

شبیه‌سازی موج بر صدا توسط بلور فونونی دو بعدی با شبکه‌ی شش‌گوشه

حمدا... صالحی^{*}, آزاده غلامپور, سیده فردوس شجاعی‌نژاد

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

چکیده

در این مقاله، ابتدا، ساختار نواری یک بلور فونونی دو-بعدی با شبکه‌ی مربعی مشتمل بر استوانه‌های پلی‌متیل متاکریلیت در ماده‌ی زمینه هوا در نظر گرفته شد. با احتساب گاف نواری این ساختار، شبیه‌سازی موج بر صدا انجام گردید. نتیجه‌ی مورد انتظار نیز مشاهده شد، سپس، یک ساختار دیگر با شبکه‌ی شش‌گوشه مشتمل بر استوانه‌های آلومینیومی در ماده‌ی زمینه تنگستن مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از روش محاسباتی عنصر متناهی (المان محدود) و نرم‌افزار کامسول و برنامه‌نویسی در محیط متلب ساختار نواری محاسبه شد. هم‌چنین، اثر تقارن بر پهنه‌ی گاف نیز بررسی گردید. با تشخیص گستره‌ی گاف نواری، شبیه‌سازی موج بر صدا در بازه بسامدی ۰,۵۹ و ۰,۶۱ کیلوهرتز صورت گرفت.

کلیدواژه‌ها: بلور فونونی، شبیه‌سازی، موج بر صدا، نوار عبوری، گاف نواری.

باعت افزایش پهنه‌ی گاف می‌شود [۴-۳]. اگرچه تحقیق در زمینه بلورهای فونونی مدت زمان بسیار کوتاهی است که آغاز شده است، اما ایده‌ی ساختار متناوب کشسانی قبل از این نشان داده شده بود. برای مثال، در سال ۱۹۷۹ نارایانامورتی^۲ و همکاران، انتشار فونون با بسامد بالا از طریق ابرشبکه‌ی^۳ GaAs/AlGaAs که می‌توانست همان بلور فونونی دو بعدی باشد را مورد بررسی قرار دادند. در سال ۱۹۸۷، آچنباک^۴ و همکاران؛ سهم بسامد پایین منحني پراکندگی ساختار متناهی سه بعدی را به صورت نظری مورد بررسی قرار دادند [۵]. در واقع تحقیق روی ساختار بلورهای فونونی در سال ۱۹۹۲ با کار نظری مایکل سیگالاس^۵ و همکاران شروع شد. آن‌ها گاف نواری کامل فونونی را بررسی و نشان دادند که ساختارهایی با شبکه‌ی متناوب سه بعدی مشکل از کره‌های یکسان با چگالی بالاتر نسبت به ماده‌ی زمینه، گاف فونونی بالاتری دارند. این ساختار می‌تواند جامد/جامد و یا سیال/سیال باشد. با وجود این حقیقت که انتشار موج صوتی درون جامدات با دو سرعت متفاوت (سرعت عرضی و طولی) رخ می‌دهد، و در حالی که موج صوتی درون سیالات فقط با یک نوع سرعت (سرعت طولی) منتشر می‌شود، سیگالاس و

۱. مقدمه

مواد مصنوعی متناوبی به نام بلورهای فونونی وجود دارند. این بلورها، امواج صدا را در بازه‌ای از بسامدها عبور نمی‌دهند. به این محدوده گاف نواری^۱ گفته می‌شود که اندازه و مکان آن به سرعت صدا، چگالی محیط، کسر پرشدگی و ثابت شبکه وابسته است [۱]. در واقع این بلورها ساختارهای ترکیبی هستند که مواد تشکیل‌دهنده‌ی آن‌ها به گونه‌ای مرتب می‌شود که ویژگی‌های کشسانی/صوتی آن‌ها به طور دوره‌ای تکرار می‌شود. رفتار فونون در چنین ساختارهایی مانند رفتار الکترون در پتانسیل دوره‌ای بلور و هم‌چنین مانند رفتار فoton‌ها در محیط‌های دی‌الکتریک تناوبی است. بنابراین انتشار فونون‌ها را می‌توان با ساختار نواری فونونی توصیف کرد. پرسشن اصلی در مطالعه‌ی بلورهای فونونی امکان وجود گاف می‌باشد. گاف محدوده‌ای از بسامد است که در آن فونون امکان عبور از بلور را ندارد. طبق مطالعات انجام شده در میان ویژگی‌های فیزیکی بلورهای فونونی تقارن بلور اثر زیادی بر پیدایش و پهنه‌ی گاف دارد [۲]. در این بلورها اعتقاد بر آن است که کاهش تقارن باعث می‌شود تا مدهای تبهگن از هم جدا شوند و این عامل

² Narayananamurti

³ Super lattice

⁴ Achenbach

⁵ Michael Sigalas

* نویسنده پاسخگو: salehi_h@scu.ac.ir

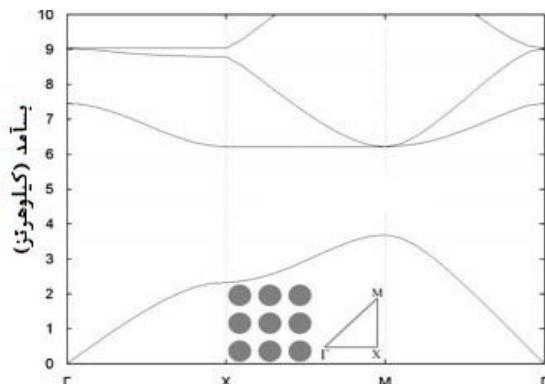
¹ Band gap

صوتی می‌باشند که به ترتیب برای پراکننده‌ها و ماده‌ی زمینه در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

جدول ۱ ویژگی‌های پراکننده و ماده‌ی زمینه.

پراکننده‌ها		ماده‌ی زمینه (هو)	
چگالی ρ_{air}	چگالی ρ_{PMMA}	سرعت صوتی C_{air}	سرعت صوتی C_{PMMA}
۱/۲ kg/m³	۱۱۹۰ kg/m³	۳۴۳ m/s	۲۶۹۴ m/s

ساختر نواری مربوط به این بلور در شکل ۱ نشان داده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در این ساختار یک گاف نواری کامل در محدوده‌ی بسامدی ۳۶۹ الی ۶۲۲ کیلوهرتز وجود دارد [۷]. انتظار می‌رود در این محدوده‌ی بسامدی با تاباندن موج به بلور در هیچ جهتی امکان عبور موج صوتی از بلور وجود نداشته باشد و بتوان از این محدوده‌ی بسامدی برای شبیه‌سازی موج بر صوتی استفاده نمود [۶].



شکل ۱ ساختار نواری بسامد یک شبکه‌ی مربعی [۷].

در ادامه، ساختار یک شبکه‌ی دو بعدی شش گوشه در نظر گرفته می‌شود. این بلور فونونی، شامل پراکننده‌های استوانه‌ای از جنس آلومینیوم در ماده‌ی زمینه تنگستن است که توسط شبکه‌ی شش گوشه با ثابت شبکه‌ی $a = 1$ سانتی‌متر و شعاع استوانه $r = 0.3$ سانتی‌متر چیده شده‌اند. پارامترهای مهم برای پراکننده‌ها و ماده‌ی زمینه در جدول ۲ ذکر شده‌اند.

اکونومو پیش‌بینی کردند که گاف نواری کامل فونونی باید در هر دو مورد وجود داشته باشد. مدتی بعد آن‌ها در یک آرایه‌ی دو بعدی متناهی مشکل از استوانه‌های موازی که با چگالی بالاتر نسبت به ماده‌ی زمینه قرار گرفته بودند، نیز یک گاف نواری کامل دو بعدی مشاهده کردند. اولین نمونه‌ی عملی که ویژگی‌های صوتی ساختارهای تناوبی را نشان داد، توسط فرانسیسکو مسجر^۱ و همکاران در مؤسسه‌ی علوم مواد مادرید ساخته شد. هم‌چنین مانوویر کاشواها^۲ و همکاران در سال ۱۹۹۳ وجود گاف نواری فونونی را برای موج کشسانی قطبیده شده در سامانه کشسانی دو بعدی تأیید کردند [۶].

بلورهای فونونی ساختارهای تناوبی هستند که از مواد کشسانی مختلف ساخته و برای کنترل انتشار امواج مکانیکی طراحی شده‌اند. این ساختارها در دو گروه تناوبی و شبکه تناوبی دسته‌بندی می‌شوند. مهم‌ترین کاربردهای این اثر در بلورهای فونونی، توانایی ساخت موج بر صوتی برای عبور موج صوتی از مسیر مشخصی در بلور بدون نفوذ درون بلور، و هم‌چنین ساخت ابرلنزهایی برای کانونی سازی امواج پراکننده شده از منبع موج است [۶]. لذا در این مقاله بناست تا اثر تقارن بر پهنای گاف و شبکه‌ی شش گوشه با استفاده از روش محاسباتی عنصر متناهی (المان محدود) و با استفاده از نرم‌افزار کامسول مورد بررسی قرار گیرد. این ابزارها امکان ساختن مدارهای فونونی را فراهم می‌سازند که در پردازش علائم در مخبرات، عکس‌برداری‌های فرآصدا و سامانه‌های درمانی کاربرد دارند.

۲. مواد و روش‌ها

در ابتدا ساختار نواری به دست آمده از مرجع [۶]، شامل بلور فونونی با پراکننده‌های استوانه‌ای از جنس پلی‌متیل متاکریلیت^۳ در ماده‌ی زمینه هوا، که توسط شبکه‌ی مربعی با ثابت شبکه‌ی $a = 39$ میلی‌متر و شعاع استوانه $r = 17.5$ میلی‌متر چیده شده‌اند، درنظر گرفته شد. پارامترهای مهم برای شبیه‌سازی شامل چگالی و سرعت

¹ Francisco Meseguer

² Manvir Kushwhala

³ Polymethyl methacrylate

فضای زمان می‌توان معادله را در هریک از مواد به صورت زیر نوشت:

$$-\rho\omega^2\psi(r) = [(\lambda + \mu)\nabla(\nabla\cdot\psi(r)) + \mu\nabla^2\psi(r)] \quad (5)$$

در صورت داشتن تقارن انتقالی پیوسته در یک جهت، می‌توان تابعیتتابع موج در آن جهت (در اینجا جهت Z) را به صورت زیر نوشت:

$$\psi(x, y, z) = e^{ik_z z} \phi(x, y) \quad (6)$$

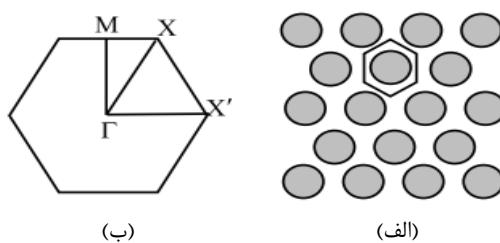
با در نظر گرفتن انتشار در صفحه X-Y، خواهیم داشت:

$$\psi(x, y, z)|_{z=0} = \phi(x, y) \quad (7)$$

بنابراین می‌توان معادله (1) را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\begin{aligned} -\rho\omega^2\Phi(x, y) &= \left[(\lambda + 2\mu)\frac{\partial^2\Phi(x, y)}{\partial x^2} + (\lambda + \mu)\frac{\partial^2\Phi(x, y)}{\partial x\partial y} + \mu\frac{\partial^2\Phi(x, y)}{\partial y^2} \right] \\ -\rho\omega^2\Phi_y(x, y) &= \left[(\lambda + 2\mu)\frac{\partial^2\Phi(x, y)}{\partial y^2} + (\lambda + \mu)\frac{\partial^2\Phi(x, y)}{\partial x\partial y} + \mu\frac{\partial^2\Phi(x, y)}{\partial x^2} \right] \\ -\rho\omega^2\Phi_r(x, y) &= \mu\left[\frac{\partial^2\Phi(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\Phi(x, y)}{\partial y^2}\right] \end{aligned} \quad (8)$$

در سه معادله بالا مشاهده می‌شود که تابع موج در جهت X و Y جفت شده می‌باشد ولی در جهت Z مستقل است. معادلات بالا تابع پارامتر k هستند که طبق قضیه بلالخ در شبکه‌ی وارون تعریف می‌شوند [۹]. با توجه به ساختار بلوری شش‌گوشی به کار رفته در این تحقیق، منطقه‌ی ویگنر سایز و منطقه‌ی اول بریلوئن کاهاش ناپذیر آن در شکل ۲ نشان داده شده‌اند.



شکل ۲ (الف) منطقه ویگنر سایز شبکه‌ی شش‌گوش، (ب) ناحیه مثلثی، مشخص کننده ناحیه بریلوئن کاهاش ناپذیر است.

همچنین در محاسبات از نرم‌افزار کامسول مولتی‌فیزیک استفاده شده است. در اینجا، از نرم‌افزار مذکور و تعریف منطقه‌ی اول بریلوئن، به منظور به دست آوردن یک مقدار ویژه از بسامد و سیپس محاسبه ساختار نواری بسامد استفاده شده است، که با یافتن منطقه‌ی کاهاش ناپذیر در فضای معکوس، و طی کردن محیط منطقه، این ساختار حاصل شود و با اعمال شرایط مرزی جدید و تعریف

جدول ۲ ویژگی‌های پراکننده و ماده زمینه [۸].

پراکننده‌ها (آلومینیوم)		ماده زمینه (تنگستن)	
۲۶۹۷ kg/m³	چگالی	۲۶۹۷ kg/m³	چگالی
۵۰۹۰ m/s	سرعت طولی صوتی	۶۴۱۰ m/s	سرعت طولی صوتی
۲۸۰۰ m/s	سرعت عرضی صوتی	۳۱۱۰ m/s	سرعت عرضی صوتی

ساختار نواری مربوط به این بلور توسط روش محاسباتی عنصر متناهی (المان محدود) با استفاده از نرم‌افزار کامسول و برنامه‌نویسی در محیط متلب^۱، مورد محاسبه قرار گرفت.

معادله موج در محیط کشسان ناهمگن در حالت کلی به صورت زیر نوشه می‌شود [۹]:

$$\rho(\vec{r}) \frac{\partial^2 u(r, t)}{\partial t^2} = \left[(\lambda + \mu) \nabla(\nabla \cdot U(r, t)) + \mu \nabla^2 U(r, t) \right] + \left[\nabla \lambda (\nabla \cdot U(r, t)) + \nabla \mu \times \nabla \times U(r, t) + \gamma (\nabla \mu \cdot \nabla) U(r, t) \right] \quad (1)$$

که در آن μ و λ ضرایب لامه ماده کشسان هستند. معادله فوق از دو عبارت تشکیل شده است. در صورتی که سطح مشترک دو ماده در مرز نسبت به سطوح هر یک از مواد کوچک باشد، می‌توان معادله‌ی حرکت در محیط کشسان را برای هر یک از مواد با ضرایب لامه ثابت، نوشت و عبارت دوم را برابر صفر قرار داد. اما در مرز به علت تغییرات ناگهانی ضرایب لامه، نمی‌توان از عبارت دوم صرف نظر کرد و برای سرتاسر ماده دو موج جداشده داشت. بنابراین امواج در محیط‌های تناوبی به علت شرایط مرزی، جفت شده هستند. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های محیط‌های تناوبی وجود قضیه بلالخ در این محیط‌ها است که به صورت زیر بیان می‌شود [۹]:

$$U(r, t) = e^{ik \cdot r} V_k(r, t) \quad (2)$$

$$V_k(r, t) = V_k(r + R, t) \quad (3)$$

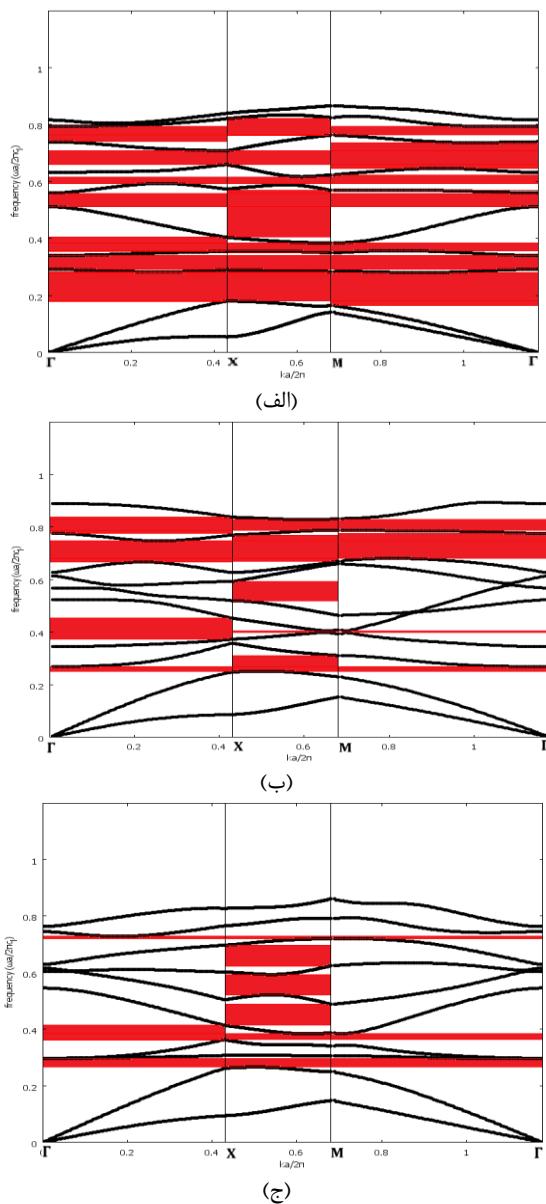
که در آن R ، بردار انتقال شبکه و k ، بردار انتقال شبکه‌ی وارون می‌باشند. لذا قضیه بلالخ را می‌توان به صورت زیر نیز نوشت:

$$U(r + R, t) = e^{ik \cdot R} U(r, t) \quad (4)$$

این شکل معادله بلالخ را می‌توان به عنوان شرط مرزی بر معادله اعمال کرد. با در نظر گرفتن انتشار هماهنگ در

¹ Matlab

شکل ۴ ساختار نواری بسامد و گاف‌های نواری ساختار بلور فونونی را نشان می‌دهد.



شکل ۴ ساختارهای نواری بلور فونونی شامل حفره‌های هوا در ماده زمینه آلمینیوم (الف) سطح مقطع مربعی، (ب) سطح مقطع دایره‌ای و (ج) سطح مقطع شش ضلعی.

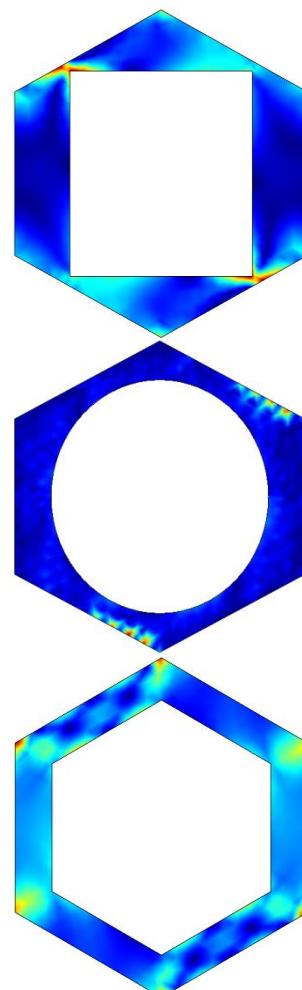
اکنون اگر تقارن‌های شبکه‌ی شش ضلعی در نظر گرفته شود، هر سه ساختار از کل تقارن‌های شبکه پیروی می‌کنند، اما با در نظر گرفتن کسر پرشدگی، به علت این که سطح مقطع شش ضلعی می‌تواند کل یک شبکه‌ی شش ضلعی را پوشاند، بیشترین مقدار کسر پرشدگی برای این سطح مقطع می‌تواند ۱ باشد. بنابراین از نظر

کدنویسی‌های مناسب، می‌توان ساختار نواری بسامد را به دست آورد.

۳. نتایج و بحث

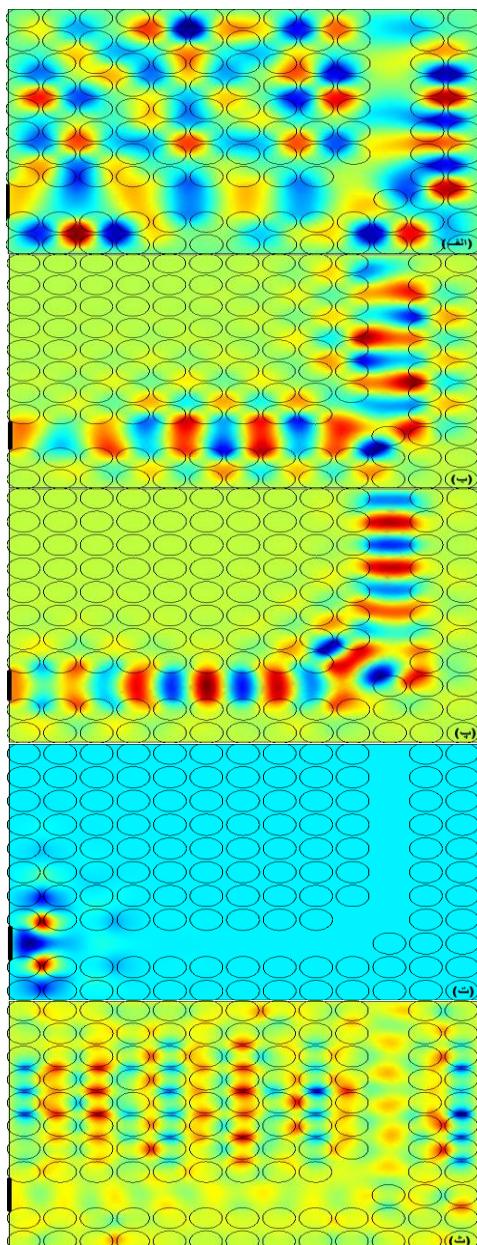
۱-۱. بررسی اثر تقارن بر پهنه‌ی گاف

در این قسمت، اثر تقارن بر پهنه‌ی گاف برای بلور فونونی آلومینیومی با حفره‌های استوانه‌ای هوا مورد بررسی قرار گرفته است. سپس، با تغییر مساحت یا شکل هندسی سطح مقطع حفره‌ها، به محاسبه و بررسی ساختار نواری، گاف و پهنه‌ی گاف پرداخته شده است. با در نظر گرفتن سه سطح مقطع متفاوت برای حفره‌ها؛ سطح مقطع، مربعی، دایره‌ای و شش ضلعی؛ سطح مقطع منطقه‌ای اول بریلوئن این ساختارها در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳ سطح مقطع منطقه‌ای اول بریلوئن بلور فونونی شامل حفره‌های استوانه‌ای هوا در ماده زمینه آلمینیوم به ترتیب از بالا به پایین با سطح مقطع مربعی، دایره‌ای و شش ضلعی است.

نواری نیست مشاهده می‌شود، موج نتوانسته از مسیر مشخص بین بلور عبور کند، و موج صوتی درون بلور فونونی نفوذ کرده و از آن می‌تواند عبور کند.



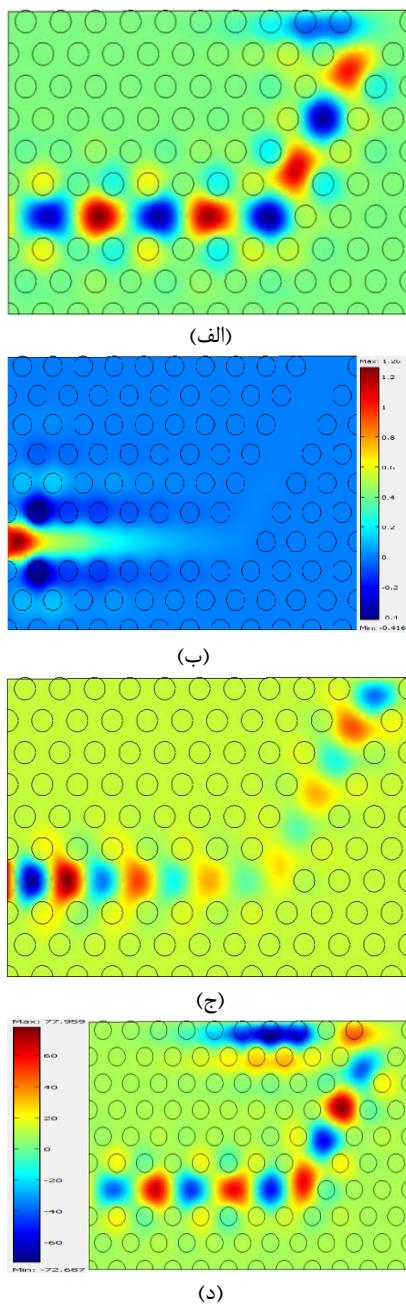
شکل ۵- به ترتیب، از (الف) الی (ث) شبیه‌سازی‌های انجام شده برای بسامدهای $2/8$ ، $3/8$ ، $4/8$ ، $5/8$ و $6/8$ کیلوهرتز.

اما برای بسامدهای درون محدوده‌ی گاف نواری، مشاهده می‌شود که بدون این که موج صوتی درون بلور نفوذ کند از مسیر بین بلور عبور خواهد کرد و تشکیل یک موج بر را می‌دهد و همچنین برای بسامد آخر، یعنی مقدار $6/8$ کیلوهرتز، به علت این که بسامد مذکور، خارج از

تقارن‌ها، سطح مقطع شش ضلعی در درجه اول قرار دارد. اما در مورد دو ساختار دیگر، با سطح مقطع مربعی و دایره‌ای، با محاسبه‌ی کسر تخلخل آن‌ها، مشاهده می‌شود که مقدار این کسر برای سطح مقطع دایره‌ای بزرگ‌تر از سطح مقطع مربعی است. با توجه به ساختارهای نواری به دست آمده که در شکل ۴ نشان داده شده‌اند، مشاهده می‌شود ساختاری که دارای حفره‌هایی با سطح مقطع مربعی، دایره‌ای و شش گوش است، به ترتیب دارای تعداد گاف بیش‌تری است. از این مشاهدات نتیجه می‌شود که ساختاری که دارای حفره‌ای با سطح مقطع شش گوش است بهدلیل این که بیش‌ترین تقارن را با شبکه دارد و در صورتی که این حفره وسیع‌تر شود می‌تواند کل سطح شبکه را پوشش دهد، به این معنا که می‌تواند بیش‌ترین مقدار کسر تخلخل برابر با ۱ را داشته باشد، بنابرین کم‌ترین تعداد گاف‌ها را دارد. در مورد دو ساختار دیگر، از نظر تعداد تقارن‌ها یکسان هستند، ولی برای ساختار دارای حفره‌ای با سطح مقطع مربعی، تعداد گاف‌های بیش‌تری نسبت به ساختار دارای حفره‌هایی با سطح مقطع دایره‌ای وجود دارد. از این مشاهدات می‌توان نتیجه گرفت ساختاری که دارای کسر تخلخل بیش‌تری است و همچنین ساختاری که دارای تقارن‌های بیش‌تری باشد، تعداد گاف‌های کم‌تری دارد.

۳-۲. شبیه‌سازی موج بر صوتی

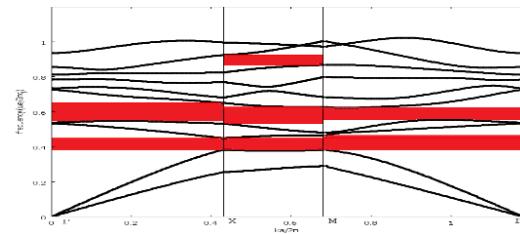
با توجه به این که از گاف نواری کامل می‌توان در ساخت موج‌برهای صوتی استفاده کرد. به این ترتیب که اگر یک نقص خطی در بلور وجود داشته باشد و یا تشکیل داده شود، در صورتی که اگر در محدوده بسامدی دارای گاف کامل، منبع موج صوتی قرار گیرد، امکان نفوذ موج صوتی در بلور وجود نخواهد داشت و در هر جهتی که موج به سمت دیوارهای بلور تابیده شود، موج مانند یک عایق کامل عمل خواهد کرد. اکنون شبیه‌سازی‌های به دست آمده برای ساختار اول را ارائه شده است. محدوده‌ی بسامدی مربوط به گاف نواری به پنج مقدار بسامد، $2/8$ ، $3/8$ ، $4/8$ ، $5/8$ و $6/8$ کیلوهرتز تقسیم و شکل ۵ شبیه‌سازی‌های این موج بر را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۵-الف برای بسامد اول، که در محدوده‌ی گاف



شکل ۷ بهترتبیب، از (الف) الی (د) شبیه‌سازی‌های انجام شده برای ساختار شش‌گوش در بسامدهای بهنجارشده ۰،۰۵،۰۶۱ و ۰،۰۵۹ کیلوهرتز.

برای این ساختار، یک منبع موج صوتی در سمت چپ هر کدام از ساختارها در نظر گرفته شد. چهار مقدار بسامد بهنجارشده در نظر گرفته شد که مقدار اول و چهارم، در محدوده‌ی گاف نواری نیستند و در واقع این بسامدها در ساختار نواری، مربوط به محدوده‌ی عبوری موج هستند. بنابراین وقتی موج بخواهد از این مسیر عبور کند، هنگامی که به دیواره‌های بلور برسودد، بازتاب کامل نداشته و

محدوده‌ی گاف نواری است، موج صوتی از مسیر بین بلور عبور نکرده و درون بلور نفوذ کرده است. ساختار نواری به دست آمده برای شبکه‌ی شش‌گوش در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶ ساختار نواری بسامد شبکه شش‌گوش.

در شکل ۶، منحنی‌های مشکی، نوارهای عبوری را نشان می‌دهند. در واقع محور عمودی مقادیر بسامدی بهنجارشده و نمودار افقی، جهت تابش موج به بلور را نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بین بعضی از نوارهای مشکی عبوری، محدوده‌های قرمز رنگی وجود دارد که منحنی‌های مشکی در آن محدوده وجود ندارند، در واقع این محدوده‌ها گاف‌های نواری، یا محدوده‌ی بسامدی ممنوعه می‌باشند، که نشان می‌دهد اگر در آن محدوده‌ی بسامدی به بلور موج صوتی تابانده شود، امکان عبور از بلور را نخواهد داشت. بازه‌هایی که در تمام جهت‌های تابش موج دارای گاف هستند، گاف نواری کامل نامیده می‌شوند، اما بازه‌هایی که فقط در جهت‌های خاصی دارای گاف هستند، گاف جزئی نامیده می‌شوند. البته گاف‌های نواری کامل مهم‌تر هستند، در واقع این گاف‌های کامل نشان می‌دهند، بلور فونونی، در هر جهت تابش موج، مانند یک عایق صوتی عمل می‌کند. یکی از محدوده‌های گاف نواری کامل، محدوده‌ی بسامدی بهنجارشده بین ۰،۰۵۸ الی ۰،۰۶۲ کیلوهرتز است.

لذا در این کار برای شبیه‌سازی موج بر صوتی، چهار مقدار دلخواه بسامد بهنجارشده‌ی ۰،۰۵۹، ۰،۰۶۱ و ۰،۰۷ کیلوهرتز در نظر گرفته شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بسامد اول و چهارم، در محدوده‌ی بسامدی گاف قرار ندارند. شبیه‌سازی انجام شده در شکل ۷ نشان داده است. شکل ۷ شبیه‌سازی انجام شده برای ساختار بلور فونونی مورد نظر را با داشتن ناراستی خطی (مانند یک مسیر یا یک صافی درون بلور) نشان می‌دهد.

شد بلور فونونی با حفره‌هایی با سطح مقطع شش ضلعی بیشترین تقارن را با شبکه شش ضلعی و در نتیجه کمترین پهنای گاف را دارد. لذا با توجه به شبیه‌سازی موج بر انجام شده، موج‌های کشسانی با بسامدهایی در محدوده‌ی گاف نواری، بدون نفوذ در بلور از مسیر تعیین شده درون بلور عبور خواهد کرد.

۵. فهرست منابع

- [1] S. Alagoz, O.A. Kaya, B.B. Alagoz, "Frequency-controlled wave focusing by a sonic crystal lens," *Applied Acoustics*, vol. 70, no. 11-12, pp. 1400-1405, 2009.
- [2] C.M. Anderson, K.P. Giapis, "Symmetry reduction in group 4mm photonic crystals," *Physical Review B*, vol. 56, no. 12, 1997.
- [3] M. Qiu, S. He, "Large complete band gap in two-dimensional photonic crystals with elliptic air holes," *Physical Review B*, vol. 60, no. 15, 1999.
- [4] C.M. Anderson, K.P. Giapis, "Larger two-dimensional photonic band gaps," *Physical Review Letters*, vol. 77, no. 14, 1996.
- [5] A. Sukhovich, "Wave phenomena in phononic crystals," PhD Thesis, Manitoba University, pp. 1-62, 2007.
- [6] T. Gorishnyy, M. Maldovan, C. Ullaland, E. Thomas, "Sound ideas," *Physics World*, vol. 18, no. 12, 2005.
- [7] L.Y. Wu, L.W. Chen, Ch.M. Liu, "Experimental investigation of the acoustic pressure in cavity of a two-dimensional sonic crystal," *Physica B: Condensed Matter*, vol. 404, no. 12-13, pp. 1766-1770, 2009.
- [8] N. Zhen, Y.Sh. Wang, Ch. Zhang, "Bandgap calculation of in-plane waves in nanoscale phononic crystals taking account of surface/interface effects," *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, vol. 54, pp. 125-132, 2013.
- [9] S.F. Shojaieenezhad, "The Effect of Symmetry on Negative Refraction in The 2D Phononic Crystals," Master of Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, 2013 (In Persian).

درون بلور نفوذ می‌کند و در واقع از درون بلور عبور می‌کند. ولی برای بسامدهای بهنجارشده دوم و سوم، که در محدوده‌ی گاف نواری هستند، بدون نفوذ به درون بلور، در هر جهتی که به دیوارهای داخلی ساختار برخورد کند، بازتاب کامل دارد و به این علت که بسامد ممنوعه است، موج صوتی می‌تواند بدون اینکه درون بلور وارد شود از مسیر مشخص شده هدایت شود و عبور کند.

بنابراین، با توجه به شکل ۷، مشاهده می‌شود که برای بعضی از بسامدها، که مربوط به گاف‌ها هستند، موج به خوبی از مسیر تعیین شده عبور خواهد کرد. اما برای بسامدهای مربوط به نوار عبوری، اثر عبور موج ضعیفتر است و نتیجه شد که اگر در بلور یک ردیف از استوانه‌ها حذف شود، یک ناراستی خطی وجود خواهد داشت. از این ناراستی می‌توان برای هدایت امواج صوتی در بسامدی در محدوده‌ی گاف استفاده کرد. زیرا دیوارهای آن موج را صد در صد بازتابش می‌کنند و امواج ناچارند که در مسیر تعیین شده حرکت نمایند. این وسیله موج بر صوتی نامیده می‌شود. هم‌چنین می‌توان مسیر موج برها را به طور دلخواه تعریف و شاخه‌های مختلفی از موج برها را که با ضخامت به اندازه کافی بزرگ از هم جدا شده‌اند، ایجاد نمود. این ابزارها امکان ساختن مدارهای فونونی را فراهم می‌سازند که در پردازش علائم در مخابرات، عکس‌برداری‌های فرآصدا و سامانه‌های درمانی کاربرد دارند.

۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از روش عنصر متناهی (المان محدود) با استفاده از نرم‌افزار کامسول و برنامه‌نویسی در محیط کامسول، ساختار نواری بسامد؛ اثر تقارن بر شبکه و گاف مربوط به بلور فونونی دو بعدی با ساختار شبکه‌ی شش ضلعی محاسبه شد. سپس با داشتن محدوده‌ی بسامدی گاف نواری، و با انتخاب بسامدهایی در محدوده و خارج از محدوده‌ی گاف نواری، شبیه‌سازی موج بر صوتی انجام و از میان چهار مقدار دلخواه بسامد بهنجارشده، ۰,۵۹، ۰,۶۱ و ۰,۶۷ کیلوهertz؛ بسامدهای ۰,۵۹ و ۰,۶۱ کیلوهertz در محدوده‌ی گاف نواری هستند و موج صوتی می‌تواند بدون این که درون بلور وارد شود، از مسیر مشخص شده هدایت شود و عبور کند. هم‌چنین مشخص