



## Optimization of Effective Parameters on the Bending Behavior of Honeycomb Sandwich Panels Using Response Surface Method

Zahra Mollazadeh<sup>1</sup>, Mohammad Mahdi Barzegari<sup>2\*</sup>, Mohammad Reza Zamani<sup>3</sup>, Jafar Eskandarijam<sup>4</sup>

<sup>1</sup> M.Sc., Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek-e-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Assistant Professor, Northern Research Center for Science and Technology, Malek-e-Ashtar University of Technology, Fereydoonkenar, Iran

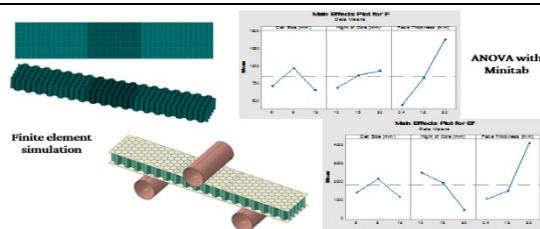
<sup>3</sup> Assistant Professor, Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek-e-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

<sup>4</sup> Professor, Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek-e-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

### HIGHLIGHTS

- Honeycomb composite sandwich panel subjected to bending test.
- Optimization of parameters done with Minitab software and CCD.
- The optimal sample with highest bending force and bending modulus, and lowest weight introduced.

### GRAPHICAL ABSTRACT



### ARTICLE INFO

#### Article history:

Article Type: Research paper

Received: 28 December 2022

Received in revised form: 14 January 2023

Accepted: 25 February 2023

Available online: 16 March 2023

\*Correspondence: [barzegari@mut.ac.ir](mailto:barzegari@mut.ac.ir)

#### How to cite this article:

Z. Mollazadeh, M. M. Barzegari, M. R. Zamani, J. Eskandarijam. Optimization of effective parameters on the bending behavior of honeycomb sandwich panels using Response Surface Method. *Journal of Aerospace Mechanics*. 2023; 19(3):61-78.

#### Keywords:

Honeycomb sandwich structure  
Numerical simulation  
bending behavior  
Response surface method (RSM)  
Central composite design (CCD)

### ABSTRACT

The use of sandwich composite structures continues to be of interest due to its favorable mechanical properties and high strength-to-weight ratio in various applications such as aerospace, shipbuilding, and fuel cells. In this research, the bending behavior of sandwich structure with aluminum honeycomb core and glass-epoxy faces analyzed. The finite element modeling of the structure done under the three-point bending test and using Abaqus software, to investigate the bending behavior. In addition, the force-displacement diagram and maximum bending force, bending modulus and strength obtained. The parameters of face thickness, core thickness and cell size of the honeycomb core investigated as effective input parameters and the effect of these parameters on the bending behavior of the sandwich panel analyzed. To determine the tests and check these parameters on the structure, the Minitab software and response surface method used by using the central composite design. Finally, the optimal sample introduced. Results show that the sample with face thickness 0.4 mm, cell size 6 mm and core thickness 10 mm have the highest bending modulus and the least weight, and the sample with face thickness of 1.2 mm and cell size 6 mm. In addition, core thickness 20 mm has the highest critical bending load tolerance to the weight.



## بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر بر رفتار خمشی پانل ساندویچی لانه‌زنبوری به روش سطح پاسخ

زهرا ملازاده<sup>۱</sup>، محمدمهدی برزگری<sup>۲\*</sup>، محمدرضا زمانی<sup>۳</sup>، جعفر اسکندری جم<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، تهران، ایران

<sup>۲</sup> استادیار، پژوهشکده علوم و فناوری شمال، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، فریدونکنار، ایران

<sup>۳</sup> استادیار، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

<sup>۴</sup> استاد، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

### برجسته‌ها

- پانل ساندویچی کامپوزیتی لانه‌زنبوری تحت آزمون خمش قرار می‌گیرد.
- بهینه‌سازی پارامترها با نرم‌افزار مینی‌تب و روش مرکب مرکزی انجام می‌شود.
- نمونه بهینه با بیشترین نیرو و مدول خمشی و کمترین وزن معرفی می‌شود.

### مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۰۷

بازنگری: ۱۴۰۱/۱۰/۲۴

پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۰۶

ارائه برخط: ۱۴۰۱/۱۲/۲۵

\*نویسنده مسئول:

barzegari@mut.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

ساختار ساندویچی لانه‌زنبوری

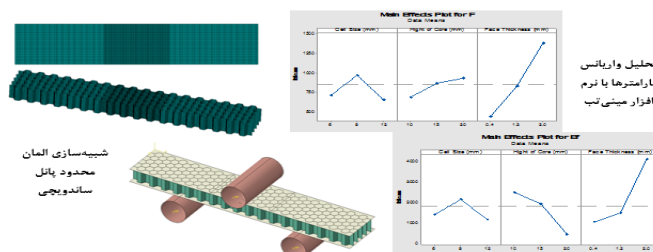
شبیه‌سازی عددی

رفتار خمشی

روش سطح پاسخ

طرح مرکب مرکزی

### چکیده گرافیکی



### چکیده

استفاده از ساختارهای کامپوزیتی ساندویچی به دلیل خواص مکانیکی مطلوب و نسبت استحکام به وزن بالا در کاربردهای مختلف مانند صنایع هوافضا، کشتی‌سازی و پیل‌های سوختی همچنان مورد توجه قرار دارد. در این پژوهش، رفتار خمشی ساختار ساندویچی با هسته لانه‌زنبوری آلومینیومی و رویه شیشه-اپوکسی مورد تحلیل قرار گرفته است. برای تحلیل رفتار خمشی، مدل‌سازی اجزای محدود سازه تحت آزمون خمش سه‌نقطه‌ای و با استفاده از نرم‌افزار آباکوس صورت گرفته و همچنین نمودار نیرو-جابجایی و مقادیر نیروی خمشی بیشینه، مدول و استحکام خمشی به‌دست آمده است. پارامترهای ضخامت رویه، ضخامت هسته و ابعاد سلول شش‌ضلعی هسته لانه‌زنبوری به عنوان پارامترهای ورودی مؤثر مورد بررسی قرار گرفته و اثر این پارامترها بر روی رفتار خمشی پانل ساندویچی تحلیل گردیده است. جهت تعیین آزمایش‌ها و بررسی این پارامترها بر رفتار خمشی سازه، از طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ و با استفاده از طرح مرکب مرکزی توسط نرم‌افزار مینی‌تب استفاده شده و در نهایت نمونه بهینه با بیشترین خواص مکانیکی خمشی و کمترین وزن معرفی شده است. با توجه به نتایج آزمایش‌ها می‌توان اظهار داشت نمونه با ضخامت رویه  $0.4 \text{ mm}$ ، اندازه سلول  $6 \text{ mm}$  و ضخامت هسته  $10 \text{ mm}$  دارای بیشترین مقدار مدول خمشی و حداقل وزن بوده و نمونه با ضخامت رویه  $1.2 \text{ mm}$ ، اندازه سلول  $6 \text{ mm}$  و ضخامت هسته  $20 \text{ mm}$  دارای بیشترین مقدار تحمل بار خمشی نسبت به وزن می‌باشد. همچنین، ضخامت رویه بیشترین تأثیر را بر رفتار خمشی سازه دارد.

## ۱- مقدمه

استفاده از ساختارهایی با نسبت استحکام به وزن بالا از مهم‌ترین مسائل موجود در صنایع است. سازه‌های ساندویچی نوعی از سازه‌های مرکب هستند که شامل دو صفحه نازک اما قوی با خواص مکانیکی زیاد و یک هسته ضعیف‌تر با چگالی کمتر اما ضخیم‌تر در بین رویه‌ها می‌باشد. این سازه‌ها مزایایی مانند نسبت سفتی خمشی بالا یا مقاومت خمشی بالا به وزن را ارائه می‌دهند. همچنین، به دلیل وزن مخصوص کم، استحکام و سختی بالا، به‌طور گسترده در سازه‌های پیشرفته مانند صنایع هوافضا، دریایی و حمل‌ونقل استفاده می‌شوند [۱].

تحقیقات زیادی در حوزه صفحات ساندویچی کامپوزیتی انجام شده است. یان و همکاران [۲] رفتار خمشی ساختار ساندویچی با هسته موجدار پر شده از فوم آلومینیوم را بررسی کرده‌اند. نتایج نشان داد پر کردن هسته با فوم منجر به افزایش قابل توجه استحکام خمشی و ظرفیت بار شکست اولیه و بیشینه می‌شود. وانگ و همکاران [۳] ساختار ساندویچی با رویه کامپوزیت تقویت شده با الیاف شیشه و هسته مشبک پر شده با فوم را مطالعه کرده‌اند. در این بررسی اثر ضخامت، ارتفاع و فاصله شبکه روی مود شکست، استحکام خمشی سازه بررسی شده است. نتایج تجربی افزایش تقریباً ۴۱۰ درصدی استحکام خمشی نهایی نسبت به سازه ساده به دلیل وجود هسته مشبک را نشان داده است. رحیمی و رحمانی [۴]، به بررسی عددی و تجربی رفتار خمشی سازه‌های ساندویچی با رویه‌های کامپوزیتی و هسته ترکیبی موجدار و فوم پرداخته‌اند. نتایج نشان داد که با استفاده از این هسته ترکیبی، سفتی خمشی و نسبت سفتی خمشی به وزن نسبت به حالت ساده به‌طور قابل‌مشاهده‌ای افزایش داشته است. سان و همکاران [۵] رفتار شکست و خردشدگی پانل ساندویچی لانه‌زنبوری آلومینیومی را تحت آزمون خمش سه‌نقطه‌ای و آزمون فشار محوری بررسی کرده‌اند. نتایج این مطالعه نشان داد که مد فروپاشی سازه‌های ساندویچی تحت تأثیر پارامترهای ساختاری در آزمون خمش سه‌نقطه‌ای قرار دارد. لی و وانگ [۶] رفتار خمشی ساختار ساندویچی کامپوزیتی با سه نوع

هسته خرپا، لانه‌زنبوری معمولی و لانه‌زنبوری خاص و نیز دو نوع کامپوزیتی تک جهته و بافته‌شده را بررسی کرده‌اند. نتایج نشان داد که ساختار خرپا بیشترین مقاومت و استحکام را داشته و ساختار لانه‌زنبوری خاص بیشترین جذب انرژی انحنای را در بین این سه نوع هسته دارد. حبیب‌نیا و همکاران [۷] صفحه انتهایی ساندویچی لانه‌زنبوری را در دو حالت با فوم و بدون فوم تحت آزمون‌های خمش و فشار بررسی کرده‌اند. نتایج نشان داد که استفاده از فوم در هسته لانه‌زنبوری منجر به کاهش وزن ورق‌ها می‌شود ولی استحکام خمشی را نیز کاهش می‌دهد. در نتیجه، نوع بدون فوم دارای استحکام خمشی بهتری می‌باشد. شیائو و همکاران [۸] رفتار خمشی سازه ساندویچی با هسته لانه‌زنبوری آلومینیومی و رویه کامپوزیت کربن را تحت آزمون خمش سه‌نقطه‌ای بررسی کرده و اثر ضخامت رویه، جهت الیاف کربن، ترتیب لایه‌گذاری و سرعت بارگذاری را مورد مطالعه قرار داده‌اند. سپس، نمونه با پارامترهای بهینه که دارای عملکرد خمشی و خردشدگی بهتری است، ارائه شد. وانگ و همکاران [۹] تأثیر ضخامت و چگالی هسته بر خواص ساختار ساندویچی با رویه الیاف کربن و هسته لانه‌زنبوری آلومینیومی را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتیجه شده است که با افزایش چگالی یا ضخامت هسته استحکام مواد بهبود می‌یابد، در حالی که چگالی و یا ضخامت متوسط، سختی خمشی را به حداکثر می‌رساند. سان و همکاران [۱۰] ساختار ساندویچی کامپوزیتی با سه نوع هسته خرپا مشبک متفاوت از نظر ساختاری را تحت آزمون خمش مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج نشان داد تغییر زاویه هیچ اثری روی مقاومت مکانیکی ساختار ساندویچی ندارد و همچنین، ساختار نوع اول دارای تحمل بار بیشتری نسبت به نوع دوم می‌باشد. دلیری و زین‌الدینی [۱۱] رفتار خمشی پانل ساندویچی از جنس کامپوزیت شیشه با هسته موج‌دار معمولی و جدید را بررسی کرده و تأثیر چیدمان (موج) هسته در جهت طولی یا عرضی بر خواص مکانیکی سازه ساندویچی و تأثیر دوره تناوب‌های مختلف را مورد مطالعه قرار داده‌اند. نتایج نشان داد که میزان جذب انرژی برای پانل‌های با هسته موج‌دار دوطرفه در جهت عرضی در مقایسه با هسته‌های معمولی افزایش یافته است.

توابع هدف تخمین زده‌شده و درنهایت حالت‌های بهینه به‌صورت آزمایشگاهی جوشکاری شده‌اند. میرزابابای مستوفی و همکاران [۱۸] به بررسی تجربی و تحلیل رگرسیونی پارامترهای مؤثر در فرآیند شکل‌دهی آزاد با انفجار مخلوط گازها پرداخته‌اند. در بخش تجربی از ورق‌های فولادی، آلومینیومی و برنجی در ضخامت‌های مختلف استفاده‌شده است. نتایج به‌دست‌آمده در بخش تحلیل رگرسیونی حاکی از آن است که مقادیر به‌دست‌آمده از پیش‌بینی مدل‌ها با داده‌های تجربی مطابقت خوبی دارد. شرایط بهینه برای کمترین تغییر شکل ورقه تحت بارگذاری انفجاری نیز ارائه شد. نصیری و همکاران [۱۹] پارامترهای مؤثر در فرآیند شکل‌دهی آزاد ورق تحت بارگذاری انفجاری زیرآب را بررسی و بهینه‌سازی کرده‌اند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که مدل ارائه‌شده توسط نرم‌افزار برای این آزمایش مناسب بوده و مقادیر به‌دست‌آمده از پیش‌بینی مدل با نتایج خروجی مطابقت دارد. همچنین، شرایط بهینه برای کمترین تغییر ضخامت و بیشترین میزان تغییر شکل دائمی ورق ارائه شد. وکیلی‌فرد و همکاران [۲۰] رفتار خمشی پانل ساندویچی با هسته موج‌دار را بررسی کرده و ساندویچ پانل بهینه با استفاده از الگوریتم ژنتیک معرفی کرده‌اند. نتایج نشان داد که پیکربندی بهینه‌شده می‌تواند مقاومت خمشی بالاتری را در همان وزن به دست آورد. درنهایت، یک ساندویچ پانل چندلایه ایزوتروپیک معرفی و بهینه‌سازی شده است.

در مطالعه حاضر رفتار خمشی ساختار ساندویچی با هسته لانه‌زنبوری با پارامترهای ساختاری متفاوت تحت آزمون خمش سه‌نقطه‌ای بررسی‌شده و تحلیل اجزای محدود انجام‌شده است. عوامل متعددی بر استحکام خمشی پانل ساندویچی با هسته لانه‌زنبوری تأثیرگذار هستند. در این پژوهش، اثر سه پارامتر ساختاری در نظر گرفته‌شده و این متغیرها هرکدام در سه سطح موردبررسی قرار گرفته‌اند. آزمایش‌ها با استفاده از روش سطح پاسخ و نرم‌افزار مینی‌تب مشخص شده‌اند. نمودار نیرو-جاب‌جایی، مقادیر حداکثر نیرو، مدول و مقاومت خمشی به‌دست‌آمده است. علاوه بر این، نسبت مدول خمشی و نیروی خمشی بیشینه قابل‌تحمل توسط سازه (نیروی بحرانی) به وزن نمونه‌های ساندویچی

آناندان و همکاران [۱۲] به بررسی رفتار شکست یک ساختار ساندویچی لانه‌زنبوری با رویه کربن-اپوکسی و هسته آلومینیومی پرداخته‌اند. شروع و انتشار شکست توسط مدل توسعه‌یافته شبیه‌سازی‌شده و همچنین، تأثیر افزایش دمای آزمایش مورد مطالعه قرار گرفته است. صدیق و همکاران [۱۳] رفتار شکست و ضربه‌پذیری سازه ساندویچی لانه‌زنبوری تحت بار خمشی در هواپیما را بررسی کردند. در این مقاله معیارهای شکست سازه ساندویچی بر اساس یک نقشه حالت شکست برای بارگذاری تحت خمش سه‌نقطه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفت. با بهینه‌سازی پارامترهای ساختاری حالت بهینه برای حداکثر بار خمشی، حداقل خیز و حداکثر جذب انرژی سازه ارائه شد. فنگ و همکاران [۱۴] طراحی حالت بهینه یک صفحه لانه‌زنبوری بر اساس الگوریتم ژنتیک پرداخته‌اند. آن‌ها یک روش بهینه‌سازی چندهدفه بر اساس فرکانس و سختی طبیعی باهدف کاهش وزن ارائه‌شده است. با استفاده از این روش و تنظیم پارامترهای سازه می‌توان جرم سازه را کاهش داد درحالی‌که مدول برشی و مدول الاستیک هر دو به‌وضوح افزایش می‌یابند. مرادی و همکاران [۱۵] به بررسی تأثیر پارامترهای مؤثر بر فرآیند ایکپ آلیاژ آلومینیوم پرداخته‌اند. طراحی آزمایش‌ها بر اساس روش سطح پاسخ انجام‌شده است. مشخص شد که پارامترهای زوایای کانال قالب و ضریب اصطکاک بین میله و قالب بر روی تمامی پاسخ‌ها تأثیری زیادی داشته و مقادیر بهینه این فرآیند باهدف دستیابی به میزان حداکثر استحکام و حداقل گشتاور به دست آمد. ظهور و موسوی [۱۶] پارامترهای مؤثر بر عمق کشش در فرآیند شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی را با روش طراحی آزمایش بررسی کرده‌اند. مدل‌سازی و بهینه‌سازی به روش سطح پاسخ گرفته است. نتایج نشان داد بیشترین عمق کشش وقتی به دست می‌آید که انرژی تخلیه بیشینه باشد. همچنین برای طول و قطر سیم بین الکترودها، یک مقدار بهینه وجود دارد که با توجه به شرایط آزمایش تعیین می‌شوند. کحال و همکاران [۱۷] به بهینه‌سازی خواص مکانیکی در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم با استفاده از روش سطح پاسخ و بهینه‌سازی چند هدفه ازدحام ذره پرداخته‌اند. با استفاده از داده‌های موجود و روش سطح پاسخ رابطه بین متغیرها و

سرعت عمودی جابجایی فک بالایی حین انجام آزمایش ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه بوده است. در این پانل ساندویچی، هسته از جنس آلومینیوم سری ۱۰۰۰ و رویه‌ها از جنس کامپوزیت شیشه زمینه اپوکسی می‌باشند. در جدول ۱ و ۲ خواص مکانیکی هسته آلومینیومی و کامپوزیت شیشه اپوکسی مستخرج از آزمون تجربی آزمایشگاه مرکز تحقیقات کامپوزیت دانشگاه مالک اشتر ارائه داده شده است. عوامل متعددی بر استحکام خمشی پانل ساندویچی با هسته لانه‌زنبوری تأثیرگذار هستند. در این پژوهش، اثر سه متغیر ساختاری در نظر گرفته شده و هرکدام از این متغیرها در سه سطح مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این سطوح پس از بررسی ابعاد و ضخامت‌های موجود در بازار و نمونه‌های ساخته شده در نظر گرفته شده‌اند.

**جدول (۱):** خواص مکانیکی هسته آلومینیومی سری ۱۰۰۰.

خواص	مقادیر
چگالی $\rho$	۲۷۱۰ kg/m <sup>3</sup>
مدول یانگ E	۷۵ GPa
ضریب پواسون U	۰/۲۳
استحکام تسلیم	۱۰۵ MPa

**جدول (۲):** خواص مکانیکی رویه کامپوزیت شیشه-اپوکسی.

خواص	مقادیر
چگالی $\rho$	۱/۸ kg/m <sup>3</sup>
مدول یانگ در راستای طولی (راستای الیاف) E <sub>1</sub>	۲۲ GPa
مدول یانگ در راستای عرضی (راستای عمود بر الیاف) E <sub>2</sub>	۶/۵ GPa
ضریب پواسون U	۰/۲۷
مدول برشی G <sub>12</sub> , G <sub>13</sub>	۴/۸ GPa
مدول برشی G <sub>23</sub>	۴/۴ GPa
استحکام کششی محوری (X <sub>t</sub> )	۷۰۰ MPa
استحکام فشاری محوری (Y <sub>t</sub> )	۱۵۰ MPa
استحکام کششی عرضی (X <sub>c</sub> )	۴۰۰ MPa
استحکام کششی عرضی (X <sub>c</sub> )	۲۰۰ MPa
استحکام فشاری عرضی (Y <sub>c</sub> )	۱۸۰ MPa

نیز محاسبه شده است. با مرور مطالعات پیشین این نتیجه حاصل شد که تاکنون تحقیق جامعی در مورد بررسی تأثیر پارامترهای ساختاری بر رفتار خمشی پانل ساندویچی با رویه کامپوزیت شیشه اپوکسی و تعیین سطوح بهینه برای پارامترهای ورودی باهدف دستیابی به سازه با کمترین وزن ممکن و بیشترین مدول خمشی یا بیشترین میزان تحمل بار خمشی صورت گرفته است. بدین جهت با توجه به اهمیت مسئله سبک‌سازی در صنایع انجام تحقیق بر روی این موضوع می‌تواند حائز اهمیت باشد. ادامه پژوهش به شرح زیر ارائه شده است: بخش ۲ مواد و روش پژوهش را معرفی می‌کند. در بخش ۳ مدل اجزای محدود پانل ساندویچی تحت آزمون خمش با استفاده از نرم‌افزار آباکوس شرح داده شده است. نتایج شبیه‌سازی در بخش ۴ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. در بخش ۵ با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب و روش سطح پاسخ تأثیر پارامترها بر رفتار خمشی سازه ساندویچی بررسی شده و نمونه بهینه با خواص مکانیکی بیشینه و وزن کمینه معرفی شده است. در نهایت، مقاله در بخش ۶ نتیجه‌گیری می‌شود.

## ۲- روش پژوهش و مواد اولیه

صفحات موردنظر در این پژوهش برای استفاده در صفحات انتهایی پیل سوختی دارای ساختار ساندویچی با هسته لانه‌زنبوری هستند. لازمه به دست آوردن استحکام سازه ساندویچی ایجاد یک مدل عددی مبتنی بر آزمون‌های استاندارد برای ایجاد قابلیت مقایسه منطقی می‌باشد و چون در آزمون‌های تجربی نمونه ساندویچی به صورت تیر مدل شده است، لذا مدل‌سازی عددی سازه این پژوهش نیز بر این مبنا و به صورت تیر تحت آزمون خمش سه‌نقطه‌ای تعریف شده است.

### ۲-۱- آزمون خمش سه‌نقطه‌ای

هندسه نمونه‌های مورد آزمایش مطابق استاندارد ASTM C393-00 به صورت مستطیلی با طول و عرض ۲۲۰ و ۴۰ میلی‌متر تعیین شده است. قطر فک دستگاه آزمون خمش ۲۰ میلی‌متر، فاصله فک‌های پایینی ۱۲۰ میلی‌متر و فک بالایی در وسط فک‌های پایینی قرار دارد. همچنین،

جدول (۳): متغیرهای مورد بررسی.

ردیف	متغیرها	واحد	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
۱	ابعاد سلول لانه‌زنبوری (A)	mm	۶	۹	۱۲
۲	ضخامت هسته لانه‌زنبوری (B)	mm	۱۰	۱۵	۲۰
۳	ضخامت رویه (C)	mm	۰/۴	۱/۲	۲

### ۲-۲- استحکام و مدول خمشی

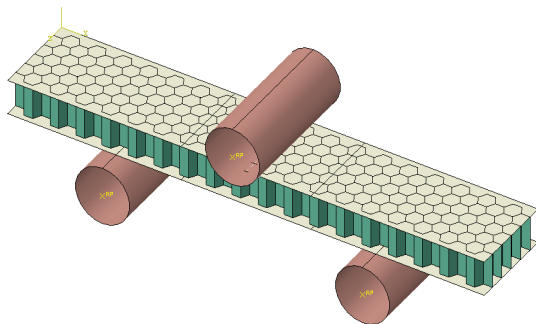
سفتی خمشی یا مدول خمشی در یک سازه نشان‌گر میزان تمایل سازه برای مقاومت در برابر خم شدن می‌باشد. با به دست آوردن بیشترین مقدار جابجایی متناظر با بار وارد شده که به‌طور دقیق در محل اعمال بارگذاری رخ می‌دهد، مدول خمشی با استفاده از رابطه زیر مطابق استاندارد به دست می‌آید. برای خمش سه‌نقطه‌ای تیرهای مقطع مستطیلی، مدول خمشی و استحکام خمشی مطابق استاندارد از رابطه (۱) و (۲) به دست می‌آید.

پارامترهای متغیر ساندویچ پانل شامل ضخامت رویه و ضخامت هسته و ابعاد سلول شش‌ضلعی لانه‌زنبوری می‌باشند که می‌توان آن‌ها را به ترتیب با علائم (Tf)، (Hc) و (Lc) خلاصه کرد. این پارامترها در جدول ۳ ارائه شده‌اند؛ بنابراین، هر نمونه از پانل‌های ساندویچی را طبق این کدهای تعریف شده نام‌گذاری می‌کنیم تا از یکدیگر تمیز داده شوند. یک نمونه از نحوه نام‌گذاری پانل‌های ساندویچی GE-115-L9-F1/2 می‌باشد. برای این نمونه، GE نشان‌دهنده جنس رویه کامپوزیت شیشه، H نشان‌دهنده ارتفاع هسته لانه‌زنبوری برابر 15 mm، L نشان‌دهنده ابعاد سلول لانه‌زنبوری برابر 9 mm و F نشان‌دهنده ضخامت رویه برابر 1/2 mm می‌باشد. تمام متغیرهای دخیل در آزمایش‌ها مشخص شده و در نهایت آزمایش‌هایی که نتایج آن‌ها تأثیر قابل‌توجهی بر خروجی ندارند حذف شده‌اند. به این ترتیب، تعداد و هزینه انجام آزمایش‌ها کاهش می‌یابد. مشخصات نمونه‌های بررسی شده در جدول ۴ ارائه شده است. در این جدول R<sub>1</sub> مدول خمشی و R<sub>2</sub> نیروی خمشی بیشینه به‌عنوان پاسخ‌های بررسی شده می‌باشند.

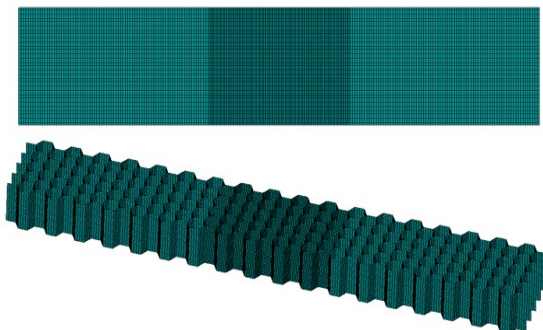
جدول (۴): نتایج طراحی آزمایش و پاسخ هر آزمایش.

شماره	A (mm)	B (mm)	C (mm)	R <sub>1</sub> (MPa)	R <sub>2</sub> (N)
۱	۶	۱۰	۰/۴	۲۸۵۳	۳۸۲/۷
۲	۹	۲۰	۱/۲	۴۳۳/۸	۹۳۴/۵
۳	۹	۱۵	۱/۲	۱۵۵۶/۸	۸۷۳/۳
۴	۶	۱۵	۱/۲	۱۶۰۰/۹	۸۹۵/۹
۵	۹	۱۵	۲	۴۱۰۵/۷	۱۳۸۲/۵
۶	۹	۱۰	۱/۲	۲۵۰۱/۶	۶۸۸
۷	۶	۲۰	۲	۵۸۶۸	۱۶۴۰
۸	۶	۱۰	۲	۵۹۷۱	۱۳۲۰/۲
۹	۶	۲۰	۰/۴	۷۴۴/۶	۶۸۲
۱۰	۱۲	۱۵	۱/۲	۱۱۶۶/۵	۶۵۴/۴
۱۱	۱۲	۱۰	۲	۴۵۷۸/۲	۱۰۱۲/۶
۱۲	۹	۱۵	۰/۴	۱۰۴۱	۴۴۰
۱۳	۱۲	۲۰	۲	۸۵۵/۹	۱۲۶۰/۴
۱۴	۱۲	۱۰	۰/۴	۲۲۲۱/۶	۲۹۸
۱۵	۱۲	۲۰	۰/۴	۳۲۵	۲۹۸/۷

پایینی دستگاه خمش بسته شده و برای تکیه‌گاه بالایی جابجایی در جهت حرکت به سمت پایین اختصاص داده می‌شود. سرعت عمودی جابجایی فک بالایی حین انجام آزمایش ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه بوده است. در تعریف خصوصیات تماس از روش پنالتی استفاده شده و ضریب اصطکاک بین تمام اجزا ۰/۳ فرض شده است. اندرکنش تعریف شده بین اجزا نیز به صورت surface-to-surface بوده و همچنین، برای اتصال بین هسته و پوسته‌ها از قید گر (Tie) استفاده شده است. برای شبکه‌بندی نمونه، با توجه به تمرکز تنش در محل اعمال بار، اجزا در این محل بیشتر و ریزتر شده‌اند. از اندازه ۰/۵ میلی‌متر برای وسط پانل و ۱ میلی‌متر برای بقیه قسمت‌ها استفاده شده است. همچنین، المان به کاررفته از نوع چهارضلعی (Quad) چهار گرهی (4SR) تعیین شده است. در شکل ۱ و ۲ مدل مونتاژ شده نمونه تحت آزمون خمش و مدل مش‌بندی شده رویه و هسته لانه‌زنبوری نشان داده شده است.



شکل (۱): مدل المان مونتاژ شده پانل ساندویچی تحت آزمون خمش سه‌نقطه‌ای.



شکل (۲): مدل اجزای محدود رویه و هسته لانه‌زنبوری.

$$E_B = \frac{L^3 m}{4bd^3} \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (2)$$

که در این رابطه  $E_B$  مدول خمشی،  $\sigma$  استحکام خمشی،  $L$  فاصله بین دو تکیه‌گاه،  $b$  عرض نمونه،  $d$  ضخامت کل پانل ساندویچی،  $P$  نیرو ماکزیمم و  $m$  شیب خط مماس بر قسمت خطی نمودار نیرو-جابجایی می‌باشد. با محاسبه شیب خطی نمودار نیرو-جابجایی هر یک از نمونه‌ها از نمودارها و قرار دادن در روابط بالا، مدول خمشی هر نمونه محاسبه شده است. همچنین،  $m$  از رابطه ۳ به دست می‌آید.

$$m = \frac{F}{d} \quad (3)$$

در این رابطه  $F$  نیرو ماکزیمم یا بیشترین نیرویی است که سازه کامپوزیتی تا قبل از اولین افت نیرو می‌تواند تحمل کند و  $d$  جابه‌جایی وسط نمونه می‌باشد.

### ۳- تحلیل عددی

نمونه ساندویچی به روش اجزای محدود و با استفاده از نرم‌افزار آباکوس تحت آزمون خمش سه‌نقطه‌ای قرار گرفته است. اولین مرحله در تحلیل مدل‌ها ایجاد مدل هندسی در نرم‌افزار اجزای محدود می‌باشد. در این پژوهش، برای مدل‌سازی سازه ساندویچی از روش مدل‌سازی با المان پوسته (shell) استفاده شده است. پس از مدل‌سازی هندسی، خصوصیات مکانیکی قطعات به آن‌ها نسبت داده شده است.

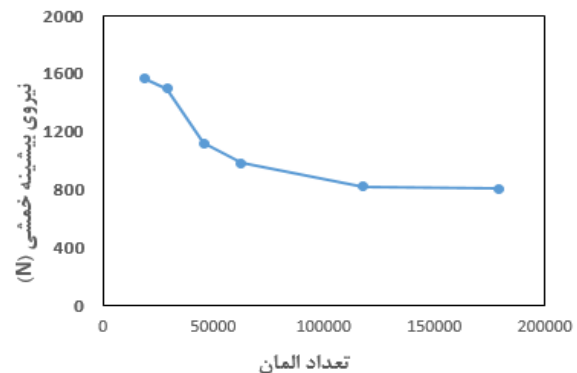
در این تحلیل به علت استفاده از المان پوسته و جنس کامپوزیت برای رویه، از معیار شکست هاشین جهت تخمین آسیب الیاف و زمینه استفاده شده است. با توجه به اعمال بارگذاری با یک سرعت ثابت و نیز شبه استاتیک بودن آن، از گام دینامیک به روش صریح (dynamic/explicit) برای این تحلیل استفاده شده است. شرایط مرزی برای شبه‌سازی، بارگذاری خمش سه‌نقطه‌ای معرفی شده‌اند. تنها شرط مرزی تعریف شده برای قطعه عبارت از اندرکنش‌های تماسی بین پانل ساندویچی و فک‌های دستگاه می‌باشد. در نتیجه، شرایط مرزی برای تکیه‌گاه‌های دستگاه به این صورت تعریف شده که تمام درجات آزادی تکیه‌گاه‌های

#### ۴- نتایج و بحث

در این بخش ابتدا مدل محاسباتی بررسی می‌شود. سپس، برای مشاهده تأثیر هر پارامتر به صورت مجزا بر رفتار خمشی و بدون در نظر گرفتن تغییرات پارامترهای دیگر نتایج عددی ارائه شده است. در نهایت، نمونه بهینه با نرم‌افزار مینی‌تب معرفی می‌شود.

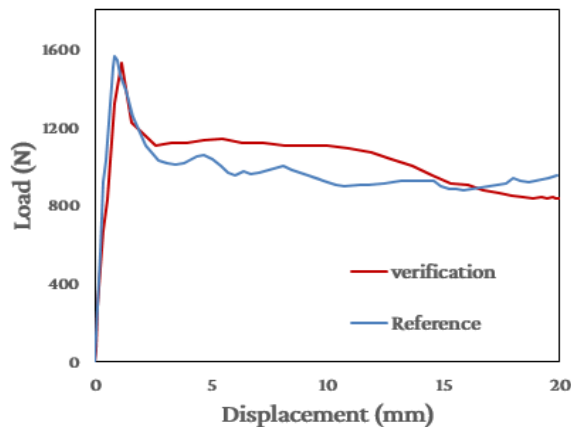
#### ۴-۱- همگرایی مدل محاسباتی

به منظور دستیابی به بهترین نتایج حل عددی مسئله و اندازه‌گیری مناسب و برای رسیدن به تعداد مطلوب المان‌ها، ریز کردن المان‌ها تا جایی ادامه پیدا کرده که دیگر با افزایش تعداد المان‌ها تغییر محسوسی در نتایج به دست آمده ایجاد نشده است. همچنین، نیروی خمشی بیشینه به عنوان معیار همگرایی حل در نظر گرفته شده است. در شکل ۳ نمودار همگرایی حل برای تعداد المان‌ها آورده شده است. همان‌طور که در نمودار همگرایی مشاهده می‌شود، تعداد بهینه المان‌ها برای سازه ساندویچی ۱۱۸۶۰۰ بوده که شامل ۷۳۸۰۰ المان برای هسته لانه‌زنبوری و ۴۴۸۰۰ المان برای دو رویه سازه ساندویچی می‌باشد.



شکل (۳): نمودار بررسی استقلال از شبکه.

فویل هسته ۰/۰۷ میلی‌متر و ضخامت رویه ۱/۵ میلی‌متر مورد مطالعه قرار گرفت. در شکل ۴ نتایج حاصل از آزمون تجربی خمش سه نقطه این نمونه ساندویچی با نتایج روش ارائه شده در این پژوهش مقایسه شده است. در این شبیه‌سازی از گام dynamic/explicit و برای مدل‌سازی هندسی از المان پوسته استفاده شده است. همچنین، برای شبکه‌بندی، نمونه المان چهار گرهی چهارضلعی برای رویه و هسته و با اندازه مش ۰/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی این شبیه‌سازی، شرایط مرزی آزمون خمش سه نقطه‌ای بوده که تمام درجات آزادی تکیه‌گاه‌های پایینی دستگاه خمش بسته شده و برای تکیه‌گاه بالایی جابجایی در جهت حرکت به سمت پایین و با سرعت ۰/۴ میلی‌متر بر دقیقه اختصاص داده شده است. در نهایت، خطای محاسبه شده ۲/۱ درصد بوده که نشان‌دهنده مطابقت مطلوب آن با نتایج مرجع ذکر شده می‌باشد.



شکل (۴): اعتبارسنجی پژوهش حاضر با مقاله سان و همکاران.

#### ۴-۳- نتایج تحلیل عددی بررسی اثر ضخامت رویه بر رفتار خمشی پانل ساندویچی

برای بررسی اثر ضخامت رویه بر رفتار خمشی ساندویچ پانل لانه‌زنبوری، سه پانل ساندویچی با ضخامت رویه‌های ۰/۴، ۱/۲ و ۲ میلی‌متر تحت آزمون خمش سه نقطه قرار گرفته و نتایج حاصل شده از تحلیل عددی این سه نمونه با هم مقایسه می‌شوند. این نمونه‌ها از هر لحاظ به غیر از ضخامت رویه مشابه یکدیگر بوده و دارای شرایط یکسان می‌باشند.

#### ۴-۲- اعتبارسنجی شبیه‌سازی اجزای محدود

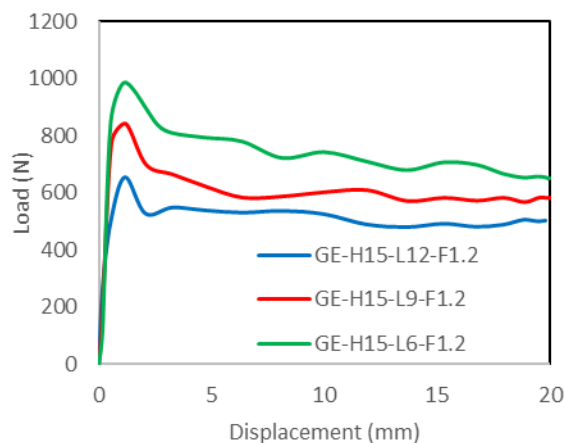
برای اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود، نتایج ارائه شده در پژوهش‌های پیشین با نتایج به دست آمده از این پژوهش مورد مقایسه قرار گرفت. در پژوهش انجام شده توسط سان و همکاران [۵]، یک نمونه پانل ساندویچی لانه‌زنبوری با رویه و هسته آلومینیومی با مشخصات ضخامت



ضخامت رویه کامپوزیتی پانل ساندویچی، نیروی بیشینه، استحکام و مدول خمشی به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد.

#### ۴-۴- نتایج تحلیل عددی بررسی اثر اندازه سلول هسته لانه زنبوری بر رفتار خمشی پانل ساندویچی

اندازه سلول شش ضلعی یکی دیگر از پارامترهای مهمی است که بر روی خواص مکانیکی ساختارهای لانه زنبوری تأثیرگذار است. برای بررسی اثر اندازه سلول، آزمون خمش سه نقطه‌ای بر روی سه نمونه پانل ساندویچی با اندازه سلول‌های مختلف ۶، ۹ و ۱۲ میلی‌متر انجام شده است. لازم به ذکر است در این بررسی شرایط آزمون یکسان بوده و پارامترهای دیگر نیز ثابت در نظر گرفته شده‌اند. در شکل ۶ نمودارهای نیرو-جابجایی برای نمونه‌های GE-H15-L9-F1/2، GE-H15-L6-F1/2 و GE-H15-L12-F1/2 نشان داده شده است.



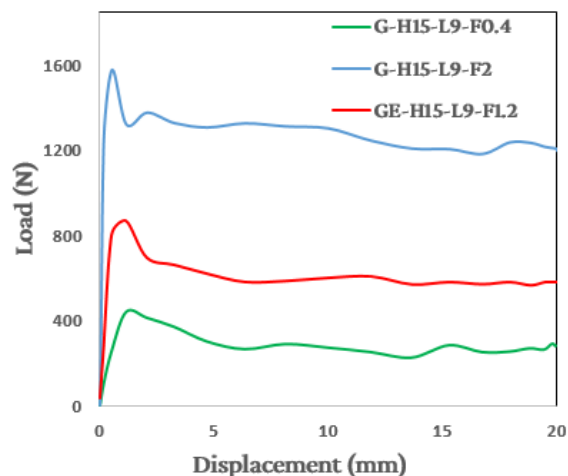
شکل (۶): نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه‌های

GE-H15-L9-F1/2، GE-H15-L6-F1/2

و GE-H15-L12-F1/2 تحت خمش سه نقطه‌ای در آباکوس.

مشاهده می‌شود که این نمودارها با وجود سطوح متفاوت از الگوی نسبتاً مشابهی پیروی می‌کنند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش اندازه سلول، نیروی بیشینه، مدول و استحکام خمشی به طور پیوسته کاهش یافته است. نتایج مربوط به شبیه‌سازی هر یک از نمونه‌ها در جدول ۶ ارائه شده است.

نمودارهای نیرو-جابجایی در شکل ۵ نشان داده شده است. همچنین، نتایج مربوط به هر یک از نمونه‌ها در جدول ۵ ارائه شده است.



شکل (۵): نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه‌های

GE-H15-L9-F1/2، GE-H15-L9-F0/4

و GE-H15-L9-F2 تحت خمش سه نقطه‌ای در آباکوس.

همان‌طور که مشاهده می‌شود نیروی خمشی برای نمونه‌های GE-H15-L9-F0/4، GE-H15-L9-F1/2 و GE-H15-L9-F2 به ترتیب برابر ۰/۱، ۴۴۰/۳۱ و ۱۳۸۲/۵۹ می‌باشد. در سازه‌های ساندویچی رویه‌ها نقش اصلی در استحکام خمشی را دارند؛ بنابراین، با افزایش ضخامت رویه، استحکام خمشی و نیروی خمشی قابل تحمل توسط آن به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. با اضافه شدن ۴ لایه به رویه با ضخامت ۰/۴ وزن سازه ۱۲۵ درصد افزایش یافته در حالی که مدول خمشی و استحکام خمشی تنها ۵۰ و ۳ درصد افزایش داشته است. همچنین، با اضافه شدن ۸ لایه به نمونه اول مدول خمشی چهار برابر و استحکام خمشی بیش از دو برابر شده است. سازه با ضخامت ۰/۴ با توجه به در نظر گرفته وزن و ضخامت کلی سازه مدول خمشی مطلوب‌تری داشته و سازه با ضخامت رویه ۲ گزینه مناسبی نمی‌باشد.

به منظور حذف اثر وزن و مقایسه بهتر رفتار خمشی نمونه‌ها، بار بیشینه مخصوص (بار نسبت به وزن) و مدول خمشی مخصوص (مدول نسبت به وزن) برای هر یک از نمونه‌ها نیز ارائه گردیده است. در نهایت، می‌توان گفت که با افزایش

#### ۴-۵- نتایج تحلیل عددی بررسی اثر ارتفاع هسته لانه‌زنبوری بر رفتار خمشی پانل ساندویچی

برای بررسی تأثیر ارتفاع هسته لانه‌زنبوری بر خواص خمشی پانل ساندویچی، سه نمونه با ارتفاع هسته‌های مختلف ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی‌متر مورد آزمایش قرار گرفته است. در این بررسی نیز شرایط آزمون یکسان بوده و پارامترهای دیگر ثابت در نظر گرفته شده‌اند. نمودار نیرو-جابجایی این سه نمونه در شکل ۷ و نتایج این بررسی در جدول ۷ نشان داده شده است. با جنس رویه، ضخامت رویه و اندازه سلول یکسان، نیروی بیشینه همراه با افزایش ارتفاع هسته لانه‌زنبوری افزایش می‌یابد. ولی مدول خمشی با در نظر گرفتن افزایش قابل توجه ضخامت کل پانل، کاهش می‌یابد. افزایش نیروی خمشی بیشینه قابل تحمل توسط سازه یا نیروی بحرانی به این دلیل است که گشتاور دوم سطح تیر ساندویچی تا حد زیادی تحت تأثیر ارتفاع هسته قرار دارد.

نمونه با اندازه سلول ۶ نسبت به نمونه با اندازه سلول ۱۲ افزایش وزن ۸ درصدی داشته در حالی که مدول و استحکام آن ۵۰ درصد افزایش یافته است. در نتیجه، با توجه به افزایش وزن ناچیز، استفاده از نمونه با اندازه سلول ریزتر باعث بهبود رفتار خمشی سازه ساندویچی لانه‌زنبوری شده و گزینه مناسبی برای صنایع می‌باشد.

هسته نسبت زیادی از ابعاد ساختار ساندویچی را به خود اختصاص می‌دهد. با کاهش اندازه سلول هسته تعداد سلول‌ها افزایش پیدا می‌کند؛ بنابراین، نیرو بین سلول‌ها تقسیم شده، تنش در هسته کاهش یافته و به‌طور کلی استحکام سازه افزایش می‌یابد. همچنین، لازم به ذکر است که خواص مکانیکی هسته تا حد زیادی تابع ابعاد و هندسه آن می‌باشد و با کاهش ابعاد و اندازه‌های هسته شش‌ضلعی خصوصیات مکانیکی آن افزایش می‌یابد؛ بنابراین، قابل پیش‌بینی است که با ریزتر شدن اندازه شش‌ضلعی‌های هسته، استحکام سازه افزایش یابد.

جدول (۵): نتایج عددی نمونه‌های ساندویچی با ضخامت رویه متفاوت تحت آزمون خمش سه‌نقطه‌ای.

GE- H15 - L9 - F2	GE- H15 - L9 - F1/2	GE- H15 - L9 - F0/4	
۱۳۸۲/۵	۸۷۳/۳	۴۴۰/۰۱	بار بیشینه (N)
۷۱	۴۵/۶	۲۰/۳	جرم نمونه (g)
۱۷/۲۳	۱۲/۹	۷/۹	استحکام خمشی (MPa)
۴۱۰۵/۷	۱۵۵۶/۸	۱۰۴۱/۶	مدول خمشی (MPa)
۱۹/۴	۱۹/۱	۲۱/۶	بار بیشینه مخصوص (N/g)
۵۷/۸	۳۴/۱	۵۱/۳	مدول خمشی مخصوص (MPa/g)

جدول (۶): نتایج عددی نمونه‌های ساندویچی با هسته دارای اندازه سلول متفاوت تحت آزمون خمش سه‌نقطه‌ای.

GE- H15 - L12 - F1/2	GE- H15 - L9 - F1/2	GE- H15 - L6 - F1/2	
۶۵۴/۴	۸۷۳/۳	۹۸۷/۶	بار بیشینه (N)
۴۳/۵	۴۵/۶	۴۷/۱	جرم نمونه (g)
۹/۷	۱۲/۹	۱۴/۶	استحکام خمشی (MPa)
۱۱۶۶/۵	۱۵۵۶/۸	۱۷۶۰/۷	مدول خمشی (MPa)
۱۵/۰۴	۱۹/۱	۲۰/۹	بار بیشینه مخصوص (N/g)
۲۶/۸	۳۴/۱	۳۷/۳	مدول خمشی مخصوص (MPa/g)

جدول (۷): نتایج عددی نمونه‌های ساندویچی با ارتفاع هسته متفاوت تحت آزمون خمش سه نقطه‌ای.

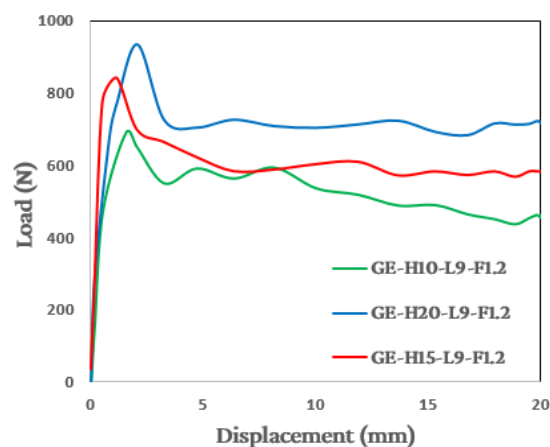
GE-H20-L9-F1/2	GE-H15-L9-F1/2	GE-H10-L9-F1/2	
۹۳۴/۵	۸۷۳/۳	۶۸۸/۰۷	بار بیشینه (N)
۴۸/۱	۴۵/۶	۴۳/۱	جرم نمونه (g)
۸/۳	۱۲/۹	۲۰/۱	استحکام خمشی (MPa)
۴۳۳/۸	۱۵۵۶/۸	۲۵۰۱/۶	مدول خمشی (MPa)
۱۹/۴	۱۹/۱	۱۵/۹۶	بار بیشینه مخصوص (N/g)
۹/۰۱	۳۴/۱	۵۸/۰۴	مدول خمشی مخصوص (MPa/g)

نمونه‌های GE-H10-L9-F1/2 و GE-H15-L12-F1/2 دارای بیشترین مدول خمشی نسبت به وزن و نیروی خمشی بیشینه نسبت به وزن می‌باشند. به دلیل تأثیر ضخامت کلی پانل ساندویچی بر پارامتر استحکام و مدول خمشی، نمونه‌ها چنین رفتاری را نشان دادند و نمونه با کمترین ضخامت هسته دارای بیشتری مدول خمشی و استحکام می‌باشد.

#### ۵- معرفی نمونه بهینه لانه‌زنبوری با روش سطح پاسخ و نرم‌افزار مینی‌تب

طراحی آزمایش یکی از مفیدترین ابزارها برای مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل تأثیر پارامترهای مختلف بر روی نتایج آزمایش است. همان‌طور که گفته شد در این پژوهش از نرم‌افزار مینی‌تب برای طراحی آزمایش بر اساس روش سطح پاسخ استفاده شده است. همچنین، به منظور دستیابی به شرایط بهینه مدل‌های تحلیل شده، از تحلیل واریانس ANOVA برای فرآیند بهینه‌سازی استفاده شده است [۲۱].

تمامی فاکتورها یا سطوح پاسخ شامل ارتفاع هسته، ضخامت رویه و اندازه سلول مورد بررسی قرار گرفتند. هرکدام از این پارامترها دارای سه سطح پاسخ می‌باشند. میزان بار خمشی بحرانی به‌عنوان سطح پاسخ اول با در نظر گرفتن شرایط بیشینه و وزن ماده به‌عنوان سطح پاسخ دوم با شرایط کمینه برای نرم‌افزار معرفی شدند. سپس، تحلیل آماری روی داده‌ها انجام شد. با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب، نمودار میانگین اثر و نمودار کانتور بار خمشی بحرانی برای پارامترهای مورد بررسی ترسیم شده است.



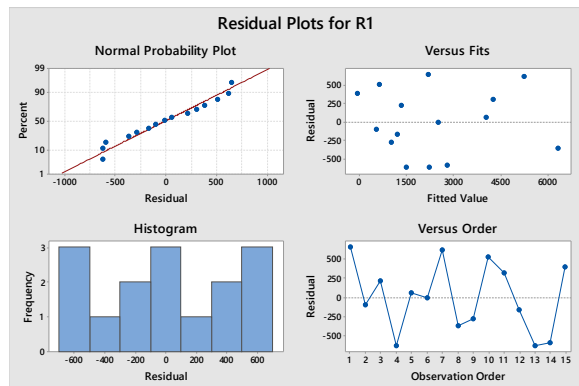
شکل (۷): نمودار نیرو-جاب‌جایی برای نمونه‌های GE-H15-L9-F1/2 و GE-H10-L9-F1/2

و GE-H20-L9-F1/2 تحت خمش سه نقطه‌ای در آباکوس.

از نظر تئوری می‌توان گفت که تغییر در مقطع عرضی تیر بر روی تنش وارد بر رویه تأثیرگذار است. در واقع، تنش بحرانی رویه تیر با ارتفاع هسته ۱۰ میلی‌متر بیشتر از تنش بحرانی وارد بر رویه تیر با هسته ۱۵ و ۲۰ میلی‌متر می‌باشد. بنابراین، برای پانل ساندویچی با ارتفاع هسته بیشتر، نیروی منجر به کماتش و شکست سازه بیشتر است. ولی به دلیل به افزایش ضخامت پانل ساندویچی، مدول و استحکام خمشی هر دو کاهش می‌یابند. در ادامه برای این نمونه‌های بررسی شده، سه پارامتر استحکام، مدول و نیروی بیشینه خمشی نسبت به وزن به صورت مجزا و در قالب نمودارهای میله‌ای به ترتیب در شکل ۸، شکل ۹ و شکل ۱۰ نمایش داده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، نمونه GE-H10-L9-F1/2 بیشترین استحکام نسبت به وزن را دارد. همچنین،

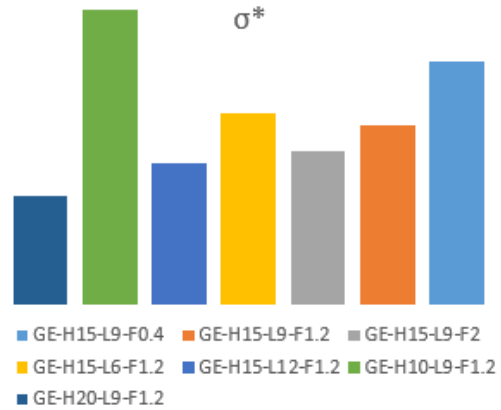
بحث نرمال بودن داده‌ها یا مقادیر باقیمانده می‌باشد که با استفاده از نمودار نرمال پلات، فرض نرمال بودن بررسی می‌شود. فرض دوم، فرض ثابت بودن واریانس‌ها است که از شکل پایین نمودارهای باقیمانده استفاده می‌شود. اگر تغییرات باقیمانده از روند خاصی پیروی نکنند و روندی کاملاً تصادفی داشته باشند می‌تواند نشان از عدم وجود اختلال در مجموعه باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود داده‌ها از روند خاصی پیروی نمی‌کنند و می‌توان گفت که تقریباً واریانس داده‌ها ثابت می‌باشد. سومین فرض برای کفایت مدل، هیستوگرام مربوط به فراوانی در مقابل باقیمانده‌ها می‌باشد که شکل زنگوله‌ای آن نرمال بودن داده‌ها را اثبات می‌کند. چهارمین فرض برای کفایت مدل، فرض استقلال داده‌ها نسبت به زمان است؛ که از شکل زیر نمودار باقیمانده استفاده می‌شود. همان‌گونه که در تصویر مشاهده می‌شود، در محور افقی ترتیب ۱۵ آزمایش تصادفی برای سه فاکتور مشخص است. نقاط این نمودار روند خاصی را نشان نمی‌دهد. پس می‌توان اظهار نمود که داده‌ها نسبت به زمان مستقل هستند.



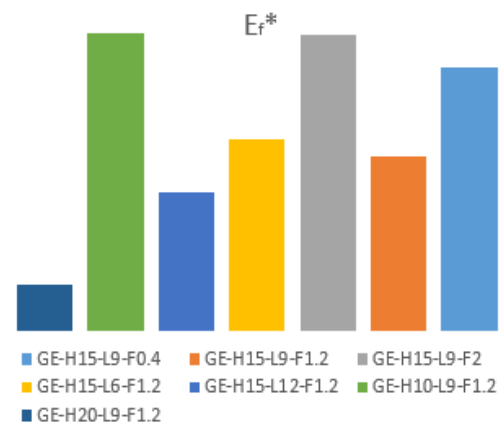
شکل (۱۱): نمودارهای صحت‌سنجی تحلیل واریانس.

## ۵-۲- تحلیل واریانس

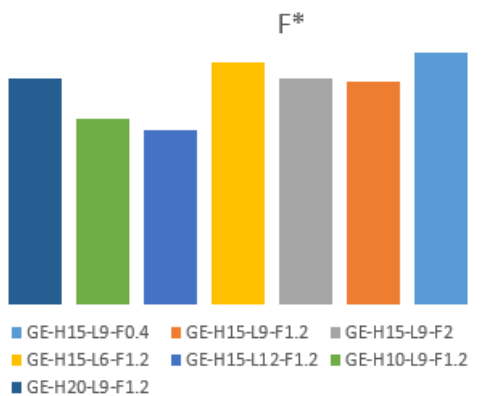
در این بخش جدول تحلیل واریانس و مدل رگرسیونی برای هر پاسخ ارائه شده است. طبق پیش‌بینی نرم‌افزار مدل خطی (Linear) برای پاسخ مدول خمشی و مدل غیرخطی (Quadratic) به‌عنوان مدل برای نیروی خمشی انتخاب شد. در جدول ۸ آنالیز واریانس مربوط به پاسخ مدول



شکل (۸): نمودار میله‌ای استحکام خمشی نمونه‌ها.



شکل (۹): نمودار میله‌ای مدول خمشی نمونه‌ها.



شکل (۱۰): نمودار میله‌ای نیروی بیشینه خمشی نمونه‌ها.

## ۵-۱- صحت‌سنجی تحلیل واریانس

برای بررسی کفایت مدل چهار فرض در نظر گرفته می‌شود. این چهار فرض برای هر پاسخ مدول خمشی و نیروی خمشی بیشینه در شکل ۱۱ نشان داده شده است. فرض اول

فاکتورهای A, B و C برای مدول خمشی و فاکتورهای A, B و C, C<sup>2</sup> و A\*B برای نیروی خمشی بیشینه فاکتورهای مؤثری هستند. ذکر این نکته ضروری است ممکن هست فاکتور به صورت تنها مؤثر نباشد ( $P \geq 0.05$ ) ولی در ترکیب با فاکتور دیگر مؤثر باشد ( $P \leq 0.05$ ). در این صورت فاکتور به صورت تنها هم باید در زمره فاکتورهای مؤثر آورده شود.

معادله رگرسیون زیر (رابطه ۴ و ۵) بر اساس مقادیر واقعی داده شده برای هر سطح از فاکتورها به دست آمده است و میزان تأثیر هر یک از فاکتورها را در معادله چندجمله‌ای نشان می‌دهد. هر چه مقدار این ضرایب بالاتر باشد نشان دهنده تأثیر بیشتر آن فاکتور هست و معمولاً از قدر مطلق برای بیان میزان تأثیر استفاده می‌شود. مثبت نشان دهنده تأثیر افزایشی فاکتورها بر روی جواب و مقادیر منفی ضرایب نشان دهنده تأثیر کاهشی فاکتورها بر روی جواب می‌باشند.

$$R_1 = 3271 + 296A - 171B - R_1 = 3271 + 296A - 171B - 640C \quad (4)$$

$$R_2 = -508 + 111.3 A + 55.4 B + 215 C + 136.2 C^2 - 3.09 A^2 B \quad (5)$$

خمشی و در جدول ۹ آنالیز واریانس مربوط به پاسخ نیروی خمشی بیشینه ارائه شده است.

این جدول شامل مجموع مربعات هر عامل و خطا، درجه آزادی هر عامل و خطا، میانگین مربعات (واریانس) هر عامل و خطا، پارامتر معنی‌داری پاسخ برای عامل (F) و سهم هر عامل در پاسخ (P) می‌باشد. همچنین، در این جدول، مقادیر ضریب تعیین برای پاسخ نشان داده شده است. برای تحلیل واریانس ANOVA به دست آمده از مقادیر p استفاده می‌شود که مقادیر کوچک‌تر از ۰/۰۵ نشان دهنده تأثیرگذاری فاکتور مربوطه هست. هر چه متغیرهای مربوط به آزمون F بیشتر و متغیر مربوط به مقدار p برای جمله‌ای، کمتر باشد آن جمله از لحاظ آماری دارای اهمیت بیشتری است. بر اساس جدول آنالیز واریانس، مقدار P کمتر از ۰/۰۵ شرایط مدل قابل قبول را نشان می‌دهد و مقادیر بیشتر از ۰/۰۵ نشان می‌دهد شرایط مدل، قابل توجه نیست. برای پیش‌بینی کفایت مدل طراحی شده از مقادیر p برای مدل استفاده می‌شود که برای مدل پیش‌بینی شده بایستی کوچک‌تر از ۰/۰۵ (معنی‌دار) باشد که در مورد جواب اول یعنی R<sub>1</sub> (مدول خمشی) و جواب دوم یعنی R<sub>2</sub> (نیروی خمشی بیشینه) صدق می‌کند و مدل طراحی شده مدل مناسبی است. بر اساس جدول

**جدول (۸):** نتایج آنالیز واریانس برای خروجی مدول خمشی.

منبع	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار P
مدل	۹	۴۷۹۳۴۶۳۵	۵۳۲۰۷۱	۹/۶۶	۰/۰۱۱
پارامترهای خطی	۳	۳۶۱۶۷۰۴۷	۱۲۰۵۵۸۲	۲۱/۸۷	۰/۰۰۳
A	۱	۶۲۲۵۸۳	۲۲۵۶۸۳	۱۱/۲۹	۰/۰۲۰
B	۱	۹۷۹۷۲۳۸	۹۷۹۷۲۳۸	۱۷/۷۷	۰/۰۰۸
C	۱	۲۰۱۴۴۱۲۵	۲۰۱۴۴۱۲۵	۳۶/۵۴	۰/۰۰۲
مربعات	۳	۶۷۲۹۱۳۹	۲۲۴۳۰۴۶	۴/۰۷	۰/۰۸۲
AA	۱	۲۵۹۹۸	۲۵۹۹۸	۰/۰۵	۰/۸۳۷
BB	۱	۸۷۵۸۰	۸۷۵۸۰	۰/۱۶	۰/۷۰۷
CC	۱	۴۲۸۲۴۳۲	۴۲۸۲۴۳۲	۷/۷۷	۰/۰۳۹
برهمکنش‌های دوتایی	۳	۵۰۳۸۴۴۹	۱۶۷۹۴۸۳	۳/۰۵	۰/۱۳۱
AB	۱	۱۴۵۱۳۸۲	۱۴۵۱۳۸۲	۲/۶۳	۰/۱۶۶
AC	۱	۳۵۸۳۰۳۱	۳۵۸۳۰۳۱	۶/۵۰	۰/۰۵۱
BC	۱	۴۰۳۷	۴۰۳۷	۰/۰۱	۰/۹۳۵
خطا	۵	۲۷۵۶۱۷۷	۵۵۱۲۳۵		
مجموع	۱۴	۵۰۹۰۸۱۲			

جدول (۹): نتایج آنالیز واریانس برای خروجی نیروی خمشی بیشینه.

منبع	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار P
مدل	۹	۲۴۱۰۳۹۴	۲۶۷۸۲۲	۱۲۳/۶۸	۰.۰۰۰
پارامترهای خطی	۳	۲۳۵۷۰۸۹	۷۸۵۶۹۶	۳۶۲/۸۳	۰.۰۰۰
A	۱	۱۹۵۰۷۷	۱۹۵۰۷۷	۹۰/۰۸	۰.۰۰۰
B	۱	۱۲۴۱۲۲	۱۲۴۱۲۲	۵۷/۳۲	۰/۰۰۱
C	۱	۲۰۳۷۸۹۰	۲۰۳۷۸۹۰	۹۴۱/۰۸	۰.۰۰۰
مربعات	۳	۲۱۱۸۰	۷۰۶۰	۳/۲۶	۰/۱۱۸
AA	۱	۱۲۲۵	۶۱۵۳	۲/۸۴	۰/۱۵۳
BB	۱	۴۰۹	۴۲۲	۰/۲۰	۰/۶۷۷
CC	۱	۱۹۵۴۵	۱۹۵۴۵	۹/۰۳	۰/۰۳۰
برهمکنش‌های دوتایی	۳	۳۲۱۲۵	۳۲۱۲۵	۴/۹۵	۰/۰۵۹
AB	۱	۱۷۱۶۸	۱۷۱۶۸	۷/۹۳	۰/۰۳۷
AC	۱	۶۰۰۶	۶۰۰۶	۲/۷۷	۰/۱۵۷
BC	۱	۸۹۵۱	۸۹۵۱	۴/۱۳	۰/۰۹۸
خطا	۵	۱۰۸۲۷	۱۰۸۲۷		
مجموع	۱۴	۲۴۲۱۲۲۲			

### ۵-۳- اثرات اصلی پارامترها بر رفتار خمشی سازه

#### ساندویچی

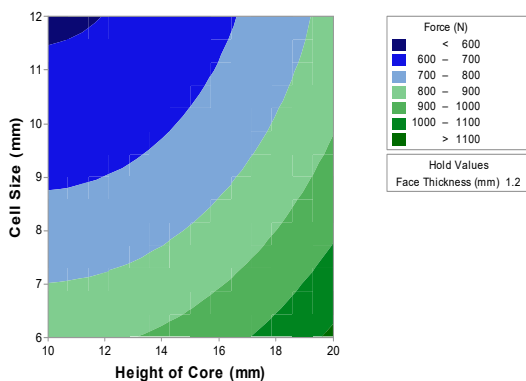
همان‌طور که مشاهده شده پارامترهای مدول خمشی و نیروی خمشی بیشینه بر رفتار خمشی سازه ساندویچی تأثیر معناداری دارند. برای بررسی رفتار خمشی سازه ساندویچ مقادیر مدول خمشی و نیروی خمشی بیشینه قابل تحمل توسط سازه (بحرانی) در نظر گرفته شده‌اند. مدول خمشی تأثیرگذار در برخی کاربردها مانند پیل‌های سوختی می‌باشد. اثرات اصلی پارامترها بر رفتار خمشی سازه شامل بار خمشی بحرانی و مدول خمشی در شکل ۱۲ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که ضخامت رویه تأثیر بسیار زیادی بر نیروی بیشینه خمشی و مدول خمشی دارد و با افزایش آن بار و مدول افزایش می‌یابد. همچنین، به‌طور مشابه با کاهش اندازه سلول تحمل بار سازه کاهش پیدا کرده و نیروی خمشی بحرانی و مدول خمشی کاهش می‌یابد. از طرفی، با افزایش ارتفاع هسته ظرفیت تحمل بار سازه افزایش یافته ولی به دلیل افزایش ضخامت کلی سازه، مدول خمشی کاهش می‌یابد.

### ۴-۵- اثرات متقابل پارامترها

هدف اصلی طراحی آزمایشات مطالعه ارتباط بین پاسخ یا خروجی به‌عنوان یک متغیر وابسته و پارامترهای ورودی می‌باشد. اگر بین پارامترها اثر تقابلی وجود داشته باشد، نتیجه‌گیری بدون در نظر گرفتن این اثرات فاقد اعتبار خواهد بود. در این روش علاوه بر بررسی تأثیر هر پارامتر به‌تنهایی بر خروجی، اثرات متقابل بین هر پارامتر نیز در نظر گرفته می‌شود.

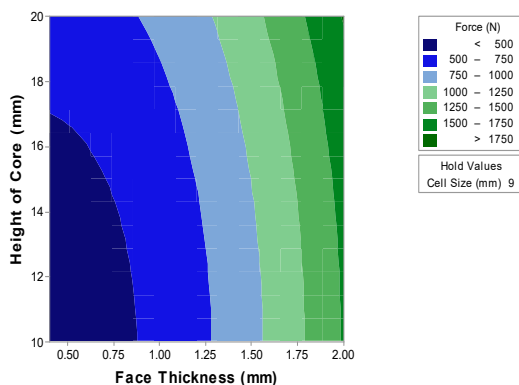
نمودار کانتور بار خمشی بحرانی برای پارامترها در شکل‌های ۱۳ تا ۱۵ نشان داده شده‌اند. با توجه به نمودار کانتور بار خمشی بحرانی برای اندازه سلول هسته و ضخامت رویه در شکل ۱۳، حداکثر نیرو زمانی رخ می‌دهد که اندازه سلول هسته بین ۶ تا ۱۰/۵ میلی‌متر و ضخامت رویه بین ۱/۷۵ تا ۲ میلی‌متر باشد. به‌طور مشابه، با توجه به نمودار کانتور بار خمشی بحرانی برای پارامترهای اندازه سلول هسته و ارتفاع هسته (شکل ۱۴)، نیروی خمشی بیشینه زمانی رخ می‌دهد که اندازه سلول بین ۶ تا ۸ میلی‌متر و ارتفاع هسته بین ۱۷ تا ۲۰ میلی‌متر باشد. همچنین، طبق نمودار کانتور بار

Contour Plot of Force (N) vs Cell Size (mm); Height of Core (mm)



شکل (۱۴): نمودار کانتور بار خمشی بحرانی برای پارامترهای اندازه سلول هسته و ارتفاع هسته.

Contour Plot of Force (N) vs Height of Core (mm); Face Thickness (mm)

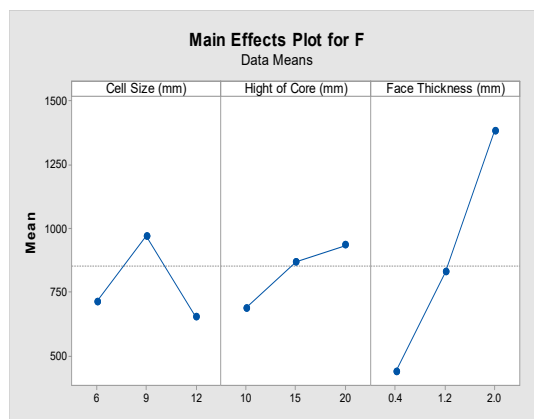


شکل (۱۵): نمودار کانتور بار خمشی بحرانی برای پارامترهای ارتفاع هسته و ضخامت رویه.

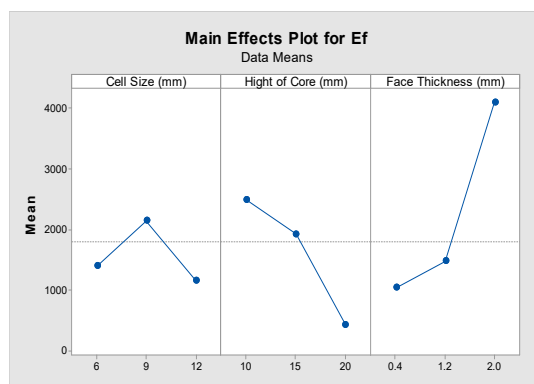
### ۵-۵- انتخاب نمونه بهینه

در این بخش پس انجام آزمایش‌های تعیین‌شده توسط نرم‌افزار طراحی آزمایش و بخش بهینه‌ساز پاسخ، یا استفاده از نتایج آزمایش‌های انجام‌شده، به بررسی رابطه این پارامترها به صورت هم‌زمان بر روی خروجی‌ها پرداخته شده است. در آزمایشات، تعیین مقدار بهینه پارامترهای ورودی برای دستیابی به مقدار حداقل یا حداکثری پارامترهای خروجی حائز اهمیت می‌باشد. همان‌طور که مشاهده شد علاوه بر این که هر یک از پارامترها به تنهایی بر خروجی تأثیرگذار است، یکدیگر اثر متقابل نیز دارند. در نتیجه، حالت بهینه باید به گونه‌ای انتخاب شود که همه پارامترهای ورودی شرایط بهینه برای خروجی موردنظر را داشته باشند. برای

خمشی بحرانی برای پارامترهای ارتفاع هسته و ضخامت رویه در شکل ۱۵، نیروی خمشی بیشینه زمانی رخ می‌دهد که ارتفاع هسته بین ۱۰ تا ۲۰ میلی‌متر و ضخامت رویه بین ۱/۷۵ و ۲ میلی‌متر باشد.



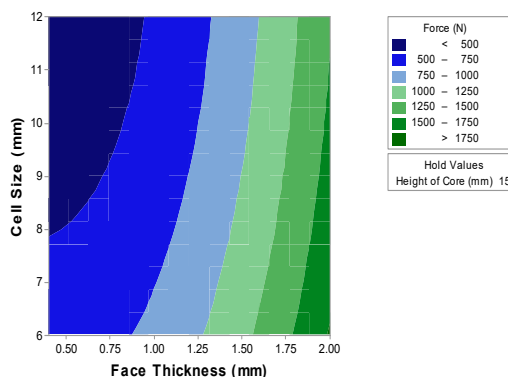
(الف)



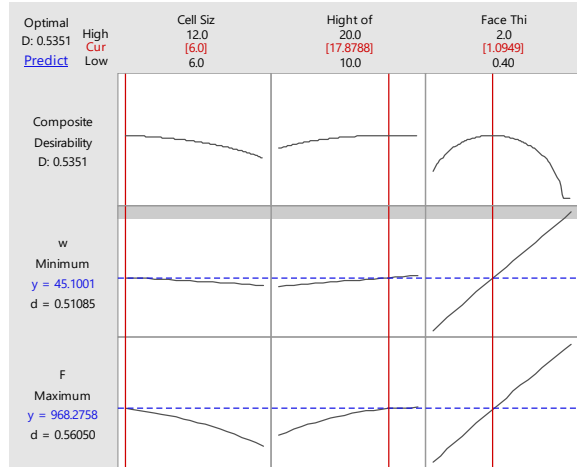
(ب)

شکل (۱۲): چگونگی تأثیر اندازه سلول، ارتفاع هسته و ضخامت رویه بر: الف) بار خمشی بحرانی؛ ب) مدول خمشی.

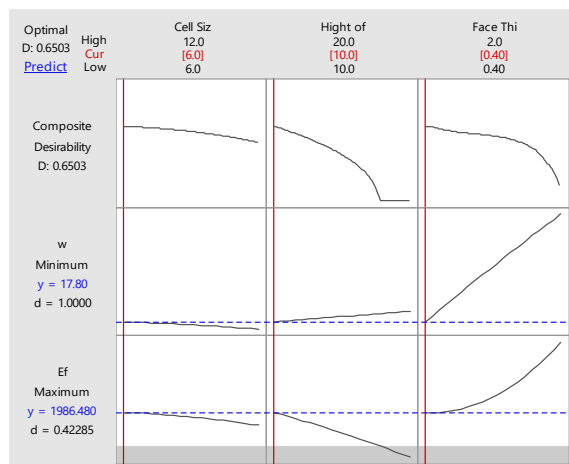
Contour Plot of Force (N) vs Cell Size (mm); Face Thickness (mm)



شکل (۱۳): نمودار کانتور بار خمشی بحرانی برای اندازه سلول هسته و ضخامت رویه.



(الف)



(ب)

شکل (۱۶): سطوح بهینه پارامترهای مؤثر و مقدار: (الف) نیروی خمشی بیشینه؛ (ب) مدول خمشی بیشینه.

این منظور در این بخش از بهینه‌سازی سطح پاسخ در نرم‌افزار مینی‌تب استفاده شده است. پارامترهای ورودی برای دستیابی به بهترین پاسخ با در نظر گرفتن حداقل وزن و حداکثر پاسخ مدول خمشی و نیروی خمشی بهینه شده‌اند. نیرو و مدول خمشی دو کمیت مهم در بررسی رفتار خمشی سازه ساندویچی می‌باشند. در برخی صنایع و کاربردها استحکام خمشی یا ظرفیت تحمل بار خمشی سازه تأثیرگذار بوده و در برخی کاربردها مانند پیل‌های سوختی مدول خمشی حائز اهمیت می‌باشد. در نتیجه، در این بخش حالت بهینه با توجه به داده‌های مربوط به نیروی خمشی بیشینه و مدول خمشی سازه معرفی می‌شوند. در شکل ۱۶ می‌توان حالت بهینه پارامترهای ورودی و خروجی‌ها را پس از بهینه‌سازی مشاهده کرد.

در جدول ۱۰ حالت بهینه نمونه بر اساس بیشترین نیروی خمشی نسبت به وزن ارائه شده است. پس از بررسی سطوح متغیرها، با توجه به مقادیر به دست آمده برای هر پارامتر، نزدیک‌ترین مقدار برای پارامتر در نظر گرفته شده است؛ بنابراین، پانل ساندویچی با ضخامت رویه ۱/۲ mm، اندازه سلول ۶ mm و ضخامت هسته ۲۰ mm دارای بیشترین نیروی خمشی بحرانی نسبت به وزن می‌باشد؛ بنابراین، پانل ساندویچی با ضخامت رویه ۰/۴ mm، اندازه سلول ۶ mm و ضخامت هسته ۱۰ mm دارای بیشترین مدول خمشی نسبت به وزن می‌باشد؛ بنابراین همان‌گونه که از شکل ۱۳ و جداول ۱۰ و ۱۱ پیداست، مقادیر بهینه پارامترهای مؤثر در رفتار خمشی سازه ساندویچی جهت حداقل کردن وزن و حداکثر کردن نیروی خمشی بیشینه و مدول خمشی ارائه شد.

جدول (۱۰): حالت بهینه نمونه بر اساس بار خمشی بحرانی نسبت به وزن.

ضخامت هسته (mm)	ضخامت رویه (mm)	اندازه سلول (mm)	نیروی خمشی بحرانی (N)	جرم (g)
۱/۱	۱۸	۶	۹۶۸/۲	۴۵

جدول (۱۱): حالت بهینه نمونه بر اساس مدول خمشی نسبت به وزن.

ضخامت هسته (mm)	ضخامت رویه (mm)	اندازه سلول (mm)	نیروی خمشی بحرانی (N)	جرم (g)
۱۰	۰/۴	۶	۱۹۸۶/۵	۱۷/۸



composite panels in four-point bending: Experimental investigation and analytical modeling. Composites part b: engineering. 2014;67:270-9.

Rahmani R, Rahimi GH, Hosseini SS. Flexural behavior of sandwich structures consisting of corrugated composite core with different geometries. Journal of Polymer Science & Technology. 2015;28: 175-187.

[5] Sun G, Huo X, Chen D, Li Q. Experimental and numerical study on honeycomb sandwich panels under bending and in-panel compression. Materials & Design. 2017;133:154-68.

[6] Li T, Wang L. Bending behavior of sandwich composite structures with tunable 3D-printed core materials. Composite Structures. 2017;175:46-57.

[7] Habibnia M, Ghasemi Tamami P, Sang Davini H. Design and investigation of honeycomb end plates for PEM fuel cells. Iranian Journal of Hydrogen & Fuel Cell. 2018;4(3):189-99.

[8] Xiao Y, Hu Y, Zhang J, Song C, Huang X, Yu J, Liu Z. The bending responses of sandwich panels with aluminium honeycomb core and CFRP skins used in electric vehicle body. Advances in Materials Science and Engineering. 2018.

[9] Wang J, Shi C, Yang N, Sun H, Liu Y, Song B. Strength, stiffness, and panel peeling strength of carbon fiber-reinforced composite sandwich structures with aluminum honeycomb cores for vehicle body. Composite Structures. 2018;184:1189-96.

[10] Sun Y, Guo LC, Wang TS, Zhong SY, Pan HZ. Bending behavior of composite sandwich structures with graded corrugated truss cores. Composite Structures. 2018;185:446-54.

[11] Daliri V, Zeinedini A. Flexural behaviour of the composite sandwich panels with novel and regular corrugated cores. Applied Composite Materials. 2019;26(3):963-82.

[12] Anandan S, Dhaliwal G, Ganguly S, Chandrashekhara K. Investigation of sandwich composite failure under three-point bending: Simulation and experimental validation. Journal of Sandwich Structures & Materials. 2020;22(6):1838-58.

[13] Sadiq SE, Bakhy SH, Jweeg MJ. Crashworthiness behavior of aircraft sandwich structure with honeycomb core under bending load. In IOP Conference Series: Materials Science

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی رفتار خمشی ساختار ساندویچی کامپوزیتی با هسته لانه‌زنبوری پرداخته‌شده و تأثیر پارامترهای ساختاری بر آن بررسی شده است. تحلیل عددی مدل‌سازی اجزای محدود سازه با پارامترهای متفاوت تحت آزمون خمش سه‌نقطه و با استفاده از نرم‌افزار آباکوس صورت گرفته و آزمایش‌ها بر اساس طراحی آزمون به روش مرکب مرکزی توسط نرم‌افزار مینی‌تب مشخص شده است. نتایج نشان داد که با افزایش ضخامت رویه و هسته و کاهش اندازه سلول، نیروی خمشی ماکزیمم افزایش پیدا می‌کند؛ اما باید در نظر داشت که با افزایش مقدار هر فاکتور، وزن نمونه‌ها نیز افزایش می‌یابد. در نتیجه، دستیابی به نمونه با وزن کمتر و استحکام خمشی و تحمل بار بالاتر اهمیت پیدا می‌کند. همچنین، مشاهده شده است که نمونه‌های با ضخامت رویه بیشتر، بیشترین تحمل نیرو و نیز مدول خمشی را داشته و این پارامتر بیشترین تأثیر را بر رفتار خمشی دارد. ساختار با ارتفاع هسته کمتر، نیروی خمشی کمتری را تحمل می‌کند؛ بنابراین، ساختار ساندویچی با ارتفاع هسته کمتر و ضخامت رویه بیشتر، استحکام و تحمل بار بیشتری دارد. پس از بهینه‌سازی پارامترها نتیجه شد که نمونه با بیشترین مدول خمشی و کمترین وزن، نمونه با اندازه سلول هسته ۶، ضخامت رویه ۰/۴ و ارتفاع هسته ۱۰ یعنی نمونه GE-H10-L6-F0/4 بوده و نمونه با بیشترین ظرفیت تحمل بار خمشی و کمترین وزن، نمونه با اندازه سلول هسته ۶، ضخامت رویه ۱/۲ و ارتفاع هسته ۲۰ یعنی نمونه GE-H20-L6-F1/2 می‌باشد.

## ۷- مراجع

[1] Bitzer TN. Honeycomb technology: materials, design, manufacturing, applications and testing. Springer Science & Business Media; 1997.

[2] Yan LL, Han B, Yu B, Chen CQ, Zhang QC, Lu TJ. Three-point bending of sandwich beams with aluminum foam-filled corrugated cores. Materials & Design. 2014;60:510-9.

[3] Wang L, Liu W, Wan L, Fang H, Hui D. Mechanical performance of foam-filled lattice

and Engineering 2020; 881(1):012046 IOP Publishing.

[14] Feng Y, Sun X, Chen B, Ni H. Optimal Design of Periodic Honeycomb Plate with Unit Cell Structure Based on Genetic Algorithm. Mobile Information Systems. 2022.

[15] Moradia S, Gerdooei M, Varedi-Koulaeid SM. Optimization and investigation of effective parameters in ECAP-Conform process using response surface method, case study: AA7075 rod. Modares Mechanical Engineering. 2021; 22(1): 57-70.

[16] Zohoor M, Mousavi S M. Evaluation and optimization of drawing depth in electrohydraulic forming (with bridge wire between electrodes). Modares Mechanical Engineering. 2017; 17 (9) :137-144.

[17] The Multi-objective optimization of the Friction Stir Welding using the Taguchi Design Method, the Response Surface Model and the Particle Swarm Algorithm. Journal of Aerospace Mechanics. 2022; 17(4): 39-54.

[18] Mostofi TM, Sayah-Badkhor M, Babaei H. Experimental study and regression analysis of free and die forming of circular metallic plates using gas mixture explosion. Journal of Aerospace Mechanics. 2021; 17(2): 85-99.

[19] Nasiri S, Sadegh-Yazdi M, Mostofi TM, Mousavi SM, Ziya-Shamami M. optimization of effective parameters in free iron sheet forming process by underwater explosion method. Journal of Aerospace Mechanics. 2022; 18(3):87-108

[20] Vakilifard A, Mazaheri H, Shaban M. Bending behavior and geometrical optimization of five-layered corrugated sandwich panels with equal in-plane principal stiffness. Journal of Composite Materials. 2022;56(17):2739-53.

[۲۱] شهبازی کرمی، ج.، ملک‌زاده مفرد، ک. و نیک‌بین، ا.، بهینه‌سازی و طراحی آزمایشات به روش سطح پاسخ، شهبازی، ۱۳۹۶.