

محاسبه ساختار نواری، ضرایب جذب و تراگسیل بلورهای فونونی یک- و دو-

بعدی

حمدا... صالحی^{*}، ماهرخ آربادوست

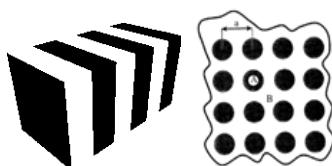
گروه فیزیک، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

چکیده

در این مقاله، ما انتشار امواج صوتی در بلورهای فونونی یک-بعدی و دو-بعدی را بررسی کردیم. بلورهای فونونی متشکل از ردیفهای مربعی شامل استوانه‌های مملو از فلزات گروه سوم جدول تناوبی برای مثال آلومینیوم و نیکل در زمینه هوا و اپوکسی می‌باشند. ابتدا با استفاده از روش بسط امواج تحت ساختار نواری این بلورها را محاسبه نمودیم، سپس ضرایب جذب و تراگسیل و علاوه توزیع فشار در آن‌ها را تعیین کردیم. اندازه ابعاد بلور مناسب با طول موج صدا می‌باشد، بنابراین، می‌توان بلورهایی با ابعاد میکرومتر تا نانومتر ساخت و با بسامدهایی که از هرتز تا تراهرتز متغیر می‌باشند. نتایج این شبیه‌سازی عددی، نمودارهای پراکندگی، ضرایب جذب و تراگسیل و توزیع فشار را برای پنج فلز نشان می‌دهند.

کلیدواژه‌ها: بلورهای فونونی، ساختار نواری فونونی، ضریب جذب، ضریب تراگسیل، روش بسط موج تخت.

ترکیبات برای آشکارسازی در بازه بسامدی وسیع استفاده کرد. شکل ۱ طرحی از بلورهای فونونی را نشان می‌دهد.



شکل ۱ طرح بلورهای فونونی: سمت راست بلور فونونی یک-بعدی و سمت چپ بلور فونونی دو-بعدی.

بلورهای فونونی محیط‌های ترکیبی ناهمگن هستند که دارای گاف نواری کشسان می‌باشند و در یک، دو و سه- بعد متناوب هستند. این محیط‌ها شامل یک ماده جاسازی شده در محیط میزان می‌باشند که به دلیل اختلاف چگالی جرمی و سرعت صدا بین محیط‌ها، در برخی بسامدها نوارهای ممنوعه تشکیل می‌شوند، بنابراین از آن‌ها می‌توان برای صافی‌های صوتی، طراحی مبدل‌ها و غیره استفاده کرد [۷-۱۰]. روش‌های شناخته شده برای تحلیل و بررسی نوارهای ممنوعه برخی بسامدهای امواج صوتی حجمی و سطحی، شامل بسط موج تخت، تفارق متناهی زمان محدود و نظریه پراکندگی چندگانه می‌باشند [۸-۱۰]. در اینجا با استفاده از روش بسط امواج

۱. مقدمه

بلورهای فونونی مواد ترکیبی از توزیع تناوبی میهمان‌های جاسازی شده در یک زمینه می‌باشند که به علت ساختار تناوبی، این مواد می‌توانند تحت شرایط ویژه‌ای گاف نواری صوتی مطلق را نمایش دهند. پهنهای نوارهای ممنوعه به طبیعت مواد ساختاری جامد یا شاره، هم‌چنین تضاد بین ویژگی‌های فیزیکی (چگالی و مدول کشسان) میهمان و زمینه، شکل هندسی چیدمان میهمان، شکل میزان و کسر پرشدگی میزان وابستگی زیادی دارند. چندین شکل از این ساختار مواد که بلورهای فونونی نامیده می‌شوند، مورد نظر می‌باشند. سامانه‌های یک-بعدی در شکلی از صفحات برآگ [۲-۱] یا ساختارهای شبیه شانه [۳-۴]، سامانه‌های دو-بعدی به صورت ردیف‌هایی از استوانه‌های موازی جاسازی شده در ماده زمینه و بلورهای سه-بعدی با توزیع‌های متفاوت از کره‌های میهمان متعلق شده در ماده زمینه [۵-۸] طراحی شده‌اند. هرگاه چگالی جرمی و معکوس مدول (ضریب) حجمی به اندازه کافی کاهش یابد سرعت گروه منفی می‌شود. گاف نواری کامل، یعنی مثل یک آینه، کاملاً امواج را بازتابش می‌کند. لذا می‌توان از این

* نویسنده پاسخگو: salehi_h@scu.ac.ir

که u بردار جابه‌جایی است که به مکان و زمان به صورت $u(r, t)$ وابسته می‌باشد. برای انتشار امواج در صفحه xoy بردار موج را $k(k_x, k_y, k_z = 0)$ در نظر می‌گیریم و با استفاده از قضیه بلاخ میدان جابه‌جایی را به صورت زیر می‌نویسیم:

$$u(r, t) = \exp(i k \cdot r - \omega t) \sum_G u_k(G) \exp(i G \cdot r) \quad (6)$$

که ω بسامد زاویه‌ای موج است. با حل معادله دیفرانسیلی (5) به یک معادله مشخصه می‌رسیم که مقادیر ویژه این معادله، همان بسامدهای زاویه‌ای صوتی هستند. در این حالت ارتعاشات قطبی موازی با محور z در صفحه xoy تجزیه می‌شوند. معادلات حرکت برای مُدهای تشکیل‌دهنده، به صورت نمادهای دوتایی نوشته می‌شوند.

$$\begin{aligned} & [\bar{C}_{\text{ff}}(K+G)^{\text{r}}] u_k^z(G) + \\ & \sum_{G \neq G'} [\Delta C_{\text{ff}}(K+G)(K+G') - (\nabla \rho) \omega^{\text{r}}] \\ & F(G-G') u_k^z(G') = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

در حالی که مُدهای بعدی (عقبت-دومی) با معادله زیر تعیین می‌گردند.

$$\begin{aligned} & [\bar{C}_{\text{ff}}(K+G)^{\text{r}} - \rho \omega^{\text{r}}] u_k^T(G) + \\ & (\bar{C}_{11} - \bar{C}_{\text{ff}})(K+G)(K+G') u_k^T(G) + \\ & \sum_{G \neq G'} F(G-G') \Delta C_{\text{ff}} \\ & [(K+G)(K+G') u_k^T(G') + \\ & (K+G')(K+G) u_k^T(G') - \\ & \gamma(K+G)(K+G') u_k^T(G') + \\ & (\Delta C_{\text{ff}})(K+G)(K+G') u_k^T(G') - \\ & (\Delta \rho) \omega^{\text{r}} u_k^T(G')] \end{aligned} \quad (8)$$

که $u^T = u_x e_x + u_y e_y$ و e_x, e_y بردارهای واحد در راستای محورهای x و y می‌باشند. معادلات (7) و (8) دو مجموعه نامتناهی از معادلات خطی هستند، اما در واقع ما مجموعه متناهی از بردارهای شبکه وارون G را برای حل این معادلات در نظر می‌گیریم. دترمینان این معادلات باید صفر شود تا شرایط ساختار نواری (k_n) را نتیجه دهد. مُدهای ویژه معادله (7) همان ارتعاشات عرضی هستند که نوارها نامیده می‌شوند. از طرف دیگر مقادیر ویژه معادله (8) ارتعاشات طولی و عرضی جفت‌شده هستند که مُدها یا نوارهای x و y را نشان می‌دهند. در

تخت اثرات ناشی از اندازه شعاع استوانه‌های مختلف در گاف‌های ممنوعه بررسی می‌شوند.

۲. روش محاسبات

سامانه‌های تناوبی یک-بعدی الگویی از چیدمان ردیف‌های موازی از کربن و هوا و دو-بعدی استوانه‌های نامتناهی با سطح مقطع r دلخواه هستند. علت استفاده از کربن، سبک بودن و ارزان بودن این عایق و کارایی بالای آن در میان عایق‌ها می‌باشد. A را به عنوان یک ماده همگن (کربن) در یک ماده زمینه همگن کشسان نامتناهی (هوا) جاسازی شده درنظر گیریم و ثابت شبکه a و کسر پرشدگی f و $1-f$ ، به ترتیب برای مواد A و B می‌باشد. پارامترهای کشسان توابع تناوبی از مکان هستند. چگالی ρ و ثابت کشسان در استوانه C_{ij}^A, ρ^A و در ماده زمینه C_{ij}^B, ρ^B می‌باشند. یعنی آمدن که ρ و C_{ij} تابعی از مختصات x و y هستند که محور z در جهت محور استوانه xoy تعریف می‌شود. تابع در صفحه xoy را در دو جهت در نظر می‌گیریم. اکنون می‌توان ρ و C_{ij} را بر حسب سری فوریه به صورت زیر نوشت:

$$\rho(r) = \rho(x, y) = \sum_G \rho(G) \exp(i Gr) \quad (1)$$

$$C_{ij}(r) = C_{ij}(x, y) = \sum_G C_{ij}(G) \exp(i Gr) \quad (2)$$

که r بردار مکان مؤلفه‌های x و y و G بردار شبکه وارون در صفحه xoy است. ضرایب فوریه در معادله (1) به شکل زیر داده می‌شوند:

$$\rho(G) = \frac{1}{A} \iint d^r r \rho(r) \exp(-i Gr) \quad (3)$$

که انتگرال روی یاخته واحد با مساحت $A = a^2$ انجام

گرفته می‌شود. در تشابه با معادله (2) می‌توان نوشت:

$$C_{ij}(G = 0) = \bar{C}_{ij} = C_{ij}^A f + C_{ij}^B (1-f), \quad (4)$$

$ij = 11, 44, 12$

اکنون معادله حرکت در مواد ترکیبی با ثابت‌های کشسان و چگالی ρ وابسته به زمان به صورت زیر نوشته می‌شود،

$$\begin{aligned} \rho(r) \frac{\partial^r u_i}{\partial r^r} = \nabla \cdot C_{\text{ff}} \nabla u_i + \left[C_{\text{ff}} \frac{\partial u}{\partial x_i} \right] + \\ \left(\frac{\partial}{\partial x_i} \right) (C_{11}(r) - 2C_{\text{ff}}(r)) \nabla u \end{aligned} \quad (5)$$

که ρ_G ضریب فوریه چگالی جرمی و C_{ijnm}^{ijnm} ضریب فوریه تانسور سختی است. با استفاده از قضیه بلاخ و بسط بردار جابه‌جایی بر حسب سری فوریه، می‌توان معادله زیر را نوشت:

$$\rho(r,t) = \sum_G e^{i(kx-\omega t)} (e^{iGx} A_G e^{ik_z z}) \quad (12)$$

که $k = (k_1, k_2)$ بردار موج بلاخ، ω بسامد زاویه‌ای k_z بردار موج در راستای z و A_G دامنه بردار جابه‌جایی هستند. در معادله (12) به ازای $k_z = 0$ یک تبهگنی دوگانه در بردار جابه‌جایی موج صوتی حجمی وجود دارد. با جای‌گذاری معادلات (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) در معادله (۹) در معادله (۱۳) بدست انجام عملیات ریاضی، مسئله ویژه مقداری (۱۳) بدست می‌آید.

$$(Ak_z^2 + Bk_z + C)U = 0 \quad (13)$$

A ، B و C ماتریس‌های $3n \times 3n$ می‌باشند که توابعی از بردار موج بلاخ k ، مؤلفه‌هایی از بردارهای شبکه وارون دو-بعدی، بسامد زاویه‌ای ω ، ضریب فوریه چگالی جرمی ρ_G و مؤلفه‌های تانسور کشسان سختی هستند. در اینجا $U = [A_G^1 \ A_G^2 \ A_G^3]$ بردار ویژه می‌باشد. عبارات ماتریس‌های A ، B و C در مرجع [۶] داده شده‌اند. با اعمال شرایط بلور فونوئی دو-بعدی، معادله (۱۳) را می‌توان به صورت زیر ساده کرد.

$$CU = 0 \quad (14)$$

بنابراین روابط پراکندگی انتشار امواج حجمی در بلورهای فونوئی دو-بعدی را می‌توان با مساوی صفر قرار دادن ماتریس C به دست آورد. در این محاسبات، از ۳۰۰ موج تخت برای رسیدن به همگرایی استفاده شده است. اطلاعات لازم مربوط به نیکل، اپوکسی و هوا در جدول (۲) ارائه گردیده‌اند.

جدول ۲ اطلاعات لازم مواد نیکل، اپوکسی و هوا برای محاسبات.

سرعت تراگسیلی m/s	سرعت طولی m/s	چگالی kg/m³	ماده
۳۰۰	۶۰۴۰	۸۹۰۸	نیکل
۲۵۴۰	۱۱۶۰	۱۱۸۰	اپوکسی
۰	۳۴۰	۱,۳	هوا

برای ضرایب جذب و تراگسیل در یک- بعد و دو- بعد، از ۴۴۱ موج تخت برای رسیدن به همگرایی استفاده شده

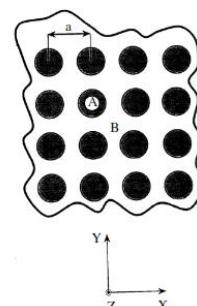
این محاسبات، از ۲۴۰ موج تخت برای رسیدن به همگرایی استفاده کرده‌ایم. اطلاعات لازم مربوط به همه مواد استفاده شده در محاسبات جدول ۱ آورده شده‌اند.

جدول ۱ اطلاعات لازم مواد گروه سوم جدول تناوبی و اپوکسی برای محاسبات.

m/s	سرعت طولی	چگالی	ماده
۶۰۴۰	۲۴۰۰	بورن	
۵۰۰۰	۲۷۰۰	آلومینیوم	
۲۷۴۰	۵۹۱۰	گالیوم	
۱۲۱۵	۷۳۱۰	ایندیوم	
۸۱۸	۱۱۸۵۰	تالیوم	
۱۱۶۰	۱۱۸۰	اپوکسی	

شبکه مربعی با ثابت شبکه ۴ میلی‌متر را در نظر می‌گیریم، اما در محاسبات نسبت شعاع استوانه به ثابت شبکه (r/a) را تغییر می‌دهیم تا گاف نواری بهینه تعیین شود. از طرف دیگر، در یک محیط کشسان خطی ناهمگن بدون هیچ نیروی خارجی، معادله حرکت بردار جابه‌جایی $u(r,t)$ را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\rho(r)\ddot{u}(r,t) = \partial_j[C_{ijnm}(r)\partial u_m(r,t)] \quad (9)$$



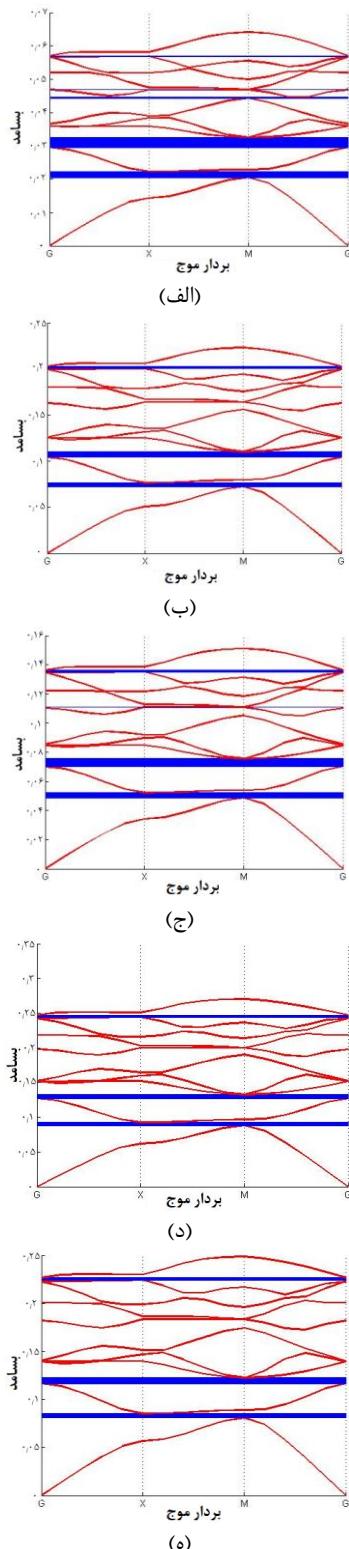
شکل ۲ چیدمان استوانه‌های فلزی در زمینه اپوکسی.

که $r = (x, y, z)$ بردار مکان، t تغییر زمان، $\rho(r)$ چگالی جرمی و C_{ijnm} تانسور سختی کشسان می‌باشند. بلورها، ترکیبی از چیدمان تناوبی در دو بعد (صفحه x و y) هستند که ماده اول در زمینه ماده دوم قرار می‌گیرد. در این روش ثابت‌های مواد بر حسب بسط سری فوریه بر حسب بردارهای شبکه وارون نوشته می‌شوند.

$$\rho(x) = \sum_G e^{iGx} \rho_G \quad (10)$$

$$C_{ijnm}(x) = \sum_G e^{iGx} C_G^{ijnm} \quad (11)$$

صوت را می‌خواهیم حذف کنیم، ماده میهمان و زمینه به طور مناسب انتخاب خواهیم کرد.



شکل ۳ ساختار نواری برای استوانه‌های؛ (الف) بورن، (ب) آلمینیوم، (ج) گالیوم، (د) ایندیوم و (ه) تالیوم در زمینه اپوکسی.

است. اطلاعات لازم مربوط به هر دو ماده آلمینیوم و اپوکسی در جدول (۳) ارائه گردیده‌اند.

بلورهای فونونی یک-بعدی شامل پنج ردیف موازی از آلمینیوم به ضخامت ۱ میکرومتر در اپوکسی می‌باشد که فاصله ورقه‌های آلمینیوم از هم یک میکرومتر در نظر گرفته شده‌اند. بلور فونونی دو-بعدی به صورت شبکه مربعی شامل استوانه‌های آلمینیوم با سطح مقطع مربعی به ابعاد ۵/۰ میکرومتر در اپوکسی، با ثابت شبکه ۱ میکرومتر را در نظر گرفته شده است.

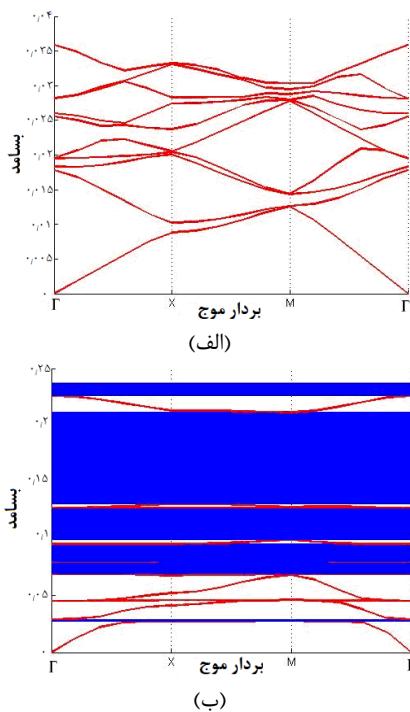
جدول ۳ اطلاعات مربوط مواد استفاده شده جهت محاسبات.

اپوکسی	آلuminium	ماده کمیت
۱۱۸۰	۲۷۰۰	$\rho(\text{kg} / \text{m}^3)$
$۷,۵۸ \times 10^{-۵}$	$۱۱,۱ \times 10^{-۱۰}$	$C_{11}(\text{N} / \text{m}^2)$
$۴,۴۲ \times 10^{-۵}$	$۱۶,۳ \times 10^{-۱۰}$	$C_{12}(\text{N} / \text{m}^2)$
$۱,۴۸ \times 10^{-۵}$	$۲,۵ \times 10^{-۱۰}$	$C_{44}(\text{N} / \text{m}^2)$
۲۵۶۹	۶۴۲۰	$C_l(\text{m/s})$
۱۱۳۹	۳۰۴۰	$C_t(\text{m/s})$

۳. نتایج

۱-۱. ساختار نواری

نمودار پراکندگی که همان ساختار نوارهای انرژی است بیانگر نوارهای ممنوعه‌ای است که در برخی از بسامدهای امواج صوتی نمی‌تواند از بلور فونونی عبور کند و با تغییر پارامتر r/a می‌توان پنهانی این گافهای نواری را تغییر داد. شکل‌های ۳-الف تا ۳-اله نمودار پراکندگی را برای استوانه‌های بورن، آلمینیوم، گالیوم، ایندیوم و تالیوم در زمینه اپوکسی در وضعیت $r/a = 0,3$ نشان می‌دهند. با توجه به این نمودارها و مقادیر مربوط به سرعت‌ها و چگالی عنصر این گروه می‌توان نتیجه گرفت که هر چه اختلاف سرعت صوتی بین استوانه‌های فلزی جاسازی شده و زمینه بیشتر باشند، گافهای نواری پهن‌تر و در بسامدهای پایین‌تری تشکیل خواهند شد و اگر اختلاف چگالی جرمی بین دو استوانه‌های فلزی جاسازی شده و زمینه بیشتر باشد، گافهای نواری بسامدهای بالاتری را پوشش می‌دهند. بنابراین با توجه به کاربرد بلور فونونی به عنوان عایق امواج صوتی، اگر بدانیم که چه بسامدهایی از

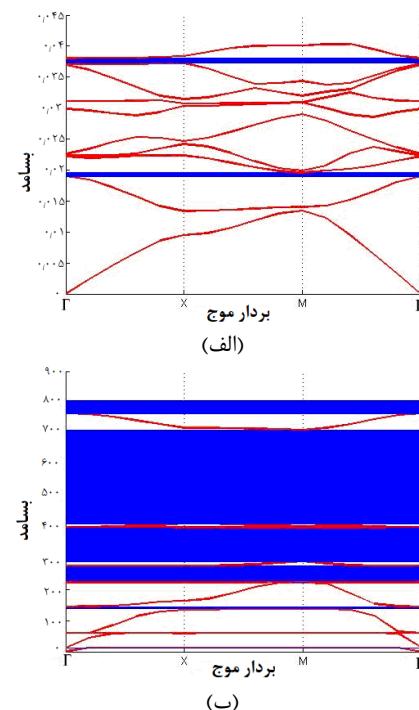


شکل ۵ نمودار پراکندگی برای استوانه‌های نیکل که در زمینه اپوکسی جاسازی شده‌اند. (الف) $r/a=0.1$ ؛ (ب) $r/a=0.4$.

با توجه با شکل ۵-الف هیچ گاف نواری مطلق برای $r/a=0.1$ مشاهده نمی‌شود، اما گاف نواری جزئی در راستای X-M در بسامدهای حدود ۰.۰۱۵ تا ۰.۰۲۵ وجود دارد. در شکل ۵-ب که نسبت شعاع استوانه‌های نیکل به ثابت شبکه افزایش یافته است، گاف‌های نواری پهن مطلق در بسامدهای بالاتر، حدود ۰.۰۷ تا ۰.۰۲ و همچنین از ۰.۲۳ تا ۰.۲۴ هرتز تشکیل شده‌اند.

محاسبات برای بلورهای فونوئی یک-بعدی با ضخامت لایه‌های ۱ میلی‌متری از کربن و هوا با ۲۵۰ موج تخت به همگرایی رسیدند و نمودار آن به صورت شکل ۶-الف رسم شده است. برای بلورهای فونوئی یک-بعدی با ثابت شبکه ۱ میلی‌متری از استوانه کربن با شعاع سطح مقطع ۰.۳ میلی‌متر در هوا با ۴۴۱ موج تخت به همگرایی رسید و نمودار آن به صورت شکل ۶-ب رسم شده است. همچنین اطلاعات لازم که در محاسبات استفاده شده، در جدول ۴ آورده شده است.

نمودار پراکندگی، بیانگر نوارهای ممنوعه‌ای است که در برخی از بسامدهای امواج صوتی نمی‌تواند از بلور فونوئی عبور کند و با تغییر پارامتر r/a و همچنین جنس ماده میزبان (هوا و اپوکسی) می‌توان پنهانی این گاف‌های نواری را تغییر داد. شکل‌های ۴ و ۵ نمودار پراکندگی را برای استوانه‌های نیکل در زمینه هوا و اپوکسی در دو وضعیت، $r/a=0.1$ و $r/a=0.4$ نشان می‌دهند.



شکل ۴ نمودار پراکندگی برای استوانه‌های نیکل که در زمینه هوا جاسازی شده‌اند. (الف) $r/a=0.1$ ؛ (ب) $r/a=0.4$.

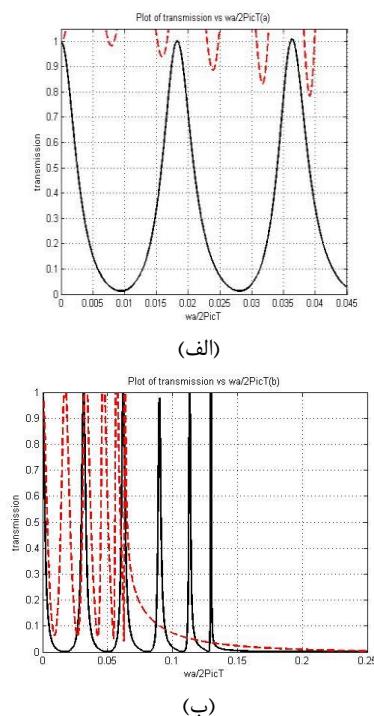
در شکل ۴-الف دو گاف نواری مطلق باریک، اولی در حدود بسامدهای ۰.۰۱۹ تا ۰.۰۲ هرتز و دومی در حدود ۰.۰۳۷ تا ۰.۰۳۸ هرتز مشاهده می‌شوند، اما گاف‌های نواری جزئی در راستای X-M-Γ-X در بسامدهای دیگر وجود ندارند. در شکل ۴-ب که نسبت شعاع استوانه‌های نیکل به ثابت شبکه افزایش یافته است، گاف‌های نواری بسیار پهن مطلق در بسامدهای بالاتر، حدود ۰.۰۲۰ تا ۰.۰۸۰ هرتز تشکیل شده‌اند. نمودار پراکندگی بلور فونوئی ساخته شده از استوانه‌های نیکل در زمینه اپوکسی در شکل ۵ رسم شده است.

جدول ۴ اطلاعات لازم مواد استفاده شده برای محاسبات.

ماده	$\rho(\text{kg} / \text{m}^3)$	$C_{11}(\text{N} / \text{m}^3)$	$C_{12}(\text{N} / \text{m}^3)$	$C_{44}(\text{N} / \text{m}^3)$
کربن	۱۷۵۰	$۳۱,۰۰ \times 10^{۱۰}$	$۱۳,۳۶ \times 10^{۱۰}$	$۸,۸۲ \times 10^{۱۰}$
هوای	۱,۳	$۱,۵ \times 10^۵$	$۱,۵ \times 10^۵$	۰

۲-۳ محاسبه ضرایب تراگسیل

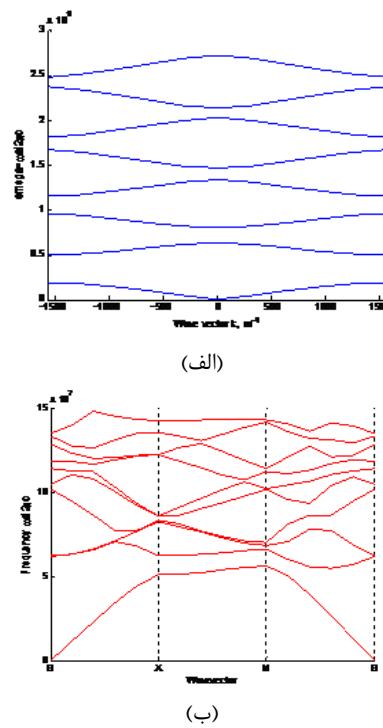
ضرایب تراگسیل یکی از عواملی است که به شدت به نوع قطبش (طولی یا تراگسیلی) بستگی دارد و با انتخاب نوع قطبش می‌توان میزان تراگسیل موج صوتی را در آن راستا محاسبه نمود. هر چه میزان تراگسیل بیشتر باشد، میزان جذب کمتر است. برای نمونه در این پژوهش، ضرایب تراگسیل یک شبکه مربعی بلور فونونی دو-بعدی ساخته شده از 12×12 استوانه توپر نیکل در زمینه اپوکسی در دو وضعیت $r/a = 0.1$ و $r/a = 0.4$ در شکل ۷ رسم شده‌اند.



شکل ۷ نمودار تراگسیل بر حسب سامد بهنجار شده، برای استوانه‌های توپر نیکل که در زمینه اپوکسی جاسازی شده‌اند. (الف) خط‌چین قرمز تراگسیل طولی و خطوط مشکی تراگسیلی را نشان می‌دهند.

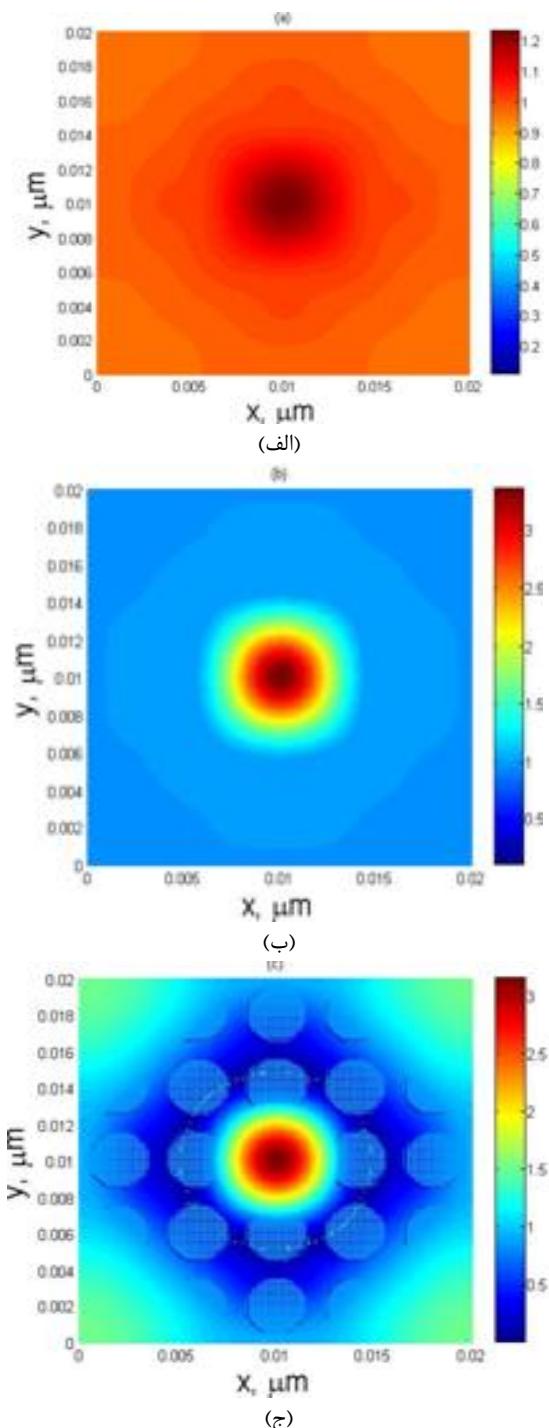
همان‌طور که در شکل ۷-الف مشاهده می‌شود برای $r/a = 0.1$ هیچ نوار ممنوعه‌ای که در آن تراگسیل کاملاً صفر شود وجود ندارد و فقط در برخی راستاهای گاف جزئی

نمودار ۶-الف نشان می‌دهد که بلورهای فونونی یک- بعدی با این ابعاد دارای چندین گاف نواری کامل هستند یعنی در بسامدهای متناوبی از صفر تا 3×10^9 هرتز امواج صوتی را از خود عبور نمی‌دهند و برای استفاده به عنوان عایق می‌توانند مناسب باشند. نمودار ۶-ب نشان می‌دهد که بلورهای فونونی یک- بعدی با این ابعاد دارای گاف‌های نواری جزیی پهن هستند. مثلاً در راستای X-M دارای گاف پهن جزیی حدود $1.5 \times 10^7 - 0$ هرتز هستند. یعنی در این راستای این پهنای بسامد صوتی را از خود عبور نمی‌دهد. لذا با توجه به این که در استراتژی بقاء در جنگ مرحله اجتناب از شناسایی شدن یکی از مراحل مهم است لذا می‌توان جهت مقابله با شناسایی فعالیت‌های راداری از مواد مختلفی استفاده نمود که یکی از این مواد با توجه به ویژگی‌های طیفی آن، بلورهای فونونی می‌باشند.



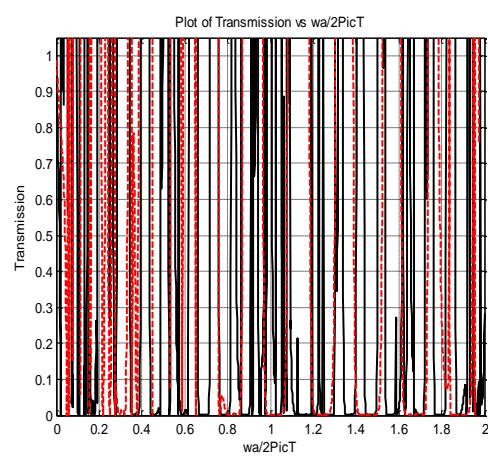
شکل ۶ ساختار نواری برای (الف) بلور فونونی یک- بعدی، (ب) بلور فونونی دو- بعدی.

فونونی یک-بعدی ساخته شده از آلومینیوم و هوا، جذب شده‌اند نشان می‌دهد.



شکل ۹ نقشه میدان جابه‌جایی کشسان در بلور فونونی دو-بعدی شامل یک شبکه مربعی ساخته شده از 5×5 استوانه‌های توپر نیکل که در زمینه اپوکسی جاسازی شده، برای دو وضعیت $r/a = 1/4$ و $r/a = 1/1$ ، در شکل ۹ رسم شده است. مد اول (الف)، (ب) و (ج) مددوم در $r/a = 1/4$ و (ج) مددوم در $r/a = 1/1$.

مشاهده می‌شود اما در شکل ۷-ب گاف نواری پهن بالای ۱۵ مشاهده می‌شود. شکل ۸ نمودار ضرایب تراگسیل برای بلور فونونی یک-بعدی را نشان می‌دهد. این شکل بسامدهایی را که کاملاً توسط بلور فونونی یک-بعدی ساخته شده از آلومینیوم و هوا، منتقل شده‌اند نشان داده و بیان می‌کند که این بلور اکثر بسامدها را عبور می‌دهد. این نمودار، تأیید می‌کند که هر چه قدر میزان جذب کمتر باشد، عبور بیشتر است.



شکل ۸ نمودار ضرایب تراگسیل بلور فونونی یک-بعدی آلومینیوم در زمینه اپوکسی بر حسب بسامد بهنجار شده.

در آخرین مرحله از محاسبات، نقشه میدان جابه‌جایی کشسان در بلور فونونی دو-بعدی شامل یک شبکه مربعی ساخته شده از 5×5 استوانه‌های توپر نیکل که در زمینه اپوکسی جاسازی شده، برای دو وضعیت $r/a = 1/4$ و $r/a = 1/1$ ، در شکل ۹ رسم شده است. در این شکل، رنگ قرمز نشان‌دهنده بیشترین جابه‌جایی میدان کشسان و آبی کمترین جابه‌جایی است.

۳-۲. محاسبه ضرایب جذب

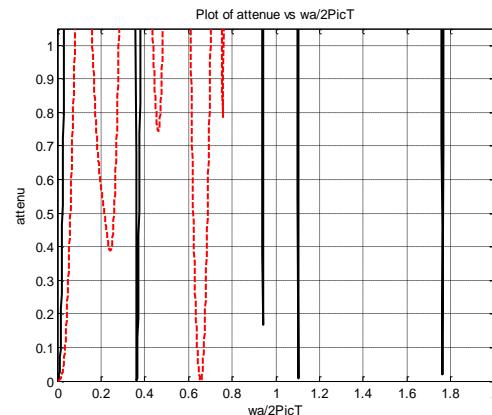
ضریب جذب یکی از عواملی است که نشان‌دهنده میزان کاهش و اتلاف شدت صوتی در هنگام عبور از یک محیط می‌باشد و با استفاده از اطلاعات آن می‌توان ضریب شکست آن محیط را محاسبه نمود. شکل ۱۰ نمودار ضرایب جذب برای بلور فونونی یک-بعدی را نشان می‌دهد. این شکل بسامدهایی را که کاملاً توسط بلور

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله ساختار نواری بلورهای فونونی یک-بعدی و دو-بعدی ساخته شده از کربن در زمینهٔ هوا مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که گاف‌های نواری پهن جزیی و در بسامدهای پایین‌تر برای بلور فونونی دو-بعدی وجود دارد پس این بلورها در بعضی جهات عایق‌های بسیار خوبی هستند و می‌توانند در عایق‌بندی استحکامات مورد استفاده قرار گیرند. اما بلورهای فونونی یک-بعدی دارای گاف نواری کامل هستند. همچنین ساختار نواری بلورهای فونونی دو-بعدی ساخته شده از استوانه‌های توپر عناصر گروه سوم جدول تناوبی در زمینهٔ اپوکسی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که گاف‌های نواری پهن‌تر و در بسامدهای پایین‌تر برای بلور فونونی ساخته شده از استوانه‌های بورن در زمینهٔ اپوکسی با $r/a = 0.3$ و همچنین استوانه‌های نیکل در زمینهٔ اپوکسی با $r/a = 0.4$ تشکیل می‌شود، که می‌توان نتیجه گرفت هرچه اختلاف بین چگالی‌ها و سرعت‌های بین مواد تشکیل دهندهٔ بلور فونونی بیشتر باشد، گاف نواری پهن‌تر شده و در بسامدهای متفاوتی تشکیل خواهد شد. علاوه بر این، ساختار ضرایب جذب و تراگسیل بلورهای فونونی یک دو-بعدی ساخته شده از آلومینیوم در بلورهای فونونی یک-بعدی جذب صوت ضعیف و تراگسیل به خوبی انجام می‌شود، پس استفاده از آن‌ها به عنوان عایق مناسب نمی‌باشد. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که بلورهای فونونی دو-بعدی جاذب بسیار خوبی برای صوت هستند و قدرت تراگسیل آن‌ها ضعیف است، پس عایق بسیار مناسباتی در بسیاری از صنایع می‌باشد. استفاده از آلومینیوم به دلیل سبک بودن و مقاوم بودن این فلز در برابر خوردگی می‌باشد.

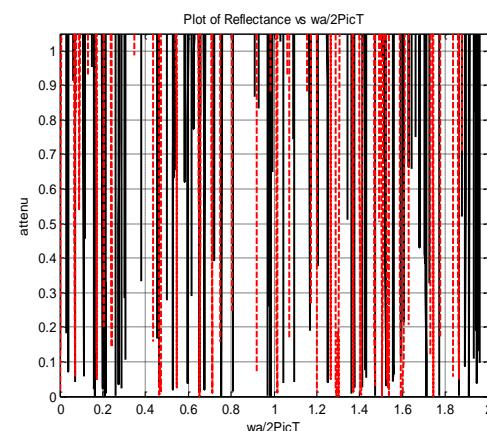
۵. فهرست منابع

- [1] Z. Liu, X. Zhang, Y. Mao, Y.Y. Zhu, Z. Yang, C.T. Chan, P. Sheng, "Locally resonant sonic materials," *Science*, vol. 289, pp. 1734, 2000.
- [2] C. Goffaux, J. Sánchez-Dehesa, "Two-dimensional phononic crystals studied using a variational method: Application to lattices



شکل ۱۰ نمودار ضرایب جذب بلور فونونی یک-بعدی آلومینیوم در زمینهٔ اپوکسی بر حسب بسامد بهنجار شده.

در شکل ۱۱ نمودار ضرایب جذب برای بلور فونونی دو-بعدی ساخته شده از یک شبکهٔ مربعی، شامل استوانه‌های آلومینیوم در زمینهٔ هوا رسم شده است. این شکل نشان می‌دهد که در اکثر بسامد صوت توسط بلور جذب می‌شود، پس می‌توان این بلور به عنوان یک عایق صوتی مناسب پیشنهاد نمود. همچنین نمودار ضرایب تراگسیل برای بلور فونونی دو-بعدی نشان می‌دهد که بلورهای فونونی دو-بعدی شدت صوت را کاهش داده و تراگسیل در برخی از بسامدها صورت گرفته است. لازم به ذکر است که چون مجموع ضرایب تراگسیل، جذب و بازتاب برابر یک است. می‌توان ضرایب تراگسیل را به دست آورده و رسم کرد.



شکل ۱۱ نمودار ضرایب جذب بلور فونونی دو-بعدی آلومینیوم در زمینهٔ اپوکسی بر حسب بسامد بهنجار شده.

- [3] of locally resonant materials," Physical Review B, vol. 67, no. 14, pp. 144301, 2003.
- [4] R. Martinez-Sala, J. Sancho, J.V. Sanchez, V. Gomez, J. Llinares, F. Meseguer, "Sound attenuation by sculpture," Nature, vol. 378, no. 6554, pp.241, 1995.
- [5] A.D. Klironomos, E.N. Economou, "Elastic wave band gaps and single scattering," Solid State Commun, vol. 105, no. 5, pp. 327-332, 1998.
- [6] M.M. Sigalas, C.M. Soukoulis, "Elastic-wave propagation through disordered and/or absorptive layered systems," Physical Reivew. B, vol. 51, no. 5, pp. 2780-2789, 1995.
- [7] T.T. Wu, Z.G. Huang, S. Lin, "Surface and bulk acoustic waves in two-dimensional phononic crystal consisting of materials with general anisotropy," Physical review B, vol. 69, no. 9(094301), 2004.
- [8] Z. Liu, Chan, C.T. Sheng, A.L. Goertzen, J.H. Page, "Elastic wave scattering by periodic structures of spherical objects: Theory and experiment," Phyical Review B, vol. 62, no. 4, pp. 2446, 2000.
- [9] M.S. Kushwaha, P. Halevi, L. Dobrzynski, B. Djafari-Rouhani, "Acoustic band structure of periodic elastic composites," Physical Review Lett, vol. 71, no. 13, pp. 2022-2025, 1993.
- [10] J.O. Vasseur, P.A. Deymier, G. Frantziskonis, G. Hong, B. Djafari-Rouhani, L.J. Dobrzynski, "Experimental evidence for the existence of absolute acoustic band gaps in two-dimensional periodic composite media," Jornal of Physics Condensed Matter, vol. 10, no. 27. pp. 6051-6064, 1998.
- C. Goffaux, J.P. Vigneron, "Theoretical study of a tunable phononic band gap system," Phys Rev B Condens Matter Mater Phys, vol. 64, no. 7, pp. 075118.1-075118.5, 2001.