Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 53(Special Issue 6) (2021) 935-938
DOI: 10.22060/mej.2021.4343

Investigation of wave propagation in architected uniform triangle mass center fractal nano-bio-filters based on microtubules

H. Jafari, M. R. Hairi Yazdi [1] , M. M. Seyyed Fakhrabadi

School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

ABSTRACT: Microtubules, polymer tubes stretched from the cell nucleus to the cell membrane, are the major parts of the cytoskeleton that provide the mechanical rigidity, organization, and shape retention for the cytoplasm of eukaryotic cells. These structures play a key role in some cellular processes such as cell division, intracellular transport, and the internal organization of cells. In all the above applications, the network structure of microtubules is the main reason for the importance of in-depth studies of their mechanical properties. In this paper, the propagation of elastic waves in periodic networks based on two-dimensional fractal microtubules of fixed mass-center triangles is analyzed. This study begins with the selection of a suitable beam model for a microtubule and examines the dynamic behavior of microtubules by creating periodic structures. To obtain dispersion curves, finite element models of microtubules and their networks are developed, and the bandgap equations are calculated based on Bloch's theory. The results show that depending on the topology of the selected unit cells as well as the considered periods, it is possible to design a frequency gap in specific ranges for the application of low and high-frequency bio-filters. This study helps researchers control or absorb some unwanted vibrations using periodic structures, and thanks to their better biocompatibility, these networks can be used in next-generation nanomechanical devices such as implantable biosensors.

Review History:

Received: Dec. 08, 2020
Revised: Mar. 02, 2021
Accepted: Mar. 31, 2021
Available Online: Apr. 11, 2021

Keywords:

Microtubule
Architected structure
Bloch's theorem
Dispersion relation
Bandgap

1- Introduction

Nature has a unique complex of active bio-molecules developed during the centuries. Nowadays, our knowledge about nano-bio-structures is flourishing and with the development of new micro/nanofabrication techniques, the artificial synthesis of such bio-structures is becoming possible [1].

Microtubules are one of the very fascinating nano-bio-structures that are radially stretched from the cell nucleus to the cell membrane. They are the stiffest part of the cells tolerating the internal and external mechanical stresses. Hence, from the mechanical point of view, microtubules are the most important bio-polymer inside the cell. Koch et al. showed that it is possible to artificially synthesize microtubules and build small networks of them using optical tweezers [2]. The investigation of various mechanical behaviors of networked structures is an important research field these days [3, 4]. Hence, following the research by Koch et al. [2], in this work, we analyze wave propagation of architected uniform triangle mass center fractal nano-bio-filters based on microtubules using finite element method and Bloch's theorem [5]. The schematic representation of microtubules and their fractal structures studied in this work are shown in Fig. 1.

*Corresponding author's email: myazdi@ut.ac.ir

2- Methodology

As shown in Fig. 2, microtubule elements have three degrees of freedom on each node, i. e. longitudinal translation (u), transverse translation (v), and bending (φ) about the z-axis.

According to Newton's second law, the governing equation of the in-plane motion of a microtubule is written as Eq. (1).

$$[M]_{6\times6}\begin{bmatrix}\ddot{u}_1\\ \ddot{v}_1\\ \ddot{\phi}_1\\ \ddot{u}_2\\ \ddot{v}_2\\ \ddot{\phi}_2\end{bmatrix}+[K]_{6\times6}\begin{bmatrix}u_1\\ v_1\\ \phi_1\\ u_2\\ v_2\\ \phi_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}f_{1x}\\ f_{1y}\\ M_1\\ f_{2x}\\ f_{2y}\\ M_2\end{bmatrix} \tag{1}$$

where f_x, f_y, and M denote the axial force, transverse force and bending moment applied on each node. Also, $[M]_{6\times6}$ and $[K]_{6\times6}$ are the mass and stiffness matrices, respectively. The detailed formulations of these matrices [6] are presented in the full paper.

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

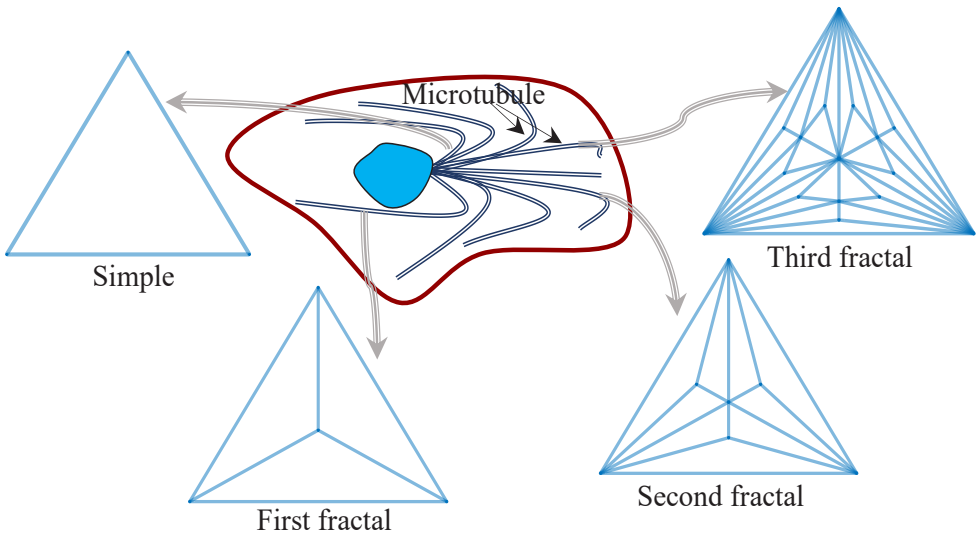


Fig. 1. Schematic representation of microtubules and their uniform triangle mass center fractal structures

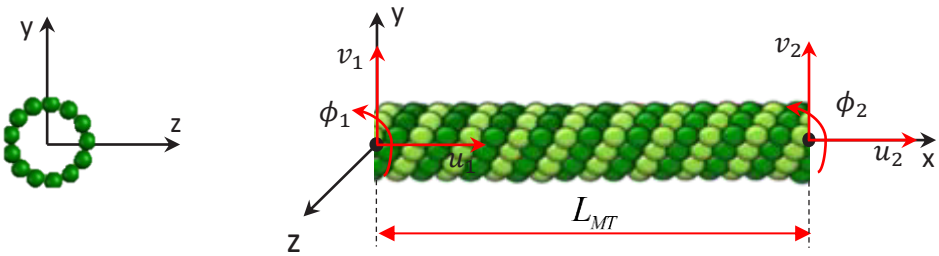


Fig. 2. Microtubule element and its degrees of freedom.

Via assembling the above elements into the unit cell of the networked structures in Fig. 1 and using the proper transformation matrices to transform the parameters from the local coordinate system to the global coordinate system, we can write the governing equation of the motion of the whole unit cell as Eq. (2).

$$[M]_{r\times r}\ddot{q}_r + [K]_{r\times r} q_r = f_r \tag{2}$$

where r is the number of degrees of freedom of the unit cell and $\ddot{q}_r$, q_r , and f_r denote the acceleration, displacement, and force on each node, respectively. Eq. (2) is solved considering Bloch's theorem [5] and the dispersion curves of the periodic structures are obtained in the irreducible Brillouin zone [3].

3- Results ad Discussion

In this section, the results of the work are presented in the form of dispersion curves within the normalized frequency range $0 \le \Omega \le 5$. The frequencies are normalized by the fundamental frequency of a doubly clamped microtubule beam. The geometries and mechanical properties of the microtubules are presented in Table 1 [4].

Fig. 3 shows the dispersion curves of a periodic structure with the unit cell of the simple triangle made of microtubules. The dispersion curves in Fig. 3 have a local resonance bandgap blocking the waves in the shown frequency range.

Changing the structure of the simple triangle to the triangular first fractal without the change in the mass center of the unit cell leads to the dispersion curves of Fig. 4. As shown in this figure, adding more microtubules to the unit cell induces an additional bandgap at the expense of decreasing the width of the local resonance bandgap.

The dispersion curves of the second and third triangular fractals of microtubules are presented and analyzed in the main text of the full paper. However, the collective bandgap areas of the periodic structures studied in this work are compared in Fig. 5. According to this figure, the second fractal possesses the largest collective bandgap area.

4- Conclusions

This paper presented wave-propagation characteristics of architected uniform triangle mass center fractal nano-

Table 1. The geometries and mechanical properties of the microtubules [4].

Geometries and mechanical properties	Numerical values
Length	1 μm
Inner diameter	16 nm
Outer diameter	25 nm
Elastic modulus	2 GPa
Poisson's ratio	0.3
Density	$1470\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}$

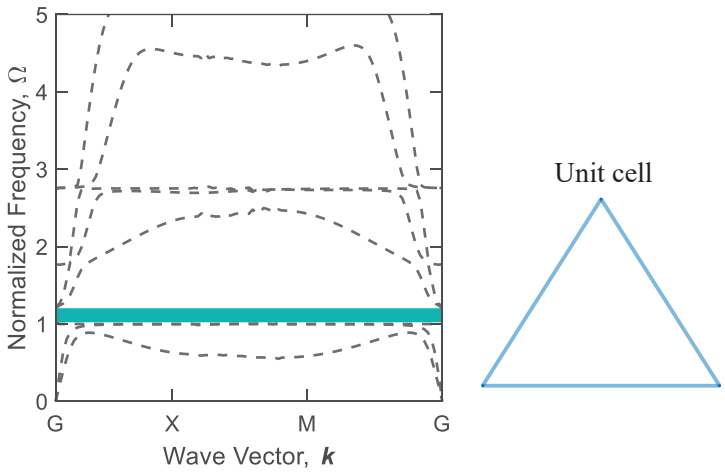


Fig. 3. Dispersion curves of a periodic structure with the unit cell of the simple triangle.

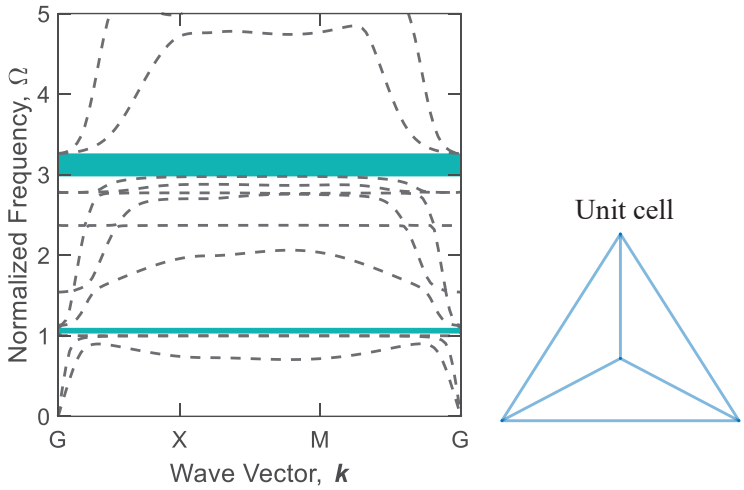


Fig. 4. Dispersion curves of a periodic structure with the unit cell of the first triangular fractal.

bio-filters based on microtubules. The zeroth, first, second, and third fractals were analyzed in the main manuscript and the results of the zeroth and first fractals were presented in this extended abstract. According to the results, the zeroth fractal has one bandgap but the first fractal has two. Also, the comparison of the collective bandgap areas revealed that the second fractal has the largest bandgap areas among all studied cases.

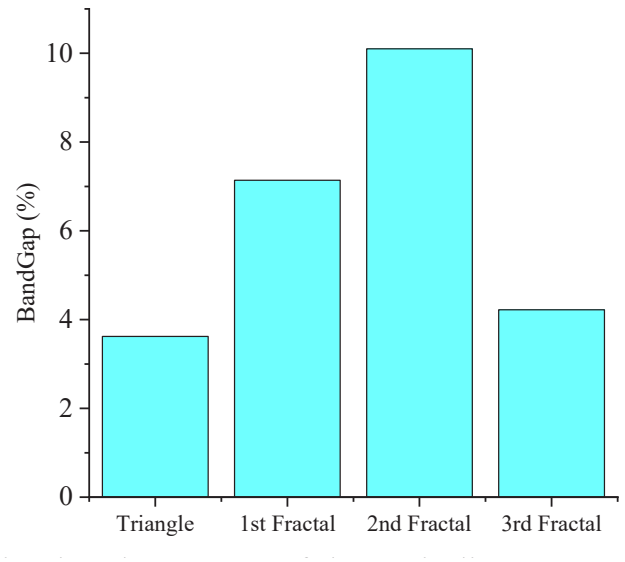


Fig. 5. Collective bandgap areas of the periodic structures studied in this work.

References

[1] N. Ahuja, K. Awad, M. Fiedler, P. Aswath, M. Brotto, V. Varanasi, Preliminary study of in-situ 3D bioprinted nano-silicate biopolymer scaffolds for muscle repair in VML defects, The FASEB Journal, 34(S1) (2020) 1-1.

[2] M.D. Koch, N. Schneider, P. Nick, A. Rohrbach, Single microtubules and small networks become significantly stiffer on short time-scales upon mechanical stimulation, Scientific Reports, 7(1) (2017).

[3] H. Jafari, M.H. Yazdi, M.M.S. Fakhrabadi, Damping effects on wave-propagation characteristics of microtubule-based bio-nano-metamaterials, International Journal of Mechanical Sciences, 184 (2020).

[4] H. Jafari, M.R.H. Yazdi, M.M.S. Fakhrabadi, Wave propagation in microtubule-based bio-nano-architected networks: A lesson from nature, International Journal of Mechanical Sciences, 164 (2019).

[5] F. Farzbod, M.J. Leamy, Analysis of Bloch's Method in Structures with Energy Dissipation, Journal of Vibration and Acoustics, 133(5) (2011).

[6] W. David V. Hutton Pullman, Fundamentals of Finite Element Analysis, The McGraw−Hill Companies 2004.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

H. Jafari, M. R. Hairi Yazdi , M. M. Seyyed Fakhrabadi, Investigation of wave propagation in architected uniform triangle mass center fractal nano-bio-filters based on microtubules, Amirkabir J. Mech. Eng., 53(Special Issue 6) (2021) 935-938.

DOI: 10.22060/mej.2021.4343

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۳، شماره ویژه ۶، سال ۱۴۰۰، صفحات ۳۹۳۹ تا ۳۹۵۲
DOI: 10.22060/mej.2021.4343

بررسی انتشار موج در نانوبیوفیلترهای معماری‌شده فراکتالی مثلث‌های مرکز جرم ثابت مبتنی بر میکروتوبول‌ها

حمید جعفری، محمدرضا حائری یزدی*، میر مسعود سید فخرآبادی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

خلاصه: میکروتوبولها، لوله‌های پلیمری متصل‌شده از هسته به غشا سلول، اصلی‌ترین بخش اسکلت سلولی هستند که سفتی مکانیکی، سازماندهی و حفظ شکل را برای سیتوپلاسم سلول‌های یوکاریوت فراهم می‌کنند. این ساختارها نقش اساسی در برخی فرآیندهای سلولی مانند تقسیم سلولی، انتقال درون سلولی و سازماندهی داخلی سلول‌ها ایفا می‌کنند. در کاربردهای ذکرشده، ساختار شبکه‌ای میکروتوبول‌ها دلیل اصلی اهمیت مطالعات عمیق‌تر خواص مکانیکی آنها هستند. در این مقاله به بررسی انتشار امواج الاستیک در شبکه‌های پریودیک مبتنی بر میکروتوبولهای فراکتالی مثلث‌های مرکز جرم ثابت جهت تجزیه و تحلیل خصوصیات دینامیکی آنها پرداخته شده‌است. این مطالعه با انتخاب یک مدل تیر مناسب برای یک میکروتوبول آغاز می‌شود و با ایجاد ساختارهای پریودیک از میکروتوبولها رفتار دینامیکی آنها مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای بدست‌آوردن منحنی های انتشار موج، مدل‌های المان محدود برای میکروتوبولها و شبکه های آنها به وجود آمده‌اند و معادلات گاف فونونی بر اساس تئوری بلاخ محاسبه می‌شوند. نتایج نشان می‌دهد بسته به توپولوژی سلول‌های واحد انتخاب‌شده و همچنین دوره‌های درنظرگرفته‌شده، امکان طراحی گاف فرکانسی در محدوده‌های خاص برای کاربرد فیلتر زیستی با فرکانس پایین و بالا وجود دارد. این مطالعه به محققان کمک می‌کند برخی از ارتعاشات ناخواسته را با استفاده از ساختارهای پریودیک معماری شده کنترل یا جذب کنند و به لطف زیست سازگاری بیشتر، می‌توان این شبکه‌ها را در ابزارهای نانوبیومکانیکی نسل بعدی مانند حسگرهای زیستی قابل کاشت استفاده‌کرد.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۱۸
بازنگری: ۱۳۹۹/۱۲/۱۲
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۱۱
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۱/۲۲

کلمات کلیدی:
میکروتوبول
انتشار امواج
ساختارهای معماری شده
گاف فرکانسی
مدول الاستیسیته

۱- مقدمه

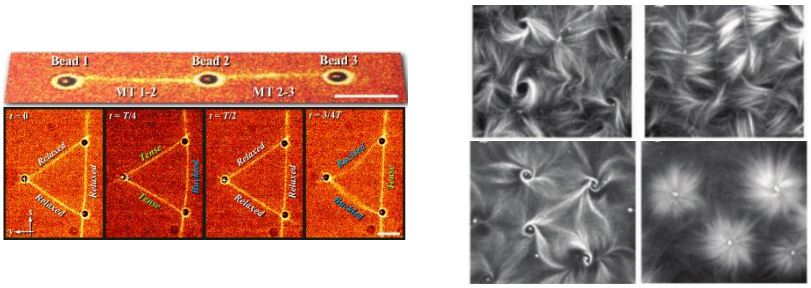
طبیعت دارای مجموعه بی‌نظیری از بیومولکول‌ها و ماکرومولکول‌ها است که در طول قرن‌های متمادی در حال فعالیت در کنار یکدیگر هستند و طی سالیان دراز با توجه به نیازهای طبیعی تکامل پیدا می‌کنند. از آنجایی که دانش و درک بشر پیرامون نانوبیوساختارها در حال افزایش بوده و با پیشرفت روش‌های ساخت در ابعاد نانو و میکرو امکان ایجاد این‌گونه ساختارها فراهم گردیده‌است [۱]، پی‌بردن به خواص و مشخصات شگفت انگیز سلول‌ها به یکی از اصلی‌ترین موضوعات پژوهشی در حوزه نانوبیوتکنولوژی تبدیل شده‌است [۲]. اگرچه انواع سلول‌های موجود در اطراف ما قابل شمارش نیستند اما همه آنها ویژگی‌های مشترکی مثل ساختمان سلولی، نحوه تکثیر[1]، حرکت‌های درون سلولی[2] و متابولیسم[3] دارند [۳]. این ویژگی‌ها و عملیات درون سلولی، ماهیتی بسیار پیچیده داشته و به شدت به هماهنگی تعداد محدودی ساختار زیرسلولی[4] متکی هستند. به طوری که دانش‌افزایی پیرامون آنها یک هدف اصلی به منظور شناسایی و معالجه بیماری‌ها یا تحقق مواد مصنوعی جدید الهام‌گرفته از طبیعت برای مقابله با تقاضای فزاینده فناوری‌های آینده است.

یکی از مهمترین مولفه‌هایی که بهتر است در این حوزه پژوهشی بر روی آن تمرکز کرد، اسکلت سلولی[5] است. اسکلت سلولی نقش‌هایی چون حفظ ساختمان اساسی سلول، ترمیم سلولی و همچنین تقسیم سلولی را برعهده دارد. در واقع آنها مستحکم‌ترین بخش سلول‌ها هستند که مقاومت

1 Replication
2 Locomotion
3 Metabolism
4 Sub-cellular components
5 Cytoskeleton

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: myazdi@ut.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.



(ب) (الف)

شکل ۱. مطالعات تجربی پیرامون میکروتوبول های شبکه‌ای (الف) الگوهای میکروتوبول‌ها در محیط آزمایشگاه [۱۲] (ب) میکروتوبول‌های متصل‌شده در محیط آزمایشگاه توسط انبرک‌های نوری به صورت خطی و مثلثی به منظور بررسی کرنش، کمانش و ارتعاشات در این سازه‌ها [۱۱]

Fig. 1. Experimental studies on networked microtubules, (a) Microtubule patterns in vitro [12], (b) Connected linear and triangular microtubules using optical tweezers to investigate strain, buckling, and vibration in such structures [11]

در برابر محرک‌های مکانیکی بیرونی و انعطاف پذیری در شرایط مختلف را فراهم می‌کنند. بررسی اسکلت سلولی منجر به درک این مسئله می‌شود که سلول‌ها به عنوان ماشین‌های خارق العاده در مقابل فشارهای مکانیکی چگونه واکنش نشان می‌دهند، تحمل می‌کنند یا پاسخ می‌دهند و چگونه نیروهای مکانیکی در داخل سلول انتقال پیدا می‌کند. فرضیه‌هایی برای این نوع انتقال ارائه شده‌است که از جمله آنها می‌توان به دو روش مستقیم [۴] (انتشار موج فیزیکی در داخل سلول که کمتر از یک ثانیه طول می‌کشد) و غیرمستقیم [۵] (تبدیل یک محرک فیزیکی به یک سیگنال شیمیایی که چند ثانیه تا یک دقیقه طول می‌کشد) اشاره کرد. از این رو، کشف معمای روش‌های انتقال نیروهای مکانیکی (استاتیکی و دینامیکی) داخل بدن و عوامل درگیر آن می‌تواند منجر به درک بهتر بیماری‌ها و وضعیت داخل سلولی شود. همچنین دریچه‌های امیدوارکننده‌ای را برای توسعه و ساخت مواد و سازه‌های هوشمند زیستی در آینده نزدیک باز می‌کند. اسکلت سلولی شبکه پیچیده‌ای از پروتئین‌های بهم پیوسته یعنی میکروتوبول ها[1] ، رشته‌های میانی[2] و رشته‌های اکتین[3] است. دینامیک داخلی اسکلت سلولی به گونه‌ای است که به منظور رفع نیازهای متنوع درون سلولی قادر به رشد سریع سلول و یا تقسیم سلولی می‌باشد. از این رو خواص مکانیکی مربوط به اجزای داخلی سلول بسیار حائز اهمیت است. از دید مکانیکی، هر کدام از بخش‌های زیرسلولی دارای نقش جداگانه‌ای هستند که میکروتوبول‌ها بیشترین نقش را در استحکام بخشی و واکنش‌های مکانیکی دارند.

میکروتوبول‌ها لوله‌های توخالی با قطر نانومتری و طول میکرومتری متشکل از پروتئین‌های توبولین[4] هستند که یک هترودیمر قطبی[5] ساخته‌شده از دو پروتئین تقریباً کروی است. با توجه به موضوعات اشاره‌شده پیرامون میکروتوبول‌ها و اهمیت به سزای آنها در بدن، تحقیقات تجربی مبتنی بر میکروسکوپ‌های نیروی اتمی و انبرک‌های نوری [۶، ۷] ، شبیه‌سازی‌های اتمی با استفاده از دینامیک مولکولی اتمی و درشت‌دانه [۸] و مدل‌سازی‌های مکانیکی پیوسته با استفاده از تئوری‌ها و مدل‌های مختلف الاستیکی مانند تیرها و پوسته‌های استوانه‌ای [۹] فراوانی بر روی آنها صورت گرفته‌است. مطالعه‌ای که ژیانگ و میگویید [۱۰] در سال ۲۰۱۴ به منظور مقایسه تئوری‌ها و روش‌های مختلف استفاده‌شده انجام دادند تئوری مناسب را برای مدل‌سازی میکروتوبول‌ها مشخص کرد. با توجه به نتایج پژوهش صورت‌گرفته در نسبت‌های مختلف طول به قطر میکروتوبول می‌توان دریافت که استفاده از مدل متداول تیر اویلر–برنولی به منظور مدل‌سازی میکروتوبول‌ها مناسب بوده و دقت کافی دارد. کخ و همکاران [۱۱]، توانستند شبکه‌های خطی و مثلثی کوچکی از میکروتوبول‌ها را با استفاده از انبرک‌های نوری بسازند و نشان دهند که شبکه‌های میکروتوبول می‌توانند خواص دینامیکی مختلفی از قبیل سختی بیشتر و فرکانس طبیعی متفاوت نسبت به تک میکروتوبول داشته باشند. در شکل ۱ نمونه‌هایی از تصاویر میکروسکوپی ساختارهای میکروتوبولی ارائه شده‌است. همانطور که مشاهده می‌شود، میکروتوبول‌ها چه به شکل طبیعی و چه به شکل مصنوعی در آزمایشگاه می‌توانند اشکال

1 Microtubules
2 Intermediate filaments
3 Actin filaments
4 Tubulin
5 Polar heterodimer

مختلفی به خود بگیرند و این موضوع بیانگر امکان ایجاد ساختارهای مختلفی از آنها به منظور یافتن خواص منحصر به فردشان است. بنابراین با توجه به مفاهیم دینامیک سازه، آرایش میکروتوبول‌ها در یک مجموعه جهت ایجاد توپولوژی‌های مشخص می‌تواند رویکردی موثر و الهام‌گرفته از طبیعت برای طراحی ساختارهای معماری شده‌باشد.

از طرفی همان‌طور که اشاره شد، ساختارهای معماری‌شده پریودیک در ایجاد خواص مؤثر الاستیکی و دینامیکی استفاده می‌شوند. رایلی[1] [۱۳] انتشار امواج در یک محیط متشکل از یک ساختار متناوب با ارتعاشات یک‌بعدی با جرم‌های نقطه‌ای (بار) که به‌صورت یکنواخت در امتداد طول پیوسته بود را در نظر گرفت. پژوهش‌های رایلی با توجه به قوانین براگ[2] بعدها از طریق تلاش‌های محققان در فیزیک حالت‌جامد و سایر شاخه‌های فیزیک پدیده‌ای را به‌عنوان گاف فرکانسی[3] در بلورهای فونونیک حاصل کرد. کاربردهای آکوستیک عملی سازه‌های پریودیک، با بهره‌گیری از گاف‌های فرکانسی، در اواخر دهه ۱۹۲۰ در مطالعات استوارت نیز ظاهر شدند [۱۴]. این پژوهشگر فیلترهای آکوستیک را برای کنترل انتقال امواج از طریق ساختارهای پریودیک طراحی کرد. چنین طرح‌هایی در ساخت فیلترهای آکوستیک محدود برای میرایی اختلالات فشار پایین در حلقه‌های هیدرولیکی استفاده‌شده‌اند [۱۵]. این مطالعات امکان استفاده از اصول طراحی ساختارهای پریودیک به منظور رسیدن به فیلترهای پایین‌گذر، بالاگذر و پهنای باند عملکردی مناسب را فراهم می‌سازد. ویژگی‌های فیلترکردن سیستم‌های پریودیک نیز به‌طور گسترده در صنعت ارتباطات از راه دور، ازجمله در گیرنده‌های تلفن‌های همراه و ارتباطات بی‌سیم استفاده می‌شوند [۱۶]. بر اساس خواص مواد معماری‌شده در انتشار امواج مکانیکی می‌توان از این مواد در موج‌بری الاستیک یا آکوستیک [۱۷]، تمرکز امواج [۱۸]، کاهش ارتعاشات [۱۹]، حسگر فرکانسی [۲۰]، عایق آکوستیک [۲۱]، تقویت آکوستیک [۲۲]، کوپلینگ موج‌های اپتیکی و مکانیکی در ادوات فوتونیک [۲۳]، کاهش رسانایی گرمایی در نیمه‌هادی‌ها [۲۴] و اخیراً در کنترل جریان استفاده کرد [۲۵]. همه این کاربردها به نوعی به انتخاب یا طراحی هوشمندانه سلول واحد ساختار معماری‌شده برمی‌گردد که باعث به‌وجودآمدن رفتارهای فونونی ویژه مانند هدایت عامدانه موج با فرکانس مشخص در یک جهت معین و یا پیش‌گیری از انتشار موج در جهت دیگر می‌شود.

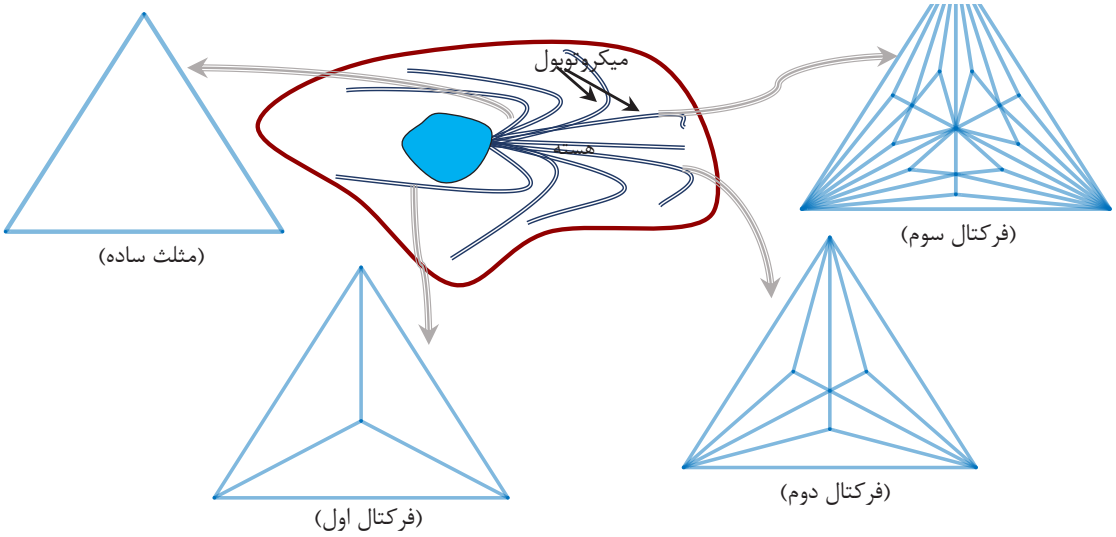
1 Rayleigh
2 Bragg's Law
3 Band Gap

در سال ۲۰۰۶، فانی و همکاران تحول جدیدی در بررسی انتشار امواج در ساختارهای معماری شده ایجاد کردند که مطالعات ایشان [۲۶, ۲۷] منبع بسیاری از پژوهش‌های بعدی شد. آنها به بررسی استفاده از مفاهیم فیزیکی کریستال‌های فونونی در انتشار امواج ساختارهای معماری‌شده پرداخته و معادلات المان محدود حاکم را با استفاده از تئوری بلاخ[4] به معادلات انتشار موج تبدیل کردند. همچنین نمودارهای پراکندگی[5] چند ساختار اصلی را به ازای تغییر نسبت طول به عرض معرفی کرده و مفاهیم اولیه این ساختارها را ارائه دادند. پس از ایشان مطالعات زیادی پیرامون انتشار موج در ساختارهای معماری‌شده مختلف از جمله ساختارهای تارعنکبوتی [۲۸]، فرکتال های ترتیبی خودتکرارشونده[6] [۲۹]، اوریگامی[7] ها [۳۰] و شش ضلعی‌های خودتکرارشونده[8] [۳۱] انجام شدند که همه این مدل‌ها از روش‌های المان محدود معرفی شده در مقاله فانی استفاده کردند. در پژوهش حاضر نیز جهت فرمول‌بندی مساله و صحت‌سنجی نتایج حاصل از مقاله فانی و همکاران [۲۷] استفاده شده تا بررسی انتشار امواج ساختارهای معماری‌شده مبتنی بر میکرتوبول‌ها صورت پذیرد. یکی از مهم ترین نوآوری‌های پژوهش حاضر نسبت به پژوهش‌های پیشین، بررسی اثر هندسه فراکتالی در انتشار امواج در ساختارهای میکروتوبولی است. به دلیل اهمیت ساختارهای فراکتالی و ویژگی‌های مهندسی که در این مواد یافت می‌شود، پژوهش حاضر، این نوع هندسه‌ها را در میکروتوبول‌ها بررسی نموده‌است. انتشار موج در ساختار فرکتالی مطالعه‌شده در این مقاله پیش از این در پژوهش دیگری بررسی نشده‌است و نتایج حاصل را علاوه بر میکروتوبول‌ها می‌توان به طور کیفی برای سایر مواد نیز استفاده کرد.

۲- مدل‌سازی المان محدود

همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود میکروتوبول‌ها درون سلول یوکاریوتی قرار دارند و با اتصال به هسته و دیواره‌ها باعث استحکام سلول می‌شوند. المان‌های تک میکروتوبول از سلول انتخاب شده و همانند شکل ۲ ساختارهای معماری‌شده را ایجاد می‌کنند. ابتدا با کنار هم قرارگرفتن سه میکروتوبول، سلول واحد[9] مثلث ساده بدست آمده‌است. سپس با کنار هم قرارگرفتن تعداد زیادی از میکروتوبول‌ها سلول‌های واحد فرکتالی حاصل

4 Bloch's theorem
5 Disspersion curves
6 fractal-inspired self-similar
7 Origami
8 Honeycomb self-similar hierarchy
9 Unit cell, is the most basic and least volume consuming repeating structure of any solid.



شکل ۲. تک میکروتوبول‌ها درون سلول یوکاریوتیک و درون ساختارهای مثلثی معماری‌شده فرکتالی

Fig. 2. Single microtubules inside eukaryotic cells and architected triangular fractal structures.

می شوند که در این شکل به صورت فرکتال‌های اول، دوم و سوم نشان داده شده‌اند. در نهایت با چیدن سلول‌های واحد در راستای افقی (X) و عمودی (Y)، ساختار دوبعدی معماری شده مبتنی بر میکروتوبول‌ها حاصل می‌گردد.

همان‌طور که اشاره شد مطالعات تجربی و محاسباتی فراوانی پیرامون خواص مکانیکی تک میکروتوبول‌ها انجام شده‌است. بر اساس نتایج حاصله از بررسی‌های تجربی و محاسبات مختلف، تئوری تیر اویلر–برنولی به منظور مدل‌سازی میکروتوبول‌ها تحت بار استاتیکی و دینامیکی مناسب ارزیابی می‌شود [۱۰]. در پژوهش حاضر برای مدل‌سازی المان محدود ساختارها از المان قاب استفاده شده است. دلیل این انتخاب این است که این المان، امکان درنظرگرفتن درجات آزادی طولی، عرضی و چرخشی را دارا بوده و از این حیث قادر است توصیف قابل قبولی از رفتار یک میکروتوبول ارائه دهد. بعد از بدست‌آوردن معادلات مربوط به تک المان میکروتوبول، معادلات مربوط به سلول واحد بدست آمده و امکان بررسی انتشار امواج در این ساختارها فراهم می‌گردد. با استفاده از تئوری بلاخ معادلات کاهش یافته و روابط انتشار امواج حاصل می‌شود.

۲- ۱- معادلات المان محدود

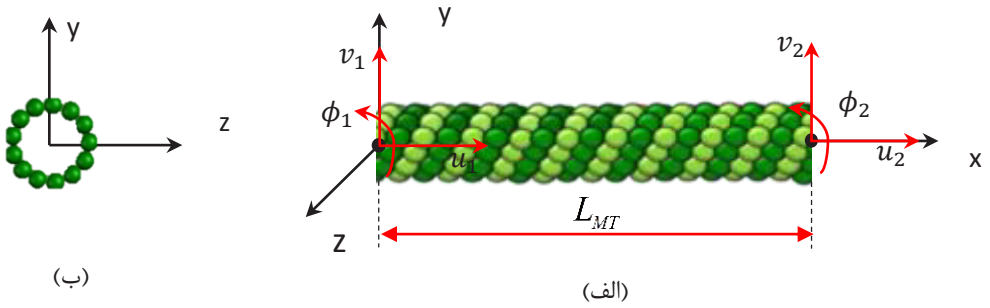
همانطور که در شکل ۳ قابل مشاهده است المان میکروتوبول در هر گره دارای درجات آزادی u، v و ϕ مربوط به جابجایی طولی، عرضی و خمش حول محور است.

با استفاده از قانون دوم نیوتن، معادله حرکت صفحه‌ای برای میکروتوبول به صورت رابطه (۱) بدست می‌آید:

$$[M]_{6\times6}\begin{bmatrix}\ddot{u}_1\\ \ddot{v}_1\\ \ddot{\phi}_1\\ \ddot{u}_2\\ \ddot{v}_2\\ \ddot{\phi}_2\end{bmatrix}+[K]_{6\times6}\begin{bmatrix}u_1\\ v_1\\ \phi_1\\ u_2\\ v_2\\ \phi_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}f_{1x}\\ f_{1y}\\ M_1\\ f_{2x}\\ f_{2y}\\ M_2\end{bmatrix} \quad (۱)$$

که f_x، f_y و M به ترتیب نشان‌دهنده نیروی گره در راستای طولی، عرضی و ممان خمشی حول محور عمود بر صفحه هستند. طبق معادله حرکت بدست‌آمده برای المان قاب [۳۲]، می توان نوشت:

$$[M]=\frac{\rho_{MT}A_{MT}L_{MT}}{420}\begin{bmatrix}210 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 156 & 22L_{MT} & 0 & 54 & -13L_{MT}\\ 0 & 22L_{MT} & 4L_{MT}^2 & 0 & 13L_{MT} & -3L_{MT}^2\\ 0 & 0 & 0 & 210 & 0 & 0\\ 0 & 54 & 13L_{MT} & 0 & 156 & -22L_{MT}\\ 0 & -13L_{MT} & -3L_{MT}^2 & 0 & -22L_{MT} & 4L_{MT}^2\end{bmatrix} \quad (۲)$$



شکل ۳. المان میکروتوبول (الف) درجات آزادی صفحه‌ای (ب) سطح مقطع میکروتوبول

Fig. 3. Microtubule element, (a) In-plane degrees of freedom, (b) Microtubule cross-section.

همچنین ماتریس سختی $[K]$ با استفاده از رابطه (۳) تعریف می‌گردد:

$$[K]=\frac{8E_{MT}I_z}{L_{MT}^3}\begin{bmatrix} \frac{AL_{MT}^2}{8I_z} & 0 & 0 & -\frac{AL_{MT}^2}{8I_z} & 0 & 0 \\ 0 & 12 & 3L_{MT} & 0 & -12 & 3L_{MT} \\ 0 & 3L_{MT} & L_{MT}^2 & 0 & -3L_{MT} & \frac{L_{MT}^2}{2} \\ -\frac{AL_{MT}^2}{8I_z} & 0 & 0 & \frac{AL_{MT}^2}{8I_z} & 0 & 0 \\ 0 & -12 & -3L_{MT} & 0 & 12 & -3L_{MT} \\ 0 & 3L_{MT} & \frac{L_{MT}^2}{2} & 0 & -3L_{MT} & L_{MT}^2 \end{bmatrix} \quad (۳)$$

که ρ_{MT}، E_{MT}، A_{MT} و I_z به ترتیب چگالی میکروتوبول، مدول الاستیسیته میکروتوبول، سطح مقطع و ممان اینرسی میکروتوبول می باشند. سطح مقطع و ممان اینرسی میکروتوبول به صورت رابطه (۴) تعریف می‌گردند:

$$A_{MT}=\frac{\pi}{4}\left(D_{out}^2-D_{in}^2\right)$$
$$I_z=\frac{\pi}{64}\left(D_{out}^4-D_{in}^4\right) \quad (۴)$$

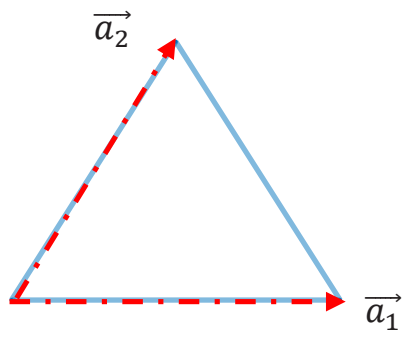
که D_{in} و D_{out} به ترتیب قطر بیرونی و قطر داخلی میکروتوبول هستند. با جاگذاری روابط (۲) و (۳) در رابطه (۱) معادله حرکت مربوط به المان تک میکروتوبول به صورت معادله (۵) حاصل می‌گردد.

$$\frac{\rho_{MT}A_{MT}L_{MT}}{420}\begin{bmatrix} 210 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 156 & 22L_{MT} & 0 & 54 & -13L_{MT} \\ 0 & 22L_{MT} & 4L_{MT}^2 & 0 & 13L_{MT} & -3L_{MT}^2 \\ 0 & 0 & 0 & 210 & 0 & 0 \\ 0 & 54 & 13L_{MT} & 0 & 156 & -22L_{MT} \\ 0 & -13L_{MT} & -3L_{MT}^2 & 0 & -22L_{MT} & 4L_{MT}^2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{v}_1 \\ \ddot{\phi}_1 \\ \ddot{u}_2 \\ \ddot{v}_2 \\ \ddot{\phi}_2 \end{bmatrix}$$
$$+\frac{8E_{MT}I_z}{L_{MT}^3}\begin{bmatrix} \frac{AL_{MT}^2}{8I_z} & 0 & 0 & -\frac{AL_{MT}^2}{8I_z} & 0 & 0 \\ 0 & 12 & 3L_{MT} & 0 & -12 & 3L_{MT} \\ 0 & 3L_{MT} & L_{MT}^2 & 0 & -3L_{MT} & \frac{L_{MT}^2}{2} \\ -\frac{AL_{MT}^2}{8I_z} & 0 & 0 & \frac{AL_{MT}^2}{8I_z} & 0 & 0 \\ 0 & -12 & -3L_{MT} & 0 & 12 & -3L_{MT} \\ 0 & 3L_{MT} & \frac{L_{MT}^2}{2} & 0 & -3L_{MT} & L_{MT}^2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ \phi_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ \phi_2 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} f_{1x} \\ f_{1y} \\ M_1 \\ f_{2x} \\ f_{2y} \\ M_2 \end{bmatrix} \quad (۵)$$

با قرارگرفتن المان موردنظر درون سلول واحد مثلثی یا فرکتالی و استفاده از ماتریس انتقال برای انتقال از مختصات محلی به مختصات کلی، معادله حرکت سلول واحد به صورت رابطه (۶) نوشته می‌شود:

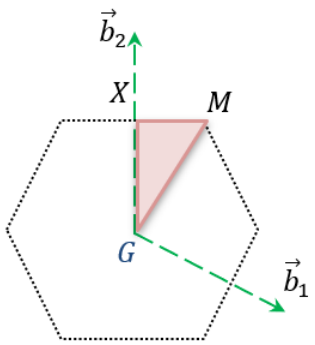
$$[M]_{r\times r}\ddot{q}_r+[K]_{r\times r}q_r=f_r \quad (۶)$$

که در آن r نشان‌دهنده تعداد درجات آزادی سلول واحد است که وابسته به تعداد میکروتوبول‌های موجود در هر سلول واحد و تعداد المان‌های درنظرگرفته‌شده در هر میکروتوبول است. همچنین بردارهای $\ddot{q}_r$، q_r و f_r به ترتیب معرف شتاب، جابجایی و نیرو در هر گره هستند.



شکل ۴. سلول واحد مثلثی و بردارهای مستقیم

Fig. 4. Triangular unit cell and its direct vectors.



شکل ۵. ناحیه بریلویین اول ساختار مثلثی

Fig. 5. First Brillouin zone of triangular structure.

۲- ۲- تئوری بلاخ

بر اساس تئوری بلاخ [۳۳]، تغییر مکان هر نقطه از هر سلول واحد درون ساختار پریودیک تابعی از تغییر مکان در نقطه متناظر آن در سلول واحد مرجع است. همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده‌است، ساختار پریودیک دوبعدی در فضای واقعی با استفاده از بردارهای مستقیم $\vec{a_1}$ و $\vec{a_2}$ به ترتیب در جهت x و y و شمارنده های m_1 و m_2 تعریف می‌گردد.

رابطه (۷) تئوری بلاخ را به بیان ریاضی نشان می‌دهد به گونه‌ای که موقیت هر نقطه ($\vec{R}$) از سلول واحد خاص که به تعداد m_1 در جهت $\vec{a_1}$ و به تعداد m_2 در جهت $\vec{a_2}$ پیش رفته است، با استفاده از موقعیت نقطه متناظر در سلول واحد مرجع ($\vec{R}_i$) قابل تعریف است.

$$\begin{aligned} &\vec{R}=\vec{R}_i+m_1\vec{a}_1+m_2\vec{a}_2 \\ &\Rightarrow q(\vec{R})=q(\vec{R}_i)e^{\vec{\kappa}.(m_1\vec{a}_1+m_2\vec{a}_2)} \\ &\xrightarrow{\begin{cases}k_1=\vec{\kappa}.\vec{a}_1\\ k_2=\vec{\kappa}.\vec{a}_2\end{cases}} q(\vec{R})=q(\vec{R}_i)e^{(k_1m_1+k_2m_2)} \end{aligned} \qquad (۷)$$

که $\vec{\kappa}$ بردار موج است و k_1 و k_2 به ترتیب اجزای بردار موج در جهت $\vec{a_1}$ و $\vec{a_2}$ می باشند. به منظور تحلیل انتشار امواج ، مشخص‌کردن محدوده بریلویین[1] یا یافتن حدود بردار موج (k_1 و k_2)، بایستی فضای حقیقی به فضای معکوس[2] تبدیل شود. اجزای بردار موج k_1 و k_2 درون ناحیه اول بریلویین تعریف می‌گردند. ناحیه بریلیون و بردارهای وارون برای ساختار مثلثی مطابق شکل ۵ هستند [۳۴] به طوری که $\vec{b_1}$ و $\vec{b_2}$ بردارهای وارون را در فضای وارون نشان می‌دهند.

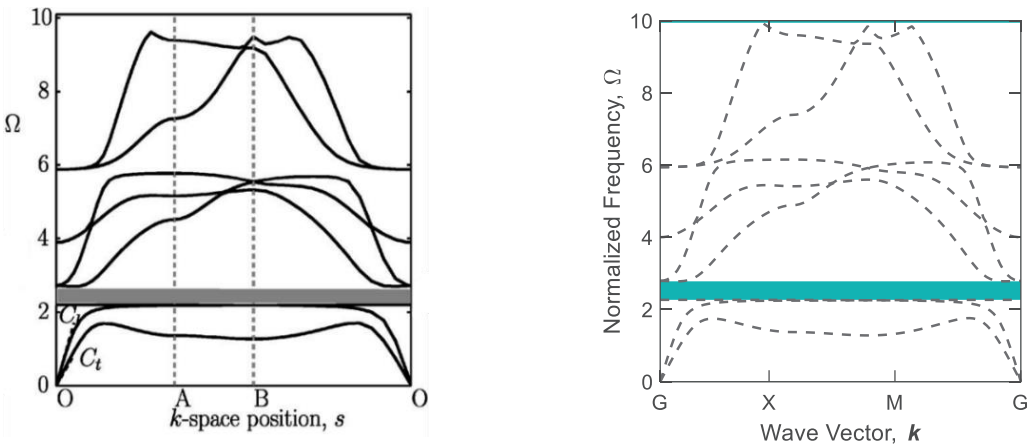
۲- ۳- معادله انتشار موج در ساختار معماری‌شده

به منظور حل معادله حرکت بدست آمده (معادله(۶)) برای سلول واحد، جابجایی و شتاب ساختار معماری‌شده به صورت هارمونیک فرض می‌شود. همانطور که پیشتر اشاره شد، معادلات انتشار امواج برای سلول واحد مرجع محاسبه می‌گردد و نتایج آن برای بقیه ساختار معماری‌شده با استفاده از تئوری بلاخ تعمیم داده می‌شود. با فرض شرایط مرزی پریودیک و فرضیات این تئوری، معادله انتشار موج ساختار معماری‌شده به صورت رابطه (۸) بدست می‌آید:

$$\left(\mathrm{k}(k_1,k_2)-\omega^2\mathrm{m}(k_1,k_2)\right)q_{r-n}=0 \qquad (۸)$$

که $\mathrm{k}(k_1,k_2)$ و $\mathrm{m}(k_1,k_2)$ به ترتیب ماتریس سختی و جرم سلول واحد مرجع با شرایط مرزی پریودیک هستند و q_{r-n} بردار جابجایی تقلیل‌یافته با شرایط مرزی پریودیک است. معادله (۸)، یک مساله مقدار ویژه است که مقدار فرکانس ویژه (ω) با تغییرات k_1 و k_2 بر روی محدوده بریلویین تقلیل ناپذیر محاسبه می‌شود.

1 Brillouin zone
2 Reciprocal space



(الف) نتایج مقاله حاضر

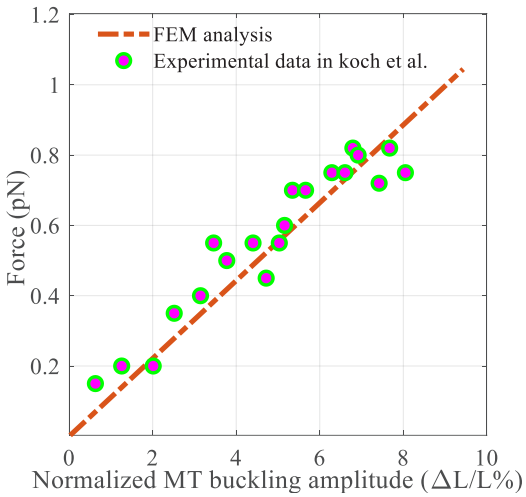
(ب) نتایج فانی و همکاران [۲۷]

شکل ۷. صحت‌سنجی فرمول‌بندی و نتایج معادلات انتشار امواج با مطالعات پیشین.

Fig. 7. Validation of formulation and results of wave-propagation equations using previous studies. (a) Results of current work, (b) Results of Phani et al. [27].

۳- نتایج و بحث

این بخش منحنی‌های انتشار موج حاصل از حل عددی معادله (۸) را ارائه می‌دهد. مقادیر ویژه این معادله برای بردارهای مختلف موج (k_1, k_2) محاسبه شده و به صورت ساختارهای گاف فرکانسی ارائه می‌شوند. با حل معادله مقدار ویژه، مقادیر ویژه به دست آمده و به ازای تغییرات مقادیر برادارهای موج رسم می‌شوند. مقادیر ویژه (Ω) با استفاده از فرکانس طبیعی اول میکروتوبول تحت شرایط دو سر ثابت که از رابطه $\omega = 22.4\sqrt{\frac{E_{MT} I_z}{\rho_{MT} A_{MT} L_{MT}^4}}$ بدست می‌آید، بی‌بعد شده‌اند [۲۷]. ابتدا مدل اویلر-برنولی با استفاده از نتایج تجربی کمانش تک میکروتوبول که توسط کوخ و همکاران [۱۱] ارائه شده‌است مقایسه می‌شود و همچنین نتایج معادلات انتشار موج با نتایج مقاله فانی و همکاران [۲۷] صحت‌سنجی شده و سپس به بررسی انتشار موج ساختارهای فرکتالی پرداخته خواهد شد.



شکل ۱. نیروی کمانش بدست آمده از المان محدود و نتایج تجربی [۱۱]

Fig. 1. Buckling force obtained from finite element method and experimental results.

۳- ۱- صحت‌سنجی معادلات

به منظور صحت‌سنج معادلات المان محدود بدست‌آمده و مدل تیر اویلر برنولی برای میکروتوبول‌ها، نیروی کمانش در المان تک میکروتوبول بدست آمد و همانطور که در شکل ۶، ملاحظه می شود، تعدادی نتایج تجربی ارائه‌شده در مقاله کوخ و همکاران [۱۱] به همراه نتایج المان محدود بدست‌آمده در نمودار ارائه گردیده‌است. نتایج محاسبات المان محدود همخوانی مناسبی با نتایج تجربی دارد. از این رو، می توان نتیجه گرفت معادلات المان محدود و مدل تیر اویلر برنولی برای میکروتوبول به درستی فرض شده‌است.

برای صحت‌سنجی معادلات انتشار امواج نیز، ساختار مثلثی موجود در مقاله فانی و همکاران [۲۷] انتخاب شد. با درنظرگرفتن مقادیر ارائه شده در این مقاله و بی‌بعدسازی نتایج، نمودار انتشار موج ساختار مثلثی به صورت شکل ۷ حاصل گردید. در قسمت (الف) شکل ۷، نتایج بدست‌آمده از معادله المان محدود که با استفاده از کدنویسی در نرم‌افزار متلب بدست آمده، ارائه

جدول ۱. خواص هندسی و مکانیکی میکروتوبول [۳۵]

Table 1. Geometrical and mechanical properties of microtubules.

خواص هندسی و مکانیکی	مقادیر
طول میکروتوبول	۱ μm
قطر داخلی	۱۶ nm
قطر خارجی	۲۵ nm
مدول الاستیسیته	۲ GPa
ضریب پواسون	۰/۳
چگالی	$۱۴۷۰\frac{kg}{m^3}$

شده‌است. همچنین قسمت (ب) مربوط به نتایج مقاله فانی و همکاران است. این نتایج برای ساختار معماری‌شده مثلثی با نسبت طول به عرض ۵۰ محاسبه گردیده‌است. همانطور که مشاهده می‌شود همخوانی بسیار خوبی مابین نتایج حاصل از معادلات انتشار موج مقاله حاضر و نتایج مرجع انتخاب‌شده وجود دارد. ناحیه‌ای در نمودارهای انتشار موج رنگ شده‌است که به آن ناحیه گاف فرکانسی[1] گفته می‌شود. این موضوع به این معنی است که ساختار معماری‌شده مثلثی با مشخصات درنظرگرفته شده، ارتعاشات در بازه فرکانسی بی‌بعد حدود ۲ تا ۲/۲ را فیلتر می‌کند. یکی از اهداف اصلی در تحلیل چنین ساختارهایی افزایش عرض ناحیه گاف فرکانسی با تغییرات مهندسی شده در ساختار سلول واحد است. گاف فرکانسی به ناحیه‌ای نسبت داده می‌شود که ساختار فرکانس‌های موجود در این ناحیه را از خود عبور نمی‌دهد و به آن ناحیه فیلتر موج نیز گفته می‌شود. دلیل ایجاد گاف فرکانسی می‌تواند به دو حالت تشدید موضعی[2] و گاف فرکانسی نوع براگ[3] در نظر گرفته شود. نوع تشدید موضعی به گونه‌ای است که فرکانس عبوری از سازه با فرکانس طبیعی یکی از المان‌های درون ساختار برابر شده و از این رو با تشدید یکی از المان ها، ناحیه گاف فرکانسی ایجاد می گردد. این در گاف فرکانسی نوع براگ متفاوت است و به نسبت طول موج ارتعاش عبوری و اندازه سلول واحد بستگی دارد [۲۹].

۳- ۲- نتایج تحلیل انتشار امواج

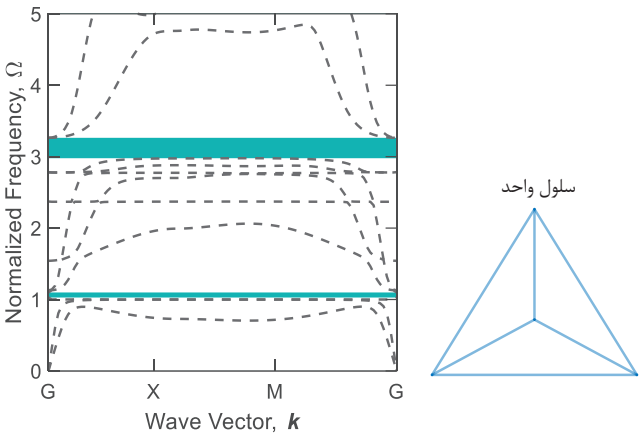
خصوصیات مواد و هندسه میکروتوبول‌های درنظرگرفته‌شده در این مقاله در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

در این بخش از مقاله به بررسی انتشار امواج ساختارهای معماری‌شده فراکتالی مثلث‌های مرکز جرم ثابت مبتنی بر میکروتوبول پرداخته می‌شود. بازه فرکانسی بررسی‌شده برای انتشار امواج در بازه بی‌بعدشده $0 \le \Omega \le 5$ انجام شده‌است. به این معنی که فرکانس‌های کاری موجود در این بازه بررسی شده و امکان فیلتر این فرکانس‌ها توسط ساختارهای معرفی‌شده مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل ۸ نمودار پراکندگی مربوط به مثلث ساده با خواص مربوط به میکروتوبول را به همراه سلول واحد ساختار نشان می‌دهد.

نمودار انتشار موج ساختار معماری‌شده مثلث ساده مبتنی بر میکروتوبول دارای یک بازه گاف فرکانسی تشدید موضعی است که نشان‌دهنده فیلتر ارتعاشات با فرکانس‌های موجود در این بازه کاری است. با تغییر ساختار مثلث ساده و بدون تغییر مرکز جرم ساختار، و اضافه‌کردن سه میکروتوبول به ساختار مثلث ساده، فرکتال اول حاصل می گردد (شکل ۹). همان‌طور که در نمودار مربوط به ساختار فرکتال اول قابل مشاهده است اضافه‌کردن میکروتوبول‌ها امکان به‌وجودآمدن نواحی جدید گاف فرکانسی را به ساختار معماری‌شده مثلثی داده‌است. این ساختار ناحیه قبلی گاف فرکانسی را که در محدود فرکانس بی بعد یک بود را نازک‌تر کرده اما در عین حال در محدوده فرکانس بی‌بعد سه توانسته است ناحیه عریضی از گاف فرکانسی ایجاد کند که می‌تواند محدوده عملکردی ساختار معماری‌شده جدید باشد.

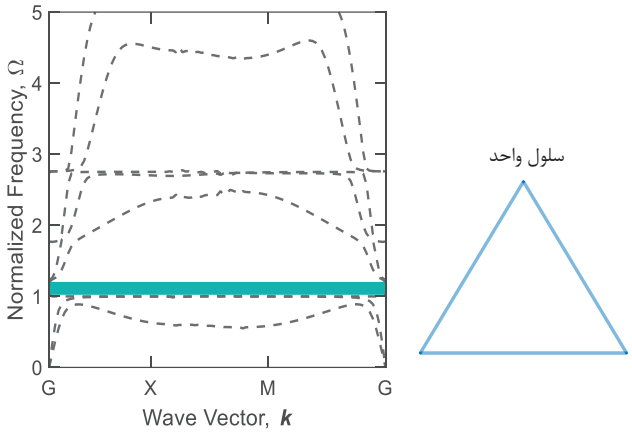
شکل ۱۰ سلول واحد و نمودار انتشار موج ساختار معماری‌شده فرکتال دوم مثلث را نشان می‌دهد. مطابق شکل، این ساختار نواحی گاف فرکانسی بیشتری نسبت به ساختارهای معرفی‌شده قبلی دارد که نشان از عملکرد بهتر این ساختار نسبت به آنها است. نواحی گاف فرکانسی این

1 Bandgap
2 Local resonance Bandgap
3 Bragg type Bandgap



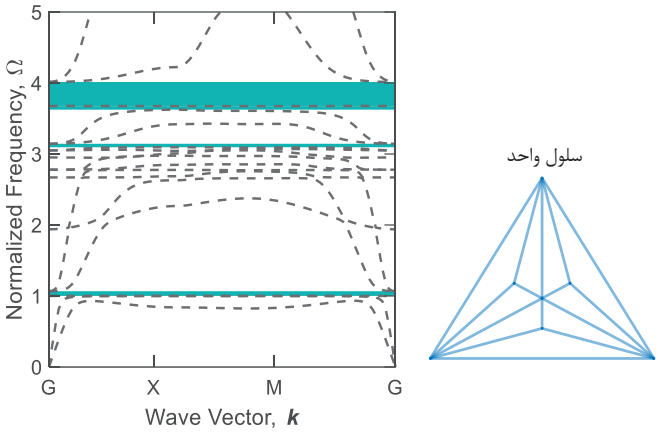
شکل ۹. نمودار انتشار موج فرکتال اول مبتنی بر میکروتوبول به همراه سلول واحد مربوطه

Fig. 9. Dispersion curves of the first fractal based on microtubules with its corresponding unit cell.



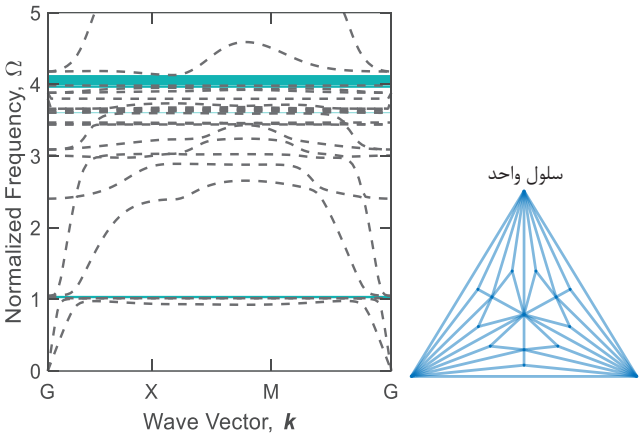
شکل ۸. نمودار انتشار موج مثلث ساده مبتنی بر میکروتوبول به همراه سلول واحد مربوطه.

Fig. 8. Dispersion curves of a simple triangle based on microtubules with its corresponding unit cell.



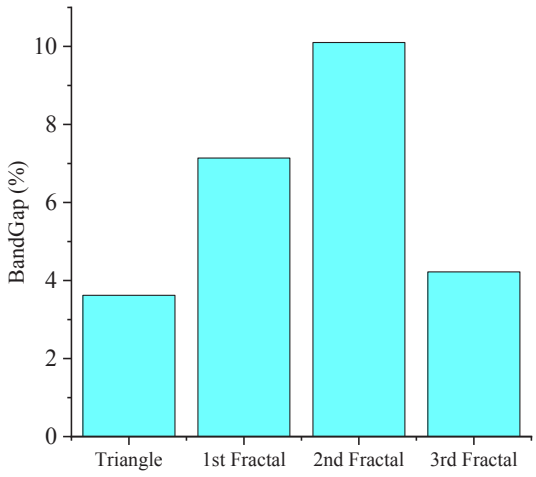
شکل ۱۰. نمودار انتشار موج فرکتال دوم مبتنی بر میکروتوبول به همراه سلول واحد مربوطه.

Fig. 10. Dispersion curves of the second fractal based on microtubules with its corresponding unit cell.



شکل ۱۱. نمودار انتشار موج فرکتال سوم مبتنی بر میکروتوبول به همراه سلول واحد مربوطه.

Fig. 11. Dispersion curves of the third fractal based on microtubules with its corresponding unit cell.



شکل ۱۲. درصد گاف فرکانسی به ازای فرکتال های مختلف

Fig. 12. Percentages of bandgaps vs. different fractals.

ساختار شامل $1.000 \le \Omega \le 1.067$، $3.095 \le \Omega \le 3.144$ و $3.624 \le \Omega \le 4.014$ است که دارای ناحیه گاف فرکانسی عریضی است. اضافه‌کردن تعدادی میکروتوبول به ساختار معماری‌شده، بدون اینکه مرکز جرم آن تغییری داشته باشد به ساختار این امکان را داده است که بتواند امواج آکوستیک در ناحیه فرکانسی بیشتری را فیلتر کند.

با افزودن حالت فرکتالی بیشتر به ساختار مثلثی، فرکتال سوم حاصل می‌شود. همانطور که در شکل ۱۱ قابل مشاهده است، این فرکتال نواحی گاف فرکانسی کمتری نسبت به سایر فرکتال‌ها دارد و طبیعتا عملکرد فیلتری ضعیف‌تری را نیز در بازه $0 \le \Omega \le 5$ از خود نشان می‌دهد. به عبارت دیگر این ساختار گذردهی بالایی در کاربردهای مکانیکی خواهد داشت.

همان‌طور که مشاهده شد افزودن میکروتوبول به ساختار مثلثی و ایجاد فرکتال‌های متنوع در ساختار معماری‌شده تا فرکتال دوم برای عملکرد فیلتری ساختار مفید بوده و باعث بهبود عملکرد ساختار می‌شود. اما با افزایش تعداد آن به فرکتال سوم، این موضوع برعکس شده و باعث کم‌شدن بازه‌های گاف فرکانسی می‌گردد. موضوع جالبی که در تمامی این ساختارها ثابت بوده‌است، گاف فرکانسی حدود فرکانس بی بعد یک است. بازه این گاف فرکانسی با تغییر فرکتال کاهش یافته ولی همواره این گاف فرکانسی در ساختار باقی مانده‌است. این موضوع به این دلیل است که این گاف فرکانسی ناشی از پدیده تشدید موضعی ساختار مثلثی است که در ناحیه بیرونی تمامی فرکتال‌ها ثابت بوده و تغییر نکرده‌است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ساختار مثلثی همواره دارای گاف فرکانسی است. به منظور مقایسه بهتر گاف فرکانسی ایجاد شده و نواحی فیلتر ارتعاش امواج الاستیک توسط ساختارهای معماری‌شده مبتنی بر میکروتوبول‌ها، نموداری در شکل ۱۲ برای درصد تجمیعی گاف‌های فرکانسی در بازه فرکانسی $0 \le \Omega \le 5$ ارائه شده‌است. همان‌طور که در این نمودار نیز قابل مشاهده است، فرکتال دوم ناحیه بیشتری را فیلتر کرده و درصد گاف فرکانسی آن در این ناحیه بیشتر از سایر ساختارهای بررسی‌شده است.

۴- نتیجه‌گیری

شبکه‌های میکروتوبولی نقش مهمی در بسیاری از فرایندهای سلولی اعم از انتقال سیگنال مکانیکی از داخل به خارج و بالعکس، پاسخ سلول به محرک‌های خارجی و سازماندهی اجزای داخلی در سیتوپلاسم بازی می‌کند. بنابراین بررسی رفتار مکانیکی آنها از اهمیت به سزایی برخوردار است. بنابراین، در این مقاله به بررسی انتشار موج در ساختارهای معماری‌شده با فرکتال‌های مثلثی مرکز جرم ثابت مبتنی بر میکروتوبول‌ها پرداخته شد. به این منظور تئوری بلاخ برای بیان میدان جابجایی همه سلول‌های واحد به عنوان تابعی

از میدان جابجایی سلول واحد مرجع به کار گرفته شد. سپس منحنی‌های انتشار امواج و نواحی گاف فرکانسی برای این ساختارها ارائه گردید. نتایج نشان داد که با افزودن فرکتال به ساختار مثلثی و تغییر تعداد میکروتوبول‌ها امکان ایجادساختار معماری شده با گاف فرکانسی بیشتر فراهم می‌شود. با بررسی نتایج حاصل می‌توان دریافت که ساختار مثلثی ساده یک گاف فرکانسی، ساختار فرکتالی مرتبه اول دو گاف فرکانسی و ساختار فرکتالی مرتبه دوم سه ناحیه گاف فرکانسی دارند. همین افزایش تعداد نواحی گاف فرکانسی با افزایش فرکتال تا مرتبه دوم باعث افزایش محدوده پیش‌گیری از انتشار موج از زیر چهار درصد در ساختار مثلثی ساده تا نزدیک به ده درصد در ساختار فرکتالی مرتبه دوم می‌گردد. همچنین با توجه به نتایج بدست‌آمده، انتشار امواج در این ساختارها به شدت به توپولوژی سلول‌های واحد وابسته هستند و این مساله قابلیت طراحی و ساخت سلول‌های واحد را نشان می‌دهد به طوری که شبکه نهایی به عنوان فیلتر زیستی در محدوده فرکانس‌های پایین و یا بالا عمل می‌کند. بنابراین، طراح نه تنها می‌تواند پیکربندی سلول واحد را به صورت هدفمند طراحی کند بلکه دارای اختیار کنترل قابلیت آن‌ها برای رسیدن به محدوده فیلتری مورد نظر است. به منظور کسب دانش و اطلاعات بیشتر در مورد رفتار انتشار امواج در ساختارهای مشابه، پیشنهاد می‌شود ساختارهای مربعی و شش ضلعی نیز با این ترکیب مورد بررسی قرار گرفته، انتشار امواج ترتیبی آنها محاسبه و میزان تغییرات گاف فرکانسی آنها تحلیل گردد.

۵- فهرست علائم

علائم انگلیسی

A	مساحت، m^2
a	بردار مستقیم
b	بردار معکوس
D	قطر، m
E	مدول الاستیسیته، N / m^2
I	ممان اینرسی m^4
$[K]$	ماتریس سختی
k	عدد موج
L	طول، m
$[M]$	ماتریس جرم
n	درجات آزادی کاهش یافته
q	بردار جابجایی
r	تعداد درجات آزادی سلول واحد
u	جابجایی طولی، m
v	جابجایی عرضی، m
x	محور طولی
y	محور عرضی
z	محور عمود بر صفحه

علائم یونانی

ρ	چگالی، kg / m^3
ϕ	ممان خمشی حول محور عمود بر صفحه
$\vec{\kappa}$	بردار موج
ω	فرکانس طبیعی میکروتوبول دو سر گیردار

زیرنویس

MT	میکروتوبول
Out	بیرونی
In	داخلی
z	حول محور عمود بر صفحه

منابع

[1] [1] N. Ahuja, K. Awad, M. Fiedler, P. Aswath, M. Brotto, V. Varanasi, Preliminary study of in-situ 3D bioprinted nano-silicate biopolymer scaffolds for muscle repair in VML defects, The FASEB Journal, 34(S1) (2020) 1-1.

[2] J.P. Giraldo, H. Wu, G.M. Newkirk, S. Kruss, Nanobiotechnology approaches for engineering smart plant sensors, Nat Nanotechnol, 14(6) (2019) 541-553.

[3] J.C. Montesinos, A. Abuzeineh, A. Kopf, A. Juanes-Garcia, K. Ötvös, J. Petrášek, M. Sixt, E. Benková, Phytohormone cytokinin guides microtubule dynamics during cell progression from proliferative to differentiated stage, The EMBO Journal, 39(17) (2020).

[4] B. Geiger, J.P. Spatz, A.D. Bershadsky, Environmental sensing through focal adhesions, Nature Reviews Molecular Cell Biology, 10(1) (2009) 21-33.

[5] P. Isermann, J. Lammerding, Nuclear Mechanics and Mechanotransduction in Health and Disease, Current Biology, 23(24) (2013) R1113-R1121.

[6] M. Kikumoto, M. Kurachi, V. Tosa, H. Tashiro, Flexural Rigidity of Individual Microtubules Measured by a Buckling Force with Optical Traps, Biophysical Journal, 90(5) (2006) 1687-1696.

[7] M. Kurachi, M. Hoshi, H. Tashiro, Buckling of a single microtubule by optical trapping forces: Direct measurement of microtubule rigidity, Cell Motility and the Cytoskeleton, 30(3) (1995) 221-228.

[8] J.A. Tuszynski, T. Luchko, E.J. Carpenter, E. Crawford, Results of Molecular Dynamics Computations of the Structural and Electrostatic Properties of Tubulin and Their Consequences for Microtubules, Journal of Computational and Theoretical Nanoscience, 1(4) (2004) 392-397.

[9] A. Ghorbanpour Arani, M. Abdollahian, M.H. Jalaei, Vibration of bioliquid-filled microtubules embedded in cytoplasm including surface effects using modified couple stress theory, Journal of Theoretical Biology, 367 (2015) 29-38.

[10] J. Zhang, S.A. Meguid, Buckling of microtubules: An insight by molecular and continuum mechanics, Applied Physics Letters, 105(17) (2014).

[11] M.D. Koch, N. Schneider, P. Nick, A. Rohrbach, Single microtubules and small networks become significantly stiffer on short time-scales upon mechanical stimulation, Scientific Reports, 7(1) (2017).

[12] T. Surrey, Nédélec, F., Leibler, S., Karsenti, E., Physical Properties Determining Self-Organization of Motors and Microtubules, Science, 292(5519) (2001) 1167-1171.

[13] L. Rayleigh, XVII. On the maintenance of vibrations by forces of double frequency, and on the propagation of waves through a medium endowed with a periodic structure, The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 24(147) (2009) 145-159.

[14] G.W. Stewart, Acoustic Wave Filters, Physical Review, 20(6) (1922) 528-551.

[15] M.P. Paidoussis, High-pass acoustic filters for hydraulic loops, Journal of Sound and Vibration, 14(4) (1971) 433-437.

[16] R.A. Johnson, Mechanical Filters. CRC Handbook of Electrical Filters., CRC, 1997.

[17] A. Khelif, A. Choujaa, S. Benchabane, B. Djafari-Rouhani, V. Laude, Guiding and bending of acoustic waves in highly confined phononic crystal waveguides, Applied Physics Letters, 84(22) (2004) 4400-4402.

[18] S. Yang, J.H. Page, Z. Liu, M.L. Cowan, C.T. Chan, P. Sheng, Focusing of Sound in a 3D Phononic Crystal, Physical Review Letters, 93(2) (2004).

[19] M.I. Hussein, Hulbert, G.M., Scott, R.A.: , Dispersive elastodynamics of 1D banded materials and structures: design, Journal of Sound and Vibration, 307 (2007) 865–893.

[20] S. Mohammadi, A.A. Eftekhar, W.D. Hunt, A. Adibi, High-Q micromechanical resonators in a two-dimensional phononic crystal slab, Applied Physics Letters, 94(5) (2009).

[21] D. Torrent, J. Sánchez-Dehesa, Acoustic cloaking in two dimensions: a feasible approach, New Journal of Physics, 10(6) (2008).

[22] X.-F. Li, X. Ni, L. Feng, M.-H. Lu, C. He, Y.-F. Chen, Tunable Unidirectional Sound Propagation through a Sonic-Crystal-Based Acoustic Diode, Physical Review Letters, 106(8) (2011).

[23] M. Eichenfield, J. Chan, R.M. Camacho, K.J. Vahala, O. Painter, Optomechanical crystals, Nature, 462(7269) (2009) 78-82.

[24] B.L. Davis, M.I. Hussein, Nanophononic Metamaterial: Thermal Conductivity Reduction by Local Resonance, Physical Review Letters, 112(5) (2014).

[25] M.I. Hussein, S. Biringen, O.R. Bilal, A. Kucala, Flow stabilization by subsurface phonons, Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 471(2177) (2015).

[26] M.I. Hussein, Dynamics of Lattice Materials, John Wiley & Sons Inc, 2017.

[27] A.S. Phani, J. Woodhouse, N.A. Fleck, Wave propagation in two-dimensional periodic lattices, The Journal of the Acoustical Society of America, 119(4) (2006) 1995-2005.

[28] M. Miniaci, A. Krushynska, A.B. Movchan, F. Bosia, N.M. Pugno, Spider web-inspired acoustic metamaterials,

Applied Physics Letters, 109(7) (2016).

[29] Q.J. Lim, P. Wang, S.J.A. Koh, E.H. Khoo, K. Bertoldi, Wave propagation in fractal-inspired self-similar beam lattices, Applied Physics Letters, 107(22) (2015).

[30] E. Boatti, N. Vasios, K. Bertoldi, Origami Metamaterials for Tunable Thermal Expansion, Advanced Materials, 29(26) (2017).

[31] D. Mousanezhad, S. Babaee, R. Ghosh, E. Mahdi, K. Bertoldi, A. Vaziri, Honeycomb phononic crystals with self-similar hierarchy, Physical Review B, 92(10) (2015).

[32] W. David V. Hutton Pullman, Fundamentals of Finite Element Analysis, The McGraw−Hill Companies 2004.

[33] F. Farzbod, M.J. Leamy, Analysis of Bloch's Method in Structures with Energy Dissipation, Journal of Vibration and Acoustics, 133(5) (2011).

[34] H. Jafari, M.H. Yazdi, M.M.S. Fakhrabadi, Damping effects on wave-propagation characteristics of microtubule-based bio-nano-metamaterials, International Journal of Mechanical Sciences, 184 (2020).

[35] H. Jafari, M.R.H. Yazdi, M.M.S. Fakhrabadi, Wave propagation in microtubule-based bio-nano-architected networks: A lesson from nature, International Journal of Mechanical Sciences, 164 (2019).

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

H. Jafari, M. R. Hairi Yazdi, M. M. Investigation of wave propagation in architected uniform triangle mass center fractal nano-bio-filters based on microtubules, Amirkabir J. Mech Eng., 53(Special Issue 6)(2021) 3939-3952.

DOI: 10.22060/mej.2021.4343

این صفحه عمداً خالی است