

A review of two-dimensional phononic crystal structures

Mohammad Bagherinouri ^{a*}

^a Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak 38156-88349, Iran

Review Article

Use your device to scan
and read the article online



Citation: Bagherinouri M. A review of two-dimensional phononic crystal structures. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2023;3(3):325-345.

doi <https://10.61186/masm.3.3.325>.

KEYWORDS

Phononic crystal,
Band gap,
Band structure,
finite difference method,
two-dimensional structure.

ABSTRACT

Phononic crystals are advanced structures which are created by repetition of inclusions in an elastically different host material. The distinguishing feature of these materials is the existence of a band gap. complete band gap is a frequency range that the phononic crystal prevents the propagation of elastic or acoustic waves in all directions whose frequency is in that range. Due to the feature of band gap, phononic crystals are suitable for managing the propagation of elastic waves. In this research, two-dimensional phononic crystal structures have been investigated. In order to reach the optimal band gap, many works have been done on the phononic crystal structures. In this article, the above efforts have been investigated including rotation of non-circular inclusions, adding an inclusion to the primary unit cell, changing the type of lattice and the shape of the inclusion, hybrid phononic crystal, nested phononic crystal, heterostructure phononic crystal, hierarchical phononic crystal and the use of Smart materials.

Extended Abstract

1. Introduction

Phononic crystals are composite materials that are formed by repetition one or more inclusions materials in an elastically different host material. Constituent materials can be solid, liquid or gas. Also, the periodicity of the structure may be in one dimension, two dimensions, or three dimensions. Figure 1 shows the arrangement of one-dimensional, two-dimensional and three-dimensional phononic crystal.

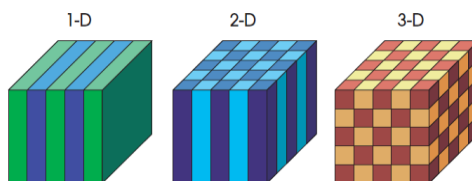


Figure 1. 1d, 2d and 3d arrangement of phononic crystal

The distinguishing feature of phononic crystals is the band gap. Full bandgap is a frequency range that the phononic crystal prevents the propagation of elastic or acoustic waves whose frequency is in that range in all directions.

Due to their band gap feature, phononic crystals are suitable for management of elastic waves propagation. A complete band gap can provide a vibration-free environment for very accurate mechanical systems [7]. By

* Corresponding author. Tel.: +98- 9184832685

E-mail address: m-bagherinoori@araku.ac.ir

DOI: <https://10.61186/masm.3.3.325>.

Received: September 27, 2023; Received in revised form: November 03, 2023; Accepted: November 19, 2023

© Author



removing the periodicity of the structure, it is possible to create guided modes inside the band gap. The wave whose frequency is within the band gap of the phononic crystal is guided well by the phononic crystal waveguide and is concentrated around the structural defect. This ability makes the phononic crystal a suitable option for designing acoustic or elastic microcavities, waveguides, filters, complete mirrors. The simultaneous use of point and line defect can lead to applications such as filter, multi-frequency separation and coupler [8]. Liquid sensor is another application of phononic crystal [9-11]. In order to reach the desired band gap, many works have been done on the phononic crystal structure. This article studied the above efforts in tuning the band gap of two-dimensional phononic crystals.

2. Achieving the desired band gap in two-dimensional phononic crystal structures

In order to reach the desired band gap, many works have been done on the phononic crystal structure, such as rotating non-circular inclusions [12], adding an inclusion to the primary unit cell, changing the lattice type, changing the shape of the inclusion, changing the filling ratio and creating a new lattice from the combination of two different lattices [13].

2.1. rotation of non-circular inclusions

Zhong et al. investigated the dependence of the full band gap on the direction of the inclusion rods with a non-circular cross section (triangular, square, hexagonal, octagonal) [14]. TianJian et al. did similar work on phononic crystals with semi-circle inclusion [15].

2.2. Adding an inclusion to the primary unit cell

Yao and his colleagues [16] studied the band structure of a two-dimensional phononic crystal with two inclusions in a single cell using the plane wave expansion method. The results of their work showed that the band gap can be adjusted by changing the position of additional inclusions.

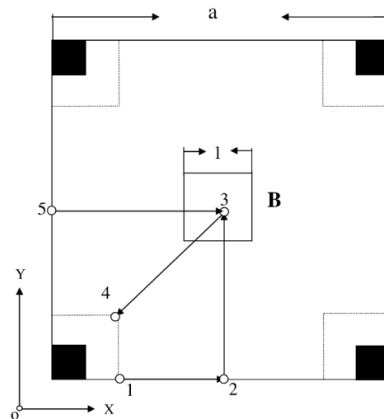


Figure 2. Two-dimensional phononic crystal unit cell. The extra bar is represented by B. [16]

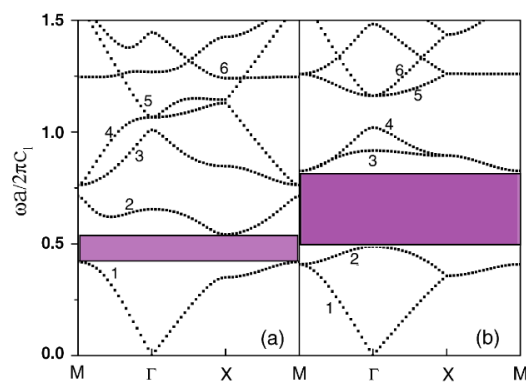


Figure 3. The band structure of the studied phononic crystal, where the full band gap is marked with a purple rectangle, a) with one rod in the unit cell b) with two rods in the unit cell, where the additional rod is located in the center of the unit cell. [16]

2.3. Changing the type of lattice and the shape of the inclusion

Liu et al [18] studied the band structure of porous phononic crystals composed of different lattices (square to triangular) using the FDTD method.

2.4. hybrid lattice

Wei et al [19] investigated the propagation of acoustic waves in a phononic crystal composed of two triangular lattices (steel in air) by the plane wave expansion method.

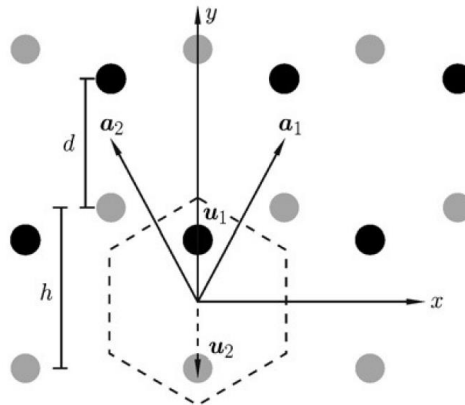


Figure 4. The hybrid phononic crystal of steel rods in air. The gray points show the triangular lattice. By adding dark bars at a distance d from the gray bars, the hybrid phononic crystal structure is formed.

2.5. Nesting phononic crystal

Hu and Zhou [22] investigated the nesting phononic crystal of mercury in water using plane wave expansion method. Nesting phononic crystal is created by placing a phononic crystal inside another one. They investigated the effect of the Nesting phononic crystal lattice constant on the band gap.

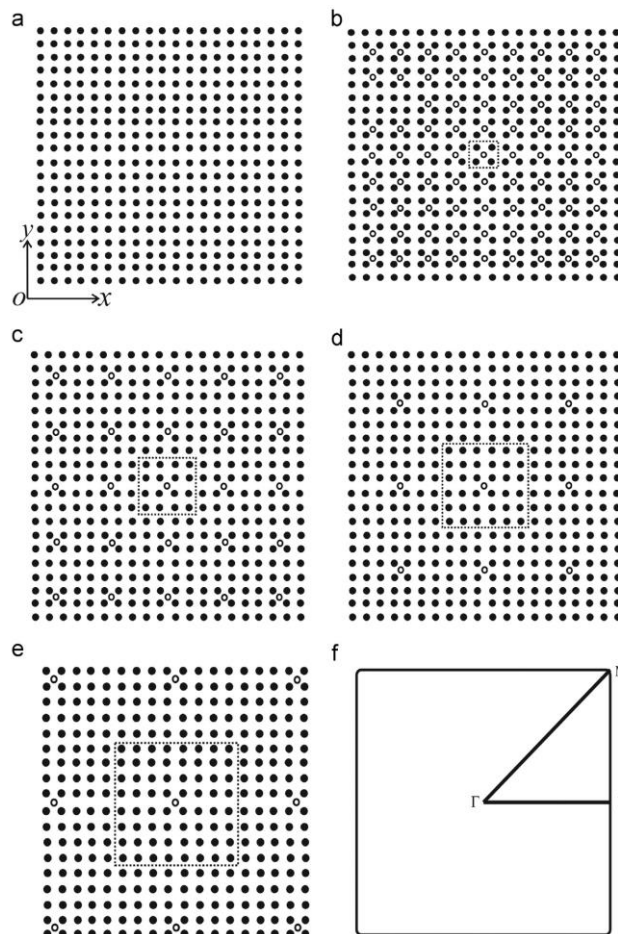


Figure 5. Phononic crystal structures. The solid black circles show the two-dimensional phononic crystal with lattice constant a_1 , which is called the primary phononic crystal. The hollow points of another phononic crystal with lattice constant a_2 display a) $a_2=0$ b) $a_2=2a_1$ c) $a_2=4a_1$ d) $a_2=6a_1$ e) $a_2=8a_1$ and f) Brillouin zone [22]

2.6. heterogenous phononic crystal

Bagheri Nouri and Moradi [33] presented and analyzed a heterogenous phononic crystal structure by combination of square and rhombic arrangements. They showed that the band gap can be extended by combining square and rhombic arrangements.

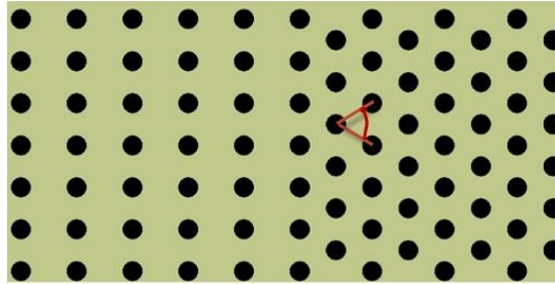


Figure 5. The heterogenous phononic crystal presented in [33]

2.7. using smart material

recently, smart materials have been used in the design of phononic crystal band gap, such as the use of shape memory alloys [34], rheomagnetic materials [35], piezoelectric materials [36] and...

3. Modeling and formulation

The studied phononic crystal in this research is two-dimensional. The cylinders are located along the z direction and repeat alternately in the xy plane. In the absence of body forces, the elastic wave equations are as follows:

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

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

Where $\rho = \rho(x, y)$ and $C_{ijmn}(x, y)$ are the density and tensor of the elastic coefficients of the structure, respectively. The summation convention is assumed on repeated indices. If the propagation of waves in the xy plane is considered, the lattice displacement and stress will not depend on z , that is: $u_i = u_i(x, y, t)$ and $\sigma_{ij} = \sigma_{ij}(x, y, t)$.

4. Conclusion

Phononic crystals are advanced materials that have attracted a lot of attention in recent years. Having a band gap is a characteristic of phononic crystals, which has led to the wide application of these materials in the management of elastic wave propagation. In this article, different two-dimensional phononic crystal structures are introduced. Also, various solutions that have been proposed to achieve the desired band gap in two-dimensional phononic crystal structures have been investigated. Among them, in this article, the effect of non-circular inclusions rotation, adding an inclusion to the primary unit cell, changing the lattice type and shape of the inclusion, hybrid phononic crystal, nested phononic crystal, inhomogeneous phononic crystal, hierarchical phononic crystal and the use of smart materials in the phononic crystal structure has been investigated, which shows that the band gap can be adjusted by changing the above parameters. Although various researches have investigated phononic crystals, there are still various issues in this subject that require more research. In addition, in this research, the governing equations of wave propagation in phononic crystals and phononic crystal analysis methods have been presented and analyzed.



بررسی روش‌های دستیابی به شکاف نواری مطلوب در ساختارهای کریستال فونونیک دو بعدی

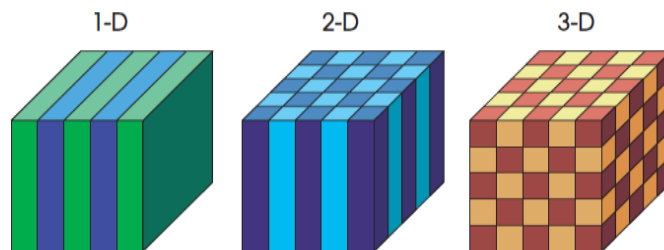
محمد باقری نوری الف*

الف استادیار، گروه مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران، m-bagherinoori@araku.ac.ir

چکیده	واژگان کلیدی
<p>کریستال‌های فونونیک مواد پیشرفته‌ای هستند که از تکرار یک یا چند ماده (آخال) در یک ماده زمینه تشکیل می‌شوند. خصوصیت متمایزکننده این مواد، وجود شکاف نواری است. شکاف نواری کامل 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 خصوصیت شکاف نواری، کریستال‌های فونونیک برای مدیریت انتشار امواج الاستیک مناسب هستند. در این پژوهش ساختارهای کریستال فونونیک دو بعدی بررسی شده است. برای رسیدن به شکاف نواری مطلوب تاکنون کارهای زیادی روی ساختار کریستال فونونیک انجام شده است. در این مقاله تلاش‌های فوق شامل دوران آخال‌های غیر دایره‌ای، اضافه کردن یک آخال به سلول واحد اولیه، تغییر نوع شبکه و شکل آخال، کریستال فونونیک مرکب، کریستال فونونیک آشیانه‌ای، کریستال فونونیک نامتجانس، کریستال فونونیک سلسله مراتبی و استفاده از مواد هوشمند در ساختار کریستال فونونیک مورد بررسی قرار گرفته است.</p>	<p>کریستال فونونیک، شکاف نواری، ساختار نواری، ساختار دو بعدی.</p>
	<p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۰۵</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۸/۱۲</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۲۸</p>

۱- مقدمه

کریستال‌های فونونیک^۱ مواد مرکبی هستند که از تکرار یک یا چند ماده (آخال) در یک ماده زمینه تشکیل می‌شوند. چگالی و خصوصیات الاستیک زمینه و آخال‌ها متفاوت است. مواد تشکیل‌دهنده می‌توانند جامد، مایع یا گاز باشند. همچنین تناوب ساختار ممکن است در یک بعد، دو بعد یا سه بعد باشد که در آن صورت آخال‌ها به ترتیب به شکل لایه^۲، استوانه و ذره خواهند بود. شکل ۱ آرایش یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی کریستال فونونیک را نمایش می‌دهد.

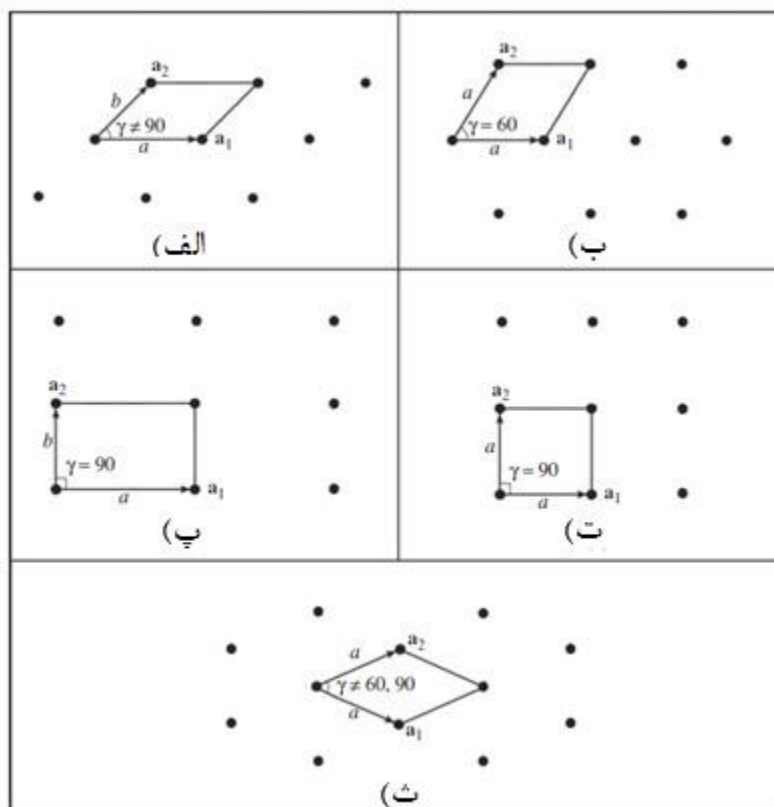


شکل ۱ آرایش یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی کریستال فونونیک [۱]

^۱ Phononic crystal

^۲ Layer

تعدادی از آرایش‌های دوبعدی کریستال فونونیک در شکل ۲ نمایش داده شده است. توانایی کریستال‌های فونونیک در ایجاد شکاف نواری کامل^۳ (یا مطلق^۴) در طیف عبور^۵ امواج، خاصیتی است که کریستال‌های فونونیک را متمایز می‌کند.



شکل ۲ تعدادی از آرایش‌های دو بعدی. (الف) مورب (ب) مثلثی (پ) مستطیلی (ت) مربعی (ث) لوزی [۲]

خصوصیت متمایزکننده کریستال‌های فونونیک، وجود شکاف نواری است. شکاف نواری کامل 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. اگر ممانعت از انتشار امواج برای همه جهات صورت نگیرد، در آن صورت شکاف نواری وابسته به جهت^۶ خواهد بود.

اولین مطلبی که در مورد کریستال‌های فونونیک منتشر شد به حدود سه دهه‌ی پیش برمی‌گردد که لاختاکیا و همکارانش [۳] در سال ۱۹۸۸ و اکونومو و همکارانش [۴] در سال ۱۹۸۹ در مورد خصوصیات آرایش متناوب مواد مرکب الاستیک تحقیق می‌کردند.

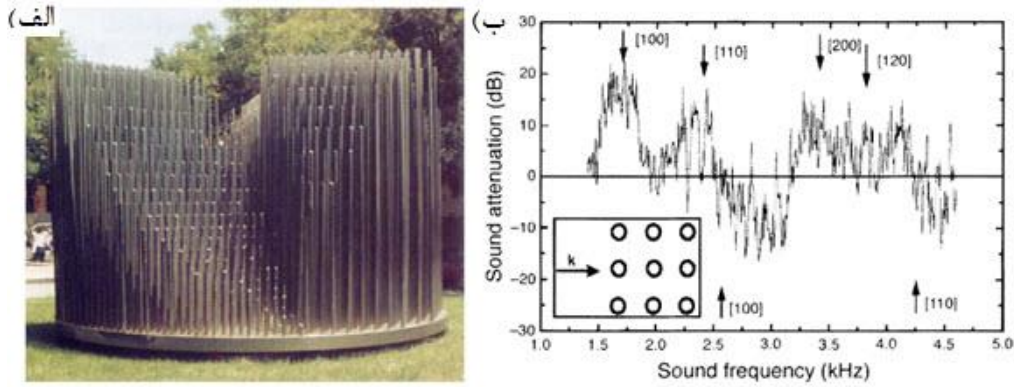
یکی از اولین آزمایش‌هایی که برای اثبات وجود شکاف نواری فونونیک انجام شد توسط مارتینز و همکارانش [۵] در سال ۱۹۹۵ صورت گرفت. آن‌ها پی بردند که یک پیکره که از آرایش مربعی دو بعدی استوانه‌های فولادی توخالی با ثابت شبکه ۱۰ سانتی‌متر تشکیل شده بود صوت با فرکانس‌های به خصوصی را میرا می‌کند. شکاف نواری مربوط به این ساختار بزرگ در محدوده شنوایی انسان قرار داشت. شکل ۳ این پیکره و طیف عبور اندازه‌گیری شده را در جهت مشخص شده نشان می‌دهد [۶].

³ Complete band gap

⁴ Absolute

⁵ Transmission

⁶ Directional



شکل ۳ یک پیکره که مانند کریستال فونونیک عمل می کند: الف) شکل ظاهری و ب) میرایی صوت بر حسب فرکانس برای انتشار موج در جهت مشخص شده [۵].

به دلیل خصوصیت شکاف فرکانسی، کریستال های فونونیک برای مدیریت انتشار امواج الاستیک مناسب هستند. شکاف نواری کامل می تواند یک محیط بدون ارتعاش را برای سیستم های مکانیکی بسیار دقیق فراهم کند [۷]. با از بین بردن تناوب ساختار، ایجاد مودهای هدایت شده^۷ درون شکاف نواری ممکن است. موجی که فرکانس آن در محدوده شکاف نواری کریستال فونونیک قرار دارد، توسط هدایت کننده کریستال فونونیک به خوبی هدایت و در اطراف نقص ساختاری متمرکز می شود. این قابلیت، کریستال فونونیک را به گزینه مناسبی برای طراحی ریز حفره های^۸ آکوستیک یا الاستیک، هدایت کننده موج^۹، فیلتر، آینه های کامل^{۱۰} مبدل می سازد. استفاده هم زمان از نقص نقطه ای^{۱۱} و خطی^{۱۲} می تواند منجر به کاربردهایی چون فیلتر، جداسازی چند فرکانس^{۱۳} و کوپلر شود [۸]. سنسور مایعات از دیگر کاربردهای کریستال فونونیک است [۹-۱۱].

برای رسیدن به شکاف نواری مطلوب تاکنون کارهای زیادی روی ساختار کریستال فونونیک انجام شده است. این مقاله به بررسی تلاش های فوق در تنظیم شکاف نواری کریستال های فونونیک دو بعدی می پردازد.

۲- دستیابی به شکاف نواری مطلوب در ساختارهای کریستال فونونیک دو بعدی

برای رسیدن به شکاف نواری مطلوب تاکنون کارهای زیادی روی ساختار کریستال فونونیک انجام شده است مانند چرخاندن آخال های غیر دایره ای [۱۲]، اضافه کردن یک آخال به سلول واحد اولیه، تغییر نوع شبکه، تغییر شکل آخال، تغییر نسبت پرکنندگی^{۱۴} و ایجاد یک شبکه جدید از ترکیب^{۱۵} دو شبکه متفاوت [۱۳].

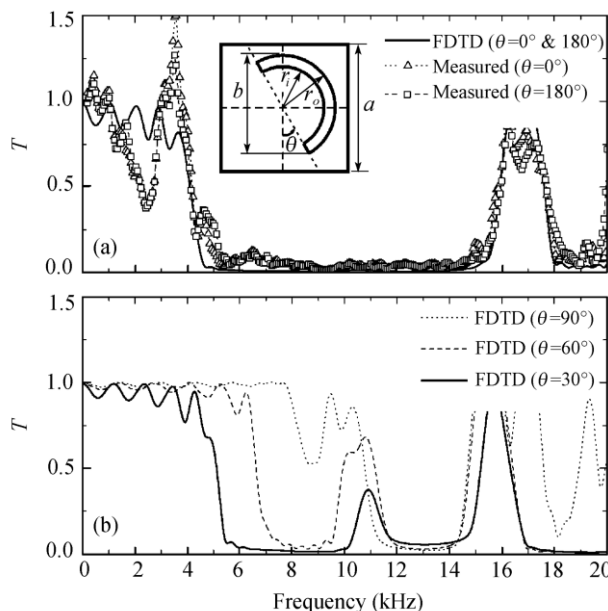
۲-۱- دوران آخال های غیر دایره ای

ژانگ و همکارانش [۱۴] با استفاده از روش بسط موج صفحه ای^{۱۶} ساختار نواری آکوستیک یک کریستال فونونیک را که از آرایش مربعی میله های فولادی با مقطع مختلف (مثلثی، مربعی، شش ضلعی، هشت ضلعی و دایره ای) در هوا تشکیل می شود بررسی کردند. آن ها وابستگی شکاف نواری کامل به راستای میله ها با مقطع غیر دایره ای را بررسی کردند. بر اساس پژوهش آن ها، وسیع ترین شکاف نواری کامل برای مقطع مربعی در صورتی رخ می دهد که مقطع میله ها در راستای زاویه ۴۵ درجه قرار داده شده باشد. این راستا برای مقاطع مثلثی و شش ضلعی، صفر درجه است. مقطع هشت ضلعی تحت زاویه ۲۲/۵ درجه وسیع ترین

⁷ Guided mode
⁸ Microcavity
⁹ Wave guide
¹⁰ Perfect mirror
¹¹ Point defect
¹² Line defect
¹³ Demultiplexing
¹⁴ Filling fractions
¹⁵ Hybridizing
¹⁶ Plane wave expansion

شکاف نواری کامل را دارد.

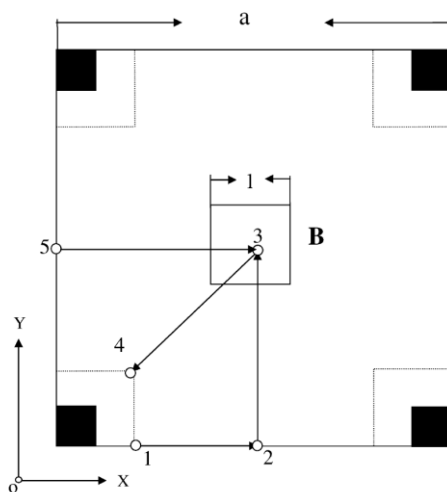
تیانجیان و همکارانش [۱۵] خصوصیات شکاف نواری آرایش مربعی استوانه‌های توخالی با مقطع نیم‌دایره در هوا را هم به روش تفاضل محدود در حوزه زمان (FDTD^{۱۷}) و هم به صورت تجربی بررسی کردند. در کار آن‌ها اثر ضخامت، راستا و شکل آخال بر پهنای شکاف نواری بررسی شده است. بر اساس کار آن‌ها، با افزایش نسبت شعاع داخلی به شعاع خارجی در مقطع نیم استوانه توخالی، شکاف‌های نواری با هم ترکیب شده و یک شکاف نواری وسیع‌تر را تشکیل می‌دهند. طبق نتایج کار آن‌ها، در زاویه دوران ۰ یا ۱۸۰ درجه حداکثر پهنای شکاف نواری رخ می‌دهد. شکل ۴ راستای آخال را بر طیف عبور نمایش می‌دهد.



شکل ۴ طیف عبور اندازه‌گیری شده و محاسبه شده در راستای ΓX برای آرایش مربعی نیم استوانه‌های توخالی در زاویه‌های مختلف θ . [۱۵]

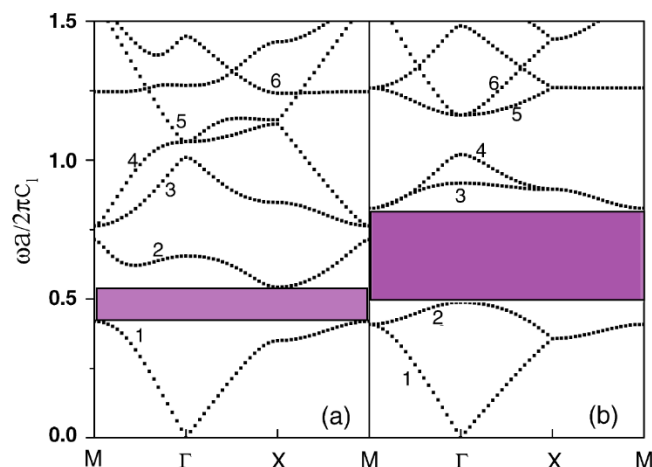
۲-۲- اضافه کردن یک آخال به سلول واحد اولیه

یائو و همکارانش [۱۶] با استفاده از روش بسط موج صفحه‌ای ساختار نواری یک کریستال فونونیک دو بعدی با دو آخال در یک سلول واحد را مطالعه کردند. نتایج کار آن‌ها نشان داد که شکاف نواری با تغییر موقعیت آخال اضافی قابل تنظیم است. شکل ۵ سلول واحد مورد بررسی در کار یائو و همکارانش را نشان می‌دهد. در شکل ۶ اثر اضافه کردن آخال اضافی بر ساختار نواری کریستال فونونیک نمایش داده شده است.



¹⁷ Finite difference time domain

شکل ۵ طیف سلول واحد کریستال فونونیک دو بعدی. میله اضافی با B نمایش داده شده است. [۱۶]



شکل ۶ ساختار نواری کریستال فونونیک مورد بررسی که شکاف نواری کامل با مستطیل بنفش رنگ مشخص شده است (a) با یک میله در سلول واحد (b) با دو میله در سلول واحد که میله اضافی در مرکز سلول واحد قرار گرفته است. [۱۶]

لیو و همکارانش [۱۷۷] با اضافه کردن یک ساختار کمکی^{۱۸} به شبکه متناوب مرسوم، شبکه متناوب دو بعدی اصلاح شده را ارائه کردند. آن‌ها انتشار امواج الاستیک در این ساختار اصلاح شده را توسط روش اجزا محدود^{۱۹} مطالعه و اثر ابعاد هندسی ساختار کمکی بر شکاف نواری را بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که با اضافه کردن ساختار کمکی به سلول واحد اولیه، یک شکاف نواری در محدوده فرکانسی پایین قابل حصول است.

۲-۳- تغییر نوع شبکه و شکل آخال

لیو و همکارانش [۱۷۸] ساختار نواری کریستال‌های فونونیک متخلخل^{۲۰} تشکیل شده از شبکه‌های متفاوت (مربعی تا مثلثی) را با استفاده از روش FDTD مطالعه کردند. آن‌ها اثر شکل‌های متفاوت تخلخل (دایره، مربع و مثلث) و نسبت پرکنندگی را بر ساختار نواری این کریستال‌های فونونیک ارزیابی کردند. بر اساس پژوهش آن‌ها شکاف نواری آرایش مثلثی تخلخل‌های مثلثی شکل در بین ساختارهای مورد بررسی، شکاف نواری وسیع‌تری دارد. علاوه بر آن، آن‌ها دریافتند که با افزایش تخلخل پهنای شکاف نواری افزایش می‌یابد.

۲-۴- کریستال فونونیک مرکب

وی و همکارانش [۱۷۹] انتشار امواج آکوستیک در کریستال فونونیک مرکب از دو شبکه مثلثی (فولاد در هوا) را با روش بسط موج صفحه‌ای بررسی کردند. شعاع آخال‌ها در این دو شبکه مثلثی متفاوت بود و آن‌ها اثر شعاع‌های متفاوت را بر شکاف نواری مطالعه کردند. نتایج کار آن‌ها نشان داد که پهنای و موقعیت شکاف‌های نواری با تغییر شعاع آخال‌ها قابل تنظیم است.

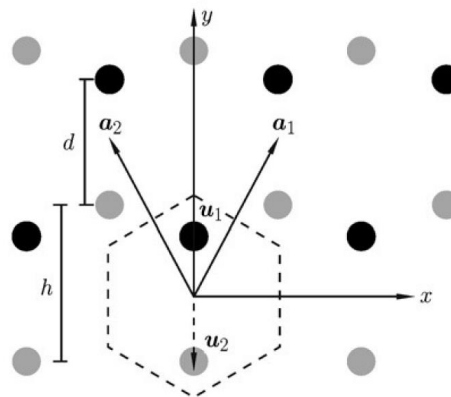
وو و همکارانش [۲۰] انتشار امواج الاستیک در کریستال فونونیک مرکب با آرایش مثلثی (فولاد در هوا) را با استفاده از روش بسط موج صفحه‌ای ارزیابی کردند. کریستال فونونیک مرکب مورد مطالعه آن‌ها از دو شبکه مثلثی (با آخال و ثابت شبکه یکسان) تشکیل شده بود. آن‌ها اثر موقعیت شبکه دوم نسبت به شبکه اول و نسبت پرکنندگی را بر شکاف نواری بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که برخلاف شبکه مثلثی معمولی، کریستال فونونیک مرکب در فرکانس‌های پایین دارای شکاف نواری است. همچنین موقعیت و پهنای شکاف نواری توسط موقعیت میله‌های افزوده شده قابل تنظیم است. شکل ۷ ساختار مورد بررسی آن‌ها

¹⁸ Auxiliary

¹⁹ FEM

²⁰ Porous

را نمایش می‌دهد.



شکل ۷ کریستال فونونیک مرکب میله‌های فولادی در هوا. نقاط خاکستری شبکه مثلثی را نشان می‌دهد. با اضافه شدن میله‌های تیره به فاصله d از میله‌های خاکستری، ساختار کریستال فونونیک مرکب تشکیل می‌شود. [۲۰]

وی و همکارانش [۲۱] خصوصیات شکاف نوری یک کریستال فونونیک مرکب با آرایش مثلثی فولاد در آب (دو شبکه مثلثی با آخال و ثابت شبکه یکسان) را از لحاظ تئوری (روش PWE) و تجربی بررسی و با کریستال فونونیک معمولی مقایسه کردند. بر اساس کار این پژوهش‌گران، کریستال فونونیک مرکب یک شکاف نوری کامل در محدوده فرکانسی پایین دارد.

۲-۵- کریستال فونونیک آشیانه‌ای^{۲۱}

هو و ژو [۲۲] کریستال فونونیک آشیانه‌ای جیوه در آب را به کمک روش بسط موج صفحه‌ای بررسی کردند. کریستال فونونیک آشیانه‌ای از جای دادن یک کریستال فونونیک درون کریستال فونونیک دیگر به وجود می‌آید. آن‌ها اثر ثابت شبکه کریستال فونونیک جای‌دهی شده را بر شکاف نوری بررسی کردند. بررسی آن‌ها نشان داد که افزایش ثابت شبکه کریستال فونونیک جای‌دهی شده، متراکم‌تر شدن منحنی‌های ساختار نوری را در پی دارد و وسیع‌ترین شکاف نوری در حالتی رخ می‌دهد که ثابت شبکه کریستال فونونیک اولیه و جای‌دهی شده با هم برابر باشند. شکل ۸ کریستال فونونیک آشیانه‌ای را نمایش می‌دهد.

۲-۶- ساختارهای خاص

تورس و اسپینوسا [۲۳] برای اولین بار به طور آزمایشگاهی شکاف نوری مافوق صوت را در کریستال فونونیک دوبعدی (آرایش متناوب جیوه در صفحه آلومینیومی) مشاهده کردند. آن‌ها پدیده موضعی شدن در نقص‌های نقطه‌ای و خطی و خم هدایت‌کننده را بررسی کردند. همچنین آن‌ها ساختارهای متناوب دوقلو^{۲۲} (دو شبکه مربعی با راستاهای متفاوت که با هم تلفیق شده‌اند) را به عنوان جداساز و خم هدایت‌کننده مافوق صوت مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها دریافتند که این ساختار می‌تواند امواج را تحت زاویه ۴۵ درجه هدایت کند. علاوه بر این، آن‌ها پدیده شکست غیرعادی را در مرزهای این ساختار مشاهده کردند.

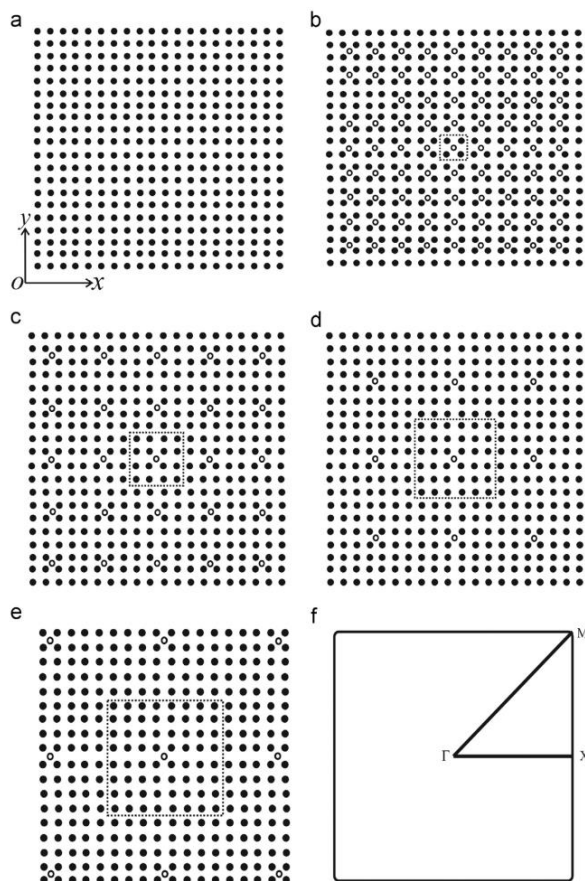
زربخش و همکارانش [۲۴] کریستال‌های فوتونیک با شبکه منحنی^{۲۳} را معرفی کردند. خصوصیت این دسته از کریستال‌های فوتونیک قرارگیری آخال‌ها روی یک شبکه منحنی است. آن‌ها بر اساس کریستال‌های فوتونیک با شبکه منحنی یک خم هدایت‌کننده با زاویه دلخواه^{۲۴} طراحی کردند. در خم پیشنهادی آن‌ها ساختار شبکه از یک شبکه تقریباً مربعی به یک شبکه تقریباً مثلثی تبدیل می‌شود. آن‌ها به کمک روش FDTD قابلیت عبور این خم را به دست آوردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که کریستال‌های فوتونیک با شبکه منحنی در تولید وسایل نانوفوتونیک قابل استفاده هستند. شکل ۹ کریستال‌های فوتونیک با شبکه منحنی را نشان می‌دهد.

²¹ Nesting photonic crystal

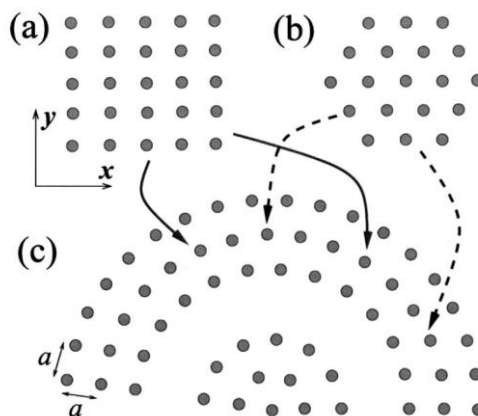
²² Twinned

²³ Curvilinear-lattice photonic crystals

²⁴ Arbitrary-angle waveguide bend



شکل ۸ ساختارهای کریستال فونونیک. دایره‌های توپر سیاه کریستال فونونیک دویعدی با ثابت شبکه a_1 را نشان می‌دهد که کریستال فونونیک اولیه نامیده می‌شود. نقاط توخالی کریستال فونونیک دیگری با ثابت شبکه a_2 را نمایش می‌دهد (a) $a_2=0$ (b) $a_2=2a_1$ (c) $a_2=4a_1$ (d) $a_2=6a_1$ (e) $a_2=8a_1$ و ناحیه بریلئون Γ (f) ناحیه بریلئون Γ ^{۲۵} [۲۲]



شکل ۹ (a) ساختار کریستال فونونیک مربعی (b) ساختار کریستال فونونیک مثلثی (c) ساختار کریستال فونونیک منحنی [۲۴]

یائو و همکارانش ^[۲۵] توسط نظریه انطباق مود ویژه بهبودیافته ^{۲۶} انتشار امواج الاستیک را درون هدایت‌کننده‌های نامتجانس ^{۲۷} کریستال فونونیک بررسی کردند. هدایت‌کننده مورد بررسی آن‌ها از دو هدایت‌کننده کریستال فونونیک (آرایش مربعی آب در جیوه) با ثابت‌های شبکه متفاوت که در کنار هم قرار گرفته‌اند، تشکیل شده است. بر اساس کار آن‌ها محدوده

²⁵ Brillouin zone

²⁶ Improved eigen-mode matching theory

²⁷ Hetero-phononic crystal waveguide

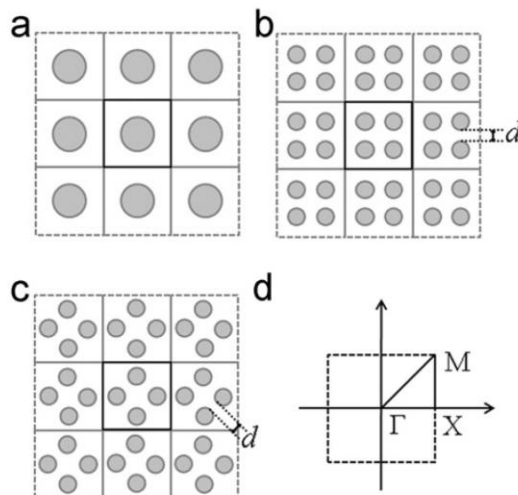
فرکانس عبور هدایت‌کننده مرکب، محدوده فرکانس عبور مشترک دو هدایت‌کننده تشکیل دهنده آن است. آن‌ها همچنین اثر نسبت ثابت‌های شبکه را بر محدوده فرکانس عبور هدایت‌کننده مرکب بررسی کردند.

یائو و همکارانش [۲۶] با ترکیب روش نظریه انطباق مود ویژه بهبودیافته و روش بسط مود بلاخ قابلیت عبور و بازتاب کریستال فونونیک دوبعدی نیمه بی‌نهایت را بررسی کردند. آن‌ها قابلیت عبور ساختاری را که از فرار گرفتن یک هدایت‌کننده کریستال فونونیک محدود (آرایش مربعی میله‌ها با مقطع مستطیلی) بین دو هدایت‌کننده کریستال فونونیک نیمه بی‌نهایت یکسان (آرایش مربعی میله‌ها با مقطع دایره) ایجاد می‌شود مطالعه کردند. در کار آن‌ها اثر پهنای حفره درون هدایت‌کننده بر قابلیت عبور هدایت‌کننده بررسی شد.

زینال وند و سلطانی والا [۲۷] کریستال فونونیک نامتجانس دوبعدی را که از اتصال دو کریستال فونونیک با آرایش مربعی یکسان، یکی با آخال‌هایی با سطح مقطع دایره‌ای و دیگری با آخال‌هایی با سطح مقطع مربعی تشکیل شده، مورد بررسی قرار دادند. برای به دست آوردن ساختار نواری آن‌ها از ترکیب روش‌های بسط موج صفحه‌ای و ابر سلول^{۲۸} استفاده کردند.

لیو و همکارانش [۲۸] به کمک روش اجزا محدود، انتشار امواج درون صفحه‌ای^{۲۹} را در کریستال فونونیک تشکیل شده از آرایش لانه زنبوری گاگوم^{۳۰} بررسی کردند. آن‌ها اثر تخلخل شبکه و وجود دیواره با ضخامت متفاوت در سلول واحد^{۳۱} را بر ساختار نواری و شکاف نواری مطالعه کردند. طبق پژوهش آن‌ها، با افزایش تخلخل در ابتدا فرکانس مرکزی شکاف نواری کاهش می‌یابد ولی افزایش بیشتر تخلخل، افزایش فرکانس مرکزی شکاف نواری را در پی دارد.

ژو و همکارانش [۲۹] خصوصیات ساختار نواری یک کریستال فونونیک سلسله مراتبی^{۳۲} دوبعدی جامد-هوا با آرایش مربعی را بررسی کردند. هر سلول کریستال فونونیک مورد بررسی آن‌ها از چهار زیر سلول تشکیل می‌شود. آن‌ها به کمک روش اجزا محدود ساختار نواری را محاسبه و اثر نسبت پرکنندگی و فاصله آخال‌ها را بر شکاف نواری بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که با انتخاب ساختار و نسبت پرکنندگی مناسب، شکاف نواری کریستال فونونیک سلسله مراتبی از شکاف نواری کریستال فونونیک عادی وسیع‌تر خواهد بود. شکل ۱۰ کریستال فونونیک سلسله مراتبی مورد بررسی در مقاله ژو و همکارانش را نمایش می‌دهد. لی و همکارانش [۳۰] برای توسعه شکاف نواری از کریستال فونونیک سلسله مراتبی استفاده کردند.



شکل ۱۰ کریستال فونونیک با شبکه مربعی (a) کریستال فونونیک معمولی با یک آخال استوانه‌ای در سلول واحد (b) کریستال فونونیک سلسله مراتبی با یک آرایش مربعی افقی استوانه‌ها (c) کریستال فونونیک سلسله مراتبی با یک آرایش مربعی مایل استوانه‌ها (d) ناحیه بریلئون کاهش‌یافته [۲۹]

²⁸ Super cell

²⁹ In-plane wave

³⁰ Kagome honeycombs

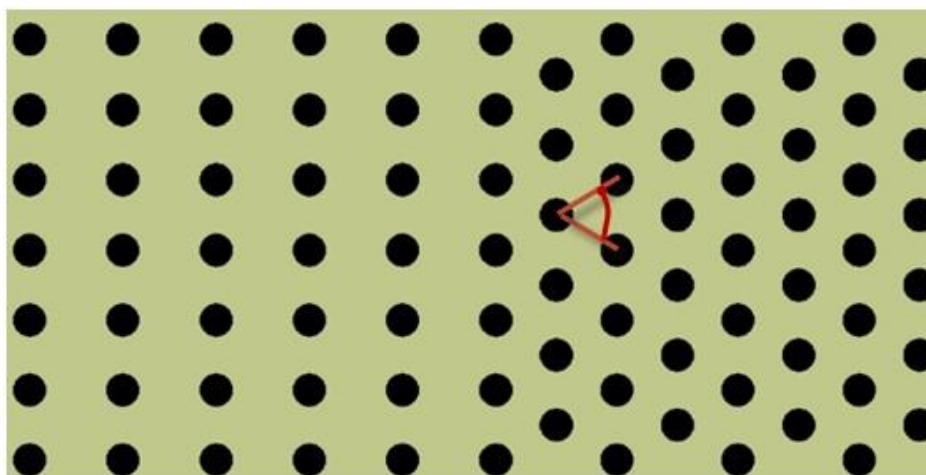
³¹ Unit cell

³² Hierarchical

ژائو و همکارانش [۳۱] اثر اضافه کردن یک کریستال فونونیک یک‌بعدی را به کریستال فونونیک مینا مطالعه کردند. بر اساس کار آن‌ها کریستال فونونیک نامتجانس حاصل، امواجی را که عمود بر لایه‌های کریستال فونونیک انتشار می‌یابند در محدوده شکاف نواری وسیعی از خود عبور نمی‌دهد.

هانگ و همکارانش [۳۲] مود هدایتی تداخلی^{۳۳} را در صفحه کریستال فونونیک نامتجانس بررسی کردند. کریستال فونونیک مورد بررسی از دو صفحه کریستال فونونیک دوبعدی نیمه بی‌نهایت متفاوت تشکیل می‌شد. آن‌ها شرایط ایجاد مود هدایتی تداخلی را استخراج کردند.

باقری نوری و مرادی [۳۳] از ترکیب آرایش‌های مربعی و لوزی یک ساختار نامتجانس کریستال فونونیک ارائه و تحلیل کردند. آن‌ها نشان دادند که با ترکیب آرایش‌های مربعی و لوزی می‌توان شکاف نواری را توسعه داد. شکل ۱۱ ساختار نامتجانس مورد بررسی در کار آن‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱ ساختار نامتجانس کریستال فونونیک ارایه شده در [۳۳]

۲-۷- استفاده از مواد هوشمند

اخیرا از مواد هوشمند در طراحی شکاف نواری کریستال فونونیک استفاده شده است مثل استفاده از آلیاژهای حافظه دار [۳۴-۳۹]، مواد رئو مغناطیس^{۳۴}، مواد رئو الکتریک^{۳۵} [۴۰-۴۵] و

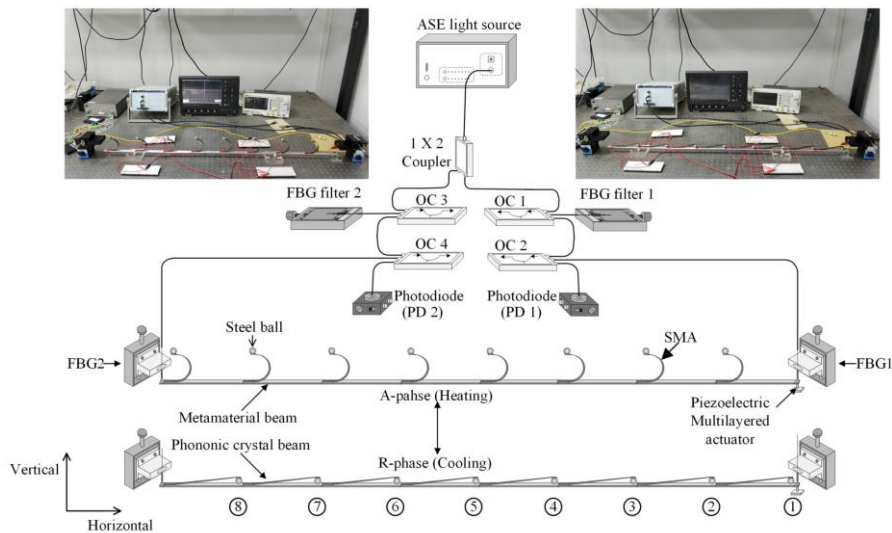
نتایج پژوهش یان و همکارانش [۴۱] نشان داد که در کریستال فونونیک رئو مغناطیس با افزایش میدان مغناطیسی، پهنای شکاف نواری کامل افزایش می‌یابد و به سمت نواحی فرکانس بالا حرکت می‌کند. لی و همکارانش [۴۵] یک کریستال فونونیک نرم را ارایه کردند و نشان دادند که با اعمال میدان مغناطیسی پهنای شکاف نواری به طور موثری قابل تنظیم است. کوچیه و همکارانش [۴۶] با استفاده از آلیاژ حافظه دار، یک کریستال فونونیک ارایه کردند. شکاف نواری این کریستال فونونیک بین نوع Bragg و رزونانس موضعی^{۳۶} قابلیت سوئیچ دارد. به این معنی که بدون حرارت دادن به آلیاژ حافظه دار، شکاف نواری از نوع Bragg است. با حرارت دادن آلیاژ حافظه دار، آلیاژ حافظه دار شکل اصلی خود را بازیابی می‌کند و شکاف نواری از نوع Bragg به نوع رزونانس موضعی سوئیچ می‌کند. در شکل ۱۲ ستاپ تست کریستال فونونیک آلیاژ حافظه دار در پژوهش کوچیه و همکارانش نشان داده شده است.

³³ Interface-guided mode

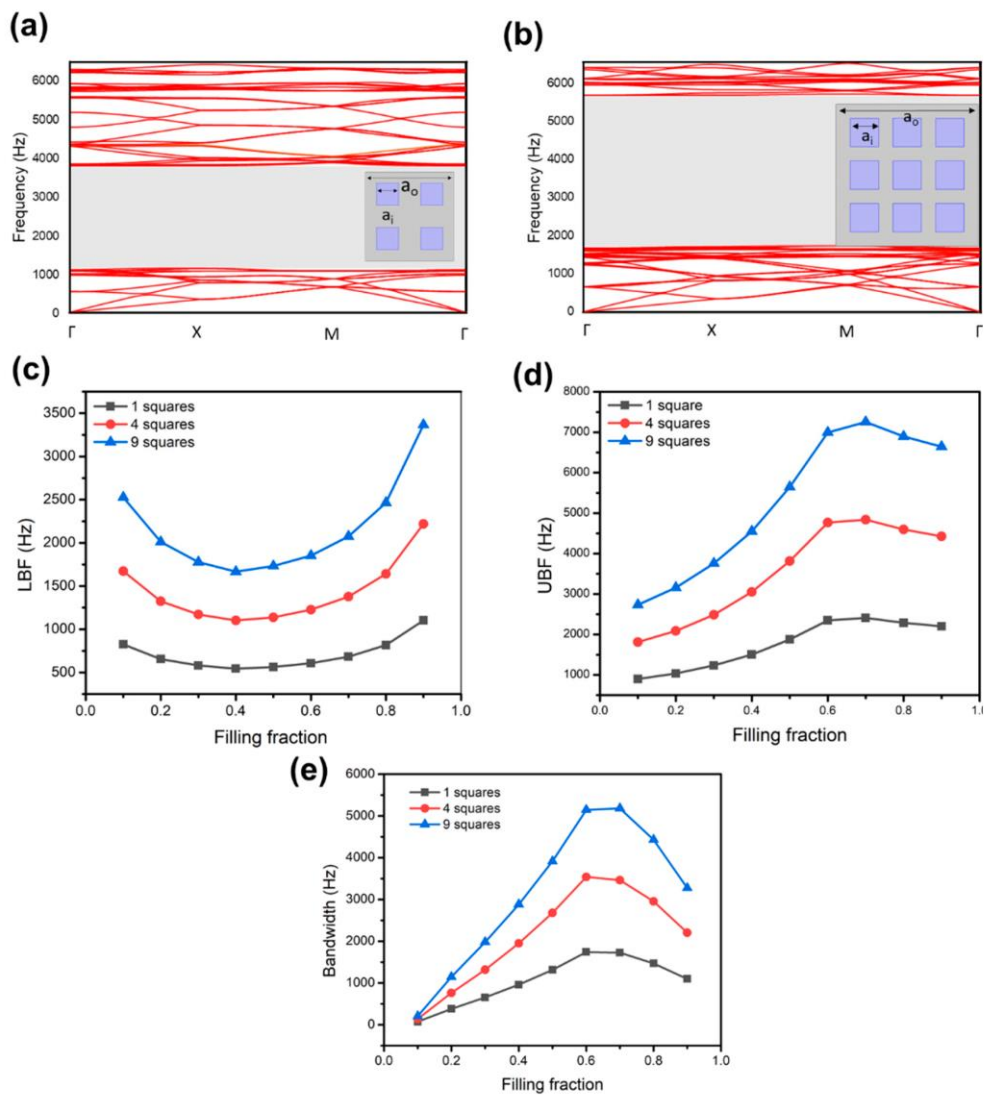
³⁴ Magnetorheological

³⁵ Electrorheological

³⁶ Local



شکل ۱۲ ستاپ تست کریستال فونونیک آلیاژ حافظه دار [۳۵]



شکل ۱۳ (a) ساختار نواری کریستال فونونیک با چهار آخال مربعی (b) ساختار نواری کریستال فونونیک با نه آخال مربعی (c-e) کران فرکانس بالایی و پایینی و پهنای باند در برابر نسبت پرکنندگی در کریستال فونونیک کاربرد تنگستن- اپوکسی برای سلول‌های واحد با یک، چهار و نه آخال [۵۱]

۲-۸- بهینه سازی

شکاف نواری کریستال فونونیک اهمیت ویژه‌ای در کاهش نویز و ارتعاشات دارد. از این رو باهدف بهینه‌سازی و افزایش پهنای شکاف نواری، پژوهش‌های مختلفی انجام شده است [۴۶-۵۰]. الحمدی و همکارانش [۵۱] کریستال فونونیک کاربرد تنگستن در زمینه اپوکسی را در نظر گرفتند. به منظور دستیابی به شکاف نواری وسیع، با تغییر آرایش و پارامترهای ابعادی شامل اندازه، تعداد و زاویه دوران آخال‌های مربعی، کریستال فونونیک مورد نظر را بهینه‌سازی کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که در مقایسه با پارامترهای هندسی دیگر، افزایش تعداد آخال‌ها و نسبت پرکنندگی^{۳۷}، شکاف نواری را به‌طور مؤثرتری توسعه می‌دهد. شکل ۱۳ اثر تعداد آخال و نسبت پرکنندگی را بر شکاف نواری ساختار مورد بررسی توسط الحمدی و همکارانش نشان می‌دهد.

۲-۹- استفاده از هوش مصنوعی

شناسایی کریستال فونونیک با شکاف نواری مفید یک فرایند سخت است چراکه همه کریستال‌های فونونیک شکاف نواری ندارند. پیش‌بینی وجود شکاف نواری برای یک ساختار کریستال فونونیک و تعیین فرکانس مرکز و پهنای شکاف نواری فرایندی با هزینه محاسباتی زیاد است. اخیراً از الگوریتم‌های یادگیری ماشین و هوش مصنوعی برای بررسی وجود شکاف نواری و تعیین مرکز و پهنای آن استفاده می‌شود [۵۲-۵۸].

در پژوهش سادات و همکاران [۵۲] سه الگوریتم مختلف یادگیری بررسی شد و نشان داده شد که الگوریتم random forests بهترین عملکرد را دارد. آن‌ها نشان دادند که با انتخاب اتفاقی کریستال فونونیک احتمال وجود شکاف نواری ۱۷ درصد است و در صورتی که با الگوریتم random forests غربالگری سریع انجام شود این احتمال به ۸۹ درصد افزایش می‌یابد.

۳- مدل‌سازی و فرمول‌بندی

کریستال فونونیک مورد بررسی در این پژوهش دوبعدی است. استوانه‌ها (آخال‌ها) در راستای z قرار دارند و درون صفحه xy به‌طور متناوب تکرار می‌شوند. در غیاب نیروهای بدنی، معادلات موج الاستیک به‌صورت زیر است:

$$\rho \ddot{u}_i = \sigma_{ij,j} \quad (۱)$$

$$\sigma_{ij} = C_{ijmn} u_{m,n} \quad (۲)$$

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. در صورتی که انتشار امواج درون صفحه xy در نظر گرفته شود جابجایی و تنش شبکه به z بستگی نخواهد داشت یعنی: $u_i = u_i(x, y, t)$ و $\sigma_{ij} = \sigma_{ij}(x, y, t)$.

در صورتی که مواد آخال و زمینه هر دو همسانگرد باشند، بر اساس قانون هوک می‌توان نوشت:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{11} &= \frac{\partial u_1}{\partial x} = \frac{1}{E} (\sigma_{11} - \nu(\sigma_{22} + \sigma_{33})) \\ \varepsilon_{22} &= \frac{\partial u_2}{\partial y} = \frac{1}{E} (\sigma_{22} - \nu(\sigma_{11} + \sigma_{33})) \\ \varepsilon_{33} &= \frac{\partial u_3}{\partial z} = \frac{1}{E} (\sigma_{33} - \nu(\sigma_{11} + \sigma_{22})) \end{aligned} \quad (۳)$$

در معادلات فوق ε_{11} ، ε_{22} ، ε_{33} و ν به ترتیب بیانگر کرنش عمودی در راستای x ، y ، z ، مدول یانگ و نسبت پواسون ماده ایزوتروپیک هستند. با توجه به اینکه جابجایی شبکه به z بستگی ندارد (انتشار امواج درون صفحه xy در نظر گرفته می‌شود) پس کرنش عمودی در راستای z صفر است. با توجه به معادله آخر معادلات (۳) تنش σ_{33} به‌صورت زیر به دست می‌آید:

$$\sigma_{33} = \nu(\sigma_{11} + \sigma_{22}) \quad (۴)$$

³⁷ filling fraction

با قرار دادن تنش σ_{33} از معادله (۴) در دو معادله اول (۳) خواهیم داشت:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{11} &= \frac{\partial u_1}{\partial x} = \frac{1}{E}((1-v^2)\sigma_{11} - (v+v^2)\sigma_{22}) \\ \varepsilon_{22} &= \frac{\partial u_2}{\partial y} = \frac{1}{E}((1-v^2)\sigma_{22} - (v+v^2)\sigma_{11})\end{aligned}\quad (5)$$

حال می‌توان از معادلات (۵) تنش‌ها را برحسب مشتقات جابجایی محاسبه کرد.

$$\begin{aligned}\sigma_{11} &= \frac{E(1-v)}{1-v-2v^2} \frac{\partial u_1}{\partial x} + \frac{Ev}{1-v-2v^2} \frac{\partial u_2}{\partial y} \\ \sigma_{22} &= \frac{Ev}{1-v-2v^2} \frac{\partial u_1}{\partial x} + \frac{E(1-v)}{1-v-2v^2} \frac{\partial u_2}{\partial y}\end{aligned}\quad (6)$$

با معرفی ضرایب C_{11} و C_{12} به صورت:

$$\begin{aligned}C_{12} &= \frac{Ev}{1-v-2v^2} \\ C_{11} &= \frac{E(1-v)}{1-v-2v^2}\end{aligned}\quad (7)$$

معادلات (۶) به شکل زیر بازنویسی می‌شوند:

$$\begin{aligned}\sigma_{11} &= C_{11} \frac{\partial u_1}{\partial x} + C_{12} \frac{\partial u_2}{\partial y} \\ \sigma_{22} &= C_{12} \frac{\partial u_1}{\partial x} + C_{11} \frac{\partial u_2}{\partial y}\end{aligned}\quad (8)$$

مؤلفه‌های برشی تنش نیز برحسب مشتقات جابجایی قابل نوشتن هستند:

$$\begin{aligned}\sigma_{12} &= C_{44} \left(\frac{\partial u_1}{\partial y} + \frac{\partial u_2}{\partial x} \right) \\ \sigma_{13} &= C_{44} \left(\frac{\partial u_1}{\partial z} + \frac{\partial u_3}{\partial x} \right) \\ \sigma_{23} &= C_{44} \left(\frac{\partial u_2}{\partial z} + \frac{\partial u_3}{\partial y} \right)\end{aligned}\quad (9)$$

که در آن C_{44} مدول صلبیت ماده‌ی ایزوتروپیک است. با توجه به اینکه جابجایی و تنش شبکه به z بستگی ندارد معادله (۹) به صورت زیر ساده می‌شوند:

$$\begin{aligned}\sigma_{12} &= C_{44} \left(\frac{\partial u_1}{\partial y} + \frac{\partial u_2}{\partial x} \right) \\ \sigma_{13} &= C_{44} \frac{\partial u_3}{\partial x} \\ \sigma_{23} &= C_{44} \frac{\partial u_3}{\partial y}\end{aligned}\quad (10)$$

حال معادله (۱) در سه جهت x و y و z نوشته می‌شوند:

$$\begin{aligned}\rho \ddot{u}_1 &= \sigma_{11,1} + \sigma_{12,2} + \sigma_{13,3} \\ \rho \ddot{u}_2 &= \sigma_{21,1} + \sigma_{22,2} + \sigma_{23,3} \\ \rho \ddot{u}_3 &= \sigma_{31,1} + \sigma_{32,2} + \sigma_{33,3}\end{aligned}\quad (11)$$

با توجه به اینکه جابجایی و تنش شبکه به z بستگی ندارد معادله (۱۱) به صورت زیر ساده می‌شود:

$$\begin{aligned}\rho \ddot{u}_1 &= \sigma_{11,1} + \sigma_{12,2} \\ \rho \ddot{u}_2 &= \sigma_{21,1} + \sigma_{22,2} \\ \rho \ddot{u}_3 &= \sigma_{31,1} + \sigma_{32,2}\end{aligned}\quad (12)$$

در صورتی تنش‌ها بر حسب جابجایی از معادلات (۸) و (۱۰) در معادله (۱۲) قرار داده شوند معادلات زیر بدست می‌آیند:

$$\begin{aligned}\rho \ddot{u}_1 &= \frac{\partial}{\partial x} (C_{11} \frac{\partial u_1}{\partial x} + C_{12} \frac{\partial u_2}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial y} (C_{44} (\frac{\partial u_1}{\partial y} + \frac{\partial u_2}{\partial x})) \\ \rho \ddot{u}_2 &= \frac{\partial}{\partial x} (C_{44} (\frac{\partial u_1}{\partial y} + \frac{\partial u_2}{\partial x})) + \frac{\partial}{\partial y} (C_{12} \frac{\partial u_1}{\partial x} + C_{22} \frac{\partial u_2}{\partial y}) \\ \rho \ddot{u}_3 &= \frac{\partial}{\partial x} (C_{44} \frac{\partial u_3}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (C_{44} \frac{\partial u_3}{\partial y})\end{aligned}\quad (12)$$

با توجه به معادله (۱۳) می‌توان دریافت که در دو معادله اول مؤلفه‌های u_1 و u_2 ظاهر شده‌اند و در این دو معادله مؤلفه u_3 وجود ندارد. پس مؤلفه‌های u_1 و u_2 به هم کوپل شده‌اند. از طرفی در معادله سوم معادله (۱۳) مؤلفه‌های u_1 و u_2 وجود ندارند و در این معادله تنها مؤلفه u_3 ظاهر شده است. به عبارت دیگر، مؤلفه u_3 از دو مؤلفه دیگر مجزا^{۳۸} شده است. دو معادله اول معادله (۱۳) معرف مود ترکیبی^{۳۹} یا درون صفحه‌ای است (جابجایی درون صفحه xy) و معادله سوم بیانگر مود تکی^{۴۰} یا برون صفحه‌ای^{۴۱} (جابجایی عمود بر صفحه xy) است. به بیان دیگر، معادلات انتشار مود ترکیبی و مود برون صفحه ای از هم هستند.

برای تحلیل کریستال‌های فونونیک تا کنون از روشهای مختلفی استفاده شده است. از آن جمله می‌توان به روش اجزا محدود [۱۷، ۲۸، ۲۹]، روش تفاضل محدود جابجایی-مبنا در حوزه زمان [۳۳، ۵۹، ۶۰]، روش تفاضل محدود در حوزه زمان [۱۵]، روش بسط موج صفحه‌ای [۱۴] و ... اشاره کرد.

۴- نتیجه گیری

کریستال‌های فونونیک مواد پیشرفته‌ای هستند که در سال‌های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. داشتن شکاف نواری مشخصه‌های کریستال‌های فونونیک است که منجر به کاربرد وسیع این مواد در مدیریت انتشار امواج الاستیک شده است. در این مقاله ساختارهای مختلف کریستال فونونیک دوبعدی معرفی شده است. همچنین راهکارهای گوناگونی که برای دستیابی به شکاف نواری مطلوب در ساختارهای کریستال فونونیک دوبعدی ارائه شده‌اند مورد بررسی قرار گرفته‌اند. از آن جمله، در مقاله حاضر، اثر دوران آخال‌های غیر دایره‌ای، اضافه کردن یک آخال به سلول واحد اولیه، تغییر نوع شبکه و شکل آخال، کریستال فونونیک مرکب، کریستال فونونیک آشیانه‌ای، کریستال فونونیک نامتجانس، کریستال فونونیک سلسله مراتبی و استفاده از مواد هوشمند در ساختار کریستال فونونیک مورد بررسی قرار گرفته است که نشان می‌دهد با تغییر پارامترهای فوق شکاف نواری قابل تنظیم است. با وجود اینکه پژوهش‌های مختلفی به بررسی کریستال‌های فونونیک پرداخته‌اند، هنوز مسائل مختلفی در این موضوع مطرح است که نیازمند تحقیقات بیشتری است. علاوه بر آن، در این پژوهش معادلات حاکم بر انتشار موج در کریستال‌های فونونیک و روش‌های تحلیل کریستال فونونیک ارائه و بررسی شده‌اند.

³⁸ decoupled

³⁹ Mixed mode

⁴⁰ Single mode

⁴¹ Out of plane mode

Authorship Contribution Statement

Dr. Mohammad Bagherinouri



Biography: Mohammad Bagherinouri received his Ph.D. degree in mechanical engineering from Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran, in 2016. He received B.Sc. degrees in Mechanical Engineering in 2006 and his M.Sc. degree in 2008 from Isfahan University of Technology, too. He is a faculty member in the Mechanical Engineering Department of Arak University, Iran. His research interests include experimental tests, heat pipes (such as thermosiphons, sintered-wick heat pipes, loop heat pipes, etc.), desalination, solar stills, heat exchangers, photovoltaic panels, etc. His research interests include acoustic metamaterial, phononic crystal, advanced material, flatness measurement, etc.

Contribution Statement: Conceptualization, Resources, Supervision, Project administration, Investigation Formal analysis, Software, Visualization, Writing – original draft, Writing – review & editing

۵- مراجع

- [1] Joannopoulos JD, Johnson SG, Winn JN, Meade RD. Molding the flow of light. Princet Univ Press Princeton, NJ [ua]. 2008.
- [2] Maldovan M, Thomas EL. Periodic materials and interference lithography: for photonics, phononics and mechanics: John Wiley & Sons, 2009.
- [3] Lakhtakia A, Varadan VV, Varadan VK. Reflection characteristics of an elastic slab containing a periodic array of circular elastic cylinders: P and SV wave analysis. The Journal of the Acoustical Society of America. 1988;83:1267-75.
- [4] Economou E, Zdetsis A. Classical wave propagation in periodic structures. Physical Review B. 1989;40:1334.
- [5] Martínez-Sala R, Sancho J, Sánchez JV, Gómez V, Llinares J, Meseguer F. Sound attenuation by sculpture. nature. 1995;378:241-.
- [6] Petrus JA. A computational and experimental study of surface acoustic waves in phononic crystals: Library and Archives Canada= Bibliothèque et Archives Canada, Ottawa, 2011.
- [7] Chen C, Cui J, Duan H, Feng X-Q, He L, Hu G, et al. Perspectives in mechanics of heterogeneous solids. Acta Mechanica Solida Sinica. 2011;24:1-26.
- [8] Pennec Y, Vasseur JO, Djafari-Rouhani B, Dobrzyński L, Deymier PA. Two-dimensional phononic crystals: Examples and applications. Surface Science Reports. 2010;65:229-91.
- [9] Alrowaili Z, Aouassa M, Mahmoud M, El-Nasser KS, Elsayed HA, Taha T, et al. Locally resonant porous phononic crystal sensor for heavy metals detection: A new approach of highly sensitive liquid sensors. Journal of Molecular Liquids. 2023;369:120964.
- [10] Fang T-Y, Sun X-W, Wen X-D, Li Y-X, Liu X-X, Song T, et al. High-performance phononic crystal sensing structure for acetone solution concentration sensing. Scientific Reports. 2023;13:7057.
- [11] Rahimi M, Bahrami A. Phononic Crystal Sensor-Demultiplexer for Detection of Benzene Isomers. Optik. 2023:171112.
- [12] Heo H, Krokhn A, Neogi A, Cui Z, Yuan Z, Hua Y, et al. Multifunctional Acoustic Device Based on a Phononic Crystal with Independently Controlled Asymmetric Rotating Rods. Physical Review Applied. 2023;19:054008.
- [13] Zhou P, Wan S, Wang X, Fu J, Zhu Y. A novel hybrid composite phononic crystal plate with multiple vibration band gaps at low frequencies. Physica B: Condensed Matter. 2021;623:413366.
- [14] Zhong L, Wu F, Zhang X, Zhong H, Zhong S. Effects of orientation and symmetry of rods on the complete acoustic band gap in two-dimensional periodic solid/gas systems. Physics Letters A. 2005;339:164-70.

- [15] Lu T, Gao G, Ma S, Jin F, Kim T. Acoustic band gaps in two-dimensional square arrays of semi-hollow circular cylinders. *Science in China Series E: Technological Sciences*. 2009;52:303-12.
- [16] Yao Y, Hou Z, Liu Y. The two-dimensional phononic band gaps tuned by the position of the additional rod. *Physics Letters A*. 2007;362:494-9.
- [17] Liu W, Chen J-W, Su X-Y. Local resonance phononic band gaps in modified two-dimensional lattice materials. *Acta Mechanica Sinica*. 2012;28:659-69.
- [18] Liu Y, Su J-y, Gao L. The influence of the micro-topology on the phononic band gaps in 2D porous phononic crystals. *Physics Letters A*. 2008;372:6784-9.
- [19] Wei R, Wu B, He C, Zhao H. Phononic band structure in a two-dimensional hybrid triangular graphite lattice. *Physica B: Condensed Matter*. 2009;404:3795-8.
- [20] Wu B, Wei R, Zhao H, He C. Phononic band gaps in two-dimensional hybrid triangular lattice. *Acta Mechanica Solida Sinica*. 2010;23:255-9.
- [21] Wei R, Wu B, Zhao H, Li J, He C. Breaking bands degeneracy in two-dimensional hybrid triangular lattice phononic crystal: A theoretical and experimental study. *Solid state communications*. 2010;150:1463-6.
- [22] Hu J-G, Xu W. Band structures of phononic crystal composed of lattices with different periodic constants. *Physica B: Condensed Matter*. 2014;441:89-93.
- [23] Torres M, de Espinosa FM. Ultrasonic band gaps and negative refraction. *Ultrasonics*. 2004;42:787-90.
- [24] Zarbakhsh J, Haggmann F, Mingaleev SF, Busch K, Hingerl K. Arbitrary angle waveguiding applications of two-dimensional curvilinear-lattice photonic crystals. *Applied Physics Letters*. 2004;84:4687-9.
- [25] Yuan-Wei Y, Zhi-Lin H, You-Yan L. Transmission frequency properties of elastic waves along a hetero-phononic crystal waveguide. *Chinese Physics Letters*. 2007;24:468.
- [26] Yao Y, Wu F, Hou Z, Liu Y. Propagation properties of elastic waves in semi-infinite phononic crystals and related waveguides. *The European Physical Journal B*. 2007;58:353-60.
- [27] Mollapour S, Barvestani J, oskooyi s. Investigation of the effect of surface changes on self-collimated beam in photonic crystalair interface in a two-dimensional photonic crystal. Iranian conference of physics. Sistan and Baluchestan University 2014. (In Persian)
- [28] Liu Y, Sun X-z, Chen S-t. Band gap structures in two-dimensional super porous phononic crystals. *Ultrasonics*. 2013;53:518-24.
- [29] Xu Y, Tian X, Chen C. Band structures of two dimensional solid/air hierarchical phononic crystals. *Physica B: Condensed Matter*. 2012;407:1995-2001.
- [30] Lei L, Miao L, Zheng H, Wu P, Lu M. Band gap extending of locally resonant phononic crystal with outward hierarchical structure. *Applied Physics A*. 2022;128:492.
- [31] Xiao XY, Chen RP. Acoustic band gap extension in one-dimensional solid/fluid phononic crystal heterostructure. *Journal of Computational Acoustics*. 2014;22:1450010.
- [32] Huang P-P, Yao Y-W, Wu F-G, Zhang X, Li J, Hu A-Z. Interface-guided mode of Lamb waves in a two-dimensional phononic crystal plate. *Chinese Physics B*. 2015;24:054301.
- [33] Nouri MB, Moradi M. Presentation and investigation of a new two dimensional heterostructure phononic crystal to obtain extended band gap. *Physica B: Condensed Matter*. 2016;489:28-32.

- [34] Kepeng Q, Zhimou C, Jiangang Z, Weihong Z, Qun Y, Xiangyang S, et al. BANDGAP OPTIMIZATION DESIGN OF PHONONIC CRYSTALS BASED ON SHAPE MEMORY ALLOY. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics. 2023;55:1278-87.
- [35] Chuang K-C, Lv X-F, Wang Y-H. A bandgap switchable elastic metamaterial using shape memory alloys. Journal of Applied Physics. 2019;125.
- [36] Song Y, Shen Y. A tunable phononic crystal system for elastic ultrasonic wave control. Applied Physics Letters. 2021;118.
- [37] Lv X-F, Xu S-F, Huang Z-L, Chuang K-C. A shape memory alloy-based tunable phononic crystal beam attached with concentrated masses. Physics Letters A. 2020;384:126056.
- [38] Sepehri S, Mashhadi MM, Fakhrabadi MMS. Manipulation of wave motion in smart nonlinear phononic crystals made of shape memory alloys. Physica Scripta. 2021;96:125527.
- [39] Billon K, Ouisse M, Sadoulet-Reboul E, Collet M, Butaud P, Chevallier G, et al. Design and experimental validation of a temperature-driven adaptive phononic crystal slab. Smart Materials and Structures. 2019;28:035007.
- [40] Eraslan S, Gitman I, Askes H, de Borst R. Effects of randomness and piezomagnetic coupling on the appearance of stop-bands in heterogeneous magnetorheological elastomers. Archive of Applied Mechanics. 2023:1-15.
- [41] Yan W, Zhang G, Gao Y. Investigation on the tunability of the band structure of two-dimensional magnetorheological elastomers phononic crystals plate. Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2022;544:168704.
- [42] Liang K, He J, Jia Z, Zhang X. Topology optimization of magnetorheological smart materials included PnCs for tunable wide bandgap design. Acta Mechanica Sinica. 2022;38:421525.
- [43] Zhang G, Gao Y. Tunability of band gaps in two-dimensional phononic crystals with magnetorheological and electrorheological composites. Acta Mechanica Solida Sinica. 2021;34:40-52.
- [44] Hu J, Yang G, Shen T, Zhang M, Du J. Bandgap tunability of surface acoustic waves in a two-dimensional magneto-electro-elastic phononic crystal. AIP Advances. 2021;11.
- [45] Li B, Gao Y. Magnetic-controlled programmable soft lattice phononic crystals with sinusoidally-shaped-like ligaments for band gap control. Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2023:170945.
- [46] Luo Y, Li Y. Tunable bandgap design of soft phononic crystals using topology optimization. Advanced Theory and Simulations. 2022;5:2100620.
- [47] Sharma AK, Joglekar M, Joglekar D, Alam Z. Topology optimization of soft compressible phononic laminates for widening the mechanically tunable band gaps. Composite Structures. 2022;289:115389.
- [48] Wu Q, He J, Chen W, Li Q, Liu S. Topology optimization of phononic crystal with prescribed band gaps. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2023;412:116071.
- [49] Sharma AK, Kosta M, Shmuel G, Amir O. Gradient-based topology optimization of soft dielectrics as tunable phononic crystals. Composite Structures. 2022;280:114846.
- [50] Li Y, Luo Y, Zhang X. Topological design of phononic crystals for multiple wide band gaps. Journal of Sound and Vibration. 2022;529:116962.
- [51] Alhammedi A, Lu J-Y, Almheiri M, Alzaabi F, Matouk Z, Al Teneiji M, et al. Numerical modelling and optimization of two-dimensional phononic band gaps in elastic metamaterials with square inclusions. Applied Sciences. 2021;11:3124.

- [52] Sadat SM, Wang RY. A machine learning based approach for phononic crystal property discovery. *Journal of Applied Physics*. 2020;128.
- [53] Miao X-B, Dong H, Wang Y-S. Deep learning of dispersion engineering in two-dimensional phononic crystals. *Engineering Optimization*. 2023;55:125-39.
- [54] Kudela P, Ijeh A, Radzienski M, Miniaci M, Pugno N, Ostachowicz W. Deep learning aided topology optimization of phononic crystals. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2023;200:110636.
- [55] Lee D, Youn BD, Jo S-H. Deep-learning-based framework for inverse design of a defective phononic crystal for narrowband filtering. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2023;255:108474.
- [56] Han S, Han Q, Jiang T, Li C. Inverse design of phononic crystals for anticipated wave propagation by integrating deep learning and semi-analytical approach. *Acta Mechanica*. 2023;234:4879-97.
- [57] Liu C-X, Yu G-L. Deep learning for the design of phononic crystals and elastic metamaterials. *Journal of Computational Design and Engineering*. 2023;10:602-14.
- [58] Liu T-W, Chan C-T, Wu R-T. Deep-Learning-Based Acoustic Metamaterial Design for Attenuating Structure-Borne Noise in Auditory Frequency Bands. *Materials*. 2023;16:1879.
- [59] Moradi M, Bagheri Nouri M. An efficient finite difference time domain algorithm for band structure calculations of Phononic crystal. *Journal of Computational & Applied Research in Mechanical Engineering (JCARME)*. 2017;6:93-101.
- [60] Bagheri nouri M, moradi m. Investigation Of effects Of Structural Defects On A Phononic Crystal Heterostructure Waveguide. *Mechanic of Advanced and Smart Materials*. 2022;2:123-33.