



بررسی اثر بهینه‌سازی ساختاری در قابلیت جذب انرژی تیرهای ساندویچی با هسته مشبک فلزی تحت بارگذاری خمشی سه نقطه

حسین تقی‌پور¹، محمد دامغانی نوری^{2*}

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان

* سمنان، صندوق پستی 35131-19111، mnoori@semnan.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 26 مرداد 1396

پذیرش: 12 اسفند 1396

ارائه در سایت: 26 اسفند 1396

کلید واژگان:

بهینه‌سازی ساختاری

جذب انرژی

هسته مشبک فلزی

تیر ساندویچی

بارگذاری عرضی

چکیده

در این پژوهش تأثیر بهینه‌سازی ساختاری هسته‌های مشبک در تیرهای ساندویچی به عنوان جاذب انرژی با نرم‌افزار اباکوس¹ مورد مطالعه قرار گرفته است. ارتباط بین نیرو و جابه‌جایی در مرکز تیر با استفاده از نتایج آزمایشگاهی به دست آمده است. دو نوع هسته مشبک از جنس فولاد با سه جهت‌گیری متفاوت در سلول‌های هسته تحت بارگذاری ضربه‌ای سرعت پایین به صورت خمشی سه نقطه مورد بررسی قرار گرفته است. هسته تیر ساندویچی از صفحات فلزی گسترش یافته ساخته شده که برای بهینه‌سازی ساختاری و حذف سلول‌های ناکارآمد از روش ریزسازه‌های ایزوتروپیک جامد با تابع جریمه (SIMP) استفاده شده است. در ادامه با انجام بهینه‌سازی ساختاری به بررسی پارامترهای ضربه‌پذیری از جمله جذب انرژی ویژه به عنوان اهداف آزمایش پرداخته شده است. این نوع سیستم جاذب انرژی می‌تواند جهت جذب انرژی ضربه در صنایع هوایی، کشتی‌سازی، خودروسازی، صنایع ریلی و آسانسورها مورد استفاده قرار گیرد. نتایج تحلیل آزمایشگاهی و بررسی عددی در بارگذاری خمشی نشان داد که به کارگیری روش بهینه‌سازی ساختاری می‌تواند ظرفیت جذب انرژی را به صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش دهد. نتایج آزمایش‌های خمشی نشان داد که ظرفیت جذب انرژی ویژه در تیر ساندویچی با ساختار بهینه بین 45 تا 94% افزایش یافته است، همچنین جهت‌گیری مناسب هسته مشبک در تیر ساندویچی با ساختاری بهینه موجب افزایش جذب انرژی ویژه تا بیش از 90% می‌شود. در انتها ساختارهای هندسی بهینه برای سه درصد مختلف کاهش حجمی و بهترین نمونه‌ها از لحاظ معیارهای در نظر گرفته شده با توجه به اهداف طراحی معرفی می‌شوند.

Topology Optimization Study in Energy Absorption of Lattice-core Sandwich Beams under Three-point Bending Test

Hossein Taghipoor¹, Mohammad Damghani Noori^{1*}

1- Department of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

*P.O.B. 35131-19111, Semnan, Iran, mnoori@semnan.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 22 December 2017

Accepted 03 March 2018

Available Online 17 March 2018

Keywords:

Topology optimization

energy absorption

expanded metal sheet

sandwich beam

three-point bending

ABSTRACT

In this research, an influence of topology optimization in energy absorption of lattice core sandwich beams by using ABAQUS software was an investigation. Relationships between the force and displacement at the midspan of the sandwich beams were obtained from the experiments. Two types of Steel lattice cores with three cell orientation were subjected to the low-velocity impact test under three-point bending. The core of sandwich beams was made from expanded metal sheets and a topology optimization with Solid Isotropic Microstructure with Penalization (SIMP) method was used to remove the redundant expanded metal cell. In the following, by studying the topology optimization to evaluate the impact parameters, including Specific Energy Absorption (SEA), as discussed testing purposes. The energy absorbing system can be used in the aerospace industry, shipbuilding, automotive, railway industry and elevators to absorb impact energy. Experimental and numerical results showed that topology optimization could significantly increase specific absorbed energy. Results of three-point bending crushing tests showed that the SEA of a sandwich beam with optimal core structure increased between 45% and 94% compared to the initial design structure of the core. In addition, appropriate orientation of expanded metal cell in the core of sandwich beam caused to increase the specific energy absorption by more than 90%. Finally, an appropriate optimal geometric structure with three tape of volume fraction and the best examples of criteria considered with respect to the objectives were introduced.

1- مقدمه

فراوانی در سیستم‌های حمل و نقل دارند. این سازه‌ها معمولاً به صورت عملیات مونتاژ از یک یا چند عضو و واحد هسته ساخته می‌شوند که توانایی

تیرهای ساندویچی در قاب‌های ساختمانی، پل‌ها، جرثقیل‌ها، بدنه کشتی‌ها، فضاپیماها و زیرساخت‌های صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد و کاربرد

¹ Abaqus

Please cite this article using:

H. Taghipoor, M. Damghani Noori, Topology Optimization Study in Energy Absorption of Lattice-core Sandwich Beams under Three-point Bending Test, Modares Mechanical Engineering, Vol. 18, No. 04, pp. 163-173, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

ریزسازه‌های بهینه توسط رزوانی و همکاران [11]، و اونگ و همکاران [12] ارائه شد.

هوانگ و همکاران [13] در راستای بررسی بهینه‌سازی ساختاری در جذب انرژی از روش بهینه‌سازی ساختاری تکاملی دو طرفه (BESO) استفاده کردند. در این مطالعه آن‌ها ساختار بهینه شده را در صفحاتی تحت بارگذاری خمشی با اعمال قیود جابه‌جایی و بیشینه نیرو اعمالی با هدف دست‌یابی به بیشترین سختی معرفی کردند.

قدوسیان و همکاران [14] با استفاده از روش بهینه‌سازی تکاملی دوجبهته سازه اولیه و به کارگیری تنش بیشینه و میانگین وزنی به بهینه‌سازی شکل سطوح تماس در سازه‌های تحت بارگذاری چندگانه پرداختند.

روش ریزسازه‌های ایزوتروپیک جامد با تابع جریمه¹ (SIMP) یکی از روش‌های محبوب استفاده شده در بهینه‌سازی ساختاری سازه‌هاست [15]. در این روش چگالی نسبی به عنوان تابعی از مختصات مسئله تعریف می‌شود و در نقاط مختلف محدوده طراحی بین صفر و یک تغییر می‌کند [16]. چگالی نسبی صفر و یک به ترتیب به معنای وجود و عدم وجود ماده در توپولوژی مسئله فرض می‌شود. به این ترتیب چگالی نسبی المان‌ها متغیرهای طراحی خواهند بود و نیازی به تغییر در ساختار شبکه‌بندی المان‌ها نخواهد بود، از طرفی هر المان چگالی ثابتی خواهد داشت [17].

در مقاله حاضر به بررسی رفتار تیرهای ساندویچی با هسته مشبک و بهینه‌سازی ساختاری آن تحت بارگذاری ضربه عرضی با سرعت پایین پرداخته شده است. کار بسیار محدودی بر بهینه‌سازی ساختارهای جاذب انرژی با وجود پتانسیل زیاد آن‌ها انجام شده است. در بررسی تجربی نمونه‌ها تحت بارگذاری ضربه‌ای سرعت پایین از دستگاه سقوط وزنه استفاده شده و نتایج با شبیه‌سازی عددی مقایسه شده است. اثر تغییر پارامترهای هندسی سلول صفحات مشبک در هسته مورد مطالعه قرار گرفته و اثر این پارامتر بر میزان جذب انرژی بررسی می‌شود. در ادامه جذب انرژی نمونه‌ها با تغییر در جهت‌گیری سلول‌های صفحات مشبک در هسته تیر ساندویچی به همراه ساختار بهینه مورد مقایسه قرار می‌گیرد. در پایان به محاسبه کلیه شاخص‌های مهم در تحلیل جاذب‌های انرژی پرداخته و نمونه با بالاترین ظرفیت جذب انرژی معرفی می‌شود.

2- بهینه‌سازی توپولوژی

2-1- روش بهینه‌سازی

یک برنامه بهینه‌سازی شامل سه عامل اصلی متغیر طراحی، تابع هدف و محدودیت‌های طراحی است. به طور کلی یک مسئله بهینه‌سازی را می‌توان به صورت ریاضی رابطه (1) توصیف کرد.

$$\begin{cases} \text{تابع هدف:} & f(Y) = f(y_1, y_2, \dots, y_n) \\ \text{قیدها:} & g_i(Y) - g_i^U \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m \\ & y_j^L \leq y_j \leq y_j^U \quad j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (1)$$

در این مطالعه متغیر طراحی Y چگالی المان‌های هسته تیر و انرژی کرنشی کل هسته مشبک در تیر به عنوان پاسخ طراحی است. حجم نهایی هسته با حداکثر مقدار g محدود می‌شود: تابع هدف $f(Y)$ نشان‌دهنده انرژی کرنشی کل هسته مشبک است. رابطه (1) یک مسئله طراحی بهینه‌سازی بر پایه رسیدن به حداکثر سختی در هسته همراه با ایجاد محدودیت در حجم هسته تیر است.

در این راستا تعدادی از روش‌های بهینه‌سازی ساختاری وجود دارد، مانند

تحمل محدوده گسترده‌ای از بارگذاری‌های دینامیکی، ضربه‌ای، انفجاری و نیروی ناشی از امواج دریا و بادها را دارند. این تیرها دارای ساختاری با هسته منظم و تناوبی است که حد وسط خوبی بین عملکرد (جذب انرژی) و قابلیت تولید ایجاد خواهد کرد. این مزایای ساختاری اغلب در راستای وجود هسته با وزن پایین بوده که صفحات بیرونی را به هم متصل می‌کنند [1]. طراحی سازه‌های ساندویچی براساس پارامترهایی چون فراهم آوردن استحکام بالا و وزن پایین میسر می‌شود. هسته باید سختی قابل قبول از لحاظ نیروهای برشی وارده به سازه را داشته باشد، همچنین بتواند از لغزش صفحات نسبت به یکدیگر جلوگیری کند [2].

ساختارهای مشبک و سلولی با توجه به استحکام، مدول و جذب بالا در تراکم‌های پایین دارای مزیت‌های منحصر به فردی هستند [3]؛ بنابراین از آن‌ها برای سازه‌هایی که نیاز به وزن سبک دارند مانند هواپیماها، فضاپیماها، خودروها و... بهره می‌برند [4]. توجه خاص به ساختار ساندویچی فلزی متشکل از هسته مواد سلولی و مشبک، ترکیب قابلیت جذب انرژی بالا با طراحی وزن بسیار سبک را به همراه دارد [5]. هسته تیرهای ساندویچی که به صورت مجزا از صفحات هستند سختی مورد نیاز این ساختار را فراهم و از طرفی ورق‌های بالایی و زیرین سختی کششی تیر را تأمین می‌کند [6].

طاهری بهروز و همکاران [7] به بررسی رفتار خمش چهار نقطه تیرهای ساندویچی با هسته‌های فومی و رزینی و طول‌های متفاوت پرداختند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان می‌دهد که مکانیزم تخریب تیرها ناشی از فرورفتگی فوم و در ادامه شکست پوسته در زیر محل اعمال نیرو بوده است. در ادامه منحنی‌های نیرو- جابه‌جایی و مکانیزم تخریب تیرها با دو روش تجربی و عددی با یکدیگر مقایسه شده که نتایج نشان از هم‌پوشانی بالای دو روش می‌دهد.

طراحی بهینه در ساختار جاذب‌های انرژی مورد توجه صنعت خودروسازی قرار گرفته است. برخی تحقیقات انجام شده در زمینه بهینه‌سازی پارامترهای ساختارهای لوله‌ای با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی ساختاری انجام شده است. این مطالعات بیشتر درباره مشکلات پیچیده بهینه‌سازی ساختارهای پیوسته در جذب انرژی و کمتر در جاذب‌ها عملی شده است.

در سال‌های اخیر بهینه‌سازی ساختاری بیشتر به دلیل رایانه‌های سریع‌تر و استفاده مکرر از شبیه‌سازی المان محدود افزایش یافته است. روش‌های مختلفی برای رسیدن به شکل نهایی در بهینه‌سازی توپولوژی استفاده می‌شود.

بهینه‌سازی سازه‌ها را بیشتر می‌توان به سه بخش تقسیم کرد: الف- بهینه‌سازی اندازه‌ها که در آن شکل سازه ثابت فرض می‌شود و ابعاد بهینه محاسبه می‌گردند، متغیرهای طراحی اندازه می‌توانند سطح مقطع تیر، ضخامت ورق، ممان اینرسی، ضخامت یا زاویه لایه‌ها و غیره باشند؛ ب- بهینه‌سازی شکل که در آن ساختار سازه ثابت است و شکل سازه تغییر داده می‌شود تا بهترین شکل برای هدف مورد نظر به دست آید؛ ج- بهینه‌سازی ساختاری که در آن ساختار سازه تغییر داده می‌شود.

در زمینه بهینه‌سازی ساختار سازه‌های پیوسته به عنوان نخستین کار تحقیقاتی می‌توان به مقاله چنگ و اولهف [8] در سال 1981 اشاره کرد که به بهینه‌سازی ورق‌های الاستیک اختصاص داشت. برخی از ریاضیدانان ریزسازه‌های بهینه را برای یافتن طرح بهینه ورق‌های سوراخ‌دار در حالت تنش صفحه‌ای مورد بررسی قرار دادند [9, 10]. نخستین حل تحلیلی دقیق برای ورق‌های سوراخ‌دار و همچنین بیان صحیح تانسور سختی در

¹ Solid Isotropic Material with Penalization

$$\frac{\partial g}{\partial y} = \{U\} \frac{\partial Q^T}{\partial y} + Q^T \frac{\partial \{U\}}{\partial y} \quad (7)$$

در این روش تعریف حساسیت بردار جابه‌جایی با E به صورت رابطه (8) نمایش داده می‌شود [23].

$$[K]\{E\} = \{Q\} \quad (8)$$

رابطه (9) با جای‌گزینی روابط (8,5) در رابطه (7) به صورت زیر به دست می‌آید.

$$\frac{\partial g}{\partial y} = \{U\} \frac{\partial Q^T}{\partial y} + \{E\}^T \left(\frac{\partial \{P\}}{\partial y} - \{U\} \frac{\partial \{K\}}{\partial y} \right) \quad (9)$$

عدد حساسیت تابع نهایی با رابطه (9) محاسبه می‌شود، این روش اساس بهینه‌سازی بسیاری از نرم‌افزارهای المان محدود از جمله نرم‌افزار قدرتمند اباکوس است.

3- تحلیل عددی

در این مقاله برای بررسی و تحلیل عددی و همچنین رسیدن به ساختار بهینه بر میزان جذب انرژی در تیر ساندویچی با هسته مشبک تحت بارگذاری ضربه‌ای سرعت پایین و شرط مرزی خمشی سه نقطه از نرم‌افزار تجاری اباکوس استفاده شده است.

طرح کلی مراحل بهینه‌سازی در فلوچارت شکل 2 آمده که شامل مراحل زیر است:

مرحله 1- در این قسمت پس از مدل‌سازی و تکمیل مراحل پیش‌پردازش، بارگذاری و اعمال شرایط مرزی تجزیه و تحلیل المان محدود انجام می‌شود. انرژی کرنشی مربوط به المان‌ها برای تعیین هدف بهینه‌سازی استفاده می‌شود. در ادامه تابع هدف، قیود مورد نظر و ناحیه مورد مطالعه در فرایند بهینه‌سازی تعیین می‌شود.

مرحله 2- بهینه‌سازی بر ساختار با نرم‌افزار اباکوس انجام می‌شود. خواص مؤثر مواد در روش SIMP در نرم‌افزار معرفی شده سپس شکل بهینه در ناحیه مورد نظر پس از تجزیه و تحلیل مشخص می‌شود که در این‌جا چگالی المان‌ها به عنوان متغیرهای طراحی مشخص شده‌اند.

مرحله 3- ساختار بهینه شده خروجی در مرحله 2 دوباره مورد تجزیه و تحلیل المان محدود در مرحله 1 قرار می‌گیرد. نتایج در تکرارها مقایسه می‌شود تا با یک همگرایی مناسب به طرح بهینه نهایی برسد.

چگونگی رسیدن به ساختار بهینه در روش SIMP به کمک نرم‌افزار اباکوس⁴ (ATOM) برای 4 نمونه در سائز و جهت‌گیری متفاوت در سلول هسته مشبک در نمودارهای شکل 3 آمده است. در این نمودارها تغییرات

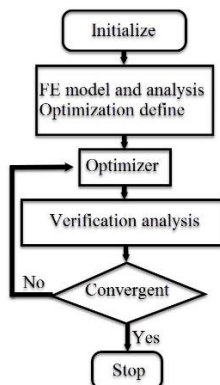


Fig.2 Flowchart of the optimization process

شکل 2 فلوچارت مراحل بهینه‌سازی

روش همگن‌سازی¹ [18]، روش مواد مصنوعی² [19] و بهینه‌سازی ساختاری تکاملی³ [13] که نام چندین مورد از این روش‌هاست. در این میان روش SIMP یکی از روش‌های مرسوم و پرکاربرد در میان روش‌های بهینه‌سازی توپولوژی است [21,20,15]. این روش که در مطالعه پیش‌رو مورد استفاده قرار گرفته اساس کلی بر پایه سختی مواد است که با یک ضریب به صورت رابطه (2) محدود می‌شود [18].

$$K^p(\rho) = \rho^p K \quad (2)$$

در رابطه (2) K^p و K به ترتیب نشان‌دهنده ماتریس سختی محدود (مجازات) شده و اصلی المان‌ها، ρ نشان‌دهنده چگالی عملی و P نیز ضریب محدودکننده است. برای یک واحد مکعبی از ساختار ماده همراه با اندازه حباب داخلی آن با سائز (a,b,c) که در شکل 1 نمایش داده شده است، چگالی مواد به صورت بدون بعد به صورت رابطه (3) محاسبه می‌شود.

$$\rho = 1 - a \times b \times c \quad (3)$$

در این‌جا ρ چگالی بدون بعد مواد عملی ساختار کلی است. در مسأله فرض پیوستگی مواد برقرار است و چنین بیان می‌کند که ساختار از بی‌نهایت سلول همراه با حباب داخلی تشکیل شده است. برای هر المان در صورتی که چگالی بی‌بعد شده به صفر نزدیک باشد یعنی المان خالی از ماده است، در غیر این صورت اگر چگالی بی‌بعد به عدد یک نزدیک باشد نشان‌دهنده المان بدون حباب داخلی است.

2-2- محاسبه حساسیت در بهینه‌سازی

حذف المان‌ها در شرایط یکسان می‌تواند اثرات متفاوتی بر اهداف طراحی داشته باشد؛ بنابراین نیاز به یک عدد حساسیت احساس می‌شود که نشان‌دهنده اثرات حذف المان‌ها بر اهداف طرح بهینه است. سختی، جابه‌جایی و نیروی اعمالی به ساختار کلی می‌تواند طبق رابطه (4) تعریف شود [22].

$$[K]\{U\} = \{P\} \quad (4)$$

در رابطه (4) K نشان‌دهنده ماتریس سختی و P نشان‌دهنده بردار نیروی اعمالی به ساختار است. رابطه (5) را با مشتق‌گیری از طرفین رابطه (4) به صورت زیر داریم.

$$K \frac{\partial U}{\partial y} = \frac{\partial P}{\partial y} - U \frac{\partial K}{\partial y} \quad (5)$$

قید g با توجه به بردار جابه‌جایی برابر با رابطه (6) است.

$$g = \{Q\}^T \{U\} \quad (6)$$

رابطه (7) را با مشتق‌گیری از طرفین رابطه (6) داریم.

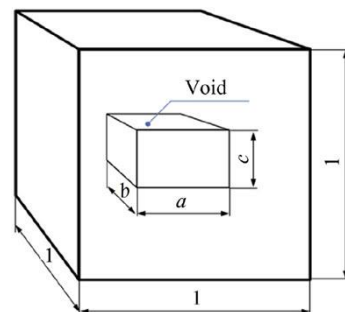


Fig. 1 a unit volume material and volume of the void cell [20]

شکل 1 یک واحد حجم ماده همراه با ابعاد حجم سلول خالی در آن [20]

¹ homogenization method

² Artificial material

³ Evolutionary structural optimization

⁴ Abaqus Topology Optimization Module

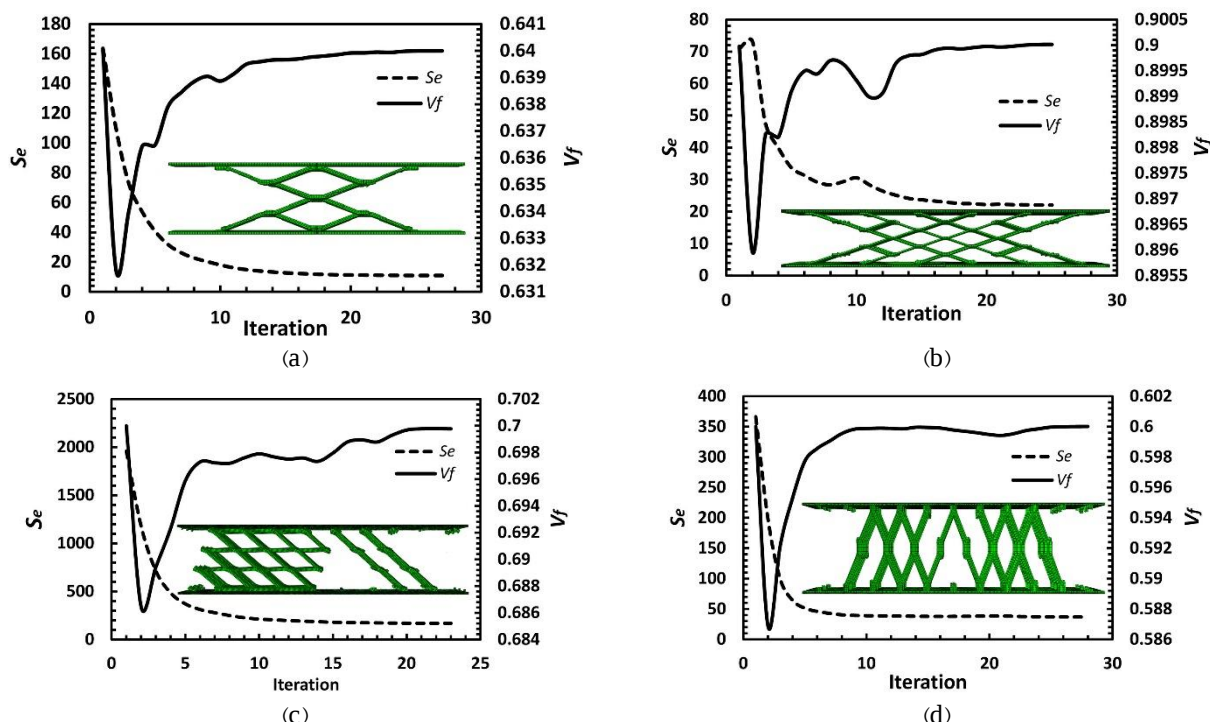


Fig.3 ATOM Histories of the volume fraction (V_f) and the strain energy (S_e) for sample a) BC03-70-0, b) BC02-90-0, c) BC03-70-45, d) BC02-88-90

شکل 3 روند کاهش حجم و انرژی کرنشی در بهینه‌سازی ساختاری اباکوس برای الف) نمونه BC03-70-0، ب) نمونه BC02-90-0، ج) نمونه BC03-70-45، د) نمونه BC02-88-90

گرفته شده است. برای بررسی تأثیر سایز مش‌ها سه نوع سایز مش 0.5، 1 و 1.5 میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفت. همان‌طور که در نمودار نیرو-جابجایی شکل 6 مشخص است، برای سایز مش 1 و 1.5 میلی‌متر در تغییر شکل الاستیک و پلاستیک تطابق خوبی برقرار است که در پایان سایز بهینه 1 میلی‌متر برای مدل‌سازی کلی انتخاب شد.

4- تحلیل آزمایشگاهی

برای ساخت تمامی نمونه‌ها از ورق‌های فولاد نورد سرد شده طبق استاندارد ASTM A-611 [22] استفاده شده است. به منظور بررسی خواص مکانیکی ورقه‌ها با استفاده از استاندارد ASTM E08M-04 مطابق شکل 7 سه نمونه استاندارد تحت آزمایش کشش قرار داده شده و نتایج در جدول 2 آورده شده است. همچنین در شکل 8 نمودار تنش برحسب کرنش مهندسی که از نتایج آزمایش کشش ورق‌های فولادی به دست آمده رسم شده است.

برای ساخت هسته‌های مشبک از دستگاه پرس استفاده شده است. شکل 9 به صورت شماتیک برش و گسترش صفحات شبکه را نشان می‌دهد. سلول‌های صفحات مشبک با دو پارامتر اصلی L_1 و L_2 معرفی می‌شوند که به ترتیب معرف طول بزرگ و کوچک لوزی است. پارامترهای هندسی این صفحات در شکل 10 و جدول 3 نشان داده شده است.

برای ساخت تیرهای ساندویچی از جوش استیلین جهت اتصال هسته مشبک به صفحات بالا و پایین استفاده شده است. در این مطالعه صفحات سلولی مشبک به صورت طولی (براساس شکل 4) به عنوان هسته تیر ساندویچی مورد آزمایش قرار گرفته است. در تمامی نمونه‌ها به طور یکسان تعداد 3 لایه از صفحات مشبک به عنوان هسته تیر ساندویچی تعبیه شده است. در ساخت تیرهای ساندویچی از دو نوع سایز متفاوت سلول نوع 1 و نوع 2 که ابعاد هندسی آن‌ها در جدول 3 آمده است، به همراه سه

انرژی کرنشی (S_e) و حجم کلی هسته (V_f) با تعداد تکرارها تا رسیدن به همگرایی در ساختار بهینه مشخص شده است. در جدول 1 تمامی 16 نمونه به همراه درصد کاهش وزن در 3 سطح آمده است.

پس از مشخص شدن ساختار بهینه برای بررسی رفتار تیرهای ساندویچی تحت بار ضربه‌ای و مشخص شدن تأثیر بهینه‌سازی بر جذب انرژی، نمونه‌ها با تغییر شکل غیرخطی مدل شده است و به صورت دینامیک صریح¹ تحلیل می‌شوند. در بررسی عددی نمونه‌های تیر با هسته مشبک که طرح شماتیک آن در شکل 4 آمده است، برای صفحات بالایی و پایینی پانل از المان‌های مکعبی سه بعدی با 8 نود ($C3D8I^2$) برای بهبود رفتار خمشی استفاده شده است.

صفحات مشبک مورد استفاده در هسته تیر با المان‌های صفحه‌ای ($S4R^3$) مدل‌سازی شده است. در شکل 5 یک سلول از هسته مشبک با این نوع از مش‌بندی نشان داده شده است. پایه‌های نگهدارنده و ضربه‌زننده با المان‌های سفت و سخت ($R3D4^4$) مدل‌سازی شده است. پایه‌های نگهدارنده در تمامی جهات مقید شده، ولی ضربه‌زننده دارای تنها یک درجه آزادی در راستای عمود بر تیر است.

در تعریف خصوصیات تماسی که یکی از مهم‌ترین بخش‌ها در مدل‌سازی است، تماس بین پایه‌های نگهدارنده و ضربه‌زننده با صفحات بالایی و پایینی تیر ساندویچی به صورت صفحه به صفحه⁵ و همچنین تماس بین صفحات هسته با یکدیگر⁶ از نوع تماس کامل با ضریب اصطکاک پنالتی 0.25 بهره

¹ dynamic explicit

² first-order fully integrated three-dimensional 8-node solid element

³ S4R 4-node thick shell

⁴ discrete rigid elements

⁵ surface to surface

⁶ self-contact

جدول 1 مقایسه طراحی بهینه در معیارهای مختلف کسر حجمی و حجم اولیه به همراه پارامترهای فروریزش در خمشی سه نقطه تحت ضربه سرعت پایین

Table 1 Optimal designs using various criterion and initial full with crashworthiness characteristics of three point bending tests in low velocity impact

نمونه	Design	W_c (kg)	$SEAc$ (J/kg)	CFE (%)	$E_d^{total}(J)_{Sim}$	$E_d^{total}(J)_{Exp}$	Error (%)	p_{mean}	p_{peak}
BC03-0	Initial full design	0.22	958.92	72.7	218.22	238	-8.31	4158	5712
BC03-85-0	Design for criterion 1	0.19	1077.43	119.8	208.04	199	4.54	3934	3281
BC03-70-0	Design for criterion 2	0.15	1187.83	93	188.4	179	5.26	3668	3943
BC03-64-0	Design for criterion 3	0.11	1441.58	93.4	169	157	7.96	3192	3414
BC03-90	Initial full design	0.218	2247.81	79.9	492.154	494	-0.28	9658	12086
BC03-90-90	Design for criterion 1	0.179	2642.72	92.4	473.8305	---	---	9003	9742
BC03-80-90	Design for criterion 2	0.14	3593.22	58.3	515.4	---	---	10165	17413
BC03-60-90	Design for criterion 3	0.128	4133.31	67.1	532.3	---	---	10104	15043
BC03-45	Initial full design	0.338	856.22	80.9	290.06	276	5.22	5655	6982
BC03-90-45	Design for criterion 1	0.274	411.19	76.4	113.07	---	---	2480	3244
BC03-80-45	Design for criterion 2	0.244	486.58	82.3	119.12	---	---	2180	2649
BC03-70-45	Design for criterion 3	0.175	505.94	87.9	88.97	---	---	1663	1891.
BC02-0	Initial full design	0.043	1614.17	134.4	70.40562	75	-6.36	1281	953
BC02-95-0	Design for criterion 1	0.032	1830.5	93.4	59.96	---	---	1089	1165
BC02-90-0	Design for criterion 2	0.023	2062.38	169.9	48	---	---	881	518
BC02-88-0	Design for criterion 3	0.014	2251.94	220.4	33	---	---	577	261

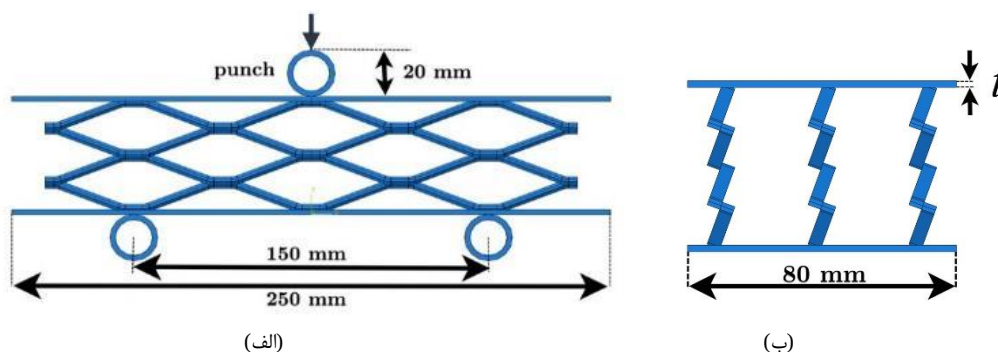


Fig. 4 A schematic view of the sandwich beam sample a) front view and b) side view

شکل 4 نمایی شماتیک از تیر ساندویچی، (الف) نمای روبه‌رو (ب) نمای جانبی

جهت‌گیری 0، 45 و 90 درجه سلولی در هسته، مطابق شکل 11 استفاده شده است. در جدول 4 مشخصات تمامی 16 نمونه طراحی شده آمده است.

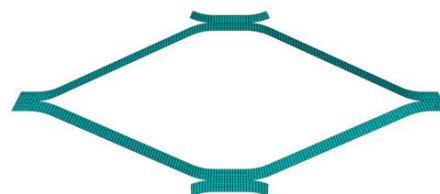


Fig. 5 Mesh for an expanded metal cell

شکل 5 نمونه مش‌بندی یک سلول از صفحه مشبک



Fig. 7 Steel sheet tensile test

شکل 7 تست کشش ورق فولادی

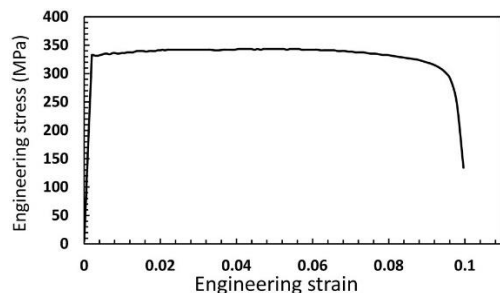


Fig. 8 Engineering stress versus engineering strain curve for steel sheet (substrate and core)

شکل 8 نمودار تنش-کرنش مهندسی صفحات فولادی (صفحات رویه و هسته)

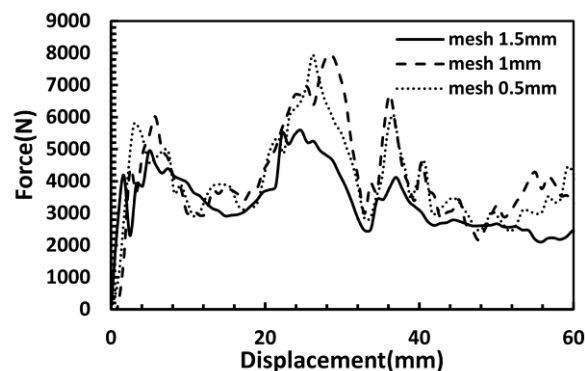


Fig. 6 Validation of mesh size for finite element simulation

شکل 6 صحت‌سنجی سازه مش برای شبیه‌سازی به روش المان محدود

تمام تست‌های خمشی سه نقطه تحت بارگذاری ضربه‌ای سرعت پایین انجام شده بر تیرهای ساندویچی با هسته مشبک با استفاده از دستگاه آزمایش سقوط وزنه انجام شده که در شکل 12 نشان داده شده است. وزنه‌ای به جرم 40 کیلوگرم از ارتفاع 1.5 متری به صورت سقوط آزاد انرژی لازم برای آزمایش خمشی سه نقطه را برای نمونه‌ها فراهم می‌کند. در حین انجام آزمایشات و همراه با تغییر شکل تیرهای ساندویچی انرژی وارده توسط نیروسنج دینامیکی ثبت می‌شود. شتاب‌سنج متصل به سیستم ثبت پالس نیز نمودار شتاب-زمان را در اختیار ما قرار می‌دهد که با دو بار انتگرال‌گیری از داده‌ها، جابه‌جایی نمونه تحت آزمایش خمشی به دست می‌آید.

5- نتایج و بحث

در بررسی فروریزش نمونه با هسته مشبک نوع 2 مطابق نمودار نیرو-جابه‌جایی شکل 13 با کاهش حجم هسته، سطح نمودار نیرو-جابه‌جایی به سمت پایین کشیده می‌شود. این نوع از هسته نسبت به هسته نوع 3 فروریزشی همگن‌تر داشته و تمامی سلول‌ها در فروریزش شرکت دارد، از این‌رو با حذف برخی سلول‌ها سطح نیرو کاهش می‌یابد. حذف سلول‌ها در هسته مشبک نوع 2 اگر چه سطح نیرو را کاهش می‌دهد، ولی این کاهش سطح نیرو در مقایسه با کاهش وزن هسته تیر قابل توجیه است.

نمودار نیرو-جابه‌جایی شکل 14 مقایسه بین تیرهای ساندویچی با هسته مشبک نوع 3 و جهت‌گیری سلولی صفر درجه را نشان می‌دهد. مقدار جذب انرژی در نمونه‌ها با کاهش حجمی 85% و 70% بسیار نزدیک به هم بوده و این نشان‌دهنده کارایی بالای بهینه‌سازی ساختاری در بهبود جذب انرژی هسته‌های مشبک و سلولی است. بهینه‌سازی ساختاری سبب شده سلول‌هایی که در جذب انرژی تأثیرگذار نبوده و دچار تغییر شکل پلاستیک نشده‌اند حذف شده و از میزان وزن سازه کاسته شود.

نمودارها و چگونگی فروریزش تیرهای ساندویچی با هسته مشبک و جهت‌گیری سلولی 45 درجه در شکل 15 نشان داده شده است. در این جهت‌گیری سلولی مشاهده می‌شود سطح نیرو با کاهش حجمی 90 درصدی

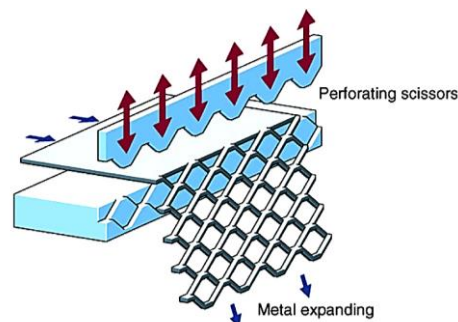


Fig. 9 Schematic of the manufacturing process for the expanded metal sheets [25]

شکل 9 طرح شماتیک از فرایند تولید صفحات مشبک فلزی [25]

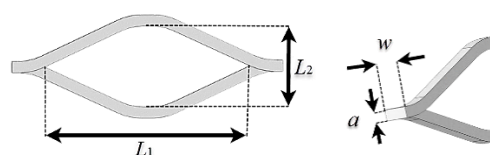


Fig. 10 Definition of geometric parameters of an expanded metal sheet cell

شکل 10 تعریف پارامترهای هندسی سلول صفحات مشبک فلزی

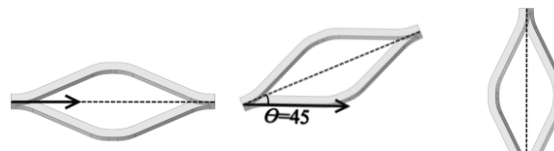


Fig. 11 Orientations of the expanded metal cells

شکل 11 جهت‌گیری سلول‌های صفحات مشبک

جدول 2 خواص مکانیکی فولاد

Table 2 Properties of steel.

مقادیر	خصوصیات مکانیکی
201	مدول الاستیک E(GPa)
0.3	ضریب پواسون ν
333.52	تنش تسلیم σ_y (MPa)
363.47	تنش نهایی σ_u (MPa)
7800	چگالی ρ (kg/m^3)

جدول 3 ابعاد سلول‌های صفحات مشبک

Table 3 Dimensions of the expanded metal cells

C	L_1 (mm)	L_2 (mm)	W(mm)	a(mm)
2	34	11	2.2	1.5
3	64	22	4	3

جدول 4 مشخصات نمونه‌های طراحی شده برای آزمایش

Table 4. Computational design of the experiments

نمونه	C	V_f (%)	زاویه سلول‌ها (θ)	W_m (kg)
BC03-0	3	100	0	0.75
BC03-85-0	3	85	0	0.71
BC03-70-0	3	70	0	0.68
BC03-64-0	3	64	0	0.63
BC03-90	3	100	90	0.74
BC03-90-90	3	90	90	0.68
BC03-80-90	3	80	90	0.63
BC03-60-90	3	60	90	0.6
BC03-45	3	100	45	0.86
BC03-90-45	3	90	45	0.77
BC03-80-45	3	80	45	0.74
BC03-70-45	3	70	45	0.67
BC02-0	2	100	0	0.568
BC02-95-0	2	95	0	0.558
BC02-90-0	2	90	0	0.549
BC02-88-0	2	88	0	0.539

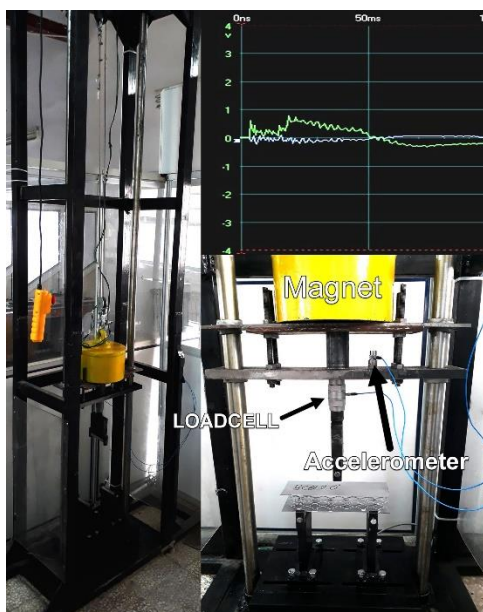


Fig. 12 a view of the drop-weight machine for low-velocity impact testing

شکل 12 نمایی از دستگاه سقوط وزنه جهت آزمایش ضربه سرعت پایین

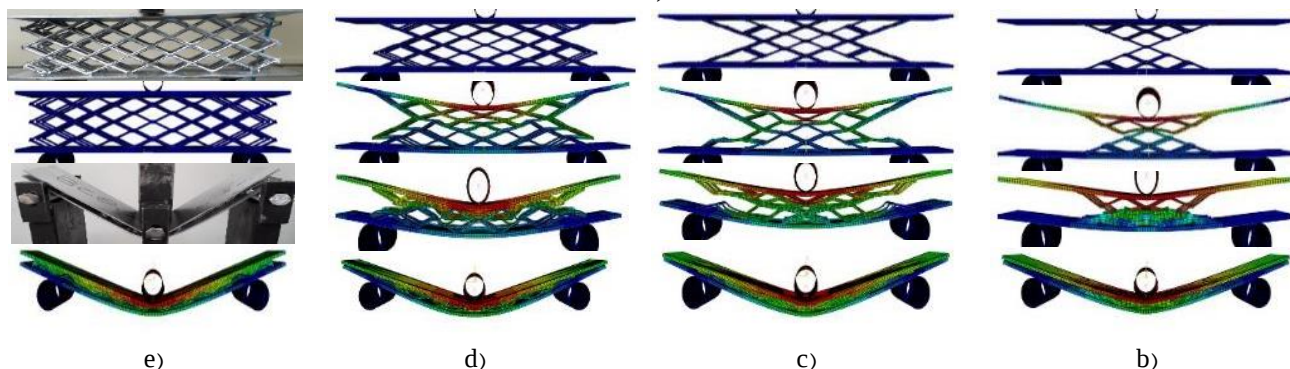
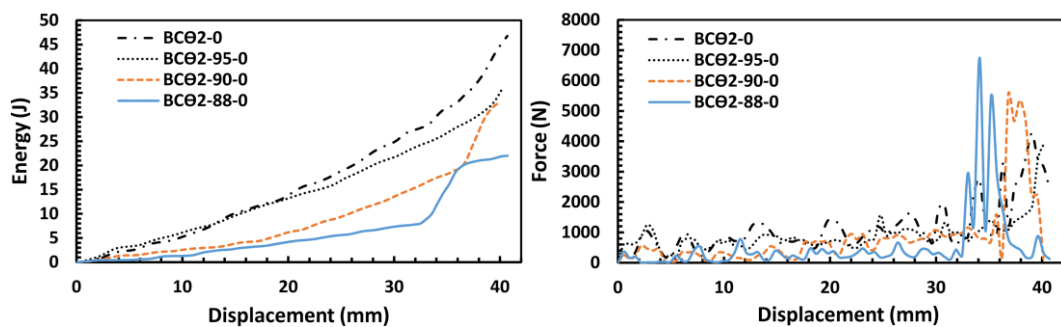


Fig. 13 a) A comparison of force-displacement and energy-displacement curves and collapse of the sandwich structures with lattice core b) BCθ2-88-0, c) BCθ2-90-0, d) BCθ2-95-0, e) BCθ2-0

شکل 13 الف) مقایسه نتایج تجربی منحنی نیرو-جابجایی و انرژی-جابجایی، به همراه مراحل فروپاشی سازه ساندویچی با هسته مشبک ب) BCθ2-88-0، ج) BCθ2-90-0، د) BCθ2-95-0، ه) BCθ2-0

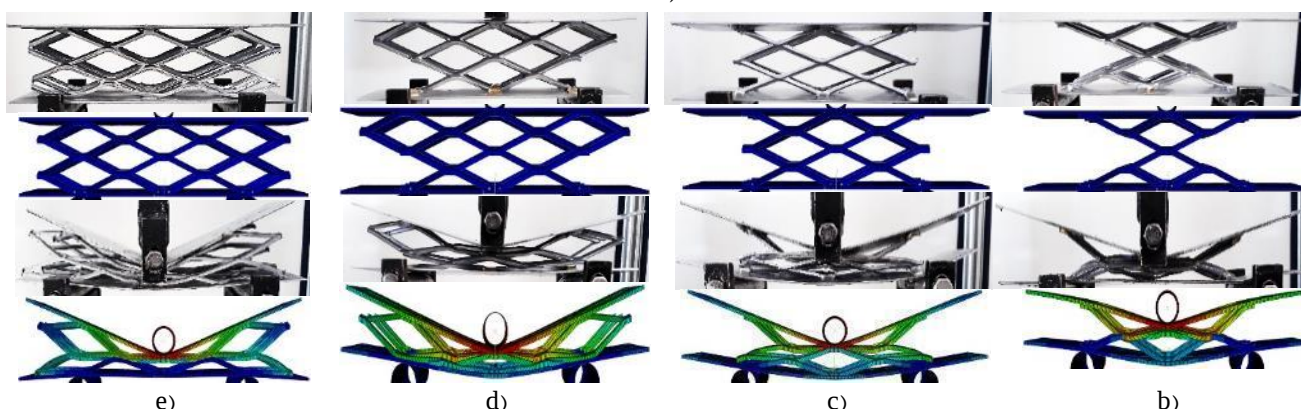
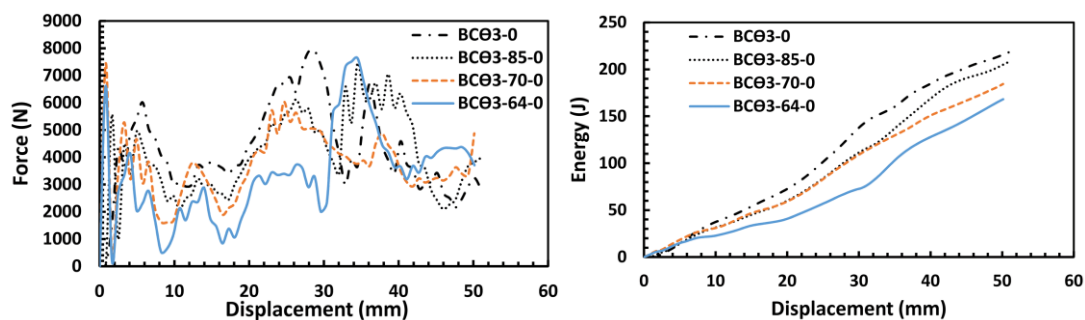


Fig. 14 a) A comparison of force-displacement and energy-displacement curves and collapse of the sandwich structures with lattice core b) BCθ3-64-0, c) BCθ3-70-0, d) BCθ3-85-0, e) BCθ3-0

شکل 14 الف) مقایسه نتایج تجربی منحنی نیرو-جابجایی و انرژی-جابجایی، به همراه مراحل فروپاشی سازه ساندویچی با هسته مشبک ب) BCθ3-64-0، ج) BCθ3-70-0، د) BCθ3-85-0، ه) BCθ3-0

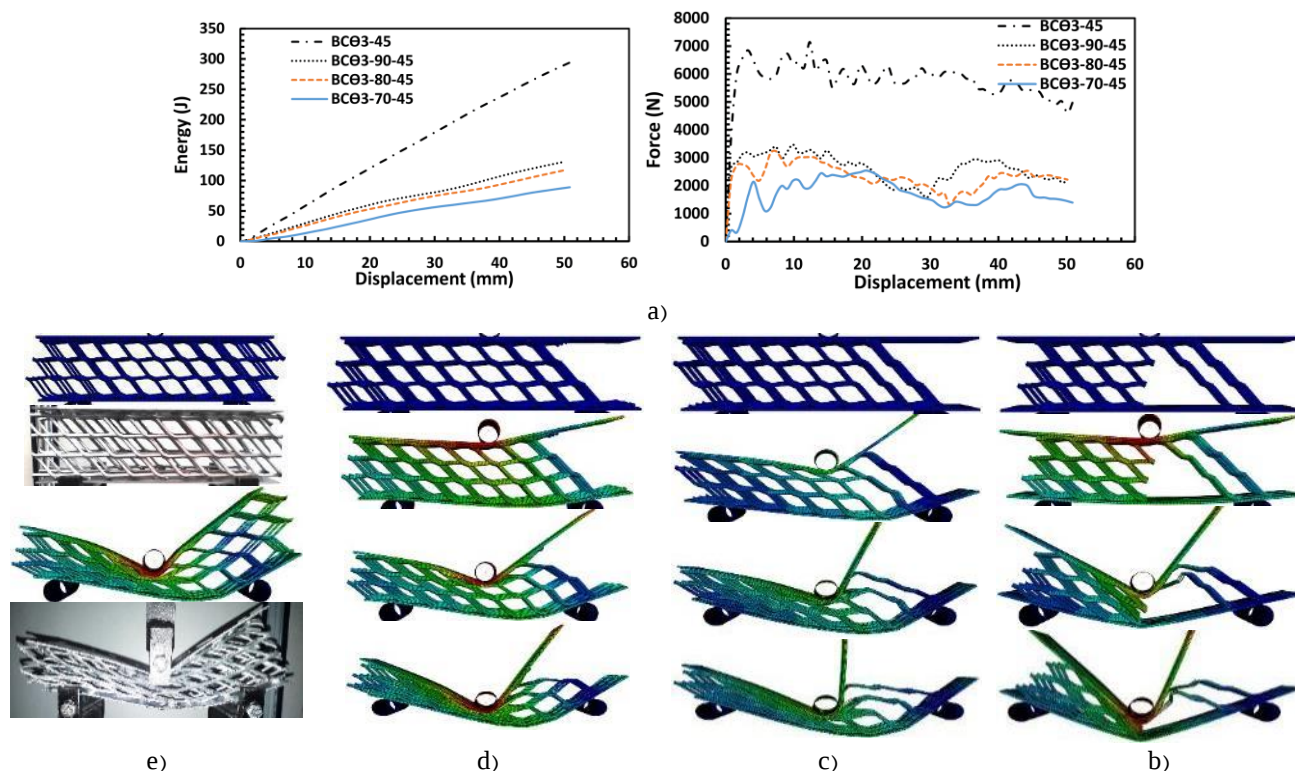


Fig. 15 a) A comparison of force-displacement and energy-displacement curves and collapse of the sandwich structures with lattice core b) BC03-70-45, c) BC03-80-45, d) BC03-90-45, e) BC03-45

شکل 15 الف) مقایسه نتایج تجربی منحنی نیرو-جابجایی و انرژی-جابجایی، به همراه مراحل فروریزش سازه ساندویچی با هسته مشبک ب) BC03-70-45، ج) BC03-80-45، د) BC03-90-45، ه) BC03-45

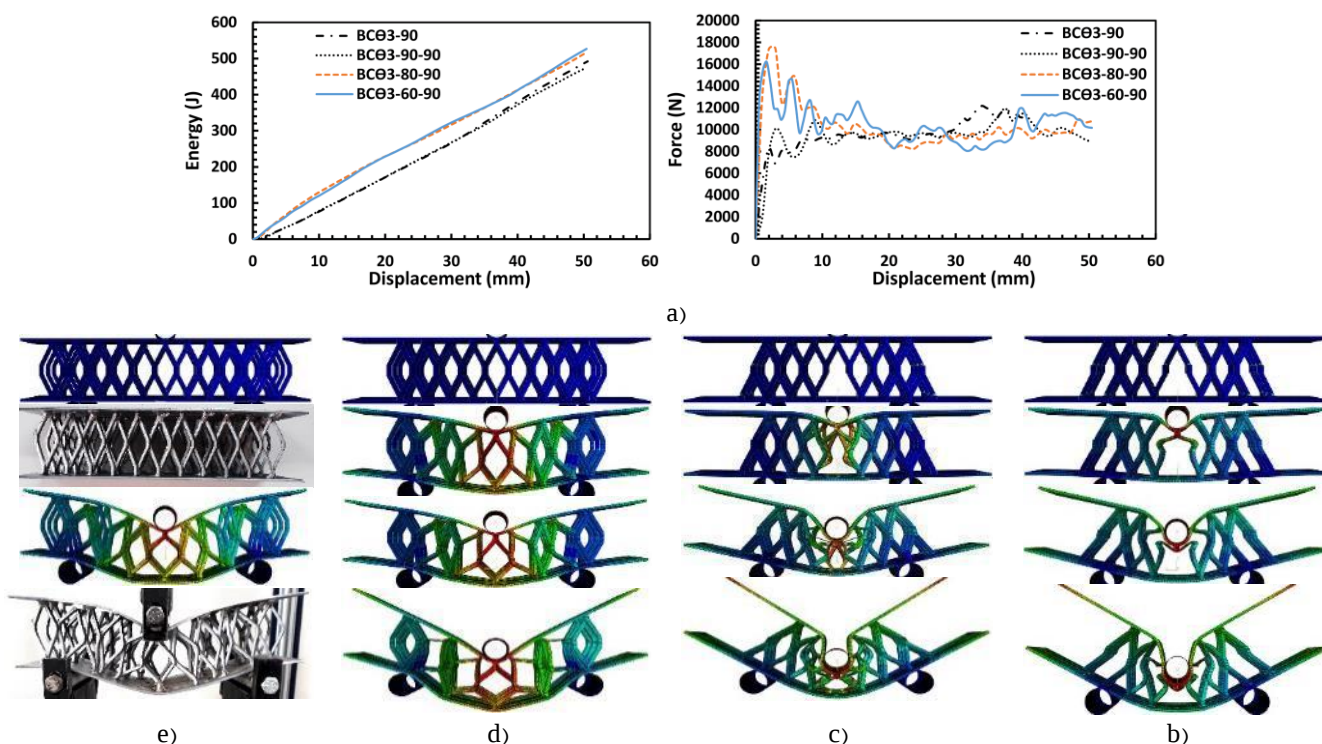


Fig. 16 a) A comparison of force-displacement and energy-displacement curves and collapse of the sandwich structures with lattice core b) BC03-60-90, c) BC03-80-90, d) BC03-90-90, e) BC03-90

شکل 16 الف) مقایسه نتایج تجربی منحنی نیرو-جابجایی و انرژی-جابجایی، به همراه مراحل فروریزش سازه ساندویچی با هسته مشبک ب) BC03-60-90، ج) BC03-80-90، د) BC03-90-90، ه) BC03-90

حجمی 88 و 90 به ترتیب 39% و 20% نسبت به نمونه اولیه افزایش یافته است، این نشان از تأثیر بالقوه بهینه‌سازی ساختاری در این نوع از هسته دارد. بازده نیروی فروریزش در هسته نوع 3 و جهت‌گیری سلولی صفر درجه (BC03-0) با روند کاهش حجم در بهینه‌سازی به طور کلی بهبود پیدا کرده و به 100% نزدیک شده است. در این تیر ساندویچی با کاهش حجمی 85، 70 و 64 به ترتیب میزان CFE افزایش، 39، 21 و 22 درصدی را تجربه می‌کند.

در تیر ساندوچی با هسته نوع 3 و جهت‌گیری سلولی 45 درجه (BC03-45)، همان‌طور که در شکل 18 و جدول 1 مشخص است، بازده نیروی فروریزش نزدیک به 100% بوده و در بهینه‌سازی ساختاری همچنان کیفیت خود را حفظ کرده و تنها افزایش 1-8 درصدی را نشان می‌دهد.

در تیر ساندویچی با جهت‌گیری 90 درجه، بازده نیروی فروریزش در بهینه‌سازی ساختاری با کاهش حجمی 90، 13.5 درصد افزایش یافته است، با دقت به نمودار نیرو-جابجایی شکل 16-a مشخص می‌شود نیروی بیشینه اولیه پایین است؛ حال آن‌که با روند کاهش حجم در بهینه‌سازی با معیار کاهش حجم 80 و 60، نیروی بیشینه تا 30% افزایش یافته و CFE به ترتیب، 37% و 19% کاهش می‌یابد.

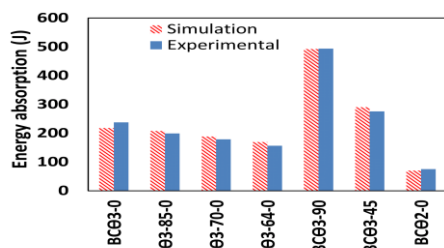


Fig. 17 Effect of cores on energy absorption

شکل 17 نمودار میله‌ای اثر نوع هسته بر مقدار جذب انرژی

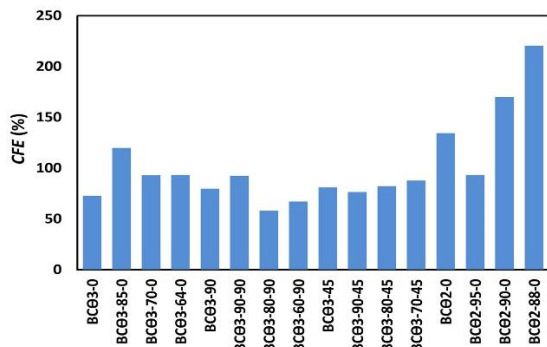


Fig. 18 Effect of cores on CFE

شکل 18 نمودار میله‌ای اثر نوع هسته بر بازده نیروی فروریزش

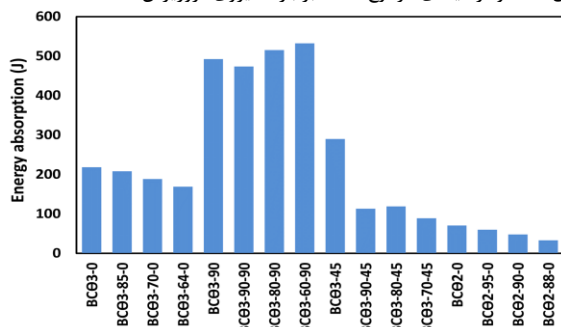


Fig. 19 Effect of cores on E_a

شکل 19 نمودار میله‌ای اثر نوع هسته بر ظرفیت جذب انرژی

در بهینه‌سازی ساختاری افت ناگهانی پیدا می‌کند. این افت ناگهانی می‌تواند ریشه در عدم تقارن هسته تیر در جهت طولی داشته باشد. در ادامه سطح نیرو با کاهش بیشتر حجم در بهینه‌سازی تقریباً ثابت می‌ماند که این باعث نزدیک شدن جذب انرژی نمونه‌ها به یکدیگر و کاهش در وزن تیرها می‌شود. تیرهای ساندویچی با هسته مشبک نوع 3 و جهت‌گیری سلولی 90 درجه، با توجه به نمودارهای نیرو-جابجایی و انرژی-جابجایی و همان‌طور که در شکل 16 نشان داده شده است، بالاترین میزان جذب انرژی در میان نمونه‌های بررسی شده را داراست. با بهینه‌سازی ساختاری در این تیر دیده می‌شود که جذب انرژی با توجه به کاهش وزن نمونه تقریباً ثابت باقی می‌ماند که این نشان‌دهنده تأثیر مؤثر بهینه‌سازی در جذب انرژی است.

مقایسه نتایج حاصل از بررسی عددی و تجربی تیرهای ساندویچی با هسته مشبک، تحت بارگذاری خمشی سرعت پایین که در نمودار میله‌ای شکل 17 نشان داده شده است، نشان از هم‌پوشانی بالا و تطابق خوب دو روش با یکدیگر دارد.

1-5- محاسبه پارامترهای مهم در جذب انرژی

نیروی پیک اولیه (P_{peak})، نیروی میانگین (P_{mean})، ظرفیت جذب انرژی (E_a) و بازده نیروی فروریزش¹ (CFE) پارامترهایی هستند که برای سنجیدن خواص جاذب استفاده می‌شوند. همچنین پارامتر دیگری نیز وجود دارد که در مطالعه جاذب‌های انرژی از اهمیت بالایی برخوردار است که انرژی جذب شده بر واحد وزن² (SEA) است. در این مطالعه با توجه به این‌که وزن هسته در مقایسه با وزن صفحات بالایی و پایینی تیر بسیار کمتر است، برای بررسی دقیق‌تر اثر بهینه‌سازی ساختاری، انرژی جذب شده بر وزن هسته تیر را به عنوان جذب انرژی ویژه معرفی می‌نماییم. روابط (10-13) [26] به ترتیب نشان‌دهنده انرژی جذب‌شده، نیروی پیک اولیه و بازده نیروی فروریزش و انرژی جذب شده ویژه است.

$$E_a = \int_0^{\delta_{max}} F(\delta) d\delta \quad (10)$$

$$P_{mean} = \frac{1}{\delta_{max}} \int_0^{\delta_{max}} F(\delta) d\delta \quad (11)$$

$$CFE = \frac{P_{mean}}{P_{peak}} \times 100 \quad (12)$$

$$SEA_c = \frac{E_a}{W_c} \quad (13)$$

این پارامترها در سیستم طراحی بسیار مهم هستند و وزن به عنوان فاکتور محدودکننده است. مقدار انرژی جذب‌شده همان سطح زیر منحنی نیرو-جابجایی است. بازده نیروی فروریزش از نسبت نیروی میانگین بر نیروی پیک اولیه به دست می‌آید [27].

در شکل 18 نمودار میله‌ای میزان بازده نیروی فروریزش نمایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهد تیر با هسته مشبک نوع 2 (BC02-88-0) با مقدار 134.4% بیشترین میزان بازده نیروی فروریزش را میان نمونه‌ها دارد؛ به طور کلی هسته نوع 2 با توجه به کم بودن تغییر شکل الاستیک هسته، یا شروع زود هنگام تغییر شکل پلاستیک با اعمال نیرو، همان‌طور که در شکل 15-a دیده می‌شود، نمودار نیرو-جابجایی سطح پایینی داشته که در ادامه با انباشته سول‌ها بر یکدیگر این سطح بالا می‌رود. این رفتار در هسته نوع 2 باعث بالا بودن بازده نیروی فروریزش در این نمونه شده است.

در ادامه میزان CFE برای تیرهای ساندویچی با هسته نوع 2 و کاهش

¹ crashing force efficiency

² specific energy absorption

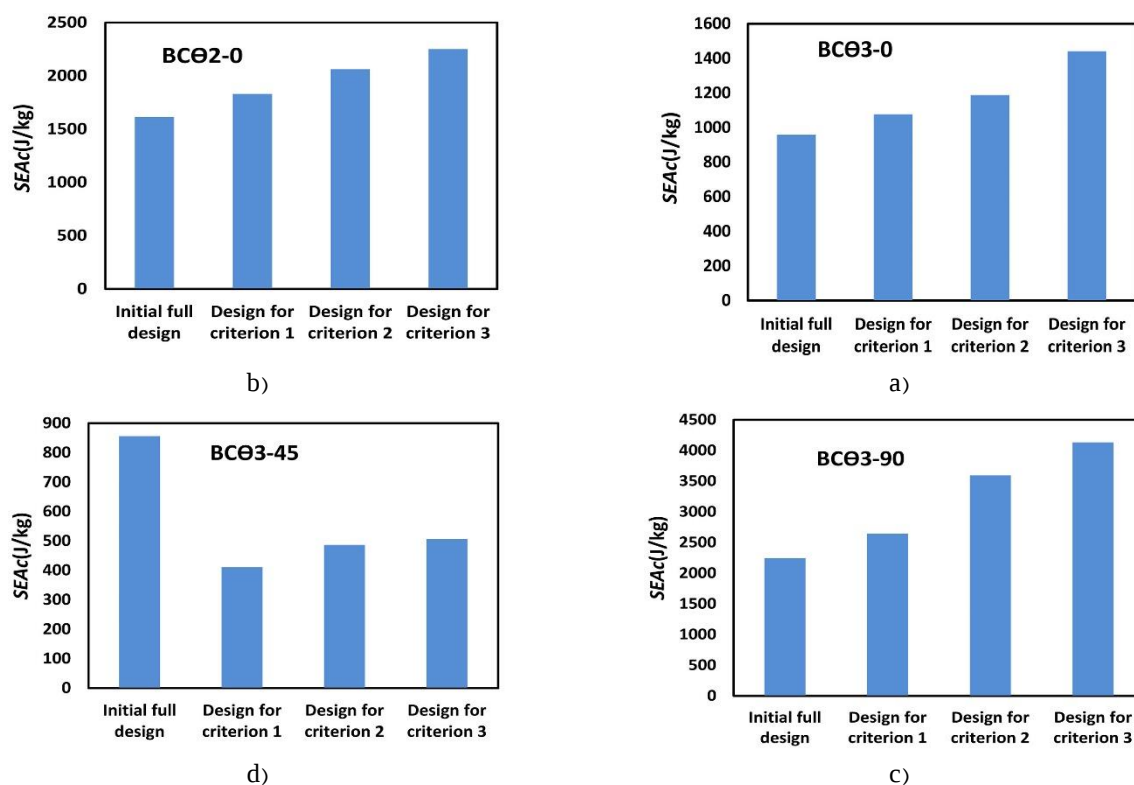


Fig. 20 Comparison of SEA during topology optimization by volume fraction between specimens with core type of a) BC02-0, b) BC03-0, c) BC03-45, d) BC03-90

شکل 20 مقایسه بین مقادیر جذب انرژی ویژه طی فرایند بهینه‌سازی ساختاری با کسر حجمی نمونه‌ها با هسته نوع الف) BC02-0، ب) BC03-0، ج) BC03-45، د) BC03-90

طی روند بهینه‌سازی کاهش وزن بیشتری در هسته تیر مشاهده می‌شود.

6- نتیجه‌گیری

از بررسی‌های انجام گرفته نتایج زیر حاصل شد.

- یکی از روش‌های مفید جهت افزایش میزان ظرفیت جذب انرژی در جاذب‌های انرژی تحت بارگذاری عرضی استفاده از بهینه‌سازی ساختاری است که در این مطالعه مورد توجه و بررسی قرار گرفت. نتایج نشان از افزایش جذب انرژی ویژه تا 94% با استفاده از این روش دارد.
- از مهم‌ترین پارامترهایی که در این پژوهش مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت، تأثیر جهت‌گیری سلول‌های صفحات مشبک در هسته تیرهای ساندویچی بر بهینه‌سازی ساختاری بود. نتایج نشان از افزایش جذب انرژی ویژه بین 45% تا 94% در جهت‌گیری 90 درجه و 11-33 درصد در جهت‌گیری صفر درجه دارد، این در حالی است که سلول با جهت‌گیری 45 درجه نه تنها میزان ظرفیت جذب انرژی ویژه افزایش نیافته، بلکه در حالتی کاهش 52% را تجربه کرده است.
- جاذب‌های ساندویچی با هسته مشبک معرفی شده دارای وزن کمی هستند و انرژی زیادی را جذب می‌کنند؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که این نوع جاذب‌ها دارای بازده انرژی بالایی هستند. در مقایسه بین هسته‌های مشبک نوع 2 و 3 مشاهده شد که مقدار جذب انرژی ویژه با افزایش سایز سلول‌ها هم افزایش می‌یابد. از سویی تأثیر بهینه‌سازی ساختاری بر ظرفیت جذب انرژی ویژه در هسته نوع 3 نسبت به هسته نوع 2 بیشتر است.

ظرفیت جذب انرژی در تیر با هسته مشبک نوع 3 و سلول با جهت‌گیری 90 درجه (BC03-90) در مقایسه با تمامی نمونه‌ها، همان‌طور که در نمودار میله‌ای شکل 19 مشاهده می‌کنید، بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده و بین 45% - 94% افزایش پیدا کرده است.

روند تغییرات میزان ظرفیت جذب انرژی ویژه نسبت به وزن هسته (SEA) در طی فرایند بهینه‌سازی ساختاری برای 4 نمونه در نظر گرفته شده در شکل 20 آمده است. در شکل 20 برای تیر با هسته مشبک نوع 3 و سلول با جهت‌گیری 90 درجه مشخص است که با کاهش حجمی 80 و 60، به ترتیب 15%، 37.5% و 45.6% در میزان ظرفیت جذب انرژی ویژه (SEA) افزایش یافته است

در شکل 15 فروریزش پیش‌رونده نمونه تیر ساندویچی با هسته نوع 3 و جهت‌گیری سلولی 45 درجه برای شکل اولیه و ساختار بهینه نشان داده شده است. میزان SEA برای ساختار بهینه با کاهش حجمی 90 نسبت به حالت اولیه مطابق نمودار میله‌ای 20-d به نصف کاهش پیدا کرده است، ولی در ادامه روند بهینه‌سازی با کاهش حجمی 80 و 70، دوباره افزایش میزان SEA مشاهده می‌شود، ولی همچنان این مقدار از حالت اولیه کمتر است.

تیرهای ساندویچی با هسته مشبک نوع 3 (BC03-0) و نوع 2 (BC02-0) جهت‌گیری سلولی صفر درجه در حالت ساختار بهینه نسبت به حالت ابتدایی به ترتیب افزایش 33.5 و 28.3 درصدی را در میزان SEA تجربه کرده است. با مقایسه بین نتایج حاصله از بهینه‌سازی ساختاری در راستای بهبود ظرفیت جذب انرژی، تأثیر بالقوه این روش در هسته نوع 3 مشخص می‌شود، چرا که این هسته نسبت به هسته نوع 2 وزن بیشتری داشته و در

- [4] F. N. Deshpande VS, Collapse of truss core sandwich beams in 3-point bending, *Solids and Structures*, Vol. 38, No. 1, pp. 6275–305, 2001.
- [5] G. L. Simone, Aluminum foams produced by liquid- state processes, *Acta Materialia*, Vol. 46, No. 3, pp. 3109–23, 1998.
- [6] S. I. Frostig Y, Baruch M, Vilnay O, High-Order theory for sandwich-beam behavior with transversely flexible core, *Engineering Mechanics*, Vol. 118, No. 1, pp. 1026–43, 1992.
- [7] F. Taheri-Behrooz, M. Mansourinik, Experimental and numerical analysis of sandwich composite beam under four-point bending, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 1, pp. 241–252, 2017. (in Persian فارسی)
- [8] K. T. Cheng, N. Olhoff, An investigation concerning optimal design of solid elastic plates, *Solids and Structures*, Vol. 17, No. 3, pp. 305–323, 1981.
- [9] R. V Kohn, G. Strang, Optimal design and relaxation of variational problems, I, *Communications on Pure and Applied Mathematics*, Vol. 39, No. 1, pp. 113–137, 1986.
- [10] K. A. Lurie, A. V Cherkasov, A. V Fedorov, Regularization of optimal design problems for bars and plates, part 2, *Optimization Theory and Applications*, Vol. 37, No. 4, pp. 523–543, 1982.
- [11] G. I. N. Rozvany, T. G. Ong, W. T. Szeto, R. Sandler, N. Olhoff, M. P. Bendsøe, Least-weight design of perforated elastic plates—I, *Solids and Structures*, Vol. 23, No. 4, pp. 521–536, 1987.
- [12] T. G. Ong, G. I. N. Rozvany, W.-T. Szeto, Least-weight design of perforated elastic plates for given compliance: Nonzero Poisson's ratio, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 66, No. 3, pp. 301–322, 1988.
- [13] X. Huang, Y. M. Xie, G. Lu, Topology optimization of energy absorbing structures, *Crashworthiness*, Vol. 12, No. 6, pp. 663–675, 2007.
- [14] A. Ghoddosian, M. Sheykhi, M. Rostami, Contact shape optimization of structures under multiple loading using bi-directional evolutionary structures, *Modeling in Engineering*, Vol. 10, No. 30, pp. 76–86, 2013. (in Persian فارسی)
- [15] W. Zhang, W. Zhong, X. Guo, An explicit length scale control approach in SIMP-based topology optimization, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 282, No. 1, pp. 71–86, 2014.
- [16] L. Siva Rama Krishna, N. Mahesh, N. Sateesh, Topology optimization using solid isotropic material with penalization technique for additive manufacturing, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 4, No. 2, pp. 1414–1422, 2017.
- [17] J. Liu, Y. Ma, A survey of manufacturing oriented topology optimization methods, *Advances in Engineering Software*, Vol. 100, No. 1, pp. 161–175, 2016.
- [18] N. Chen, D. Yu, B. Xia, J. Liu, Z. Ma, Interval and subinterval homogenization-based method for determining the effective elastic properties of periodic microstructure with interval parameters, *Solids and Structures*, Vol. 106–107, No. Supplement C, pp. 174–182, 2017.
- [19] M. Zhou, G. I. N. Rozvany, The COC algorithm, Part II: Topological, geometrical and generalized shape optimization, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 89, No. 1–3, pp. 309–336, 1991.
- [20] H. Long, Y. Hu, X. Jin, H. Yu, H. Zhu, An optimization procedure for spot-welded structures based on SIMP method, *Computational Materials Science*, Vol. 117, No. 1, pp. 602–607, 2016.
- [21] N. P. Garcia-Lopez, M. Sanchez-Silva, A. L. Medaglia, A. Chateaufneuf, A hybrid topology optimization methodology combining simulated annealing and SIMP, *Computers and Structures*, Vol. 89, No. 15, pp. 1512–1522, 2011.
- [22] M. Abdi, *Evolutionary topology optimization of continuum structures using X-FEM and isovalues of structural performance*. PhD thesis, University of Nottingham, 2015.
- [23] R. T. Haftka, H. M. Adelman, Recent developments in structural sensitivity analysis, *Structural Optimization*, Vol. 1, No. 3, pp. 137–151, 1989.
- [24] ASTM Int., Standard Specification for Steel , Sheet , Carbon , and High-Strength, Low-Alloy, Hot-rolled and Cold-rolled, *ASTM*, no. A 568/A 568M, 2000.
- [25] G. W. Kooistra, H. N. G. Wadley, Lattice truss structures from expanded metal sheet, *Materials and Design*, Vol. 28, No. 2, pp. 507–514, 2007.
- [26] M. Damghani Nouri, H. Hatami, A. Ghodsbin Jahromi, Experimental investigation of expanded metal tube absorber under axial, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 371–378, 2015. (in Persian فارسی)
- [27] C. Graciano, G. Martínez, D. Smith, Experimental investigation on the axial collapse of expanded metal tubes, *Thin-walled Structural*, Vol. 47, No. 8–9, pp. 953–961, 2009.

- تیر ساندویچی با هسته مشبک نوع 2 دارای بالاترین مقدار CFE است که با پیشبرد کاهش حجم طی بهینه‌سازی ساختاری روندی روبه رشد به خود می‌گیرد. این عامل ریشه در نوع فروریزش هسته در این تیر دارد. هسته مشبک نوع 2 با کمترین نیرو در مفصل‌های خود تشکیل لولای پلاستیک داده و تمامی سلول‌ها به طور یکپارچه در این فرایند شرکت می‌کند.
- جاذب‌های انرژی ساندویچی با هسته مشبک به دلیل شکل سازه‌ای دارای مکانیزم فروریزش متقارن و همگن در هسته است، همچنین در این نوع جاذب‌ها نیروی بیشینه اولیه مقدار کمی دارد و به نیروی میانگین نزدیک است. محاسبه ضریب شکل یا بازده نیروی لهیدگی بیانگر همین موضوع است.
- تأثیر بهینه‌سازی ساختاری بر بازده نیروی فروریزش (CFE) با افزایش زاویه جهت‌گیری سلول‌های هسته از صفر تا 90 درجه به صورت معکوس است، به طوری که در هسته با جهت‌گیری صفر درجه باعث رشد میزان CFE می‌شود، در هسته با جهت‌گیری 45 درجه تقریباً بی‌تأثیر و سرانجام در جهت‌گیری سلولی 90 درجه باعث کاهش در بازده نیروی فروریزش می‌شود.

7- فهرست علائم

C	نوع هسته
CFE	ضریب شکل
E	مدول الاستیک
E_a	ظرفیت جذب انرژی جاذب (J)
L	طول نمونه (mm)
N_c	تعداد لایه صفحات مشبک در هسته
P_{mean}	نیروی میانگین (N)
P_{peak}	نیروی پیک اولیه (N)
SEA_a	انرژی جذب شده بر واحد وزن جاذب (J/kg)
SEA_c	انرژی جذب شده بر واحد وزن هسته (J/kg)
t	ضخامت صفحات بالایی و پایینی تیر (mm)
V_f	درصد کاهش حجم نسبت به حجم اولیه
W_m	وزن نمونه (kg)
علائم یونانی	
δ	جابه‌جایی (mm)
ρ	چگالی (kg/m^3)

8- مراجع

- [1] S. Guruprasad, A. Mukherjee, Layered sacrificial claddings under blast loading Part I analytical studies, *Impact Engineering*, Vol. 24, No. 9, pp. 975–984, 2000.
- [2] S. Guruprasad, A. Mukherjee, Layered sacrificial claddings under blast loading. Part II experimental studies, *Impact Engineering*, Vol. 24, No. 9, pp. 975–984, 2000.
- [3] E. A. Wadley HNG, Fleck NA, Fabrication and structural performance of periodic cellular metal sandwich structures, *Composites Science and Technology*, Vol. 63, No. 1, pp. 2331–43, 2003.