

# بررسی اثر شکل آخال بر شکاف نواری کامپوزیت آلومینا-اپوکسی

محمد باقری نوری\*

استادیار

گروه مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک،

اراک، ایران

m-bagherinoori@araku.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۱۰

## چکیده

کریستال‌های فونونیک<sup>۱</sup> مواد مرکب متناوبی هستند که از تکرار متناوب یک (یا چند) ماده آخال<sup>۲</sup> در یک زمینه تشکیل می‌شوند. داشتن خصوصیت شکاف نواری و توانایی این مواد در مدیریت انتشار امواج الاستیک موجب شده است تا پژوهش‌های متعددی در سال‌های اخیر به این موضوع اختصاص داده شوند. این مقاله به بررسی انتشار مود درون صفحه‌ای موج الاستیک در کامپوزیت آلومینا-اپوکسی پرداخته است. اثر شکل آخال بر شکاف نواری کامپوزیت به روش اجزاء محدود و با کمک نرم‌افزار کامسول مورد بررسی قرار گرفته است. آرایش شبکه مورد بررسی مربعی است. به منظور صحت‌سنجی نتایج، ابتدا ساختار نواری کریستال‌های فونونیک با شکل دایره به دست آمده و با روش بسط موج صفحه‌ای و مشاهدات تجربی مقایسه شده است. سپس ساختار نواری کریستال‌های فونونیک با شکل آخال مثلث، مربع، پنج ضلعی منتظم، شش ضلعی منتظم، هفت ضلعی منتظم، هشت ضلعی منتظم به دست آمده و مقایسه شده‌اند. نتایج به دست آمده نشان داد که شکاف نواری کریستال فونونیک با شکل آخال مثلث (محدوده ۴۷/۳ تا ۶۶/۱ و ۷۹/۹ تا ۹۰/۳ کیلوهرتز) در مقایسه با شکل‌های دیگر آخال وسیع‌تر است.

**واژگان کلیدی:** کریستال فونونیک، ساختار نواری، شکاف نواری، شکل آخال

## ۱. مقدمه

دارد. با توجه به ضعف مواد متخلخل و ویسکوالاستیک در تضعیف این ارتعاشات، در سالین اخیر، پژوهش‌های زیادی به کریستال‌های فونونیک به عنوان راه‌حلی برای این چالش اختصاص داده شده است. کریستال‌های فونونیک مواد مرکب متناوبی هستند که از تکرار متناوب یک (یا چند) ماده آخال در یک زمینه<sup>۳</sup> تشکیل می‌شوند، به گونه‌ای که چگالی و خصوصیات الاستیک زمینه و آخال‌ها متفاوت است. مواد

ارتعاشات فرکانس بالا با محدوده فرکانسی ۲۰ تا ۱۰۰ کیلوهرتز باعث کاهش دقت تست‌های غیرمخرب و میکروسکوپ‌های نیروی اتمی می‌شود [۱]. علاوه بر آن، ارتعاشات فرکانس بالا یکی از علل خرابی تجهیزات الکترونیکی است [۲]. هواپیماها، ماهواره‌ها و راکت‌ها در حین پرواز اغلب دچار شوک‌های ارتعاشی فرکانس بالا می‌شوند [۳]. بنابراین تضعیف ارتعاشات فرکانس بالا اهمیت زیادی

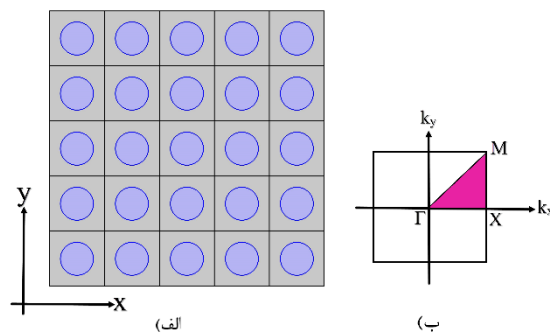
تشکیل دهنده می‌توانند جامد، مایع یا گاز باشند. همچنین تناوب ساختار ممکن است در یک، دو یا سه بعد باشد. شکاف نواری<sup>۴</sup> ویژگی متمایزکننده کریستال‌های فونونیک است. منظور از شکاف نواری کامل<sup>۵</sup> یک محدوده فرکانسی است که کریستال فونونیک از انتشار امواج الاستیک یا آکوستیک که فرکانس آنها در آن محدوده قرار می‌گیرد در همه جهات جلوگیری می‌کند. به دلیل داشتن شکاف نواری، کریستال‌های فونونیک ابزار مناسبی برای مدیریت انتشار امواج الاستیک هستند و در زمینه‌های مختلفی کاربرد دارند از جمله: ایجاد یک محیط بدون ارتعاش برای سیستم‌های مکانیکی بسیار دقیق [۴-۶]، هدایت‌کننده موج<sup>۶</sup> [۷-۸]، فیلتر [۹-۱۰]، لنز آکوستیک [۱۱-۱۳]، سنسور مایعات [۱۴-۱۶].

تاکنون پژوهش‌های زیادی به بررسی پارامترهای مؤثر بر شکاف نواری کریستال فونونیک پرداخته‌اند. مثل بررسی اثر راستای آخال‌های غیردایره‌ای [۱۷]، بررسی اثر راستای آخال‌هایی با شکل نیم‌دایره‌ای توخالی [۱۸]، بررسی اثر افزودن آخال اضافه به سلول واحد اولیه [۱۹-۲۰]، کریستال فونونیک مرکب [۲۱-۲۳]، کریستال فونونیک سلسله مراتبی [۲۴-۲۷]. علاوه بر آن، مقالات مختلفی به بررسی اثر شکل آخال بر شکاف نواری کریستال فونونیک اختصاص داده شده است از آن جمله، بررسی اثر آخال با شکل فرکتال<sup>۷</sup> [۲۹]، بررسی

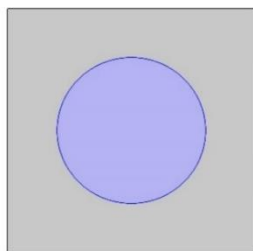
کریستال فونونیک با شکل آخال ستاره [۳۰-۳۱]، بررسی کریستال فونونیک آگرتیک<sup>۸</sup> با شکل آخال کوکی<sup>۹</sup> [۳۲]، بهینه‌سازی کریستال فونونیک با شکل آخال مربعی [۳۳]، بررسی کریستال فونونیک با شکل صلیب [۳۴]. اگرچه در مطالعات مختلفی کامپوزیت‌های پلیمری [۳۵-۳۹] مورد مطالعه قرار گرفته‌اند اما اثر شکل آخال بر ساختار نواری کریستال‌های فونونیک پلیمری مورد بررسی قرار نگرفته است. در این مقاله اثر شکل آخال بر شکاف نواری کامپوزیت آلومینا-اپوکسی به روش اجزاء محدود و با کمک نرم‌افزار کامسول مورد بررسی قرار می‌گیرد. ساختارهای نواری کریستال‌های فونونیک با شکل آخال مثلث، مربع، پنج ضلعی منتظم، شش ضلعی منتظم، هفت ضلعی منتظم، هشت ضلعی منتظم و دایره به دست آمده و مقایسه می‌شوند.

## ۲. کریستال فونونیک آلومینا-اپوکسی

ساختار مورد بررسی در این مقاله از تکرار متناوب آخال‌های آلومینا در زمینه اپوکسی حاصل می‌شود. آرایش شبکه از نوع مربعی است. فرض می‌شود که این تکرار متناوب در داخل صفحه، در دو جهت تا بی‌نهایت ادامه می‌یابد. شکل ۱ کریستال فونونیک با آرایش مربعی را نشان می‌دهد که در آن، شکل آخال‌های آلومینا دایره‌ای است. در واقع شکل ۱ بخشی از کریستال فونونیک را نمایش داده است.



شکل ۱. الف) آرایش مربعی آخال‌های آلومینا در زمینه اپوکسی ب) ناحیه بریلون<sup>۱۰</sup> کاهش یافته



شکل ۲. سلول واحد ساختار نمایش داده شده در شکل ۱

### ۳. معادلات حاکم

کریستال فونونیک مورد بررسی در این پژوهش دو بعدی است. آخال‌ها در راستای Z قرار دارند و درون صفحه XY به‌طور متناوب تکرار می‌شوند. در غیاب نیروهای حجمی، معادلات موج الاستیک به‌صورت زیر است:

$$\rho \ddot{u}_i = \sigma_{ij,j} \quad (1)$$

$$\sigma_{ij} = C_{ijmn} u_{m,n} \quad (2)$$

که  $\rho = \rho(x, y)$  و  $C_{ijmn}(x, y)$  به ترتیب چگالی و تانسور ضرایب الاستیک ساختار هستند. قرارداد جمع روی اندیس‌های تکراری فرض می‌شود. از آنجایی که انتشار امواج درون صفحه XY در نظر گرفته می‌شود جابه‌جایی و تنش شبکه به Z بستگی نخواهد داشت یعنی:  $u_i = u_i(x, y, t)$  و  $\sigma_{ij} = \sigma_{ij}(x, y, t)$  و معادلات مد ترکیبی<sup>۱۱</sup> از مد عرضی مجزا خواهد شد [۴۰]. در ادامه انتشار مد ترکیبی یا درون صفحه‌ای (جابه‌جایی درون صفحه XY) بررسی می‌شود.

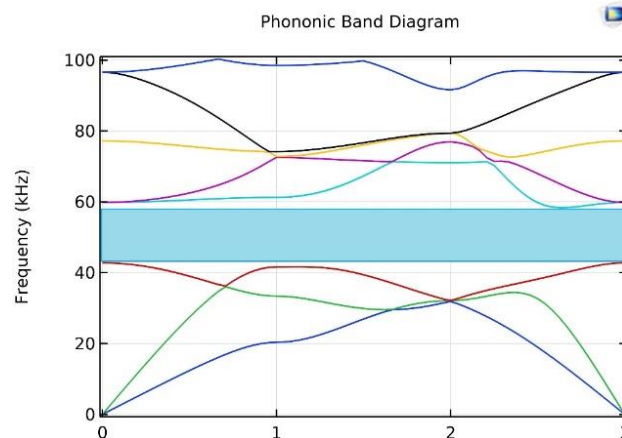
با توجه به انتشار موج در صفحه XY و با توجه به نظریه بلاخ<sup>۱۲</sup>، معادله زیر برای جابه‌جایی به‌دست می‌آید که به شرط مرزی متناوب بلاخ معروف است:

$$u(X + a, t) = e^{ik.a} u(X, t) \quad (3)$$

که در آن  $X = (x, y)$ ،  $a$  بردار شبکه و  $k$  بردار موج است [۴۰]. براساس نظریه بلاخ، به‌جای تحلیل کل ساختار (که درون صفحه در دو جهت تا بی‌نهایت ادامه می‌یابد) می‌توان یک سلول واحد ساختار را با در نظر گرفتن شرط مرزی متناوب بلاخ تحلیل کرد. شکل ۲ سلول واحد ساختار نمایش داده شده در شکل ۱ را نمایش می‌دهد.

### ۴. شبیه‌سازی و نتایج

در این مقاله فرض می‌شود که آخال و زمینه ایزوتروپیک هستند. برای مطالعه ساختار مورد نظر، از روش اجزاء محدود استفاده شده و نتایج به کمک نرم‌افزار کامسول به‌دست آمده‌اند. به‌منظور صحت‌سنجی نتایج، ابتدا شکل آخال آلومینا دایره در نظر گرفته شده و نتایج با نتایج مرجع [۳۶] مقایسه شده است. نسبت پرکنندگی<sup>۱۳</sup>  $0.283$  و ثابت شبکه ۲۲ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. منظور از نسبت پرکنندگی، نسبت مساحت آخال به مساحت کل سلول واحد است. چگالی، سرعت امواج طولی و عرضی در آلومینا به ترتیب ۳۹۷۰ کیلوگرم بر متر مکعب،  $10844$  و  $6421$  متر بر ثانیه لحاظ شده است. همین خصوصیات برای اپوکسی به ترتیب  $1142$  کیلوگرم بر متر مکعب،  $2654$  و  $1175$  متر بر ثانیه است [۳۶]. این پارامترها در سرتاسر این مقاله ثابت در نظر گرفته می‌شود. شکل ۳ ساختار نواری کریستال فونونیک فوق با شکل آخال دایره (شعاع  $6/6$  میلی‌متر که معادل نسبت پرکنندگی  $0.283$  است) را نشان می‌دهد.



شکل ۳. ساختار نواری کریستال فونونیک فوق با شکل آخال دایره برای مود درون صفحه‌ای. راستای ۰-۱، ۱-۲ و ۲-۳ به ترتیب راستای  $\Gamma$ -X،  $\Gamma$ -M و X-M ناحیه بریلئون کاهش یافته‌اند.

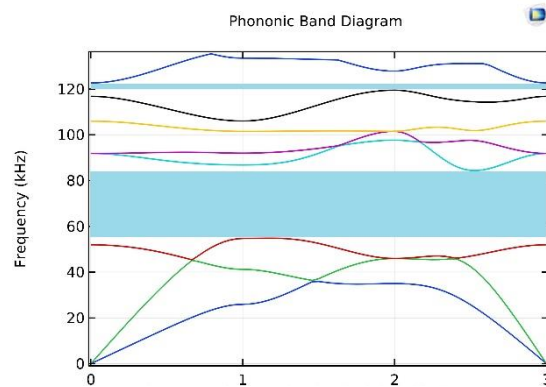
براساس بررسی‌های نویسنده، بررسی تجربی شکاف نواری کریستال فونونیک آلومینا-اپوکسی در مقاله‌ای انجام نشده است. از این رو به منظور صحت‌سنجی نتایج با مشاهدات تجربی، شکاف نواری کریستال فونونیک دور آلومین<sup>۱۵</sup>- اپوکسی به دست آمده از تحلیل اجزاء محدود با مشاهدات تجربی مرجع [۴۱] مقایسه شده است.

ثابت شبکه کریستال فونونیک دور آلومین-اپوکسی ۲۲ میلی‌متر و قطر آخال‌های دایره‌ای شکل، ۱۶ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. چگالی، سرعت امواج طولی و عرضی در دور آلومین به ترتیب ۲۷۹۹ کیلوگرم بر متر مکعب، ۶۳۴۲ و ۳۰۹۵ متر بر ثانیه لحاظ شده است. همین خصوصیات برای اپوکسی به ترتیب ۱۱۴۲ کیلوگرم بر متر مکعب، ۲۵۶۹ و ۱۱۳۹ متر بر ثانیه است [۴۱]. شکل ۴ ساختار نواری کریستال فونونیک فوق را نشان می‌دهد.

به عنوان نمونه، اگر بردار موج منطبق بر بردار موج M ناحیه بریلئون کاهش یافته (نقطه ۲ در محور افقی شکل ۳) در نظر گرفته شود، یعنی نقطه ۲ روی محور افقی با منحنی‌های شکل ۳ قطع داده شود، منحنی‌های شکل ۳ در نقاط ۳۲، ۷۱، ۷۶، ۸۰ و ۹۱ کیلوهرتز قطع می‌شود. در واقع شکل ۳ بیان می‌کند که در صورتی که بردار موج M باشد، موج با فرکانس‌های ۳۲، ۷۱، ۷۶، ۸۰ و ۹۱ کیلوهرتز از ساختار عبور می‌کند. منحنی‌های مختلف در شکل ۳ تمایزی نسبت به هم ندارند و بیانگر فرکانس‌هایی هستند که در راستاهای مختلف از ساختار عبور می‌کند.

ناحیه مستطیلی آبی رنگ در شکل ۳، محدوده فرکانسی را نشان می‌دهد که به ازای آن هیچ بردار موجی وجود ندارد. به عبارت دیگر در صورتی که موج با فرکانس‌هایی در این محدوده به سمت ساختار منتشر شود، ساختار از عبور این موج در همه جهات جلوگیری خواهد کرد.

همان‌طور که از شکل ۳ پیدا است، روش اجزاء محدود، شکاف نواری کامل ۴۲/۸ تا ۵۸/۴ کیلوهرتز (ناحیه مستطیلی آبی رنگ) را برای ساختار با شکل آخال دایره‌ای در مود درون صفحه‌ای پیش‌بینی می‌کند که تطابق بسیار خوبی با روش بسط موج صفحه‌ای<sup>۱۴</sup> مرجع [۳۶] دارد.



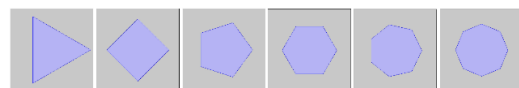
شکل ۴. ساختار نواری کریستال فونونیک دور آلومین-اپوکسی با شکل آخال دایره برای مود درون صفحه‌ای. راستای ۰-۱، ۱-۲ و ۲-۳ به ترتیب راستای  $\Gamma$ -X، X-M،  $\Gamma$ -X و M- $\Gamma$  ناحیه بریلون کاهش یافته‌اند.

شکل ۶ ساختار نواری کریستال فونونیک با شکل آخال مثلث را نمایش می‌دهد. از شکل ۶ می‌توان دریافت که شکاف نواری کریستال فونونیک با شکل آخال مثلث محدوده فرکانسی  $47/3$  تا  $66/1$  کیلوهرتز و  $79/9$  تا  $90/3$  کیلوهرتز است. ساختار نواری کریستال فونونیک با شکل آخال مربع در شکل ۷ ارائه شده بیانگر شکاف نواری  $47$  تا  $64$  کیلوهرتز و  $79/5$  تا  $82/2$  کیلوهرتز است. شکل ۸ به ساختار نواری کریستال فونونیک با شکل آخال پنج ضلعی منتظم اختصاص دارد و شکاف نواری  $43/09$  تا  $53/09$  کیلوهرتز را نشان می‌دهد. در شکل ۹ ساختار نواری کریستال فونونیک با شکل آخال شش ضلعی منتظم نشان داده شده است. همان‌طور که از این شکل مشخص است، شکاف نواری در این حالت،  $43/4$  تا  $59/3$  کیلوهرتز است. ساختار نواری کریستال فونونیک با شکل آخال هفت ضلعی منتظم در شکل ۱۰ ارائه شده است که بر شکاف نواری  $43/2$  تا  $59$  کیلوهرتز دلالت دارد. در شکل ۱۱ ساختار نواری کریستال فونونیک با شکل آخال هشت ضلعی منتظم آورده شده که بیانگر شکاف نواری  $43$  تا  $58/8$  کیلوهرتز است.

همان‌طور که از شکل ۴ پیدا است، روش اجزاء محدود، شکاف نواری کامل  $54/9$  تا  $84/4$  و  $119/5$  تا  $122/6$  کیلوهرتز (ناحیه مستطیلی آبی رنگ) را برای کریستال فونونیک دور آلومین-اپوکسی با شکل آخال دایره‌ای در مود درون صفحه‌ای پیش‌بینی می‌کند که تطابق بسیار خوبی با مشاهدات تجربی مرجع [۴۱] دارد. نتایج مشاهدات تجربی، شکاف نواری  $55$  تا  $85$  و  $115$  تا  $125$  کیلوهرتز را نشان می‌دهد [۴۱].

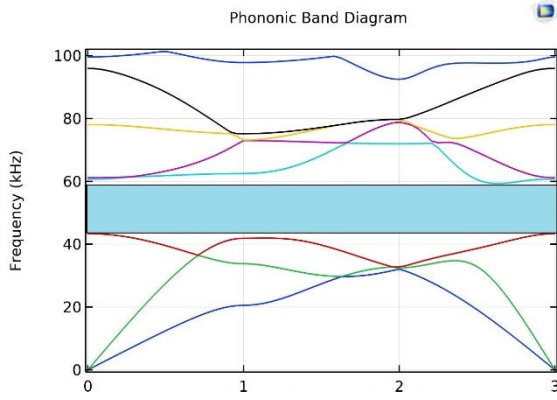
#### ۴-۱. بررسی اثر شکل آخال بر شکاف نواری کریستال فونونیک آلومینا-اپوکسی

در ادامه شکل مثلث متساوی‌الاضلاع، مربع، پنج ضلعی منتظم، شش ضلعی منتظم، هفت ضلعی منتظم و هشت ضلعی منتظم به‌عنوان شکل آخال در نظر گرفته شده است و کریستال فونونیک حاصل مورد تحلیل قرار گرفته است. در شکل ۵، شش شکل فوق (به‌عبارتی از ۳ ضلعی منتظم تا ۸ ضلعی منتظم) نمایش داده شده‌اند. در همه شش شکل فوق، ثابت شبکه  $22$  میلی‌متر و نسبت پرکنندگی  $0/283$  است.



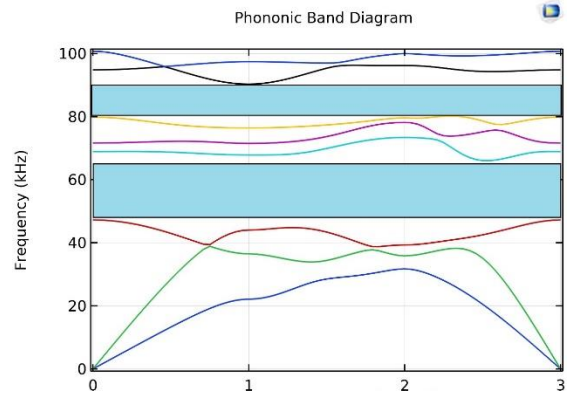
شکل ۵. سلول واحد کریستال فونونیک با شکل‌های مختلف

آخال

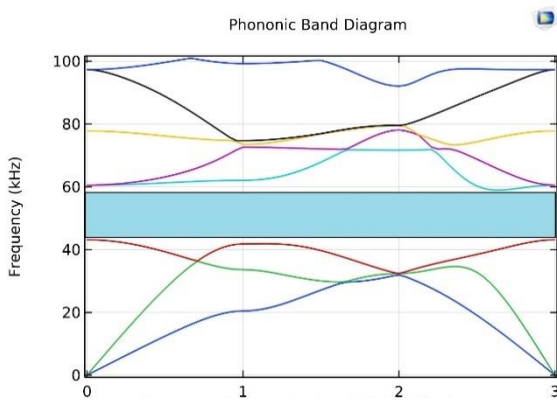


شکل ۹. ساختار نواری کریستال فونونیک با شکل آخال شش

ضلعی منتظم

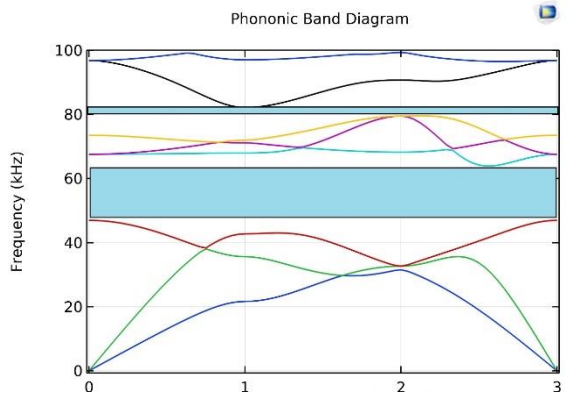


شکل ۶. ساختار نواری کریستال فونونیک با شکل آخال مثلث

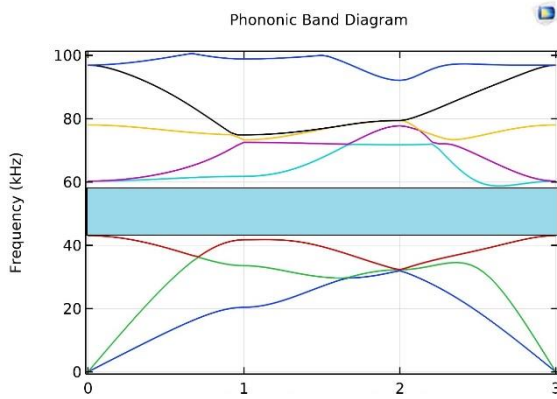


شکل ۱۰. ساختار نواری کریستال فونونیک با شکل آخال هفت

ضلعی منتظم

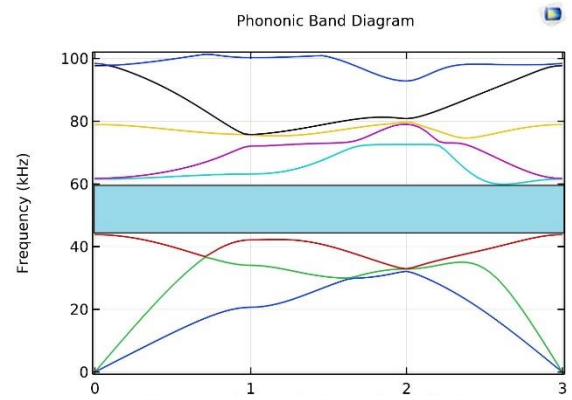


شکل ۷. ساختار نواری کریستال فونونیک با شکل آخال مربع



شکل ۱۱. ساختار نواری کریستال فونونیک با شکل آخال هشت

ضلعی منتظم

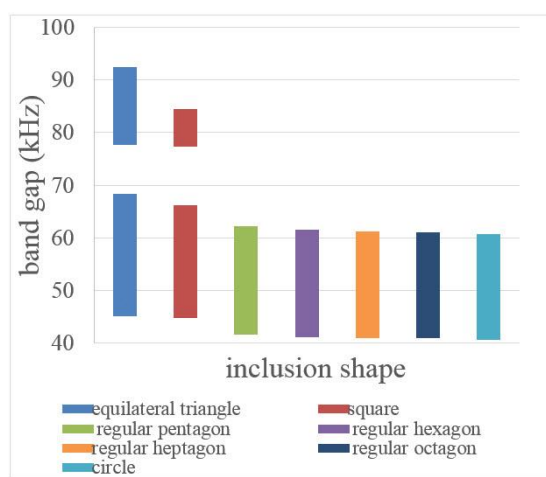


شکل ۸. ساختار نواری کریستال فونونیک با شکل آخال پنج

ضلعی منتظم

شکاف نواری، کریستال‌های فونونیک ابزار مناسبی برای مدیریت انتشار امواج الاستیک هستند. از این رو، هرچه شکاف نواری وسیع‌تر باشد، کریستال‌های فونونیک در محدوده فرکانسی وسیع‌تری قادر به مدیریت انتشار امواج الاستیک هستند. از این رو برای داشتن وسیع‌ترین شکاف نواری و بهترین عملکرد در مدیریت انتشار امواج الاستیک، شکل آخال باید مثلث در نظر گرفته شود.

شکل ۱۲ شکاف نواری را برای شکل‌های مختلف آخال مقایسه می‌کند. همان‌طور که از این شکل می‌توان دید، در حالتی که شکل آخال مثلث است، شکاف نواری وسیع‌تر از حالت‌های دیگر است. شکاف نواری کریستال فونونیک با شکل آخال شش ضلعی منتظم، هفت ضلعی منتظم، هشت ضلعی منتظم و دایره تقریباً یکسان است. همان‌طور که در بخش مقدمه بیان شد، شکاف نواری ویژگی متمایزکننده کریستال‌های فونونیک است و به دلیل داشتن



شکل ۱۲. شکاف نواری کریستال فونونیک با شکل آخال مختلف. از چپ به راست به ترتیب، مثلث، مربع، پنج ضلعی منتظم، شش ضلعی منتظم، هفت ضلعی منتظم، هشت ضلعی منتظم و دایره

است. نتایج نشان داد که برای دستیابی به وسیع‌ترین شکاف نواری باید شکل آخال، مثلث باشد. در این حالت شکاف نواری محدوده فرکانسی ۴۷/۳ تا ۶۶/۱ کیلوهرتز و ۷۹/۹ تا ۹۰/۳ کیلوهرتز است. همچنین شکاف نواری کریستال فونونیک با شکل آخال شش ضلعی منتظم، هفت ضلعی منتظم، هشت ضلعی منتظم و دایره تقریباً یکسان است.

## ۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی اثر شکل آخال بر ساختار نواری کریستال فونونیک آلومینا-اپوکسی پرداخته شده است. ساختارهای نواری کریستال‌های فونونیک با شکل آخال مثلث، مربع، پنج ضلعی منتظم، شش ضلعی منتظم، هفت ضلعی منتظم، هشت ضلعی منتظم و دایره به دست آمده

## ۶. مأخذ

- [1] Krause, Martin, Ulrike Dackermann, and Jianchun Li., "Elastic wave modes for the assessment of structural timber: ultrasonic echo for building elements and guided waves for pole and pile structures", *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 2015, Vol.5, pp.221-249.
- [2] Han, Jae-Hung, Se-Hyun Youn, Ho-Kyung Jeong, and Young-Soon Jang, "Enhanced shock and vibration isolator for the attenuation of low-frequency vibration and high-frequency

- pyroshock loads", In *Third International Conference on Smart Materials and Nanotechnology in Engineering*, 2012, Vol.8409, pp.288-295. SPIE, 2012.
- [3] Guo, Jin, Rui Zhao, and Yunbo Shi, "Towards Broadband High-Frequency Vibration Attenuation Using Notched Cross-Shaped Metamaterial", *Micromachines*, 2023, Vol.14, no.2, p.414.
- [4] Wei, Qi, Jiawei Xiang, Weiping Zhu, and Hongjiu Hu., "WBEM-based analysis of band structures of solid-solid and fluid-fluid phononic crystals with frequency-independent fundamental solutions", *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2023, Vol.151, pp.439-456.
- [5] Li, Yingli, Gengwang Yan, Xiaohong Dong, Yong Peng, and Xudong Jiang, "Elastic wave propagation and bandgaps mechanism of two-dimensional windmill-like elastic metamaterials", *Applied Acoustics*, 2023, Vol.208, p.109364.
- [6] Chen, C. Q., J. Z. Cui, H. L. Duan, Xi-Qiao Feng, L. H. He, G. K. Hu, M. J. Huang et al., "Perspectives in mechanics of heterogeneous solids", *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2011, Vol.24, no.1, pp.1-26.
- [7] Yuan, Wenlou, Akira Nagakubo, Oliver B. Wright, and Hirotsugu Ogi, "High sensitivity biosensing scheme based on a GHz phononic crystal waveguide", *Japanese Journal of Applied Physics*, 2023, Vol.62, no.SJ, p. SJ1012.
- [8] Laude, Vincent, "Principles and properties of phononic crystal waveguides", *Apl Materials*, 2021, Vol.9, no.8.
- [9] Hosseinkhani, Ali, Emad Panahi, Mohammad Farid Khansanami, and Davood Younesian, "A modified star-shaped phononic crystal for the vibration wave filtration in plates: design and experiment", *Archive of Applied Mechanics*, 2023, Vol.93, no.8, pp.3153-3169.
- [10] Lee, Ki Yong, and Wonju Jeon, "Hierarchical phononic crystals for filtering multiple target frequencies of ultrasound", *Scientific Reports*, 2020, Vol.10, no.1, p.8070.
- [11] Allam, Ahmed, Karim Sabra, and Alper Erturk, "3D-printed gradient-index phononic crystal lens for underwater acoustic wave focusing", *Physical Review Applied*, 2020, Vol.13, no.6, p.064064.
- [12] Danawe, Hrishikesh, and Serife Tol., "Broadband subwavelength imaging of flexural elastic waves in flat phononic crystal lenses", *Scientific Reports*, 2023, Vol.13, no.1, p.7310.
- [13] Ruan, Yongdu, and Xu Liang, "2D phononic-crystal Luneburg lens for all-angle underwater sound localization", *Acta Acustica*, 2022, Vol.6, p.12.
- [14] Alrowaili, Z. A., M. Aouassa, M. H. Mahmoud, Karam S. El-Nasser, Hussein A. Elsayed, T. A. Taha, Ashour M. Ahmed, Ali Hajjiah, and Ahmed Mehaney, "Locally resonant porous phononic crystal sensor for heavy metals detection: A new approach of highly sensitive liquid sensors", *Journal of Molecular Liquids*, 2023, Vol.369, p.120964.
- [15] Lucklum, Ralf, Nikolay Mukhin, Bahram Djafari Rouhani, and Yan Pennec, "Phononic crystal sensors: A new class of resonant sensors—Chances and challenges for the determination of liquid properties", *Frontiers in Mechanical Engineering*, 2021, Vol.7, p.705194.



- [16] Gharibi, Hamed, and Ahmed Mehaney, "Two-dimensional phononic crystal sensor for volumetric detection of hydrogen peroxide (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) in liquids", *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 2021, Vol.126, p.114429.
- [17] Zhong, Lanhua, Fugen Wu, Xin Zhang, Huilin Zhong, and Shao Zhong, "Effects of orientation and symmetry of rods on the complete acoustic band gap in two-dimensional periodic solid/gas systems", *Physics Letters A*, 2005, Vol.339, no.1-2, pp.164-170.
- [18] Lu, TianJian, GuoQin Gao, ShouLin Ma, Feng Jin, and T. Kim, "Acoustic band gaps in two-dimensional square arrays of semi-hollow circular cylinders", *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2009, Vol.52, no.2, pp.303-312.
- [19] Yao, Yuanwei, Zhilin Hou, and Youyan Liu, "The two-dimensional phononic band gaps tuned by the position of the additional rod", *Physics Letters A*, 2007, Vol.362, no.5-6, pp.494-499.
- [20] Liu, Wei, Ji-Wei Chen, and Xian-Yue Su, "Local resonance phononic band gaps in modified two-dimensional lattice materials", *Acta Mechanica Sinica*, 2012, Vol.28, no.3, pp.659-669.
- [21] Wei, Ruiju, Bin Wu, Cunfu He, and Huanyu Zhao, "Phononic band structure in a two-dimensional hybrid triangular graphite lattice", *Physica B: Condensed Matter*, 2009, Vol.404, no.20, pp.3795-3798.
- [22] Wu, Bin, Ruiju Wei, Huanyu Zhao, and Cunfu He, "Phononic band gaps in two-dimensional hybrid triangular lattice", *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2010, Vol.23, no.3, pp.255-259.
- [23] Wei, Ruiju, Bin Wu, Huanyu Zhao, Jianbao Li, and Cunfu He, "Breaking bands degeneracy in two-dimensional hybrid triangular lattice phononic crystal: A theoretical and experimental study", *Solid state communications*, 2010, Vol.150, no.31-32, pp.1463-1466.
- [24] Yuan-Wei, Yao, Hou Zhi-Lin, and Liu You-Yan, "Transmission frequency properties of elastic waves along a hetero-phononic crystal waveguide", *Chinese Physics Letters*, 2007, Vol.24, no.2, p.468.
- [25] Yao, Y. W., F. G. Wu, Z. L. Hou, and Y. Y. Liu, "Propagation properties of elastic waves in semi-infinite phononic crystals and related waveguides", *The European Physical Journal B*, 2007, Vol.58, pp.353-360.
- [26] Nouri, Mohammad Bagheri, and Mehran Moradi, "Presentation and investigation of a new two dimensional heterostructure phononic crystal to obtain extended band gap", *Physica B: Condensed Matter*, 2016, Vol.489, pp.28-32.
- [27] Xu, Y. L., X. G. Tian, and C. Q. Chen, "Band structures of two dimensional solid/air hierarchical phononic crystals", *Physica B: Condensed Matter*, 2012, Vol.407, no.12, pp.1995-2001.
- [28] Lei, Lijian, Linchang Miao, Haizhong Zheng, Pengteng Wu, and Minghui Lu, "Band gap extending of locally resonant phononic crystal with outward hierarchical structure", *Applied Physics A*, 2022, Vol.128, no.6, p.492.
- [29] Luo, Haoming, Yue Ren, Anthony Gravouil, Valentina M. Giordano, Qing Zhou, Haifeng Wang, and Anne Tanguy, "Role of a fractal shape of the inclusions on acoustic attenuation in a nanocomposite", *APL Materials*, 2021, Vol.9, no.8.

- [30] Hosseinkhani, Ali, Emad Panahi, Mohammad Farid Khansanami, and Davood Younesian, "A modified star-shaped phononic crystal for the vibration wave filtration in plates: design and experiment", *Archive of Applied Mechanics*, 2023, Vol.93, no.8, pp.3153-3169.
- [31] Chang, Shu-Yeh, Chung-De Chen, Jia-Yi Yeh, and Lien-Wen Chen, "Elastic wave propagation of two-dimensional metamaterials composed of auxetic star-shaped honeycomb structures", *Crystals*, 2019, Vol.9, no.3, p.121.
- [32] Xiao, Si-Hang, Chong Zhang, Qing-Hua Qin, and Hui Wang, "A novel planar auxetic phononic crystal with periodic cookie-shaped cellular microstructures", *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2022, Vol.29, no.23, pp.3345-3358.
- [33] Alhammadi, Alya, Jin-You Lu, Mahra Almheiri, Fatima Alzaabi, Zineb Matouk, Mohamed Al Teneiji, Rashid K. Abu Al-Rub, Vincenzo Giannini, and Dong-Wook Lee, "Numerical modelling and optimization of two-dimensional phononic band gaps in elastic metamaterials with square inclusions", *Applied Sciences*, 2021, Vol.11, no.7, p.3124.
- [34] Panahi, Emad, Ali Hosseinkhani, Mohammad Farid Khansanami, Davood Younesian, and Mostafa Ranjbar, "Novel cross shape phononic crystals with broadband vibration wave attenuation characteristic: Design, modeling and testing", *Thin-Walled Structures*, 2021, Vol.163, p.107665.
- [35] Miranda Jr, Edson, Clodualdo Aranas Jr, Samuel Rodrigues, Hélio Silva, Gedeon Reis, Antônio Paiva, and José Dos Santos, "Dispersion diagram of trigonal piezoelectric phononic structures with Langasite inclusions", *Crystals*, 2021, Vol.11, no.5, p.491.
- [36] Miranda Jr, Edson Jansen Pedrosa, and José Maria Campos dos Santos, "Phononic band gaps in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/epoxy composite", In *Materials Science Forum*, 2018, Vol. 912, pp.112-117. Trans Tech Publications Ltd, 2018.
- [37] Krushynska, A.O., Gliozzi, A.S., Fina, A., Krushinsky, D., Battezzatore, D., Badillo-Ávila, M.A., Acuautla, M., Stassi, S., Noè, C., Pugno, N.M. and Bosia, F., "Dissipative dynamics of polymer phononic materials", *Advanced Functional Materials*, 2021, Vol.31, no.30, p.2103424.
- [38] Yu, Tianmiao, Fengchun Jiang, Mengxin Cao, Chunhe Wang, Ruonan Qin, and Chunhuan Guo, "Sound insulation of a novel laminated polymer matrix composite containing metallic hollow spheres based on phononic crystal structure design", *Polymers for Advanced Technologies*, 2022, Vol.33, no.2, pp.601-609.
- [39] Oliveira, Vinícius Braga Santos de, Lucas Franco Corrêa Schalcher, José Maria Campos Dos Santos, and Edson Jansen Pedrosa de Miranda Jr., "Wave attenuation in 1-D viscoelastic phononic crystal rods using different polymers", *Materials Research*, 2023, Vol.26, p.e20220534.
- [40] Tanaka, Yukihiro, Yoshinobu Tomoyasu, and Shin-ichiro Tamura, "Band structure of acoustic waves in phononic lattices: Two-dimensional composites with large acoustic mismatch", *Physical Review B*, 2000, Vol.62, no.11, p.7387.
- [41] Vasseur, Jérôme Olivier, P. A. Deymier, G. Frantzikonis, G. Hong, Bahram Djafari-Rouhani, and Leonard Dobrzynski, "Experimental evidence for the existence of absolute acoustic band gaps in two-dimensional periodic composite media", *Journal of Physics: Condensed Matter*, 1998, Vol.10, no.27, p.6051.

- 
1. Phononic Crystal
  2. Inclusion
  3. Host
  4. Band Gap
  5. Complete Band Gap
  6. Wave Guide
  7. Fractal
  8. auxetic phononic crystal
  9. Cookie-shaped
  10. Brillouin Zone
  11. Mixed mode
  12. Bloch's theorem
  13. Filling Fraction
  14. Plane Wave Expansion Method
  15. Duralumin