

بررسی انتشار موج در نانویوفیلترهای معماری شده فراکتالی مثلث‌های مرکز جرم ثابت مبتنی بر میکروتوبول‌ها

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

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

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 فرانسی
مدول الاستیسیته

خلاصه: میکروتوبولها، لوله‌های پلیمری متصل شده 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 ذکر شده، ساختار شبکه‌ای میکروتوبول‌ها دلیل اصلی اهمیت مطالعات عمیق‌تر خواص مکانیکی آنها هستند. در این مقاله به بررسی انتشار امواج الاستیک در شبکه‌های پر یودیک مبتنی بر میکروتوبول‌های فراکتالی مثلث‌های مرکز جرم ثابت جهت تجزیه و تحلیل خصوصیات دینامیکی آنها پرداخته شده است. این مطالعه با انتخاب یک مدل تیر مناسب برای یک میکروتوبول آغاز می‌شود و با ایجاد ساختارهای پر یودیک از میکروتوبولها رفتار دینامیکی آنها مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای بدست آوردن منحنی‌های انتشار موج، مدل‌های المان محدود برای میکروتوبولها و شبکه‌های آنها به وجود آمده‌اند و معادلات گاف فونونی بر اساس تئوری بلاخ محاسبه می‌شوند. نتایج نشان می‌دهد بسته به توپولوژی سلول‌های واحد انتخاب شده و همچنین دوره‌های در نظر گرفته شده، امکان طراحی گاف فرانسی 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 پر یودیک معماری شده کنترل یا جذب کنند و به لطف زیست سازگاری بیشتر، می‌توان این شبکه‌ها را در ابزارهای نانویومکانیکی نسل بعدی مانند حسگرهای زیستی قابل کاشت استفاده کرد.

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 نانویوساختارها در حال افزایش بوده و با پیشرفت روش‌های ساخت در ابعاد نانو و میکرو امکان ایجاد این گونه ساختارها فراهم گردیده است [۱]، پی‌بردن به خواص و مشخصات شگفت‌انگیز سلول‌ها به یکی از اصلی‌ترین موضوعات پژوهشی در حوزه نانویوتکنولوژی تبدیل شده است [۲]. اگرچه انواع سلول‌های موجود در اطراف ما قابل شمارش نیستند اما همه آنها ویژگی‌های مشترکی مثل ساختمان سلولی، نحوه

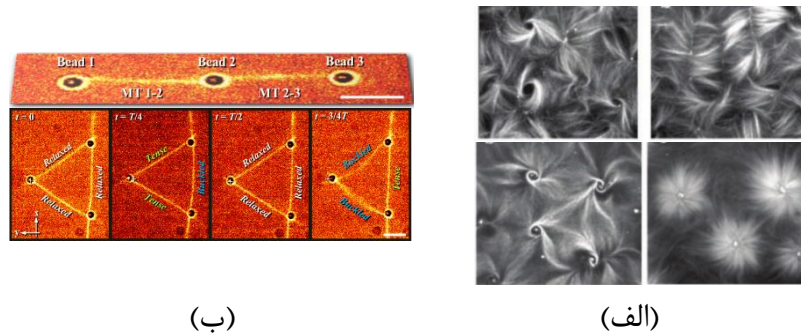
تکثیر، حرکت‌های درون سلولی^۱ و متابولیسم^۲ دارند [۳]. این ویژگی‌ها و عملیات درون سلولی، ماهیتی بسیار پیچیده داشته و به شدت به هماهنگی تعداد محدودی ساختار زیرسلولی^۴ متکی هستند. به طوری که دانش‌افزایی پیرامون آنها یک هدف اصلی به منظور شناسایی و معالجه بیماری‌ها یا تحقق مواد مصنوعی جدید الهام‌گرفته از 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^۵ 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





شکل ۱. مطالعات تجربی پیرامون میکروتوبول های شبکه ای (الف) الگوهای میکروتوبول ها در محیط آزمایشگاه [۱۲] (ب) میکروتوبول های متصل شده در محیط آزمایشگاه توسط انبرک های نوری به صورت خطی و مثلثی به منظور بررسی کرنش، کمانش و ارتعاشات در این سازه ها [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]

میکروتوبول ها لوله های توخالی با قطر نانومتری و طول میکرومتری متشکل از پروتئین های توبولین^۴ هستند که یک هترو دایمر قطبی^۵ ساخته شده از دو پروتئین تقریباً کروی است. با توجه به موضوعات اشاره شده پیرامون میکروتوبول ها و اهمیت به سزای آنها در بدن، تحقیقات تجربی مبتنی بر میکروسکوپ های نیروی اتمی و انبرک های نوری [۶، ۷]، شبیه سازی های اتمی با استفاده از دینامیک مولکولی اتمی و درشت دانه [۸] و مدل سازی های مکانیکی پیوسته با استفاده از تئوری ها و مدل های مختلف الاستیکی مانند تیرها و پوسته های استوانه ای [۹] فراوانی بر روی آنها صورت گرفته است. مطالعه ای که ژیانگ و میگوید [۱۰] در سال ۲۰۱۴ به منظور مقایسه تئوری ها و روش های مختلف استفاده شده انجام دادند تئوری مناسب را برای مدل سازی میکروتوبول ها مشخص کرد. با توجه به نتایج پژوهش صورت گرفته در نسبت های مختلف طول به قطر میکروتوبول می توان دریافت که استفاده از مدل متداول تیر اویلر-برنولی به منظور مدل سازی میکروتوبول ها مناسب بوده و دقت کافی دارد. کخ و همکاران [۱۱]، توانستند شبکه های خطی و مثلثی کوچکی از میکروتوبول ها را با استفاده از انبرک های نوری بسازند و نشان دهند که شبکه های میکروتوبول می توانند خواص دینامیکی مختلفی از قبیل سختی بیشتر و فرکانس طبیعی متفاوت نسبت به تک میکروتوبول داشته باشند. در شکل ۱ نمونه هایی از تصاویر میکروسکوپی ساختارهای میکروتوبولی ارائه شده است. همانطور که مشاهده می شود، میکروتوبول ها چه به شکل طبیعی و چه به شکل مصنوعی در آزمایشگاه می توانند اشکال

در برابر محرک های مکانیکی بیرونی و انعطاف پذیری در شرایط مختلف را فراهم می کنند. بررسی اسکلت سلولی منجر به درک این مسئله می شود که سلول ها به عنوان ماشین های خارق العاده در مقابل فشارهای مکانیکی چگونه واکنش نشان می دهند، تحمل می کنند یا پاسخ می دهند و چگونه نیروهای مکانیکی در داخل سلول انتقال پیدا می کند. فرضیه هایی برای این نوع انتقال ارائه شده است که از جمله آنها می توان به دو روش مستقیم [۴] (انتشار موج فیزیکی در داخل سلول که کمتر از یک ثانیه طول می کشد) و غیرمستقیم [۵] (تبدیل یک محرک فیزیکی به یک سیگنال شیمیایی که چند ثانیه تا یک دقیقه طول می کشد) اشاره کرد. از این رو، کشف معمای روش های انتقال نیروهای مکانیکی (استاتیکی و دینامیکی) داخل بدن و عوامل درگیر آن می تواند منجر به درک بهتر بیماری ها و وضعیت داخل سلولی شود. همچنین در پیچه های امیدوارکننده ای را برای توسعه و ساخت مواد و سازه های هوشمند زیستی در آینده نزدیک باز می کند. اسکلت سلولی شبکه پیچیده ای از پروتئین های بهم پیوسته یعنی میکروتوبول ها^۱، رشته های میانی^۲ و رشته های اکتین^۳ است. دینامیک داخلی اسکلت سلولی به گونه ای است که به منظور رفع نیازهای متنوع درون سلولی قادر به رشد سریع سلول و یا تقسیم سلولی می باشد. از این رو خواص مکانیکی مربوط به اجزای داخلی سلول بسیار حائز اهمیت است. از دید مکانیکی، هر کدام از بخش های زیرسلولی دارای نقش جداگانه ای هستند که میکروتوبول ها بیشترین نقش را در استحکام بخشی و واکنش های مکانیکی دارند.

4 Tubulin
5 Polar heterodimer

1 Microtubules
2 Intermediate filaments
3 Actin filaments

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 معماری شده پرداخته و معادلات المان محدود حاکم را با استفاده از تئوری بلاخ^۴ به معادلات انتشار موج تبدیل کردند. همچنین نمودارهای پراکندگی^۵ 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 معماری شده مختلف از جمله ساختارهای تارکنکبوتی [۲۸]، فرکتال‌های ترتیبی خودتکرارشونده^۶ [۲۹]، اوربگامی^۷ ها [۳۰] و شش ضلعی‌های خودتکرارشونده^۸ [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 معماری شده مبتنی بر میکروتوبول‌ها صورت پذیرد. یکی از مهم‌ترین 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 نموده است. انتشار موج در ساختار فرکتالی مطالعه شده در این مقاله پیش از این در پژوهش دیگری بررسی نشده است و نتایج حاصل را علاوه بر میکروتوبول‌ها می‌توان به طور کیفی برای سایر مواد نیز استفاده کرد.

۲- مدل‌سازی المان محدود

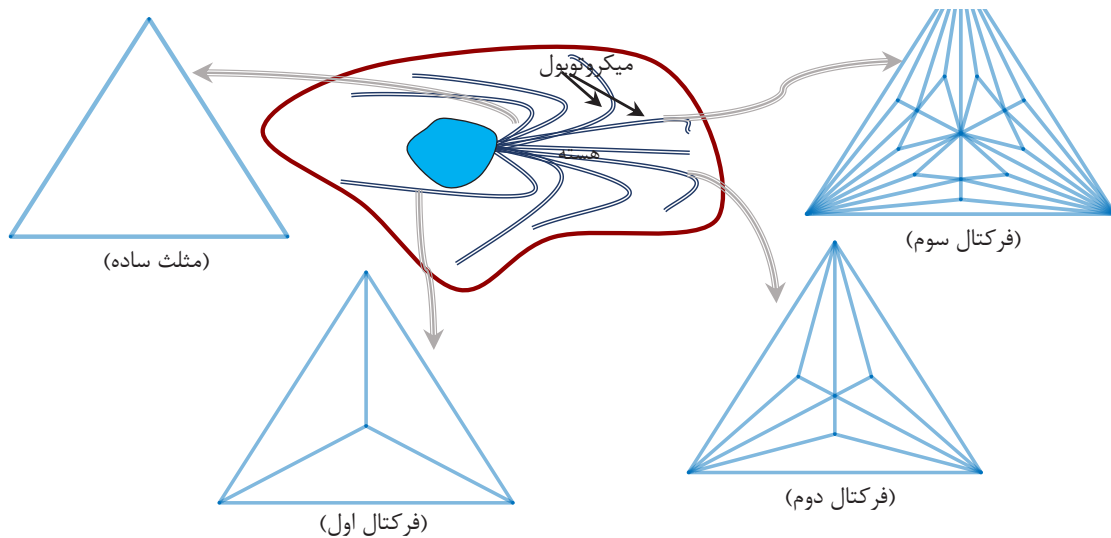
همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود میکروتوبول‌ها درون سلول یوکاریوتی قرار دارند و با اتصال به هسته و دیواره‌ها باعث استحکام سلول می‌شوند. المان‌های تک میکروتوبول از سلول انتخاب شده و همانند شکل ۲ ساختارهای معماری شده را ایجاد می‌کنند. ابتدا با کنار هم قرار گرفتن سه میکروتوبول، سلول واحد^۹ مثلث ساده بدست آمده است. سپس با کنار هم قرار گرفتن تعداد زیادی از میکروتوبول‌ها سلول‌های واحد فرکتالی حاصل

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 شده باشد.

از طرفی همان‌طور که اشاره شد، ساختارهای معماری شده پرپودیک در ایجاد خواص مؤثر الاستیکی و دینامیکی استفاده می‌شوند. رایلی^۱ [۱۳] انتشار امواج در یک محیط متشکل از یک ساختار متناوب با ارتعاشات یک‌بعدی با جرم‌های نقطه‌ای (بار) که به صورت یکنواخت در امتداد طول پیوسته بود را در نظر گرفت. پژوهش‌های رایلی با توجه به قوانین براگ^۲ بعدها از طریق تلاش‌های محققان در فیزیک حالت جامد و سایر شاخه‌های فیزیک پدیده‌ای را به‌عنوان گاف فرکانسی^۳ در بلورهای فونونیک حاصل کرد. کاربردهای آکوستیک عملی سازه‌های پرپودیک، 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 پرپودیک طراحی کرد. چنین طرح‌هایی در ساخت فیلترهای آکوستیک محدود برای میرایی اختلالات فشار پایین در حلقه‌های هیدرولیکی استفاده شده‌اند [۱۵]. این مطالعات امکان استفاده از اصول طراحی ساختارهای پرپودیک به منظور رسیدن به فیلترهای پایین‌گذر، بالاگذر و پهنای باند عملکردی مناسب را فراهم می‌سازد. ویژگی‌های فیلترکردن سیستم‌های پرپودیک نیز به‌طور گسترده در صنعت ارتباطات از راه دور، از جمله در گیرنده‌های تلفن‌های همراه و ارتباطات بی‌سیم استفاده می‌شوند [۱۶]. بر اساس خواص مواد معماری شده 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 معماری شده برمی‌گردد که باعث به‌وجود آمدن رفتارهای فونونی ویژه مانند هدایت عامدانه موج با فرکانس مشخص در یک جهت معین و یا پیش‌گیری از انتشار موج در جهت دیگر می‌شود.

4 Bloch's theorem
5 Dispersion 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.

1 Rayleigh
2 Bragg's Law
3 Band Gap



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

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

گره دارای درجات آزادی u ، v و ϕ مربوط به جابجایی طولی، عرضی و خمشی حول محور است. با استفاده از قانون دوم نیوتن، معادله حرکت صفحه‌ای برای میکروتوبول به صورت رابطه (۱) بدست می‌آید:

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

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]، می‌توان نوشت:

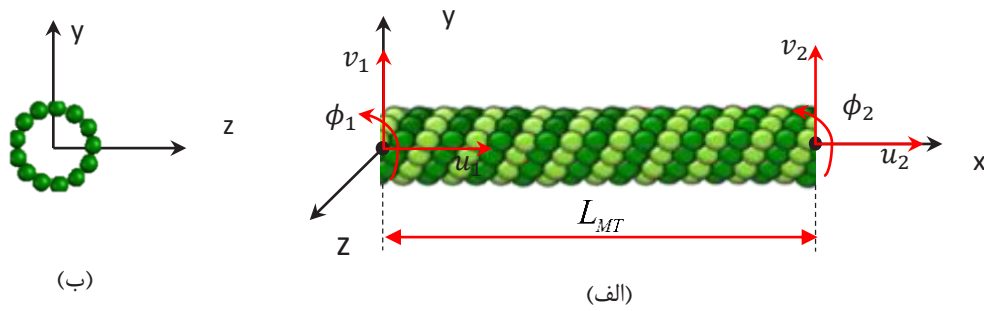
$$[M] = \frac{\rho_{MT} A_{MT} L_{MT}}{420} \begin{bmatrix} 210 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 156 & 22L_{MT} & 0 & 54 & -13L_{MT} \\ 0 & 22L_{MT} & 4L_{MT}^2 & 0 & 13L_{MT} & -3L_{MT}^2 \\ 0 & 0 & 0 & 210 & 0 & 0 \\ 0 & 54 & 13L_{MT} & 0 & 156 & -22L_{MT} \\ 0 & -13L_{MT} & -3L_{MT}^2 & 0 & -22L_{MT} &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

می‌شوند که در این شکل به صورت فرکتال‌های اول، دوم و سوم نشان داده شده‌اند. در نهایت با چین 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 اوپلر-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 در نظر گرفتن 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



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.

$$\frac{\rho_{MT} A_{MT} L_{MT}}{420} \begin{bmatrix} 210 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 156 & 22L_{MT} & 0 & 54 & -13L_{MT} \\ 0 & 22L_{MT} & 4L_{MT}^2 & 0 & 13L_{MT} & -3L_{MT}^2 \\ 0 & 0 & 0 & 210 & 0 & 0 \\ 0 & 54 & 13L_{MT} & 0 & 156 & -22L_{MT} \\ 0 & -13L_{MT} & -3L_{MT}^2 & 0 & -22L_{MT} & 4L_{MT}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{v}_1 \\ \ddot{\phi}_1 \\ \ddot{u}_2 \\ \ddot{v}_2 \\ \ddot{\phi}_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$+ \frac{8E_{MT} I_z}{L_{MT}^3} \begin{bmatrix} \frac{AL_{MT}^2}{8I_z} & 0 & 0 & -\frac{AL_{MT}^2}{8I_z} & 0 & 0 \\ 0 & 12 & 3L_{MT} & 0 & -12 & 3L_{MT} \\ 0 & 3L_{MT} & L_{MT}^2 & 0 & -3L_{MT} & \frac{L_{MT}^2}{2} \\ -\frac{AL_{MT}^2}{8I_z} & 0 & 0 & \frac{AL_{MT}^2}{8I_z} & 0 & 0 \\ 0 & -12 & -3L_{MT} & 0 & 12 & -3L_{MT} \\ 0 & 3L_{MT} & \frac{L_{MT}^2}{2} & 0 & -3L_{MT} & L_{MT}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ \phi_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ \phi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{1x} \\ f_{1y} \\ M_1 \\ f_{2x} \\ f_{2y} \\ M_2 \end{bmatrix}$$

با قرار گرفتن 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:

$$[M]_{r \times r} \ddot{q}_r + [K]_{r \times r} q_r = f_r \quad (6)$$

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

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

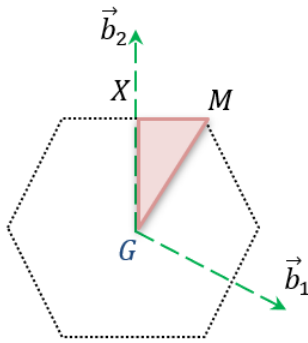
$$[K] = \frac{8E_{MT} I_z}{L_{MT}^3} \begin{bmatrix} \frac{AL_{MT}^2}{8I_z} & 0 & 0 & -\frac{AL_{MT}^2}{8I_z} & 0 & 0 \\ 0 & 12 & 3L_{MT} & 0 & -12 & 3L_{MT} \\ 0 & 3L_{MT} & L_{MT}^2 & 0 & -3L_{MT} & \frac{L_{MT}^2}{2} \\ -\frac{AL_{MT}^2}{8I_z} & 0 & 0 & \frac{AL_{MT}^2}{8I_z} & 0 & 0 \\ 0 & -12 &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

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

$$A_{MT} = \frac{\pi}{4} (D_{out}^2 - D_{in}^2) \quad (4)$$

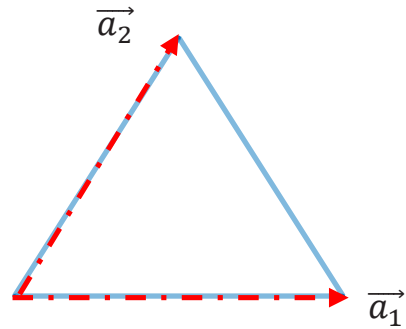
$$I_z = \frac{\pi}{64} (D_{out}^4 - D_{in}^4)$$

که D_{out} و D_{in} 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.



شکل ۵. ناحیه بریلوین اول ساختار مثلثی

Fig. 5. First Brillouin zone of triangular structure.



شکل ۴. سلول واحد مثلثی و بردارهای مستقیم

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

ناحیه اول بریلوین تعریف می‌گردند. ناحیه بریلوین 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 معماری شده

به منظور حل معادله حرکت بدست آمده (معادله (۶)) برای سلول واحد، جابجایی و شتاب ساختار معماری شده 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 معماری شده با استفاده از تئوری بلاخ تعمیم داده می‌شود. با فرض شرایط مرزی پرپودیک و فرضیات این تئوری، معادله انتشار موج ساختار معماری شده به صورت رابطه (۸) بدست می‌آید:

$$(\mathbf{k}(k_1, k_2) - \omega^2 \mathbf{m}(k_1, k_2)) q_{r-n} = 0 \quad (8)$$

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

۲-۲- تئوری بلاخ

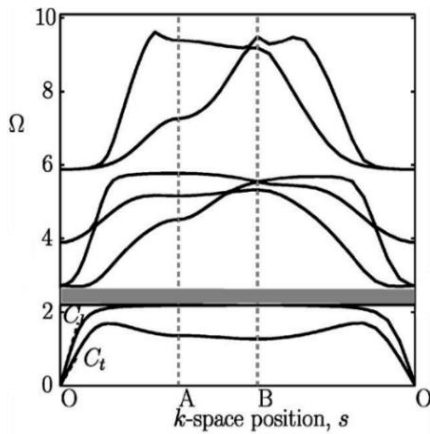
بر اساس تئوری بلاخ [۳۳]، تغییر مکان هر نقطه از هر سلول واحد درون ساختار پرپودیک تابعی از تغییر مکان در نقطه متناظر آن در سلول واحد مرجع است. همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است، ساختار پرپودیک دویعدی در فضای واقعی با استفاده از بردارهای مستقیم \vec{a}_1 و \vec{a}_2 به ترتیب در جهت x و y و شمارنده های 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.

$$\begin{aligned} \vec{R} &= \vec{R}_i + m_1 \vec{a}_1 + m_2 \vec{a}_2 \\ \Rightarrow q(\vec{R}) &= q(\vec{R}_i) e^{i \vec{k} \cdot (m_1 \vec{a}_1 + m_2 \vec{a}_2)} \end{aligned} \quad (7)$$

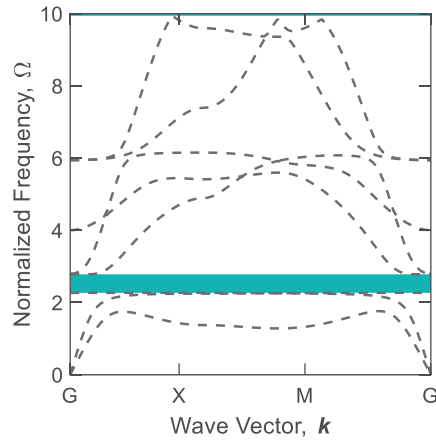
$$\xrightarrow{\begin{cases} k_1 = \vec{k} \cdot \vec{a}_1 \\ k_2 = \vec{k} \cdot \vec{a}_2 \end{cases}} q(\vec{R}) = q(\vec{R}_i) e^{i(k_1 m_1 + k_2 m_2)}$$

که \vec{k} بردار موج است و k_1 و k_2 به ترتیب اجزای بردار موج در جهت \vec{a}_1 و \vec{a}_2 می‌باشند. به منظور تحلیل انتشار امواج، مشخص کردن محدوده بریلوین^۱ یا یافتن حدود بردار موج (k_1 و k_2)، بایستی فضای حقیقی به فضای معکوس^۲ تبدیل شود. اجزای بردار موج k_1 و k_2 درون

1 Brillouin zone
2 Reciprocal space



(ب) نتایج فانی و همکاران [۲۷]



(الف) نتایج مقاله حاضر

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

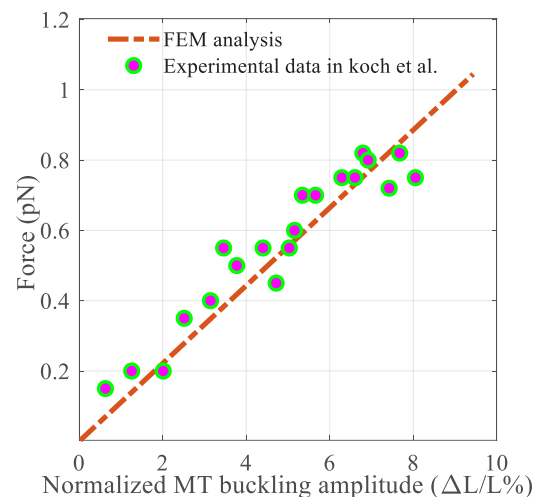
این بخش منحنی‌های انتشار موج حاصل از حل عددی معادله (۸) را ارائه می‌دهد. مقادیر ویژه این معادله برای بردارهای مختلف موج k_1, k_2 محاسبه شده و به صورت ساختارهای گاف فرکانسی ارائه می‌شوند. با حل معادله مقدار ویژه، مقادیر ویژه به دست آمده و به ازای تغییرات مقادیر بردارهای موج رسم می‌شوند. مقادیر ویژه (Ω) با استفاده از فرکانس طبیعی اول میکروتوبول تحت شرایط دو سر ثابت که از رابطه

اولر-برنولی با استفاده از نتایج تجربی کماتش 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.

۳-۱- صحت‌سنجی معادلات

به منظور صحت‌سنجی معادلات المان محدود بدست‌آمده و مدل تیر اوپلر برنولی برای میکروتوبول‌ها، نیروی کماتش در المان تک میکروتوبول بدست آمد و همانطور که در شکل ۶، ملاحظه می‌شود، 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، می‌توان نتیجه گرفت معادلات المان محدود و مدل تیر اوپلر 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 در نظر گرفتن 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



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

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

جدول ۱. خواص هندسی و مکانیکی میکروتوبول [۳۵]

Table 1. Geometrical and mechanical properties of microtubules.

مقادیر	خواص هندسی و مکانیکی
۱ μm	طول میکروتوبول
۱۶ nm	قطر داخلی
۲۵ nm	قطر خارجی
۲ GPa	مدول الاستیسیته
۰/۳	ضریب پواسون
$۱۴۷ \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	چگالی

مقاله در جدول ۱ ارائه شده‌اند. در این بخش از مقاله به بررسی انتشار امواج ساختارهای معماری شده فراکتالی مثلث‌های مرکز جرم ثابت مبتنی بر میکروتوبول پرداخته می‌شود. بازه فرکانسی بررسی شده برای انتشار امواج در بازه بی‌بعد شده $0 \leq \Omega \leq 5$ انجام شده‌است. به این معنی که فرکانس‌های کاری موجود در این بازه بررسی شده و امکان فیلتر این فرکانس‌ها توسط ساختارهای معرفی شده 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 معماری شده 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 اضافه کردن سه میکروتوبول به ساختار مثلث ساده، فرکتال اول حاصل می‌گردد (شکل ۹). همان‌طور که در نمودار مربوط به ساختار فرکتال اول قابل مشاهده است اضافه کردن میکروتوبول‌ها امکان به‌وجود آمدن نواحی جدید گاف فرکانسی را به ساختار معماری شده 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 معماری شده جدید باشد.

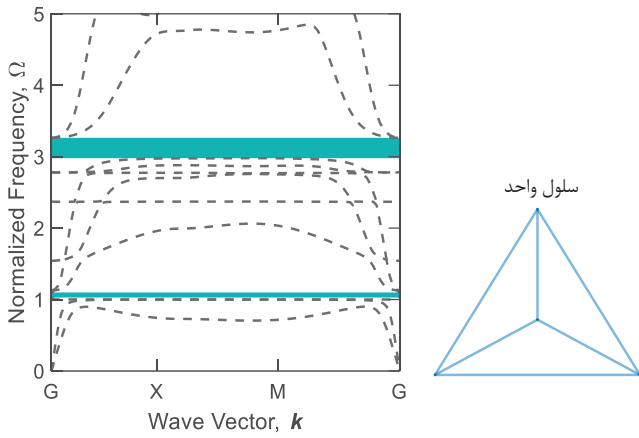
شکل ۱۰ سلول واحد و نمودار انتشار موج ساختار معماری شده فرکتال دوم مثلث را نشان می‌دهد. مطابق شکل، این ساختار نواحی گاف فرکانسی بیشتری نسبت به ساختارهای معرفی شده قبلی دارد که نشان از عملکرد بهتر این ساختار نسبت به آنها است. نواحی گاف فرکانسی این

شده‌است. همچنین قسمت (ب) مربوط به نتایج مقاله فانی و همکاران است. این نتایج برای ساختار معماری شده 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 انتخاب شده وجود دارد. ناحیه‌ای در نمودارهای انتشار موج رنگ شده‌است که به آن ناحیه گاف فرکانسی^۱ گفته می‌شود. این موضوع به این معنی است که ساختار معماری شده مثلثی با مشخصات در نظر گرفته 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^۲ و گاف فرکانسی نوع براگ^۳ 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 المان‌ها، ناحیه گاف فرکانسی ایجاد می‌گردد. 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

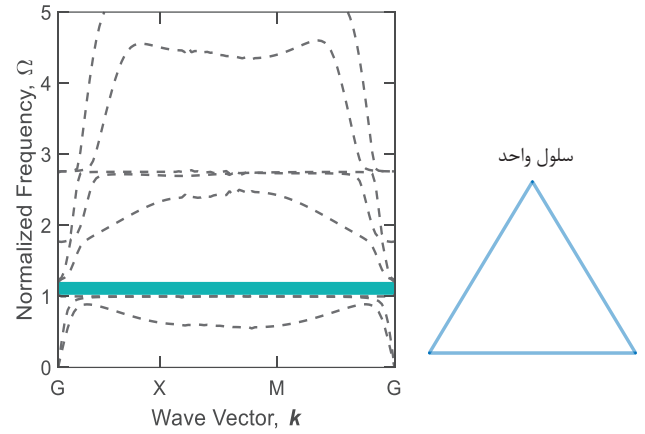
خصوصیات مواد و هندسه میکروتوبول‌های در نظر گرفته شده در این

- 1 Bandgap
- 2 Local resonance Bandgap
- 3 Bragg type Bandgap



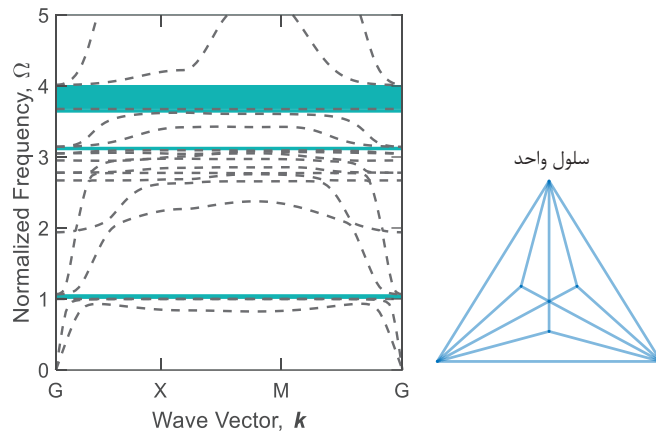
شکل ۹. نمودار انتشار موج فرکتال اول مبتنی بر میکروتوبول به همراه سلول واحد مربوطه.

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



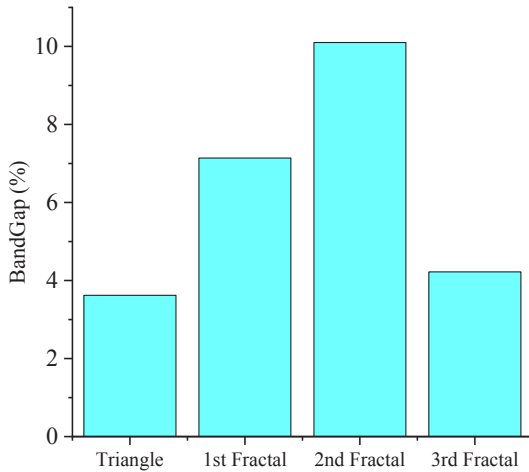
شکل ۸. نمودار انتشار موج مثلث ساده مبتنی بر میکروتوبول به همراه سلول واحد مربوطه.

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



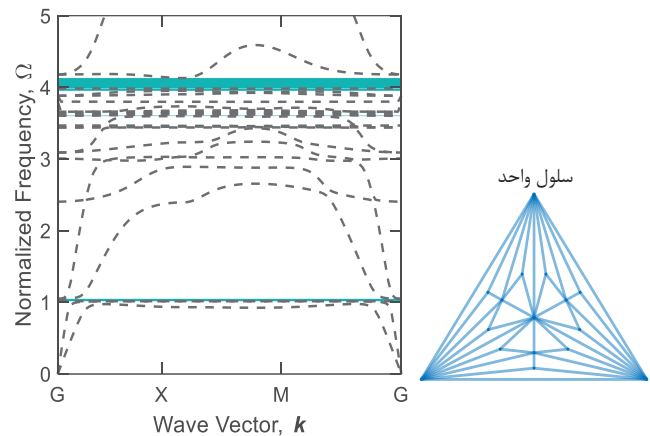
شکل ۱۰. نمودار انتشار موج فرکتال دوم مبتنی بر میکروتوبول به همراه سلول واحد مربوطه.

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



شکل ۱۲. درصد گاف فرکانسی به ازای فرکتال های مختلف

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



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.

گاف فرکانسی ناشی از پدیده تشدید موضعی ساختار مثلثی است که در ناحیه بیرونی تمامی فرکتال‌ها ثابت بوده و تغییر نکرده است. 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 معماری شده مبتنی بر میکروتوبول‌ها، نموداری در شکل ۱۲ برای درصد تجمعی گاف‌های فرکانسی در بازه فرکانسی $0 \leq \Omega \leq 5$ ارائه شده است. 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 بررسی شده 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 به‌سزایی برخوردار است. بنابراین در این مقاله به بررسی انتشار موج در ساختارهای معماری شده 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

ساختار شامل $1.000 \leq \Omega \leq 1.067$ ، $3.095 \leq \Omega \leq 3.144$ و $3.624 \leq \Omega \leq 4.014$ است که دارای ناحیه گاف فرکانسی عریضی است. اضافه کردن تعدادی میکروتوبول به ساختار معماری شده، 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 طبیعتاً عملکرد فیلتری ضعیف‌تری را نیز در بازه $0 \leq \Omega \leq 5$ 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 معماری شده 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 بوده است، 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 مانده است. این موضوع به این دلیل است که این

جابجایی طولی، m	u
جابجایی عرضی، m	v
محور طولی	x
محور عرضی	y
محور عمود بر صفحه	z

علائم یونانی

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

زیرنویس

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

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 ایجاد ساختار 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

منابع

- [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.

- 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, [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-

- [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).
- 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. Vasio, 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.

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



