Nonlocal Theoretical Analysis of Free Vibration of Graphene Origami Auxetic Metamaterial Nanobeams

Muthanna Abdulrazzaq Qraibi[1], Saeed Feli[*1], Mehdi Ranjbar-Roeintan[2]

[1]Department of Mechanical Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran
[2]Department of Mechanical Engineering, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran

ABSTRACT

In this research, the free vibration of graphene origami auxetic metamaterial nanobeams is investigated using Eringen's nonlocal elasticity theory and Euler-Bernoulli beam theory. Graphene origami-reinforced nanobeams exhibit auxetic behavior owing to their nanoscale folding patterns, which gradually unfold under applied tension, causing transverse expansion perpendicular to the applied force, unlike conventional materials that contract laterally under tension. The effective material properties including Young's modulus, density, and Poisson's ratio are calculated using homogenization relations and correction functions dependent on the temperature and folding degree. The governing equations are derived using the energy method, space-time separation, generalized Lagrange equations, and natural frequencies are extracted by solving the eigenvalue problem. The dimensionless natural frequencies of the simply-supported nanobeam are validated against existing studies. The results indicate that increasing the weight percentage of graphene origami increases the natural frequency of the nanobeam due to the increase in Young's modulus and decrease in density. Furthermore, increasing the folding degree, while enhancing the auxetic property, reduces the natural frequency due to the decrease in Young's modulus. Increasing the nanobeam length due to increased mass and also increasing the nonlocal parameter due to reduced effective stiffness of the beam lead to a decrease in the natural frequency.

KEYWORDS

Graphene origami, Auxetic metamaterial, Free vibration, Eringen's nonlocal theory, Folding effect.

ACCEPTED MANUSCRIPT

* Corresponding Author, Email: Felisaeid@Razi.ac.ir

1. Introduction

Metamaterials—first theorized in 1968 as materials with simultaneously negative permeability and permittivity [1]—later inspired "mechanical metamaterials" exhibiting unconventional properties such as negative elastic modulus, negative Poisson's ratio, or zero shear modulus [2]. Nanotechnology, meanwhile, deals with materials at the atomic and molecular scale, defined as having at least one dimension between 1 and 100 nanometers [3]. For example, Esen et al. [4] applied nonlocal strain gradient theory to functionally graded Timoshenko nanobeams under magnetic and thermal fields, presenting the effects of the nonlocal parameter, strain gradient, and magnetic field intensity.

In 1995, Ebbesen and Hiura [5] first introduced "graphite origami" after observing random tearing and folding of graphite surface layers via atomic force microscopy. In 2008, Schniepp et al. [6] demonstrated the folding and unfolding of a single graphene sheet, sparking considerable research into folded graphene. Graphene origami is a three-dimensional structure formed by folding two-dimensional graphene sheets according to origami principles—"ori" meaning "to fold" and "gami" meaning "paper" in Japanese. Its auxetic property arises not from graphene itself but from its origami geometry.

In this study, by presenting a theoretical model based on Eringen's nonlocal theory, the influence of key parameters—including the weight percentage of graphene origami, the folding percentage of graphene origami, the nanobeam length, and the nonlocal parameter—on the natural frequencies of nanobeams reinforced with graphene origami auxetic metamaterial is investigated.

2. Materials and Methods

2.1 Materials

The effective properties of the composite are determined in two stages: first, the overall volume fraction of graphene origami V_{Gr}^{*} is calculated from its weight fraction W_{Gr}, and then the effective Young's modulus E, density ρ, and Poisson's ratio ν are obtained using modified functions that account for the reinforcement efficiency of graphene. where H_{Gr} denotes the degree of folding of graphene origami (a value between 0 and 1, representing the percentage of hydrogen atom coverage), T is the operating temperature, and T_0 is the reference temperature of 300 K. The modified functions are expressed as follows [7]:

$$
\begin{aligned}
f_E &= 1.11 - 1.22V_{\mathrm{Gr}} - 0.134\left(\frac{T}{T_0}\right) + 0.559V_{\mathrm{Gr}}\left(\frac{T}{T_0}\right) \\
&\quad - 5.5H_{\mathrm{Gr}}V_{\mathrm{Gr}} + 38H_{\mathrm{Gr}}V_{\mathrm{Gr}}^2 - 20.6H_{\mathrm{Gr}}^2V_{\mathrm{Gr}}^2 \\
f_\rho &= 1.01 - 2.01V_{\mathrm{Gr}}^2 - 0.0131\left(\frac{T}{T_0}\right) \\
f_\nu &= 1.01 - 1.43V_{\mathrm{Gr}} + 0.165\left(\frac{T}{T_0}\right) - 16.8H_{\mathrm{Gr}}V_{\mathrm{Gr}} \\
&\quad - 1.1H_{\mathrm{Gr}}V_{\mathrm{Gr}}\left(\frac{T}{T_0}\right) + 16H_{\mathrm{Gr}}^2V_{\mathrm{Gr}}^2
\end{aligned}
\tag{1}
$$

2.2 Methods

In this section, a nanobeam of length L, thickness h, and width b is considered, with the origin of coordinates located at the center of the beam. In this study, the classical Euler–Bernoulli beam theory is employed. Using Eringen's nonlocal elasticity theory for a homogeneous isotropic nanobeam, the axial stress σ_{xx} is expressed in terms of the axial strain ε_{xx} in the first-order case (commonly adopted in engineering applications) as follows:

$$
\sigma_{xx}(x) = E\left(\varepsilon_{xx} + \mu\frac{\partial^2\varepsilon_{xx}}{\partial x^2}\right) \tag{2}
$$

The energy method (kinetic and potential energy), the separation of variables method, and the Lagrange method are employed. Finally, the free vibration equations for the nanobeam are presented as follows:

$$
M\,\ddot{d} + K\,d = 0 \tag{3}
$$

where M and K are the $N\times N$ mass and stiffness matrices, respectively, and d is the displacement vector of order $N\times 1$. The parameter N denotes the number of terms required to achieve convergence of the response, and finally the entries of the mass and stiffness matrices are presented as follows:

$$
\begin{aligned}
M^{mn} &= \int_V z^2\rho\frac{dN_m}{dx}\frac{dN_n}{dx}dV + \int_V \rho N_m N_n\,dV \\
K^{mn} &= \int_V z^2E\frac{d^2N_m}{dx^2}\frac{d^2N_n}{dx^2}dV - \int_V z^2\mu E\frac{d^3N_m}{dx^3}\frac{d^3N_n}{dx^3}dV
\end{aligned}
\tag{4}
$$

Finally, by setting the determinant $(K - M\omega^2)$ equal to zero, the natural frequencies ω of the free vibration of the nanobeam are calculated. Results and Discussion

3.1 Validation

To verify the governing equations, the natural frequencies of graphene origami-reinforced nanobeams with simply supported boundary conditions are

ACCEPTED MANUSCRIPT

calculated at 300 K, showing minor discrepancies (less than 2%) compared with the cited references in Table 1.

Table 1: Natural frequencies of graphene origami auxetic metamaterial nanobeams for simply-supported boundary conditions and their dimensionless comparison.

Nonlocal parameter μ (nm²)	Natural frequency (dimensionless)		
	Present work	Şimşek [8]	Reddy [9]
0	9.8293	9.8696	9.8696
1	9.3316	9.4158	9.4159
2	8.8059	9.0194	9.0951

3.2 Parametric study

With a 50% increase in the weight percentage of graphene origami (from 2% to 3%), the Young's modulus, natural frequency, and absolute value of the nanobeam's Poisson's ratio increased by 13.22%, 9.33%, and 314.90%, respectively, while with a 100% increase in the weight percentage of graphene origami (from 2% to 4%), the Young's modulus, natural frequency, and absolute value of the nanobeam's Poisson's ratio increased by 33.93%, 22.37%, and 580.67%, respectively. Furthermore, the nanobeam's density decreased by 5.27% and 10.63%.

The results indicate that with an increase in folding degree from 70% to 80%, the Young's modulus and natural frequency decrease by 6.27% and 3.16%, respectively, while the absolute value of the Poisson's ratio increases by 530%. This trend continues with an increase in folding degree from 80% to 90%, such that the Young's modulus and natural frequency decrease by 7.21% and 3.71%, respectively, and the absolute value of the Poisson's ratio increases by 82.5%, while the density remains constant throughout the entire range.

Observations indicate that with an increase in nanobeam length, the values of Young's modulus, density, and Poisson's ratio remain unchanged, while the natural frequency decreases by 33.13% and 52.54% as the nanobeam length changes from 10*h* to 12.5*h* and 15*h*, respectively. Also, with an increase in the nonlocal parameter from 1 to 2 and from 2 to 3 nm², the Young's modulus, density, and Poisson's ratio remain unchanged, while the nanobeam's natural frequency decreases by 5.58% and 11.60%, respectively, demonstrating the nonlinear influence of the nonlocal parameter on frequency.

3. Conclusions

This study analyzed the free vibrations of graphene origami-reinforced auxetic metamaterial nanobeams using Eringen's nonlocal theory and classical Euler–Bernoulli beam theory.

Key findings include: increasing graphene origami weight percentage raised Young's modulus and reduced effective density, significantly increasing natural frequency—enabling design of nano-reinforcements and nanosensors with higher resonance frequency and sensitivity; increasing folding degree strengthened auxeticity but reduced natural frequency due to decreased Young's modulus, revealing a trade-off between auxetic properties and dynamic stiffness requiring optimal balance; increasing nanobeam length sharply reduced natural frequency due to greater mass and flexibility, emphasizing the need for precise dimensional selection; and increasing the nonlocal parameter reduced effective stiffness and natural frequency, underscoring the necessity of accounting for size effects to avoid inaccurate resonance prediction.

5. References

[1] V.G. Veselago, The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ε and μ, Phys.-Usp., 10(4) (1968) 509-514.

[2] J.U. Surjadi, L. Gao, H. Du, X. Li, X. Xiong, N.X. Fang, Y. Lu, Mechanical metamaterials and their engineering applications, Adv. Eng. Mater., 21(3) (2019) 1800864.

[3] B. Mekuye, B. Abera, Nanomaterials: An overview of synthesis, classification, characterization, and applications, Nano select, 4(8) (2023) 486-501.

[4] I. Esen, A.A. Abdelrhmaan, M.A. Eltaher, Free vibration and buckling stability of FG nanobeams exposed to magnetic and thermal fields, Engineering with Computers, 38(4) (2022) 3463-3482.

[5] T.W. Ebbesen, H. Hiura, Graphene in 3-dimensions: Towards graphite origami, in, Wiley Online Library, 1995.

[6] H.C. Schniepp, K.N. Kudin, J.-L. Li, R.K. Prud'homme, R. Car, D.A. Saville, I.A. Aksay, Bending properties of single functionalized graphene sheets probed by atomic force microscopy, ACS nano, 2(12) (2008) 2577-2584.

[7] S. Zhao, Y. Zhang, Y. Zhang, W. Zhang, J. Yang, S. Kitipornchai, Genetic programming-assisted micromechanical models of graphene origami-enabled metal metamaterials, Acta Materialia, 228 (2022) 117791.

[8] M. Şimşek, Large amplitude free vibration of nanobeams with various boundary conditions based on the nonlocal elasticity theory, Composites Part B: Engineering, 56 (2014) 621-628.

[9] J. Reddy, Nonlocal theories for bending, buckling and vibration of beams, International journal of engineering science, 45(2-8) (2007) 288-307.

ACCEPTED MANUSCRIPT

تحلیل تئوری غیرموضعی ارتعاشات آزاد نانوتیرهای فراماده آگزتیک گرافن اوریگامی

مثنی عبدالرزاق عریبی[1]، سعید فعلی[1*]، مهدی رنجبر روئین‌تن[2]

۱-گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی‌مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

۲-گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

چکیده

در این پژوهش، ارتعاشات آزاد نانوتیرهای فراماده آگزتیک گرافن اوریگامی با استفاده از تئوری غیرموضعی ارینگن و تئوری تیر اویلر-برنولی بررسی می‌شود. نانوتیرهای تقویت‌شده با گرافن اوریگامی به دلیل ساختار هندسی با الگوهای تاخوردگی در مقیاس نانو، رفتار آگزتیک دارند. این رفتار ناشی از بازشدن تدریجی تاهای گرافن تحت کشش است که باعث انبساط عرضی ماده شده و برخلاف مواد معمولی، در راستای عمود بر نیروی اعمالی منبسط می‌شود. خواص مؤثر ماده مرکب شامل مدول یانگ، چگالی و ضریب پواسون با استفاده از روابط همگن‌سازی و توابع اصلاح وابسته به دما و تاخوردگی محاسبه می‌شوند. معادلات حاکم با استفاده از روش انرژی، جداسازی مکان-زمان و معادلات تعمیم‌یافته لاگرانژ و فرکانس‌های طبیعی با حل مسئله مقدار ویژه استخراج می‌گردند. فرکانس‌های طبیعی بی‌بعد نانوتیر دو سر ساده با مطالعات موجود اعتبارسنجی شد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش درصد وزنی گرافن اوریگامی، به دلیل افزایش مدول یانگ و کاهش چگالی، فرکانس طبیعی نانوتیر را افزایش می‌دهد. همچنین افزایش تاخوردگی، اگرچه خاصیت آگزتیک را تقویت می‌کند، اما به دلیل کاهش مدول یانگ، فرکانس طبیعی را کاهش می‌دهد. افزایش طول نانوتیر به دلیل افزایش جرم نانوتیر و همچنین افزایش پارامتر غیرموضعی به دلیل کاهش سفتی موثر تیر نیز موجب کاهش فرکانس طبیعی می‌شوند.

کلمات کلیدی

گرافن اوریگامی، فراماده آگزتیک، ارتعاشات آزاد، تئوری غیرموضعی ارینگن، اثر تاخوردگی.

[*]نویسنده مسئول، ایمیل: Felisaeid@Razi.ac.ir

ACCEPTED MANUSCRIPT

۱- مقدمه

مفهوم فراماواد[1] برای نخستین بار در سال ۱۹۶۸ توسط فیزیکدان روسی، مطرح شد. او نشان داد که از لحاظ نظری، موادی با هم زمانی نفوذپذیری و گذردهی الکتریکی منفی قابل تحقق هستند [۱]. این ایده‌ی بنیادین، زمینه‌ساز پیدایش شاخه‌ای نوین در علوم مهندسی شد که امروزه با نام «فراماواد مکانیکی» شناخته می‌شود، موادی که می‌توانند ویژگی‌های غیرمعمولی همچون مدول الاستیک منفی، نسبت پواسون منفی، یا مدول برشی صفر از خود نشان دهند [۲]. در این میان، ضریب پواسون به عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترهای مکانیکی، بیانگر ارتباط میان کرنش‌های عرضی و طولی است و نشان می‌دهد که یک ماده در پاسخ به تغییر شکل محوری، تا چه اندازه در جهت عمود بر آن دچار تغییر بعد می‌شود. موادی که دارای ضریب پواسون منفی هستند، آگزتیک[2] نامیده می‌شوند و رفتاری خلاف انتظار دارند، زمانی که در یک جهت کشیده می‌شوند، در جهت عمود بر آن منبسط می‌شوند و برعکس. این ویژگی منحصربه‌فرد، کاربردهای گسترده‌ای در جاذب‌های انرژی ضربه‌ای، غربال‌های مولکولی، حسگرهای حساس و همچنین صنایع ورزشی و پزشکی برای این مواد به ارمغان آورده است [۳, ۴].

مفهوم نانوتکنولوژی[3] به عنوان یکی از پیشروترین حوزه‌های علمی در قرن حاضر، به مطالعه و کاربرد مواد در مقیاس اتمی و مولکولی می‌پردازد. مواد نانو به موادی اطلاق می‌شوند که حداقل یکی از ابعاد آنها در محدوده ۱ تا ۱۰۰ نانومتر دارد [۵]. در این مقیاس، مواد از خود خواص شگفت‌انگیزی نشان می‌دهند که در حالت توده‌ای دیده نمی‌شود. مهم‌ترین دلیل این تفاوت، نسبت بسیار بالای سطح به حجم در نانومواد است که باعث می‌شود تعداد اتم‌های واقع در سطح در مقایسه با اتم‌های درون ماده به شدت افزایش یابد و خواصی مانند واکنش‌پذیری شیمیایی، کاتالیزوری و ظرفیت جذب به مراتب بیشتر شود [۶]. در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی به تحلیل ارتعاشات نانوتیرها با در نظر گرفتن اثرات اندازه پرداخته‌اند. از جمله، هائونان[4] و همکاران [۷] با استفاده از تئوری تیموشنکو و الاستیسیته غیرموضعی، ارتعاشات تیرهای دوار پیزوالکتریک مدرج تابعی را تحلیل کردند و نشان دادند که عوامل سینماتیکی خارجی، ولتاژ و اثر مقیاس کوچک به صورت غیرخطی بر فرکانس‌های طبیعی تاثیر می‌گذارند. همچنین، اسن[5] و همکاران [۸] با بهره‌گیری از تئوری گرادیان کرنش غیرموضعی، ارتعاشات آزاد و کمانش نانوتیرهای مدرج تابعی تیموشنکو را در معرض میدان های مغناطیسی و حرارتی مورد مطالعه قرار دادند و تاثیر پارامترهای غیرموضعی، گرادیان کرنش و شدت میدان مغناطیسی را ارائه نمودند. در مطالعه‌ای دیگر، گارتیا و چاکراورتی[6] [۹] ارتعاشات آزاد نانوتیرهای مدرج تابعی دو-جهته را با استفاده از تئوری اویلر-برنولی و تئوری گرادیان کرنش غیرموضعی بر روی بستر الاستیک وینکلر-پاسترناک[7] مدلسازی کردند و نتایج خود را با روش ریلی-ریتز استخراج نمودند. در نهایت، بینه[8] و همکاران[۱۰] با در نظر گرفتن اثرات فلکسوالکتریسیته[9] و محیط مرطوب دمایی، پاسخ‌های استاتیکی و دینامیکی نانوتیرها را با ترکیب تئوری‌های غیرموضعی و گرادیان کرنش به روش تحلیلی بررسی کردند و بر اهمیت لحاظ کردن این اثرات در طراحی و بهینه‌سازی نانوساختارها تاکید نمودند.

فتحعلیلو و همکاران [۱۱] نشان دادند که اثر وابسته به اندازه در میکروتیرهای طلا و نیکل قابل توجه است و نادیده گرفتن آن منجر به نتایج نادرست می‌شود. آن‌ها با استفاده از تئوری‌های مرتبه بالاتر (تنش کوپل اصلاح‌شده و گرادیان کرنش اصلاح‌شده) نشان دادند که ولتاژهای محاسبه‌شده بسیار نزدیک‌تر به نتایج تجربی هستند. همچنین، امیری و همکاران [۱۲] ارتعاشات آزاد نانوورق‌های مگنتو-الکترو-الاستیک دایره‌ای را بر اساس تئوری صفحه کیرشهف و در چارچوب تئوری الاستیسیته غیرموضعی برای در نظرگرفتن

[1] Metamaterial
[2] Auxetics
[3] Nanotechnology
[4] Hao-nan
[5] Esen
[6] Gartia and Chakraverty
[7] Winkler–Pasternak
[8] Binh
[9] Flexoelectricity

ACCEPTED MANUSCRIPT

اثر مقیاس کوچک بررسی کردند. در نهایت، تأثیر پارامتر غیرموضعی، ضخامت و شعاع نانوورق، کسر حجمی پیزوالکتریک و پتانسیل های مغناطیسی و الکتریکی اعمالی بر فرکانس‌های طبیعی را به صورت عددی بررسی کردند.

در سال ۱۹۹۵، مفهوم «اوریگامی[1] گرافیت[2]» برای اولین بار توسط ابسن و هیورا[3] [۱۳] معرفی شد، زیرا آنها پارگی و تاخوردگی تصادفی لایه‌های سطحی گرافیت را با میکروسکوپ نیروی اتمی مشاهده کردند. در سال ۲۰۰۸، اشنیپ[4] و همکارانش [۱۴] با موفقیت تاخوردگی و باز شدن یک لایه گرافن را نشان دادند. از آن زمان، تحقیقات قابل توجهی در مورد خواص گرافن تاخورده و کاربردهای آن انجام شده است. گرافن[5] اوریگامی یک ساختار سه‌بعدی پیچیده است که با تاخوردگی صفحات گرافن دوبعدی طبق اصول اوریگامی تشکیل می‌شود. اصطلاح اوریگامی از زبان ژاپنی گرفته شده است، که در آن «اوری» به معنی «تا کردن» و «گامی» به معنی «کاغذ» است. دلیل اصلی خاصیت آگزتیک گرافن اوریگامی، نه در خود گرافن، بلکه در هندسه اوریگامی آن نهفته است. با ایجاد الگوهای تا خوردگی در صفحه گرافن، ساختاری سه‌بعدی حاصل می‌شود که تحت کشش، مانند یک سازه تاشو باز شده و در جهت عمود بر نیروی اعمالی منبسط می‌شود. این رفتار وابسته به هندسه است و با تغییر درجه تاخوردگی، می‌توان نسبت پواسون منفی را تا مقادیر قابل توجهی تنظیم کرد. به همین دلیل، گرافن اوریگامی نه تنها سختی و استحکام کامپوزیت را افزایش می‌دهد، بلکه با القای خاصیت آگزتیک، آن را به یک فراماده با قابلیت جذب انرژی بالا و پاسخ دینامیکی قابل تنظیم تبدیل می‌کند.

ژائو[6] و همکاران [۱۵] ارتعاشات غیرخطی تیر فراماده آگزتیک تقویت‌شده با گرافن اوریگامی را به صورت مدرج تابعی بررسی کردند. با تغییر لایه‌ای گرافن، خواص آگزتیک تنظیم و معادلات تیر تیموشنکو با روش دیفرانسیل کوادرچر[7] حل شد. نتایج نشان داد پارامترهای گرافن (میزان، تاخوردگی و توزیع) فرکانس غیرخطی را کنترل می‌کند. موراری[8] و همکاران [۱۶] در چارچوب نظریه تیر تیموشنکو، به بررسی تأثیر نسبت پواسون منفی بر ویژگی‌های ارتعاش آزاد تیرهای گرافن اوریگامی با ضخامت متغیر غوطه‌ور در سیال با درجه‌بندی تابعی با ضخامت متغیر پرداختند. نسبت پواسون و سایر خواص الاستیک تیر به صورت لایه‌ای در امتداد جهت ضخامت درجه‌بندی شد و توسط مدل‌های میکرومکانیکی به کمک برنامه‌نویسی ژنتیک پیش‌بینی شد.

گائو[9] و همکاران [۱۷] به بررسی کمانش و ارتعاشات آزاد تیرهای گرافن اوریگامی مدرج تابعی بر روی بستر الاستیک در محیط حرارتی پرداختند. آن‌ها با در نظر گرفتن سه نوع توزیع دمایی (یکنواخت، خطی و سینوسی) و با استفاده از تئوری تیر اصلاح‌شده و معادلات لاگرانژ، نشان دادند که توزیع‌های نامتقارن ماده و دما منجر به کمانش انشعابی نمی‌شوند و تأثیر وزن، تاخوردگی گرافن اوریگامی و شرایط مرزی بر پاسخ ارتعاشی و کمانش بسیار حائز اهمیت است. کرمی و قایش [۱۸] با تمرکز بر دینامیک غیرخطی، رفتار اجباری و آزاد تیرهای گرافن اوریگامی را در چارچوب تئوری مرتبه سوم برشی با استفاده از مدل میکرومکانیکی هالپین-تسای اصلاح‌شده تحلیل کردند. آن‌ها با بهره‌گیری از روش گالرکین برای گسسته‌سازی و روش تفاضلات محدود برای حل معادلات غیرخطی، پدیده‌های کلیدی از جمله سخت‌شدگی غیرخطی و پرش در پاسخ فرکانسی را شناسایی کردند.

با توجه به پیشرفت‌های اخیر در زمینه مواد فراماده و ساختارهای نانومتری، درک رفتار دینامیکی نانوتیرهای تقویت‌شده با گرافن اوریگامی به دلیل کاربردهای گسترده آنها در حسگرها، محرک‌ها و سازه‌های سبک‌وزن هوافضایی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با وجود پژوهش‌های متعدد، تحلیل ارتعاشاتی آنها با در نظر گرفتن همزمان اثرات غیرموضعی و استفاده از گرافن اوریگامی به عنوان تقویت‌کننده، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در این مطالعه، با ارائه یک مدل‌سازی تئوری مبتنی بر تئوری غیرموضعی ارینگن، تأثیر پارامترهای کلیدی شامل درصد وزنی گرافن اوریگامی، درصد تاخوردگی گرافن اوریگامی، طول نانوتیر و پارامتر غیرموضعی بر فرکانس

[1] Origami
[2] Graphite
[3] Ebbesen and Hiura
[4] Schniepp
[5] Graphene
[6] Zhao
[7] Differential quadrature
[8] Murari
[9] Gao

ACCEPTED MANUSCRIPT

های طبیعی نانوتیرهای تقویت‌شده با فراماده آگزتیک گرافن اوریگامی بررسی می‌شود. نتایج این پژوهش می‌تواند مسیر را برای طراحی بهینه نانوتیرهای فراماده با عملکرد دینامیکی قابل تنظیم هموار سازد.

اگرچه ادبیات تحقیق، به خصوص مراجع [۱۵-۱۸] به طور گسترده به بررسی ارتعاش آزاد تیرهای فراماده اگزتیک گرافن اوریگامی با استفاده از تئوری‌های تیر کلاسیک مختلف پرداخته‌اند، اما این مطالعات محدود به مقیاس ماکرو هستند و اثرات وابسته به اندازه را که در مقیاس نانو حائز اهمیت می‌شوند، در نظر نمی‌گیرند. مکانیک پیوسته کلاسیک قادر به ثبت برهمکنش‌های بین‌اتمی موجود در نانوساختارها نیست. این مطالعه به بررسی ارتعاش آزاد نانوتیرهای فراماده اگزتیک گرافن اوریگامی با ادغام مدل‌های میکرومکانیکی مبتنی بر برنامه‌ریزی ژنتیکی و تئوری الاستیسیته غیرموضعی ارینگن می‌پردازد. پارامتر غیرموضعی معرفی شده در این کار، به طور مؤثر اثرات مقیاس کوچک را ثبت می‌کند و پیش‌بینی دقیق‌تری از فرکانس‌های طبیعی در مقایسه با تئوری‌های تیر کلاسیک ارائه می‌دهد. این امر کار حاضر را از ادبیات موجود متمایز کرده و شکاف مهمی را در تحلیل نانوتیرهای فراماده اگزتیک پر می‌کند.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد

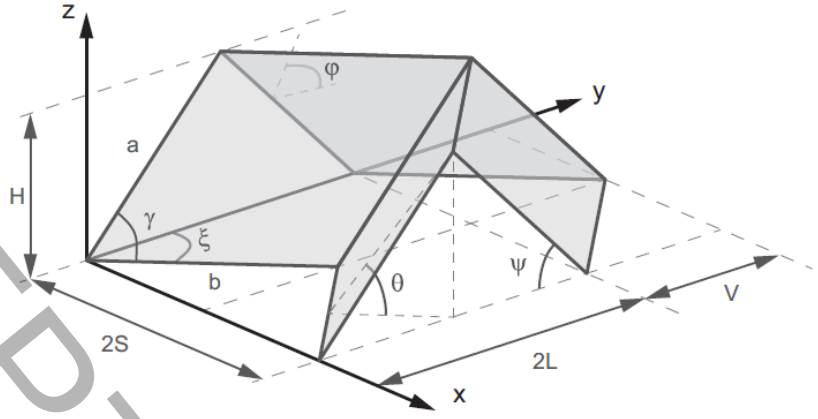
ترکیب گرافن اوریگامی با مس، یک ماده مرکب آگزتیک با ضریب پواسون منفی می‌سازد که این ویژگی نه از معماری ماکروسکوپی، بلکه مستقیماً از هندسه تاشده گرافن در مقیاس نانو نشأت می‌گیرد. در این کامپوزیت، گرافن اوریگامی با الگوی تا خوردگی میورا نقش هسته فعال را ایفا کرده و با باز شدن تدریجی تاشده‌ها تحت کشش، باعث انبساط عرضی ماده می‌شود، درحالی که زمینه مسی علاوه بر انتقال بار و حفظ یکپارچگی، با چینش دو لایه گرافن اوریگامی عمود بر هم، ناهمسانگردی را رفع کرده و خواص همسان‌گرد در صفحه ایجاد می‌کند. همچنین، افزایش دما و درصد گرافن اوریگامی اثر آگزتیک را تقویت می‌کند و این ماده با منحنی تنش-کرنش سه مرحله‌ای خود، جذب انرژی بالایی دارد که آن را برای کاربردهای پیشرفته سبک‌وزن و با قابلیت تنظیم عملکرد ایده‌آل می‌سازد.

یک سلول واحد میورا در شکل ۱ نشان داده شده است. هندسه آن را می‌توان به روش‌های گوناگونی پارامتربندی کرد، در اینجا، سلول واحد را بر اساس ابعاد کوچک‌ترین جزء تشکیل‌دهنده‌اش — یعنی یک متوازی‌الاضلاع با اضلاع a و b و زاویه تند γ — و همچنین زاویه دووجهیِ تاخوردگی θ (که در بازه صفر تا ۹۰ درجه قرار دارد) میان وجوه و صفحه xy تعریف شده است. در این صورت، می‌توان نوشت [۱۹]:

$$
\begin{aligned}
H &= a\cdot\sin\theta\sin\gamma \\
S &= b\cdot\frac{\cos\theta\tan\gamma}{\sqrt{1+\cos^2\theta\tan^2\gamma}} \\
L &= a\cdot\sqrt{1-\sin^2\theta\sin^2\gamma} \\
V &= b\cdot\frac{1}{\sqrt{1+\cos^2\theta\tan^2\gamma}} \\
\tan\xi &= \cos\theta\tan\gamma \\
\sin\psi &= \sin\theta\sin\gamma \\
\cos\gamma &= \cos\xi\cos\psi \\
\sin\varphi &= \sin\xi/\sin\gamma
\end{aligned}
\qquad (۱)
$$

ACCEPTED MANUSCRIPT

که در آن $\xi \in [0, \gamma]$، $\psi \in [0, \gamma]$ و $\varphi \in [0, \pi/2]$ است. شایان ذکر است که ورق میورا-اوری[1] را می‌توان از یک ورق تخت و تنها با خم‌کاری در امتداد خطوط تا، تا کرد، از این رو، این ورق یک سطح قابل‌گسترش محسوب می‌شود.



شکل ۱: شماتیکی از یک سلول واحد میورا [۱۹].

Figure 1: Schematic of a Miura unit cell.

هنگامی که ورق میورا-اوری به صورت اوریگامی صلب مدلسازی می‌شود، دارای یک حالت انبساط درون‌صفحه‌ای واحد است که رفتار سینماتیکی آن را می‌توان با یک ضریب پواسون توصیف کرد [۱۹]:

$$\nu_{SL} = -\frac{\varepsilon_L}{\varepsilon_S} = -\frac{S}{L}\frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}S} = -\tan^2\xi \qquad (۲)$$

که در آن، ε_L و ε_S کرنش‌های حقیقی لحظه‌ای هستند. در نهایت ضریب پواسون همواره منفی است، منفی بودن ضریب پواسونِ درون‌صفحه‌ای ورق میورا-اوری، موضوعی شناخته‌شده است [۲۰، ۲۱]. با این حال، فرمول‌بندی‌های پیشین مانع از درک یک نکته کلیدی می‌شدند، اینکه ضریب پواسون تنها تابعی از زاویه ξ در صفحه xy (یا به عبارتی، نسبت S/V) است. این بینش، مقدمه‌ای برای معرفی متاماده سلولی تاشو[2] گرافن اوریگامی خواهد بود که در بخش بعدی توصیف می‌شود، با این حال پیش‌بینی خواص فراماد مبتنی بر گرافن اوریگامی با استفاده از مدل‌های میکرومکانیکی موجود، چالشی بزرگ محسوب می‌شود، به همین دلیل از روشی که در ادامه توضیح داده می‌شود برای تخمین خواص این مواد استفاده می‌شود.

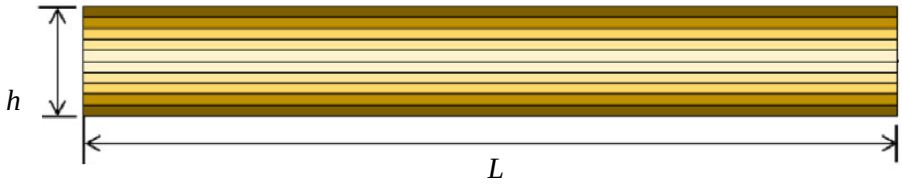
کسر حجمی کلی گرافن اوریگامی V_G^* از روی کسر وزنی W_{Gr} به صورت زیر محاسبه می‌شود [۲۲]:

$$V_{\mathrm{Gr}}^* = \frac{W_{\mathrm{Gr}}}{W_{\mathrm{Gr}} + \frac{\rho_{\mathrm{Gr}}}{\rho_{\mathrm{Cu}}}\left(1 - W_{\mathrm{Gr}}\right)} \qquad (۳)$$

که W_{Gr}، ρ_G و ρ_{cu} به ترتیب نشان‌دهنده کسر وزنی گرافن، چگالی گرافن و چگالی مس هستند. شکل ۲ یک تیر با طول L و ضخامت h از چندین لایه فراماد آگزتیک مبتنی بر گرافن اوریگامی را نشان می‌دهد که در جهت ضخامت، لایه به لایه تغییر می‌کنند تا توزیع‌های درجه‌بندی شده نسبت پواسون و سایر خواص مواد حاصل شود. در این مطالعه از توزیع یکنواخت گرافن اوریگامی در نانو تیر استفاده گردیده، یعنی در تمام لایه‌ها $V_G = \left(V_G^*\right)^K$ برقرار است که K نشان‌دهنده شماره لایه می‌باشد. با توجه به اینکه در تمام لایه‌ها خصوصیات یکسان است دیگر نیاز به تعریف تعداد لایه نیست و می‌توان مستقیما رابطه $V_G = V_G^*$ را نوشت.

[1] Miura-ori
[2] Folded cellular metamaterial

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل ۲: پیکربندی شماتیک یک تیر از چندین لایه فرامواد آگزتیک مبتنی بر گرافن اوریگامی [۱۵].

Figure 2: Schematic configuration of a beam composed of multiple layers of graphene origami-based auxetic metamaterial.

خواص مؤثر ماده مرکب شامل مدول یانگ E، چگالی ρ و ضریب پواسون ν از طریق توابع اصلاح f_E، f_ρ و f_ν به صورت زیر محاسبه می‌شوند [۲۲, ۲۳]:

$$E=\frac{1+\eta_{\mathrm{Gr}}\xi_{\mathrm{Gr}}V_{\mathrm{Gr}}}{1-\eta_{\mathrm{Gr}}V_{\mathrm{Gr}}}E_{\mathrm{Cu}}\,f_E$$
$$\rho=\left(\rho_{\mathrm{Gr}}V_{\mathrm{Gr}}+\rho_{\mathrm{Cu}}(1-V_{\mathrm{Gr}})\right)f_\rho \quad (۴)$$
$$\nu=\left(\nu_{\mathrm{Gr}}V_{\mathrm{Gr}}+\nu_{\mathrm{Cu}}(1-V_{\mathrm{Gr}})\right)f_\nu$$

که E_{cu} مدول یانگ مس، ν_G ضریب پواسون گرافن و ν_{cu} ضریب پواسون مس هستند. پارامترهای ξ_G و η_G برای توصیف راندمان تقویت گرافن معرفی شده‌اند و بر حسب مدول یانگ گرافن E_{Gr} تعریف می‌شوند [۲۲]:

$$\xi_{\mathrm{Gr}}=\frac{2l_{\mathrm{Gr}}}{h_{\mathrm{Gr}}}$$
$$\eta_{\mathrm{Gr}}=\frac{\frac{E_{\mathrm{Gr}}}{E_{\mathrm{Cu}}}-1}{\frac{E_{\mathrm{Gr}}}{E_{\mathrm{Cu}}}+\xi_{\mathrm{Gr}}} \quad (۵)$$

در مطالعه ژائو[1] و همکاران، برای استخراج توابع اصلاح، از روش برنامه‌ریزی ژنتیکی استفاده شده است. بدین ترتیب که ابتدا داده های مکانیکی مورد نیاز با استفاده از شبیه‌سازی دینامیک مولکولی تولید شدند. سپس، ساختارهای درختی ژن بر اساس این داده‌ها آموزش داده شدند. در نهایت، با رمزگشایی از این درختان ژنی و جایگذاری ضرایب وزنی و بایاس، فرمول‌های ریاضی توابع اصلاح برای مدل هالپین-تسای و قانون اختلاط به دست آمدند [۲۴]:

$$f_E=1.11-1.22V_{\mathrm{Gr}}-0.134\left(\frac{T}{T_0}\right)+0.559V_{\mathrm{Gr}}\left(\frac{T}{T_0}\right)-5.5H_{\mathrm{Gr}}V_{\mathrm{Gr}}+38H_{\mathrm{Gr}}V_{\mathrm{Gr}}^2-20.6H_{\mathrm{Gr}}^2V_{\mathrm{Gr}}^2$$
$$f_\rho=1.01-2.01V_{\mathrm{Gr}}^2-0.0131\left(\frac{T}{T_0}\right) \quad (۶)$$
$$f_\nu=1.01-1.43V_{\mathrm{Gr}}+0.165\left(\frac{T}{T_0}\right)-16.8H_{\mathrm{Gr}}V_{\mathrm{Gr}}-1.1H_{\mathrm{Gr}}V_{\mathrm{Gr}}\left(\frac{T}{T_0}\right)+16H_{\mathrm{Gr}}^2V_{\mathrm{Gr}}^2$$

که در آن H_{Gr} نشان دهنده درجه تاخوردگی گرافن اوریگامی (مقداری بین ۰ تا ۱ که نشان‌دهنده درصد پوشش اتم‌های هیدروژن است)، T دمای کاری و T_0 دمای مرجع ۳۰۰ کلوین است.

۲-۲- روش‌ها

در این بخش یک نانوتیر با طول L و ضخامت h و عرض b شامل مبدا مختصات در مرکز تیر، در نظر گرفته می‌شود. بر اساس تئوری کلاسیک تیر اویلر-برنولی[2]، میدان جابجایی تیر به شکل زیر نوشته می‌شود [۲۵]:

$$U(x,z,t)=-z\frac{\partial w(x,t)}{\partial x}$$
$$W(x,z,t)=w(x,t). \quad (۷)$$

[1] Zhao
[2] Euler–Bernoulli (classical beam theory)

ACCEPTED MANUSCRIPT

که علامت منفی در این رابطه نشان‌دهنده فرض قرارگیری محور z به سمت بالا (در راستای مثبت) است. مولفه U جابجایی در راستای محور x و مولفه W نشان‌دهنده جابجایی در راستای محور z است. همچنین مولفه‌های کرنش به صورت زیر تعریف می‌شوند [۲۶]:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial U}{\partial x} = -z\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$$
$$\gamma_{xz} = \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} = 0 \quad (۸)$$

تئوری الاستیسیته غیرموضعی ارینگن[1]، بیان می‌کند که میدان تنش در یک نقطه x از یک محیط الاستیک پیوسته نه تنها به میدان کرنش در همان نقطه، بلکه به کرنش‌های تمام نقاط دیگر جسم نیز وابسته است. بنابراین، تانسور تنش غیرموضعی σ در نقطه x به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۷]:

$$\sigma_{ij}(x) = \int_V K(|x-x'|,\tau) C_{ijkl}\varepsilon_{kl}(x')dV(x') \quad (۹)$$

که در آن σ_{ij} تانسور تنش، ε_{ij} تانسور کرنش، C_{ijkl} تانسور مدول الاستیسیته، K ($|x-x'|,\tau$) تابع هسته (کرنل)، $|x-x'|$ فاصله اقلیدسی و $\tau = \frac{e_0 a}{l}$ که در آن e_0 یک ثابت مناسب برای هر ماده، a طول مشخصه داخلی (مثلاً طول پیوند، پارامتر شبکه و فاصله دانه‌ای) و l طول مشخصه خارجی (مثلاً طول ترک و طول موج) است. از آنجایی که حل تحلیلی انتگرال فضایی غیرموضعی معادله (۲) بسیار دشوار است، ارینگن معادله انتگرالی-جزئی را به یک معادله دیفرانسیل مرتبه دوم معادل در ناحیه دو بعدی به صورت زیر ساده‌سازی کرد [۲۷]:

$$\left(1-\tau^2 l^2 \nabla^2\right)\sigma = T \quad (۱۰)$$

رابطه ساختاری غیرموضعی برای نانوتیر ایزوتروپیک همگن، را می‌توان به صورت زیر نوشت [۲۸]:

$$\sigma_{xx}(x) - \mu\frac{\partial^2 \sigma_{xx}}{\partial x^2} = E\varepsilon_{xx} \quad (۱۱)$$

که در آن $\mu = (e_0 a)^2$ بوده که نشان‌دهنده پارامتر غیرموضعی می‌باشد. اگر از بسط سری عملگر معکوس استفاده شود، می‌توان نوشت:

$$\sigma_{xx}(x) = E\left(1-\mu\frac{\partial^2}{\partial x^2}\right)^{-1}\varepsilon_{xx} = E\left(\varepsilon_{xx} + \mu\frac{\partial^2\varepsilon_{xx}}{\partial x^2} + \mu^2\frac{\partial^4\varepsilon_{xx}}{\partial x^4} + \ldots\right) \quad (۱۲)$$

که در حالت مرتبه اول (معمول در کاربردهای مهندسی) به صورت زیر خلاصه می‌شود:

$$\sigma_{xx}(x) = E\left(\varepsilon_{xx} + \mu\frac{\partial^2\varepsilon_{xx}}{\partial x^2}\right) \quad (۱۳)$$

فرم انرژی پتانسیل U و جنبشی T می تواند به صورت زیر ارائه گردد:

$$U = \frac{1}{2}\int_V \sigma_{xx}\varepsilon_{xx}\, dV$$
$$T = \frac{1}{2}\int_V \left(\dot{U}^2 + \dot{W}^2\right) dV \quad (۱۴)$$

با جایگذاری رابطه (۱۳) در (۱۴) انرژی پتانسیل به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$U = \frac{1}{2}\int_V \left[E\varepsilon_{xx}^2 + \mu E\varepsilon_{xx}\frac{\partial^2\varepsilon_{xx}}{\partial x^2}\right]dV \quad (۱۵)$$

با انتگرال‌گیری جزئی (برای تبدیل مشتق دوم به مشتق اول) خواهیم داشت:

[1] Eringen's nonlocal elasticity theory

ACCEPTED MANUSCRIPT

$$\int_V \varepsilon_{xx} \frac{\partial^2 \varepsilon_{xx}}{\partial x^2} dV = \left[\varepsilon_{xx} \frac{\partial \varepsilon_{xx}}{\partial x} \right]_0^L - \int_V \left(\frac{\partial \varepsilon_{xx}}{\partial x} \right)^2 dV \quad (۱۶)$$

جمله مرزی $\left[\varepsilon_{xx} \frac{\partial \varepsilon_{xx}}{\partial x} \right]_0^L$ باید برای حذف شدن، در دو سر تیر صفر شود. در تئوری اویلر-برنولی، شرایط مرزی کلاسیک به گونه‌ای هستند که این جمله مرزی حذف می‌شود. در ادامه، هر حالت به طور جداگانه توضیح داده می‌شود. در تکیه‌گاه ساده در این حالت، جابجایی و لنگر خمشی $M = -EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$ در دو سر تیر صفر است:

$$w(0) = 0, \quad w(L) = 0, \quad M(0) = 0, \quad M(L) = 0 \quad (۱۷)$$

که جمله مرزی به دلیل صفر بودن ε_{xx} در مرزها صفر می‌شود. در حالت تکیه‌گاه گیردار، جابجایی و شیب در دو سر تیر صفر است:

$$w(0) = 0, \quad w(L) = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial x}(0) = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial x}(L) = 0 \quad (۱۸)$$

با توجه به رابطه $\varepsilon_{xx} = -z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$ در مرزها $\varepsilon_{xx} = 0$ است. زیرا w و مشتق اول آن در مرز صفر هستند (هرچند مشتق دوم ممکن است صفر نباشد، اما صفر بودن w برای صفر شدن ε_{xx} کافی نیست؛ اما در تکیه‌گاه گیردار، شرط $\frac{\partial w}{\partial x} = 0$ باعث می‌شود که $\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$ لزوماً صفر نباشد. با این حال، درعمل برای تیرهای اویلر-برنولی، شرط مرزی گیردار $\varepsilon_{xx} = 0$ معمولاً در مرز همراه است، زیرا تغییر شکل خمشی در تکیه‌گاه گیردار صفر است). بنابراین جمله مرزی حذف می‌شود. در تکیه‌گاه آزاد، نیروی برشی $V = -EI \frac{\partial^3 w}{\partial x^3}$ و لنگر خمشی در دو سر تیر صفر هستند:

$$M(0) = 0, \quad M(L) = 0, \quad V(0) = 0, \quad V(L) = 0 \quad (۱۹)$$

در این حالت داریم:

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}(0) = 0, \quad \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}(L) = 0 \quad \Rightarrow \quad \varepsilon_{xx}(0) = 0, \quad \varepsilon_{xx}(L) = 0 \quad (۲۰)$$

پس جمله مرزی حذف می‌شود و در نهایت فرم نهائی انرژی پتانسیل به صورت زیر است:

$$U = \frac{1}{2} \int_V \left[E\varepsilon_{xx}^2 - \mu E \left(\frac{\partial \varepsilon_{xx}}{\partial x} \right)^2 \right] dV \quad (۲۱)$$

باید توجه داشت که شرایط مرزی کلاسیک به کار رفته در اینجا، یک تقریب ایده‌آل را نشان می‌دهد، با این حال، پارامتر غیر موضعی به طور مؤثر اثرات وابسته به اندازه را در مقیاس نانو در نظر می‌گیرد.

با به کار بردن روش جداسازی متغیرها، جابجایی در راستای محور z می‌تواند به فرم $w(x,t) = \sum_{n=1}^{N} W_n(t) N_n(x)$ نوشته شود که $N_n(x)$ تابع شکل بوده و تابع شرط مرزی اساسی است. در نهایت فرم انرژی پتانسیل و جنبشی نانوتیر به صورت زیر ارائه می‌گردد:

$$U = \frac{1}{2} \int_V E \left[\left(-z \sum_{n=1}^{N} W_n \frac{d^2 N_n}{dx^2} \right)^2 - \mu \left(-z \sum_{n=1}^{N} W_n \frac{d^3 N_n}{dx^3} \right)^2 \right] dV$$
$$T = \frac{1}{2} \int_V \rho \left[\left(-z \sum_{n=1}^{N} \frac{dW_n}{dt} \frac{dN_n}{dx} \right)^2 + \left(\sum_{n=1}^{N} \frac{dW_n}{dt} N_n \right)^2 \right] dV \quad (۲۲)$$

ACCEPTED MANUSCRIPT

به منظور استخراج معادلات نهایی، روش تعمیم یافته لاگرانژ به کار گرفته می شود [۲۶]:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{W}_n}\right)-\frac{\partial T}{\partial W_n}+\frac{\partial P}{\partial W_n}=0 \qquad (۲۳)$$

در نهایت معادلات ارتعاشات آزاد نانوتیر به صورت زیر ارائه می‌گردد:

$$M\ \ddot{d}+K\ d=0 \qquad (۲۴)$$

که M و K به ترتیب ماتریس جرم و سفتی با مرتبه $N\times N$ بوده و d بردار جابجایی شامل مولفه‌های $W_n(t)$ از مرتبه $N\times 1$ است:

$$M^{mn}=\int_V z^2\rho\frac{dN_m}{dx}\frac{dN_n}{dx}dV+\int_V \rho N_m N_n dV$$
$$K^{mn}=\int_V z^2 E\frac{d^2N_m}{dx^2}\frac{d^2N_n}{dx^2}dV-\int_V z^2\mu E\frac{d^3N_m}{dx^3}\frac{d^3N_n}{dx^3}dV \qquad (۲۵)$$

در نهایت با برابر صفر قرار دادن دترمینان $(K-M\omega^2)$، فرکانس‌های طبیعی ارتعاشات آزاد نانوتیر ω محاسبه می‌گردد. برای شرایط مرزی نانوتیر با تکیه‌گاه‌های دو سر ساده، تابع شکل به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$N_n(x)=\sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \qquad (۲۶)$$

این تابع شکل به گونه‌ای انتخاب شده که شرایط مرزی زیر را در دو انتهای تیر یعنی جابجایی صفر و لنگر خمشی صفر را برآورده کند:

$$W(0)=W(\mathrm{L})=0 \ \rightarrow\ N_n(0)=N_n(\mathrm{L})=0$$
$$M(0)=M(\mathrm{L})=0 \ \rightarrow\ \frac{d^2N_n}{dx^2}(0)=\frac{d^2N_n}{dx^2}(L)=0 \qquad (۲۷)$$

۳- نتایج و بحث‌ها

با فرض دمای محیط ۳۰۰ کلوین، ضخامت تیر ۱ نانومتر، سطح مقطع مربعی، طول ۱۰ برابر ضخامت، شرایط مرزی با دو تکیه‌گاه ساده، پارامتر غیرموضعی μ برابر ۲ نانومتر، کسر وزنی گرافن اوریگامی ۲ درصد، تاخوردگی گرافن اوریگامی ۸۰ درصد، پارامتر l_{Gr} ۸/۳۷۶ نانومتر، h_{Gr} ۰/۳۴ نانومتر، مدول‌یانگ، ضریب پواسون و چگالی مس به ترتیب ۶۵/۷۹ گیگاپاسکال، ۰/۳۸۷ و ۸۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و مدول‌یانگ، ضریب پواسون و چگالی گرافن به ترتیب ۹۲۹/۵۷ گیگاپاسکال، ۰/۲۲ و ۱۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب درنظر گرفته می‌شود [۱۵]. در مقاله ارائه شده این مقادیر ثابت هستند و هر جا یکی از این پارامترها تغییر کند، مقدار پارامتر جدید ذکر می شود.

۳-۱- صحت‌سنجی

به منظور صحت‌سنجی معادلات ارائه شده، فرکانس‌های طبیعی نانوتیرهای تقویت‌شده با گرافن اوریگامی با شرایط مرزی دو سر ساده در دمای ۳۰۰ کلوین به صورت بدون‌بعد از طریق فرمول $\lambda=\omega L^2\sqrt{\frac{\rho A}{E\ I}}$ محاسبه می‌گردد که $A=bh$ مساحت سطح مقطع نانوتیر و $I=\frac{1}{12}bh^3$ ممان اینرسی سطح مقطع آن بوده و این نکته قابل ذکر است که مواد استفاده شده تاثیری در عدد نهایی فرکانس بدون بعد ندارند و با فرض ضخامت تیر ۱ نانومتر، سطح مقطع مربعی، طول ۱۰ برابر ضخامت می‌باشد که با توجه به مقالات مرجع این مقدار در نظر گرفته می‌شود. جدول ۱ فرکانس طبیعی نانوتیرهای تقویت‌شده با گرافن اوریگامی و مقایسه آن در حالت بی بعد با مراجع مختلف را نشان می‌دهد. نتایج جدول ۱ صحت معادلات تئوری ارائه‌شده در این مقاله را تأیید می‌کند. با این حال، همانطور که مشاهده می‌شود، تفاوت‌های جزئی (کمتر از ۲ درصد) بین نتایج کار حاضر و مراجع ذکر شده در جدول ۱ وجود دارد.

ACCEPTED MANUSCRIPT

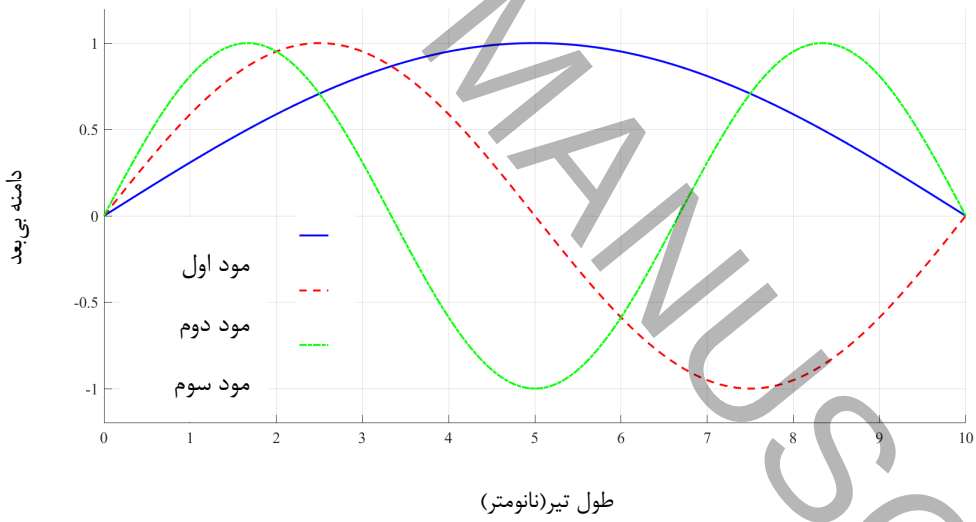
Table 1: Natural frequencies of graphene origami auxetic metamaterial nanobeams for simply-supported boundary conditions and their dimensionless comparison with various references.

جدول ۱: فرکانس‌های طبیعی نانوتیرهای فراماده آگزتیک گرافن اوریگامی برای شرایط مرزی دو سر ساده و مقایسه بی‌بعد آن‌ها با مراجع مختلف.

پارامتر غیرموضعی (نانومتر مربع)	فرکانس طبیعی (گیگاهرتز) کار حاضر	فرکانس طبیعی (بدون‌بعد) کار حاضر	فرکانس طبیعی (بدون‌بعد) شیمسک[1] [۲۸]	فرکانس طبیعی (بدون‌بعد) توین[2] [۲۹]	فرکانس طبیعی (بدون‌بعد) آیدگو[3] [۳۰]	فرکانس طبیعی (بدون‌بعد) ردی[4] [۳۱]
۰	۱۴/۷۲	۹/۸۲۹۳	۹/۸۶۹۶	۹/۷۸۳۸	۹/۷۴۴۳	۹/۸۶۹۶
۱	۱۳/۹۷	۹/۳۳۱۶	۹/۴۱۵۸	۹/۳۳۴۱	۹/۲۹۳۱	۹/۴۱۵۹
۲	۱۳/۱۹	۸/۸۰۵۹	۹/۰۱۹۴	۸/۹۴۱۳	۸/۸۹۹۴	۹/۰۹۵۱

این تفاوت‌ها ناشی از ۲ عامل اصلی است، شامل نوع تئوری تیر، که در کار حاضر از تئوری تیر اویلر-برنولی استفاده شده است، در حالی که مرجع [۲۹] از تئوری تغییر شکل برشی سینوسی و مرجع [۳۱] از تئوری تیر ردی بهره برده‌اند. دلیل تفاوت دیگر هم روش حل است که مراجع [۲۸] و [۳۰] از روش‌های تحلیلی و گلرکین استفاده کرده‌اند، در حالی که در کار حاضر، روش انرژی همراه با جداسازی متغیرها و معادلات لاگرانژ به کار رفته است. این تفاوت در روش حل نیز می‌تواند منجر به اختلاف‌های جزئی در نتایج شود.

این نکته حائز اهیمت است که اثر دما بر ارتعاش آزاد تیرهای فراماده اگزتیک گرافن اوریگامی قبلاً به طور جامع در مرجع [۱۷] با استفاده از تئوری تیر کلاسیک بررسی شده، به همین دلیل برای جلوگیری از تکرار و تمرکز بر جنبه‌های نوآورانه کار ما (یعنی اثرات مقیاس غیرموضعی)، ما دما را در مطالعات پارامتریک، ثابت در ۳۰۰ کلوین نگه داشته‌ایم. در نهایت ۳ مود اول ارتعاشی نانوتیرهای فراماده آگزتیک گرافن اوریگامی در شکل ۳ رسم شده است.



شکل ۳: شکل سه مود اول ارتعاشی نانوتیرهای فراماده آگزتیک گرافن اوریگامی.

Figure 3: The first three vibration mode shapes of the graphene origami auxetic metamaterial nanobeams.

[1] Şimşek
[2] Tuyen
[3] Aydogu
[4] Reddy

ACCEPTED MANUSCRIPT

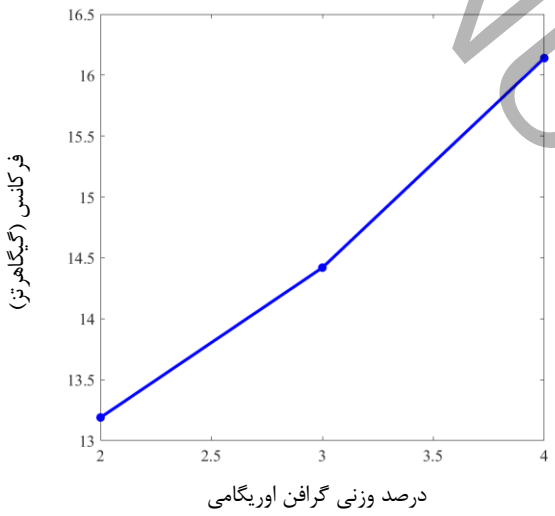
۲-۳- تاثیر درصد وزنی گرافن اوریگامی

در این بخش تاثیر درصد وزنی گرافن اوریگامی بر فرکانس‌های طبیعی، مدول یانگ، چگالی و ضریب پواسون نانوتیرهای فراماده آگزتیک گرافن اوریگامی در جدول ۲ ارائه شده و در شکل ۴ فرکانس طبیعی بر حسب درصدهای وزنی ترسیم شده است. با افزایش ۵۰ درصدی میزان درصد وزنی گرافن اوریگامی (از ۲ به ۳ درصد)، مدول یانگ، فرکانس طبیعی و قدرمطلق ضریب پواسون نانوتیر به ترتیب ۱۳/۲۲، ۹/۳۳ و ۳۱۴/۹۰ درصد افزایش یافته، در حالی که با افزایش ۱۰۰ درصدی میزان درصد وزنی گرافن اوریگامی (از ۲ به ۴ درصد)، مدول یانگ، فرکانس طبیعی و قدرمطلق ضریب پواسون نانوتیر به ترتیب ۳۳/۹۳، ۲۲/۳۷ و ۵۸۰/۶۷ درصد افزایش یافته است. همچنین چگالی نانوتیر ۵/۲۷ درصد و ۱۰/۶۳ درصد کاهش یافته است. افزایش درصد وزنی گرافن اوریگامی طبق معادله (۳) باعث افزایش مدول یانگ نانوتیر طبق معادلات (۴) می‌گردد، همچنین با توجه به معادله (۶) و معادله (۴)، چگالی کاهش و قدرمطلق ضریب پواسون افزایش یافته است. در نهایت فرکانس طبیعی با توجه به افزایش سفتی موثر و کاهش جرم موثر نانوتیر طبق معادله (۲۵) افزایش می‌یابد. پس افزایش درصد وزنی گرافن اوریگامی هم‌زمان خاصیت آگزتیک و فرکانس طبیعی نانوتیر را تقویت می‌کند. دلیل تغییرات زیاد نسبت پواسون بر حسب درصد وزنی گرافن اوریگامی در جدول ۲، جمله $۱۶H_G^{۲}V_G^{۲}$ در تابع اصلاحی f_v در معادله ۶ است که با توجه به توان دوم V_{Gr}، تغییرات بیشتری نسبت به جمله‌های دیگر در این تابع اصلاحی ایجاد می‌کند. در مورد چگالی نیز جمله $-۲V_G^{۲}$ بیشترین تاثیر را هنگام تغییرات درصد وزنی گرافن اوریگامی بر تابع اصلاحی چگالی ایفا می‌کند.

Table 2: Natural frequencies, Young's modulus, density, and Poisson's ratio of graphene origami auxetic metamaterial nanobeams with different weight percentages of graphene origami.

جدول ۲: فرکانس‌های طبیعی، مدول یانگ، چگالی و ضریب پواسون نانوتیرهای فراماده آگزتیک گرافن اوریگامی با درصدهای وزنی مختلف گرافن اوریگامی.

درصد وزنی گرافن اوریگامی	مدول یانگ (گیگاپاسکال)	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	ضریب پواسون	فرکانس طبیعی (گیگاهرتز)
۲	۸۵/۰۲۹	۸۰۰۴/۶	-۰/۰۶۳۱	۱۳/۱۹
۳	۹۶/۲۶۶	۷۵۸۲/۹	-۰/۲۶۱۸	۱۴/۴۲
۴	۱۱۳/۸۸۰	۷۱۵۳/۴	-۰/۴۲۹۵	۱۶/۱۴



شکل ۴: تاثیر درصدهای وزنی گرافن اوریگامی بر فرکانس طبیعی نانوتیرهای فراماده آگزتیک گرافن اوریگامی.

Figure 4: Effect of weight percentages of graphene origami on the natural frequencies of graphene origami auxetic metamaterial nanobeams.

ACCEPTED MANUSCRIPT

۳-۳- تاثیر درصد تاخوردگی گرافن اوریگامی

در این قسمت، تاثیر میزان تاخوردگی گرافن اوریگامی بر فرکانس‌های طبیعی، مدول یانگ، چگالی و ضریب پواسون نانوتیرهای فراماده آگزتیک گرافن اوریگامی در جدول ۳ ارائه شده و در شکل ۵ فرکانس طبیعی بر حسب درصدهای تاخوردگی متنوع گرافن اوریگامی ترسیم شده است.. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش تاخوردگی از ۷۰ به ۸۰ درصد مدول یانگ و فرکانس طبیعی به ترتیب ۶/۲۷ و ۳/۱۶ درصد کاهش می‌یابند، در حالی که قدر مطلق ضریب پواسون ۵۳۰ درصد افزایش می‌یابد. این روند با افزایش تاخوردگی از ۸۰ به ۹۰ درصد نیز ادامه می‌یابد، به طوری که مدول یانگ و فرکانس طبیعی به ترتیب ۷,۲۱ و ۳,۷۱ درصد کاهش و قدر مطلق ضریب پواسون ۸۲,۵ درصد افزایش می‌یابد، چگالی نیز در تمام بازه‌ها ثابت می‌ماند. این تغییرات با استفاده از روابط (۴) و (۶) قابل توجیه است: افزایش درجه تاخوردگی از طریق جملات منفی شامل $۵/۵H_G V_G$ و $۲۰/۶H_G V_G^{۲}$ مدول یانگ را کاهش می‌دهد، در حالی که تابع اصلاح f_ν با جملات مرتبط با H_{Gr}، ضریب پواسون را به سمت مقادیر منفی‌تر (رفتار آگزتیک قوی‌تر) سوق می‌دهد. سازوکار فیزیکیِ کاهش مدول یانگ با افزایش میزان تاخوردگی را می‌توان به این صورت توضیح داد که هندسه تاخورده، ویژگی‌های ری-اینترنت[1] ایجاد می‌کند که همچون لولاهای انعطاف‌پذیر عمل می‌کنند که تحت بارگذاری مکانیکی، این تاخوردگی‌ها به‌آسانی باز می‌شوند و تغییر شکل را بدون انتقال مؤثر تنش پذیرا می‌شوند که این امر منجر به بروز اثر نرم‌شدگی هندسی می‌گردد. به‌علاوه، نواحی تاخورده موجب ایجاد شکاف‌های موضعی میان ورق گرافن و ماتریس مس می‌شوند که سطح تماس مؤثر را کاهش داده و برهمکنش‌های بین‌سطحی واندروالسی را تضعیف می‌کنند. این کاهش انتقال تنش از ماتریس به گرافن، خود عاملی دیگر در کاهش کلی مدول یانگ مؤثر کامپوزیت محسوب می‌شود.

از آنجا که چگالی تحت تأثیر H_{Gr} قرار نمی‌گیرد، کاهش فرکانس طبیعی صرفاً ناشی از کاهش مدول یانگ بوده که باعث کاهش سفتی موثر طبق رابطه (۲۵) می‌گردد. این رفتار دوگانه نشان می‌دهد که اگرچه افزایش تاخوردگی خاصیت آگزتیک را به طور قابل توجهی تقویت می‌کند، اما به دلیل کاهش سفتی، فرکانس طبیعی نانوتیر را تضعیف نموده و طراحان باید با انتخاب بهینه میزان تا خوردگی، تعادل مناسبی بین این دو ویژگی ایجاد کنند.

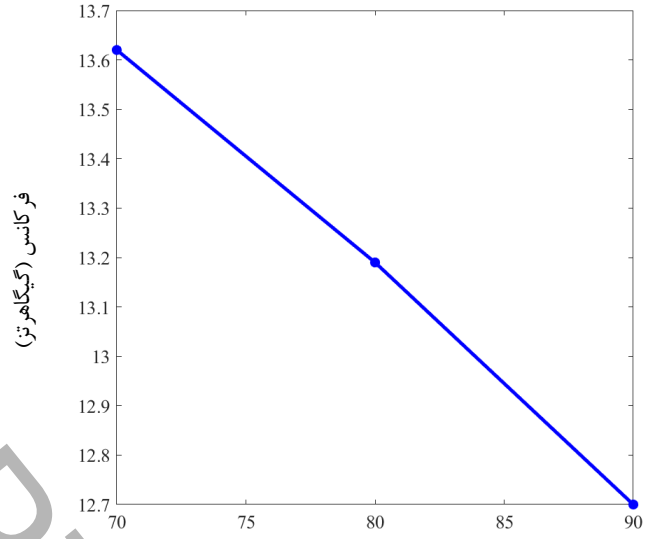
Table 3: Natural frequencies, Young's modulus, density, and Poisson's ratio of graphene origami auxetic metamaterial nanobeams with different folding percentages of graphene origami.

جدول ۳: فرکانس‌های طبیعی، مدول یانگ، چگالی و ضریب پواسون نانوتیرهای فراماده آگزتیک گرافن اوریگامی با درصدهای تاخوردگی مختلف گرافن اوریگامی.

درصد تاخوردگی گرافن اوریگامی	مدول یانگ (گیگاپاسکال)	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	ضریب پواسون	فرکانس طبیعی (گیگاهرتز)
۷۰	۹۰/۷۲	۸۰۰۴/۶	-۰/۰۱۰۰	۱۳/۶۲
۸۰	۸۵/۰۳	۸۰۰۴/۶	-۰/۰۶۳۱	۱۳/۱۹
۹۰	۷۸/۹۰	۸۰۰۴/۶	-۰/۱۱۵۱	۱۲/۷۰

[1] Re-entrant

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل ۵: تاثیر درصدهای تاخوردگی گرافن اوریگامی بر فرکانس‌های طبیعی نانوتیرهای فراماده آگزتیک گرافن اوریگامی.

Figure 5: Effect of folding percentages of graphene origami on the natural frequencies of graphene origami auxetic metamaterial nanobeams.

۴-۳- تاثیر طول نانوتیر

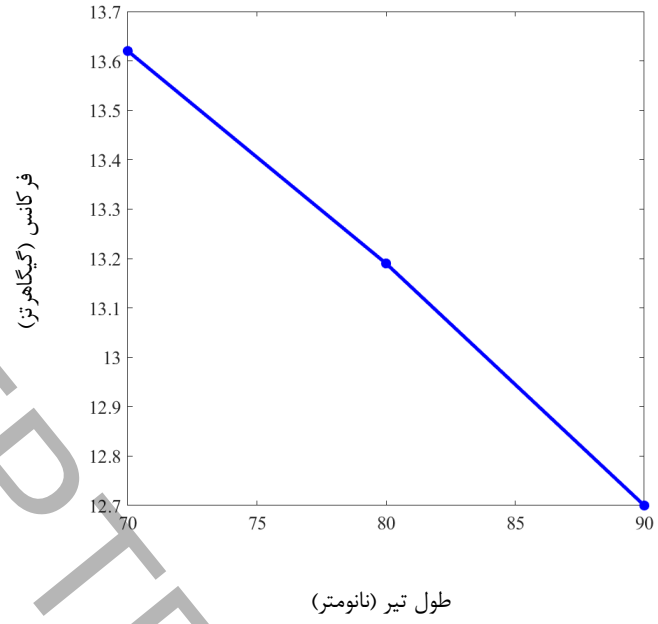
با توجه به وابستگی شدید فرکانس طبیعی به طول در تئوری اویلر-برنولی، در این بخش اثر افزایش طول نانوتیر بر پاسخ ارتعاشی و خواص مؤثر ماده مرکب بررسی می‌گردد. بدین منظور، نتایج مربوط به تغییرات فرکانس طبیعی، مدول یانگ، چگالی و ضریب پواسون برای سه طول مختلف در جدول ۴ گردآوری شده ارائه شده و در شکل ۶ فرکانس طبیعی بر حسب طول‌های متنوع نانوتیر ترسیم شده است. مشاهدات نشان می‌دهد که با افزایش طول نانوتیر مقادیر مدول یانگ، چگالی و ضریب پواسون بدون تغییر باقی می‌مانند، در حالی که فرکانس طبیعی ۳۳/۱۳ و ۵۲/۵۴ درصد با تغییر طول نانوتیر از $10h$ به $12/5h$ و $15h$ کاهش می‌یابد. این کاهش به دلیل افزایش طول نانوتیر و در نتیجه کاهش سختی خمشی مؤثر است، زیرا با افزایش طول، جرم و انعطاف‌پذیری تیر افزایش یافته و در نتیجه فرکانس طبیعی به شدت کاهش می‌یابد. این رفتار مستقل از خواص ماده بوده و صرفاً ناشی از تغییرات هندسی است.

Table 4: Natural frequencies, Young's modulus, mass density, and Poisson's ratio of graphene origami auxetic metamaterial nanobeams with various lengths.

جدول ۴: فرکانس‌های طبیعی، مدول یانگ، چگالی و ضریب پواسون نانوتیرهای فراماده آگزتیک گرافن اوریگامی با طول‌های مختلف.

طول نانوتیر (نانومتر)	مدول یانگ (گیگاپاسکال)	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	ضریب پواسون	فرکانس طبیعی (گیگاهرتز)
L=10 h	۸۵/۰۲۹	۸۰۰۴/۶	-۰/۰۶۳۱	۱۳/۱۹
L=12.5 h	۸۵/۰۲۹	۸۰۰۴/۶	-۰/۰۶۳۱	۸/۸۲
L=15 h	۸۵/۰۲۹	۸۰۰۴/۶	-۰/۰۶۳۱	۶/۲۶

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل ۶: تاثیر طول نانوتیر بر فرکانس‌های طبیعی نانوتیرهای فرامادہ آگزتیک گرافن اوریگامی.

Figure 6: Effect of nanobeam length on the natural frequencies of graphene origami auxetic metamaterial nanobeams.

۴-۴- تاثیر پارامتر غیرموضعی

از آنجا که در مقیاس نانو، اثرات غیرموضعی نقش تعیین‌کننده‌ای در پاسخ مکانیکی سازه‌ها ایفا می‌کنند، در این بخش تأثیر افزایش پارامتر غیرموضعی بر فرکانس طبیعی و خواص مؤثر نانوتیر در جدول ۵ ارائه شده ارائه شده و در شکل ۷ فرکانس طبیعی بر حسب پارامترهای غیرموضعی با مقادیر مختلف ترسیم شده است.. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش پارامتر غیرموضعی از ۱ به ۲ و از ۲ به ۳ نانومتر مربع، مدول یانگ، چگالی و ضریب پواسون بدون تغییر باقی می‌مانند، در حالی که فرکانس طبیعی نانوتیر به ترتیب ۵/۵۸ و ۱۱/۶۰ درصد کاهش می‌یابد و نشان‌دهنده تأثیر غیرخطی پارامتر غیرموضعی بر فرکانس است. این کاهش ناشی از اثرات غیرموضعی است که در مدل ارینگن به صورت کاهش سفتی مؤثر در مودهای پایین ظاهر می‌شود. با افزایش پارامتر غیرموضعی، جمله غیرموضعی $-\int_V z^2 \mu E \frac{d^3 N_m}{dx^3} \frac{d^3 N_n}{dx^3} dV$ در ماتریس سفتی بزرگتر شده و سفتی مؤثر را کاهش می‌دهد، در نتیجه فرکانس طبیعی کاهش می‌یابد. این رفتار تأکید می‌کند که در مقیاس نانو، اثرات غیرموضعی نمی‌توانند نادیده گرفته شوند و باید در طراحی نانوساختارها لحاظ گردند.

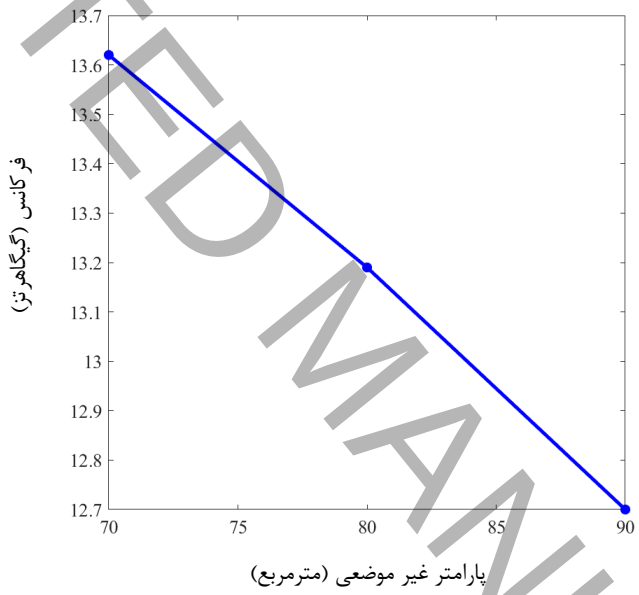
کاهش فرکانس طبیعی با افزایش پارامتر غیرموضعی، پیامدهای فیزیکی قابل توجهی برای طراحی و ساخت نانودستگاه‌ها دارد. پارامتر غیرموضعی نیروهای بین‌اتمی دوربرد و ماهیت گسسته شبکه اتمی را در نظر می‌گیرد که به طور مؤثر سفتی نانوتیر را کاهش می‌دهد و باعث می‌شود که نانوتیر نرم‌تر از آنچه مکانیک پیوسته کلاسیک پیش‌بینی می‌کند، رفتار کند. این اثر نرم‌شدن، فرکانس تشدید را به مقادیر پایین‌تر منتقل می‌کند و خطر ناپایداری دینامیکی زودرس یا شکست ناشی از تشدید را در نانودستگاه‌هایی که تحت ارتعاشات خارجی مانند نویز حرارتی یا محرک مکانیکی کار می‌کنند، افزایش می‌دهد. علاوه بر این، این اثر اندازه با کاهش ابعاد دستگاه برجسته‌تر می‌شود که نشان می‌دهد تئوری پیوسته کلاسیک برای نانودستگاه‌های فوق‌کوچک که طول مشخصه آنها به مقیاس طول داخلی ماده نزدیک می‌شود، کافی نیست. بنابراین، اثر غیرموضعی باید در طراحی نانودستگاه‌های نسل بعدی، از جمله نانوتشدیدگرها، نانوحسگرها و نانومحرک‌ها، برای اطمینان از پیش‌بینی دقیق رفتار دینامیکی و عملکرد قابل اعتماد آنها وارد شود.

ACCEPTED MANUSCRIPT

Table 5: Natural frequencies, Young's modulus, density, and Poisson's ratio of graphene origami auxetic metamaterial nanobeams with various nonlocal parameter.

جدول ۵: فرکانس‌های طبیعی، مدول یانگ، چگالی و ضریب پواسون نانوتیرهای فراماده آگزتیک گرافن اوریگامی با با پارامترهای غیرموضعی متنوع.

پارامتر غیر موضعی (نانومتر مربع)	مدول یانگ (گیگاپاسکال)	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	ضریب پواسون	فرکانس طبیعی (گیگاهرتز)
۱	۸۵/۰۲۹	۸۰۰۴/۶	-۰/۰۶۳۱	۱۳/۹۷
۲	۸۵/۰۲۹	۸۰۰۴/۶	-۰/۰۶۳۱	۱۳/۱۹
۳	۸۵/۰۲۹	۸۰۰۴/۶	-۰/۰۶۳۱	۱۲/۳۵



شکل ۷: تاثیر پارامتر غیر موضعی بر فرکانس‌های طبیعی نانوتیرهای فراماده آگزتیک گرافن اوریگامی.

Figure 7: Effect of the nonlocal parameter on the natural frequencies of graphene origami auxetic metamaterial nanobeams.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ارتعاشات آزاد نانوتیرهای فراماده آگزتیک تقویت‌شده با گرافن اوریگامی با استفاده از تئوری غیرموضعی ارینگن و تئوری کلاسیک تیر اویلر-برنولی مورد تحلیل قرار گرفت. گرافن اوریگامی به عنوان یک ماده فراماده با ساختار تاخورده در مقیاس نانو، به دلیل هندسه خاص خود رفتاری آگزتیک (ضریب پواسون منفی) از خود نشان داد، به گونه‌ای که تحت کشش، تاهای آن باز شد و ماده در جهت عمود بر نیروی اعمالی منبسط شد. این ویژگی منحصربه‌فرد، همراه با نسبت استحکام به وزن بالا و قابلیت جذب انرژی عالی، این نانومواد را به گزینه‌ای ایده‌آل برای کاربردهای پیشرفته تبدیل کرد. مدل‌سازی تئوری بر اساس روش انرژی و گسسته‌سازی با توابع شکل سینوسی برای شرایط مرزی دوسر ساده انجام شد و ماتریس‌های جرم و سفتی با در نظر گرفتن اثرات غیرموضعی استخراج گردید. تأثیر پارامترهای کلیدی بر فرکانس طبیعی به شرح زیر مورد بررسی قرار گرفت:

ACCEPTED MANUSCRIPT

- افزایش درصد وزنی گرافن اوریگامی باعث افزایش مدول یانگ و کاهش چگالی مؤثر شد و در نتیجه فرکانس طبیعی را به طور قابل توجهی افزایش داد. این رفتار نشان‌دهنده نقش مؤثر گرافن در افزایش سختی و بهبود عملکرد دینامیکی نانوتیر بود و از منظر مهندسی، این یافته امکان طراحی نانوتشدیدگرها و نانوحسگرهایی با فرکانس تشدید بالاتر و حساسیت بیشتر را فراهم می‌کند.

- افزایش میزان تاخوردگی گرافن اوریگامی، اگرچه خاصیت آگزتیک (قدر مطلق ضریب پواسون منفی) را تقویت کرد، اما به دلیل کاهش مدول یانگ ناشی از جملات کاهنده در تابع اصلاح، فرکانس طبیعی را کاهش داد. این موضوع بیانگر وجود تعادل میان خواص آگزتیک و سفتی دینامیکی بود و این مورد نشان می‌دهد که برای طراحی نانوتشدیدگرها و نانوحسگرها باید تعادل بهینه‌ای میان خاصیت آگزتیک مطلوب و فرکانس تشدید مورد نیاز برقرار کرد.

- افزایش طول نانوتیر به دلیل افزایش جرم و افزایش انعطاف‌پذیری، باعث کاهش شدید فرکانس طبیعی شد. این موضوع بر لزوم انتخاب دقیق ابعاد در طراحی نانوتشدیدگرها و نانوحسگرها تأکید می‌کند، زیرا تغییرات جزئی در طول می‌تواند فرکانس تشدید را به طور چشمگیری جابجا کند.

- افزایش پارامتر غیرموضعی ناشی از اثرات اندازه در مقیاس نانو، با کاهش سفتی مؤثر، فرکانس طبیعی را کاهش داد و نشان‌دهنده لزوم لحاظ‌کردن این اثر در تحلیل نانوساختارها بود. این رفتار نشان می‌دهد که نادیده گرفتن اثر غیرموضعی در طراحی نانوتشدیدگرها و نانوحسگرها می‌تواند منجر به پیش‌بینی نادرست فرکانس تشدید و در نتیجه عملکرد نامناسب دستگاه شود.

در مجموع، این پژوهش نشان می‌دهد که با انتخاب بهینه پارامترهای طراحی نظیر درصد وزنی گرافن اوریگامی، درصد تاخوردگی گرافن اوریگامی، طول و پارامتر غیرموضعی می‌توان عملکرد دینامیکی نانوتیرهای فرامادہ آگزتیک گرافن اوریگامی را به طور قابل توجهی کنترل کرده و آن را برای کاربردهای حسگری، جاذب‌های انرژی و سازه‌های هوشمند بهینه‌سازی نمود.

منابع

[1] V.G. Veselago, The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ε and μ, Phys.-Usp., 10(4) (1968) 509-514.

[2] J.U. Surjadi, L. Gao, H. Du, X. Li, X. Xiong, N.X. Fang, Y. Lu, Mechanical metamaterials and their engineering applications, Adv. Eng. Mater., 21(3) (2019) 1800864.

[3] K.K. Saxena, R. Das, E.P. Calius, Three decades of auxetics research− materials with negative Poisson's ratio: a review, Adv. Eng. Mater., 18(11) (2016) 1847-1870.

[4] Z. Tahmasebi-Tahneh, M. Ranjbar-Roeintan, Low-velocity impact on sandwich beams with 2D curved re-entrant auxetic cores, Amirkabir J. Mech. Eng., (2025). (in Persian)

[5] B. Mekuye, B. Abera, Nanomaterials: An overview of synthesis, classification, characterization, and applications, Nano select, 4(8) (2023) 486-501.

[6] A. Husen, K.S. Siddiqi, Advances in smart nanomaterials and their applications, Elsevier, 2023.

[7] L. Hao-nan, L. Cheng, S. Ji-ping, Y. Lin-quan, Vibration analysis of rotating functionally graded piezoelectric nanobeams based on the nonlocal elasticity theory, Journal of Vibration Engineering & Technologies, 9(6) (2021) 1155-1173.

[8] I. Esen, A.A. Abdelrhmaan, M.A. Eltaher, Free vibration and buckling stability of FG nanobeams exposed to magnetic and thermal fields, Engineering with Computers, 38(4) (2022) 3463-3482.

[9] A.K. Gartia, S. Chakraverty, Free vibration of bi-directional functionally graded nanobeams resting on Winkler–Pasternak foundations, Journal of Vibration Engineering & Technologies, 12(Suppl 2) (2024) 1929-1945.

ACCEPTED MANUSCRIPT

[10] V.H. Binh, P.B. Khien, B. Van Tuyen, Bending, free, and forced vibration responses of nanobeams taking flexoelectricity and temperature into account, Journal of Vibration Engineering & Technologies, 13(7) (2025) 506.

[11] M. Fathalilou, M. Sadeghi, G. Rezazadeh, Nonlinear behavior of capacitive micro-beams based on strain gradient theory, Journal of Mechanical Science and Technology, 28(4) (2014) 1141-1151.

[12] A. Amiri, S. Fakhari, I. Pournaki, G. Rezazadeh, R. Shabani, Vibration analysis of circular magneto-electro-elastic nano-plates based on Eringen's nonlocal theory, (2015).

[13] T.W. Ebbesen, H. Hiura, Graphene in 3-dimensions: Towards graphite origami, in, Wiley Online Library, 1995.

[14] H.C. Schniepp, K.N. Kudin, J.-L. Li, R.K. Prud'homme, R. Car, D.A. Saville, I.A. Aksay, Bending properties of single functionalized graphene sheets probed by atomic force microscopy, ACS nano, 2(12) (2008) 2577-2584.

[15] S. Zhao, Y. Zhang, Y. Zhang, J. Yang, S. Kitipornchai, A functionally graded auxetic metamaterial beam with tunable nonlinear free vibration characteristics via graphene origami, Thin-Walled Struct., 181 (2022) 109997.

[16] B. Murari, S. Zhao, Y. Zhang, L. Ke, J. Yang, Vibrational characteristics of functionally graded graphene origami-enabled auxetic metamaterial beams with variable thickness in fluid, Eng. Struct., 277 (2023) 115440.

[17] X.-Y. Gao, Z.-Z. Wang, L.-S. Ma, Free vibration and buckling analysis of FG graphene origami-enabled auxetic metamaterial beams in a thermal environment: X.-Y. Gao et al, Acta Mechanica, 236(2) (2025) 1265-1287.

[18] B. Karami, M.H. Ghayesh, Nonlinear dynamics of graphene origami enabled auxetic metamaterial third-order beams, International Journal of Non-Linear Mechanics, (2026) 105374.

[19] M. Schenk, S.D. Guest, Geometry of Miura-folded metamaterials, Proceedings of the National Academy of Sciences, 110(9) (2013) 3276-3281.

[20] M. Koryo, Method of packaging and deployment of large membranes in space, The Institute of Space and Astronautical Science report, (618) (1985) 1-9.

[21] L. Mahadevan, S. Rica, Self-organized origami, Sci., 307(5716) (2005) 1740-1740.

[22] V.N. Anh, T. Van Ke, N.T.T. Huong, N.T. Hue, P.H. Tu, Nonlinear Free Vibrations of Functionally Graded Graphene Origami-Enabled Auxetic Metamaterial Skew-microplates with Variable Thickness Using Isogeometric Analysis, Defence Technology, (2025).

[23] P. Shi, V.N.V. Hoang, P.T. Thanh, Nonlinear postbuckling analysis of functionally graded graphene origami-enabled auxetic metamaterial plates with bi-directionally stepped thickness, Mechanics Based Design of Structures and Machines, (2025) 1-38.

[24] S. Zhao, Y. Zhang, Y. Zhang, W. Zhang, J. Yang, S. Kitipornchai, Genetic programming-assisted micromechanical models of graphene origami-enabled metal metamaterials, Acta Materialia, 228 (2022) 117791.

[25] H. Biglari, M. Nazarzadeh Ansaroudi, S. Rezazadeh Movahhed, Static response of smart beams equipped with extension/shearing piezoelectric patches considering Poisson's effect based on different theories, Amirkabir J. Mech. Eng., 48(4) (2016) 371-378. (in Persian)

[26] P. Olfati, M. Ranjbar-Roeintan, Low-velocity impact on hybrid-composite beams reinforced by MWCNTs and bamboo natural fibers: Analytical, experimental, and numerical approaches,

ACCEPTED MANUSCRIPT

Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 239(17) (2025) 7058-7067.

[27] A.C. Eringen, On differential equations of nonlocal elasticity and solutions of screw dislocation and surface waves, Journal of applied physics, 54(9) (1983) 4703-4710.

[28] M. Şimşek, Large amplitude free vibration of nanobeams with various boundary conditions based on the nonlocal elasticity theory, Composites Part B: Engineering, 56 (2014) 621-628.

[29] B. Van Tuyen, Buckling and free vibration response of organic nanobeams taking the temperature into account, Ain Shams Engineering Journal, 14(10) (2023) 102193.

[30] M. Aydogdu, A general nonlocal beam theory: its application to nanobeam bending, buckling and vibration, Physica E: low-dimensional systems and nanostructures, 41(9) (2009) 1651-1655.

[31] J. Reddy, Nonlocal theories for bending, buckling and vibration of beams, International journal of engineering science, 45(2-8) (2007) 288-307.

ACCEPTED MANUSCRIPT

ACCEPTED MANUSCRIPT