

# Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 52(10) (2021) 697-700 DOI: 10.22060/mej.2019.16382.6351

# Numerical and Experimental Study of Energy Absorption Amount of Functionally Graded Honeycomb with Negative Stiffness Property under Quasi-Static Load

## M. Shafipour, S. Y. Ahmadi-Brooghani\*

Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.

**ABSTRACT:** Functionally graded honeycomb with negative stiffness can be used extensively as an energy absorber because of having two features of negative stiffness and being functionally graded. In this research, the effect of using functionally graded honeycomb with negative stiffness in increasing energy absorption has been considered. In functionally graded honeycomb the thicknesses of structure change gradually in each layer, as a result, each layer has a different stiffness. Negative stiffness honeycomb is a type of energy absorbers that absorb energy by the transition from one buckled shape to another and show snap through- like behavior. In this research, at first quasi-static tests have been carried out on negative stiffness honeycombs with constant thickness. Then finite element model of negative stiffness honeycomb with experimental results and a good agreement between numerical and experimental results has been observed. Functionally graded honeycomb with negative stiffness then has been modeled numerically. Energy absorption per unit mass of the functionally graded negative stiffness honeycomb with conventional ones. Based on the results, energy absorption per unit mass in functionally graded honeycomb with negative stiffness.

#### **Review History:**

Received: 20 May. 2019 Revised: 9 Jul. 2019 Accepted: 2 Sep. 2019 Available Online: 27 Sep. 2019

#### Keywords:

Functionally graded honeycomb Negative stiffness Snap through Energy absorption

#### 1. Introduction

Mechanical systems often encounter vibrations and impact forces. A good suggestion to mitigate mechanical vibration or impact forces is honeycomb structures because they possess lightweight, high strength and energy absorption properties. However, they have a major disadvantage, they can not recover after the absorption of impact forces. The negative stiffness honeycombs have been devised to overcome this problem. They are designed by arraying negative stiffness elements in a honeycomb form [1]. Since 2010, many researchers have studied the behavior and construction of negative stiffness elements [2, 3]. Energy absorption of curved beam as a negative stiffness element has been studied by Fulcher et al. [2] and Klatt [3]. Correa et al. [1] continued the research on design and energy absorption characteristics of the negative stiffness honeycomb numerically and experimentally. In these investigations, they have shown that the negative stiffness honeycombs possess the energy absorption property like the conventional honeycomb and unlike the conventional ones, they can recover after the impact force is applied.

On the other hand, researches on functionally graded honeycombs have also been conducted [4-7]. Functionally graded honeycomb is a type of energy absorption structure that its cell size, shape, thickness or material properties vary functionally to change the relative density or other properties. Ajdari et al. [4] have shown that in functionally graded honeycomb when the relative density decreases in the impact direction, the energy absorption increases. A study by Galedari et al. [5] showed that functionally graded absorption reduces the rate of impact load on protective object. Also, the results of numerical research studied by Tau et al. [6] indicate that functionally graded honeycomb improves the specific energy absorption rate compared to the regular honeycomb approximately by 70%.

Based on the finding of the previous works on functionally graded honeycomb, which increases energy absorption and the duration of impact transmission, and negative stiffness honeycomb, recoverability after the impact, in this research, the functionally graded honeycombs with negative stiffness were investigated for the first time. In this article, energy absorption of negative stiffness honeycomb with constant thickness was studied numerically and experimentally. The quasi-static experiment is carried out on negative stiffness honeycomb, and then negative stiffness honeycomb with constant thickness is simulated in ABAQUS. Due to the good agreement between the experimental and numerical results, numerical modelling has been approved. Then, functionally graded honeycomb with negative stiffness is modeled in ABAQUS and quasi-static loading applied to the model. In this simulation the effect of being functionally on increasing energy absorption is studied.

\*Corresponding author's email: syahmadi@birjand.ac.ir



#### 2. Experimental and Numerical Study

In this research, the amount of energy absorption by negative stiffness honeycomb with constant thickness is studied numerically and experimentally. The result of Finite Element (FE) simulation is validated with experimental results. The negative stiffness honeycomb has been manufactured using Nylon 11 material by a material jetting system (J750) from Stratasys in a multi-scale additive manufacturing lab at the university of Waterloo, Waterloo, Canada. Quasi-static loading has been applied to negative stiffness honeycomb by a universal testing machine. The test is performed at Odontology department at Mashhad university of medical science, Mashhad, Iran. The SANTAM universal testing machine with 50 kg load cell has been used. For experimental test, displacement of 33 mm was applied to the top of the honeycomb at a constant crosshead velocity of 5 mm/min and the force-displacement curve was recorded. Fig. 1 shows negative stiffness honeycomb with constant thickness under a quasi-static load.



Fig. 1. Negative stiffness honeycomb with constant thickness under a quasi-static load

Then the quasi-static model of both conventional and functionally graded negative stiffness honeycomb is simulated in ABAQUS/standard version 2016. Since the model is under the large deformation and rotation, geometric nonlinearity has been used in the modelling. A total of 7374 C3D20H elements is employed.

#### 3. Results and Discussion

The amount of energy absorbed by the negative stiffness honeycomb with constant thickness is calculated experimentally and numerically by calculating the area under the force-displacement diagram, in MATLAB software. The amount of energy absorbed by the negative stiffness honeycomb numerically and experimentally is respectively 4.6205 N.m and 5.1903 N.m. By comparing the experimental and FE results the acceptable agreement can be observed. The calculated relative error between numerically and experimentally results is 10.98%. In the present research, for the first time, a functionally graded

honeycomb with negative stiffness has been employed for the energy absorption purpose. In this paper, the functionally graded negative stiffness honeycomb means the thickness of each layer of curved beam is varying. To studying the significance of functionally graded honeycomb in absorbing energy and the effect of varying the stiffness from one layer to another, the amount of energy absorbed by the functionally graded honeycomb with negative stiffness is compared with negative stiffness honeycomb with constant thickness. This comparison is simulated in the ABACUS software. In this numerical simulation, functionally graded honeycomb has thicknesses of 1.27, 1.48, 1.69 and 1.9 mm, respectively and the load has been applied to the thickest layer of honeycomb. The force-displacement results from the FE analysis for functionally graded negative stiffness honeycomb and negative stiffness honeycomb with constant thickness have been shown in Fig. 2.

As one can see in Fig. 2, by increasing the thickness of functionally graded negative stiffness honeycomb, the amount of peak load is increased. In order to study the effect of being functionally graded in the honeycomb structure on increasing the energy absorption, energy absorption per unit mass Specific Energy Absorption (SEA) of the functionally graded honeycomb with negative stiffness is calculated and compared with negative stiffness honeycomb with constant thickness. The amount of SEA for negative stiffness honeycomb with constant thickness and functionally graded honeycomb with negative stiffness is 102.65 J/kg and 161.25 J/kg, respectively. It is clear that the amount of SEA for functionally graded honeycomb with negative stiffness increased compared to negative stiffness honeycomb with constant thickness. For displacement of 33 mm, the relative increase is 57%, which indicates better performance of functionally graded honeycomb with negative stiffness.



Fig. 2. Comparison between quasi-static force-displacement diagram for FE model of negative stiffness honeycomb with constant thickness and functionally graded negative stiffness honeycomb

#### 4. Conclusions

In this research, the amount of energy absorption of functionally graded honeycomb with negative stiffness is compared with constant thickness negative stiffness honeycomb. To validate the FE simulation, the numerical and experimental results for constant thickness negative stiffness honeycomb have been compared. The results showed a good agreement between them so that the amount of energy absorption of experimental and numerical simulation has indicated 10.98% relative error. Then finite element model of functionally graded and constant thickness negative stiffness honeycomb is simulated in ABAQUS software and the results of the simulation are compared. The results of simulation show that energy absorption per unit mass in functionally graded negative stiffness honeycomb is 1.57 times higher than constant thickness one. In summary, it is observed that functionally graded negative stiffness honeycomb increases energy absorption. This feature along with recoverability of these structures is a unique feature for energy absorbers.

#### References

 D. M. Correa, T. D. Klatt, S.A. Cortes, M. R. Haberman, D. Kovar, and C.C. Seepersad, Negative Stiffness Honeycombs for Recoverable Shock Isolation, Rapid Prototyping Journal, 21(2) (2015) 193-200.

- [2] B.A. Fulcher, D.W. Shahan, M.R. Haberman, C. Conner Seepersad, P.S. Wilson, Analytical and Experimental Investigation of Buckled Beams as Negative Stiffness Elements for Passive Vibration and Shock Isolation Systems, Journal of Vibration and Acoustics, 136(3) (2014) 031009-031012.
- [3] T.D. Klatt, Extreme energy absorption : the design, modeling, and testing of negative stiffness metamaterial inclusions, M.Sc. Thesis ,The University of Texas at Austin,(2014).
- [4] A. Ajdari, H. Nayeb-Hashemi, A. Vaziri, Dynamic crushing and energy absorption of regular, irregular and functionally graded cellular structures, International Journal of Solids and Structures, 48(3) (2011) 506-516.
- [5] S.A. Galehdari, M. Kadkhodayan, S. Hadidi-Moud, Low velocity impact and quasi-static in-plane loading on a graded honeycomb structure; experimental, analytical and numerical study, Aerospace Science and Technology, 47(Supplement C) (2015) 425-433.
- [6] Y. Tao, S. Duan, W. Wen, Y. Pei, D. Fang, Enhanced out-of-plane crushing strength and energy absorption of in-plane graded honeycombs, Composites Part B: Engineering, 118(Supplement C) (2017) 33-40.

This page intentionally left blank

نشريه مهندسي مكانيك اميركبير

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۲، شماره ۱۰، سال ۱۳۹۹، صفحات ۲۸۰۹ تا ۲۸۲۲ DOI: 10.22060/mej.2019.16382.6351

مطالعه عددی و تجربی میزان جذب انرژی سازه لانهزنبوری هدفمند با سفتی منفی تحت بارگذاری شبهاستاتیکی

مهدیه شفیعپور، سید یوسف احمدی بروغنی\*

دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

خلاصه: سازههای لانهزنبوری هدفمند با سفتی منفی به دلیل داشتن دو ویژگی هدفمند بودن و سفتی منفی میتوانند دارای کاربرد <sup>تا</sup> فراوان به عنوان جاذب انرژی باشند. در این پژوهش تاثیر هدفمند نمودن سازههای لانهزنبوری با سفتی منفی در افزایش میزان جذب انرژی بررسی شده است. در این لانهزنبوریها هدفمند نمودن سازه با تغییر تدریجی در ضخامت تیرهای خمیده در هر لایه انجام شده است. سازه لانهزنبوری با سفتی منفی نوعی جاذب انرژی است که با تغییر از یک مود کمانش به مود دیگر و رفتار فراجهش مانند در سلولها، باعث جذب انرژی میشود. در این تحقیق ابتدا آزمایش تراکم شبه استاتیکی بر روی لانهزنبوری با سفتی منفی و فخامت ثابت انجام شده است. پس از آن، مدل اجزاء محدود سازه، تحت تراکم شبه استاتیکی در نرمافزار آباکوس شبیه سازی شده و نتایج ماست انجام شده است. پس از آن، مدل اجزاء محدود سازه، تحت تراکم شبه استاتیکی در نرمافزار آباکوس شبیه سازی شده و نتایج ماست انجام شده است. پس از آن، مدل اجزاء محدود سازه، تحت تراکم شبه استاتیکی در نرمافزار آباکوس شبیه سازی شده و نتایج میشود. سپس لانهزنبوری هدفتن با سفتی منفی در نرمافزار آباکوس شبیه سازی شده و عملکرد جذب انرژی در آن با لانهزنبوری با می شود. سپس لانهزنبوری هدفتن با سفتی منفی در نرمافزار آباکوس شبیه سازی شده و عملکرد جذب انرژی در آن با لانهزنبوری با می شود. سپس لانهزنبوری هدفمند با سفتی منفی در نرمافزار آباکوس شبیه سازی شده و عملکرد جذب انرژی در آن با لانهزنبوری با موفی منفی و ضخامت ثابت مقایسه شده است. نتایج این مقایسه نشان می دهد که میزان جذب انرژی در واحد جرم برای لانهزنبوری ج

**تاریخچه داوری:** دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۳۰ بازنگری: ۱۳۹۸/۰۴/۱۸ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۱۱ ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۰۷/۰۵

> کلمات کلیدی: لانهزنبوری هدفمند سفتی منفی فراجهش جذب انرژی

### ۱ – مقدمه

سازههای مکانیکی اغلب اوقات با ارتعاشات و بارهای ضربه مواجه میشوند. بارهای ضربهای و ارتعاشات معمولا به دلیل ایجاد تنش بالا یا خستگی باعث شکست سازههای مکانیکی میشوند. یک چالش مهم برای جلوگیری از آسیب به این سازهها و یا حفاظت از کاربر سازهها، کاهش و یا حذف این نیروها میباشد. یک پیشنهاد خوب برای کاهش و یا حذف ارتعاشات یا نیروهای ضربه، استفاده از سازههای لانهزنبوری ششضلعی است، زیرا دارای سه ویژگی مهم سبک بودن، استحکام بالا و جذب انرژی بالا هستند. اما آنها یک عیب اساسی دارند و آن این است که جذب انرژی در آنها بهصورت مکرر امکانپذیر نیست. توانایی جذب انرژی بنابراین این نوع لانهزنبوریها برای جذب انرژی بهصورت مکرر مناسب نیستند. برای جذب انرژی بهصورت برگشتپذیر، لانهزنبوریها با سفتی منفی طراحی و ساخته شدهاند. این نوع لانهزنبوریها با چیدن اجزاء با سفتی

\* نویسنده عهدهدار مکاتبات: syahmadi@birjand.ac.ir

نمودهاند. فالچر و همکاران [۳] بهصورت آزمایشگاهی و تحلیلی رفتار یک تیر کمانش شده، دارای خاصیت سفتی منفی، را به عنوان جاذب ارتعاشات و ضربه مورد بررسی قرار دادند. سامانه مورد بررسی شامل فنرهایی با سفتی مثبت بود که به طور موازی با حرکت عرضی تیر کمانش شده قرار داشت. فالچر و همکاران، بارگذاری جابجایی کنترل را به این سامانه اعمال کردند. تتایچ آزمایشگاهی رفتار سفتی منفی را برای تیر کمانش شده نشان داد. همچنین با تغییر میزان فشردگی محوری تیرها، رفتار سفتی منفی بیشتری مربعی با استفاده از یک ضربه الکترودینامیکی قرار گرفت. به وضوح مشاهده شد که شتاب بیشینه توسط این سامانه جاذب ضربه، تحت یک موج مشاهدات نشان داد که یک تیر کمانش شده به عنوان یک جزء با سفتی منفی وسیلهای مفید برای جذب نیروهای ضربه میباشد. اما ساخت تیر از قبل کمانش شده، برای ایجاد رفتار سفتی منفی، به دلیل وجود تنشهای

منفی به صورت ستونی و سطری در کنار یکدیگر ایجاد می شوند [ ۱ و ۲ ].

از سال ۲۰۱۰ محققان زیادی بر روی ساخت اجزاء با سفتی منفی مطالعه

(Creative Commons License) حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) این موانید.

پسماند در آن، مشکل است.

یکی از مشکلات استفاده از تیرهای کمانش شده به عنوان اجزاء با سفتی منفی، نیاز به کمانش جزء تیر، بعد از ساخت سازه است. کیو و همکاران[۴۵] امکان استفاده از تیرهای خمیده پیش ساخته با شکل کسینوسی را به طور تحلیلی، برای ایجاد رفتار سفتی منفی مورد بررسی قرار داد. در تحقیق ارائه شده توسط وی، معادلات تحلیلی برای توصیف یک تیر خمیده پیش ساخته استخراج شد. همچنین کیو نشان داد که ثابت هندسیQ (که حاصل تقسیم مقدار h، حداکثر ارتفاع تیر خمیده، برt ضخامت تیر است) برای یک تیر نمیده، یک مقدار بحرانی برای ایجاد سفتی منفی است، که با تغییر این ثابت هندسی میتوان مقدار سفتی منفی را تغییر داد. کیو سپس ثابت کرد ثابت هندسی میتوان مقدار سفتی منفی را تغییر داد. کیو سپس ثابت کرد است تا مود چرخش یا مود دوم کمانش در تیر محدود شود. او همچنین اثبات کرد که با استفاده از یک تیر مضاعف که در مرکز نیز کاملاً مقید شده است، میتوان مود دوم کمانش در تیر محدود شود. او همچنین مخید شده

درسال ۲۰۱۴ کلات [۶] تحقیقات انجام شده توسط کیو را گسترش داد. او بر روی ثابت Q تحقیق نمود. همچنین تیرهای خمیده را به روش ساخت افزایشی ۲ و از ماده نایلون ۱۱ ساخت. ساخت افزایشی فرآیندی است که قطعات بوسیله افزایش لایه به لایه مواد ایجاد می شوند. این روش برای توليد قطعات پيچيده كه ساخت آنها به وسيله روشهاي توليد متداول ديگر مشکل و یا غیرممکن است، استفاده می شود. کلات این تیرهای خمیده را در شرایط مرزی مختلف آزاد و ثابت آزمایش کرد. آزمایشات نشان داد که در بارگذاری جابجایی شبهاستاتیکی، شرایط مرزی ثابت، برای نشان دادن رفتار سفتي منفى لازم است. تا اين قسمت از تحقيقات انجام شده، مفهوم اجزاء با سفتی منفی به عنوان یک سازه منفرد برای عایق ضربه استفاده شده بود، اما به عنوان شکلی از لانهزنبوری ساخته نشده بود. تحقیقات در زمینه جاذب انرژی با سفتی منفی با کارهای کورا و همکاران [۱ و ۲] ادامه یافت. آنها لانهزنبوریهایی به شکل تیرهای خمیده ساختند و این سازههای لانهزنبوری را با چیدن اجزاء با سفتی منفی بهصورت سطری و ستونی در کنار هم تولید کردند. پس از آن عملکرد این لانهزنبوریها در جذب انرژی را بهصورت عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیقات مشاهده شد که لانهزنبوریها با سفتی منفی علاوه بر داشتن ویژگیهای لانهزنبوریهای

معمولی به عنوان جاذبهای انرژی، توانایی جذب انرژی را بهصورت کاملاً برگشت پذیر دارند.

از سوی دیگر بر روی سازههای لانهزنبوری هدفمند نیز تحقیقاتی انجام شده است. جاذبهای انرژی لانهزنبوری هدفمند، نوعی جاذب میباشند که اندازه سلول، شکل، ضخامت دیوارهی سلولی و یا خواص ماده به صورت هدفمند، با هدف تغییر در چگالی نسبی و یا سایر خواص تغییر میکنند. در محیط پیرامون، انواع جاذبهای ضربه طبیعی هدفمند را می توان مشاهده کرد. یکی از جاذبهای ضربهی طبیعی هدفمند، پوست موز است. در ساختار پوست موز، وظیفه پوست، حفاظت از میوه در برابر بارهای ضربه میباشد. این ساختار بهصورت سازههای لانهزنبوری است که خواص آنها به صورت هدفمند از لایه ای به لایه دیگر تغییر می کند. در تحقیق انجام شده توسط دکیانگ و همکاران [۷] یک مدل اجزاء محدود جهت بررسی رفتار جاذب انرژی لانهزنبوری هدفمند تحت بار ضربهای ارائه شده است. سانگ وهمکاران [۸] رفتار فشردگی دینامیکی سازه سهبعدی با چیدمان ورونی ّ و از جنس فوم را به روش تجربی بررسی نمودند. همچنین شبیهسازی عددی با روش اجزاء محدود انجام شده است و میزان انرژی کرنشی در این شبیهسازی اندازه گیری شده است. بعلاوه اثر شکل سلول ها بر مودهای تغییرشکل بررسی شده است. بر اساس نتایج بدست آمده میزان جذب انرژی با افزایش نامنظمی سلول ها افزایش مییابد. چنگ و همکاران[۹ و ۱۰] یک مدل اجزاء محدود بر پایه شکل هندسی واقعی کلاه ایمنی موتور سیکلت را شبیه سازی نمودند و کد ال اس داینا برای شبیه سازی پاسخ های دینامیکی در سرعتهای ضربه متفاوت به کار گرفته شد. نتایج شبیهسازی نشان میدهد که در سرعتهای پایین (کمتر از۸/۳ متر بر ثانیه)، سفتی پوسته و چگالی خطی باید نسبتا پایین باشد تا نیروی تماسی به سر کاهش یابد و در عوض در سرعت بالا مانند ۱۱/۱ متر بر ثانیه، یک پوسته سفت تر و چگالی بالاتر باید برای حفاظت در مقابل ضربات استفاده شود. اژدری و همکاران [۱۱ و ۱۲] رفتار تخريب ديناميكي و ميزان جذب انرژي جاذب انرژي لانه زنبوري منظم و نامنظم و هدفمند را بررسی و با استفاده از روش اجزاء محدود، مودهای مختلف تغییرشکل و میزان جذب انرژی را در اینگونه جاذبها تحلیل نمودند. نتایج تحقیق نشان داد که کاهش در چگالی نسبی در جهت ضربه، در مراحل اولیه خرد شدن، باعث افزایش جذب انرژی لانهزنبوری می شود. همچنین در این تحقیقات مشخص شد که در سرعتهای بالای خرابی، گرادیان چگالی اثر قابل ملاحظه ای در جذب انرژی لانهزنبوری دارد. ونگ و همکاران [۱۳]

<sup>1</sup> Snap Through

<sup>2</sup> Additive Manufacturing

<sup>3</sup> Voroni

با تحلیل اجزاء محدود، فلزات با ساختار سلولی را تحت بار ضربه ای مورد بررسی قرار دادند. همچنین مکانیزم جذب انرژی و تغییر شکل جاذب انرژی هدفمند مورد تحقيق قرار گرفت. نتايج نشان داد كه گراديان چگالي مثبت-بهطوری که چگالی بیشتر در سمت اعمال ضربه باشد- یک انتخاب خوب برای حفاظت سازه اصلی میباشد، زیرا میتواند انرژی زیادی را جذب کند. در مطالعهی انجام شده توسط گلهداری و همکاران [۱۴] سازه لانهزنبوری هدفمند به عنوان جاذب انرژی مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش تجربی سقوط وزنه با سرعت پایین بر روی جاذب انرژی لانهزنبوری هدفمند انجام شد. نتایج مطالعه نشان داد که هدفمند بودن جاذب انرژی، باعث کاهش نرخ اعمال بار ضربه ای به جسم محافظت شونده می شود. همچنین مدل سازی اجزاء محدود در نرمافزار آباکوس بر روی سازه لانهزنبوری هدفمند و سازه لانهزنبوری با ضخامت ثابت انجام شد. نتایج مدل سازی نشان داد که با وجود جذب انرژی مناسب و برابر با سازهی لانهزنبوری با ضخامت ثابت، حداکثر نيروى وارد شده به سازه محافظت شونده توسط لانهزنبورىها در مراحل اولیه بارگذاری کاهش یافته است. به عبارت دیگر انتقال نیرو به صورت تدریجی و با تاخیر زمانی اتفاق افتاده است و بنابراین خسارت کمتری به سازه محافظت شونده وارد شده است. در جاذب انرژی لانهزنبوری هدفمند باید از محل اعمال بار به سمت دیگر سازه، سفتی لانهزنبوری تغییر کند. این مساله به این دلیل است که در بارگذاری با سرعت کم، هر ردیف باید به صورت مجزا تغيير شكل داده و بعد از قفل شدگی كامل رديف بعدی شروع به تغيير شكل نماید. با این نوع تغییر شکل، انتقال نیرو به سازه محافظت شونده به صورت تدریجی بوده و موج ضربه ای با تاخیر زمانی به جسم محافظت شونده انتقال می یابد [۱۴]. تقی پور و دامغانی [۱۵ و ۱۶] به بررسی تجربی و عددی رفتار تیرهای ساندویچی با هسته مشبک، تحت بارگذاری شبهاستاتیکی عرضی پرداختند و اثر تغییر پارمترهای هندسی و اندازه سلول صفحات مشبک در هسته را بر میزان جذب انرژی بررسی نمودند. در ادامه با طراحی ساختارهای هندسی بهینه بر روی هستههای مشبک تیرهای ساندویچی، ظرفیت جذب انرژی را توسط این جاذبها به طور قابل ملاحظهای افزایش دادند [۱۷]. یو و همکاران [۱۸] با تغییر ضخامت دیواره و اندازه سلول در هر لایه از سازه لانهزنبوری، یک لانهزنبوری مربعی هدفمند تعریف نمودند و دریافتند که عملکرد آن تحت فشار یکنواخت خارج صفحهای در مقایسه با لانهزنبوری بدون گرادیان ضخامت، بهبود بخشیده شده است. آنها اثر گرادیان ضخامت داخل صفحهای را با شبیه سازی اجزاء محدود بررسی نمودند. نتایج نشان داد که هسته هدفمند با تغییر ضخامت لایه به لایه، برای هر دو شرایط

بارگذاری شبه استاتیکی و بار انفجاری باعث برتری استحکام سازه و افزایش جذب انرژی می شود. جین و همکاران [۱۹] یک سازه فشرده با هسته ای شامل سلول های لانهزنبوری هدفمند را پیشنهاد نمودند و پاسخ دینامیکی و مقاومت انفجاری این سازهها تحت این بارگذاریها به صورت عددی با نرمافزار الااسداینا بررسی شد. نتایج این تحقیق نشان داد که سازههای لانهزنبوری با دیوارههای ضخیمتر دارای جذب انرژی مخصوص (انرژی جذب شده در طول خرابی تقسیم بر جرم ماده خراب شده) بیشتر تحت بار فشاری هستند. در تحقیقی که توسط تاو و همکاران [۲۰] انجام شده است، یک لانهزنبوری هدفمند داخل صفحهای پیشنهاد شده است و رفتار دینامیکیاش تحت تراکم خارج صفحهای با شبیهسازی عددی و تحلیل تئوری بررسی شده است. گرادیان ضخامت داخل صفحهای با تغییر در ضخامت دیوارههای سلولی لانهزنبوری انجام می پذیرد. در این تحقیق، در لانهزنبوری های هدفمند، اگر ضخیم ترین بخش در ناحیه برخورد ضربه باشد، گرادیان مثبت است و اگر نازکترین بخش در این ناحیه قرار گیرد، گرادیان ضخامت منفی است. نتایج عددی تحقیق تاو و همکاران [۲۰] نشان میدهد که استحکام خرابی و ظرفیت جذب انرژی لانهزنبوری با گرادیان ضخامت مثبت در مقایسه با لانهزنبوری بدون گرادیان افزایش مییابد. همچنین در این تحقیق مشخص شد که لانهزنبوری هدفمند داخل صفحهای میزان جذب انرژی مخصوص را تقریبا تا ۷۰ درصد نسبت به لانهزنبوری منظم معمولی بهبود میبخشد.

با توجه به تحقیقات انجام شده در زمینه سازههای لانهزنبوری با سفتی منفی با ویژگی مهم برگشتپذیر بودن و لانهزنبوریهای هدفمند با ویژگی افزایش میزان جذب انرژی و افزایش مدت زمان انتقال ضربه در آنها و با تاکید بر این مساله که لانهزنبوریهای هدفمندی که تاکنون مورد بررسی قرار گرفتهاند، برگشتپذیر نیستند و نمیتوان از آنها در جذب ضربات مکرر استفاده کرد، در این تحقیق برای اولین بار لانهزنبوریهای هدفمند با سفتی منفی مورد بررسی قرار گرفتهاند. در این نوع جاذبهای انرژی، هم ویژگی انرژی به دلیل هدفمند بودن وجود دارد. در این مقاله در ابتدا به بررسی انرژی به دلیل هدفمند بودن وجود دارد. در این مقاله در ابتدا به بررسی روی سازه لانه زنبوری با سفتی منفی و هم افزایش میزان جذب انرژی به دلیل هدفمند بودن وجود دارد. در این مقاله در ابتدا به بررسی انرژی به دلیل هدفمند بودن وجود دارد. در این مقاله در ابتدا به بررسی نوری مانور با سفتی منفی ازمایشهای تراکم شبهاستاتیکی بر با ضخامت ثابت پرداخته شده است. آزمایشهای تراکم شبهاستاتیکی بر روی سازه لانه زنبوری با سفتی منفی انجام شده است و پس از آن سازه لانه زنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت تحت بارگذاری مشابه با آزمایش



**شکل ۱:** طرحوارهی یک تیر خمیده در سازه لانهزنبوری با سفتی منفی[۱]

[Fig. 1. The schematic of a curved beam in the honeycomb structure [1

بین نتایج تجربی و عددی، شبیه سازی عددی مورد تایید قرار گرفته است. در ادامه، سازه لانهزنبوری هدفمند با سفتی منفی تحت بارگذاری تراکم شبه استاتیکی در نرمافزار آباکوس شبیه سازی شده است. هدفمند نمودن سازه با تغییر تدریجی در ضخامت تیرهای خمیده سازه لانه زنبوری با سفتی منفی مورد بررسی قرار گرفته است. پارامترهای مهم جهت بررسی میزان جذب انرژی در لانه زنبوری هدفمند با سفتی منفی با لانه زنبوری دارای سفتی منفی و ضخامت ثابت مقایسه شده است و اثر هدفمند نمودن سازه در میزان افزایش جذب انرژی مورد بررسی قرار گرفته است.

# ۲- آزمایش تجربی بر روی سازه لانهزنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت

مدل اولیه لانهزنبوری با سفتی منفی که در این تحقیق استفاده شده است، بر پایه مدل ارائه شده در تحقیقات کورا و همکاران [۱ و ۲ ]میباشد. در این مدل تیرهای خمیده با شکل کسینوسی بر پایه طرح اولیه کیو [ ۴ و ۵] به صورت چیدمان سطری و ستونی کنار یکدیگر به صورت منظم قرار گرفتهاند. شکل هر جزء سازه لانهزنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت در شکل ۱ و ابعاد آن در جدول ۱ ارائه شده است.

برای یک تیر با طول L، ضخامت t، عرض خارج از صفحه b و ارتفاع حداکثر اولیه تیر خمیده مطابق رابطه حداکثر اولیه تیر خمیده مطابق رابطه کسینوسی (رابطه (۱)) است [ ۴ و ۵].

$$\overline{w}(x) = \frac{h}{2} \left[ 1 - \cos\left(\frac{2\pi x}{L}\right) \right] \tag{1}$$

در رابطه (۱)، x موقعیت عرضی هر نقطه روی تیر از یک انتها و (x) w (x) فاصلهی عمودی یک نقطه روی تیر از خط افقی است که متصل کننده دو

#### Table 1. The dimensions of each curved beam in the negative stiff-[ness honeycomb structure [1, 2

۱ و ۲]	منفى [	سفتى	لانەزنبورى با	در سازه	خميده	تير	هر	: ابعاد	ل ۱	جدوا
--------	--------	------	---------------	---------	-------	-----	----	---------	-----	------

اندازه بر حسب میلیمتر	ابعاد
۵۰/۸	L، طول
١/٢٧	ضخامت <i>t</i>
۵/ • ۸	حداكثر ارتفاع اوليه تير خميده $h^{\scriptscriptstyle  ext{ iny{ iny{ iny{ iny{ iny{ iny{ iny{ iny$
١٢/٧	عرض خارج از صفحه،b

## انتهای تیر میباشد [ ۴ و ۵].

در سازه لانهزنبوری، تیرها بهصورت مضاعف قرار گرفتهاند تا کمانش از مود اول به سوم اتفاق بیافتد و در مرکز تیر رفتار ضد تقارن(شیب غیر صفر) ایجاد نشود. همچنین یک تیر افقی در وسط تیرهای کمانش شده قرار گرفته است تا با جلوگیری از حرکت دو انتهای تیر، رفتار سفتی منفی تیر را حفظ نماید. برای انجام آزمایش تجربی، لانهزنبوری با سفتی منفی با ضخامت ثابت از جنس نایلون ۱۱ با چگالی ۱۰۴۰ کیلوگرم بر مترمکعب، نسبت پوواسون۳۲/۰ و مدول یانگ ۱۵۸۲ مگاپاسکال و با استفاده از پرینتر سهبعدی و روش متریال جت<sup>۱</sup> با دستگاه جی ۲۵۰<sup>۲</sup> در آزمایشگاه ساخت چند مقیاسه<sup>۳</sup> در دانشگاه واترلو کانادا و مطابق با ابعاد جدول ۱ ساخته شده است. روش متریال جت یک تکنیک از روشهای ساخت افزایشی است که با

<sup>1</sup> Material Jetting

<sup>2</sup> J750

<sup>3</sup> Multi-Scale Manufacturing

بستر چاپ بهصورت لایه به لایه قرار می گیرند و سپس با اشعه فرابنفش مستحکم می شوند. ماهیت این روش به گونه ای است که می توان از چند ماده مختلف در پرینت یک جسم واحد استفاده کرد. به طور کلی مزیت استفاده از روش های پرینت سه بعدی در ساخت قطعه، سرعت بالای ساخت، هزینه نسبتا پایین ساخت و عدم نیاز به پرداخت نهایی بر روی سطح قطعه می باشد [۲۱]. آزمایش تراکم شبه استاتیکی بر روی لانه زنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت در آزمایشگاه گروه دندان پزشکی دانشگاه فردوسی مشهد انجام شده است. ماشین آزمایش صنتام<sup>۲</sup> با لودسل ۵۰ کیلوگرم است و بارگذاری با سرعت ۵ میلی متر بر دقیقه انجام شده است. لانه زنبوری تحت بارگذاری شبه استاتیکی معادل جابجایی ۳۳ میلی متر قرار گرفته است. سازه لانه زنبوری بین لودسل و پایه دستگاه ثابت نگه داشته شده است. شکل ۲ دستگاه آزمایش و سازه لانه زنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت را نشان

مراحل مختلف بارگذاری شبه استاتیکی و نحوه تراکم سازه لانهزنبوری در آزمایش تجربی در شکل ۳ ارائه شده است. طی آزمایش مشاهده می شود که هر ردیف به صورت مستقل از یکدیگر کمانش می کند و حداکثر نیرو در نمودار نیرو-جابجایی لانهزنبوری با سفتی منفی، درست قبل از کمانش



شکل ۲: دستگاه آزمایش برای بارگذاری شبهاستاتیکی بر روی نمونه لانهزنبوری با سفتی منفی Fig. 2. Schematic test setup for quasi-static displacement loading of negative stiffness honeycomb



شکل ۳: مراحل مختلف تراکم سازه ی لانه زنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت: (الف) قبل از بارگذاری(ب) در جابجایی y =۸/۳۴ mm (ج) در جابجایی y =۲۹/۶۸ mm (د) y = ۲۳/۳۴ mm (د) y = ۲۳/۳۴ mm

Fig. 3. A negative stiffness honeycomb with constant thickness in various stages of quasi-static compression at different displacement: (a) before displacement (b) y=8.34 mm (c) y=17.19 mm (d) y=23.34 mm (e) y=29.68 mm

1 SANTAM



**شکل 2:** نمودار نیرو-جابجایی حاصل از بارگذاری شبهاستاتیکی، استخراج شده از آزمایش تجربی لانهزنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت

Fig. 4. Quasi-static force-displacement diagram for experimentally tested negative stiffness honeycomb with constant thickness

رديف بعدي اتفاق ميافتد.

نمودار نیرو-جابجایی برای بارگذاری تراکم شبهاستاتیکی، با کنترل جابجایی از دستگاه آزمایش استخراج شده است. شکل ۴ نمودار نیرو برحسب جابجایی را برای سازه لانهزنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت را نشان میدهد.

با اندازه گیری ابعاد سازه لانه زنبوری قبل و بعد از اعمال بار، مشاهده می شود که سازه پس از برداشتن بار به شکل اولیه خود باز می گردد. شکل ۵ بعد ارتفاع سازه لانه زنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت و جدول ۲ مقدار ارتفاع سازه را قبل و بعد از بار گذاری نشان می دهد.

# ۳- مدلسازی عددی لانهزنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت

شبیهسازی جذب انرژی سازه لانهزنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت در محیط نرمافزار آباکوس ۲۰۱۶ انجام شده است. این شبیهسازی یک مدل غیرخطی هندسی است. غیرخطی بودن مدل به دلیل تماس بین ردیفهای مختلف سازه در حین تراکم و همچنین تغییر شکلهای بزرگ در سازه لانهزنبوری به دلیل پدیده فراجهش در هر تیر خمیده می بشد. به منظور مش بندی سازه لانه زنبوری یک مدل اجزاء محدود سه بعدی با المان CTD۲۰H استفاده شده است. تعداد المان کل، ۷۳۷۴ المان است. مش بندی در نرمافزار آباکوس برای سازه لانهزنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت در



شکل ۵: بعد ارتفاع سازه لانه زنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت

H) Fig. 5. The height dimension of negative stiffness honeycomb) with constant thickness

#### Table 2. Honeycomb height before and after compression test

فتی منفی و ضخامت ثابت قبل و بعد از ذاری	<b>جدول ۲:</b> ارتفاع سازه لانهزنبوری با س بارگ
ارتفاع سازه بعد از تراکم (mm)	ارتفاع سازه قبل از تراکم (mm)
٨٩/٧	٨٩/٩

# شکل ۶ نشان داده شده است.

به منظور اعمال شرایط مرزی، بارگذاری با کنترل جابجایی، تحت بار شبهاستاتیکی به میزان ۳۳ میلیمتر بر روی سازه لانهزنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت و بر روی صفحه بالایی A در سازه، اعمال میشود، در حالیکه تمام درجات آزادی صفحه پایینی B مقید شده است. شکل ۷ طرحواره بارگذاری و شرایط مرزی این شبیهسازی را نشان میدهد. در هنگام تماس ردیفهای مختلف تیرهای خمیده بر اثر تراکم شبهاستاتیکی، شرایط تماس رفتار مماسی<sup>۲</sup> و بدون اصطکاک<sup>۲</sup> در نظر گرفته شده است.

مرحله نهایی تراکم شبهاستاتیکی سازه لانهزنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت که از آزمایش تجربی و حل عددی بهدست آمده است، در شکل ۸ نشان داده شده است. مشاهده می شود که شکل تراکم بهدست آمده از شبیه سازی عددی کاملا مشابه با آزمایش تجربی است.

نمودار نیرو بر حسب جابجایی بهدست آمده از این شبیهسازی و مقایسه

<sup>1</sup> Tangential Behavior

<sup>2</sup> Frictionless









شکل ٦: مش بندی سازهی لانه زنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت در نرم افزار آباكوس

Fig. 6. Discretization of negative stiffness honeycomb with constant thickness in Abaqus software



شکل ۸: مقایسه مرحله نهایی تراکم سازه لانهزنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت بهدست آمده از آزمایش تجربی و حل عددی

Fig. 8. Comparison between final step of deformation of experimental and numerical simulation . for the negative stiffness honeycomb with constant thickness

> آن با نمودار استخراج شده از آزمایش تجربی در شکل ۹ نشان داده شده از مدل سازی ندارد. است.

> > مطالعه بر روی حساسیت به مش برای تشخیص اندازه مناسب مش بندی انجام شده است. شکل ۱۰ اثرات اندازه مشبندی و در نتیجه تعداد المانها را بر روی مقدار نیروی بیشینه اولیه در نمودار نیرو بر حسب جابجایی نشان میدهد. منظور از نیروی بیشینه اولیه، مقدار نیرو در نمودار نیرو-جابجایی است که برای اولین بار به میزان حداکثر خود میرسد. از روی شکل ۱۰ واضح است که از تعداد المان تقریبا ۴۲۰۰، کاهش اندازه مش بندی و افزایش تعداد المان در مدلسازی اجزاء محدود، تاثیری بر روی بهبود نتایج خروجی

با توجه به نتیجه بهدست آمده از شکل ۱۰، نمودار نیرو-جابجایی برای سه اندازه مش ۲/۷ ، ۲ و ۱/۸ میلیمتر که به ترتیب دارای ۴۴۵۰، ۷۳۷۴ و ۹۹۹۶ المان میباشند، در شکل ۱۱ ترسیم و با یکدیگر مقایسه شده است. با توجه به شکل ۱۱ واضح است که برای بارگذاری برابر ۳۳ میلیمتر، نمودار نیرو-جابجایی برای سه اندازه مش ارائه شده، تقریبا مشابه است.

با توجه به این مطلب که، سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی میزان جذب انرژی توسط جاذب لانهزنبوری را نشان میدهد، میزان جذب انرژی توسط لانهزنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت از دو حل تجربی و عددی در



**شکل ۱۰:** اثر تعداد المانها در مدلسازی اجزاء محدود بر روی نیروی بیشینه اولیه در نمودار نیرو-جابجایی در لانهزنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت





**شکل ۹:** نمودار نیرو بر حسب جابجایی برای بارگذاری شبهاستاتیکی سازه لانهزنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت در تحلیل اجزاء محدود و مقایسه آن با نمودار استخراج شده از آزمایش تجربی

Fig. 9. Comparison between experimental test and FE model of quasi-static force-displacement diagram of the negative stiffness honeycomb with constant thickness

Table 3. Comparison of the amount of energy absorbed by constant thickness negative stiffne	SS
honeycomb derived from experimental and FE results	

**جدول ۳:** مقایسه بین مقدار انرژی جذب شده استخراج شده از نمودار نیرو-جابجایی در آزمایش تجربی و مدلسازی اجزاء محدود برای لانهزنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت

نتايج تجربى	نتايج حل اجزاء محدود	
۵/۱۹۰۳	۴/۶۲۰۵	مقدار انرژی جذب شده (N.m)

نرمافزار متلب محاسبه و در جدول ۳ ارائه گردیده است.

با توجه به مقایسه نتایج تجربی و عددی ارائه شده در جدول۳، نتایج عددی انطباق بسیار خوبی با نتایج تجربی دارد، بهطوری که خطای نسبی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی، در میزان جذب انرژی توسط لانهزنبوری با سفتی منفی با ضخامت ثابت، برابر ۱۰/۹۸ درصد میباشد که میتوان نتیجه گرفت، شبیهسازی عددی مورد تایید قرار میگیرد.

# ٤- شبیهسازی عددی لانهزنبوری هدفمند با سفتی منفی

با توجه به تحقیقات انجام شده تاکنون، یکی از مهمترین مزایای

سازههای لانهزنبوری این است که با تغییر پارامترهای هندسی سازه از قبیل ارتفاع، ضخامت، اندازه سلول و زاویه داخلی آن میتوان به خواص مکانیکی متفاوتی دست پیدا نمود. همچنین هدفمند نمودن سازه لانهزنبوری با تغییر دادن ضخامت آن، باعث کاهش نرخ اعمال بار ضربهای به جسم محافظتشونده میشود و در مدت زمان بیشتری نیرو انتقال مییابد. در واقع هر چه بار ضربهای در مدت زمان بیشتری انتقال یابد، آسیب کمتری به سازه اصلی وارد خواهد شد [۱۴]. در ادامه این تحقیق برای اولین بار از لانهزنبوریهای هدفمند با سفتی منفی برای جذب انرژی برگشتپذیر استفاده شده است. هدفمند نمودن با تغییر در ضخامت هر لایه از تیرهای



**شکل ۱۲:** هندسه، شرایط مرزی و بارگذاری برای تحلیل اجزاء محدود یک نمونه لانهزنبوری با سفتی منفی هدفمند



خمیده از مود اول کمانش به مود سوم و محدود نمودن مود دوم است– باید ابعاد تیرها را طوری انتخاب کرد که مقدار Q از عدد ۲/۳۱ بیشتر باشد. با توجه به این دو نکته ضخامتها به طور یکنواخت از ۱/۲۷ تا ۱/۹ میلی متر افزایش یافته است.

برای سازه با ضخامت ثابت لایهها، تمام ردیفها دارای ضخامت ثابت ۱/۲۷ میلیمتر میباشد. هر دو مدل از جنس نایلون ۱۱ با چگالی ۱۰۴۰ کیلوگرم بر مترمکعب، نسبت پوواسون۳۳/۰ و مدول یانگ ۱۵۸۲ مگاپاسکال درنظر گرفته شده است. بارگذاری شبهاستاتیکی برابر ۳۳ میلیمتر تحت شرایط کنترل جابجایی بر صفحه بالایی Aدر سازه وارد میشود، در حالی که صفحه پایینی B در سازه کاملاً مقید شده است. تراکم شبهاستاتیکی سازه لانهزنبوری هدفمند با سفتی منفی در مراحل مختلف بارگذاری در شکل ۱۳ نشان داده شده است. مشاهده میشود که پدیده فراجهش از لایه با ضخامت کمتر آغاز میشود و به ترتیب ضخامت لایهها، تراکم سازه لانهزنبوری اتفاق میافتد.

نمودار تغییرات نیرو بر حسب جابجایی برای سازه لانهزنبوری هدفمند با سفتی منفی و سازه لانهزنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت در شکل ۱۴ ارائه شده است.

همانطور که در شکل ۱۴ مشاهده می شود، با تغییر ضخامت سازه



**شکل ۱۱:** اثر اندازه مشربندی در مدلسازی اجزاء محدود بر روی نمودار نیرو– جابجایی در لانهزنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت

# Fig. 11. The effect of mesh size on the force-displacement diagram in FE model of the negative stiffness honeycomb with constant thickness

خمیده موجود در سازه لانهزنبوری با سفتی منفی انجام شده است و در هر لايه از سمت اعمال بار ضخامت لايهها كاهش يافته است. به منظور بررسي اهمیت هدفمند نمودن سازه لانهزنبوری در جذب انرژی و اثر تغییر سفتی سازه از یک لایه به لایه دیگر، میزان جذب انرژی توسط لانهزنبوری هدفمند با سفتی منفی با سازه لانهزنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت تحت بارگذاری شبه استاتیکی مقایسه شده است. این مقایسه در محیط نرم افزاری آباکوس شبیهسازی شده است. در این شبیهسازی عددی، سازه هدفمند مطابق شکل ۱۲ دارای ضخامتهای به ترتیب ۱/۲۷، ۱/۴۸، ۱/۶۹ و ۱/۹ میلی متر است و بارگذاری از سمت ضخامت بیشتر سازه لانهزنبوری اعمال شده است. در انتخاب ضخامتهای سازه لانهزنبوری هدفمند با سفتی منفی دو نکته در نظر گرفته شده است. اول این که علاوه بر اهمیت میزان افزایش جذب انرژی در سازههای جاذب انرژی، وزن این سازهها نیز حائز اهمیت است، و باید انرژی مخصوص(نسبت جذب انرژی به جرم سازه) در آنها تا حد امکان بالا باشد. از سوی دیگر با توجه به تحقیقات موجود در مراجع [۴ و ۵]، ثابت هندسی Q یک پارامتر اساسی در تیرهای سازنده لانهزنبوری با سفتی منفی است و وضعیت دو پایایی و میزان سفتی منفی را تعیین می کند و برای داشتن خاصیت سفتی منفی و برگشتپذیری- که حاصل کمانش تیر

<sup>1</sup> Bistable



Fig. 13. Functionally graded negative stiffness honeycomb in various stages of quasi-static compression (a) before displacement (b) y=6.27 mm (c) y=13.28 mm (d) y=22.73 mm (e) y=30.08 mm

 Table 4. Comparison between the amount of energy absorbed in FE model of constant thickness negative stiffness honeycomb and functionally graded negative stiffness honeycomb

η	SEA (J/kg)	$E_a$ (J)	<i>m</i> (kg)	$F_{mean}$ (N)	$F_{Peak}$ (N)	نوع سازه
•/٧٢٨	۱۰۲/۶۵	۴/۶۲۰۵	•/•۴۵•١	14.10	१९४/१९۶	لانهزنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت
1/•04	181/80	۷/۸۴۳۴	•/• 4884	۲۳۷	774/801	لانەزنبورى با سفتى منفى ھدفمند

**جدول ٤:** مقایسه بین لانهزنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت و لانهزنبوری هدفمند با سفتی منفی در جذب انرژی

شده در واحد جرم سازه 'SEA و ضریب شکل  $\eta$  استفاده نمود. این پارامترها در طراحی جاذبهای انرژی بسیار مهم هستند و وزن سازه به عنوان عامل محدودکننده میباشد. این پارامترها به صورت روابط (۲) تا (۵) محاسبه می شوند [۱۵ و ۱۶].

$$E_a = \int_{x_1}^{x_2} F(x) dx \tag{(7)}$$

1 Specific Energy Absorption (SEA)

لانهزنبوری با سفتی منفی و هدفمند نمودن آن، مقدار حداکثر نیرو در هر لایه با افزایش ضخامت لایه افزایش مییابد. همچنین نتایج شبیهسازی اجزاء محدود نشان میدهد، در بارگذاری شبه استاتیکی، ابتدا لایه با ضخامت کمتر کمانش مییابد و پس از کمانش کامل آن لایه، لایه با ضخامت بیشتر از آن کمانش خواهد یافت و این کمانش به ترتیب از نازکترین لایه تا ضخیم ترین لایه ادامه مییابد.

برای سنجیدن خواص جاذب انرژی می توان از پارامترهای نیروی بیشینه  $F_{mean}$ ، نیروی میانگین  $F_{peak}$ ، نارژی جذب  $F_{Peak}$ 



**شکل ۱۵:** مقایسه بین نمودار ظرفیت جذب انرژی در واحد جرم حاصل از حل اجزاء محدود برای لانهزنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت و لانهزنبوری هدفمند با سفتی منفی

Fig. 15. Comparison between specific energy absorbed for FE model of constant thickness negative stiffness honeycomb and functionally graded negative stiffness honeycomb

لانهزنبوری هدفمند با سفتی منفی، بهدست آمده از حل اجزاء محدود، در شکل ۱۵ ارائه شده است.

واضح است که ظرفیت جذب انرژی در واحد جرم در سازه لانهزنبوری هدفمند با سفتی منفی در مقایسه با لانهزنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت افزایش یافته است. با توجه به جدول ۴، برای جابجایی کل معادل ۳۳ میلیمتر، این میزان افزایش نسبی برابر ۵۷ درصد است که نشان از کارایی بهتر لانهزنبوری هدفمند با سفتی منفی میباشد. همچنین با توجه به این مطلب که اگر ضریب شکل  $\eta$  افزایش یابد، نیروی بیشینه به نیروی متوسط نزدیک میشود و حالتی ایدهآل برای جاذبهای انرژی محسوب میشود و باعث بالا رفتن بازده در میزان جذب انرژی میگردد [۱۲]، مقدار ضریب شکل  $\eta$  برای دو سازه لانهزنبوری هدفمند با سفتی منفی و لانهزنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت با یکدیگر مقایسه شده است. مقدار ضریب شکل در لانهزنبوری هدفمند با سفتی منفی به مراتب بیشتر از ضریب شکل با سفتی منفی و ضخامت ثابت با یکدیگر مقایسه شده است. مقدار ضریب باکر در لانهزنبوری هدفمند با سفتی منفی به مراتب بیشتر از ضریب شکل

## ٥- نتيجه گيري

در این تحقیق میزان جذب انرژی در لانهزنبوری با سفتی منفی هدفمند با لانهزنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت با یکدیگر مقایسه شده



**شکل ١٤:** مقایسه بین نمودار نیرو-جابجایی حاصل از حل اجزاء محدود برای لانهزنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت و لانهزنبوری هدفمند با سفتی منفی

Fig. 14. Comparison between quasi-static force-displacement diagram for FE model of negative stiffness honeycomb with constant thickness and functionally graded negative stiffness honeycomb

$$F_{mean} = \frac{E_a}{x_2 - x_1} \tag{(Y)}$$

$$SEA = \frac{E_a}{m} \tag{(f)}$$

$$\eta = \frac{F_{mean}}{F_{Peak}} \tag{(a)}$$

مقادیر  $\mathcal{R}_{Peak}$ ،  $\mathcal{R}_a$ ،  $\mathcal{R}_a$ ،  $\mathcal{R}_{Peak}$  و  $\eta$  برای دو سازه لانهزنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت و سازه لانهزنبوری هدفمند با سفتی منفی محاسبه و در جدول ۴ با یکدیگر مقایسه شده است.

برای مطالعه اثر تغییر ضخامت لایهها و هدفمند نمودن سازه لانهزنبوری در افزایش میزان جذب انرژی، میزان جذب انرژی در واحد جرم، SEA، برای سازه لانهزنبوری هدفمند با سفتی منفی و سازه لانهزنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت محاسبه و با یکدیگر مقایسه شده است. برای این منظور مساحت زیر نمودار نیرو بر حسب جابجایی، تا جابجایی ۳۳ میلیمتر، نشان داده شده در شکل ۱۳، بر جرم سازه (حاصلضرب حجم سازه لانهزنبوری در چگالی ماده نایلون ۱۱) تقسیم شده است. همچنین نمودار تغییرات SEA نسبت به جابجایی نیز برای لانهزنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت و منابع

- D.M. Correa, C.C. Seepersad, M.R. Haberman, Mechanical design of negative stiffness honeycomb materials, Integrating Materials and Manufacturing Innovation, 4(1) (2015) 10.
- [2] D. M. Correa, T. D. Klatt, S.A. Cortes, M. R. Haberman, D. Kovar, and C.C. Seepersad, Negative Stiffness Honeycombs for Recoverable Shock Isolation, Rapid Prototyping Journal, 21(2) (2015) 193-200.
- [3] B.A. Fulcher, D.W. Shahan, M.R. Haberman, C. Conner Seepersad, P.S. Wilson, Analytical and Experimental Investigation of Buckled Beams as Negative Stiffness Elements for Passive Vibration and Shock Isolation Systems, Journal of Vibration and Acoustics, 136(3) (2014) 031009-031012.
- [4] J. Qiu, An electrothermally-actuated bistable MEMS relay for power applications, Ph.D. thesis, MIT University, (2003).
- [5] J. Qiu, J.H. Lang, A.H. Slocum, A curved-beam bistable mechanism, Journal of Microelectromechanical Systems, 13(2) (2004) 137-146.
- [6] T.D. Klatt, Extreme energy absorption : the design, modeling, and testing of negative stiffness metamaterial inclusions, M.Sc. Thesis ,The University of Texas at Austin,(2014).
- [7] S. Deqiang, Z. Weihong, W. Yanbin, Mean out-of-plane dynamic plateau stresses of hexagonal honeycomb cores under impact loadings, Composite Structures, 92(11) (2010) 2609-2621.
- [8] Y. Song, Z. Wang, L. Zhao, J. Luo, Dynamic crushing behavior of 3D closed-cell foams based on Voronoi random model, Materials & Design, 31(9) (2010) 4281-4289.

است. در ابتدا لانهزنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت تحت بارگذاری جابجایی کنترل و بار شبه استاتیکی مورد آزمایش قرار گرفته است و سپس این بارگذاری در نرمافزار آباکوس شبیهسازی شده است. نتایج حاصل از حل عددي با نتايج آزمايش تجربي راستي آزمايي شده است. نتايج، انطباق مناسب بین نتایج آزمایشگاهی و حل عددی را نشان میدهد، بهطوریکه مقایسه میزان جذب انرژی حاصل از حل عددی و تجربی درصد خطای نسبی ۱۰/۹۸ را نشان میدهد، که نشاندهنده قابل قبول بودن شبیهسازی عددی میباشد. پس از آن مدلسازی لانهزنبوری هدفمند با سفتی منفی در نرمافزار آباکوس انجام شده است. میزان جذب انرژی در واحد جرم در آن با میزان جذب انرژی در لانهزنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت مقایسه شده است. نتایج مدل سازی نشان میدهد که میزان جذب انرژی در واحد جرم در بارگذاری شبه استاتیکی در لانهزنبوری هدفمند با سفتی منفی ۱/۵۷ برابر لانهزنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت است. در واقع جذب انرژی در واحد جرم به میزان نسبی ۵۷ درصد افزایش یافته است. به طور خلاصه مشاهده می شود که هدفمند نمودن سازه لانهزنبوری با سفتی منفی، باعث افزایش میزان جذب انرژی میشود که این مساله در کنار برگشتیذیر بودن این نوع سازهها یک ویژگی منحصر به فرد برای جاذبهای انرژی می باشد که می توان در جذب بالای انرژی و در بار گذاری های مکرر از آن بهره حست.

## ٦- فهرست علائم

#### علائم انگلیسی

b	عرض خارج از صفحه
$E_a$	ظرفیت جذب انرژی
$F_{mean}$	نیروی میانگین
$F_{Peak}$	نيروى بيشينه اوليه
h	حداكثر ارتفاع اوليه تير خميده
L	طول تیر
т	جرم جاذب انرژی
$\mathcal{Q}$	ثابت هندسی
SEA	انرژی جذب شده در واحد جرم سازه
t	ضخامت تیر
$\overline{w}(x)$	فاصله عمودی یک نقطه روی تیر از خط افقی اتصالدهنده دو انتهای تیر
x	موقعیت عرضی هر نقطه روی تیر خمیده

#### علائم يونانى

ضريب شكل  $\eta$ 

- Modares Mechanical Engineering, 18(3) (2018) 126-134 (in Persian).
- [16] H. Taghipoor, M. Damghani Noori, Experimental and numerical study on
- energy absorption of lattice-core sandwich beam, Steel and Composite Structures, 27(2) (2018) 135-147.
- [17] H. Taghipoor, M. Damghani Noori, Topology Optimization Study in Energy Absorption of Latticecore Sandwich Beams under Three-point Bending Test, Modares Mechanical

Engineering, 18(4) (2018) 163-173 (in Persian).

- [18] B. Yu, B. Han, P.-B. Su, C.-Y. Ni, Q.-C. Zhang, T.J. Lu, Graded square honeycomb as sandwich core for enhanced mechanical performance, Materials & Design, 89(Supplement C) (2016) 642-652.
- [19] X. Jin, Z. Wang, J. Ning, G. Xiao, E. Liu, X. Shu, Dynamic response of sandwich structures with graded auxetic honeycomb cores under blast loading, Composites Part B: Engineering, 106(Supplement C) (2016) 206-217.
- [20] Y. Tao, S. Duan, W. Wen, Y. Pei, D. Fang, Enhanced out-of-plane crushing strength and energy absorption of in-plane graded honeycombs, Composites Part B: Engineering, 118(Supplement C) (2017) 33-40.
- [21] E. Salcedo, D. Baek, A. Berndt, J. Eun Ryu, Simulation and validation of three dimension functionally graded materials by material jetting, Additive Manufacturing, 22 (2018) 351-359.

- [9] L.T. Chang, C.H. Chang, G.L. Chang, Fit Effect of Motorcycle Helmet — A Finite Element Modeling, JSME International Journal Series A Solid Mechanics and Material Engineering, 44(1) (2001) 185-192.
- [10] L.T. Chang, G.L. Chang, J.Z. Huang, S.C. Huang, D.S. Liu, C.H. Chang, Finite element analysis of the effect of motorcycle helmet materials against impact velocity, Journal of the Chinese Institute of Engineers, 26(6) (2003) 835-843.
- [11] A. Ajdari, H. Nayeb-Hashemi, A. Vaziri, Dynamic crushing and energy absorption of regular, irregular and functionally graded cellular structures, International Journal of Solids and Structures, 48(3) (2011) 506-516.
- [12] A. Ajdari, S. Babaee, A. Vaziri, Mechanical properties and energy absorption of heterogeneous and functionally graded cellular structures, Procedia Engineering, 10 (2011) 219-223.
- [13] X. Wang, Z. Zheng, J. Yu, Crashworthiness design of density-graded cellular metals, Theoretical and Applied Mechanics Letters, 3(3) (2013) 031001.
- [14] S.A. Galehdari, M. Kadkhodayan, S. Hadidi-Moud, Low velocity impact and quasi-static in-plane loading on a graded honeycomb structure; experimental, analytical and numerical study, Aerospace Science and Technology, 47(Supplement C) (2015) 425-433.
- [15] H. Taghipoor, M. Damghani Noori, Experimental investigation of energy absorption in foam filled sandwich beams with expanded metal sheet as core under quasi-static bending,

بی موجعه محمد ا