



Investigation of inclusion dimensional parameters effect on the band gap of tungsten-rubber phononic crystal plate

Mohammad Bagherinouri ^a

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

Original Article

Use your device to scan and read the article online



Citation: Bagherinouri M. Investigation of inclusion dimensional parameters effect on the band gap of tungsten-rubber phononic crystal plate. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2025;5(1):1-19

 <https://10.61882/masm.5.1.1>

KEYWORDS

Phononic crystal,
Plate,
Band gap,
Inclusion dimension,
Low frequency.

ABSTRACT

Phononic crystals are a kind of advanced materials that are created by alternating arrangement of one or more inclusion materials in a different host material. In this research, the effect of the dimensional parameters of inclusions on the band gap of tungsten-rubber phononic crystal plate has been investigated. The shape of the inclusion under investigation is a hollow cylinder and the lattice type is square. The analysis of the above structure was done based on the finite element method and with aid of Comsol software. The band structures of the phononic crystals have been obtained for 10 different dimensions of the inclusion (inner and outer diameter of the hollow cylinder). The results showed that to achieve the widest band gap, the outer and inner diameters of the cylinder should be 4.5 and 3.77 mm, respectively. In this case, the band gap can be obtained from the frequency of 281.5 to 1076.5 Hz, and the total width of the band gap is 795 Hz.

Extended Abstract

1. Introduction

Noise is one of the four major public hazards in the world that seriously affects people's daily life. Noise is mainly caused by mechanical vibrations. Mechanical vibrations have an adverse effect on the operation of mechanical structures and engineering equipment, especially on precision instruments. Mechanical vibrations lead to fatigue, wear of mechanical equipment and working life reduction the of the equipment [1]. Noise has harmful effects on human health that can last for a long time. Among these harmful effects, we can mention hearing loss, sleep disturbance, High blood pressure and heart rate, inability to learn, increased risk of accidents [2-5], etc. Low-frequency vibrations and noise are able to spread over long distances [1], therefore, in order to improve people's living environment, it is necessary to develop methods to prevent the spread of vibrations and reduce noise.

Phononic crystals are created from the alternating arrangement of one or more inclusion materials in a host material in such a way that the elastic properties of the inclusion and the host are different. The distinguishing characteristic of phononic crystals is having a band gap [6, 7]. The meaning of band gap is the frequency range that the phononic crystal prevents the propagation of waves whose frequency is in this range. Due to the

* Corresponding author. Tel.: +989184832685

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

DOI: <https://10.61882/masm.5.1.1>

Received: May 13, 2024; Received in revised form: Jun 09, 2024; Accepted: August 13, 2024.

© Author



characteristic of the band gap, phononic crystals are able to control the propagation of acoustic and elastic waves [8, 9] and have applications such as filters [10, 11], sensors [12, 13], waveguides [14, 15] and etc.

To develop a band gap at low frequencies, various phononic crystals have been proposed and investigated in recent years. Wu et al [16] proposed a one-side stubbed phononic crystal plate. They showed that the band gap of this plate can be adjusted by adjusting the height of the stubs, and the widest strip gap can be obtained if the height of the stub is 9 times the thickness of the plate. Assor and Adich [17] analysed a double-side stubbed phononic crystal plate and showed that the width of its band gap is twice that of one-side stubbed phononic crystal plate. Dong et al [18] proposed a phononic crystal for in-plane mode filtering. Li and her colleagues [19, 20] proposed cone-shaped inclusions, which were relatively lighter than cylindrical inclusions. Yang et al [21] proposed and studied phononic crystal plate with double-sided cone-shaped inclusions. Tang and her colleagues [22] presented a phononic crystal plate that consisted of repeating tungsten inclusions in a rubber host. Zhang and Han [24] designed a hybrid phononic crystal to achieve a wider bandgap in the low frequency range. Also, in order to achieve a wider bandgap in the low frequency range, a new structure with a square lattice in silicon was proposed and the material distribution was optimized using a genetic algorithm.

Bagheri Nouri and Moradi [26], in their previous article in the *Mechanics of Advanced and Smart Materials* journal, investigated the effects of structural defects on an heterostructure phononic crystal wave guide. Also, in the recent research of Bagheri Nouri [27] in the *Mechanics of Advanced and Smart Materials* journal, the methods of achieving the desired band gap in two-dimensional phononic crystals have been investigated. In both these papers, it is assumed that the phononic crystal has infinite dimensions in the direction perpendicular to the plane (z direction). While the current article examines a phononic crystal plate that has limited dimensions in the direction perpendicular to the plane (z direction). Achieving a wider bandgap in the low frequency range is a topic of current studees. In this article, a two-dimensional phononic crystal plate, which consisted by repeating hollow cylinder shaped inclusions is analyzed using the finite element method with the help of Comsol software, and the effect of the dimensional parameters of the inclusions (inner and outer diameter of the hollow cylinder) is studied on the band gap. It is also shown that by adjusting the dimensional parameters of the inclusion, a wider band gap can be achieved.

2. Phononic Crystal Plate

Figure 1 shows the phononic crystal plate investigated in this article. The structure is formed by repeating hollow cylinders shaped tungsten inclusion in a rubber background. The cylinders are located in the z direction and are repeated in the xy plane in two directions infinitely.

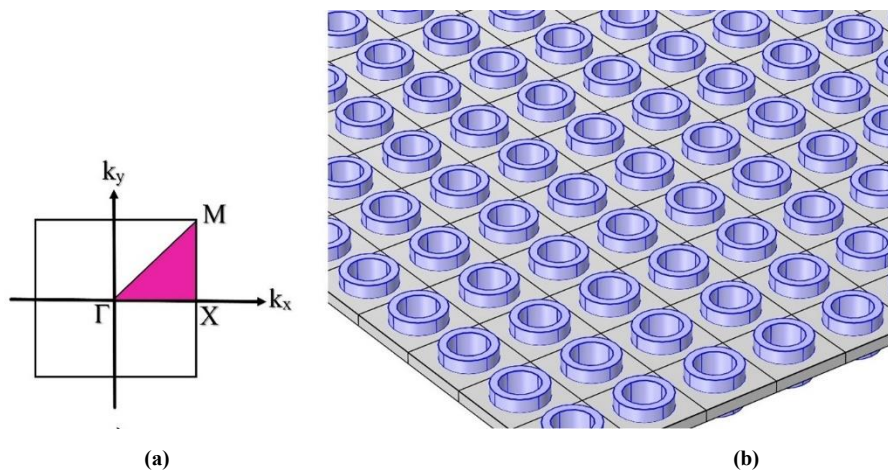


Figure 1. a) The Phononic Crystal Plate b) the reduced brillouin zone

Two-dimensional phononic crystal considered here. The inclusions are located in the z direction and repeated alternately in the xy plane. In this article, it is assumed that the inclusion and the background material are isotropic.

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 the elastic coefficients tensor of the structure, respectively. The summation convention is assumed on repeated indices. According to Bloch's theory, the following equation is obtained for the displacement, which is known as Bloch's periodic boundary condition:

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

where $X=(x,y)$, a is the lattice vector and k is the wave vector [28]. According to Bloch's theory, instead of analyzing the entire structure, a unit cell of the structure can be analyzed by considering Bloch's periodic boundary condition. Figure 2 shows the unit cell of the desired structure.

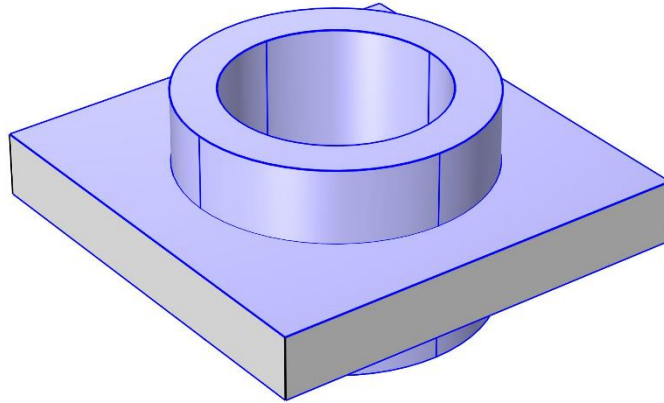


Figure 2. The desired phononic crystal unit cell

To study the desired structure, finite element method has been used and the results have been obtained with the help of Comsol software. The phononic crystal is formed by repeating hollow cylinder shaped tungsten inclusion in a rubber field. The density, Young's modulus and Poisson's ratio of tungsten are 17800 kg/m³, 370 GPa and 0.28 respectively. These values for rubber are assumed to be 1300 kg/m³, 117.5 kPa and 0.469 respectively. In order to verify the results, the results have been compared with the published ones [22]. Figure 3 shows the band structure of the phononic crystal, which was obtained with the COMSOL software.

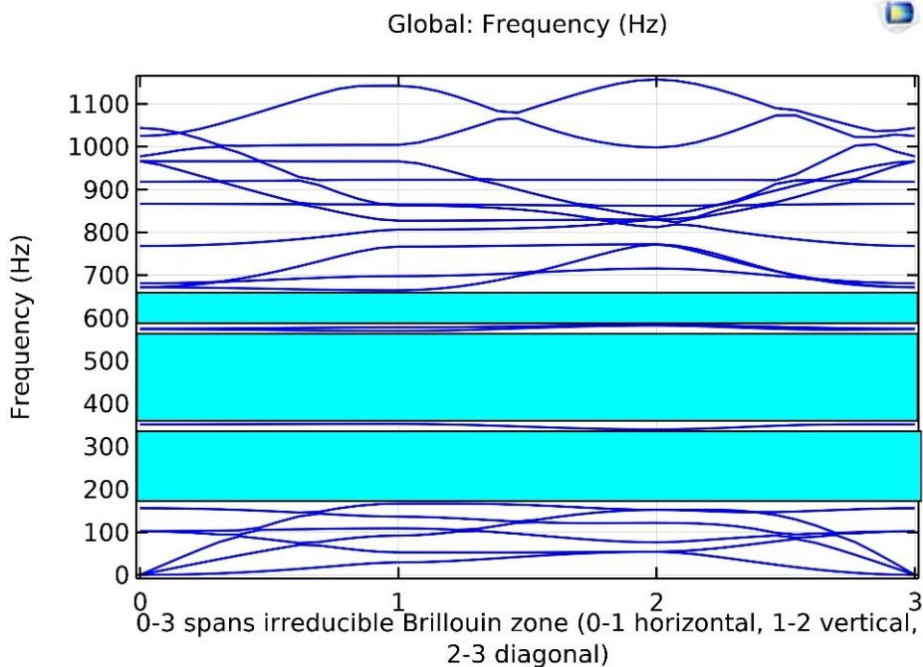


Figure 3. The band structure of the phononic crystal. The outer and inner diameter of the cylinder were assumed to be 3.5 mm and 2.5 mm respectively. 0-1, 1-2 and 2-3 lines are the Γ -X, X-M and M- Γ directions of the reduced Brillouin zone, respectively.

As Figure 3 shows, the computed results predict the band gap of 166 to 340, 352 to 570, and 582 to 664 Hz which is in very good agreement with those of reference [22].

3. The Effect of Inclusion Dimensional Parameters on The Band Gap

In the following, the effect of the inclusion dimensional parameters (internal and external diameter of the hollow cylinder) on the band gap is investigated. In all cases, the square lattice constant is 10 mm, the plate thickness is 1.5 mm, and the cylinder height is 5 mm. The inner and outer diameters of the cylinder are changed in such a way that the volume of the hollow cylinder is equal to the volume of the reference hollow cylinder [22] (the outer diameter of the cylinder, 3.5 mm, the inner diameter of the cylinder, 2.5 mm). In other words, by keeping the volume of the inclusion constant, the effect of changing the dimensional parameters of the inclusion on the band gap has been investigated. Table 1 shows the characteristics of hollow cylinders (10 cases) which are discussed in the following.

Table 1. Specifications of the studied hollow shaped inclusion (internal diameter r_i and external diameter r_o)

row	r_o (mm)	r_i (mm)
1	2.55	0.71
2	2.75	1.25
3	3.00	1.73
4	3.25	2.14
5	3.50	2.50
6	3.75	2.84
7	4.00	3.16
8	4.25	3.47
9	4.50	3.77
10	4.80	4.13

Figure 4 shows the unit cell of some of the states in Table 1.

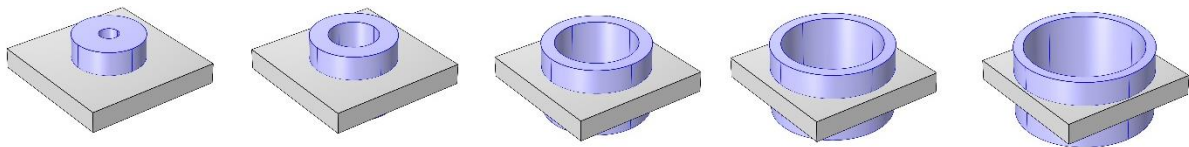


Figure 4. from left to right, the unit cell for cases 1, 3, 6, 7 and 10 in table 1.

As an example, in Figures 5 to 8, the band structure of the phononic crystal is shown, respectively, for cases 1 to 4 in Table 1., which were obtained with COMSOL software.

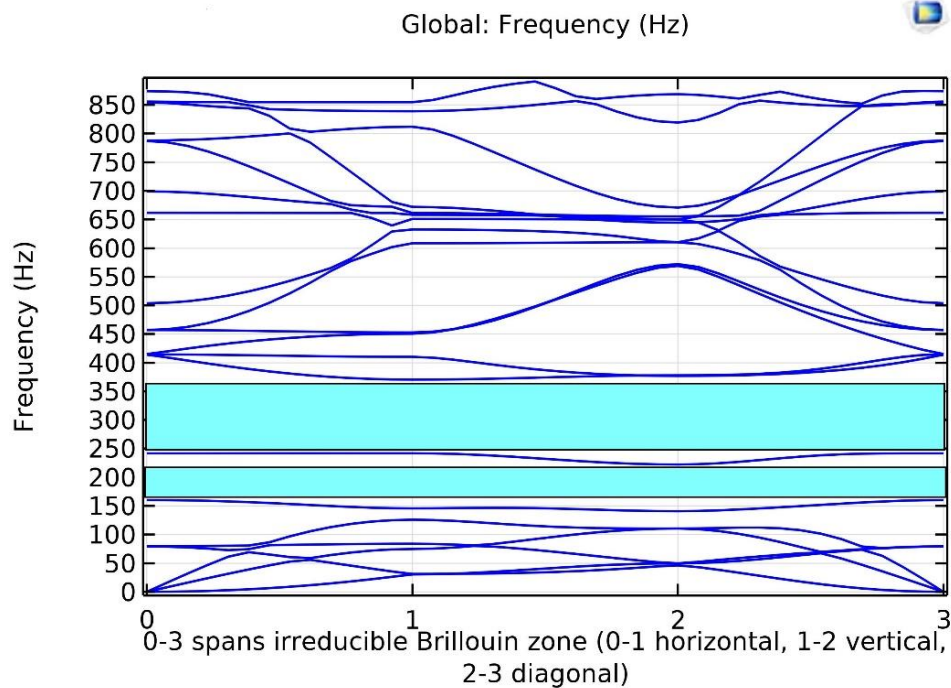


Figure 5. The band structure of the phononic crystal. The outer diameter of the cylinder was assumed to be 2.55 mm (case 1). 0-1, 1-2 and 2-3 lines are the Γ -X, X-M and M- Γ directions of the reduced Brillouin zone, respectively.

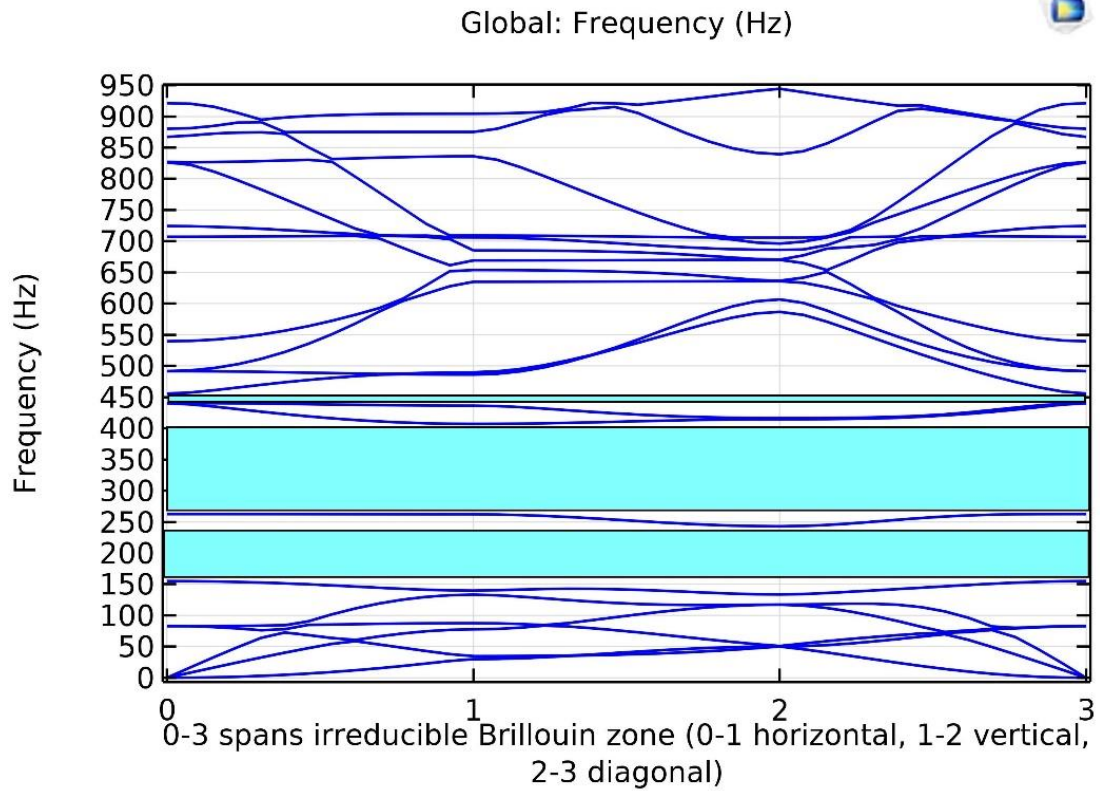


Figure 6. The band structure of the phononic crystal. The outer diameter of the cylinder was assumed to be 2.75 mm (case 2). 0-1, 1-2 and 2-3 lines are the Γ -X, X-M and M- Γ directions of the reduced Brillouin zone, respectively.

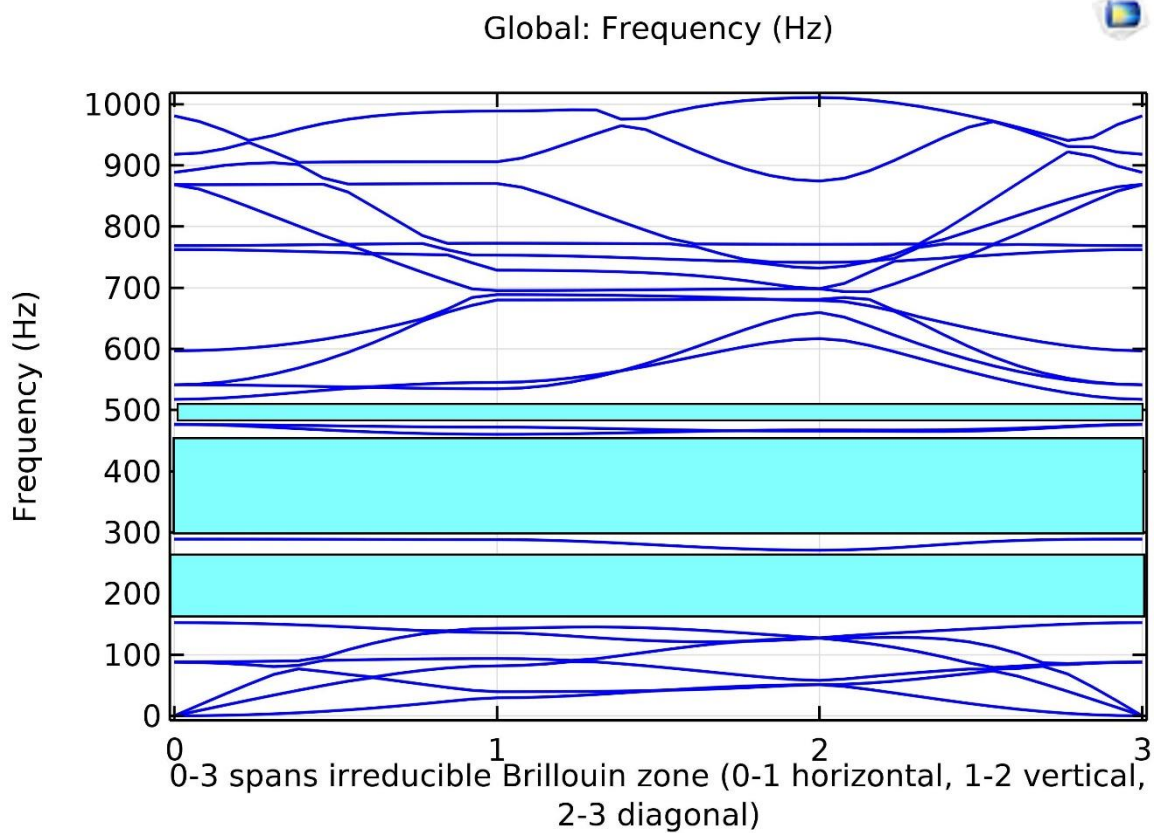


Figure 7. The band structure of the phononic crystal. The outer diameter of the cylinder was assumed to be 3 mm (case 3). 0-1, 1-2 and 2-3 lines are the Γ -X, X-M and M- Γ directions of the reduced Brillouin zone, respectively.

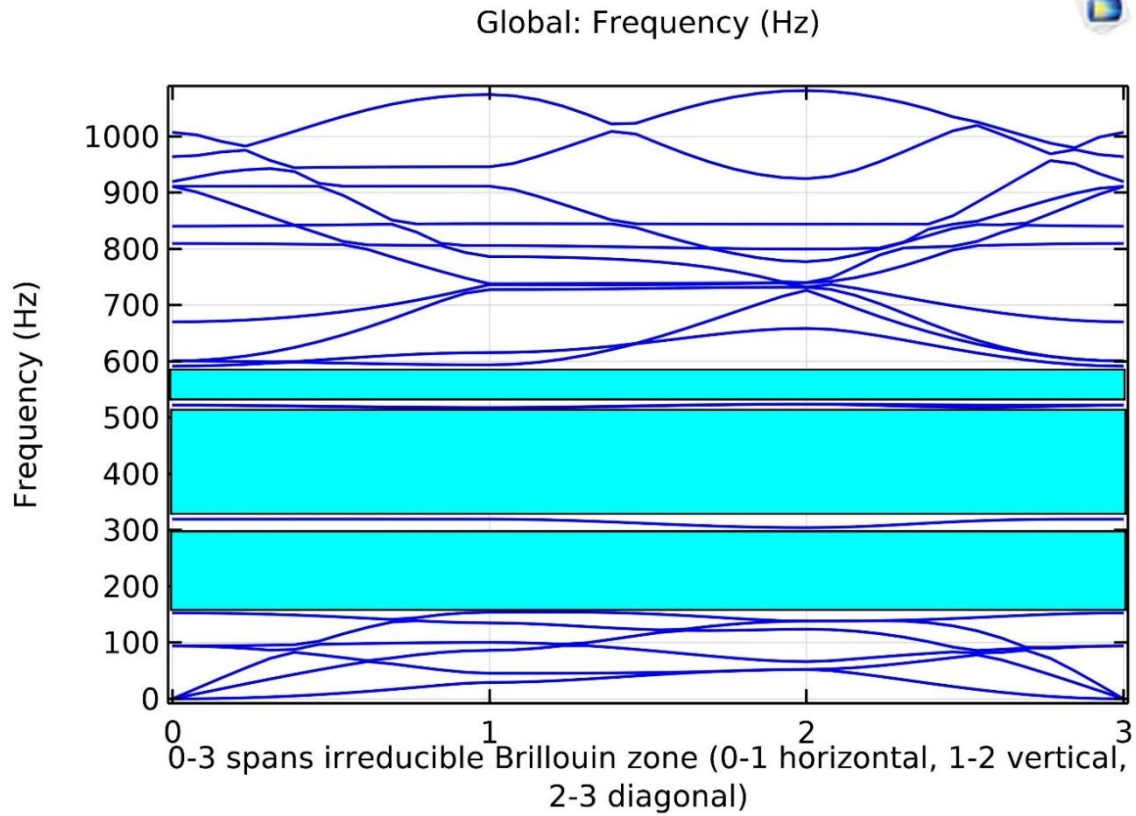


Figure 8. The band structure of the phononic crystal. The outer diameter of the cylinder was assumed to be 3.25 mm (case 4). 0-1, 1-2 and 2-3 lines are the Γ -X, X-M and M- Γ directions of the reduced Brillouin zone, respectively.

Figure 9 shows the effect of the dimensional characteristics of inclusions on the band gap. As the figure shows, if the outer diameter of the cylinder is 4.5 and the inner diameter of the cylinder is 3.77 mm, the band gap from 281.5 to 566.5, from 574 to 918.5, and from 925.5 to 1076.5 Hz can be achieved. In this case, the width of the obtained band gap is maximum.

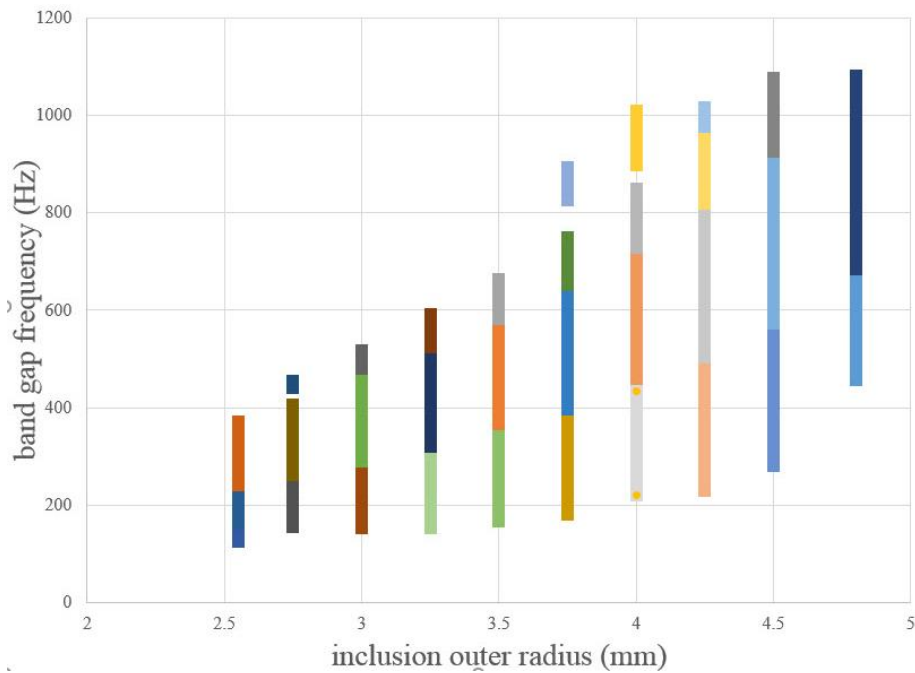


Figure 9. The band gap of the plate versus the external diameter of the cylinder scatter (10 cases in Table 1).



مطالعه اثر پارامترهای ابعادی آخال بر شکاف نواری ورق بلور فونونی تنگستن-لاستیک

محمد باقری نوری^{الف*}

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

چکیده	واژگان کلیدی
کریستال‌های فونونیک مواد پیشرفته‌ای هستند که از چیدمان متناوب یک یا چند ماده آخال در یک ماده زمینه متفاوت به وجود می‌آیند. در این پژوهش اثر پارامترهای ابعادی آخال بر شکاف نواری ورق کریستال فونونیک تنگستن-لاستیک بررسی شده است. شکل آخال مورد بررسی استوانه توخالی و نوع شبکه مربعی است. تحلیل ساختار فوق بر اساس روش اجزا محدود و به کمک نرم افزار کامسول انجام شده است. ساختارهای نواری کریستال‌های فونونیک فوق با شکل آخال استوانه‌ای برای ۱۰ ابعاد متفاوت آخال (قطر داخلی و خارجی استوانه توخالی) به دست آمده است. نتایج نشان داد که برای دستیابی به پهن‌ترین شکاف نواری باید قطر خارجی و داخلی استوانه به ترتیب ۴/۵ و ۳/۷۷ میلی‌متر باشد. در این حالت شکاف نواری تقریباً از فرکانس ۲۸۱/۵ تا ۱۰۷۶/۵ هرتز قابل دستیابی است و پهنای کل شکاف نواری ۷۹۵ هرتز است.	کریستال فونونیک، ورق، شکاف نواری، ابعاد آخال، فرکانس پایین. تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۲۴ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۳/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۳

۱- مقدمه

نوفه^۱ یکی از چهار خطر عمده عمومی در جهان است که زندگی روزمره انسان‌ها را به‌طور جدی تحت تأثیر قرار می‌دهد. نوفه عمدتاً ناشی از ارتعاشات مکانیکی است. ارتعاشات مکانیکی، بر کارکرد سازه‌های مکانیکی و تجهیزات مهندسی اثر نامطلوب دارد به‌خصوص بر تجهیزات ابراز دقیق. ارتعاشات مکانیکی منجر به خستگی، سایش تجهیزات مکانیکی و کاهش عمر کاری تجهیزات می‌شود [۱]. نوفه اثرات زیانباری بر سلامت انسان دارد که می‌تواند تا دراز مدت ادامه یابد. از جمله این اثرات زیان‌بار می‌توان به افت شنوایی، اختلال در خواب، افزایش فشار خون و ضربان قلب، عدم توانایی در یادگیری، افزایش خطر وقوع حادثه [۲-۵] و ... اشاره کرد. ارتعاشات و نوفه با فرکانس پایین، قادر هستند تا فاصله‌های بیشتر منتشر شوند [۱]، از این‌رو به‌منظور بهبود محیط زندگی مردم، توسعه روش‌های جلوگیری از انتشار ارتعاشات و کاهش نوفه ضروری است.

کریستال‌های فونونیک ساختارهایی هستند که از چیدمان متناوب یک یا چند ماده آخال^۲ در یک ماده زمینه ایجاد می‌شوند به‌گونه‌ای که خواص الاستیک آخال و زمینه متفاوت است. مشخصه متمایز کننده کریستال‌های فونونیک داشتن شکاف نواری است [۶، ۷]. منظور از شکاف نواری^۳، محدوده فرکانسی است که کریستال فونونیک از انتشار موج‌هایی که فرکانس آن‌ها در این محدوده قرار می‌گیرد جلوگیری می‌کند. با توجه به خصوصیت شکاف نواری، کریستال‌های فونونیک قادر بر کنترل انتشار امواج آکوستیک و الاستیک هستند [۸، ۹] و کاربردهایی چون فیلتر [۱۰، ۱۱]، سنسور [۱۲، ۱۳]، هدایت کننده موج [۱۴، ۱۵] و ... دارند.

^۱ Noise

^۲ Inclusion

^۳ Band gap

با هدف توسعه شکاف نواری در فرکانس‌های پایین، در سالیان اخیر کریستال‌های فونونیک مختلفی پیشنهاد و بررسی شده‌اند. وو و همکارانش [۱۱۶] ورق کریستال فونونیک دارای کنده یک طرفه^۴ را پیشنهاد دادند. آن‌ها نشان دادند که شکاف نواری این ورق با تنظیم ارتفاع کنده قابل تنظیم است و پهن‌ترین شکاف نواری در صورتی قابل حصول است که ارتفاع کنده‌ها ۹ برابر ضخامت ورق باشد. آسور و آدیچ [۱۱۷] ورق کریستال فونونیک با کنده دو طرفه را تحلیل کردند و نشان دادند که پهنای شکاف نواری آن دو برابر ساختار با کنده یک طرفه است.

دنگ و همکارانش [۱۱۸] یک کریستال فونونیک را برای فیلتر مود درون صفحه‌ای پیشنهاد دادند و نشان دادند که دارای شکاف نواری در محدوده صفر تا ۳۰۰۰ هرتز است. اما این کریستال فونونیک، نوارهای مسطح^۵ زیادی در ساختار نواری داشت که منجر می‌شد هر شکاف نواری باریک شود. لی و همکارانش [۱۱۹-۱۲۰] آخال‌های مخروطی شکل را پیشنهاد دادند که نسبتاً به آخال‌های استوانه‌ای سبک‌تر بود. آن‌ها نشان دادند که ساختار پیشنهادی آن‌ها دارای شکاف نواری در محدوده فرکانسی ۵۹ تا ۱۰۳ هرتز و ۱۵۴ تا ۳۱۸ هرتز است.

یانگ و همکارانش [۱۲۱] ورق کریستال فونونیک با آخال‌های مخروطی شکل دو طرفه را پیشنهاد و مطالعه کردند. ساختار پیشنهادی آن‌ها از آخال‌های مخروطی شکل سرب تشکیل می‌شد که با لاستیک پوشش داده شده بود و در زمینه‌ی اپوکسی تکرار می‌شد. بر اساس شبیه‌سازی اجزا محدود، این ساختار پنج شکاف نواری در محدوده ۰ تا ۱۱۰۰ هرتز با پوشش کلی^۶ ۶۸ درصد داشت.

تانگ و همکارانش [۱۲۲] ورق کریستال فونونیک را ارائه کردند که از تکرار تنگستن در زمینه‌ی لاستیک تشکیل می‌شد. آن‌ها سه نوع آخال با شکل فنجان، استوانه تو خالی و استوانه تو پر را بر شکاف نواری ساختار بررسی کردند و نشان دادند که شکاف نواری در هر سه ساختار تقریباً در محدوده ۱۴۱ تا ۶۶۶ هرتز است. تانگ و همکارانش [۱۲۳] در پژوهش دیگری ورق کریستال فونونیک را بررسی کردند که از تکرار آخال‌های مخروطی تشکیل می‌شد. جنس آخال‌ها تنگستن بود که توسط چهار ورق اتصال دهنده از جنس لاستیک احاطه و در زمینه‌ی اپوکسی تکرار می‌شد.

ژانگ و هان [۱۲۴] یک کریستال فونونیک ترکیبی را طراحی کردند تا به شکاف نواری وسیع‌تر در محدوده فرکانسی پایین، دست یابند. این کریستال فونونیک از تکرار حفره‌ها و کنده‌های سرب متناوب در یک ورق لاستیک تشکیل می‌شد. همچنین به‌منظور دستیابی به شکاف نواری وسیع‌تر در محدوده فرکانسی پایین یک ساختار جدید با شبکه مربعی در سلیکون پیشنهاد شد و توزیع ماده با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی شد [۱۲۵].

باقری نوری و مرادی [۱۲۶] در مقاله قبلی خود در نشریه مکانیک مواد پیشرفته و هوشمند، اثرات نقص ساختاری را بر یک هدایت کننده موج با ساختار نامتجانس کریستال فونونیک بررسی کردند. همچنین در پژوهش اخیر باقری نوری [۱۲۷] در نشریه مکانیک مواد پیشرفته و هوشمند، روش‌های دستیابی به شکاف نواری مطلوب در کریستال‌های فونونیک دوبعدی مورد بررسی قرار گرفته است. در هر دو این مقالات، فرض شده است که کریستال فونونیک در راستای عمود بر صفحه (راستای z) دارای ابعاد بی‌نهایت است. در حالی که مقاله حاضر به بررسی یک ورق کریستال فونونیک می‌پردازد که در راستای عمود بر صفحه (راستای z) دارای ابعاد محدود است.

دستیابی به شکاف نواری وسیع‌تر در محدوده فرکانسی پایین، موضوعی است که در حال حاضر مورد توجه است. در این مقاله یک ورق کریستال فونونیک دو بعدی که از تکرار آخال‌هایی با شکل استوانه تو خالی تشکیل می‌شود با استفاده از روش اجزا محدود و با کمک نرم‌افزار کامسول^۷ مورد تحلیل قرار می‌گیرد و اثر پارامترهای ابعادی آخال (قطر داخلی و خارجی استوانه تو خالی) بر شکاف نواری بررسی می‌شود. همچنین نشان داده می‌شود که با تنظیم پارامترهای ابعادی آخال می‌توان به شکاف نواری وسیع‌تر دست یافت.

⁴ One-side stubbed phononic crystal

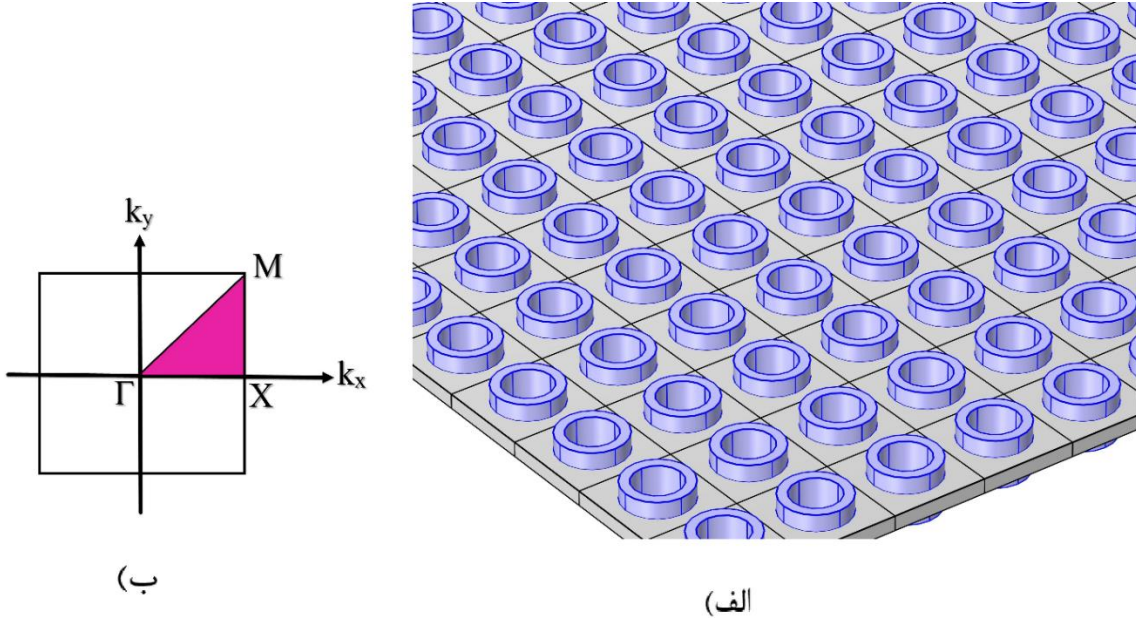
⁵ Flat band

⁶ Total coverage

⁷ Comsol Software

۲- ورق کریستال فونونیک

شکل ۱ ورق کریستال فونونیک مورد بررسی در این مقاله را نشان می‌دهد. کریستال فونونیک از تکرار استوانه‌های توخالی تنگستن در زمینه‌ی لاستیک تشکیل می‌شود. استوانه در راستای z قرار دارند و درون صفحه xy در دو جهت تا بی‌نهایت تکرار می‌شوند.



شکل ۱ الف) ورق کریستال فونونیک مورد نظر ب) ناحیه بریلئون^۸ کاهش یافته در صفحه ورق

۳- تئوری حاکم و روش حل

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

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

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

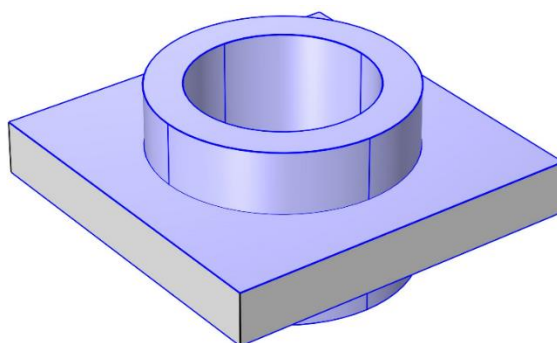
که $\rho = \rho(x, y)$ و $C_{ijmn}(x, y)$ به ترتیب چگالی و تانسور ضرایب الاستیک ساختار هستند. قرارداد جمع روی اندیس‌های تکراری فرض می‌شود. با توجه به نظریه بلاچ^۹، معادله زیر برای جابجایی به دست می‌آید که به شرط مرزی متناوب بلاچ معروف است:

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

که در آن $X = (x, y)$ ، a بردار شبکه و k بردار موج است [۲۸]. بر اساس نظریه بلاچ، به جای تحلیل کل ساختار می‌توان یک سلول واحد ساختار را با در نظر گرفتن شرط مرزی متناوب بلاچ تحلیل کرد. شکل ۲ سلول واحد ساختار مورد نظر را نمایش می‌دهد.

^۸ Brillouin zone

^۹ Bloch's theory

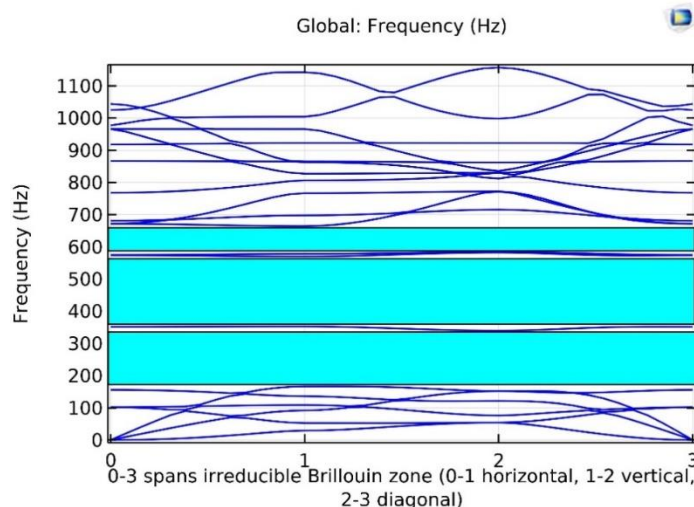


شکل ۲ سلول واحد کریستال فونونیک مورد نظر

۴- شبیه‌سازی و نتایج

در این مقاله فرض می‌شود که آخال و زمینه ایزوتروپیک هستند. برای مطالعه ساختار مورد نظر، از روش اجزا محدود استفاده شده است و نتایج به کمک نرم‌افزار کامسول به دست آمده‌اند. کریستال فونونیک از تکرار استوانه‌های توخالی تنگستن در زمینه‌ی لاستیک تشکیل می‌شود. چگالی، مدول یانگ و نسبت پواسون تنگستن به ترتیب برابر ۱۷۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، ۳۷۰ گیگا پاسکال و ۰/۲۸ است. این مقادیر برای لاستیک به ترتیب ۱۳۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، ۱۱۷/۵ کیلو پاسکال و ۰/۴۶۹ فرض می‌شود. به منظور صحت سنجی نتایج، ابتدا ثابت شبکه مربعی ۱۰ میلی‌متر، ضخامت ورق، ۱/۵ میلی‌متر، قطر خارجی استوانه، ۳/۵ میلی‌متر، قطر داخلی استوانه، ۲/۵ میلی‌متر و ارتفاع استوانه ۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است و نتایج به دست آمده با نتایج مرجع [۲۲] مقایسه شده است. در شکل ۳ ساختار نواری کریستال فونونیک فوق نشان داده شده است که با نرم‌افزار کامسول به دست آمده است.

برای تحلیل ساختار فوق در قسمت model wizard نرم‌افزار کامسول، مدل 3D انتخاب شده است. بعد از رسم سلول واحد مطابق شکل ۲ در نرم‌افزار، study از نوع solid mechanics (solid) در نرم‌افزار کامسول تعریف شده است. روی سطوح هایلایت شده در شکل ۲، شرط مرزی از نوع free و روی مابقی سطوح، شرط مرزی از نوع periodic condition تعریف شده‌اند. شرط مرزی متناوب بلاچ در نرم‌افزار کامسول با عنوان شرط مرزی فلوکه آمده است. برای اعمال شرط مرزی بلاچ (فلوکه) باید روی solid mechanics (solid) در نمودار درختی کلیک راست کرد و سپس از بخش Connection، periodic condition را انتخاب نمود. در تنظیمات شرط مرزی periodic condition، در بخش type of periodicity نوع floquet periodicity را باید برگزید. همچنین برای در نظر گرفتن بردارهای موج مختلف (ناحیه بریلئون کاهش یافته) از قابلیت parametric sweep در نرم‌افزار کامسول استفاده شده است.



شکل ۳ ساختار نواری کریستال فونونیک فوق با قطر خارجی استوانه، ۳/۵ میلی‌متر، قطر داخلی استوانه ۲/۵ میلی‌متر، راستای ۱-۲، ۰-۱، ۲-۳ و ۳-۲ به ترتیب راستای $\Gamma-X$ ، $X-M$ و $M-\Gamma$ ناحیه بریلئون کاهش یافته‌اند.

همان‌طور که از شکل ۳ پیدا است، روش اجزا محدود، شکاف نواری ۱۶۶ تا ۳۴۰، ۳۵۲ تا ۵۷۰ و ۵۸۲ تا ۶۶۴ هرتز (ناحیه

مستطیلی فیروزه‌ای رنگ) را پیش‌بینی می‌کند که تطابق بسیار خوبی با مرجع [۲۲] دارد. این مقادیر در مرجع [۲۲] به ترتیب ۱۴۱ تا ۳۴۸، ۳۵۸ تا ۵۷۹ و ۵۹۰ تا ۶۶۶ هرتز است.

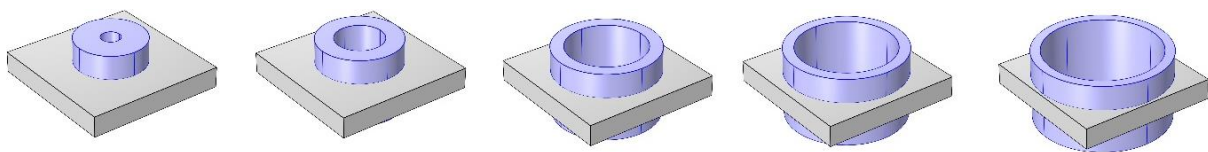
۱-۴- بررسی اثر پارامترهای ابعادی آخال (قطر داخلی و خارجی استوانه توخالی) بر شکاف نواری

در ادامه اثر پارامترهای ابعادی آخال (قطر داخلی و خارجی استوانه توخالی) بر شکاف نواری مورد بررسی قرار می‌گیرد. در همه حالت‌های مورد بررسی ثابت شبکه مربعی ۱۰ میلی‌متر، ضخامت ورق، ۱/۵ میلی‌متر و ارتفاع استوانه ۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است و قطر داخلی و خارجی استوانه به‌گونه‌ای تغییر داده شده است که حجم استوانه توخالی با حجم استوانه توخالی مرجع [۲۲] (قطر خارجی استوانه، ۳/۵ میلی‌متر، قطر داخلی استوانه، ۲/۵ میلی‌متر) برابر باشد. به‌عبارت‌دیگر با ثابت نگه‌داشتن حجم ماده آخال، اثر تغییر پارامترهای ابعادی آخال بر شکاف نواری ساختار بررسی شده است. جدول ۱، مشخصات استوانه‌های توخالی (۱۰ حالت) را نشان می‌دهد که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

جدول ۱ مشخصات قطر داخلی r_i و خارجی r_o استوانه‌ها

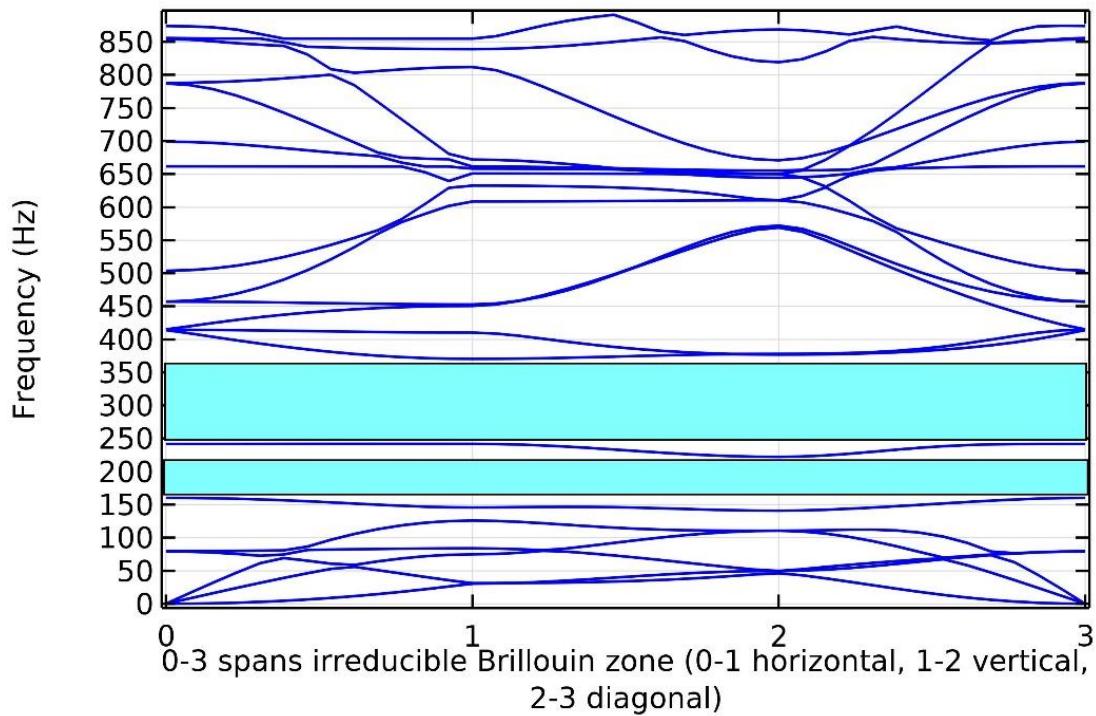
ردیف	r_o (mm)	r_i (mm)
۱	۲/۵۵	۰/۷۱
۲	۲/۷۵	۱/۲۵
۳	۳/۰۰	۱/۷۳
۴	۳/۲۵	۲/۱۴
۵	۳/۵۰	۲/۵۰
۶	۳/۷۵	۲/۸۴
۷	۴/۰۰	۳/۱۶
۸	۴/۲۵	۳/۴۷
۹	۴/۵۰	۳/۷۷
۱۰	۴/۸۰	۴/۱۳

شکل ۴ سلول واحد برخی از حالت‌های جدول ۱ را نمایش می‌دهد.



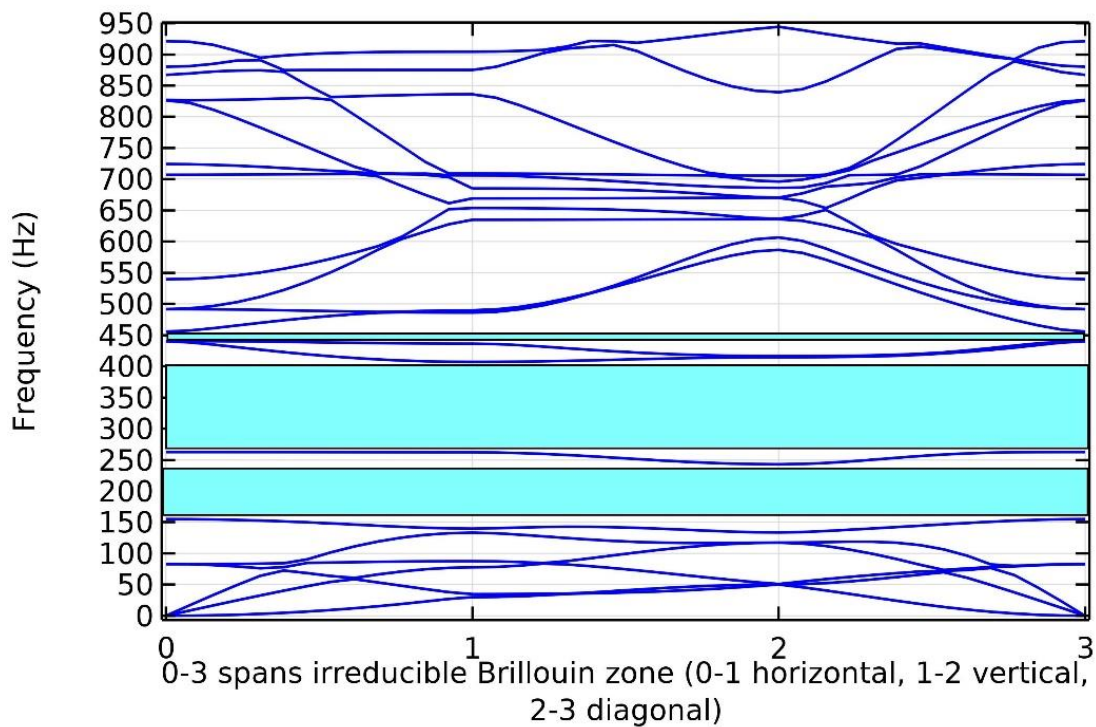
شکل ۴ به ترتیب از چپ به راست سلول واحد کریستال فونونیک برای حالت ۱، حالت ۳، حالت ۶، حالت ۷ و حالت ۱۰ در جدول ۱ در شکل‌های ۵ تا ۱۳ ساختار نواری کریستال فونونیک به ترتیب برای حالت‌های ۱ تا ۱۰ در جدول ۱ نشان داده شده است که با نرم‌افزار کامسول به دست آمده است.

Global: Frequency (Hz)



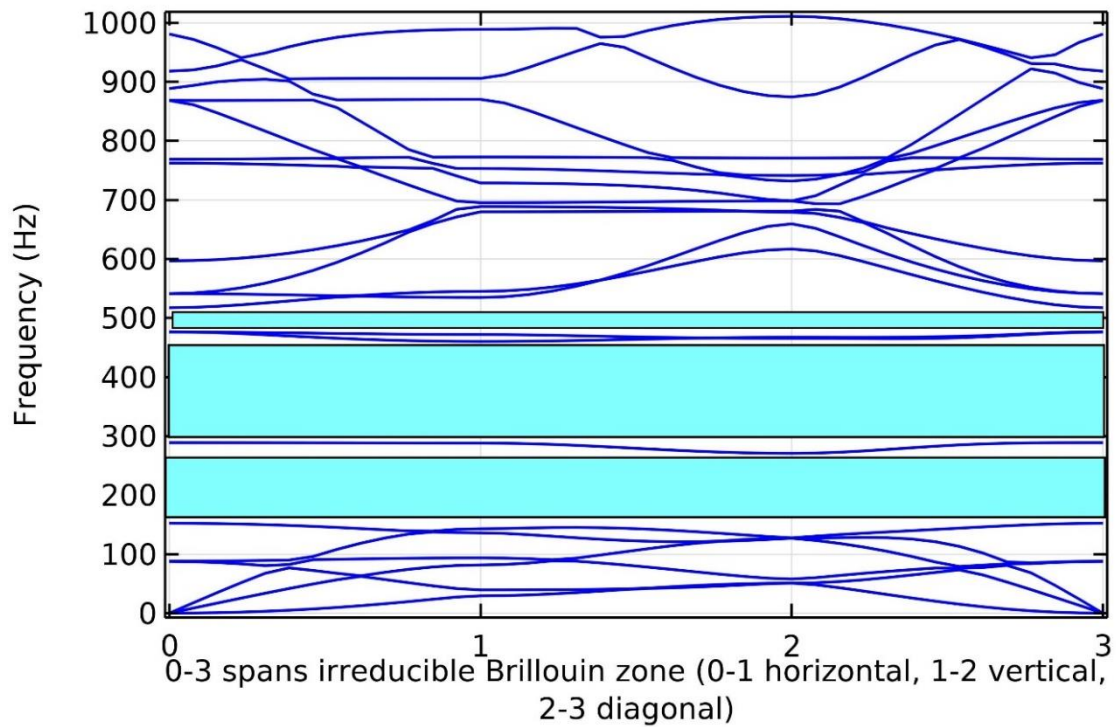
شکل ۵ ساختار نواری کریستال فونونیک فوق با قطر خارجی استوانه، ۲/۵۵ میلی‌متر، قطر داخلی استوانه ۰/۷ میلی‌متر (حالت ۱). راستای ۰-۱، ۱-۲ و ۲-۳ به ترتیب راستای Γ -X، X-M و M- Γ ناحیه بریلئون کاهش یافته‌اند.

Global: Frequency (Hz)



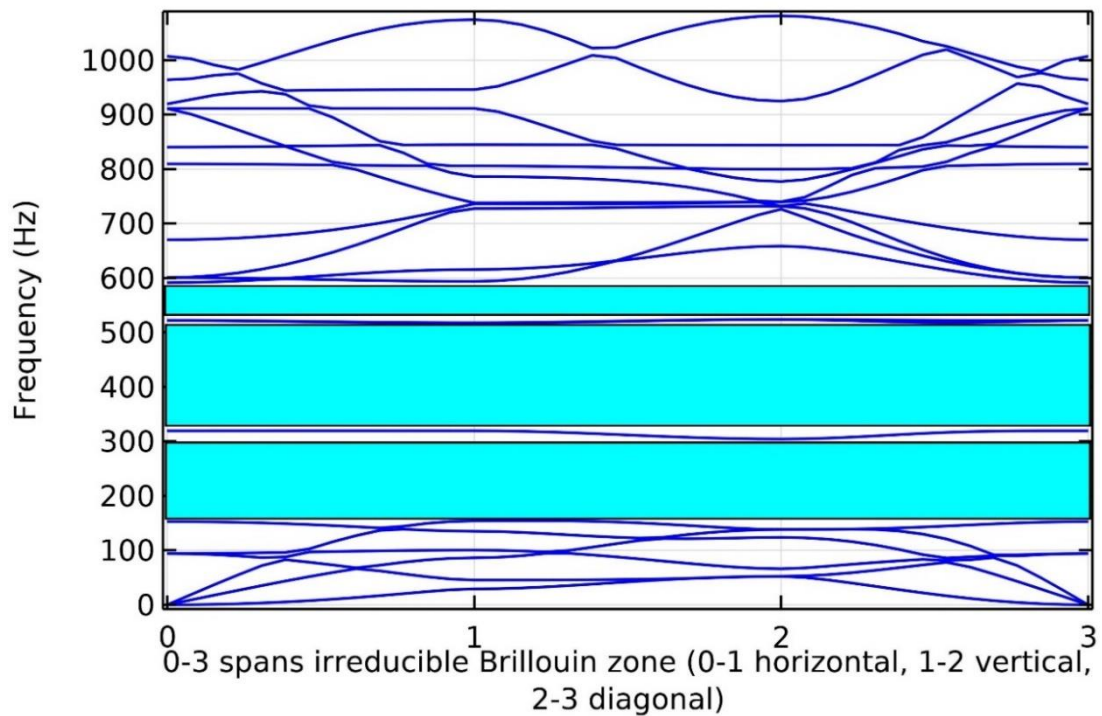
شکل ۶ ساختار نواری کریستال فونونیک فوق با قطر خارجی استوانه، ۲/۷۵ میلی‌متر، قطر داخلی استوانه ۱/۲۵ میلی‌متر (حالت ۲). راستای ۰-۱، ۱-۲ و ۲-۳ به ترتیب راستای Γ -X، X-M و M- Γ ناحیه بریلئون کاهش یافته‌اند.

Global: Frequency (Hz)



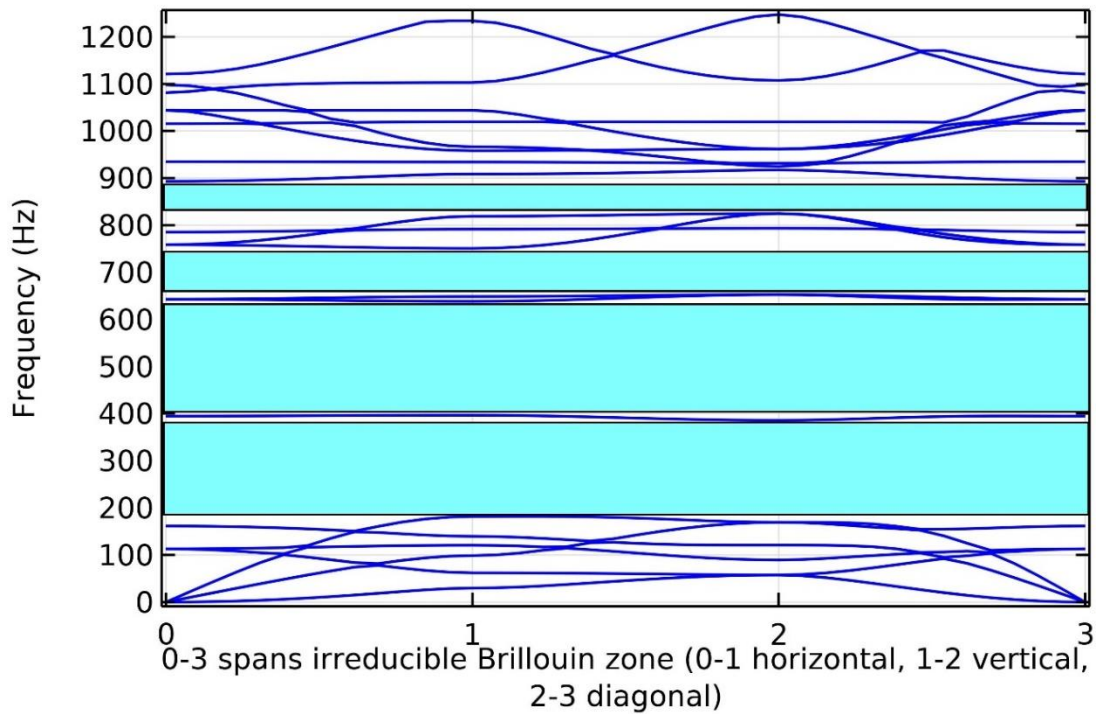
شکل ۷ ساختار نواری کریستال فونونیک فوق با قطر خارجی استوانه، ۳ میلی‌متر، قطر داخلی استوانه ۱/۷۳ میلی‌متر (حالت ۳). راستای ۰-۱، ۱-۲ و ۲-۳ به ترتیب راستای Γ -X، X-M و M- Γ ناحیه بریلئون کاهش یافته‌اند.

Global: Frequency (Hz)



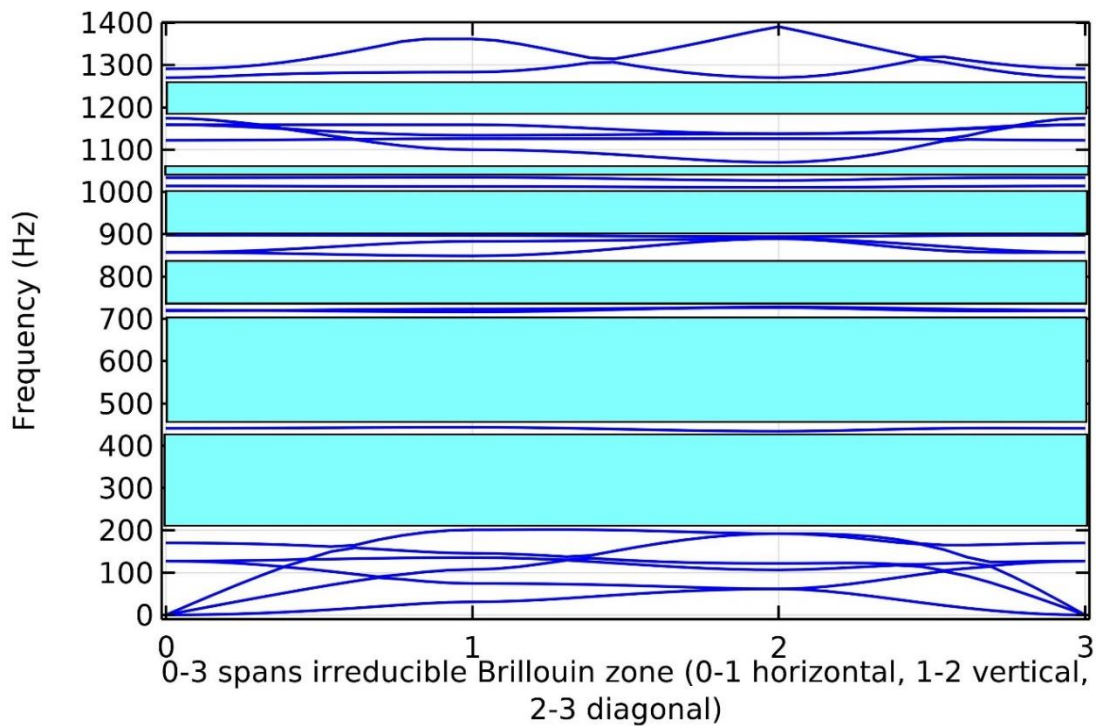
شکل ۸ ساختار نواری کریستال فونونیک فوق با قطر خارجی استوانه، ۳/۲۵ میلی‌متر، قطر داخلی استوانه ۲/۱۴ میلی‌متر (حالت ۴). راستای ۰-۱، ۱-۲ و ۲-۳ به ترتیب راستای Γ -X، X-M و M- Γ ناحیه بریلئون کاهش یافته‌اند.

Global: Frequency (Hz)



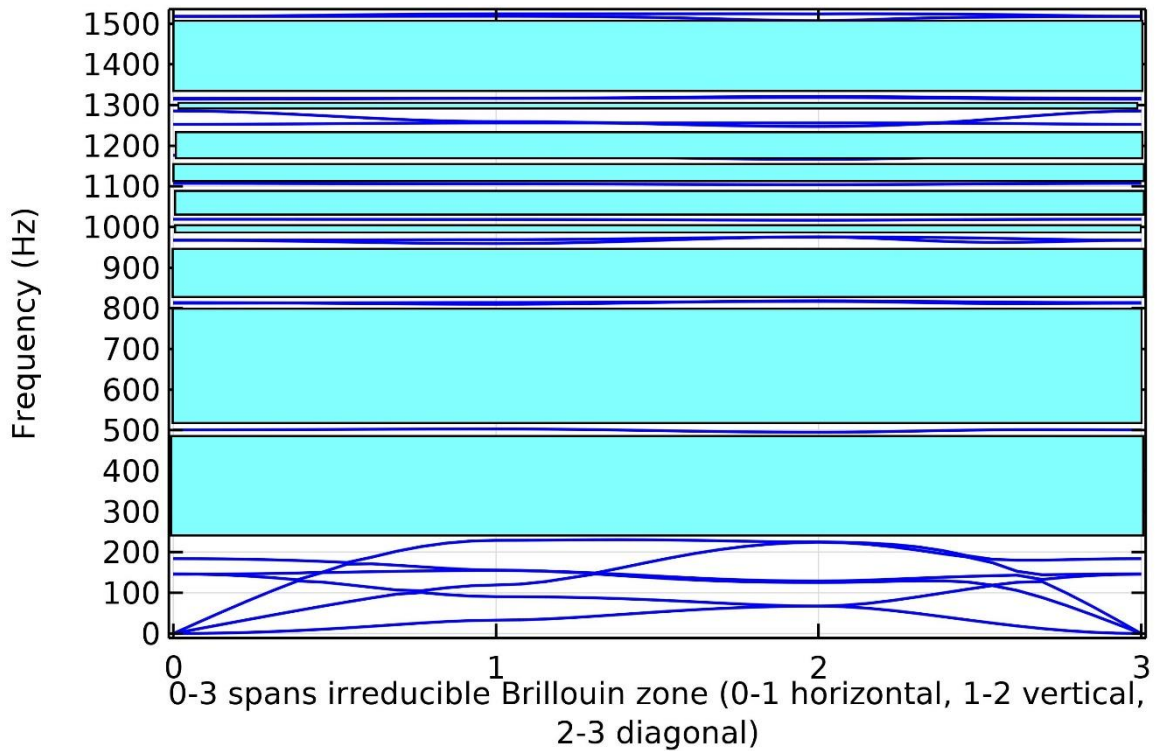
شکل ۹ ساختار نواری کریستال فونونیک فوق با قطر خارجی استوانه، ۳/۷۵ میلی‌متر، قطر داخلی استوانه ۲/۸۴ میلی‌متر (حالت ۶). راستای ۰-۱، ۱-۲ و ۲-۳ به ترتیب راستای Γ -X، X-M، M- Γ ناحیه بریلئون کاهش یافته‌اند.

Global: Frequency (Hz)



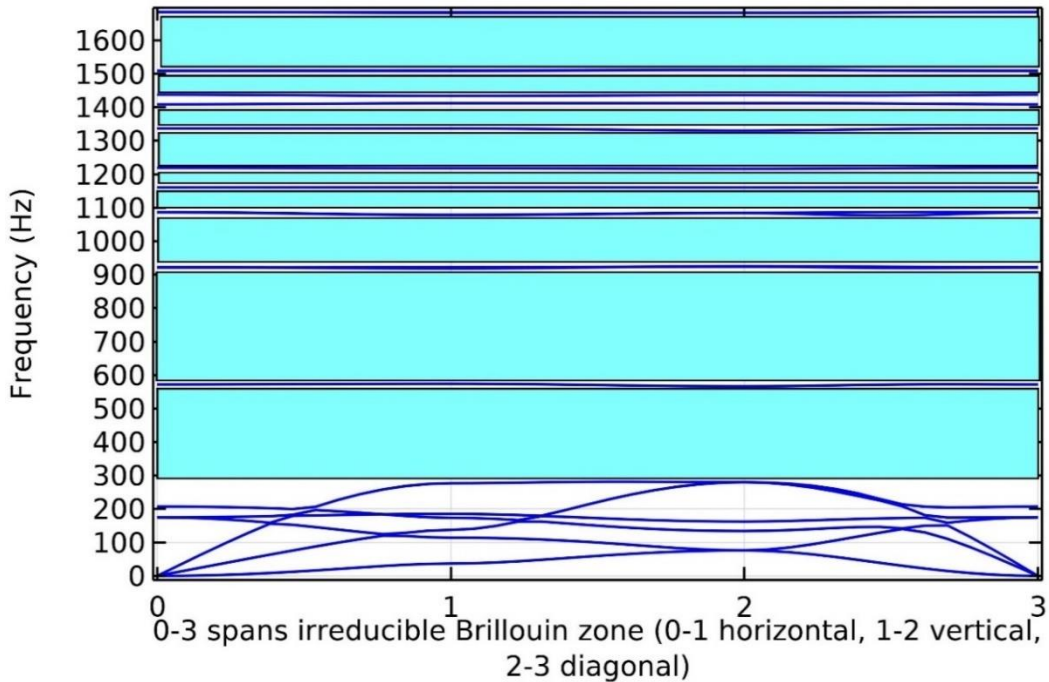
شکل ۱۰ ساختار نواری کریستال فونونیک فوق با قطر خارجی استوانه، ۴ میلی‌متر، قطر داخلی استوانه ۳/۱۶ میلی‌متر (حالت ۷). راستای ۰-۱، ۱-۲ و ۲-۳ به ترتیب راستای Γ -X، X-M، M- Γ ناحیه بریلئون کاهش یافته‌اند.

Global: Frequency (Hz)



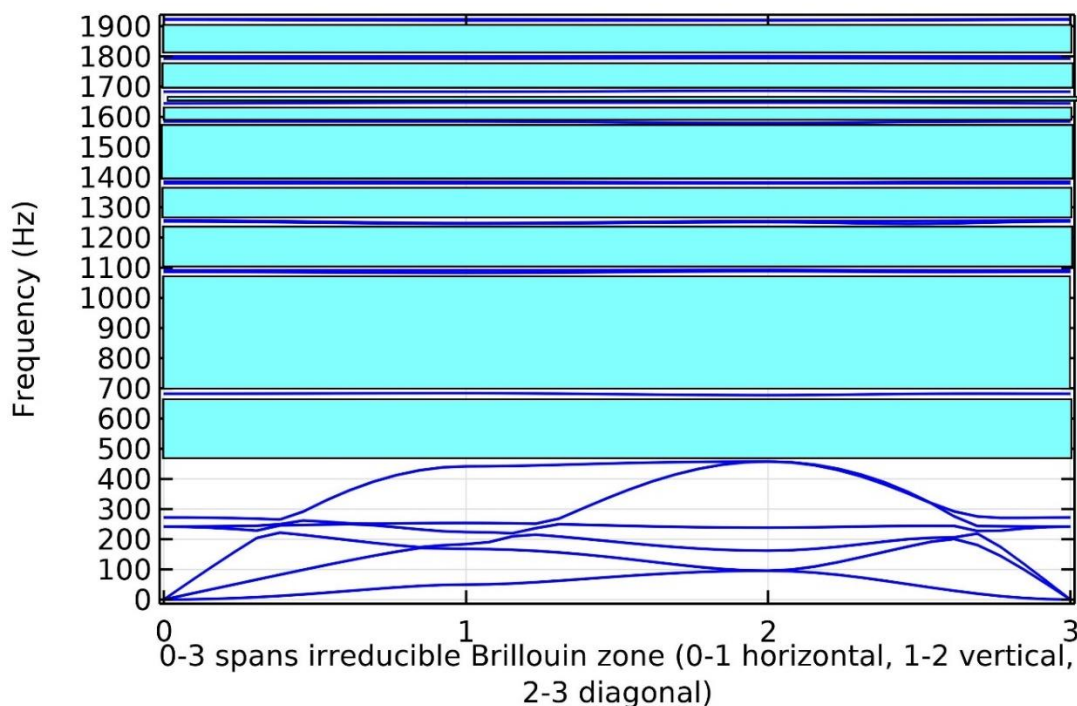
شکل ۱۱ ساختار نواری کریستال فونونیک فوق با قطر خارجی استوانه، ۴/۲۵ میلی‌متر، قطر داخلی استوانه ۳/۴۷ میلی‌متر (حالت ۸). راستای ۰-۱، ۱-۲ و ۲-۳ به ترتیب راستای Γ -X، X-M و M- Γ ناحیه بریلئون کاهش یافته‌اند.

Global: Frequency (Hz)



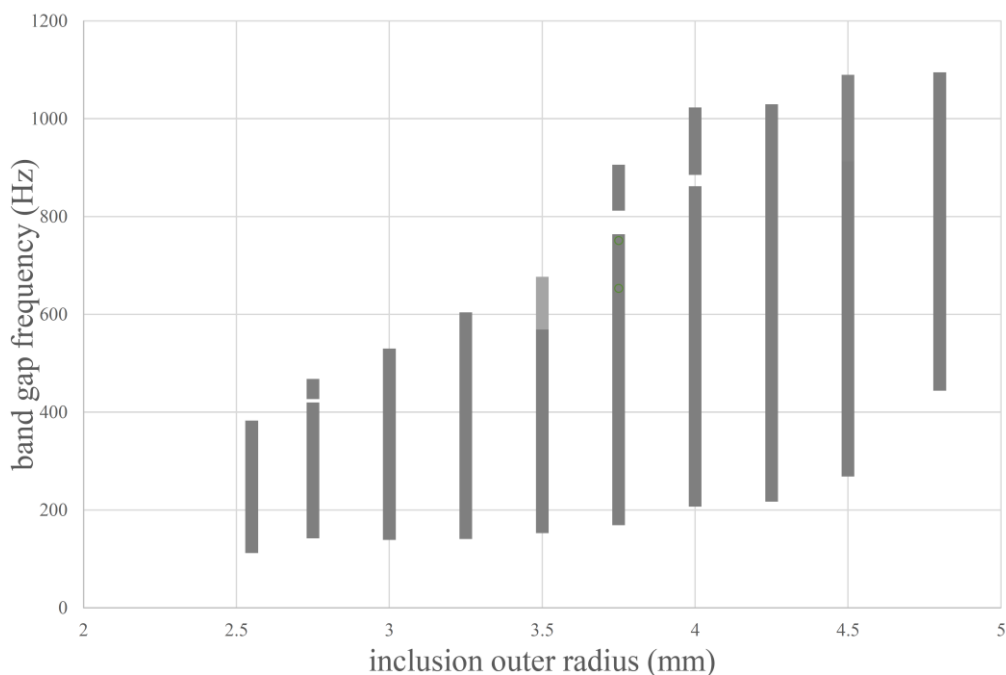
شکل ۱۲ ساختار نواری کریستال فونونیک فوق با قطر خارجی استوانه، ۴/۵ میلی‌متر، قطر داخلی استوانه ۳/۷۷ میلی‌متر (حالت ۹). راستای ۰-۱، ۱-۲ و ۲-۳ به ترتیب راستای Γ -X، X-M و M- Γ ناحیه بریلئون کاهش یافته‌اند.

Global: Frequency (Hz)



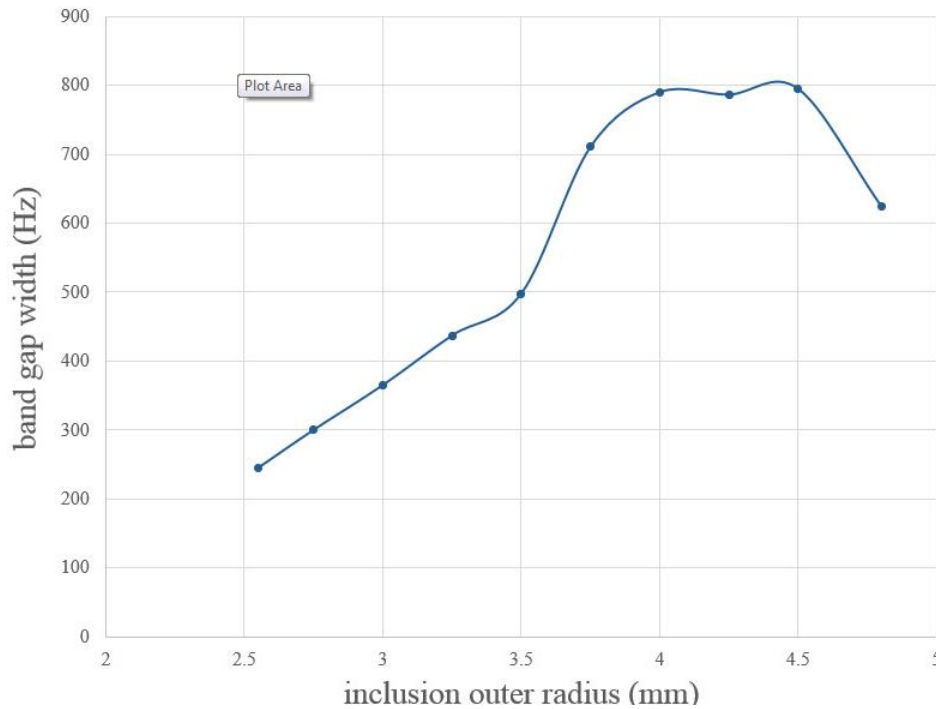
شکل ۱۳ ساختار نواری کریستال فونونیک فوق با قطر خارجی استوانه، ۴/۸ میلی‌متر، قطر داخلی استوانه ۴/۱۳ میلی‌متر (حالت ۱۰). راستای ۰-۱، ۱-۲ و ۲-۳ به ترتیب راستای Γ -X، X-M، M- Γ ناحیه بریلئون کاهش یافته‌اند.

از شکل‌های ۵ تا ۱۳ و شکل ۳ شکاف نواری تا فرکانس ۱۱۰۰ هرتز در هر حالت استخراج شده و نتایج در شکل ۱۴ آورده شده است. به‌عنوان مثال، همان‌طور که شکل ۱۲ (یا شکل ۱۴) نشان می‌دهد در صورتی که قطر خارجی استوانه ۴/۵ و قطر داخلی استوانه ۳/۷۷ میلی‌متر باشند، شکاف نواری از ۲۸۱/۵ تا ۵۶۶/۵، از ۵۷۴ تا ۹۱۸/۵ و از ۹۲۵/۵ تا ۱۰۷۶/۵ هرتز قابل دستیابی است.



شکل ۱۴ شکاف نواری کریستال فونونیک فوق برحسب قطر خارجی استوانه (۱۰ حالت جدول ۱).

در شکل ۱۵، تفاضل فرکانس پایان آخرین شکاف نواری و فرکانس شروع اولین شکاف نواری (پهنای کل شکاف نواری) برحسب قطر خارجی استوانه نمایش داده شده است. به عنوان مثال، همان طور که شکل ۱۲ (یا شکل ۱۴) نشان می دهد در صورتی که قطر خارجی استوانه ۴/۵ و قطر داخلی استوانه ۳/۷۷ میلی متر باشند، شکاف نواری از ۲۸۱/۵ تا ۵۶۶/۵، از ۵۷۴ تا ۹۱۸/۵ و از ۹۲۵/۵ تا ۱۰۷۶/۵ هرتز قابل دستیابی است. بنابراین پهنای کل شکاف نواری تفاضل فرکانس ۱۰۷۶/۵ و ۲۸۱/۵ است یعنی ۷۹۵ هرتز.



شکل ۱۵ پهنای کل شکاف نواری کریستال فونونیک فوق برحسب قطر خارجی استوانه (۱۰ حالت جدول ۱).

همان طور که شکل ۱۵ نشان می دهد در صورتی که قطر خارجی استوانه ۴/۵ و قطر داخلی استوانه ۳/۷۷ میلی متر باشند، حداکثر پهنای کل شکاف نواری (۷۹۵ هرتز) قابل دستیابی است. در صورتی که قطر خارجی استوانه ۴/۲۵ و قطر داخلی استوانه ۳/۴۷ میلی متر باشند، پهنای کل شکاف نواری ۷۸۶ هرتز خواهد بود. همچنین در حالتی که قطر خارجی استوانه ۴ و قطر داخلی استوانه ۳/۱۶ میلی متر باشند، پهنای کل شکاف نواری ۷۹۰ هرتز خواهد بود.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله اثر پارامترهای ابعادی آخال بر شکاف نواری ورق کریستال فونونیک تنگستن-لاستیک بررسی شده است. شکل آخال مورد بررسی استوانه توخالی است. ساختارهای نواری کریستالهای فونونیک فوق با شکل آخال استوانه ای برای ۱۰ ابعاد متفاوت آخال (قطر داخلی و خارجی استوانه توخالی) به دست آمده است. نتایج نشان داد که برای دستیابی به پهن ترین شکاف نواری باید قطر خارجی و داخلی استوانه به ترتیب ۴/۵ و ۳/۷۷ میلی متر باشد. در این حالت شکاف نواری تقریباً از فرکانس ۲۸۱/۵ تا ۱۰۷۶/۵ هرتز و پهنای کل شکاف نواری ۷۹۵ هرتز است.

Authorship Contribution Statement

Dr. Mohammad Bagherinouri



Biography: Assistant Professor at Department of Mechanical Engineering, University of Arak, Arak, Iran.

Contribution Statement: Conceptualization, Methodology, Resources, Validation, Formal analysis, Investigation, Software, Visualization, Writing – original draft, Writing – review & editing, Supervision.

۶- مراجع

- [1] Liu J, Guo H, Wang T. A review of acoustic metamaterials and phononic crystals. *Crystals*. 2020; 10(4): 305.
- [2] Muzet A. Environmental noise, sleep and health. *Sleep Medicine Reviews*. 2007; 11(2): 135-142.
- [3] Babisch W. Transportation noise and cardiovascular risk: updated review and synthesis of epidemiological studies indicate that the evidence has increased. *Noise and Health*. 2006; 8(30): 1-29.
- [4] Thompson R, Smith RB, Karim YB, Shen C, Drummond K, Teng C, Toledano MB. Noise pollution and human cognition: an updated systematic review and meta-analysis of recent evidence. *Environment International*. 2022; 158: 106905.
- [5] Torjussen M. Evaluating the specific sound level from plant and machinery in high residual sound environments. *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*. 2023; 265(3): 4236-4240.
- [6] Sigalas MM. Elastic and acoustic wave band structure. *Journal of Sound and Vibration*. 1992; 158(2): 377-382.
- [7] Sánchez-Pérez JV, Caballero D, Martínez-Sala R, Rubio C, Sánchez-Dehesa J, Meseguer F, Llinares J, Gálvez F. Sound attenuation by a two-dimensional array of rigid cylinders. *Physical Review Letters*. 1998; 80(24): 5325.
- [8] Mohammadi S, Eftekhari AA, Khelif A, Hunt WD, Adibi A. Evidence of large high frequency complete phononic band gaps in silicon phononic crystal plates. *Applied Physics Letters*. 2008; 92(22).
- [9] Bilal OR, Hussein MI. Ultrawide phononic band gap for combined in-plane and out-of-plane waves. *Physical Review E*. 2011; 84(6): 065701.
- [10] Hosseinkhani A, Panahi E, Khansanami MF, Younesian D. A modified star-shaped phononic crystal for the vibration wave filtration in plates: design and experiment. *Archive of Applied Mechanics*. 2023; 1-7.
- [11] Cao H, Li W, Wang Z, Tian F, Zhang L, Chen X. Nonlinear ultrasonic crack detection based on 3D-printed phononic crystal filters. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2023.
- [12] Omrani EM, Nazari F. High-performance ethyl lactate sensor via phononic crystal-based T-shape structure. *The European Physical Journal Plus*. 2024; 139(1): 13.
- [13] Zhu T, Wang T, Zhou HT, Wang YF, Wang YS. Reconfigurable phononic crystal sensor for liquid detection. *Smart Materials and Structures*. 2024.
- [14] Valappil SV, Goosen JF, Aragón AM. Multi-objective design of 3D phononic crystal waveguide by design space trimming. *Materials & Design*. 2024; 237: 112594.
- [15] Jiang Z, Zhou Y, Zheng S, Liu J, Xia B. Waveguides induced by replacing defects in phononic crystal. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2023; 255: 108464.
- [16] Wu TT, Huang ZG, Tsai TC, Wu TC. Evidence of complete band gap and resonances in a plate with periodic stubbed surface. *Applied Physics Letters*. 2008; 93(11).
- [17] Badreddine Assouar M, Oudich M. Enlargement of a locally resonant sonic band gap by using double-sided stubbed phononic plates. *Applied Physics Letters*. 2012; 100(12).
- [18] Dong Y, Yao H, Du J, Zhao J, Chao D, Wang B. Research on low-frequency band gap property of a hybrid phononic crystal. *Modern Physics Letters B*. 2018; 32(15): 1850165.

- [19] Li S, Chen T, Wang X, Xi Y. Lamb waves propagation in a novel metal-matrix phononic crystals plate. *Modern Physics Letters B*. 2016; 30(26): 1650338.
- [20] Li S, Dou Y, Chen T, Wan Z, Ju L, Zhang F, Cui XX. Forming low-frequency complete vibration bandgaps in a thin nonmetallic elastic metamaterial plate. *Acoustical Physics*. 2019; 65: 322-333.
- [21] Yang Q, Song T, Wen XD, Zhu HF, Tan ZH, Liu LJ, Liu ZJ, Sun XW. Simulations on the wide bandgap characteristics of a two-dimensional tapered scatterer phononic crystal slab at low frequency. *Physics Letters A*. 2020; 384(35): 126885.
- [22] Tang R, Lu T, Pan C, Zheng W. Vibrational loss analysis of a new type of phononic crystal with a tungsten block embedded inside a rubber matrix. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*. 2023; 42(4): 1765-1774.
- [23] Tang R, Lu T, Zheng W. Low-frequency ultrawide band gap study of symmetric conical scatterer phononic crystal. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*. 2023; 1-10.
- [24] Zhang Z, Han XK. A new hybrid phononic crystal in low frequencies. *Physics Letters A*. 2016; 380(45): 3766-3772.
- [25] Cheng Q, Guo H, Yuan T, Sun P, Guo F, Wang Y. Topological design of square lattice structure for broad and multiple band gaps in low-frequency range. *Extreme Mechanics Letters*. 2020; 35: 100632.
- [26] Bagheri Nouri M, Moradi M. Investigation of effects of structural defects on a phononic crystal heterostructure waveguide. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2022; 2(2): 123-133.
- [27] Bagheri Nouri M. A review of two-dimensional phononic crystal structures. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2023; 3(3): 325-345.
- [28] Tanaka Y, Tomoyasu Y, Tamura SI. Band structure of acoustic waves in phononic lattices: two-dimensional composites with large acoustic mismatch. *Physical Review B*. 2000; 62(11): 7387.