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

حمدا... صالحی*، ماهرخ آریادوست

گروه فیزیک، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

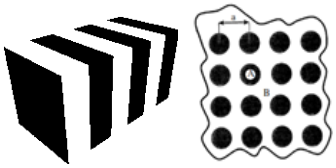
چکیده

در این مقاله، ما انتشار امواج صوتی در بلورهای فونونی یک-بعدی و دو-بعدی را بررسی کرده‌ایم. بلورهای فونونی متشکل از ردیف‌های مربعی شامل استوانه‌های مملو از فلزات گروه سوم جدول تناوبی برای مثال آلومنیوم و نیکل در زمینهٔ هوا و اپوکسی می‌باشند. ابتدا با استفاده از روش بسط امواج تخت ساختار نواری این بلورها را محاسبه نمودیم، سپس ضرایب جذب و تراگسیل و بعلاوه توزیع فشار در آن‌ها را تعیین کردیم. اندازه ابعاد بلور متناسب با طول‌موج 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.

۱. مقدمه

بلورهای فونونی مواد ترکیبی از توزیع تناوبی میهمان‌های جاسازی‌شده در یک زمینه می‌باشند که به علت ساختار تناوبی، این مواد می‌توانند تحت شرایط ویژه‌ای گاف نواری صوتی مطلق را نمایش دهند. پهنای نوارهای ممنوعه به طبیعت مواد ساختاری جامد یا شاره، هم‌چنین تضاد بین ویژگی‌های فیزیکی (چگالی و مدول کشسان) مهمان و زمینه، شکل هندسی چیدمان میهمان، شکل میزبان و کسر پرشدگی میزبان وابستگی زیادی دارند. چندین شکل از این ساختار مواد که بلورهای فونونی نامیده می‌شوند، مورد نظر می‌باشند. سامانه‌های یک- بعدی در شکلی از صفحات براگ [۱-۲] یا ساختارهای شبه شانه [۳-۴]، سامانه‌های دو- بعدی به صورت ردیف‌هایی از استوانه‌های موازی جاسازی‌شده در ماده زمینه و بلورهای سه-بعدی با توزیع‌های متفاوت از کره‌های میهمان معلق 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 ترکیبات برای آشکارسازی در بازهٔ 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 جاسازی‌شده در محیط میزبان 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 [۱-۷]. روش‌های شناخته شده برای تحلیل و بررسی نوارهای ممنوعه‌ی برخی بسامدهای امواج صوتی حجمی و سطحی، شامل بسط موج تخت، تفارق متناهی زمان محدود و نظریهٔ پراکندگی چندگانه می‌باشند [۸-۱۰]. در این‌جا با استفاده از روش بسط امواج

* نویسنده پاسخگو: salehi_h@scu.ac.ir

[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-08]

[DOR: 20.1001.1.23455748.1395.4.2.2.1]

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 مادهٔ همگن (کربن) در یک ماده زمینه همگن کشسان نامتناهی B (هوا) جاسازی‌شده درنظربگیریم و ثابت شبکه a و کسر پرشدگی f و ۱-f، به ترتیب برای مواد A و B می‌باشند. پارامترهای کشسان توابع تناوبی از مکان هستند. چگالی جرمی ρ و ثابت کشسان در استوانه ρ^A، C_{ij}^A و در ماده زمینه ρ^B، C_{ij}^B می‌باشند. یعنی آمدن‌که ρ و C_{ij} تابعی از مختصات x و y هستند که محور z در جهت محور استوانه تعریف می‌شود. تناوب در صفحهٔ xoy را در دو جهت در نظر می‌گیریم. اکنون می‌توان ρ و C_{ij} را برحسب سری فوریه به صورت زیر نوشت:

$$\rho(r)=\rho(x,y)=\sum_G \rho(G)\exp(iGr) \qquad (۱)$$

$$C_{ij}(r)=C_{ij}(x,y)=\sum_G C_{ij}(G)\exp(iGr) \qquad (۲)$$

که r بردار مکان مؤلفه‌های x و y؛ و G بردار شبکهٔ وارون در صفحهٔ xoy است. ضرایب فوریه در معادلهٔ (۱) به شکل زیر داده می‌شوند:

$$\rho(G)=\frac{۱}{A}\iint d^۲r\rho(r)\exp(-iGr) \qquad (۳)$$

که انتگرال روی یاخته واحد با مساحت $A=a^۲$ انجام گرفته می‌شود. در تشابه با معادلهٔ (۲) می‌توان نوشت:

$$C_{ij}(G=۰)=\bar{C}_{ij}=C_{ij}^A f+C_{ij}^B(۱-f), \quad ij=۱۱,۴۴,۱۲ \qquad (۴)$$

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

$$\rho(r)\frac{\partial^۲u_i}{\partial t^۲}=\nabla.\,C_{۴۴}\nabla u_i+\left[C_{۴۴}\frac{\partial u}{\partial x_i}\right]+\left(\frac{\partial}{\partial x_i}\right)(C_{۱۱}(r)-۲C_{۴۴}(r))\nabla u \qquad (۵)$$

که u بردار جابه‌جایی است که به مکان و زمان به صورت $u(r,t)$ وابسته می‌باشد. برای انتشار امواج در صفحهٔ xoy بردار موج را $k(k_x,k_y)$ و $k_z=۰$ در نظر می‌گیریم و با استفاده از قضیه بلاخ میدان جابه‌جایی را به صورت زیر می‌نویسیم:

$$u(r,t)=\exp i(k.r-\omega t)\sum_G u_k(G)\exp(iG.r) \qquad (۶)$$

که ω بسامد زاویه‌ای موج است. با حل معادلهٔ دیفرانسیلی (۵) به یک معادله مشخصه می‌رسیم که مقادیر ویژه این معادله، همان بسامدهای زاویه‌ای صوتی هستند. در این حالت ارتعاشات قطبشی موازی با محور z در صفحهٔ xoy تجزیه می‌شوند. معادلات حرکت برای مُدهای تشکیل‌دهنده، به صورت نمادهای دوتایی نوشته می‌شوند.

$$\left[\bar{C}_{۴۴}(K+G)^۲\right]u_k^z(G)+\sum_{G\neq G'}\left[\Delta C_{۴۴}(K+G)(K+G')-(\nabla\rho)\omega^۲\right] \qquad (۷)$$
$$F(G-G')u_k^z(G')=۰$$

در حالی‌که مُدهای بعدی (عقب‌تر-دومی) با معادلهٔ زیر تعیین می‌گردند.

$$\left[\bar{C}_{۴۴}(K+G)^۲-\rho\omega^۲\right]u_k^T(G)+(\bar{C}_{۱۱}-\bar{C}_{۴۴})(K+G)(K+G')u_k^T(G)+\sum_{G\neq G'}F(G-G')\Delta C_{۴۴}$$
$$[(K+G).(K+G')u_k^T(G')+(K+G').(K+G)u_k^T(G')-۲(K+G).(K+G')u_k^T(G')+(\Delta C_{۴۴})(K+G).(K+G')u_k^T(G')-(\Delta\rho)\omega^۲u_k^T(G')] \qquad (۸)$$

که $u^T=u_xe_x+u_ye_y$ و e_x,e_y بردارهای واحد در راستای محورهای x و y می‌باشند. معادلات (۷) و (۸) دو مجموعه نامتناهی از معادلات خطی هستند، امّا در واقع ما مجموعه متناهی از بردارهای شبکه وارون G را برای حل این معادلات در نظر می‌گیریم. درترمینان این معادلات باید صفر شود تا شرایط ساختار نواری $\omega_n(k)$ را نتیجه دهد. مُدهای ویژه معادلهٔ (۷) همان ارتعاشات عرضی $(u=u^ze_z\perp k)$ (که e_z بردار یکه در راستای محور z هستند) که نوارها نامیده می‌شوند. از طرف دیگر مقادیر ویژه معادلهٔ (۸) ارتعاشات طولی و عرضی جفت‌شده هستند که مُدها یا نوارهای x و y را نشان می‌دهند. در

[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-08]

[DOR: 20.1001.1.23455748.1395.4.2.2.1]

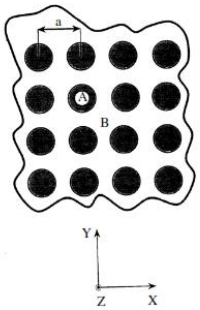
این محاسبات، از ۲۴۰ موج تخت برای رسیدن به همگرایی استفاده کرده‌ایم. اطلاعات لازم مربوط به همه مواد استفاده شده در محاسبات جدول ۱ آورده شده‌اند.

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

ماده	چگالی kg/m^3	سرعت طولی m/s
بورن	۲۴۰۰	۶۰۴۰
آلومینیوم	۲۷۰۰	۵۰۰۰
گالیوم	۵۹۱۰	۲۷۴۰
ایندیوم	۷۳۱۰	۱۲۱۵
تالیوم	۱۱۸۵۰	۸۱۸
اپوکسی	۱۱۸۰	۱۱۶۰

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، معادلهٔ حرکت بردار جابه‌جایی $u(r,t)$ را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\rho(r)\ddot{u}(r,t)=\partial_j[C_{ijnm}(r)\partial u_m(r,t)] \qquad (۹)$$



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 زمینهٔ ماده دوم قرار می‌گیرد. در این روش ثابت‌های مواد بر حسب بسط سری فوریه بر حسب بردارهای شبکه وارون نوشته می‌شوند.

$$\rho(x)=\sum_G e^{iGx}\rho_G \qquad (۱۰)$$

$$C_{ijnm}(x)=\sum_G e^{iGx}C_G^{ijnm} \qquad (۱۱)$$

که ρ_G ضریب فوریه چگالی جرمی و C_G^{ijnm} ضریب فوریه تانسور سختی است. با استفاده از قضیهٔ بلاخ و بسط بردار جابه‌جایی برحسب سری فوریه، می‌توان معادلهٔ زیر را نوشت:

$$\rho(r,t)=\sum_G e^{i(kx-\omega t)}(e^{iG.x}A_G e^{ik_z z}) \qquad (۱۲)$$

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 معادلهٔ (۱۲) به ازای $k_z=0$ یک تبهگنی دوگانه در بردار جابه‌جایی موج صوتی حجمی وجود دارد. با جای‌گذاری معادلات (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) در معادلهٔ (۹) و انجام عملیات ریاضی، مسألهٔ ویژه مقداری (۱۳) بدست می‌آید.

$$(Ak_z^2+Bk_z+C)U=0 \qquad (۱۳)$$

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 فونونی دو-بعدی، معادله (۱۳) را می‌توان به صورت زیر ساده کرد.

$$CU=0 \qquad (۱۴)$$

بنابراین روابط پراکندگی انتشار امواج حجمی در بلورهای فونونی 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.

ماده	چگالی kg/m^3	سرعت طولی m/s	سرعت تراگسیلی m/s
نیکل	۸۹۰۸	۶۰۴۰	۳۰۰۰
اپوکسی	۱۱۸۰	۱۱۶۰	۲۵۴۰
هوا	۱٫۳	۳۴۰	۰

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

[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-08]

[DOR: 20.1001.1.23455748.1395.4.2.2.1]

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

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

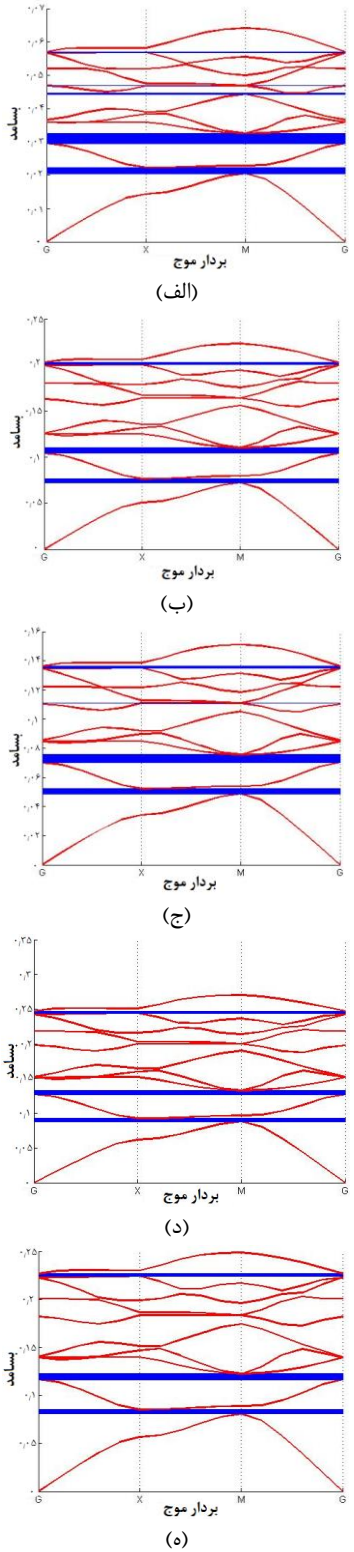
جدول ۳ اطلاعات مربوط مواد استفاده شده جهت محاسبات.

ماده / کمیت	آلومینیوم	اپوکسی
$\rho(kg/m^3)$	۲۷۰۰	۱۱۸۰
$C_{11}(N/m^2)$	$11/1\times10^{10}$	$7/58\times10^{5}$
$C_{12}(N/m^2)$	$16/3\times10^{10}$	$4/42\times10^{5}$
$C_{44}(N/m^2)$	$2/5\times10^{10}$	$1/48\times10^{5}$
$C_l(m/s)$	۶۴۲۰	۲۵۶۹
$C_t(m/s)$	۳۰۴۰	۱۱۳۹

۳. نتایج

۳-۱. 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 پهنای این گاف‌های نواری را تغییر داد. شکل‌های ۳- الف تا ه نمودار پراکندگی را برای استوانه‌های بورن، آلومینیوم، گالیوم، ایندیوم و تالیوم در زمینهٔ اپوکسی در وضعیت، r/a=۰/۳ نشان می‌دهند. با توجه به این نمودارها و مقادیر مربوط به سرعت‌ها و چگالی عناصر این گروه می‌توان نتیجه گرفت که هر چه اختلاف سرعت صوتی بین استوانه‌های فلزی جاسازی‌شده 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 صوت را می‌خواهیم حذف کنیم، ماده میهمان و زمینه به طور مناسب انتخاب خواهیم کرد.



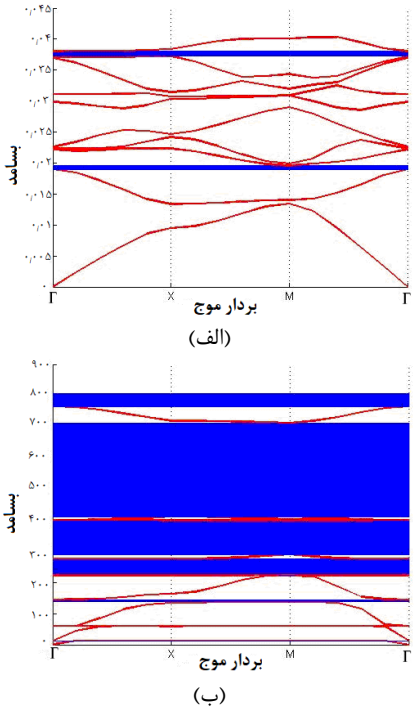
(الف) (ب) (ج) (د) (ه)

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

[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-08]

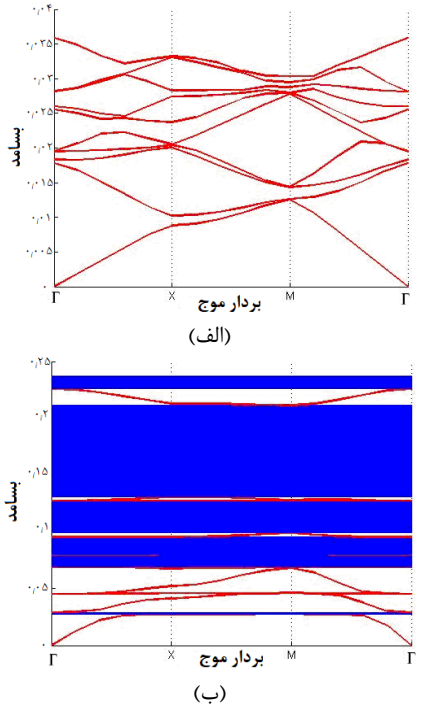
[DOR: 20.1001.1.23455748.1395.4.2.2.1]

نمودار پراکندگی، بیانگر نوارهای ممنوعه‌ای است که در برخی از بسامدهای امواج صوتی نمی‌تواند از بلور فونونی عبورکند و با تغییر پارامتر r/a و هم‌چنین جنس ماده میزبان (هوا و اپوکسی) می‌توان پهنای این گاف‌های نواری را تغییر داد. شکل‌های ۴ و ۵ نمودار پراکندگی را برای استوانه‌های نیکل در زمینهٔ هوا و اپوکسی در دو وضعیت، r/a=۰٫۴ و r/a=۰٫۱ نشان می‌دهند.



شکل ۴ نمودار پراکندگی برای استوانه‌های نیکل که در زمینه هوا جاسازی شده‌اند. الف) r/a=۰٫۱ ؛ ب) r/a=۰٫۴ .

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 و Γ-X در بسامدهای دیگر وجو دارند. در شکل ۴-ب که نسبت شعاع استوانه‌های نیکل به ثابت شبکه افزایش یافته است، گاف‌های نواری بسیار پهن مطلق در بسامدهای بالاتر، حدود ۲۰۰ تا ۸۰۰ هرتز تشکیل شده‌اند. نمودار پراکندگی بلور فونونی ساخته شده از استوانه‌های نیکل در زمینهٔ اپوکسی در شکل ۵ رسم شده‌است.



شکل ۵ نمودار پراکندگی برای استوانه‌های نیکل که در زمینهٔ اپوکسی جاسازی شده‌اند. الف) r/a=۰٫۱ ؛ ب) r/a=۰٫۴ .

با توجه با شکل ۵-الف هیچ گاف نواری مطلق برای r/a=۰٫۱ 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 r/a=۰٫۴ نسبت شعاع استوانه‌های نیکل به ثابت شبکه افزایش یافته است، گاف‌های نواری پهن مطلق در بسامدهای بالاتر، حدود ۰٫۰۷ تا ۰٫۲ و هم‌چنین از ۰٫۲۳ تا ۰٫۲۴ هرتز تشکیل شده‌اند.

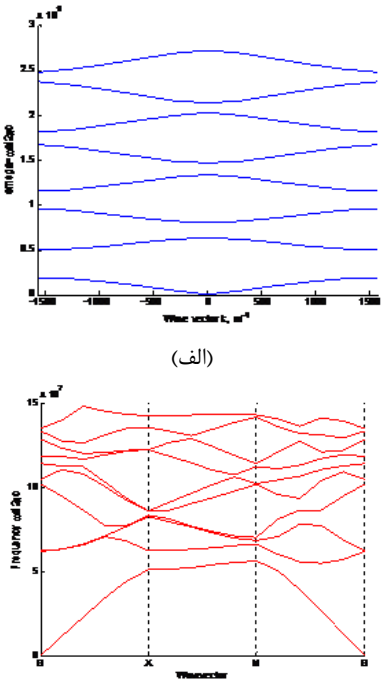
محاسبات برای بلورهای فونونی یک-بعدی با ضخامت لایه‌های ۱ میلی‌متری از کربن و هوا با ۲۵۰ موج تخت به همگرایی رسیدند و نمودار آن به صورت شکل ۶-الف رسم شده است. برای بلورهای فونونی یک-بعدی با ثابت شبکه ۱ میلی‌متری از استوانه کربن با شعاع سطح مقطع ۰٫۳ میلی‌متر در هوا با ۴۴۱ موج تخت به همگرایی رسید و نمودار آن به صورت شکل ۶- ب رسم شده است. هم‌چنین اطلاعات لازم که در محاسبات استفاده شده، در جدول ۴ آورده شده است.

[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-08]
[DOR: 20.1001.1.23455748.1395.4.2.2.1]

جدول ۴ اطلاعات لازم مواد استفاده شده برای محاسبات.

ماده	$\rho(kg/m^3)$	$C_{11}(N/m^2)$	$C_{12}(N/m^2)$	$C_{44}(N/m^2)$
کربن	۱۷۵۰	$۳۱٫۰۰\times۱۰^{۱۰}$	$۱۳٫۳۶\times۱۰^{۱۰}$	$۸٫۸۲\times۱۰^{۱۰}$
هوا	۱٫۳	$۱٫۵\times۱۰^{۵}$	$۱٫۵\times۱۰^{۵}$	۰

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 ۳×۱۰^{۹} 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 $۱٫۵\times۱۰^{۷}$ - ۰ 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 مرحلهٔ 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.



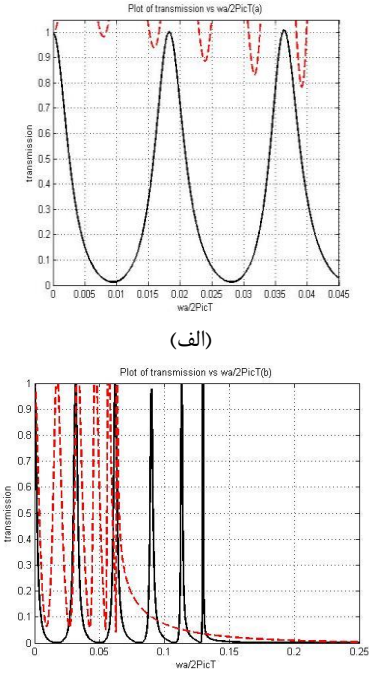
(الف)

(ب)

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

۳-۲. محاسبهٔ ضرایب تراگسیل

ضریب 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 ۱۲× ۱۲ استوانهٔ توپر نیکل در زمینهٔ اپوکسی در دو وضعیت r/a=۰٫۱ و r/a=۰٫۴ در شکل ۷ رسم شده‌اند.



(الف)

(ب)

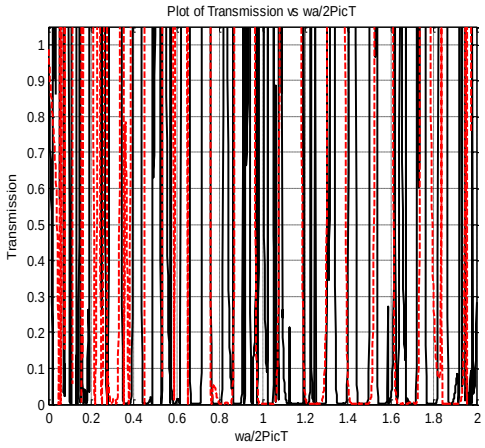
شکل ۷ نمودار تراگسیل بر حسب بسامد بهنجار شده، برای استوانه‌های توپر نیکل که در زمینه اپوکسی جاسازی شده‌اند. الف) r/a=۰٫۱ ؛ ب) r/a=۰٫۴ (خط‌چین قرمز تراگسیل طولی و خطوط مشکی تراگسیلی را نشان می‌دهند).

همان‌طور که در شکل ۷-الف مشاهده می‌شود برای r/a=۰٫۱ هیچ نوار ممنوعه‌ای که در آن تراگسیل کاملاً صفر شود وجود ندارد و فقط در برخی راستاها گاف جزئی

[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-08]

[DOR: 20.1001.1.23455748.1395.4.2.2.1]

مشاهده می‌شود اما در شکل ۷-ب گاف نواری پهن بالای ۰٫۱۵ 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 آلومینوم 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.

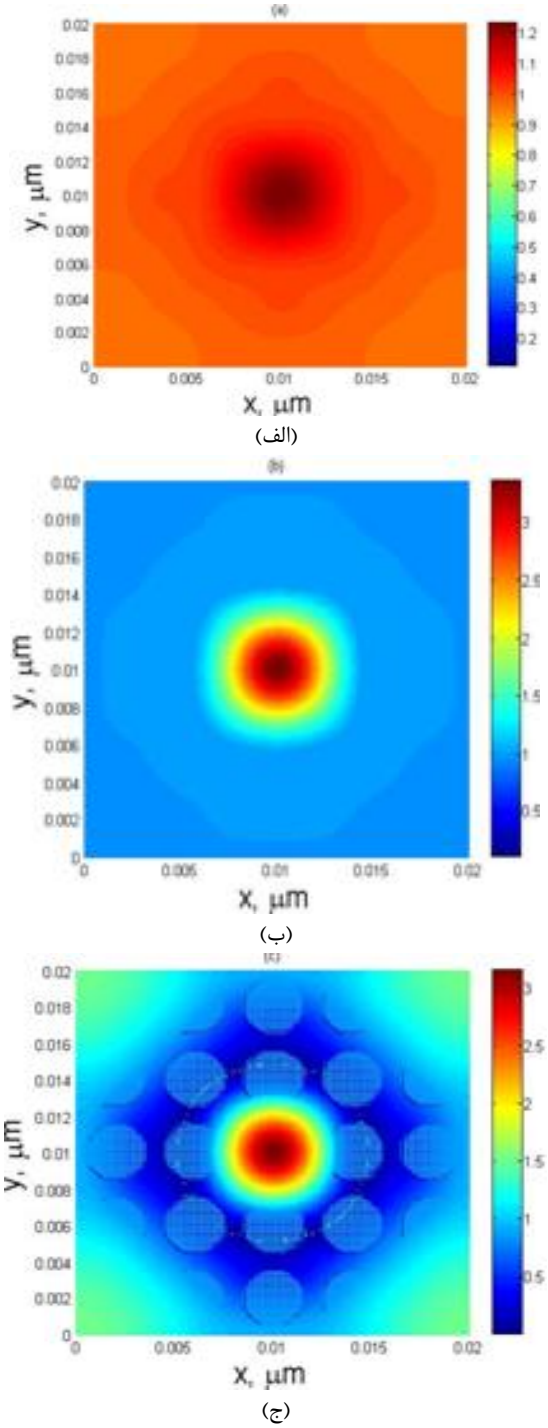


شکل ۸ نمودار ضرایب تراگسیل بلور فونونی یک-بعدی آلومینیوم در زمینه اپوکسی بر حسب بسامد بهنجار شده.

در آخرین مرحله از محاسبات، نقشه میدان جابه‌جایی کشسان در بلور فونونی دو-بعدی شامل یک شبکه مربعی ساخته شده از ۵×۵ استوانه‌های توپر نیکل که در زمینهٔ اپوکسی جاسازی‌شده، برای دو وضعیت r/a=۰٫۴ و r/a=۰٫۱، در شکل ۹ رسم شده است. در این شکل، رنگ قرمز نشان‌دهنده بیش‌ترین جابه‌جایی میدان کشسان و آبی کم‌ترین جابه‌جایی است.

۳-۳. محاسبه ضرایب جذب

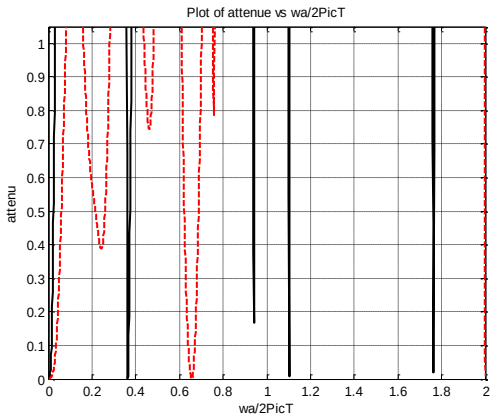
ضریب جذب یکی از عواملی است که نشان‌دهندهٔ میزان کاهش و اتلاف شدت صوتی درهنگام عبور از یک محیط می‌باشد و با استفاده از اطلاعات آن می‌توان ضریب شکست آن محیط را محاسبه نمود. شکل ۱۰ نمودار ضرایب جذب برای بلور فونونی یک-بعدی را نشان می‌دهد. این شکل بسامدهایی را که کاملاً توسط بلور فونونی یک-بعدی ساخته شده از آلومینوم و هوا، جذب شده‌اند نشان می‌دهد.



شکل ۹ نقشه میدان جابه‌جایی کشسان در بلور فونونی دو-بعدی شامل یک شبکه مربعی ساخته شده از ۵×۵ استوانه های توپر نیکل که در زمینه اپوکسی جاسازی شده است. مد اول الف) r/a=۰٫۱ ؛ ب) r/a=۰٫۴ و ج) مد دوم در r/a=۰٫۴ .

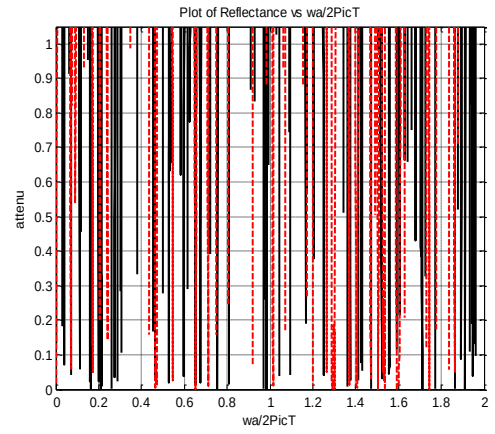
[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-08]

[DOR: 20.1001.1.23455748.1395.4.2.2.1]



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 شبکه مربعی، شامل استوانه‌های آلومینیوم در زمینه 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 زمینه اپوکسی بر حسب بسامد بهنجار شده.

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=۰٫۳ و هم‌چنین استوانه‌های نیکل در زمینهٔ هوا با r/a=۰٫۴ 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 زمینهٔ اپوکسی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که 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 می باشد. 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

[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-08]

[DOR: 20.1001.1.23455748.1395.4.2.2.1]

of locally resonant materials," Physical Review B, vol. 67, no. 14, pp. 144301, 2003.

[3] 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.

[4] A.D. Klironomos, E.N. Economou, "Elastic wave band gaps and single scattering," Solid State Commun, vol. 105, no. 5, pp. 327-332, 1998.

[5] M.M. Sigalas, C.M. Soukoulis, "Elastic-wave propagation through disordered and/or absorptive layered systems," Physical Reiview. B, vol. 51, no. 5, pp. 2780-2789, 1995.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 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.

[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-08]

[DOR: 20.1001.1.23455748.1395.4.2.2.1]