



MECHANICS OF SMART STRUCTURES

Available Online at: <http://jmss.qut.ac.ir/>



Design and Numerical Analysis of Variable Stiffness Metamaterial (VSM) Structures: A Novel Step in Materials Engineering and Multifunctional Applications

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Hossein Rahimi*

School of Mechanical Engineering,
Collage of Engineering, University of
Tehran

Ghader Faraji

School of Mechanical Engineering,
Collage of Engineering, University of
Tehran

Majid Baniassadi

School of Mechanical Engineering,
Collage of Engineering, University of
Tehran

* Correspondence

horahimi@ut.ac.ir

Article History

Received: 04 Mar, 2025

Accepted: 06 Nov, 2025

ePublished : 13 Nov, 2025

ABSTRACT

Metamaterials, as innovative materials, have played a key role in developing various technologies. Unlike natural materials, the properties of metamaterials depend on repetitive structures and advanced designs, offering unique capabilities such as tunable stiffness, energy absorption, vibration control, and wave management. These features enable the design of multifunctional components with high strength and adjustable mechanical properties, which have broad applications in industries such as medicine and civil engineering. This paper designs a basic cell with variable stiffness, capable of adjusting mechanical properties in different directions. The design of this cell is based on metamaterial principles and numerical analysis, and simulation results demonstrate that the proposed structure can provide diverse mechanical responses under various loading conditions. In the design process, several 2D models were developed, and after numerical simulation analyses, an optimized 3D model was produced by combining different geometries. The analysis results showed that the proposed structure has high stability and significant energy absorption, which can be used in applications such as stress control and designing components resistant to earthquakes or impacts.

Keywords: Metamaterial; Tunable Stiffness; Adjustable mechanical properties; Finite element analysis (FEA).

طراحی و تحلیل عددی ساختارهای فراماده با سختی متغیر: گامی جدید در مهندسی مواد و کاربردهای چند منظوره

حسین رحیمی*

دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تهران

مجید بنی اسدی

دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تهران

قادر فرجی

دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تهران

دلیل طراحی خاص و متغیر نسبت به نیرو در سه جهت اصلی می باشد. در فرآیند طراحی، مدل های دوبعدی متعددی توسعه داده شدند و پس از تحلیل شبیه سازی های عددی، مدل سه بعدی بهینه با استفاده از ترکیب هندسه های مختلف تولید شد. برای بررسی خواص این مدل، میدان تنشی این مدل در فازهای مختلف نیرویی و همچنین نمودار نیرو-جابجایی برای بررسی میزان سفتی ارایه شد. نتایج تحلیل ها نشان داد که ساختار پیشنهادی دارای پایداری بالا و جذب انرژی قابل توجهی بوده و می تواند در کاربردهایی مانند کنترل تنش و طراحی قطعات مقاوم در برابر زلزله یا ضربه مورد استفاده قرار گیرد.

کلید واژه ها

فراماده^۱، سفتی متغیر، خواص مکانیکی تغییرپذیر، شبیه سازی عددی.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۵

* نویسنده مسئول: horahimi@ut.ac.ir

۱ مقدمه

فراماده ها به عنوان یکی از نوآوری های برجسته در علوم مواد و مهندسی، با بهره گیری از طراحی های هندسی پیچیده و ساختارهای تکرارشونده، خواصی فراتر از مواد طبیعی ارائه می دهند. این مواد، که ویژگی هایشان عمدتاً به ساختار و نه ترکیب شیمیایی وابسته است، قابلیت هایی نظیر تنظیم سفتی، جذب انرژی، کنترل ارتعاشات و مدیریت امواج را فراهم می کنند [۱-۳]. برخلاف مواد سنتی که خواصشان به ذات شیمیایی و فیزیکی اجزای تشکیل دهنده وابسته است، فراماده ها از طریق چیدمان دقیق و مهندسی شده ی سلول های پایه طراحی می شوند تا پاسخ های مکانیکی یا فیزیکی خاصی را در برابر محرک های خارجی

چکیده

فراماده به عنوان موادی نوآورانه، نقشی کلیدی در توسعه فناوری های مختلف ایفا کرده اند. برخلاف مواد طبیعی، خواص فراماده به ساختارهای تکرارشونده و طراحی های پیشرفته بستگی دارد و قابلیت هایی منحصر به فرد مانند تنظیم سفتی، جذب انرژی، کنترل ارتعاشات، و مدیریت امواج ارائه می دهند. این ویژگی ها امکان طراحی قطعات چندمنظوره با مقاومت بالا و قابلیت تنظیم خواص مکانیکی را فراهم کرده و کاربردهایی گسترده در صنایع مختلف نظیر پزشکی، و مهندسی عمران دارند. این مقاله به طراحی یک سلول پایه با سفتی متغیر پرداخته که قابلیت تنظیم خواص مکانیکی در جهات مختلف را داراست. طراحی این سلول بر اساس اصول فراماده و تحلیل عددی انجام شده و نتایج شبیه سازی ها نشان می دهد که ساختار ارائه شده می تواند پاسخ مکانیکی متنوعی در شرایط مختلف بارگذاری ارائه دهد. علت اصلی این موضوع به

¹ Metamaterial

از خود نشان دهند. چنین خصوصیتی، فراماده‌ها را به گزینه‌ای کلیدی برای کاربردهای پیشرفته در صنایع هوافضا، پزشکی و مهندسی عمران تبدیل کرده است [۴-۶]. به عنوان مثال، در هوافضا، نیاز به مواد سبک با خواص مکانیکی قابل تنظیم برای بهبود عملکرد سازه‌ها حیاتی است [۷]، در حالی که در پزشکی، این مواد می‌توانند با تنظیم فشار وارده بر بافت‌ها، ایمپلنت‌هایی کارآمدتر ارائه دهند [۸]. در مهندسی عمران نیز، استفاده از فراماده‌ها در طراحی سازه‌های مقاوم در برابر زلزله یا جذب‌کننده‌ی ارتعاشات، افق‌های جدیدی را گشوده است.

پژوهش‌های اخیر در حوزه فراماده‌های مکانیکی، پیشرفت‌های قابل توجهی را به همراه داشته است. به عنوان مثال، Babaei و همکاران نشان دادند که ساختارهای شبکه‌ای شش‌ضلعی به دلیل پایداری و جذب انرژی بالا، در کاربردهای کنترل ارتعاشات و جذب ضربه مؤثر هستند [۹]. به طور مشابه، Zhang و همکاران با بررسی ساختارهای مربعی و لوزی‌شکل، رفتار متعادل و قابل تنظیم آن‌ها را برای تحمل تنش‌های محوری تأیید کردند [۱۰]. Yu و همکاران نیز به تحلیل ساختارهای پیچیده‌تر مانند هشت‌ضلعی‌ها پرداختند و توانایی آن‌ها در تنظیم تنش و انتقال نیرو را برجسته کردند [۱]. همچنین، Montazeri و همکاران بر روی ساختارهای دوبعدی با سختی متغیر متمرکز شدند، اما چالش‌های انتقال به مدل‌های سه‌بعدی را نیز مطرح کردند [۸]. در زمینه تولید، Zheng و همکاران نشان دادند که روش تولید افزایشی^۲، امکان ساخت ساختارهای پیچیده با دقت بالا را فراهم می‌کند، که برای توسعه ساختارهای موردنظر در این پژوهش نیز قابل استفاده است [۱۱]. این مطالعات نشان‌دهنده‌ی ظرفیت بالای فراماده‌ها در تطبیق با نیازهای متنوع و اهمیت طراحی‌های هندسی در دستیابی به خواص مکانیکی مطلوب هستند.

با وجود پیشرفت‌های ذکرشده، چالش‌هایی نظیر پیچیدگی‌های هندسی، محدودیت‌های تولید و نیاز به شبیه‌سازی‌های پیشرفته همچنان باقی است. این موانع، توسعه‌ی فراماده‌هایی با قابلیت

تولید انبوه و کاربرد گسترده را دشوار می‌سازد [۱۲]. با این حال، پیشرفت در فناوری‌های تولید مانند چاپ سه‌بعدی و ادغام فراماده‌ها با مواد هوشمند، مانند مواد حافظه‌دار، امکانات جدیدی را فراهم کرده است [۱۳]. برای مثال، مواد حافظه‌دار می‌توانند در پاسخ به تغییرات دما یا فشار، شکل خود را تغییر دهند و این ویژگی در ترکیب با فراماده‌ها، کاربردهای نوآورانه‌ای را در حوزه‌های مختلف ایجاد کرده است. این پژوهش با هدف غلبه بر برخی از این چالش‌ها، یک سلول پایه سه‌بعدی با سختی متغیر طراحی و تحلیل کرده است که بر اساس اصول فراماده و شبیه‌سازی عددی توسعه یافته و توانایی تنظیم خواص مکانیکی در جهات مختلف را داراست. این سلول پایه می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای توسعه‌ی ساختارهای بزرگ‌تر و پیچیده‌تر در آینده مورد استفاده قرار گیرد.

۲ روش طراحی تک‌سلول با خاصیت سختی متغیر در جهات مختلف

طراحی سلول پایه با خاصیت سختی متغیر، فرآیندی چند مرحله‌ای است که در آن، از بررسی تحقیقات گذشته و آزمون مدل‌های متنوع تا بهینه‌سازی نهایی، تمامی جنبه‌های عملکرد مکانیکی مدنظر قرار می‌گیرد. ایده اولیه طراحی سلول بر اساس ساده‌ترین ساختارهای ممکن شکل گرفت. سپس بهینه‌سازی مرحله به مرحله‌ی هرکدام از مدل‌ها، دستیابی مدل ایده‌آل را میسر می‌کند. در پژوهش‌های انجام شده فرآیند طراحی این سلول از مطالعات گسترده بر روی ساختارهای دوبعدی و تحقیقات انجام‌شده در زمینه فراماده مکانیکی الهام گرفته شد. تحقیقات گذشته نشان داده‌اند که ساختارهای دوبعدی با هندسه‌هایی مانند شش‌ضلعی، مربعی، هشت‌ضلعی و ترکیبات نامتقارن، قابلیت بهینه‌سازی خواص مکانیکی، از جمله سختی متغیر، جذب انرژی و رفتار ارتجاعی را دارند. [۸] در مطالعات گذشته اکثر مدل‌های ارائه شده به صورت

² Additive Manufacturing



شکل ۱. رویه طراحی و دستیابی به مدل سفتی متغیر

پس از بررسی ساختارهای دوبعدی، طراحی‌ها به مدل‌های سه‌بعدی انتقال یافتند. هدف اصلی در این مرحله، دستیابی به مدلی بود که بتواند خواص مکانیکی متغیر و غیرهمسانگردی را در سه جهت اصلی X ، Y و Z ارائه دهد. ساختار اولیه به شکل مکعبی طراحی شد و هر وجه آن از ترکیب هندسه‌های داخلی با تراکم و ضخامت متغیر شکل گرفت. این طراحی به گونه‌ای انجام شد که پاسخ مکانیکی هر وجه، مستقل و متناسب با شرایط بارگذاری آن باشد. در مرحله تولید مدل‌های سه‌بعدی اولیه، ۸ مدل مختلف طراحی شدند و سپس هر کدام در جهت‌های مختلف (شکل ۲) با استفاده از نرم‌افزار اباکوس^۴ تحلیل شدند. این تحلیل‌ها شامل شبیه‌سازی شبه استاتیکی برای بررسی رفتار ساختار تحت بارگذاری در جهت‌های مختلف بود.

دوبعدی بررسی شده بودند. برای تبدیل این مدل‌ها به مدل سه‌بعدی چالش‌های زیادی وجود دارد، برای مثال اغلب مدل‌ها از نظر طراحی امکان سه‌بعدی شدن نداشتند. از سوی دیگر بعضی از مدل‌هایی که این قابلیت را داشتند، شرایط ساخت برای آن‌ها فراهم نبود و عملاً مورد استفاده قرار نگرفتند. مطالعات پیشین، به‌ویژه تحقیقاتی که فراماده [۱، ۴] را بررسی کرده‌اند، نشان داده‌اند که:

- شبکه‌های شش‌ضلعی: از پایداری بالا و جذب انرژی قابل توجهی برخوردارند.
- ساختارهای مربعی یا لوزی‌شکل: رفتار مکانیکی متعادل و قابل تنظیمی در جهات مختلف دارند.
- ساختارهای هشت‌ضلعی یا ترکیبات هندسی پیچیده‌تر: ویژگی‌هایی نظیر تنظیم تنش و انتقال نیرو بهینه‌تر را ارائه می‌دهند.

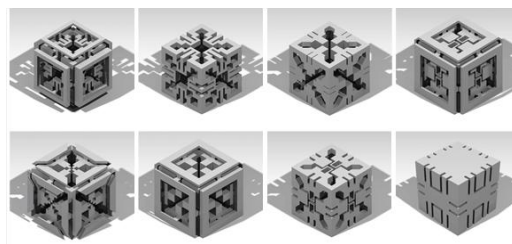
برای شروع طراحی، حدود ۱۵ مدل دوبعدی اولیه با استفاده از نرم‌افزار طراحی سه‌بعدی کتیا^۳ طراحی شدند. پس از طراحی هر کدام از مدل‌ها به صورت جداگانه ۳ مرتبه تحت شبیه‌سازی قرار گرفت تا از میزان متغیر بودن سفتی در هر دو جهت X, Y اطمینان حاصل گردد. این مدل‌ها با تغییراتی در زوایا، ضخامت، و توزیع مواد، برای بهینه‌سازی عملکرد مکانیکی مورد ارزیابی قرار گرفتند. رویه دستیابی به مدل ایده‌آل در شکل ۱ آمده است.

^۴ Abaqus

^۳ CATIA V5

جدول ۱. مقادیر عددی مشخص شده در شکل ۳

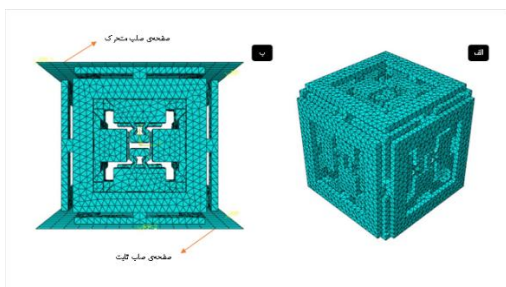
شماره اندازه	a	b	c	d	e
اندازه (میلی متر)	۲.۵	۱.۵	۴	۱۲	۱۲



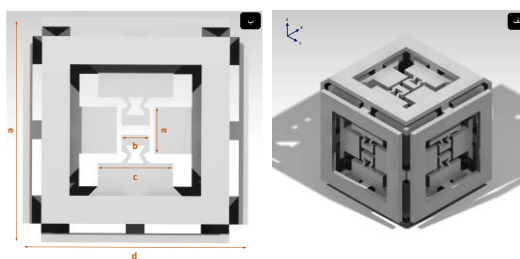
شکل ۲. سلول‌های طراحی شده اولیه که هر کدام بنا به برآورده نکردن اهداف مورد نظر رد شدند

۳ شبیه‌سازی عددی سلول طراحی شده

شبیه‌سازی عددی این ساختار با استفاده از نرم‌افزار اباکوس و روش تحلیل صریح دینامیکی انجام شد. این روش به دلیل توانایی در مدل‌سازی رفتار غیرخطی و پیچیده مواد و ساختارها انتخاب شد. مش‌بندی مدل با استفاده از المان‌های سه‌بعدی هرمی^۵ دقیق مش‌بندی شد تا تغییرات جزئی در هندسه داخلی به درستی شبیه‌سازی شوند (شکل ۴). این مدل به عنوان مدل بهینه برای برآورده کردن خواسته‌هایی مکانیکی این مقاله در نظر گرفته شده است که مبنای آن نتایج قابل توجه و منحصر بفرد آن در ادامه می‌باشد. شرایط مرزی در یک سمت نمونه به صورت ثابت و از سمت دیگر نمونه تحت بارگذاری توسط یک صفحه‌ی صلب قرار گرفت. همچنین خواص ماده مورد استفاده از پلیمر آکریلونیتریل بوتادین استایرن^۶ به صورت الاستیک-پلاستیک با خواص یکنواخت فرض شد.



شکل ۴. سلول شبیه‌سازی شده (الف) مش بندی در حالت سه‌بعدی، (ب) مش‌بندی صفحه‌های ثابت و متحرک



شکل ۳. الف) طراحی سه‌بعدی نمونه ایده‌آل نهایی، (ب) ابعاد و جزئیات سلول نهایی

این تفاوت‌ها مستقیماً ناشی از تراکم هندسی متفاوت در هر جهت می‌باشد.

۴ تحلیل نتایج

۴-۱ سفتی متغیر در جهات مختلف

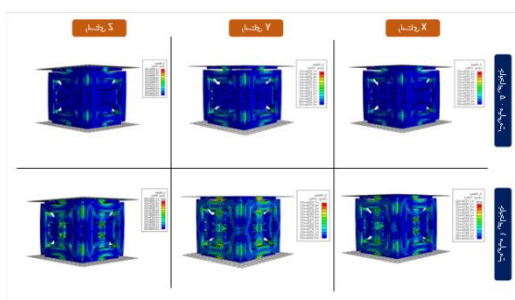
نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که ساختار ارائه‌شده رفتار مکانیکی متفاوتی در جهات X ، Y ، و Z دارد. نیروهای تحمل‌شده در این جهات، بر اساس جابجایی ۱ میلی‌متر، بیانگر توزیع متناسب سفتی ساختار هستند. راستای Y نیروی وارد شده به ۳۸۴ نیوتن می‌رسد که بیشترین مقدار بین سه راستا است. این نتیجه حاکی از سفتی بالا و مقاومت ساختار در این جهت بوده و برای انتقال نیروهای بزرگ، مانند کاربردهای سازه‌ای، ایده‌آل است. راستای X نیروی وارد شده برابر با ۲۸۵ نیوتن است. این مقدار نشان‌دهنده سفتی متوسط ساختار در این راستا است که می‌تواند برای تحمل تنش‌های محوری مناسب باشد. در حالی که راستای Z مقدار نیرو ۱۸۴ نیوتن است که کمترین مقدار بین سه راستا بوده و نشان‌دهنده انعطاف‌پذیری بیشتر ساختار در این جهت است. این ویژگی می‌تواند برای کاربردهایی نظیر جذب انرژی در طراحی‌های ضدضربه مورد استفاده قرار گیرد.

۴-۲ پایداری مکانیکی

شکل نیرو-جابجایی **Error! Reference source not found.** نشان‌دهنده رفتار یکنواخت و پایدار ساختار در تمامی جهات است. نبود تغییرات ناگهانی در نمودارها حاکی از توزیع بهینه تنش و کاهش نقاط تمرکز تنش است. طراحی ساختار به گونه‌ای است که پایداری مکانیکی در شرایط بارگذاری استاتیکی حفظ شده و از مشکلات رایج در ساختارهای مرسوم، مانند تمرکز تنش در نقاط خاص، جلوگیری می‌کند. این پایداری به‌ویژه در

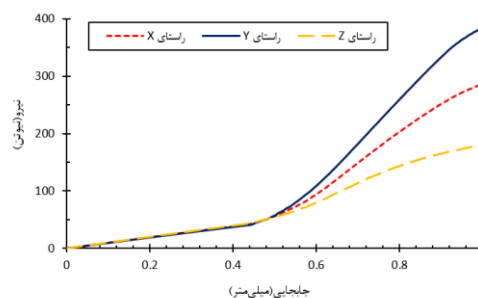
۳-۱ نتایج شبیه‌سازی

مقدار جابجایی ۱ میلی‌متر بر صفحه ی صلب بالا اعمال شد. در هر سه جهت میزان تنش ایجاد شده در سلول در (شکل ۵) قابل مشاهده است. کرنش اعمال شده در شبیه‌سازی به مقدار نهایی ۱ میلی‌متر در بازه زمانی ۵۰ ثانیه صورت گرفته‌است.



شکل ۵. نتایج شبیه‌سازی اعمال شده بر روی سلول نهایی در راستای X, Y, X در دو مقدار جابجایی ۰.۵ میلی‌متر و ۱ میلی‌متر.

نمودار نیرو-جابجایی خروجی از شبیه‌سازی، رفتار مکانیکی سلول طراحی‌شده را نشان داد. تحلیل نمودارها مشخص کرد که ساختار طراحی‌شده در هر جهت پاسخ مکانیکی متفاوتی ارائه می‌دهد.



شکل ۶. نمودار نیرو-جابجایی شبیه‌سازی شده ی سلول نهایی تحت بارگذاری فشاری در سه راستای X, Y, X .

طراحی قطعات چندمنظوره که تحت بارگذاری مداوم یا متغیر قرار می‌گیرند، اهمیت دارد.

سه‌بعدی مشابه، عملکرد بهتری در کنترل تنش و ارائه پاسخ مکانیکی یکنواخت و قابل تنظیم دارد. به‌طور خاص، توانایی جذب انرژی و تنظیم خواص مکانیکی در جهات مختلف از نقاط قوت این طراحی محسوب می‌شود. کاربردهای این ساختار در صنایعی مانند مهندسی عمران و تجهیزات پزشکی، که نیاز به مواد سبک با خواص قابل تنظیم دارند، بسیار حائز اهمیت است. به عنوان مثال، در مهندسی عمران، امکان جذب انرژی ارتعاشی و کاهش انتقال آن به سایر بخش‌های سازه از کاربردهای کلیدی این ساختار است. با این حال، چالش‌هایی نظیر پیچیدگی‌های هندسی و محدودیت‌های تولید همچنان وجود دارند که نیازمند تحقیقات بیشتری در زمینه روش‌های پیشرفته ساخت، مانند تولید افزایشی و مواد هوشمند هستند. این تحقیقات می‌تواند به بهبود خواص مکانیکی و کاهش هزینه‌های تولید کمک کند. در نهایت، این پژوهش گامی به سوی طراحی فراماده چندمنظوره با قابلیت سفارشی‌سازی است و می‌تواند به توسعه مواد پیشرفته برای صنایع حساس کمک کند. پیشنهاد می‌شود که در تحقیقات آینده، مدل ارائه‌شده تحت شرایط بارگذاری دینامیکی نیز تحلیل شود و تأثیر مواد مختلف بر عملکرد مکانیکی آن مورد بررسی قرار گیرد.

۶ منابع

- [۱] X. Yu, J. Zhou, H. Liang, Z. Jiang, L. Wu, Progress in Materials Science 94 (2018) 114-173.
- [۲] C.M. Watts, X. Liu, W.J. Padilla, Advanced materials 24 (2012) OP98-OP120.
- [۳] M. Carrara, M. Cacan, J. Toussaint, M. Leamy, M. Ruzzene, A. Erturk, Smart Materials and Structures 22 (2013) 065004.
- [۴] M. Khajepour, A. Bayati, B. Rezaee, A. Khatami, M.A. Soltani, G. Faraji, K. Abrinia, M. Baghani, M. Baniassadi,

۳-۴ طراحی و بهینه‌سازی هندسی

ساختار سه‌بعدی طراحی‌شده، که در شکل‌های ارائه‌شده نشان داده شده است، شامل ترکیبات پیچیده‌ای از هندسه‌های متنوع است. این طراحی که با استفاده از نرم‌افزار مدل‌سازی سه‌بعدی و تحلیل‌های عددی بهینه‌سازی شده، امکان توزیع بهتر تنش و تنظیم خواص مکانیکی را فراهم کرده است. هر وجه از ساختار به‌صورت مستقل رفتار مکانیکی مشخصی ارائه می‌دهد که این ویژگی می‌تواند برای کاربردهای سفارشی‌سازی‌شده مفید باشد. مقایسه با مدل‌های پیشین نشان می‌دهد [۱۰] که ساختار پیشنهادی، علاوه بر ارائه خواص مکانیکی متعادل، در کاهش تمرکز تنش و بهبود تنظیم سفتی نیز عملکرد بهتری داشته است. در حالی که مدل‌های دوبعدی و برخی مدل‌های سه‌بعدی قبلی محدودیت‌هایی در کنترل سفتی داشتند، مدل پیشنهادی این چالش را برطرف کرده و امکان استفاده در کاربردهای صنعتی پیشرفته را فراهم کرده است.

۵ نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک ساختار سه‌بعدی با خاصیت سفتی متغیر طراحی و شبیه‌سازی شد. نتایج تحلیل‌ها نشان داد که ساختار طراحی‌شده قادر به ارائه خواص مکانیکی متفاوت در جهات مختلف بوده و پایداری مکانیکی مناسبی تحت بارگذاری‌های مختلف دارد. این ویژگی‌ها امکان استفاده از این ساختار را در طیف وسیعی از کاربردهای صنعتی فراهم می‌کند. مقایسه با تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که ساختار پیشنهادی در مقایسه با مدل‌های دوبعدی و

- M. Charara, S. Gonella, Physical Review B 108 (2023) [٩]
L020301
- H. Zhang, X. Guo, J. Wu, D. Fang, Y. Zhang, Science [١٠]
.advances 4 (2018) eaar8535
- X. Zheng, H. Lee, T.H. Weisgraber, M. Shusteff, J. [١١]
DeOtte, E.B. Duoss, J.D. Kuntz, M.M. Biener, Q. Ge, J.A.
Jackson, Science 344 (2014) 1373-1377
- M. Kadic, T. Bückmann, R. Schittny, M. Wegener, [١٢]
.Reports on Progress in physics 76 (2013) 126501
- Q. Ge, H.J. Qi, M.L. Dunn, Applied Physics Letters 103 [١٣]
(٢٠١٣)
- Journal of Materials Research and Technology 33 (2024)
480-490
- R. Kumar, M. Kumar, J.S. Chohan, S. Kumar, Materials [٥]
.Today: Proceedings 56 (2022) 3016-3024
- (٢٠٢٠) J. Wang, G. Dai, J. Huang, Iscience 23 [٦]
- T.A. Schaedler, W.B. Carter, Annual Review of Materials [٧]
.Research 46 (2016) 187-210
- A. Montazeri, E. Bahmanpour, M. Safarabadi, [٨]
International Journal of Mechanical Sciences 260 (2023)
108670