

Investigation of Effects of Structural Defects on A Phononic Crystal Heterostructure Waveguide

Mohammad Bagheri nouri^{a*}, Mehran Moradi^b

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

^bDepartment of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, 84156-83111, Iran

Original Article

Use your device to scan
and read the article online



Citation: 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.

 <https://10.52547/masm.2.2.123>.

KEYWORDS

Phononic crystal,
Structural Defect,
Waveguide,
Finite difference method.

ABSTRACT

Phononic crystals are inhomogeneous structures which are created by periodic arrangement of inclusions in an elastically different host material. By removing of a row of inclusions, phononic crystal waveguide can be obtained. In this research, effects of structural defects on a phononic crystal heterostructure waveguide have been investigated. The heterostructure is composed of square and triangular phononic crystals (periodic arrangement of steel inclusions in epoxy host). To analyze the structure, displacement based finite difference time domain method has been used. The simulation shows that a stub attached vertically to the heterostructure waveguide induces dips in the transmission spectrum. Also, the frequency range of the transmission was limited to a narrow frequency domain of 104 Khz in the cavity-containing waveguide. Finally, the simulation showed that the effect of the cavity that is inserted at the side of the waveguide is insignificant.

Extended Abstract

1. Introduction

Phononic crystals are inhomogeneous structures which are created by periodic arrangement of inclusions in an elastically different host material. By removing of a row of inclusions, phononic crystal waveguide can be obtained.

In this research, effects of structural defects on a phononic crystal heterostructure waveguide have been investigated. The heterostructure is composed of square and triangular phononic crystals (periodic arrangement of steel inclusions in epoxy host) as illustrated in FIG 1.

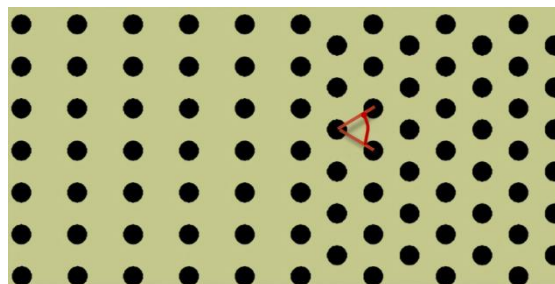


Figure 1. The studied phononic crystal heterostructure

Then, by creation of line defects in the heterostructure, a heterostructure waveguide bend is actualized.

Diameter of the steel inclusion and the lattice constant are 5 and 8 mm respectively. The host material is epoxy.

* Corresponding author. Tel.: +988632625008

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

DOI: <https://10.52547/masm.2.2.123>.

Received: April 17, 2022; Received in revised form: May 23, 2022; Accepted: August 16, 2022.

2022 Published by Arak University Press. All rights reserved.



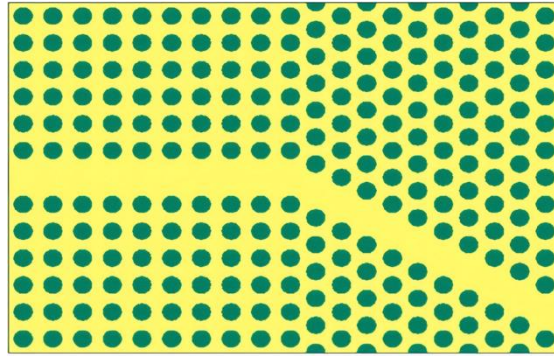


Figure 2. The proposed arbitrary heterostructure waveguide bend

2. Methodology

Two-dimensional phononic crystals are considered here. The equations of elastic wave propagation can be described as:

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

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

In the above equations, $\rho = \rho(x, y)$, $C_{ijmn}(x, y)$ and u_i are respectively density, elastic stiffness tensor, i th component of wave displacement in the structure.

The summation agreement over dummy indices is considered, too. Since propagation of elastic waves in the xy plane is assumed, the displacement and stress tensor of the structure are independent of z , i.e., $u_i = u_i(x, y, t)$ and $\sigma_{ij} = \sigma_{ij}(x, y, t)$. The propagation of the mixed mode in the heterostructure is studied in this paper.

To solve the aforementioned equations, displacement-based finite difference time domain (DBFDTD) method was used which can be found in detail in [17].

To analyze the proposed bend, left and right boundaries of FIG. 2 was surrounded by two homogenous regions and the perfectly matched layer (PML) [18] was applied as the absorbing boundary condition. The periodic boundary condition was applied on the top and bottom boundaries.

A Gaussian wave packet was launched along the x direction in the left homogenous region. The calculation model was discretized in both x and y directions with a grid interval of $(a/60)$. The equations of motion were solved over 2^{16} time steps with each time step lasting 6 ns. By taking fast Fourier transform of the averaged x component of displacement over the guide width (right homogenous region) and normalizing it to the same quantity calculated for the wave packet in the absence of the phononic crystal, transmission coefficient can be calculated. To analyse the heterostructure a developed FORTRAN code was used.

3. Discussion and Results

By substituting an inclusion with host material, defects can be introduced within the heterostructure. The cavity-containing waveguide was showed in FIG. 3. Effect of this cavity on transmission spectrum of the waveguide has been illustrated in FIG. 4. As can be seen in FIG. 4, the frequency range of the transmission was limited to a narrow frequency domain of 104 KHz in the cavity-containing waveguide.

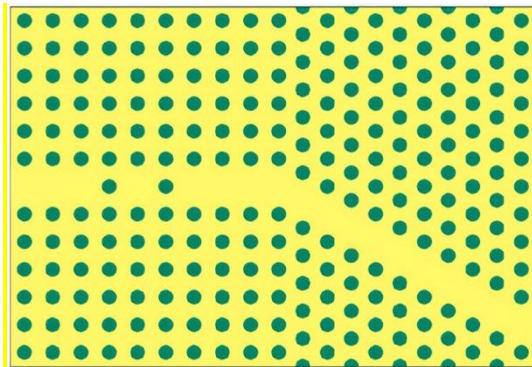


Figure 3. The cavity-containing waveguide

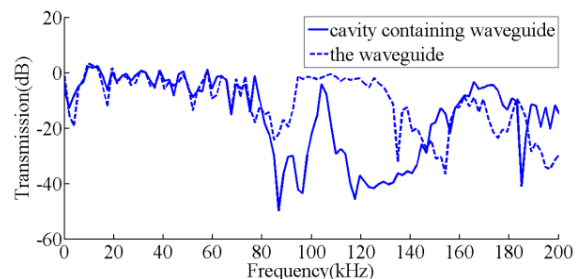


Figure 4. Transmission spectrum of the cavity-containing waveguide (solid line) and transmission spectrum of the waveguide (dashed line)

FIG. 5 shows a stub attached vertically to the heterostructure waveguide. The analyse showed that a stub attached vertically to the heterostructure waveguide induces dips in the transmission spectrum.

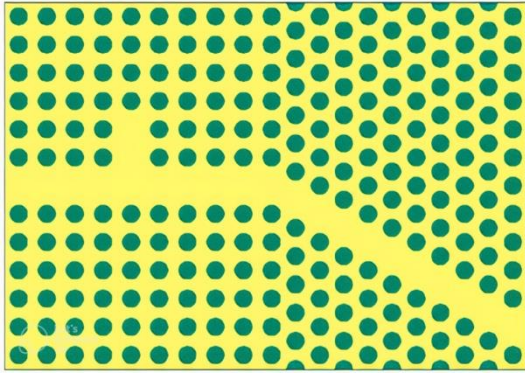


Figure 5. The stubbed heterostructure waveguide

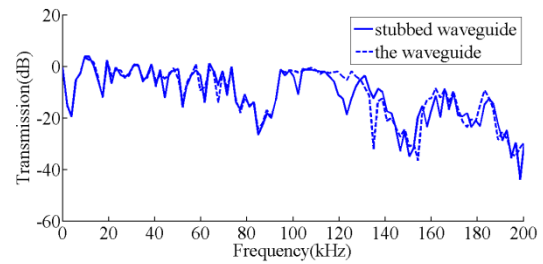


Figure 6. Transmission spectrum of the stubbed waveguide (solid line) and transmission spectrum of the waveguide (dashed line)

The displacement pattern of the stubbed waveguide in 20000 th time step has been showed in FIG. 7. The frequency of applied wave is 123 KHz. This figure indicates that the displacements of right-side points of waveguide are insignificant. In other words, if the wave frequency is 123 KHz, the wave could not propagate along the waveguide.

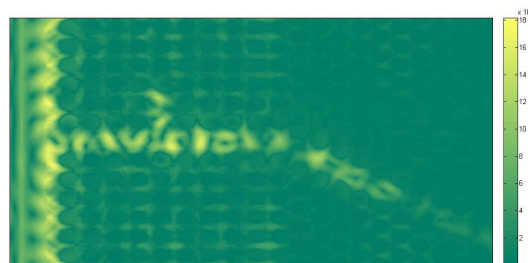


Figure 7. The displacement pattern (in m) of the stubbed waveguide in 20000 th time step

FIG. 8 shows the situation where a cavity is inserted at the side of the waveguide. It is expected that a cavity that is inserted at the side of the waveguide, leads to zero of transmission. The effect of this cavity on the transmission spectrum of the waveguide was depicted in FIG. 9

The simulation showed that that the cavity which is inserted at the side of the waveguide leads to an insignificant reduction in the transmission spectrum of the waveguide in 102 KHz frequency.

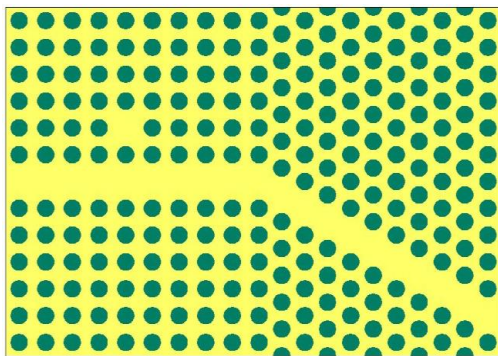


Figure 8. The side cavity coupled waveguide

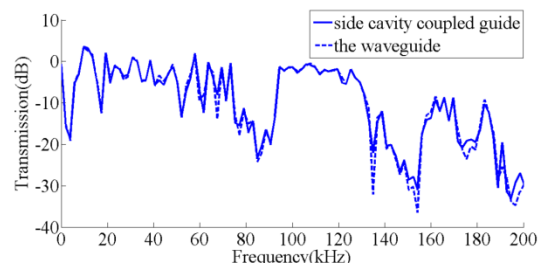


Figure 9. Transmission spectrum of the side cavity coupled waveguide (solid line) and transmission spectrum of the waveguide (dashed line)

4. Conclusion

In this paper, effect of structural defect on transmission spectrum of a phononic crystal heterostructure waveguide has been studied. The heterostructure is composed of square and triangular phononic crystals. The inclusion and host material are steel and epoxy respectively.

To analyze the structure, displacement based finite difference time domain method has been used. The simulation shows that a stub attached vertically to the heterostructure waveguide induces dips in the transmission spectrum. Also, the frequency range of the transmission was limited to a narrow frequency domain of 104 KHz in the cavity-containing waveguide. Finally, the simulation showed that the effect of the cavity that is inserted at the side of the waveguide is insignificant



بررسی اثرات نقص ساختاری بر یک هدایت کننده موج با ساختار نامتجانس کریستال فونونیک

محمد باقری نوری^{الف*}، مهرا ن مرادی^ب

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

^باستادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران، moradi@cc.iut.ac.ir

چکیده	واژگان کلیدی
<p>کریستال‌های فونونیک مواد مرکبی هستند که از آرایش متناوب یک یا چند ماده آخال در یک ماده زمینه متفاوت ایجاد می‌شوند. از حذف یک ردیف از آخال‌ها، هدایت‌کننده کریستال فونونیک قابل دستیابی است. در این پژوهش اثرات نقص ساختاری بر یک هدایت‌کننده موج با ساختار نامتجانس کریستال فونونیک بررسی شده است. ساختار مورد نظر از تکرار آخال‌های فولادی درزمینه‌ی اپوکسی و از ترکیب آرایش مربعی و مثلثی به وجود می‌آید. برای تحلیل ساختار فوق از روش تفاضل محدود جایجایی-مینا در حوزه زمان استفاده شده است. تحلیل نشان می‌دهد ریشه‌ای که عمود بر راستای هدایت‌کننده نامتجانس قرار دارد، باعث تنزل طیف عبور در فرکانس‌های ۱۰۲ و ۱۲۳ کیلوهرتز می‌شود. همچنین هدایت‌کننده در حالتی که یک حفره را در بر می‌گیرد، تنها فرکانس ۱۰۴ کیلوهرتز را هدایت می‌کند. درنهایت، حفره‌ای که در مجاورت هدایت‌کننده قرار می‌گیرد، اثر ناچیزی بر کاهش عبور هدایت‌کننده دارد.</p>	<p>کریستال فونونیک، نقص ساختاری، هدایت‌کننده، روش تفاضل محدود.</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۲۸ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۳/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۲۵</p>

۱- مقدمه

کریستال‌های فونونیک^۱ مواد مرکب پیشرفته‌ای هستند که از آرایش متناوب 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. توانایی کریستال‌های فونونیک در ایجاد شکاف نواری کامل^۲ (یا مطلق^۳) در طیف عبور^۴ امواج، خاصیتی است که کریستال‌های فونونیک را متمایز می‌کند. 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 فرکانسی، کریستال‌های فونونیک برای مدیریت انتشار امواج الاستیک مناسب هستند. شکاف نواری کامل می‌تواند یک محیط بدون ارتعاش را برای سیستم‌های مکانیکی بسیار دقیق فراهم کند [۱]. با از بین بردن تناوب ساختار، ایجاد مودهای هدایت‌شده^۵ درون شکاف نواری ممکن است. موجی که فرکانس آن در محدوده شکاف نواری کریستال فونونیک

^۱Phononic crystal

^۲Complete band gap

^۳Absolute

^۴Transmission

^۵Guided mode

قرار دارد، توسط هدایت‌کننده کریستال فونونیک به خوبی هدایت و در اطراف نقص ساختاری متمرکز می‌شود. این قابلیت، کریستال فونونیک را به گزینه مناسبی برای طراحی ریز حفره‌های آکوستیک یا الاستیک، هدایت‌کننده موج^۷، فیلتر، آینه‌های کامل^۸ مبدل می‌سازد. استفاده هم‌زمان از نقص نقطه‌ای^۹ و خطی^{۱۰} می‌تواند منجر به کاربردهایی چون فیلتر، جداسازی چند فرکانس^{۱۱} و کوپلر^{۱۲} شود [۲].

اولین مطلبی که در مورد کریستال‌های فونونیک منتشر شد به حدود سه دهه‌ی پیش برمی‌گردد. زمانی 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. در سال‌های اخیر پژوهشگران زیادی به بررسی کریستال‌های فونونیک پرداخته‌اند. یانگ و همکارانش از یک هدایت‌کننده کریستال فونونیک برای تقویت برداشت انرژی از یک دستگاه پیزوالکتریک استفاده کردند [۵]. ژانگ و همکارانش از کریستال فونونیک برای رفع مشکل نویز و ارتعاشات در وسایل نقلیه استفاده کردند [۶]. جیا و همکارانش با انجام یک تحلیل عدم اطمینان اثرات رندم بر شکاف نواری کریستال فونونیک را بررسی کردند [۷]. درکارگوو و همکارانش از روش اجزا محدود برای بررسی ساختار نواری و طیف عبور امواج آکوستیک سطحی در هدایت‌کننده کریستال فونونیک استفاده شده است [۸]. سلمان و همکارانش یک هدایت‌کننده کریستال فونونیک را به‌عنوان سنسور میزان تغییرات غلظت اتانول در ترکیب اتانول و آب پیشنهاد و تحلیل کردند [۹]. در پژوهش خلیف و همکارانش هدایت و خم امواج آکوستیک در یک هدایت‌کننده به‌صورت تجربی اثبات شده است. هدایت‌کننده مورد بررسی در کار آن‌ها از حذف میله‌ها از شبکه متناوب استوانه‌های فولادی در آب به وجود آمده است [۱۰].

با از بین بردن تناوب ساختار نقص به وجود می‌آید. از حذف یک آخال یا جایگزینی یک آخال دیگر یک نقص نقطه‌ای ایجاد می‌شود. با حذف یک ردیف از آخال‌ها یا جایگزینی یک ردیف از آن‌ها با آخال‌های دیگر نقص خطی به وجود می‌آید. از حذف یا جایگزینی یک ردیف از آخال‌ها در ساختار متناوب یک هدایت‌کننده موج ایجاد می‌شود. در مقالات مختلفی هدایت‌کننده موج بررسی و اثرات ریشه و حفره بر قابلیت عبور هدایت‌کننده مطالعه شده است.

کافسکی و همکارانش نشان دادند که قابلیت عبور هدایت‌کننده‌های کریستال فونونیک تابعی از فرکانس است [۱۱]. خلیف و همکارانش [۱۲] انتشار امواج آکوستیک را در هدایت‌کننده‌های خطی ایجادشده درون کریستال‌های فونونیک دوبعدی (فولاد در آب، هوا در آب) که دارای ریشه^{۱۳} است بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که اثر این نقص ساختاری، القای صفر عبور^{۱۴} در طیف عبور هدایت‌کننده است. همچنین خلیف و همکارانش [۱۳] نشان دادند که طیف عبور هدایت‌کننده‌ای که یک حفره را در برمی‌گیرد به قله‌های باریکی که به موده‌های ویژه حفره مربوط هستند محدود می‌شود. علاوه بر این، پژوهش‌های دیگری به بررسی اثرات نقص ساختاری بر طیف عبور هدایت‌کننده پرداخته‌اند [۱۴-۱۶].

اگر چه در مقالات مختلفی به بررسی اثرات نقص ساختاری بر طیف عبور هدایت‌کننده کریستال فونونیک پرداخته شده است، اما بر اساس بهترین اطلاع ما اثرات نقص ساختاری بر طیف عبور هدایت‌کننده با ساختار نامتجانس کریستال فونونیک تاکنون بررسی نشده است.

۲- مدل سازی و فرمول بندی

کریستال فونونیک مورد بررسی در این پژوهش دوبعدی است. استوانه‌ها (آخال‌ها) در راستای z قرار دارند و درون صفحه xy

⁶Microcavity

⁷Wave guide

⁸Perfect mirror

⁹Point defect

¹⁰Line defect

¹¹Demultiplexing

¹² Coupler

¹³Stub

¹⁴Zeros of transmission

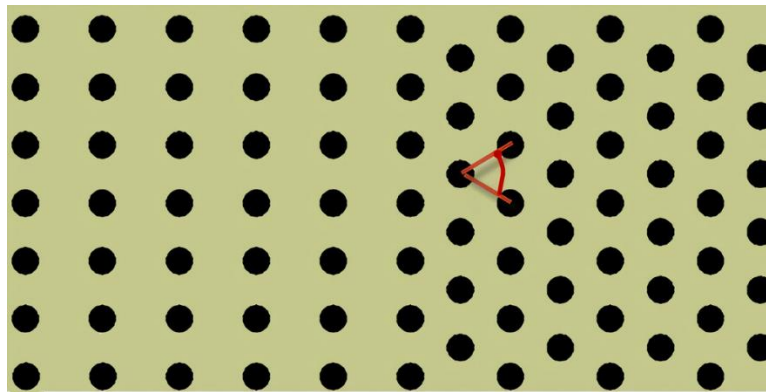
به‌طور متناوب تکرار می‌شوند. در غیاب نیروهای بدنی، معادلات موج الاستیک به‌صورت زیر است:

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

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

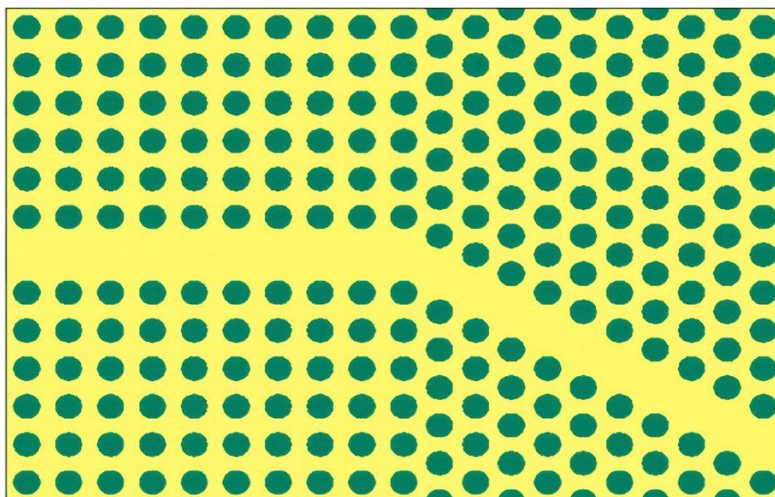
که $\rho = \rho(x, y)$ و $C_{ijmn}(x, y)$ به ترتیب چگالی و تانسور ضرایب الاستیک ساختار هستند. قرارداد جمع روی اندیس‌های تکراری فرض می‌شود. از آنجایی که انتشار امواج درون صفحه xy در نظر گرفته می‌شود جابجایی و تنش شبکه به z بستگی نخواهد داشت یعنی: $u_i = u_i(x, y, t)$ و $\sigma_{ij} = \sigma_{ij}(x, y, t)$. در اینجا انتشار مود ترکیبی^{۱۵} یا درون صفحه‌ای (جابجایی درون صفحه xy) بررسی می‌شود.

در این مقاله فرض می‌شود که آخال و زمینه ایزوتروپیک هستند. برای مطالعه ساختار مورد نظر، از روش تفاضل محدود جابجایی-مینا در حوزه زمان [۱۷] استفاده می‌شود. ساختار نامتجانس مورد بررسی این مقاله ساختاری است که از ترکیب دو آرایش مربعی و مثلثی ایجاد می‌شود. **Error! Reference source not found.** ساختار نامتجانس را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۱، سمت راست ساختار مورد نظر آرایش مثلثی و سمت چپ ساختار، آرایش مربعی است.



شکل ۱ ساختار نامتجانس مورد بررسی

۲. با ایجاد نقص خطی (حذف آخال‌ها) در ساختار فوق، هدایت‌کننده کریستال فونونیک با ساختار نامتجانس ایجاد می‌شود.



Error! Reference source not found. هدایت‌کننده کریستال فونونیک با ساختار نامتجانس

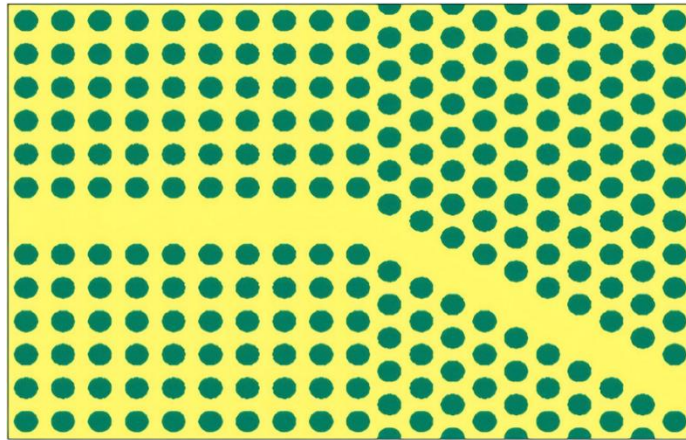
¹⁵Mixed mode

۳- نتایج

برای تحلیل هدایت کننده فوق، در راستای عمودی از شرط مرزی متناوب و در راستای افقی از PML^{۱۶} [۱۸] به عنوان شرط مرزی جاذب استفاده شده است. به منظور انجام تحلیل، سمت راست و چپ **Error! Reference source not found.** با ناحیه های همگنی از جنس زمینه احاطه می شود که نشان داده نشده اند.

در ناحیه همگن سمت چپ، موج طولی ایجاد می شود. موج طولی به صورت یک شرط اولیه اعمال می شود. یعنی پیش از شروع حلقه زمانی، مؤلفه افقی جابجایی نقاطی از ناحیه همگن سمت چپ برابر با مقدار یک تابع قرار داده می شود. تابع استفاده شده در اینجا حاصل ضرب یک موج کسینوسی در یک تابع گوسی^{۱۷} است [۱۹]. سلول واحد به یک شبکه ۶۰×۶۰ گسسته سازی شده و معادله حرکت در حین ۲۱۶ گام زمانی حل شده است. هر گام زمانی ۶ نانوثانیه طول می کشد. در ناحیه همگن سمت راست، از جابجایی در راستای x روی عرض هدایت کننده میانگین گیری می شود. از این میانگین تبدیل فوریه گرفته می شود. اندازه تبدیل فوریه به دست آمده به اندازه تبدیل فوریه مدل در حالتی که کریستال فونونیک حذف شده (تنها زمینه باقیمانده باشد) تقسیم می شود. بدین ترتیب ضریب عبور به دست می آید. برای تحلیل ساختار فوق و به دست آوردن نتایج یک کد به زبان فرترن^{۱۸} نوشته و اجرا شد. کد فوق جابجایی گره ها را بر اساس روش تفاضل محدود جابجایی-مبنا در حوزه زمان به روزرسانی می کند و از آن تبدیل فوریه می گیرد.

با ایجاد حفره در سازه، نقص به وجود می آید. منظور از حفره، حذف یک آخال از ساختار و جایگزینی آن با زمینه است. در حالتی که هدایت کننده کریستال فونونیک حفره را در برگیرد، محدوده فرکانسی عبور هدایت کننده به محدوده باریک مربوط به فرکانس ویژه آن حفره محدود می شود [۱۳]. شکل ۳ حالتی را نشان می دهد که هدایت کننده مورد بررسی یک حفره را در بر گرفته است. در شکل ۴ اثر این حفره بر طیف عبور هدایت کننده نمایش داده شده است.



شکل ۳ هدایت کننده مورد نظر در حالتی که یک حفره را در بر گرفته است

شکل ۴ نشان می دهد که هدایت کننده در حالتی که یک حفره را در برمی گیرد، موج الاستیک با فرکانس ۱۰۴ کیلوهرتز را هدایت می کند. در شکل ۴ طیف عبور هدایت کننده مورد نظر (بدون حفره) با خط چین نمایش داده شده است که نشان می دهد هدایت کننده در محدوده فرکانسی ۹۴ تا ۱۲۹ کیلوهرتز امواج الاستیک را هدایت می کند. به عبارت دیگر محدوده هدایت خم هدایت کننده با حضور حفره از محدوده فرکانسی ۹۴ تا ۱۲۹ کیلوهرتز به فرکانس ۱۰۴ کیلوهرتز محدود شده است. فرکانس ۱۰۴ کیلوهرتز به مود ویژه حفره مربوط می شود.

در صورتی که یک منبع موج از بیرون بر کریستال فونونیک که دارای حفره است اعمال شود، انرژی موج از طریق تونل

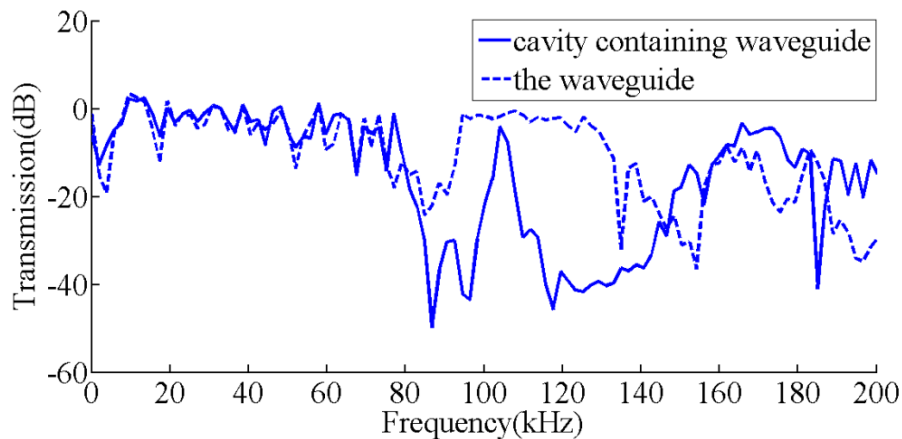
¹⁶Perfectly matched layer

¹⁷ Gaussian function

¹⁸ FORTRAN

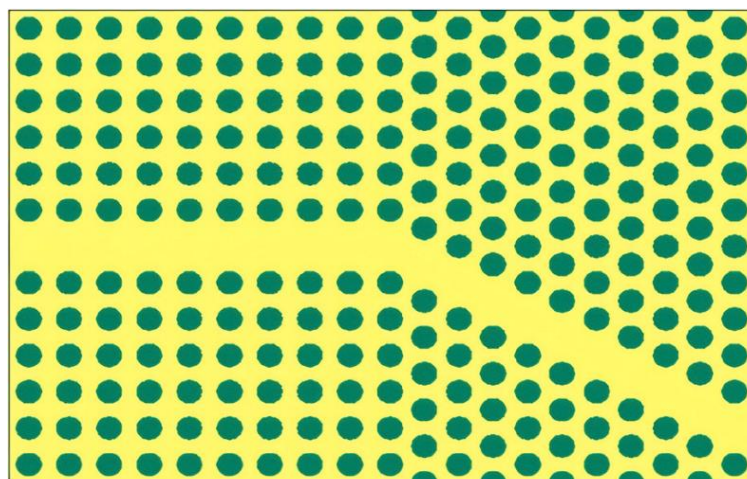
زدن^{۱۹} ممکن است به درون حفره انتقال یابد. این انتقال انرژی تنها برای فرکانس‌های بخصوصی (فرکانس‌های رزونانس حفره) به‌طور مؤثر رخ می‌دهد. در واقع در حالتی که هدایت‌کننده پیشنهادی یک حفره را در برمی‌گیرد، فرکانس رزونانس حفره ۱۰۴ کیلوهرتز است. در این حالت به کمک اثر تونل زدن، مود هدایت‌کننده و حفره کوپل شده و موج با فرکانس رزونانس حفره عبور داده می‌شود [۲۰].

به‌عبارت‌دیگر در صورتی که فرکانس موج اعمالی ۱۰۴ کیلوهرتز باشد، انرژی موج به درون حفره انتقال می‌یابد و نهایتاً موج از هدایت‌کننده عبور می‌کند. در نتیجه طیف عبور هدایت‌کننده پیشنهادی در حالتی که یک حفره را در برمی‌گیرد، در فرکانس ۱۰۴ کیلوهرتز دارای قله است.



شکل ۴ طیف عبور هدایت‌کننده مورد نظر در حالتی که حفره را در بردارد (خط پر) و طیف عبور هدایت‌کننده بدون نقص (خط چین).

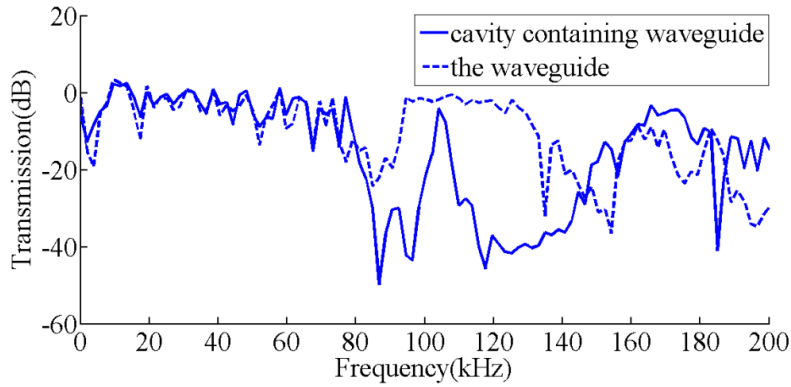
شکل ۵ هدایت‌کننده را در حالتی که یک ریشه در مجاورت آن قرار دارد نشان می‌دهد. اثر عمده ریشه، ایجاد صفرهای عبور است [۱۳]. اثر این ریشه بر طیف عبور هدایت‌کننده مورد بررسی در شکل ۶ نمایش داده شده است. همان‌طور که شکل ۶ نشان می‌دهد ریشه‌ای که در مجاورت هدایت‌کننده پیشنهادی قرار دارد، باعث تنزل طیف عبور در فرکانس‌های ۱۰۲ و ۱۲۳ کیلوهرتز می‌شود.



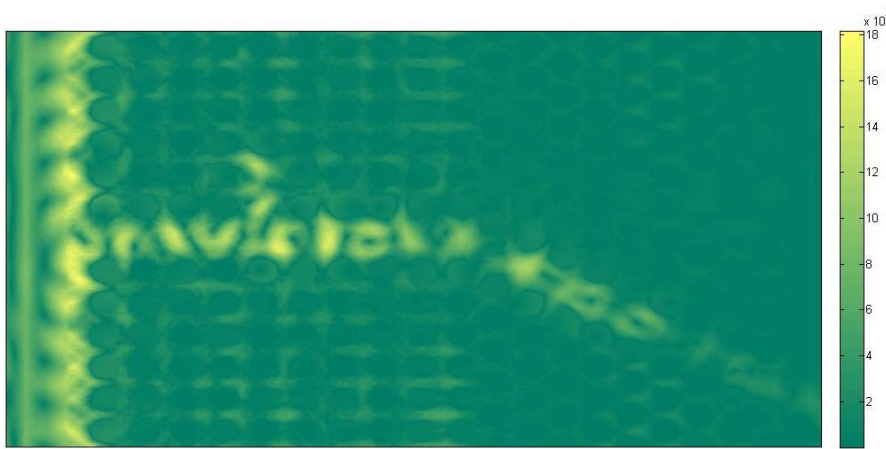
شکل ۵ هدایت‌کننده مورد نظر در حالتی که یک ریشه در مجاورت آن قرار گرفته است.

شکل ۷ الگوی جابجایی هدایت‌کننده مورد نظر را در حالتی که یک ریشه در مجاورت آن قرار دارد در گام زمانی ۲۰۰۰۰ نشان می‌دهد. فرکانس موج اعمالی ۱۲۳ کیلوهرتز است. این شکل نشان می‌دهد که جابجایی نقاط انتهایی (سمت راست) هدایت‌کننده ناچیز است. به‌عبارت‌دیگر موج با فرکانس ۱۲۳ کیلوهرتز از هدایت‌کننده عبور نمی‌کند.

¹⁹Tunneling

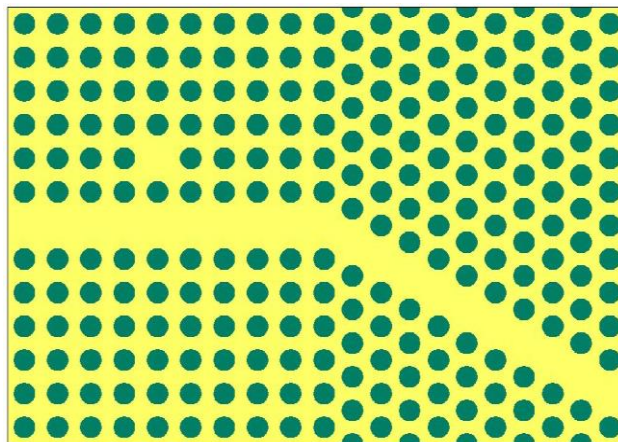


شکل ۶ اثر ریشه بر طیف عبور هدایت کننده. طیف عبور هدایت کننده در مجاورت ریشه (خط پر) و طیف عبور هدایت کننده بدون نقص (خط چین).

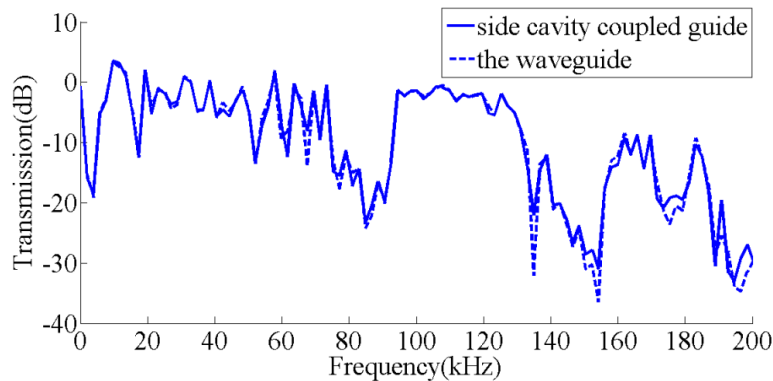


شکل ۷ الگوی جابجایی (برحسب متر) درون هدایت کننده در حالی که یک ریشه در مجاورت آن قرار دارد در گام زمانی ۲۰۰۰۰

شکل ۸ هدایت کننده را در حالتی که یک حفره در مجاورت آن قرار دارد نشان می دهد. انتظار می رود حفره ای که در مجاورت یک هدایت کننده قرار می گیرد باعث ایجاد صفرهایی در طیف عبور هدایت کننده شود. این صفرهای عبور در فرکانس های ویژه حفره رخ می دهند. در حالتی که عرض هدایت کننده زیاد باشد، اثر حفره کاهش قابلیت عبور هدایت کننده خواهد بود [۱۳]. اثر این حفره بر طیف عبور هدایت کننده در شکل ۹ نمایش داده شده است. شکل ۹ نشان می دهد که حفره اثر ناچیزی بر کاهش عبور هدایت کننده برای فرکانس ۱۰۲ کیلوهرتز داشته است. این اثر ناچیز حفره جانبی به دلیل عرض زیاد هدایت کننده است.



شکل ۸ هدایت کننده در حالتی که یک حفره در مجاورت آن قرار گرفته است



شکل ۹ اثر حفره جانبی بر طیف عبور هدایت کننده. طیف عبور هدایت کننده پیشنهادی در مجاورت حفره جانبی (خط پر) و طیف عبور هدایت کننده بدون نقص (خط چین).

۴- نتیجه گیری

در این مقاله اثرات نقص ساختاری بر یک هدایت کننده موج با ساختار نامتجانس کریستال فونونیک بررسی شده است. ساختار نامتجانس از ترکیب کریستال‌های فونونیک با آرایش مربعی و مثلثی به وجود می‌آید. در ساختار فوق آخال و زمینه به ترتیب فولاد و اپوکسی^{۲۰} است. در تحلیل ساختار فوق از روش تفاضل محدود جابجایی-مبنا در حوزه زمان استفاده شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که ریشه‌ای که عمود بر راستای هدایت کننده نامتجانس قرار دارد، باعث تنزل طیف عبور در فرکانس‌های ۱۰۲ و ۱۲۳ کیلوهرتز می‌شود. همچنین هدایت کننده در حالتی که یک حفره را در برمی‌گیرد، تنها فرکانس ۱۰۴ کیلوهرتز را هدایت می‌کند. حفره‌ای که در مجاورت هدایت کننده قرار می‌گیرد اثر ناچیزی بر کاهش عبور هدایت کننده برای فرکانس ۱۰۲ کیلوهرتز داشته است.

۵- مراجع

- [1] Chen CQ, Cui JZ, Duan HL, Feng X-Q, He LH, Hu GK, et al. Perspectives in mechanics of heterogeneous solids. *Acta Mechanica Solida Sinica*. 2011;24:1-26.
- [2] 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.
- [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 EN, Zdetsis A. Classical wave propagation in periodic structures. *Physical Review B*. 1989;40:1334.
- [5] Yang Xe, Zhong J, Xiang J. Optimization scheme for piezoelectric energy harvesting in line-defect for 2D starlike hole-type phononic crystals considering waveguides. *AIP Advances*. 2022;12:015012.
- [6] Zhang S, Liu J, Zhang H, Wang S. Tunable Low Frequency Band Gap and Waveguide of Phononic Crystal Plates with Different Filling Ratio. *Crystals*. 2021;11:828.
- [7] Jia Z, Chen Y, Yang H, Wang L. Designing phononic crystals with wide and robust band gaps. *Physical Review Applied*. 2018;9:044021.
- [8] Guo Y, Schubert M, Dekorsy T. Finite element analysis of surface modes in phononic crystal waveguides. *Journal of Applied Physics*. 2016;119:124302.

²⁰ Epoxy

- [9] Salman A, Kaya OA, Cicek A. Determination of concentration of ethanol in water by a linear waveguide in a 2-dimensional phononic crystal slab. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2014;208:50-5.
- [10] Khelif A, Choujaa A, Benchabane S, Djafari-Rouhani B, Laude V. Guiding and bending of acoustic waves in highly confined phononic crystal waveguides. *Applied physics letters*. 2004;84:4400-2.
- [11] Kafesaki M, Sigalas MM, Garcia N. Frequency modulation in the transmittivity of wave guides in elastic-wave band-gap materials. *Physical Review Letters*. 2000;85:4044.
- [12] Khelif A, Djafari-Rouhani B, Vasseur JO, Deymier PA, Lambin P, Dobrzynski L. Transmittivity through straight and stublike waveguides in a two-dimensional phononic crystal. *Physical Review B*. 2002;65:174308.
- [13] Khelif A, Djafari-Rouhani B, Vasseur JO, Deymier PA. Transmission and dispersion relations of perfect and defect-containing waveguide structures in phononic band gap materials. *Physical Review B*. 2003;68:024302.
- [14] Benchabane S, Khelif A, Choujaa A, Djafari-Rouhani B, Laude V. Interaction of waveguide and localized modes in a phononic crystal. *EPL (Europhysics Letters)*. 2005;71:570.
- [15] Wu T-T, Hsu J-C, Sun J-H. Phononic plate waves. *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*. 2011;58:2146-61.
- [16] Mohammadi S, Adibi A. On chip complex signal processing devices using coupled phononic crystal slab resonators and waveguides. *AIP Advances*. 2011;1:041903.
- [17] Bagherinouri M., 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.
- [18] Chew WC, Liu QH. Perfectly matched layers for elastodynamics: a new absorbing boundary condition. *Journal of computational acoustics*. 1996;4:341-59.
- [19] Lambin P, Khelif A, Vasseur JO, Dobrzynski L, Djafari-Rouhani B. Stopping of acoustic waves by sonic polymer-fluid composites. *Physical Review E*. 2001;63:066605.
- [20] Adibi A, Khelif A. *Phononic Crystals: Fundamentals and Applications*: Springer, 2016.