point intensity and focal point distance to source were investigated. In general, the obtained results are in good agreement with other existing results.

**Keywords:** Phononic crystals, Band gap, simulation.

pp. 38-47 (In Persian)

---

\* Corresponding author E-mail: salehi\_h@scu.ac.ir