



## بررسی تجربی رفتار مکانیکی سازه‌های ساندویچی الهام گرفته شده از ساختار پیله کرم ابریشم و ساخته شده با استفاده از روش پرینت سه بعدی

مصطفی حسینی واجاری<sup>1</sup>، سهیل داریوشی<sup>2\*</sup>، مرتضی بهزادنسب<sup>3</sup>

1- دانشجوی دکتری، مهندسی معماری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان

2- استادیار، مهندسی مکانیک، گروه کامپوزیت، پژوهشکده فرآیند پلیمرها، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، تهران

3- استادیار، مهندسی پلیمر، گروه رنگ، پژوهشکده فرآیند پلیمرها، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، تهران

\* تهران، صندوق پستی 14965115، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، s.dariushi@ippi.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

پیله کرم ابریشم یک ساختار سلسله مراتبی با عملکرد چندگانه است که طی میلیون‌ها سال جهت ایجاد شرایط بهینه برای دگردیسی و حفظ جان حشره در مقابل شکارچیان تکامل یافته است. در این مقاله با الهام‌گیری از ساختار پیله کرم ابریشم، هسته دو نوع سازه ساندویچی مشبک باز طراحی شد. به این منظور میله‌های مستقیم موجود در ساختار مکعبی مرکزدار و ساختار کاگومی با میله‌های خمیده به شکل حلقه جایگزین شد. برای ساخت سازه‌های مشبک طراحی شده به دلیل پیچیدگی هندسه و دقت ابعادی بالا از روش چاپ سه بعدی پلیمریزاسیون نوری استفاده شد. در این روش قطعه مستقیماً از داده‌های هندسی سطوح آن که به کمک کامپیوتر طراحی شده است، به صورت لایه به لایه با استفاده از رزین‌های پخت نوری ساخته می‌شود. پس از ساخت قطعات، آزمون فشار شبه استاتیکی بر روی نمونه‌ها انجام گرفت. نتایج بدست آمده نشان داد که ساختارهای اصلاح شده قابلیت تغییر شکل بزرگتری بدون ایجاد شکست دارند و جذب انرژی در آنها به صورت یکنواخت صورت می‌گیرد. اگرچه ساختارهای اصلاح شده مدول الاستیک و جذب انرژی کمتری دارند اما کرنش الاستیک بزرگتر و روند تدریجی شکست در این سازه‌ها از مزایای مهم آنها به حساب می‌آید که در کاربردهای مختلف مانند جاذب‌های انرژی یا ایمپلنت‌های پزشکی که وظیفه تحمل بار ندارند، می‌تواند مورد توجه قرار بگیرد.

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 28 بهمن 1399  
داوری اولیه: 27 فروردین 1400  
پذیرش: 22 خرداد 1400

### کلیدواژگان:

سازه ساندویچی  
پرینت سه بعدی  
پیله کرم ابریشم  
بار فشاری

## An experimental investigation on mechanical properties of 3D-printed bio-inspired sandwich panels based on silk cocoon geometry

Mostafa Hosseini Vajari<sup>1</sup>, Soheil Dariushi<sup>2\*</sup>, Morteza Behzadnasab<sup>1</sup>

1- Department of Architecture, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Semnan Branch, Semnan, Iran

2- Composite Group, Polymer Processing Faculty, Iran Polymer and Petrochemical Institute, Tehran, Iran

3- Colour Group, Polymer Processing Faculty, Iran Polymer and Petrochemical Institute, Tehran, Iran

\* P.O.Box: 14965115, Iran Polymer and Petrochemical Institute, s.dariushi@ippi.ac.ir

### Article Information

Original Research Paper  
Received: 17 February 2021  
First Decision: 16 April 2021  
Accepted: 12 June 2021

### Keywords:

Sandwich Structure  
3d Print  
Silkworm Cocoon  
Compression Loading

### Abstract

The silkworm cocoon is a hierarchical structure with multiple functions that have evolved over millions of years to create optimal metamorphosis conditions and preserve insect life against predators. In this paper, inspired by the structure of a silkworm cocoon, the cores of two types of lattice sandwich structures were redesigned. For this purpose, the straight struts in the body centered cubic structure and the kagome structure were replaced by curved struts. Due to the complexity of geometry and high dimensional accuracy, three-dimensional printing (digital light processing) was used to construct the designed lattice structures. In this method, the part is made directly from its surfaces' geometric data, which has been designed with the help of a computer, layer by layer, using optical curing resins. After the fabrication of the parts, a quasi-static pressure test was performed on the samples. The results showed that the modified structures are capable of larger deformation without failure, and their energy absorption is uniform. Although modified structures have a lower modulus of elasticity and energy absorption, larger elastic strain and gradual failure of these structures are important advantages that can be considered in various applications such as energy absorbers or nonstructural medical implants.

### 1- مقدمه

قبول برای تحمل نیروهای برشی را داشته باشد تا بتواند از لغزش رویه‌ها نسبت به یکدیگر جلوگیری کند [1]. عملکرد مکانیکی سازه‌های ساندویچی علاوه بر خواص

سازه‌های ساندویچی از یک هسته با چگالی کم و دو رویه با سفتی و استحکام بالا تشکیل می‌شوند. هسته باید سفتی قابل

Please cite this article using:

M. Hosseini Vajari, S. Dariushi, M. Behzadnasab, An experimental investigation on mechanical properties of 3D-printed bio-inspired sandwich panels based on silk cocoon geometry, Vol. 8, No. 4, pp. 19- 26, 2021 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

روش استریولیتوگرافی است که از دقت ابعادی بسیار بالایی برخوردار است. در اواسط دهه 80 میلادی چارلز هال پلیمرهای با قابلیت پخت نوری را در معرض تابش لیزر اسکن کننده، همانند مکانیزم به کار رفته در چاپگرهای لیزری قرار داد و توانست یک لایه جامد ایجاد کند. با تکرار این عمل و پخت لایه‌های بعدی بر روی لایه قبلی، قطعات سه بعدی تولید شده و روش استریولیتوگرافی به وجود آمد [8].

در روش نمونه‌سازی با استفاده از نور، صفحه ساخت متحرک در محور عمودی (Z) در حمامی آکنده از رزین حساس به نور غوطه ور بوده و منبع نور به آن تابیده می‌شود. هر نقطه از رزین که در معرض تابش قرار گیرد پلیمریزه شده و باقی قسمت‌های رزین بصورت مونومر باقی می‌مانند. سپس با حرکت صفحه در راستای محور عمودی امکان ایجاد لایه بعدی بر روی لایه پرینت شده قبلی مهیا شده و بدین ترتیب قطعه نهایی لایه به لایه ایجاد می‌شود. به دلیل استفاده از نور در طول موج‌های مختلف و امکان متمرکز کردن آنها با استفاده از عدسی‌های اپتیکی این روش از دقت ابعادی بسیار بالایی برخوردار بوده و حتی می‌توان اشکال مورد نظر را در ابعاد زیر میکرومتر ایجاد نمود.

با توجه به پیشرفت‌های اخیر روش پرینت سه بعدی و امکان چاپ قطعات ظریف و پیچیده، ساخت قطعات با هندسه مشابه با ساختارهای موجود در طبیعت تسهیل شده و امکان درک بهتر مکانیزم‌های طبیعی و قابلیت‌های آنها فراهم شده است. در دهه‌های اخیر، پيله کرم ابریشم به عنوان یک ساختار مشبک طبیعی مورد بررسی و مطالعه محققان مختلف قرار گرفته و رفتارهای فیزیکی و مکانیکی آن که میلیون‌ها سال در طبیعت تکامل یافته، مطالعه شده است [9]. پيله کرم ابریشم یک ساختار سه بعدی بدون بافت و با لایه‌های متعدد است که به واسطه خواص خوب مکانیکی و فیزیکی می‌تواند شفیره را در مدت دگرذیسی در مقابل شکارچیان و تغییرات آب و هوایی خارج پيله حفظ کرده و شرایط اتمسفری داخل پيله را کنترل کند [10]. طبق مطالعات انجام شده در مورد ساختار و خصوصیات انواع پيله‌ها، خصوصیات مکانیکی پيله‌ها توسط شبکه‌های الیاف و خاصیت الیاف مشخص می‌شوند. با توجه به این ساختار، پارچه ابریشمی یا رشته ابریشم در صنعت نساجی، زیست پزشکی و مهندسی برای مقاصد مختلف مانند پارچه‌های ساده تا پارچه چتربازان، مواد کامپوزیتی، بخیه‌های جراحی و داربست‌های بافتی مورد استفاده قرار می‌گیرد [11].

هنگامی که تنیدن پيله شروع می‌شود، علاوه بر حرکت کرم ابریشم، حرکت سر و گردن آن با ایجاد حلقه‌هایی به شکل عدد

رویه‌ها، بستگی زیادی به جنس و هندسه هسته دارد. در هسته‌های فومی و مشبک می‌توان متناسب با نیازهای طراحی با تغییر چگالی و مکان نسبی سلول‌ها و یا تغییر هندسه دیواره‌ها خواص مکانیکی نهایی را تنظیم نمود [2].

ساختارهای ساندویچی به دلیل ظرفیت مناسب در جذب انرژی و نسبت مقاومت به وزن بالا در کاربردهای مختلف از جمله به عنوان سازه‌های محافظ در بسته بندی و نیز عضو ساختاری در سازه‌های سبک مورد استفاده قرار می‌گیرند [3]. ساختارهای لانه زنبوری شش وجهی، خرپایی، کرکره‌ای، ساختارهای سلسله مراتبی و همچنین انواع فوم‌های پلیمری از کاربردی‌ترین انواع هسته‌های پل‌های ساندویچی در ساخت جاذب‌های انرژی به شمار می‌آیند [4، 5]. هسته‌های مشبک از محبوب‌ترین اشکال هسته در سازه‌های ساندویچی به ویژه برای جذب نیرو هستند. همچنین مزیت‌های هسته‌های مشبک مانند ساخت آسان، انعطاف پذیری بالا در فرایندهای طراحی و هزینه کم تولید باعث شده ساختارهای ساندویچی با هسته مشبک برای تولید انبوه جذاب شوند [5].

ساختارهای مشبک از یک یا چند سلول تکرار شونده تشکیل می‌شوند. این سلول‌ها از میله‌هایی تشکیل شده‌اند که اندازه و محل اتصال آنها با یکدیگر شکل فضایی سلول را مشخص می‌کند. پارامترهایی مانند توپولوژی و هندسه سلول رفتار کلی ساختار مشبک را به نحو چشمگیری تحت تاثیر قرار می‌دهند. یکی از رایج‌ترین ساختارهای مشبک که تاکنون توسط محققان مورد بررسی قرار گرفته است، ساختار مکعبی مرکز دار است. این ساختار معمولاً به دلیل سادگی طراحی و ساخت برای کاربردهای مختلف انتخاب می‌شود [6].

امروزه ساختارهای مختلف و پیچیده با تنوع در مواد تولیدی و روش ساخت، برای تولید ساختارهای ساندویچی مطرح شده‌اند. چاپ سه بعدی با برخورداری از مزایای بسیار از جمله سهولت کارکرد، امکان ساخت قطعات با هندسه پیچیده و دقت بالا در زمینه‌های زیست پزشکی، الکترونیک، هوافضا و صنایع مختلف به کار گرفته شده است [7، 8].

در چاپ سه بعدی بر خلاف روش‌های مرسوم تولید (تزیق در یک قالب و یا تراشکاری و برداشت مواد)، یک قطعه به صورت لایه به لایه ساخته می‌شود. برای این منظور مدل سه بعدی رایانه‌ای به ده‌ها و یا هزاران لایه دو بعدی با ضخامت بسیار کم (چند میکرومتر) تقسیم شده و هر لایه به صورت مجزا ایجاد و سپس با اضافه شدن لایه‌های بعدی قطعه نهایی تولید می‌شود. یکی از مهمترین و پرکاربردترین روش‌های ساخت افزایشی

می‌کنند. اعضای تشکیل دهنده ساختار با صفحه X-Y زاویه 45 درجه می‌سازند. غالباً تغییر شکل این ساختار با خمش میله‌ها انجام می‌شود [13]. این ساختار به علت عدم وجود میله‌های عمودی، تحت بارگذاری فشاری تغییر شکل کلی بزرگی را بدون شکست محلی از خود نشان می‌دهد و ساختاری مناسب برای جذب انرژی می‌باشد [14].

ساختار دوبعدی کاگومی از دیرباز در بافت سبدهای ژاپنی مورد استفاده قرار می‌گرفت. دانشمندان بعدها دریافتند که ساختار کریستالی برخی مواد معدنی طبق هندسه کاگومی سه بعدی شکل گرفته‌اند [15]. پژوهشگران دریافتند که در ساختار سازه‌های ساندویچی، هسته‌های کاگومی تحت بارگذاری فشاری در کمناش پلاستیک از خود مقاومت بالایی نشان می‌دهند که این امر موجب به تعویق انداختن شکست سازه و جذب انرژی بیشتر می‌شود. نکته دیگر آن است که ساختار کاگومی تحت بار برشی از خود رفتار ایزوتروپیک نشان می‌دهد یعنی در همه جهات مقاومت یکسانی دارد. با الهام از نحوه قرارگیری الیاف به شکل حلقه‌های بینهایت در ساختار پیله کرم ابریشم، میله‌های به کار رفته برای تشکیل دو ساختار مشبک مکعبی مرکزدار و کاگومی با ساختار حلقه‌ای جایگزین شد. این حلقه‌ها به شکل دو لوپ دقیقاً متقارن و هم اندازه در یک محور روبروی همدیگر قرار گرفتند تا از نظر توزیع نیرو همگن باشند.

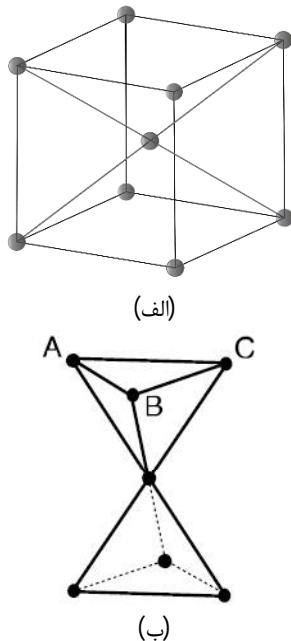


Fig. 2 Schematic representation of lattice structure with geometry a) body centered cubic b) kagome

شکل 2 تصویر شماتیک ساختار مشبک با هندسه الف) مکعبی مرکزدار، ب) کاگومی

8 انگلیسی (8) یا علامت بی نهایت ریاضی ( $\infty$ ) یک بافت منحصر به فرد در لایه های مختلف را ایجاد می‌کند که در شکل 1 نشان داده شده است. مشاهده این نوع از بافت توسط سایر پژوهشگران نیز گزارش شده است [10-12]. ساختار لایه‌ای با هندسه خاص قرارگیری الیاف در هر لایه به گونه‌ای است که پیله در مقابل بارهای مکانیکی مانند ضربه و فشار بسیار مقاوم است. البته رفتار کرم ابریشم عامل مهمی است که بر خواص پیله ابریشم تأثیر می‌گذارد.

استراتژی ساخت و ساز کرم ابریشم به گونه‌ای کرم ابریشم و محیط طبیعی نیز بستگی دارد. در نتیجه در طبیعت پیله‌های با اندازه‌های مختلف، ساختارهای مختلف، مورفولوژی‌ها و خواص مکانیکی متنوع وجود دارد [9-12].

بر اساس اطلاعات نویسندگان این مقاله، تاکنون در هیچ‌کدام از مقالاتی که در بالا مورد بررسی قرار گرفته و یا حتی مقالات مشابه در زمینه سازه‌های مشبک، از میله‌های دارای انحنای با شکل خاص مشاهده شده در الیاف پیله کرم ابریشم استفاده نشده است. از این رو در پژوهش حاضر با الهام از نحوه قرارگیری الیاف در لایه‌های پیله کرم ابریشم دو ساختار میله‌ای مرسوم با طراحی شد. به منظور ساخت نمونه‌های ساندویچی با هسته مشبک میله‌ای از روش پرینت سه بعدی بر پایه پخت نوری رزین که یکی از دقیق‌ترین روش‌ها برای تولید ساختارهای سه‌بعدی است، استفاده شد. با انجام آزمون فشاری، میزان جذب انرژی و رفتار سازه‌های ساندویچی طراحی شده با رفتار ساختارهای بدون تغییرات مقایسه شد.

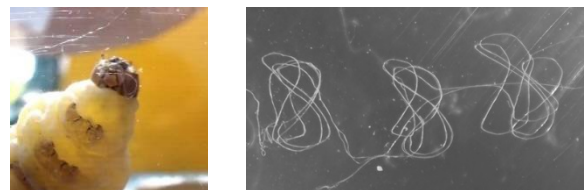


Fig. 1 Rings made in the shape of an infinite mathematical symbol ( $\infty$ ) by Bombyx mori silk worms

شکل 1 حلقه‌های ساخته شده به شکل علامت بی نهایت ریاضی ( $\infty$ ) توسط کرم های ابریشم بامبیکس موری

## 2- مواد و روش‌ها

### 2-1- ایجاد مدل سه بعدی

ساختار مشبک با هندسه مکعبی مرکزدار<sup>1</sup> همان‌طور که در شکل 2- الف نشان داده شده از هشت میله استوانه‌ای تشکیل شده است که مرکز یک مکعب را به گوشه‌های آن متصل

<sup>1</sup> Body Centered Cubic or BCC

همه قطعات پس از پرینت در محلول الکل شستشو داده شد و به مدت 40 دقیقه زیر تابش نور فوق بنفش جهت پساپخت قرار گرفت. با توجه به طراحی انجام شده و دقت بالای ساخت تمام نمونه‌ها از نظر ابعاد و وزن یکسان بودند. شکل 4 تصاویر میکروسکوپ نوری یک حلقه از ساختار اصلاح شده ارائه شده است، این تصویر اتصال و دقت ساخت مناسب لایه‌ها را نشان می‌دهد. در شکل 5 نیز تصاویر نمونه‌های ساخته شده ارائه شده است.

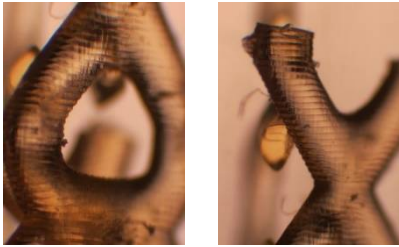


Fig. 4 Microscopic images of fabricated three-dimensional structures  
شکل 4 تصاویر میکروسکوپی از ساختارهای سه بعدی ساخته شده

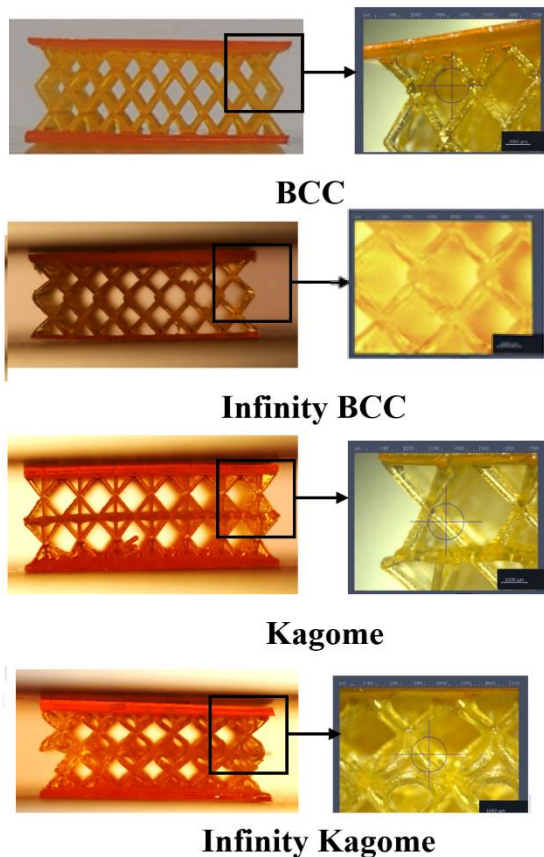


Fig. 5 Three-dimensional structures made by 3D printing  
شکل 5 ساختارهای سه بعدی ساخته شده با روش پرینت سه بعدی

### 2-3- انجام آزمون فشاری

تست فشاری به منظور بررسی خواص فشاری و میزان جذب انرژی طبق استاندارد ASTM C365 انجام گرفت. برای اطمینان

همان‌گونه که در شکل 3 مشاهده می‌شود، اتصال حلقه‌ها به یکدیگر مشابه ساختار بی بافت طراحی شده و هیچگونه گره‌ای میان حلقه‌ها ایجاد نشد، حلقه‌ها تنها در بخش انتهایی به یکدیگر متصل شدند. طراحی قطعات به گونه‌ای انجام شد که چگالی نسبی تمام نمونه‌ها با هم برابر باشند، جهت طراحی از نرم افزار سالیدورک 2016 استفاده شد.

### 2-2- ساخت نمونه بر اساس روش ساخت افزایشی

در این پژوهش از پرینتر سه بعدی به روش پردازش نوری دیجیتال (DLP) مدل پارساتری دی ساخت ایران با دقت 30 میکرون استفاده شد. رزین پایه اکریلاتی حساس به نور فوق بنفش (UV) نوع مان کست 800 ساخت شرکت مان بسیار جهت ساخت نمونه تهیه و نمونه‌ها با ضخامت 50 میکرومتر در زمان تابش 3 ثانیه برای هر لایه و در ابعاد  $8 \times 21 \times 21$  میلی‌متر مکعب تولید شد.

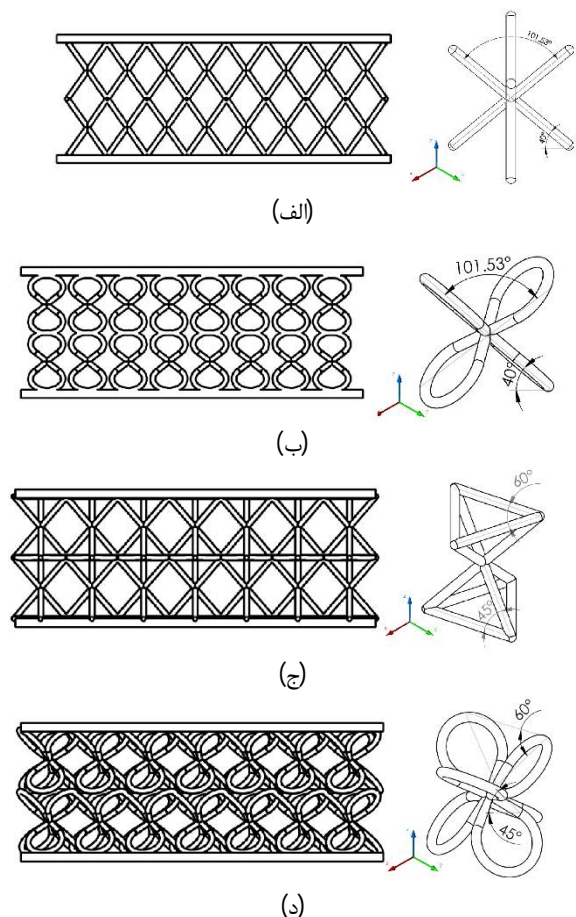


Fig. 3 Geometry and unit cell of designed 3D structures a) BCC b) modified BCC c) kagome d) modified kagome

شکل 3 هندسه و سلول واحد ساختارهای سه بعدی طراحی شده (الف) مکعبی مرکزدار، (ب) مکعبی مرکزدار اصلاح شده، (ج) کاگومی، (د) کاگومی اصلاح شده

نتایج آزمون فشاری نمونه‌ها در ادامه ارائه شده و مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی نسبت تنش بیشینه اولیه به تنش میانگین در کلیه نمودارهای تنش - کرنش بدست آمده، منحنی تنش میانگین نیز رسم شده است. البته لازم به ذکر است که تنش میانگین تا ابتدای نقطه چگالش در نظر گرفته شده است.

همان‌طور که در قسمت قبل در شکل 3 نشان داده شد، همه هسته‌ها (ساختارهای مشبک) از دو ردیف سلول واحد که به صورت عمودی بر روی یکدیگر قرار گرفته‌اند، تشکیل می‌شوند. بنابر این انتظار می‌رود که در نتایج آزمون فشاری سازه‌ها دو قله مشاهده شود که هر یک مربوط به بیشینه تحمل یک ردیف از سلول‌ها یا به بیان دیگر آغاز خرابی یک ردیف از سلول‌ها است.

در شکل 7 نتایج مربوط به سازه ساندویچی با ساختار هسته مکعبی مرکزدار و ساختار اصلاح شده به همراه تصاویر نمونه در هر مرحله از بارگذاری نشان داده شده است. همانگونه که بیان شد در این نتایج دو قله مجزا دیده می‌شود و افزایش نهایی نیز مانند اغلب سازه‌های سلولی مربوط به چگالش یا جمع شدگی دیواره سلول‌ها بر روی یکدیگر و تشکیل یک حالت نزدیک به ماده جامد بدون فضای خالی است.

منحنی‌های ارائه شده در شکل 7- الف نشان می‌دهد که ساختار از نقطه a (شروع بارگذاری) تا نقطه b از خود رفتار الاستیک خطی نشان داده است در این ناحیه کمانش الاستیک میله‌ها در ساختار هسته مشهود است. البته چون ساختار اصلاح شده را می‌توان مجموعه‌ای از میله‌های خمیده در نظر گرفت، مدول الاستیک این ساختار کمتر از مدول ساختار اصلاح نشده بدست آمده اما کرنش الاستیک ساختار اصلاح شده تقریباً دو برابر کرنش الاستیک ساختار اصلی است که قابلیت مناسب تغییر شکل سازه اصلاح شده را نشان می‌دهد. از نقطه b رفتار پلاستیک شروع شده و در نقطه c یا بیشینه تنش، شکست ساختار شروع شده است. در نمونه اصلاح شده کرنش نقطه b و c به یکدیگر بسیار نزدیک هستند. یعنی سازه توانسته است تغییر شکل بزرگتری را در شرایط الاستیک طی کند و دیرتر به فاز پلاستیک وارد شده که این مساله از اهمیت بالایی برخوردار است. افت قابل توجه تنش از نقطه c تا d به دلیل تردی رزین فوتوست که سازه از این جنس ساخته شده و نیز ساختار میله‌ای هسته است، همان‌طور که مشاهده می‌شود این افت در نمونه اصلاح شده بسیار کمتر است و همراه با تغییر شکل بزرگتری رخ می‌دهد. در نقطه d منطقه یکنواخت تنش شروع شده، که در این ناحیه شکست پیشرونده و تدریجی بخش‌های باقیمانده از

از نتایج بدست آمده از هر نمونه حداقل 3 مورد آزمایش شد. نمونه‌ها در بین فک‌های صاف در دستگاه یونیورسال ساخت شرکت سنتام و با نیروسنج با ظرفیت 100 کیلوگرم - نیرو تحت بار فشاری با سرعت 1 میلی‌متر بر ثانیه قرار گرفتند. در حالیکه دمای محیط 25 درجه سانتیگراد و رطوبت 60 درصد بود. برای بررسی دقیق رفتار هسته در حین آزمون تصویر برداری انجام شد. محاسبه تنش و کرنش هر نمونه به ترتیب با استفاده از فرمول (1) و (2) انجام گرفت.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

که در رابطه فوق  $\sigma$  مقدار تنش کلی سازه،  $F$  نیروی مشخص شده در آزمون در هر لحظه و  $A$  سطح مقطع کلی یا مساحت روبه سازه ساندویچی (21×21 میلی‌متر مربع) است. مقدار کرنش نیز از فرمول (2) بدست آمد.

$$\varepsilon = \frac{d}{t} \quad (2)$$

در رابطه فوق  $\varepsilon$  مقدار کرنش کلی سازه،  $d$  تغییر شکل مشخص شده در آزمون در هر لحظه و  $t$  ضخامت کلی سازه ساندویچی (8 میلی‌متر) است.

### 3- نتایج و بحث

رفتار تنش - کرنش ایده آل ساختارهای طراحی شده برای جذب انرژی در شکل 6 نشان داده شده است [16]. این منحنی یک منحنی دو خطی است که اغلب طراحان تلاش می‌کنند به آن دست پیدا کنند. اما رفتار واقعی سازه‌ها معمولاً به شکل منحنی خط چین موجود در شکل است. از این رو تلاش می‌شود با ایجاد تغییرات در مواد یا طراحی سازه نسبت اولین تنش بیشینه<sup>1</sup> به تنش میانگین به عدد 1 نزدیک شود و یا به بیان دیگر اولین نقطه تنش بیشینه تا نزدیک مقدار میانگین کاهش یابد.

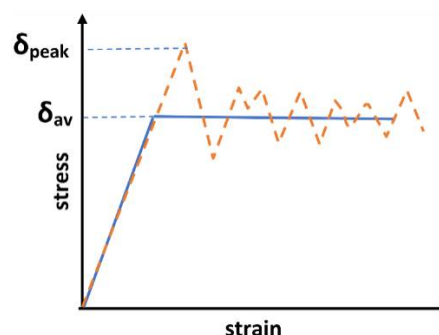


Fig. 6 Schematic representation of the stress-strain curve of energy-absorbing structures under compressive loading

شکل 6 تصویر شماتیک منحنی تنش-کرنش سازه‌های جاذب انرژی تحت بارگذاری فشاری

<sup>1</sup> First peak stress

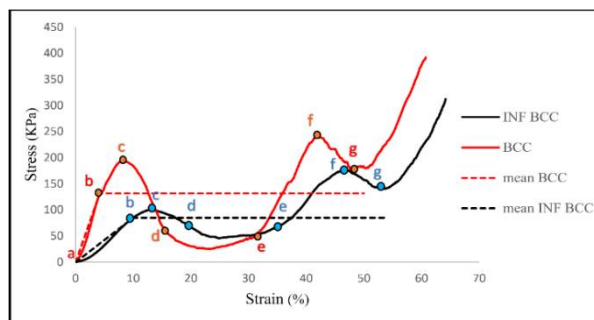


به دلیل تراکم بالای میله‌های شکسته شده، فضاهای خالی ساختار در این حالت بسیار کاهش پیدا کرده و از نقطه *g* چگالش سازه باعث افزایش مجدد تنش می‌شود. همان‌طور که مشاهده شد رفتار سازه اصلاح شده با افزایش و کاهش‌های کمتری همراه بوده و شکست سلول‌ها همراه با جذب انرژی به صورت تدریجی صورت گرفته است. البته سازه اصلاح شده به خاطر انحنای موجود در میله‌ها قابلیت جذب انرژی کمتری نیز از خود نشان داده است اما همان‌طور که دیده می‌شود این ساختار به حالت ایده‌آل نزدیکتر است و افت و خیز کمتری در نمودار نسبت به ساختار اصلاح نشده دیده می‌شود. در سازه ساندویچی با ساختار هسته مکعبی مرکز دار و ساختار اصلاح شده نسبت اولین بیشینه تنش به تنش میانگین به ترتیب برابر با  $1/17$  و  $1/46$  است. کمتر بودن نسبت اولین بیشینه تنش به تنش میانگین یک مزیت برجسته برای سازه‌های اصلاح شده به حساب می‌آید.

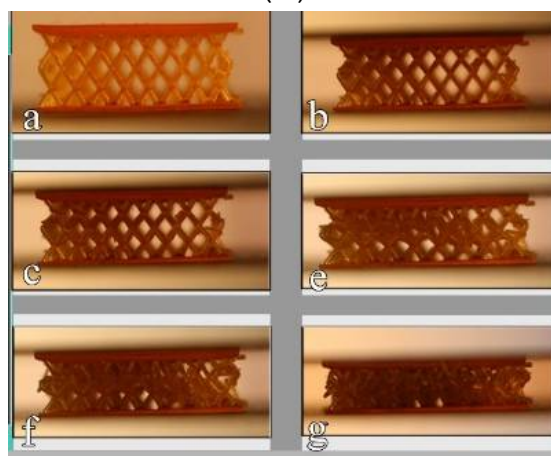
در شکل 8 نتایج تنش- کرنش مربوط به سازه ساندویچی با ساختار هسته کاغومی و کاغومی اصلاح شده نشان داده شده است. همانگونه که بیان شد در این ساختار نیز دو قله مجزا دیده می‌شود که مربوط به نقطه شروع شکست دو ردیف سلول موجود در ساختار هسته ساندویچی است. روند تغییر شکل سازه جذب انرژی نیز مانند سازه ساندویچی با ساختار هسته مکعبی مرکزدار است البته در ادامه مقایسه این دو ساختار با یکدیگر ارائه می‌شود. منحنی‌های تنش-کرنش ارائه شده در شکل 8 نشان می‌دهند که در ساختار کاغومی اصلاح شده مقدار اولین بیشینه تنش کاهش یافته و در کرنش بالاتری سازه به اولین دومین بیشینه تنش رسیده یعنی سازه قابلیت تغییر شکل بیشتر بدون ایجاد شکست را از خود نشان داده است. مقدار جذب انرژی در ساختار کاغومی 105 ژول و در کاغومی اصلاح شده 100 ژول بوده است. بعلاوه در سازه ساندویچی با ساختار هسته کاغومی و کاغومی اصلاح شده نسبت اولین بیشینه تنش به تنش میانگین به ترتیب برابر با  $1/36$  و  $1/08$  است.

نمودار مقایسه‌ای بین کلیه نتایج بدست آمده در شکل 9 ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در ساختار کاغومی به دلیل زاویه بیشتر میله‌ها با صفحه *xy*، مدول الاستیک و استحکام از ساختار مربعی مرکزدار کمتر است. اما سازه کاغومی تغییر شکل‌های بزرگتری را بدون شکست تحمل کرده است و روند شکست در سازه کاغومی اصلاح شده کاملاً تدریجی اتفاق افتاده است. چنانچه تعداد ردیف‌های سلول افزایش یابد، ساختارهای اصلاح شده به ویژه ساختار کاغومی اصلاح شده

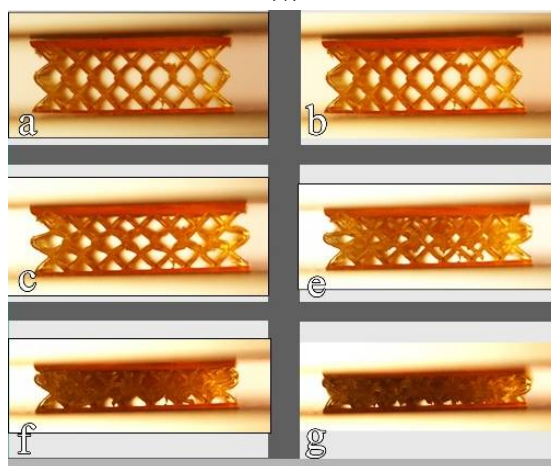
ردیف اول سلول‌ها ادامه پیدا می‌کند و ساختار در نقطه *e* به اندازه‌ای فشرده شده است که تقریباً بخش اعظم بار وارده به ردیف دوم سلول‌ها منتقل می‌شود و تغییر شکل الاستیک این ردیف از ساختارها از نقطه *e* تا *f* رخ می‌دهد، در نقطه *f* شکست ردیف دوم شروع شده و تا نقطه *g* ادامه پیدا می‌کند.



(الف)



(ب)

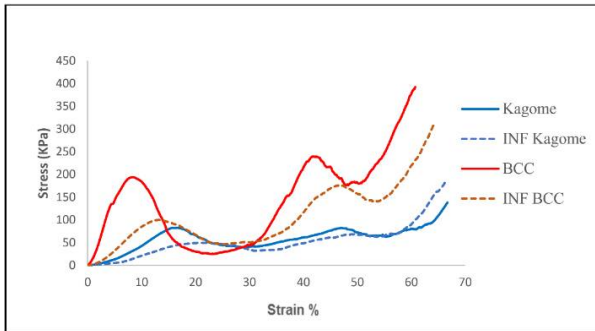


(ج)

**Fig. 7** (A) Stress-strain diagram of sandwich structure with BCC and modified BCC core (b) Sandwich structure with BCC core during test (c) Sandwich structure with modified BCC core during test

شکل 7 (الف) نمودار تنش-کرنش ساختار ساندویچی با هسته مکعبی مرکزدار و اصلاح شده (ب) ساختار ساندویچی با هسته مکعبی مرکزدار در حین آزمون (ج) ساختار ساندویچی با هسته مکعبی مرکزدار اصلاح شده در حین آزمون

مثلا نوع جدیدی از ایمپلنت‌های سینه برای بانوان (با ساختار مشبک و متخلخل) از این دسته هستند. در این گونه ایمپلنت‌ها توانایی تغییر شکل بیشتر (کرنش بزرگتر) بدون ایجاد آسیب به ساختار یک قابلیت مهم به حساب می‌آید.



**Fig. 9** Stress-strain diagram of sandwich structure with body centered cubic and kagome core and corresponding modified structures

شکل 9 نمودار تنش - کرنش ساختار ساندویچی با هسته مکعبی مرکزدار و کاگومی و ساختارهای متناظر اصلاح شده

#### 4- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر هسته‌های مشبک ساختارهای ساندویچی به شکل مکعب مرکزدار و کاگومی با الهام از ساختار پیله کرم ابریشم بازطراحی شد. میله‌های مستقیم موجود در این ساختارهای مشبک با حلقه‌های خمیده به شکل علامت بی نهایت ( $\infty$ ) جایگزین گردید و سازه‌ها با روش چاپ سه بعدی ساخته شد. آزمون فشار شبه استاتیکی بر روی نمونه‌ها انجام گرفت و به طور کلی نتایج زیر بدست آمد:

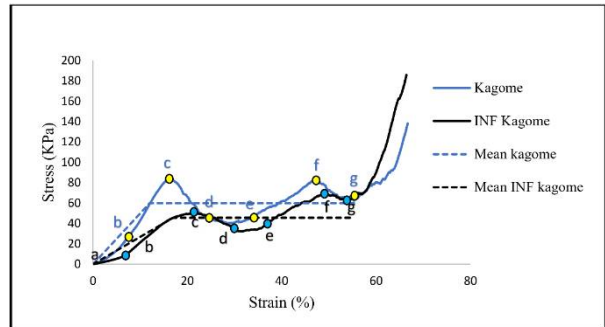
دقت و سرعت ساخت نمونه‌ها نشان داد که روش چاپ سه بعدی بر پایه پخت نوری رزین، یک روش سریع برای نمونه سازی است که می‌توان با استفاده از این روش ساختارهای پیچیده با دقت بالا را تولید نمود.

در ساختار مکعبی مرکزدار مقدار اولین تنش بیشینه 92/4% بیشتر و کرنش متناظر با اولین تنش بیشینه 37% کمتر از ساختار اصلاح شده بود که نشان می‌دهد سازه اصلاح شده قابلیت تغییر شکل بیشتر بدون ایجاد شکست را از خود نشان داده است. البته جذب انرژی ساختار اصلاح نشده 14/1% بیشتر از سازه اصلاح شده بود.

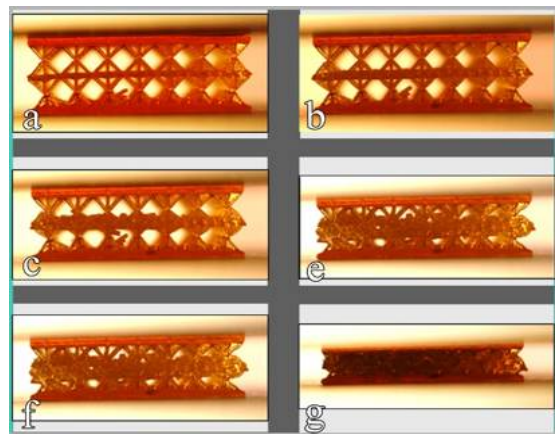
در ساختار کاگومی مقدار اولین تنش بیشینه 66% بیشتر و کرنش متناظر با اولین تنش بیشینه 19% کمتر از ساختار اصلاح شده بود. در سازه اصلاح نشده جذب انرژی 5/1% بیش از ساختار مکعبی مرکزدار اصلاح شده بود.

در سازه ساندویچی با ساختار هسته مکعبی مرکز دار و

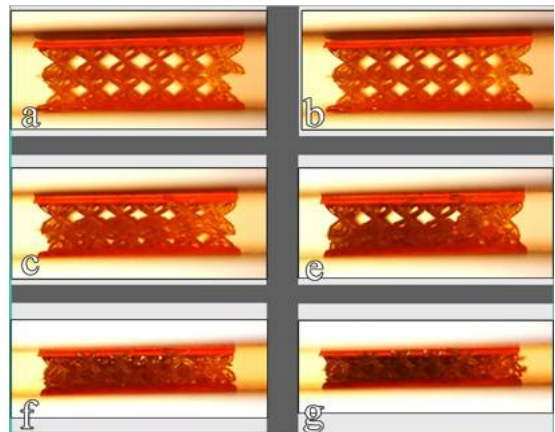
می‌تواند در تغییر شکل‌های بزرگ و تدریجی انرژی زیادی را جذب کند. جذب یکنواخت انرژی یک مزیت بزرگ در طراحی جاذب‌های انرژی به حساب می‌آید.



(الف)



(ب)



(ج)

**Fig. 8** (A) Stress-strain diagram of sandwich structure with modified kagome core and kagome (b) Sandwich structure with kagome core during test (c) Sandwich structure with modified kagome core during test

شکل 8 (الف) نمودار تنش - کرنش ساختار ساندویچی با هسته کاگومی و کاگومی اصلاح شده (ب) ساختار ساندویچی با هسته کاگومی در حین آزمون (ج) ساختار ساندویچی با هسته کاگومی اصلاح شده در حین آزمون

در بعضی از ایمپلنت‌های به کار رفته در بدن، ایمپلنت نقش ساختاری ندارد یعنی وظیفه اصلی ایمپلنت تحمل نیرو نیست.

- Materials & Design*, Vol. 143, pp. 27-37, 2018.
- [7] S. Abidaryan, A. H. Behraves, M. Barmouz, S. K. Hedayati, Effect of infill percentage and raster angle in fused deposition modeling (FDM) process on shape memory properties of poly (lactic acid) and comparison with compression molding, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 7, No. 5, pp. 14- 23, 2020 (in Persia فارسی)
- [8] I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*, New York: Springer, 2014.
- [9] J. Guan, W. Zhu, B. Liu, K. Yang, F. Vollrath, J. Xu, Comparing the microstructure and mechanical properties of Bombyx mori and Antheraea pernyi cocoon composites, *Acta Biomaterialia*, Vol. 47, pp. 60-70, 2017.
- [10] L. Ranakoti, M. Gupta, P. Rakesh. *Silk and Silk-Based Composites: Processing of Green Composites*, Edition 2019, pp. 91-106, Singapore, Springer Nature Pte Ltd., 2019.
- [11] M. Miura, H. Morikawa, H. Kato, M. Iwasa, Analysis of the construction process of cocoon shape by Bombyx mori, *The journal of sericultural science of Japan* ;Vol. 66, pp. 23-30, 1997.
- [12] M. Kiyosawa, E. Ito, K. Shirai, R. Kanekatsu, M. Miura M, K. Kiguchi, Cocoon Spinning Behavior in the Silkworm, Bombyx mori : Comparison of Three Strains Constructing Different Cocoons in Shape. *Zoological Science*, Vol. 16, pp. 215-23, 2009.
- [13] T. Maconachie, M. Leary, B. Lozanovski, X. Zhang, M. Qian, O. Faruque, SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges. *Materials & Design*, Vol. 183, p. 108137, 2019.
- [14] Y. Amani, S. Dancette, P. Delroisse, A. Simar, E. Maire, Compression behavior of lattice structures produced by selective laser melting: X-ray tomography based experimental and finite element approaches, *Acta Materialia*, Vol. 159, pp. 395-407, 2018.
- [15] S. Hyun, AM. Karlsson, S. Torquato, AG. Evans, Simulated properties of Kagomé and tetragonal truss core panels, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 40, No. 25, pp. 6989-6998, 2003.
- [16] S. Boria, *Lightweight Design and Crash Analysis of Composites*. J.Njuguna (Eds.), *Lightweight Composite Structures in Transport*, pp. 329-360, New York: Woodhead Publishing, 2016.
- ساختار اصلاح شده نسبت اولین بیشینه تنش به تنش میانگین به ترتیب برابر با  $1/46$  و  $1/17$  است. هرچه این نسبت به عدد 1 نزدیکتر باشد سازه به یک جاذب انرژی ایده آل نزدیکتر است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با اصلاح ساختار نسبت اولین بیشینه تنش به تنش میانگین 29% کاهش یافته است.
- در سازه ساندویچی با ساختار کاغومی و ساختار اصلاح شده نسبت اولین بیشینه تنش به تنش میانگین به ترتیب برابر با  $1/36$  و  $1/08$  است. در ساختار کاغومی اصلاح شده نسبت اولین بیشینه تنش به تنش میانگین 28% کاهش یافته است.
- به طور کلی مشاهده می‌شود که افت و خیزهای تنش در نمونه‌های اصلاح شده بسیار کمتر است و در حین تغییر شکل بزرگتری رخ می‌دهد. این رفتار قابلیت مناسب ساختارهای اصلاح شده برای جذب انرژی در یک روند آرام و تدریجی را نشان می‌دهد.

## 5- مراجع

- [1] B. Han, Z. Zhang, QC. Zhang, Q. Zhang, TJ. Lu, BH. Lu, Recent advances in hybrid lattice-cored sandwiches for enhanced multifunctional performance, *Extreme Mechanics Letters*, Vol. 10, pp. 58-69, 2017.
- [2] A. Pydah, RC. Batra, Blast loading of bumper shielded hybrid two-core Miura-ori/honeycomb core sandwich plates, *Thin-Walled Structures*, Vol. 129, pp. 45-57, 2018.
- [3] LJ. Gibson, Mechanical behavior of metallic foams, *Annual Review of Materials Science*, Vol. 30, No. 1, pp. 191-227, 2000.
- [4] Y. Feng, H. Qiu, Y. Gao, H. Zheng and J. Tan, Creative design for sandwich structures: A review, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, <https://doi.org/10.1177/1729881420921327>, 2020.
- [5] A. Ataei, H. Ahmadi, A. Farokhabadi, Experimental investigation of buckling after impact strength of grid stiffened composite panels, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 7, No. 11, pp. 34-41, 2020 (in Persia فارسی)
- [6] Z. Xiao, Y. Yang, R. Xiao, Y. Bai, C. Song, D. Wang, Evaluation of topology-optimized lattice structures manufactured via selective laser melting.