



## بررسی تجربی و عددی قابلیت جذب انرژی ساختار مشبک دو ماده‌ای

حسین قره‌باغی<sup>1</sup>، امین فرخ‌آبادی<sup>2\*</sup>

1- دانشجوی دکتری، مهندسی هوافضا، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

\* تهران، صندوق پستی 111-14115، amin-farrokh@modares.ac.ir

### اطلاعات مقاله:

دریافت: 1401/08/16

پذیرش: 1401/10/11

### کلیدواژگان

الاستو-پلاستو-آسیب،

ساخت افزایشی،

اجزای محدود غیرخطی

### چکیده

مقاله حاضر عملکرد مکانیکی و ظرفیت جذب انرژی ساختار مشبک سه‌بعدی دو ماده را از طریق رویکرد تجربی و عددی بررسی می‌کند. در ابتدا، با استفاده از ساخت افزایشی بخش بیرونی ساختار مشبک سه‌بعدی پیشنهادی با ماده ترموپلاستیک پلی‌اورتان ساخته شده است. با استفاده از یک سرنگ، رزین اپوکسی به قسمت داخلی ساختار مشبک تولید شده تزریق می‌شود. سپس، آزمایش‌های فشرده‌سازی برای تجزیه و تحلیل خواص مکانیکی و ظرفیت جذب انرژی ساختار مشبک سه‌بعدی دو ماده انجام شده است. مطالعه عددی غیرخطی، رفتار الاستو-پلاستو-آسیب در آنالیزهای المان محدود که پاسخ غیرخطی ساختارهای در نظر گرفته شده را دنبال می‌کند، اجرا شده است. این مدل قادر است تفاوت خواص کششی و فشاری مواد را نیز بررسی کند. منحنی نیرو-جابجایی ساختار مشبک تحت بارگذاری فشاری مقایسه شده است. مدل عددی پیش‌بینی قابل قبولی در مورد پاسخ‌های خطی و غیرخطی ساختار مشبک سه‌بعدی پیشنهادی نشان می‌دهند. نتایج نشان می‌دهد که نه تنها استفاده از ساختارهای مشبک دو ماده‌ای باعث جذب انرژی بیشتر و بهبود خواص مکانیکی می‌شود، بلکه ترکیب منطقی دو ماده باعث می‌شود ساختار مشبک سه‌بعدی دو ماده با جذب انرژی و سفتی بهینه در مقایسه با ساختارهای مشبک معمولی با یک ماده واحد داشته باشد.

## Experimental and numerical investigation of the energy absorption capability of the bi-material lattice structure

Hussain Gharehbaghi<sup>1</sup>, Amin Farrokhadi<sup>2\*</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

\* P.O.B. 14115-111, Tehran, Iran, amin-farrokh@modares.ac.ir

### Keywords

Additive manufacturing,  
Elasto-plasto-damage,  
Nonlinear FEM

### Abstract

This paper investigates the mechanical performance and energy absorption capacity of bi-material three-dimensional lattice structures via experimental and numerical approaches. At first, fused deposition modeling was used to manufacture the outer part of the proposed three-dimensional lattice structure with TPU material. Using a syringe, epoxy resin is injected into the inner part of the manufactured lattice structure. Then, quasi-static compression tests were conducted to analyze the mechanical properties and energy absorption capacity of the bi-material three-dimensional lattice structure. As the nonlinear numerical study, the elasto-plasto-damage behavior was implemented in finite element analyses which track the nonlinear response of considered structures. This model is capable to investigate the differences in tensile and compressive properties of the materials as well. The comparison of the load-displacement curve of structures under compressive loading has been compared. The numerical models exhibit an acceptable prediction about the linear and nonlinear responses of the proposed three-dimensional lattice structure. The results reveal that not only does the use of hybrid structures provide more energy absorption and improve mechanical properties, but also the rational combination of two materials makes the bi-material three-dimensional lattice structure with the optimum energy absorption and stiffness, in comparison to those usual lattice structures with a single material.

### 1- مقدمه

این تا حدودی به دلیل در دسترس بودن ساخت افزایشی است که ساخت ساختارهای مشبک با ریزمعماری‌های پیچیده را ممکن می‌سازد. بر این اساس، بررسی ساختارهای مشبک ساخته‌شده با روش ساخت افزایشی و خواص ماکروسکوپی آن‌ها بسیار مهم است [4]، [5].

ساختارهای مشبک سه‌بعدی به دلیل خواص مفیدی که دارند معمولاً در زمینه‌های مختلفی مانند هوافضا، حمل و نقل و کاربردهای زیست پزشکی استفاده می‌شوند [3]–[1]. ترکیب منطقی مواد و طراحی امکان توسعه ساختارهای مشبک سه‌بعدی با ظرفیت جذب انرژی بالا را فراهم کرده است.

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Gharehbaghi, H., Farrokhadi, A., "Experimental and numerical investigation of the energy absorption capability of the bi-material lattice structure," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 9, No. 2, pp. 1976-1982, 2023.  
https://doi.org/10.22068/JSTC.2022.1971958.1806

ماده ای مبتنی بر یک سلول واحد دو هرمی چهارضلعی (شکل 1) تاکنون مورد مطالعه قرار نگرفته است.

هدف مطالعه حاضر ارائه رویکردهای عددی غیرخطی و تجربی است که در آن ظرفیت جذب انرژی ساختار مشبک بر اساس سلول واحد دو هرمی چهارضلعی بررسی خواهد شد. با در نظر گرفتن رفتار تغییر شکل بزرگ با مدل الاستو-پلاستو-آسیب، تحلیل عددی انجام شده است. شبیه سازی اجزای محدود از طریق نرم افزار آباکوس نسخه 6.14.3 با حل کننده صریح انجام شده است. با استفاده از زیربرنامه فرترن و با توجه به تفاوت خواص فشاری و کششی پلیمرها، در المان هایی که تحت تنش های فشاری و کششی قرار می گیرند، خواص فشاری و کششی پلیمر اختصاص داده می شود. نمونه های ساختار مشبک با استفاده از پرینت سه بعدی ساخته شده اند. یکی از مهم ترین نوآوری های این تحقیق ساخت ساختار مشبک دو ماده ای با ترکیبی از مواد نرم و سخت می باشد.

### 1-1- معرفی ساختار مشبک دو ماده ای

در این تحقیق خواص و ظرفیت جذب انرژی یک ساختار مشبک دو ماده ای بررسی شده است. این ساختار مشبک بر اساس سلول واحد دو هرمی چهارضلعی است. شکل 1 مدل این سلول واحد را در نمای سه بعدی نشان می دهد.

این سلول واحد دارای هشت پایه مورب یکسان و چهار پایه افقی در صفحه است. لازم به ذکر است که طول چهار پایه افقی یکسان است و به زاویه رأس بستگی دارد. شکل 2 ساختار مشبک را نشان می دهد که با تکرار سلول واحد دو هرمی چهارضلعی دو ماده ای معرفی شده در شکل 1 ساخته شده است. طول و شعاع پایه های سلول های واحد در همه جهات یکسان است. سطح مقطع پایه ها دایره ای است که در شکل 3 نشان داده شده است.

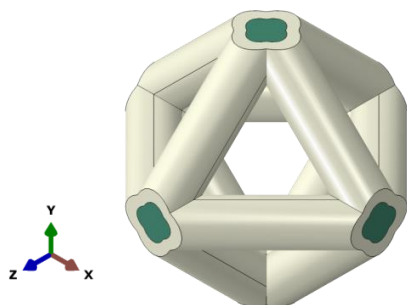


Fig. 1 Perspective view of the unit cell

شکل 1 نمای سه بعدی سلول واحد

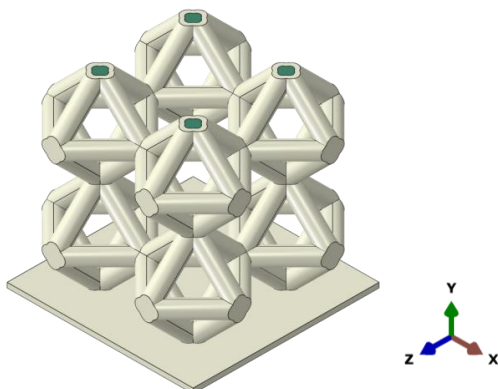


Fig. 2. Perspective view of the lattice structure

شکل 2 نمای سه بعدی ساختار مشبک

در دسترس بودن مدل های محاسباتی امکان طراحی منطقی ساختارهای مشبک را فراهم می کند، جایی که انتخاب انواع سلول های واحد و ابعاد بر اساس پیش بینی های دقیق خواص مکانیکی حاصل وجود دارد. به همین دلیل است که مطالعات زیادی بر روی روابط توپولوژی-ویژگی ساختارهای مشبک بر اساس انواع مختلف سلول های واحد انجام شده است [7]، [6]. محققان علاوه بر تجزیه و تحلیل خواص مکانیکی ساختارهای مشبک، کارایی جذب انرژی این ساختارها را نیز مورد بررسی قرار داده اند [8]–[10]. اکثر مطالعات انجام شده در مورد جذب انرژی ساختارهای مشبک بر روی نمونه های تولید شده با یک ماده متمرکز شده است. مطالعات کمی در مورد تجزیه و تحلیل جذب انرژی ساختارهای مشبک دو ماده ای انجام شده است. به عنوان مثال، لی و همکاران [11]، به طور تجربی خواص فشاری شبه استاتیکی و رفتار جذب انرژی شبکه های موجدار دو جهته را بررسی کردند. پاسخ های فشرده سازی توسط روش اجزای محدود برای تکرار فرآیند تغییر شکل شبیه سازی شده است. دنگ و همکاران [12] بهینه سازی توپولوژی را برای طراحی میرایی ساختارهای مشبک پیشنهاد کردند. در این کار، چهار مورد طراحی ارائه شده و به تفصیل مورد بحث قرار گرفته است. کانو و همکاران [13] یک مطالعه تجربی بر روی پاسخ ضربه ای کم سرعت ساختارهای مشبک دو ماده ای ارائه کردند که دارای ساختار ترکیبی متشکل از یک ساختار مشبک چاپ شده سه بعدی پر شده از مواد تقویت کننده بود.

تقی پور و ملک زاده [14] در پژوهشی تأثیر روش پرکردن هسته های موجدار دوزنقه ای شکل دو لایه، با فوم های پلی اورتان از نوع سخت با وزن سبک، مورد مطالعه قرار دادند. آن ها پنج نوع هسته موجدار از جنس آلومینیوم به صورت خالی و پر شده از فوم، تحت بارگذاری شبه استاتیکی به صورت فشاری تک محوره قرار داده اند. در ادامه با استفاده از شبیه سازی عددی توسط نرم افزار آباکوس به بررسی جذب انرژی ویژه پرداخته اند. مقایسه ای نتایج حاصل از تحلیل عددی و آزمایشگاهی، نشان از همپوشانی بالا و تطابق خوب دو روش دارد. نتایج نشان داد که به کارگیری فوم در هسته، می تواند ظرفیت جذب انرژی را به صورت قابل ملاحظه ای افزایش دهد. پرورش و همکارانش [15] در پژوهشی به دسته جدیدی از ساختارهای مشبک تحت عنوان ساختارهای آگزتیک پرداخته اند که به دلیل وزن پایین، سفتی و مقاومت برشی بالا کاربردهای مختلفی در انواع سازه ها از جمله سازه های جاذب انرژی دارند. آن ها به بررسی تجربی رفتار سه سازه آگزتیک الاستومری از جنس تی بی-یو با هندسه های آنتی تتراکایرال، آرهد (سرنیزه ای)، ری اینترنت در بارگذاری شبه استاتیکی و ضربه ای و مقایسه آن ها با یک سازه غیر آگزتیک لانه زنبوری پرداخته اند. همچنین نمونه هایی با استفاده از روش ساخت افزایشی (پرینت سه بعدی) تهیه نموده و پارامترهایی مانند میزان جذب انرژی و میزان جذب انرژی بر واحد طول فشرده گی را ارزیابی نموده اند. در این مطالعه، ساختارهای مشبک دو ماده ای از ساختار مشبک پلی لاکتیک اسید و فوم پلی اورتان برای افزایش مقاومت در برابر ضربه ساخته شده است. آزمایش های ضربه برای مقایسه تضعیف ضربه، سفتی، چقرمگی و استحکام به ترتیب با استفاده از نرخ اندازه گیری شده تغییر شتاب، جابجایی و جذب انرژی انجام شده است. نتایج نشان داد که فوم های انعطاف پذیر اثرات مثبت بیشتری نسبت به فوم صلب بر خواص ضربه دارند. در نتیجه، انتخاب مناسب پرکننده فوم می تواند به طور قابل توجهی خواص ضربه را بهبود دهد.

مطالعه حاضر به بررسی عددی و تجربی یک ساختار مشبک دو ماده ای بر اساس یک سلول واحد دو هرمی چهارضلعی می پردازد. ساختار مشبک دو

### 3- روش تجربی

#### 1-3- ساخت ساختار مشبک

برای اعتبارسنجی مدل عددی، تعداد 3 نمونه از ساختار مشبک با سلول واحد دو هرمی چهارضلعی با پایه‌های توخالی دایره‌ای با استفاده از مدل‌سازی رسوب ذوب شده ساخته شد (شکل 4). برای اعمال بار یکنواخت در حین آزمایش، صفحات با ضخامت 1 میلی‌متر در بالا و زیر ساختار مشبک قرار داده شدند. طول پایه‌های شیب‌دار تشکیل دهنده سلول واحد برابر با 20 میلی‌متر است. قطر بیرونی برابر با 5 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. همچنین قطر داخلی 3 میلی‌متر است. زاویه رأس 45 درجه است. سرعت چاپ برابر با 300 میلی‌متر در دقیقه و ارتفاع لایه‌های چاپ شده و قطر نازل به ترتیب برابر با 0.16 و 0.4 میلی‌متر است. علاوه بر این، دمای نازل و بستر به ترتیب برابر با 250 و 60 درجه سانتی‌گراد است. نمونه‌ها در 32 ساعت چاپ شدند. با توجه به نرمی فیلامنت ترموپلاستیک پلی‌اورتان، در ساخت این ساختار مشبک از هیچ گونه عقب نشینی استفاده نشده است. همچنین برای افزایش کیفیت ساخت از حمایت کننده با پرکردن 15 درصد استفاده شده است (شکل 4).

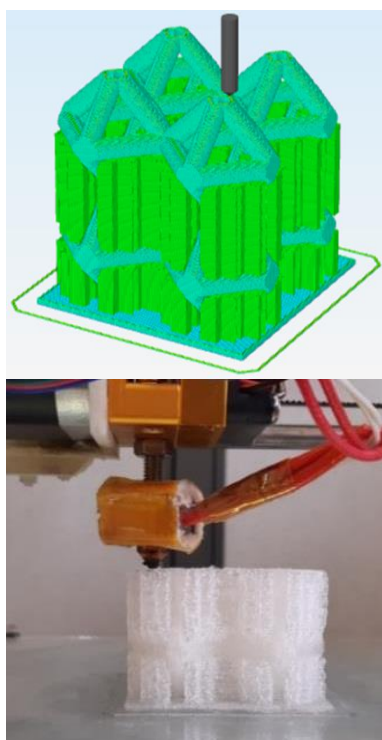


Fig. 4 A lattice structure made of the quadrilateral bipyramid unit cell with circular hollow struts by additive manufacturing

شکل 4 یک ساختار مشبک ساخته شده از سلول واحد دو هرمی چهارضلعی با پایه‌های توخالی دایره‌ای با ساخت افزایشی

پس از ساخت نمونه با چاپگر سه‌بعدی و جداسازی حمایت‌کننده‌ها از آن، رزین به کمک سرنگ به فضاهای خالی تزریق می‌شود. شکل 5 تزریق رزین اپوکسی را نشان می‌دهد. ساختار مشبک به‌گونه‌ای طراحی شده است که فضای داخلی پایه‌ها به هم راه دارند، 4 سلول واحد بالایی از قسمت بالا باز هستند و بعد از تزریق رزین برای اعمال یکنواخت نیرو به کمک صفحه تخت بسته می‌شوند. صفحه تخت بالایی با استفاده از چسب به ساختار مشبک متصل می‌شود. برای اطمینان از پر شدن اپوکسی در فضاهای خالی، حجم فضای خالی محاسبه شده است و به همان مقدار رزین تزریق می‌شود. برای

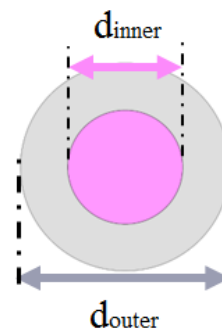


Fig 3. Cross-section of the strut, soft material, gray color (TPU) and hard material, lilac color (epoxy)

شکل 3 سطح مقطع پایه، ماده نرم، رنگ خاکستری (ترموپلاستیک پلی‌اورتان) و ماده سخت، رنگ یاسی (اپوکسی)

#### 2- خواص مواد

یکی از چالش‌های اصلی در قابلیت جذب انرژی ساختارهای مشبک ساخته شده با پلیمرهای سخت مانند ای بی اس، پلی‌لاکتیک اسید و غیره، شکست ناگهانی سازه و فروریختن ساختار مشبک است. از سوی دیگر، در ساختارهای مشبک ساخته شده با پلیمرهای نرم مانند ترموپلاستیک پلی‌اورتان، به دلیل سفتی کم این مواد، جذب انرژی کاهش می‌یابد. استفاده همزمان از مواد نرم و سخت ایده اصلی این تحقیق برای افزایش قابلیت جذب انرژی ساختارهای مشبک پلیمری است. در نتیجه، در ساختار مشبک دو ماده‌ای پیشنهادی، از ترموپلاستیک پلی‌اورتان به عنوان یک ماده نرم و رزین اپوکسی به عنوان یک ماده سخت استفاده می‌شود. در این ساختار مشبک به دلیل کشیدگی زیاد، از ترموپلاستیک پلی‌اورتان در قسمت بیرونی پایه‌ها استفاده شده است. برای قسمت داخلی پایه‌ها باید از مواد سفت‌تر از ترموپلاستیک پلی‌اورتان استفاده شود. در نتیجه از رزین اپوکسی ام ال 506 برای پرکردن قسمت داخلی پایه‌ها استفاده می‌شود که می‌توان آن را به پایه‌ها تزریق کرد. نسبت ترکیبی هاردنر به رزین 13 به 100 [16] است. مدول الاستیک ترموپلاستیک پلی‌اورتان 60 مگاپاسکال است، دیگر خواص مکانیکی ترموپلاستیک پلی‌اورتان و رزین اپوکسی به ترتیب در جداول 1 و 2 ارائه شده است.

جدول 1 خواص مکانیکی ترموپلاستیک پلی‌اورتان تحت بارهای کششی و فشاری [15]

Table 1 Mechanical properties of TPU material under tensile and compressive loads [15]

	Yield stress (MPa)	Ultimate Tensile Strength (MPa)	Fracture Strain
Tensile	17.4	550	1.576
Compression	3.6	188	0.652

جدول 2 خواص مکانیکی اپوکسی ام ال 506 [16]

Table 2 Mechanical properties of ML506 epoxy [16]

Property	Value	Unit
Young's modulus	2.8	GPa
Poisson's ratio	0.35	
Mass density	1.14	g/m <sup>3</sup>
Tensile strength	76.1	MPa
Compressive strength	97.4	MPa

تحت بارگذاری فشاری ایجاد شده است. تحلیل عددی غیرخطی ساختار مشبک پیشنهادی با استفاده از نرم افزار آباکوس نسخه 6.14.3 با حل کننده صریح شبیه سازی شده است. تفاوت قابل توجهی در کشش و فشار بین رفتار پلاستیک و کرنش شکست مواد پلیمری ساخته شده توسط چاپگر سه بعدی مشاهده شده است. در نتیجه، خواص کششی و فشاری به نواحی مختلف در ساختارهای مشبک که تحت کشش و فشار در آزمون فشرده سازی قرار دارند، اختصاص داده شده است. رفتار پلاستیک و کرنش شکست ناحیه کششی و فشاری با استفاده از زیربرنامه به زبان فرترن جدا می شود. در شکل 7 روند نمای این زیر برنامه آورده شده است. ساختار مشبک دو ماده ای به صورت سه بعدی برای شبیه سازی مدل سازی شده است و از المان C3D4 استفاده شده است. تماس بین ماده داخلی و ماده بیرونی گره فرض شده است. این تماس با توجه به مشاهدات تجربی لحاظ شده است. اندازه دانه بندی 0.3 میلی متر پس از مطالعه همگرایی انتخاب شده است. مطالعه همگرایی با معیار سفتی اولیه (ناحیه الاستیک خطی) بررسی شده است. در خواص الگوریتم تماس، رفتار مماسی با ضریب اصطکاک برابر با 0.2 و تماس سخت برای رفتار نرمال (تماس عمومی) تعیین شده است [1]. شکل 8 شرایط مرزی و بارگذاری و روش المان بندی را نشان می دهد. منحنی نیرو-جابجایی به دست آمده از المان محدود غیرخطی برای مقایسه با آزمون های تجربی استفاده شده است.

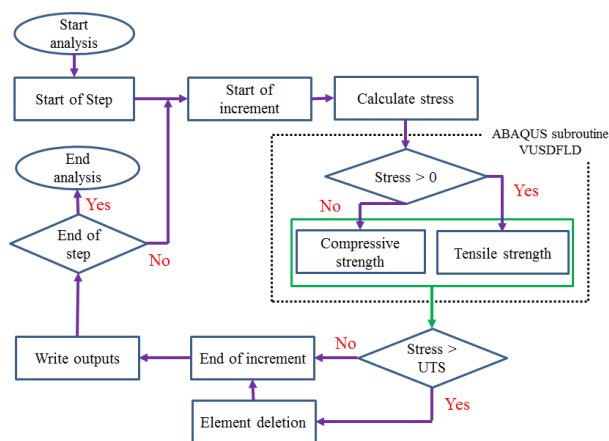


Fig. 7 Procedure for the finite element analysis of failure mechanisms  
 شکل 7 روند نمای مکانیزم های خرابی برای تحلیل اجزای محدود

### 5- بحث و نتایج

شکل 9 منحنی نیرو-جابجایی در آزمایش تجربی و تحلیل عددی را نشان می دهد. نتایج روش عددی با نتایج تجربی مطابقت بسیار خوبی دارد. منحنی نیرو-جابجایی رفتار خطی را نشان می دهد تا زمانی که به اولین نیروی بیشینه برسد. سپس، یک روند کاهشی جزئی در پاسخ مقدار نیرو اتفاق می افتد و ساختار مشبک یک وضعیت فروپاشی پیوسته را تا زمانی که حداکثر جابجایی خرد شدن را برآورده می کند، نشان می دهد. مقایسه بین رفتارهای ساختارهای مختلف جاذب انرژی معمولاً بر اساس پارامترهای جذب انرژی ویژه و بازده نیروی خرد شدن انجام می شود (رابطه 1 و 2). میانگین بار خرد شدن به صورت رابطه 3 به دست می آید، یک ساختار جاذب انرژی ایده آل دارای مقدار جذب انرژی ویژه بالا و کمترین اختلاف بین مقادیر میانگین بار خرد شدن و اولین نیروی بیشینه (یعنی بازده نیرو خرد شدن برابر با 1) است.

جلوگیری از محبوس شدن هوا، تزریق رزین اپوکسی با سرعت پایین (تقریباً 0.2 سی سی در دقیقه) انجام شده است. باز بودن قسمت بالایی ساختار باعث خروج هوای اضافی از داخل ساختار می شود.



Fig. 5 Injection of resin into hollow struts

شکل 5 تزریق رزین به پایه های توخالی

### 2-3- آزمون فشاری

سطح زیر منحنی نیرو-جابجایی مقدار انرژی جذب شده یک ساختار مشبک تحت بارگذاری فشاری را نشان می دهد. بنابراین، به منظور ارزیابی جذب انرژی، یک آزمون فشرده سازی با استفاده از دستگاه آزمون سنتام اس تی ام-20 انجام شد (شکل 6). آزمایش در دمای اتاق با سرعت نامی 2 میلی متر در دقیقه انجام شده است.



Fig. 6 Compressive tests for the bi-material lattice structure based on the quadrilateral bipyramid unit cell

شکل 6 آزمون فشاری برای ساختار مشبک دو ماده ای بر اساس سلول واحد دو هرمی چهارضلعی

### 4- تحلیل عددی

اگرچه روش اجزای محدود خطی ارائه شده در مطالعات قبلی [17]، [18] به خوبی می تواند مدول الاستیک معادل ساختار مشبک دو ماده ای را تخمین بزند، اما قادر به پیش بینی اولین آسیب و رفتار غیرخطی این ساختارهای مشبک نیست. بنابراین یک روش اجزای محدود غیرخطی برای بررسی رفتار ساختار مشبک دو ماده ای بر اساس سلول های واحد دو هرمی چهارضلعی



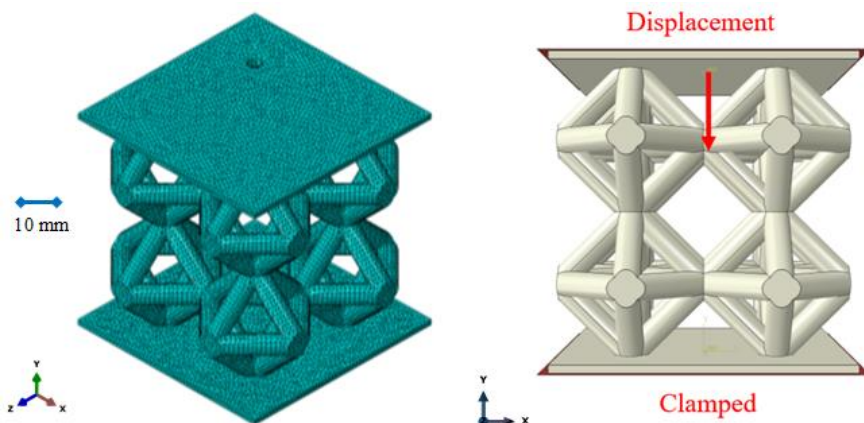


Fig. 8 Applied loading, boundary conditions, and mesh discretization in nonlinear FE

شکل 8 نحوه بارگذاری اعمال شده، شرایط مرزی و امان بندی

می دهد. شکل 11 تغییر شکل ساختار مشبک را با اپوکسی خالص تحت بارگذاری فشاری نشان می دهد.

جذب انرژی ویژه در ساختار مشبک دو ماده ای بیشتر از ساختار مشبک یک ماده است. در ساختار مشبک تک ماده ای ساخته شده از مواد نرم، به دلیل مدول الاستیک کم، میانگین بار خرد شدن و اولین نیروی بیشینه کوچک خواهد بود، در نتیجه میزان جذب انرژی ویژه قابل توجه نخواهد بود. در ساختار مشبک تک ماده ای ساخته شده از مواد سخت، به دلیل کرنش شکست کم، آسیب در ساختار مشبک تحت بارگذاری بسیار سریع رخ می دهد و گاهی اوقات ساختار مشبک به طور ناگهانی فرو می ریزد (شکل 11) و به دلیل نوسانات فراوان در نمودار نیروی جابجایی، میانگین بار خرد شدن کوچک خواهد بود، بنابراین ساختار مشبک برای کاربردهای جذب انرژی نامناسب خواهد بود. در شکل 12، منحنی های بار-جابجایی برای ساختار مشبک با ترموپلاستیک پلی اورتان خالص و رزین اپوکسی خالص و ترکیبی از این دو ماده آورده شده است.

### 6- نتیجه گیری

در این مقاله ظرفیت جذب انرژی در ساختار مشبک دو ماده ای بر اساس سلول واحد دو هرمی چهارضلعی به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفته است. رفتار ساختار مشبک دو ماده تحت بارگذاری شبه استاتیکی فشاری مورد ارزیابی قرار گرفته است. تغییر شکل بزرگ با ارائه مدل اجزای محدود غیرخطی بر اساس رفتار الاستو-پلاستو-آسیب مواد پیش بینی شده است. مناطق فشاری و کششی با استفاده از زیر برنامه به زبان فرترن از هم جدا شده اند. تفاوت در رفتار پلاستیک و کرنش شکست پلیمرها در طول کشش و فشرده سازی در مدل عددی ارائه شده، پیش بینی ظرفیت جذب انرژی در ساختار مشبک پلیمری را به طور مناسب ممکن می سازد. یکی از مهم ترین نتایج این تحقیق، دستیابی به افزایش جذب انرژی ویژه در ساختار مشبک سه بعدی با استفاده از دو ماده، مواد نرم با کرنش شکست زیاد در خارج و مواد سخت با سفتی بالا در داخل است. استفاده از ترموپلاستیک پلی اورتان (مواد نرم) از افت ناگهانی بار جلوگیری می کند. استفاده از اپوکسی (مواد سخت) اولین نیروی بیشینه، میانگین بار خرد شدن و جذب انرژی ویژه را افزایش می دهد. ایده استفاده از مواد نرم و سخت در کنار هم در ساختار مشبک، جذب انرژی ویژه را بیش از 11 برابر در مقایسه با ساختار مشبک تولید شده با اپوکسی خالص و بیش از 8 برابر در مقایسه با ساختار مشبک تولید شده با ترموپلاستیک پلی اورتان خالص افزایش داده است.

$$SEA = \frac{\int F dx}{m} \quad (1)$$

$$CLE = \frac{MCL}{IPCF} \quad (2)$$

$$MCL = \frac{\int F dx}{d_{max}} \quad (3)$$

با توجه به آزمون های تجربی برای ساختار مشبک دو ماده ای پیشنهادی، جذب انرژی 144 ژول با انحراف معیار +8 و -4 ژول، بازده نیروی خرد شدن 0.77 با انحراف معیار +0.02 و -0.02 و اولین نیروی بیشینه 6.2 کیلو نیوتن با انحراف معیار +0.37 و -0.18 شده است.

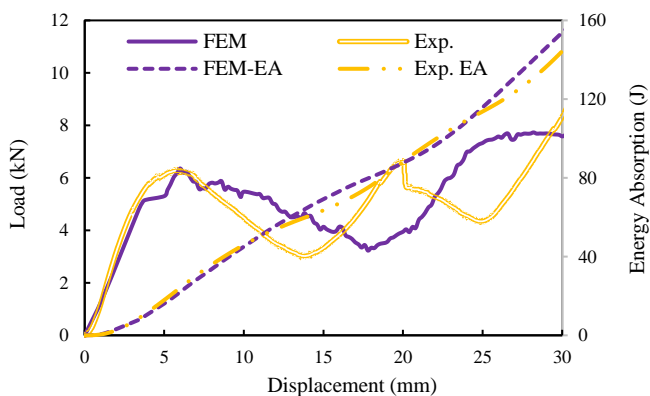


Fig. 9 Comparison of obtained load-displacement curves due to experimental and numerical tests under compressive loading

شکل 9 منحنی نیرو-جابجایی به دست آمده از آزمون تجربی و مدل عددی

شکل 10 تغییر شکل ساختار مشبک دو ماده ای را تحت بارگذاری فشاری نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود، ساختار مشبک تحت بارگذاری فشاری در لایه بیرونی پایه ها به دلیل کرنش شکستگی زیاد ترموپلاستیک پلی اورتان دچار شکست نمی شود. این ویژگی از فروریختن ناگهانی ساختار مشبک جلوگیری می کند. در حقیقت لایه نرم بیرونی (ترموپلاستیک پلی اورتان) به عنوان پوشش قسمت داخلی که از مواد شکننده سخت با سفتی بالا (نسبت به مواد لایه بیرونی) ساخته شده است، از ریزش ناگهانی جلوگیری کرده و ظرفیت بارگیری ساختار مشبک را افزایش

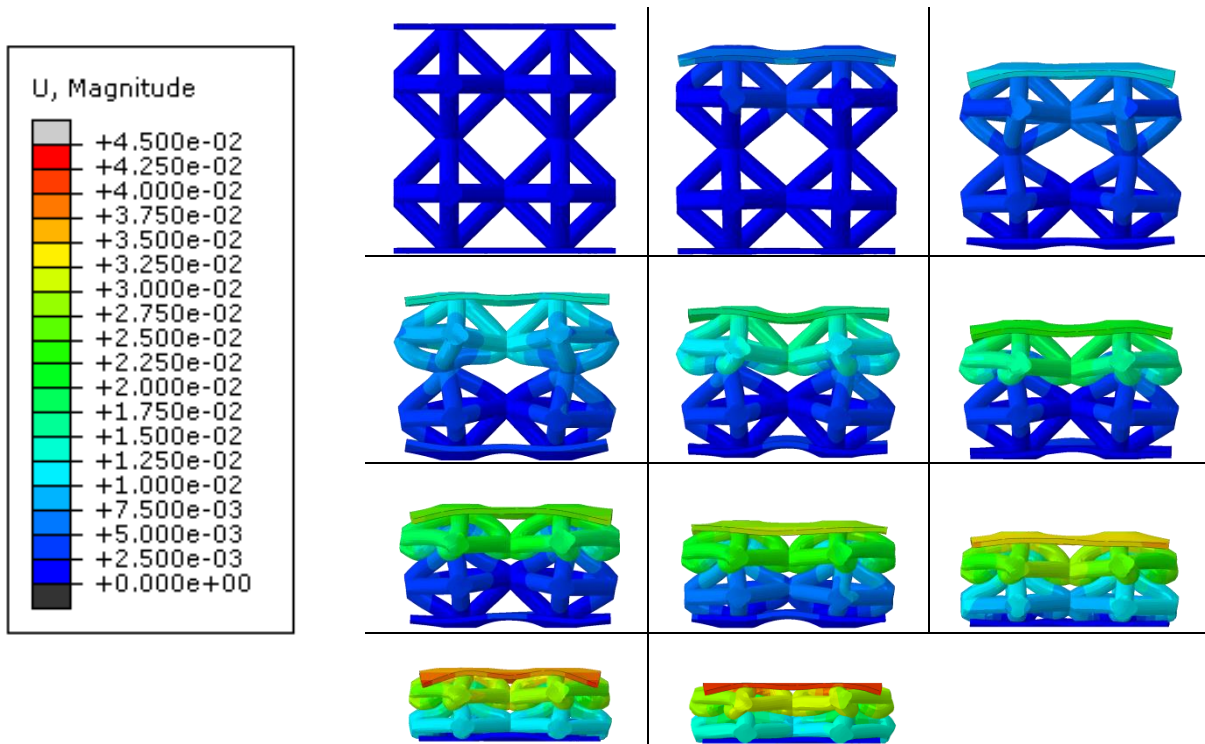


Fig. 10 Deformation bi-material lattice structures under compressive load

شکل 10 تغییر شکل ساختار مشبک دو ماده‌ای تحت بارگذاری فشاری

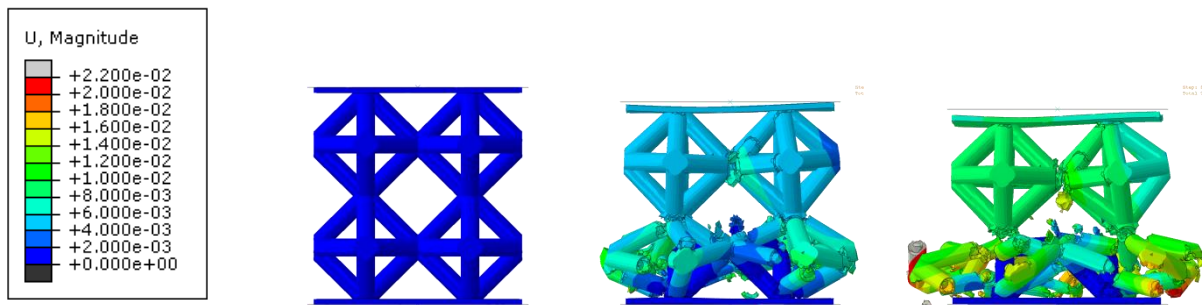


Fig. 11 Deformation lattice structures with pure epoxy under compressive load

شکل 11 تغییر شکل ساختار مشبک با اپوکسی خالص تحت بارگذاری فشاری

7- مراجع

[1] Farrokhhabadi, A., Veisi, H., Gharehbaghi, H., Montesano, J., Behravesh, A.H. and Hedayati, S.K., "Investigation of the energy absorption capacity of foam-filled 3D-printed glass fiber reinforced thermoplastic auxetic honeycomb structures," *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, vol. 0, no. 0, pp. 1–12, 2022.

[2] Mahbod, M. and Asgari, M., "Multiobjective optimization of a newly developed additively manufactured functionally graded anisotropic porous lattice structure," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 234, no. 11, pp. 2233–2255, 2020.

[3] Mahbod, M., Asgari, M. and Mittelstedt, C., "Architected functionally graded porous lattice structures for optimized elastic-plastic behavior," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, vol. 234, no. 8, pp. 1099–1116, 2020.

[4] Hedayati, R., Sadighi, M., Mohammadi-Aghdam, M. and Zadpoor, A.A., "Analytical relationships for the mechanical properties of additively manufactured porous biomaterials based on octahedral unit cells," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 46, pp. 408–422, 2017.

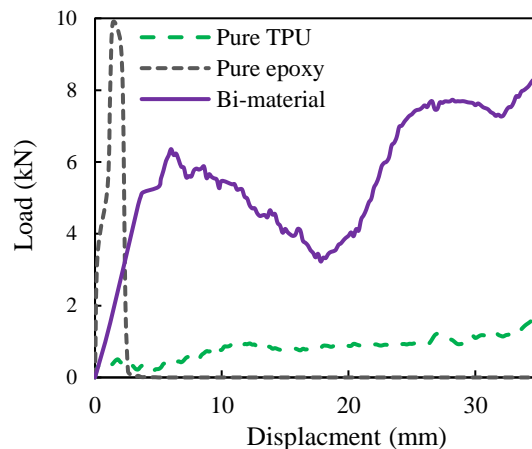


Fig. 12 Load-displacement curves related to lattice structures with pure TPU, pure epoxy, and bi-material

شکل 12 منحنی‌های نیرو-جابجایی مربوط به ساختارهای مشبک با ترموپلاستیک پلی‌اورتان خالص، اپوکسی خالص و دو ماده

- [21] Gharehbaghi, H., Sadeghzade, M. and Farrokhabadi, A., "Introducing the new lattice structure based on the representative element double octagonal bipyramid," *Aerospace Science and Technology*, vol. 121, p. 107383, 2022.
- [5] Hedayati, S.K., Behraves, A.H., Hasannia, S., Kordi, O., Pourghaumi, M., Saed, A.B. and et al., "Additive manufacture of PCL/nHA scaffolds reinforced with biodegradable continuous Fibers: Mechanical Properties, in-vitro degradation Profile, and cell study," *European Polymer Journal*, vol. 162, p. 110876, 2022.
- [6] Veisi, H. and Farrokhabadi, A., "Investigation of the equivalent material properties and failure stress of the re-entrant composite lattice structures using an analytical model," *Composite Structures*, vol. 257, p. 113161, 2021.
- [7] Zadpoor, A.A. and Hedayati, R., "Analytical relationships for prediction of the mechanical properties of additively manufactured porous biomaterials," *Journal of Biomedical Materials Research - Part A*, vol. 104, no. 12, pp. 3164–3174, 2016.
- [8] Mahbod, M. and Asgari, M., "Elastic and plastic characterization of a new developed additively manufactured functionally graded porous lattice structure: Analytical and numerical models," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 155, pp. 248–266, 2019.
- [9] Farrokhabadi, A., Ashrafian, M.M., Gharehbaghi, H. and Nazari, R., "Evaluation of the equivalent mechanical properties in a novel composite cruciform honeycomb using analytical and numerical methods," *Composite Structures*, vol. 275, p. 114410, 2021.
- [10] Hedayati, R., Sadighi, M., Mohammadi-Aghdam, M. and Hosseini-Toudeshky, H., "Comparison of elastic properties of open-cell metallic biomaterials with different unit cell types," *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, vol. 106, no. 1, pp. 386–398, 2018.
- [11] Galehdari, S.A., Kadkhodayan, M. and Hadidi-Moud, S., "Low velocity impact and quasi-static in-plane loading on a graded honeycomb structure; experimental, analytical and numerical study," *Aerospace Science and Technology*, vol. 47, pp. 425–433, 2015.
- [12] Deng, D. and Murakawa, H., "Numerical simulation of temperature field and residual stress in multi-pass welds in stainless steel pipe and comparison with experimental measurements," *Computational Materials Science*, vol. 37, no. 3, pp. 269–277, 2006.
- [13] Olszta, M.J., Cheng, X., Jee, S.S., Kumar, R., Kim, Y.Y., Kaufman, M.J. and et al., "Bone structure and formation: A new perspective," *Materials Science and Engineering R: Reports*, vol. 58, no. 3–5, pp. 77–116, 2007.
- [14] Taghipoor, H. and Malekzade, K., "Experimental and numerical study of Energy Absorption in foam filled Trapezoidal Compound core sandwich panels subjected to quasi-static loading", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, vol. 5, no. 4, pp. 565–574, 2019.
- [15] Parvareh, M., Ahmadi, H. and Liaghat, G.H., "Investigation on the Energy Absorption of Elastomeric Auxetic Structures in Quasi-static and Impact Loading", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, vol. 8, no. 1, pp. 1431–1442, 2021.
- [16] Farrokhabadi, A., Ashrafian, M.M. and Fotouhi, M., "Design and characterization of an orthotropic accordion cellular honeycomb as one-dimensional morphing structures with enhanced properties," *Journal of Sandwich Structures & Materials*, vol. 0, no. 0, p. 109963622110702, 2022.
- [17] Barbero, E.J., *Finite element analysis of composite materials using Abaqus™*. CRC press, 2013.
- [18] Deymier, A.C., An, Y., Boyle, J.J., Schwartz, A.G., Birman, V., Genin, G.M. and et al. "Micro-mechanical properties of the tendon-to-bone attachment," *Acta Biomaterialia*, vol. 56, no. January, pp. 25–35, 2017.
- [19] Molino, G., Montalbano, G., Pontremoli, C., Fiorilli, S. and Vitale-Brovarone, C., "Imaging techniques for the assessment of the bone osteoporosis-induced variations with particular focus on micro-ct potential," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 10, no. 24, pp. 1–27, 2020.
- [20] Sadeghzade, M., Gharehbaghi, H. and Farrokhabadi, A., "Experimental and Analytical Studies of Mechanical Properties of Additively Manufactured Lattice Structure Based on Octagonal Bipyramid Cubic Unit Cell," *Additive Manufacturing*, vol. 48, no. PB, p. 102403, 2021.