

شبیه‌سازی موج‌بر 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 موج‌بر 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 پهنای گاف نیز بررسی گردید. با تشخیص گستره‌ی گاف نواری، شبیه‌سازی موج‌بر صدا در بازه بسامدی ۰/۵۹ و ۰/۶۱ کیلوهرتز صورت گرفت.

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

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 به‌طور دوره‌ای تکرار می‌شود. رفتار فونون در چنین ساختارهایی مانند رفتار الکترون در پتانسیل دوره‌ای بلور و همچنین مانند رفتار فوتون‌ها در محیط‌های دی‌الکتریک تناوبی است. بنابراین انتشار فونون‌ها را می‌توان با ساختار نواری فونونی توصیف کرد. پرسش 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 انجام‌شده در میان ویژگی‌های فیزیکی بلورهای فونونی تقارن بلور اثر زیادی بر پیدایش و پهنای 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

باعث افزایش پهنای گاف می‌شود [۳-۴]. 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 دوبعدی باشد را مورد بررسی قرار دادند. در سال ۱۹۸۷، آچنبخ^۴ و همکاران، سهم بسامد پایین منحنی پراکندگی ساختار متناهی سه‌بعدی را به‌صورت 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 سه‌بعدی متشکل 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

² Narayanamurti

³ Super lattice

⁴ Achenback

⁵ Michael Sigalas

^{*} نویسنده پاسخگو: salehi_h@scu.ac.ir

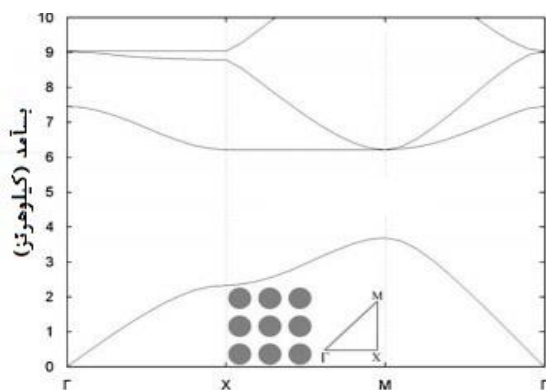
¹ Band gap

صوتی می‌باشند که به‌ترتیب برای پراکنده‌ها و ماده‌ی زمینه در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

جدول ۱ ویژگی‌های پراکنده و ماده‌ی زمینه.

پراکنده‌ها		ماده‌ی زمینه (هوا)	
چگالی	۱۱۹۰	چگالی	۱٫۲
ρ_{PMMA}	kg/m^3	ρ_{air}	kg/m^3
سرعت صوتی	۲۶۹۴	سرعت صوتی	۳۴۳
C_{PMMA}	m/s	C_{air}	m/s

ساختار نواری مربوط به این بلور در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در این ساختار یک گاف نواری کامل در محدوده‌ی بسامدی ۳/۶۹ الی ۶/۲۲ 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 موج‌بر صوتی استفاده نمود [۶].



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

در ادامه، ساختار یک شبکه‌ی دوبعدی شش گوشه در نظر گرفته می‌شود. این بلور فونونی، شامل پراکنده‌های 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 پراکنده‌ها و ماده‌ی زمینه در جدول ۲ ذکر شده‌اند.

اکنون پیش‌بینی کردند که گاف نواری کامل فونونی باید در هر دو مورد وجود داشته باشد. مدتی بعد آن‌ها در یک آرایه‌ی دوبعدی متناهی متشکل از استوانه‌های موازی که با چگالی بالاتر نسبت به ماده‌ی زمینه قرار گرفته بودند، نیز یک گاف نواری کامل دوبعدی 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 مانویر کاشوواها^۲ و همکاران در سال ۱۹۹۳ وجود گاف نواری فونونی را برای موج کشسانی قطبیده شده در سامانه کشسانی دوبعدی 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 شبه تناوبی دسته‌بندی می‌شوند. مهم‌ترین کاربردهای این اثر در بلورهای فونونی، توانایی ساخت موج‌بر صوتی برای عبور موج صوتی از مسیر مشخصی در بلور بدون نفوذ درون بلور، و هم‌چنین ساخت ابرلنزهایی برای قانونی‌سازی امواج پراکنده‌شده از منبع موج است [۶]. لذا در این مقاله بناست تا اثر تقارن بر پهنای گاف و شبیه‌سازی موج‌بر صوتی توسط بلور فونونی دو بعدی با 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 مخابرات، عکس‌برداری‌های فراصدا و سامانه‌های درمانی کاربرد دارند.

۲. مواد و روش‌ها

در ابتدا ساختار نواری به دست آمده از مرجع [۶]، شامل بلور فونونی با پراکنده‌های استوانه‌ای از جنس پلی‌متیل متاکریلیت^۳ در ماده‌ی زمینه هوا، که توسط شبکه‌ی مربعی با ثابت شبکه‌ی $a=3.9$ میلی‌متر و شعاع استوانه $r=1.75$ میلی‌متر چیده شده‌اند، در نظر گرفته شد. پارامترهای مهم برای شبیه‌سازی شامل چگالی و سرعت

¹ Francisco Meseguer

² Manvir Kushwaha

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 تابعیت تابع موج در آن جهت (در این‌جا جهت Z) را به صورت زیر نوشت:

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

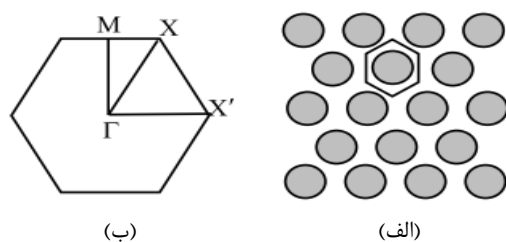
با در نظر گرفتن انتشار در صفحه X-Y، خواهیم داشت:

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

بنابراین می‌توان معادله‌ی (۱) را به‌صورت زیر بازنویسی کرد:

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

در سه معادله‌ی بالا مشاهده می‌شود که تابع موج در جهت x و y جفت‌شده می‌باشد ولی در جهت z مستقل است. معادلات بالا تابع پارامتر k هستند که طبق قضیه‌ی بلاخ در شبکه‌ی وارون تعریف می‌شوند [۹]. با توجه به ساختار بلوری شش‌گوشه‌ی به‌کار رفته در این تحقیق، منطقه‌ی ویگنر سائز و منطقه‌ی اول بریلوئن کاهش‌ناپذیر آن در شکل ۲ نشان داده شده‌اند.



شکل ۲ (الف) منطقه ویگنر سائز شبکه‌ی شش‌گوشه، (ب) ناحیه مثلثی، مشخص‌کننده ناحیه بریلوئن کاهش‌ناپذیر است.

هم‌چنین در محاسبات از نرم‌افزار کامسول مولتی‌فیزیک استفاده شده است. در اینجا، از نرم‌افزار مذکور و تعریف منطقه‌ی اول بریلوئن، به‌منظور به‌دست آوردن یک مقدار ویژه از بسامد و سپس محاسبه‌ی ساختار نواری بسامد استفاده شده است، که با یافتن منطقه‌ی کاهش‌ناپذیر 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 ماده‌ی زمینه [۸].

پراکننده‌ها (آلومنیوم)		ماده‌ی زمینه (تنگستن)	
چگالی	۲۶۹۷ kg/m ^۳	چگالی	۲۶۹۷ kg/m ^۳
سرعت طولی صوتی	۶۴۱۰ m/s	سرعت طولی صوتی	۵۰۹۰ m/s
سرعت عرضی صوتی	۳۱۱۰ m/s	سرعت عرضی صوتی	۲۸۰۰ m/s

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.

معادله‌ی موج در محیط کشسان ناهمگن در حالت کلی به صورت زیر نوشته می‌شود [۹]:

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

که در آن μ و λ ضرایب لامه‌ی ماده‌ی کشسان هستند. معادله‌ی 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 لامه‌ی 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، جفت‌شده هستند. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های محیط‌های تناوبی وجود قضیه‌ی بلاخ در این محیط‌ها است که به‌صورت زیر بیان می‌شود [۹]:

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

$$\mathbf{V}_k(\mathbf{r}, t) = \mathbf{V}_k(\mathbf{r} + \mathbf{R}, t) \quad (3)$$

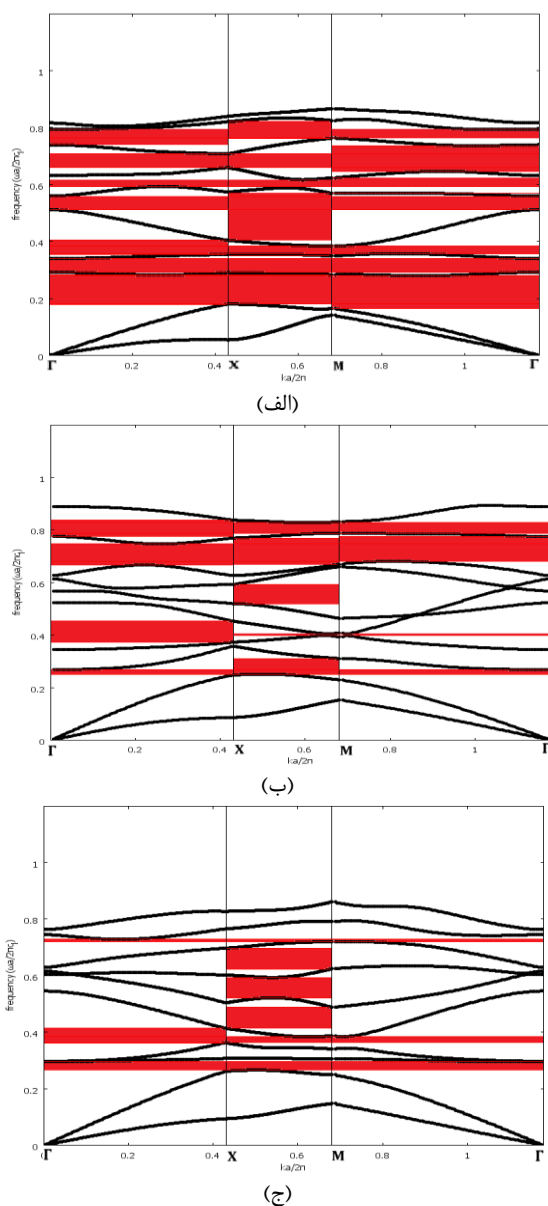
که در آن R، بردار انتقال شبکه و k، بردار انتقال شبکه‌ی وارون می‌باشند. لذا قضیه‌ی بلاخ را می‌توان به صورت زیر نیز نوشت:

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

این شکل معادله‌ی بلاخ را می‌توان به‌عنوان 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 ماده‌ی زمینه آلومینیوم (الف) سطح مقطع مربعی، (ب) سطح مقطع دایره‌ای و (ج) سطح مقطع شش‌ضلعی.

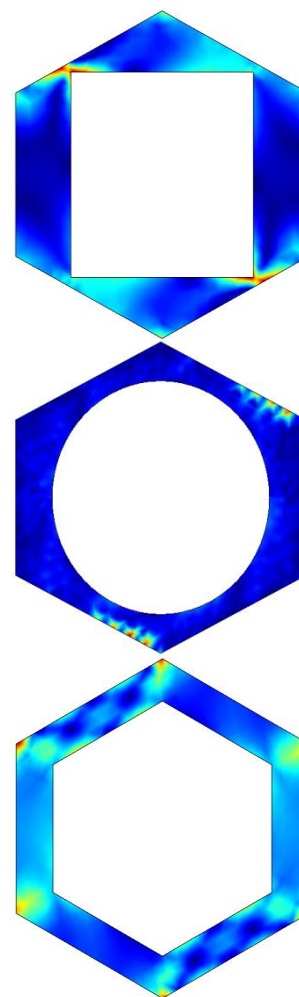
اکنون اگر تقارن‌های شبکه‌ی شش‌ضلعی در نظر گرفته شود، هر سه ساختار از کل تقارن‌های شبکه پیروی می‌کنند، اما با در نظر گرفتن کسر پرشدگی، به‌علت این‌که سطح مقطع شش‌ضلعی می‌تواند کل یک شبکه‌ی شش‌ضلعی را بپوشاند، بیش‌ترین مقدار کسر پرشدگی برای این سطح مقطع می‌تواند ۱ باشد. بنابراین از نظر

کدنویسی‌های مناسب، می‌توان ساختار نواری بسامد را به‌دست آورد.

۳. نتایج و بحث

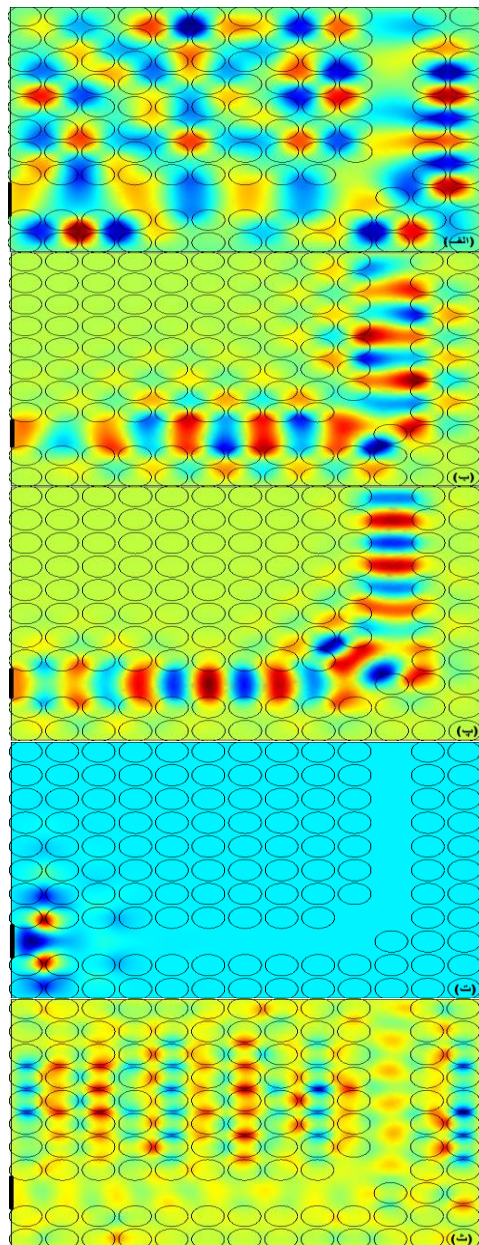
۳-۱. بررسی اثر تقارن بر پهنای گاف

در این قسمت، اثر تقارن بر پهنای 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 پهنای گاف پرداخته شده است. با در نظر گرفتن سه سطح مقطع متفاوت برای حفره‌ها؛ سطح مقطع، مربعی، دایره‌ای و شش‌ضلعی؛ سطح مقطع منطقه‌ای اول بریلوئن این ساختارها در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳ سطح مقطع منطقه‌ی اول بریلوئن بلور فونونی شامل حفره‌های استوانه‌ای هوا در ماده زمینه آلومینیوم به‌ترتیب از بالا به پایین با سطح مقطع مربعی، دایره‌ای و شش‌ضلعی 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.



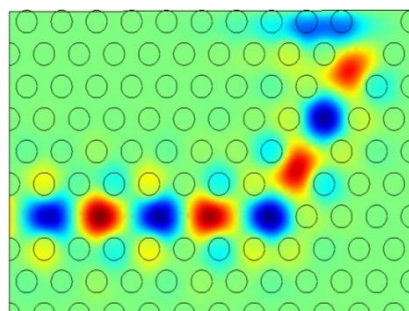
شکل ۵ به ترتیب، از (الف) الی (ث) شبیه‌سازی‌های انجام شده برای بسامدهای ۲/۸، ۳/۸، ۴/۸، ۵/۸ و ۶/۸ کیلوهرتز.

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 موج‌بر را می‌دهد و همچنین برای بسامد آخر، یعنی مقدار ۶/۸ کیلوهرتز، به علت این که بسامد مذکور، خارج از

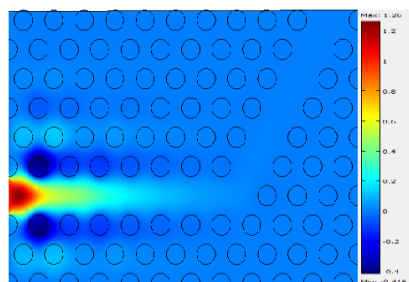
تقارن‌ها، سطح مقطع شش ضلعی در درجه‌ی اول قرار دارد. اما در مورد دو ساختار دیگر، با سطح مقطع مربعی و دایره‌ای، با محاسبه‌ی کسر تخلخل آن‌ها، مشاهده می‌شود که مقدار این کسر برای سطح مقطع دایره‌ای بزرگ‌تر از سطح مقطع مربعی است. با توجه به ساختارهای نواری به دست آمده که در شکل ۴ نشان داده شده‌اند، مشاهده می‌شود ساختاری که دارای حفره‌هایی با سطح مقطع مربعی، دایره‌ای و شش‌گوشه است، به ترتیب دارای تعداد گاف بیش‌تری است. از این مشاهدات نتیجه می‌شود که ساختاری که دارای حفره‌ای با سطح مقطع شش‌گوشه است به دلیل 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، بنابراین 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 موج‌بر صوتی

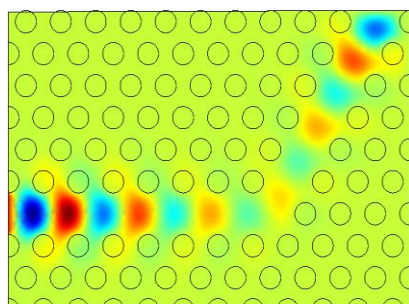
با توجه به این که از گاف نواری کامل می‌توان در ساخت موج‌برهای صوتی استفاده کرد. به این ترتیب که اگر یک نقص خطی در بلور وجود داشته باشد و یا تشکیل داده شود، در صورتی که اگر در محدوده‌ی بسامدی دارای گاف کامل، منبع موج صوتی قرار گیرد، امکان نفوذ موج صوتی در بلور وجود نخواهد داشت و در هر جهتی که موج به سمت دیواره‌های 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، ۲/۸، ۳/۸، ۴/۸، ۵/۸ و ۶/۸ کیلوهرتز تقسیم و شکل ۵ شبیه‌سازی‌های این موج‌بر را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۵-الف برای بسامد اول، که در محدوده‌ی گاف



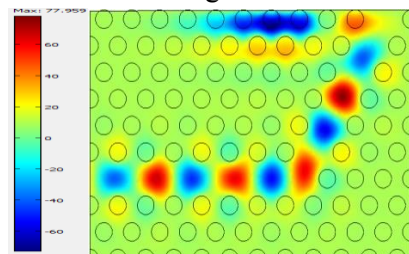
(الف)



(ب)



(ج)

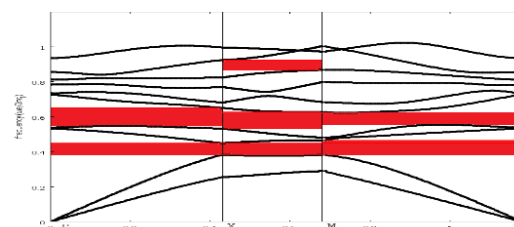


(د)

شکل ۷ به ترتیب، از (الف) الی (د) شبیه‌سازی‌های انجام شده برای ساختار شش گوشه در بسامدهای بهنجارشده‌ی ۰٫۵، ۰٫۵۹، ۰٫۶۱ و ۰٫۷ 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 برخورد کند، 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 شش گوشه در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶ ساختار نواری بسامد شبکه شش گوشه.

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 نخواهند 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 ۰٫۵۸ الی ۰٫۶۲ کیلوهرتز است.

لذا در این کار برای شبیه‌سازی موج‌بر صوتی، چهار مقدار دلخواه بسامد بهنجارشده‌ی ۰٫۵، ۰٫۵۹، ۰٫۶۱ و ۰٫۷ 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 شده 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 موج‌بر انجام شده، موج‌های کشسانی با بسامدهایی در محدوده‌ی گاف نواری، بدون نفوذ در بلور از مسیر تعیین‌شده درون بلور عبور خواهند 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. Shojaienezhad, "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 دیواره‌های داخلی ساختار برخورد کند، بازتاب کامل دارد و به این علت که بسامد، بسامد ممنوعه است، موج صوتی می‌تواند بدون اینکه درون بلور وارد شود از مسیر مشخص‌شده 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 تعیین‌شده 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 دیواره‌های آن موج را صد در صد بازتابش می‌کنند و امواج ناچارند که در مسیر تعیین شده حرکت نمایند. این وسیله موج‌بر صوتی نامیده می‌شود. هم‌چنین می‌توان مسیر موج‌برها را به طور دلخواه تعریف و شاخه‌های مختلفی از موج‌برها 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 فراصدا و سامانه‌های درمانی کاربرد دارند.

۴. 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 موج‌بر صوتی انجام و از میان چهار مقدار دلخواه بسامد بهنجارشده‌ی ۰/۵، ۰/۵۹، ۰/۶۱ و ۰/۷ کیلوهرتز؛ بسامدهای ۰/۵۹ و ۰/۶۱ کیلوهرتز 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