



Numerical Calculation of Mechanical Properties of Honeycomb Core Using Homogenization Method

Amirhosein Rahbar¹, Seyed Mohammad Navid Ghoreishi^{2*}

¹ Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology (SUT), Tehran, Iran
Rahbaramirhosein75@gmail.com

^{2*} Satellite Research Institute, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran
smn.ghoreishi@isrc.ac.ir

Available in:
Journal.isrc.ac.ir

Journal of Space Science,
Technology & Applications
(Persian)

Vol. 6, No. 1, pp.: 1-20
2026

DOI:

[10.22034/jss.2025.501714.1226](https://doi.org/10.22034/jss.2025.501714.1226)

Article Info

Received: 2025-01-23
Accepted: 2025-03-12

Keywords

Honeycomb Core,
Mechanical Properties,
Homogenization Method,
Finite Element Method

How to Cite this article

A. Rahbar, S. M. N. Ghoreishi, "Numerical Calculation of Mechanical Properties of Honeycomb Core Using Homogenization Method", *Journal of Space Science, Technology & Applications*, Vol. 6, No. 1, pp. 1-20, 2026.

Abstract

Honeycomb structures are widely used in the design of satellite structures and advanced industries due to their high strength-to-weight ratio, excellent energy absorption capacity, and optimal mechanical behavior. A precise analysis of the mechanical properties of these structures is essential to ensure their optimal performance. One of the most critical aspects in estimating the mechanical properties of honeycomb structures is determining the mechanical properties of the honeycomb core. Various parameters, such as cell wall thickness, cell angle, cell height, and cell length, significantly influence the mechanical properties of the honeycomb core. In this paper, various methods for determining the mechanical properties of the honeycomb core, including analytical, numerical, and experimental approaches, reviewed, and their advantages and disadvantages are extracted. Subsequently, using a homogenization method and considering a suitable representative volume element (RVE), an innovative numerical approach is proposed to calculate the mechanical properties of the honeycomb core, taking into account various geometric parameters. In this method, an advanced parametric code is developed in MATLAB, which allows for the definition of a suitable unit cell representative by considering different geometric parameters such as cell wall thickness, cell angle, cell height, and cell length. This code is capable of interfacing with finite element software such as ANSYS to apply periodic boundary conditions and in-plane/out-of-plane loadings for calculating mechanical properties, including elastic moduli, shear moduli, and Poisson's ratios in different directions. Using the proposed method, the influence of each geometric parameter in the design of the honeycomb core is investigated, and the mechanical properties of the honeycomb core under various geometric conditions are numerically calculated. Furthermore, to validate the accuracy of the proposed method, the results of this study are compared with the analytical Gibson-Ashby model. It is observed that the proposed method can estimate the mechanical properties of the honeycomb core with very high accuracy and significantly low computational cost. Therefore, the proposed method, due to its ability to accurately model various geometric variables and its high precision in calculating mechanical properties, can serve as an effective tool for estimating the mechanical properties of honeycomb core structures.

محاسبه عددی خواص مکانیکی هسته لانه زنبوری با استفاده از روش همگن سازی

امیرحسین رهبر^۱، سید محمد نوید قریشی^{۲*}

۱- دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی مکانیک، تهران، ایران - Rahbaramirhosein75@gmail.com

۲- پژوهشکده سامانه‌های ماهواره، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران - smn.gshoreishi@isrc.ac.ir

نویسنده مسئول *

چکیده

سازه‌های لانه‌زنبوری به دلیل نسبت بالای استحکام به وزن، ظرفیت جذب انرژی بالا و رفتار مکانیکی بهینه، به‌طور گسترده در طراحی سازه‌های فضایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. تحلیل دقیق خواص مکانیکی این سازه‌ها برای اطمینان از عملکرد مطلوب تحت بارگذاری‌های مختلف ضروری است. یکی از مهم‌ترین بخش‌ها برای تخمین خواص مکانیکی سازه‌های لانه‌زنبوری، تعیین خواص مکانیکی هسته لانه زنبوری است. متغیرهای مختلفی نظیر ضخامت دیواره سلول، زاویه سلول، ارتفاع و طول سلول در خواص مکانیکی هسته لانه زنبوری تأثیرگذار است. در این مقاله روش‌های مختلف برای تعیین خواص مکانیکی هسته لانه‌زنبوری شامل روش‌های تحلیلی، عددی و تجربی مورد بررسی قرار گرفته و مزایا و معایب آن‌ها استخراج گردید. سپس با استفاده از روش همگن‌سازی و با در نظر گرفتن یک المان حجم نماینده مناسب، یک روش نوآورانه برای محاسبه خواص مکانیکی هسته لانه زنبوری به صورت عددی با در نظر گرفتن متغیرهای هندسی مختلف ارائه گردید. در روش ارائه شده یک کد پارامتریک پیشرفته در نرم‌افزار متلب که قابلیت تعریف المان واحد نماینده مناسب با در نظر گرفتن متغیرهای هندسی مختلف نظیر ضخامت دیواره سلول، زاویه سلول، ارتفاع و طول سلول را دارد توسعه داده شده است. این کد قابلیت اتصال با نرم‌افزارهای المان محدود نظیر انسیس را جهت اعمال شرایط مرزی دوره‌ای و بارگذاری‌های درون و برون صفحه‌ای جهت محاسبه خواص مکانیکی شامل مدول‌های الاستیسیته، مدول‌های برشی و ضرایب پواسون در راستاهای مختلف دارد. با استفاده از روش ارائه شده تأثیر هر یک از متغیرهای هندسی موجود در طراحی هسته لانه‌زنبوری به دقت مورد بررسی قرار گرفت و خواص مکانیکی هسته لانه‌زنبوری تحت شرایط هندسی مختلف به صورت عددی محاسبه گردید. همچنین در نهایت برای اطمینان از صحت نتایج روش ارائه شده، نتایج این مقاله با مدل تحلیلی گیبسون - اشیی مقایسه گردید و مشاهده شد که روش ارائه شده قابلیت تخمین خواص مکانیکی هسته لانه‌زنبوری را با دقت بسیار بالا و هزینه محاسباتی بسیار پایین دارد. بنابراین روش ارائه شده به دلیل توانایی مدل سازی دقیق متغیرهای هندسی مختلف و دقت بالا در محاسبه خواص مکانیکی، می‌تواند به‌عنوان یک ابزار کارآمد در تخمین خواص مکانیکی هسته سازه‌های لانه‌زنبوری مورد استفاده قرار گیرد.

دسترس پذیر در نشانی:

Journal.isrc.ac.ir

دوفصلنامه علوم، فناوری و

کاربردهای فضایی

سال ششم، شماره ۱، صفحه ۲۰-۱

بهار و تابستان ۱۴۰۵

DOI:

10.22034/jssta.2025.501714.1226

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۰۴

پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۲

واژه‌های کلیدی

هسته لانه زنبوری، خواص مکانیکی،

روش همگن‌سازی، روش المان

محدود

نحوه استناد به این مقاله

امیرحسین رهبر، سید محمد نوید قریشی، "محاسبه عددی خواص مکانیکی هسته لانه زنبوری با استفاده از روش همگن‌سازی"، دوفصلنامه علوم، فناوری و کاربردهای فضایی، جلد ششم، شماره اول، صفحات ۲۰-۱، ۱۴۰۵.

۱- مقدمه

سازه‌های لانه‌زنبوری^۱ به عنوان یکی از مهم‌ترین نوآوری‌های مهندسی در صنایع مختلف، به ویژه در صنعت هوافضا، به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد خود نظیر جرم کم، استحکام بالا و مقاومت در برابر ضربه، به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۴-۱]. این ساختارها که از الهام طبیعت و به خصوص ساختار کندوی زنبور عسل توسعه یافته‌اند، توانسته‌اند جایگاه مهمی در طراحی‌های پیشرفته مهندسی و مواد سبک اما مستحکم پیدا کنند. یکی از مهم‌ترین مزایای استفاده از سازه‌های لانه‌زنبوری در صنعت فضایی، کاهش وزن کلی فضاپیماها، ماهواره‌ها و سایر تجهیزات فضایی است که منجر به کاهش هزینه‌های پرتاب و بهبود عملکرد سامانه‌های فضایی می‌شود [۵-۶]. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که استفاده از این سازه‌ها در طراحی بدنه ماهواره‌ها و اجزای داخلی فضاپیماها باعث افزایش دوام و مقاومت مکانیکی آن‌ها در برابر شرایط سخت فضا، مانند تغییرات دمایی شدید و فشارهای ناشی از پرتاب، می‌شود [۹-۷]. ساختارهای لانه‌زنبوری در ترکیب با مواد کامپوزیتی پیشرفته، نظیر الیاف کربن و آلیاژهای آلومینیوم، می‌توانند استحکام مکانیکی را افزایش داده و در عین حال جرم کلی سازه را کاهش دهند. جهت ارزیابی عملکرد مکانیکی این سازه‌ها، روش‌های مختلفی برای تعیین خواص مکانیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد که می‌توان آن‌ها را به سه دسته کلی روش‌های تجربی، روش‌های تحلیلی و روش‌های عددی تقسیم کرد. در روش‌های تجربی، آزمایش‌های مکانیکی نظیر آزمون کشش، فشار، برش و خمش برای تعیین خواص مکانیکی سازه‌های لانه‌زنبوری انجام می‌شود. این روش‌ها دقیق هستند، اما هزینه‌بر بوده و نیازمند تجهیزات آزمایشگاهی پیشرفته است [۱۲-۱۰]. برای مثال، آزمایش‌های انجام شده بر روی پنل‌های ساندویچی با هسته لانه‌زنبوری نشان داده‌اند که نوع چسبندگی بین لایه‌های مختلف تأثیر قابل توجهی بر استحکام کلی سازه دارد [۱۳]. علاوه بر این، تأثیر دما، رطوبت و شرایط محیطی بر روی استحکام این سازه‌ها در تحقیقات مختلف بررسی شده و نشان داده شده است که تغییرات محیطی می‌تواند اثرات قابل توجهی بر روی دوام و عملکرد این ساختارها داشته باشد [۱۴-۱۵]. روش‌های تحلیلی مبتنی بر مدل‌های ریاضی هستند که از معادلات مکانیک جامدات و مکانیک

مواد کامپوزیتی برای پیش‌بینی خواص مکانیکی استفاده می‌کنند. این روش‌ها معمولاً بر اساس تئوری‌های الاستیسیته و پلاستیسیته توسعه یافته‌اند و با استفاده از مدل‌هایی مانند مدل گیبسون - اشبی^۲، خواص مؤثر سازه‌های لانه‌زنبوری تخمین زده می‌شود [۱۶]. در این مدل‌ها، عواملی مانند نوع ماده، ضخامت دیواره‌های سلولی، نسبت ابعاد سلول‌ها و نحوه اتصال آن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. تحقیقات جدید در این حوزه نشان داده است که اصلاح مدل‌های ریاضی و در نظر گرفتن عوامل غیرخطی در تحلیل این سازه‌ها می‌تواند دقت پیش‌بینی‌های مکانیکی را بهبود ببخشد [۲۰-۱۷]. روش‌های عددی نیز که شامل روش اجزاء محدود^۳ و دیگر تکنیک‌های محاسباتی هستند، امکان تحلیل رفتار مکانیکی این سازه‌ها را با دقت بالا فراهم می‌کنند. استفاده از این روش‌ها به دلیل کاهش هزینه‌های آزمایشگاهی و امکان شبیه‌سازی سناریوهای مختلف، در تحقیقات مهندسی مکانیک مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته است [۲۱]. روش اجزاء محدود یکی از پرکاربردترین روش‌های عددی در این زمینه است که می‌تواند رفتار مکانیکی سازه‌های لانه‌زنبوری را تحت شرایط بارگذاری مختلف شبیه‌سازی کند و میزان تنش، کرنش و شکست این ساختارها را تخمین بزند [۲۴-۲۲].

تحلیل و طراحی سازه‌های لانه‌زنبوری از طریق روش‌های مختلف امکان‌پذیر است. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که استفاده از روش‌های عددی برای تحلیل این سازه‌ها منجر به کاهش هزینه‌های طراحی و افزایش دقت نتایج نسبت به روش‌های تحلیلی می‌شوند. در این مقاله، روش‌های مختلف برای تعیین خواص مکانیکی سازه‌های لانه‌زنبوری بررسی و مقایسه شدند. روش همگن‌سازی به دلیل دقت بالا و کاهش پیچیدگی محاسباتی به عنوان رویکرد برتر انتخاب شد. یک کد پارامتریک پیشرفته توسعه داده شد که امکان کنترل دقیق متغیرهای هندسی مانند زاویه، ضخامت دیواره، ارتفاع و طول سلول را فراهم می‌کند. تحلیل‌های عددی با استفاده از روش المان محدود با هدف بررسی تغییرات متغیرهای هندسی بر خواص مکانیکی مانند مدول‌های الاستیسیته و برشی انجام شدند. روش ارائه‌شده به دلیل دقت بالا و توانایی کنترل متغیرهای هندسی، ابزاری کارآمد برای طراحی و بهینه‌سازی سازه‌های سبک‌وزن و مقاوم در کاربردهای فضایی است.

³ FEM¹ HoneyComb
² Gibson-Ashby

مکانیکی آن‌ها در سه راستای متعامد متفاوت است [۲۷]. در این مواد، رفتار مکانیکی در هر راستا وابسته به ویژگی‌های میکروسکوپی ماده و توزیع هندسی آن است. این ویژگی در سازه‌های لانه‌زنبوری به واسطه هندسه شش‌ضلعی و تکرار شونده آن‌ها کاملاً مشهود است، زیرا پاسخ مکانیکی در راستای محورها اصلی متفاوت خواهد بود. برای توصیف دقیق‌تر این رفتار، مدول‌های الاستیسیته (E_x, E_y, E_z) ، مدول‌های برشی (G_{xy}, G_{yz}, G_{xz}) و ضرایب پواسون $(\nu_{xy}, \nu_{yz}, \nu_{xz})$ مورد استفاده قرار می‌گیرند. این متغیرها با استفاده از روابط تنش-کرنش و مدل‌های تحلیلی و عددی قابل استخراج هستند. رابطه خطی بین تنش و کرنش برای یک ماده ارتوتروپیک خطی-الاستیک به صورت معادله ۱ بیان می‌شود:

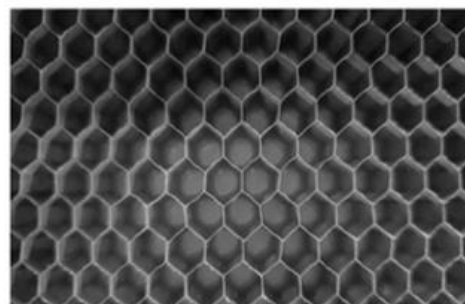
$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{bmatrix} \quad (1)$$

مدول‌های الاستیسیته، مقاومت ماده را در برابر تغییر شکل در راستای بارگذاری تعریف می‌کنند و برای سازه‌های لانه‌زنبوری به شدت به متغیرهای هندسی مانند ضخامت دیواره و ارتفاع و اندازه سلول بستگی دارند. بهینه‌سازی خواص مکانیکی سازه‌های لانه‌زنبوری با احتساب متغیرهای هندسی، بهبود عملکرد ساختار را به همراه دارد. تغییرات کوچک در هندسه سلول، مانند تغییر نسبت ارتفاع به ضخامت یا افزایش اندازه سلول، می‌تواند تأثیر محسوسی بر مدول‌های الاستیسیته، ظرفیت جذب انرژی و مقاومت کلی در برابر تغییر شکل داشته باشد. در این پژوهش، برای اجرای فرآیند بهینه‌سازی خواص مکانیکی، از یک رویکرد سیستماتیک استفاده شده است که شامل تعریف هندسه مدل، تخصیص مواد، اعمال شرایط مرزی، تحلیل تنش-کرنش با استفاده از روش المان محدود و در نهایت بهینه‌سازی هندسی است. مراحل این فرآیند به طور کامل در شکل ۲ نمایش داده شده‌اند.

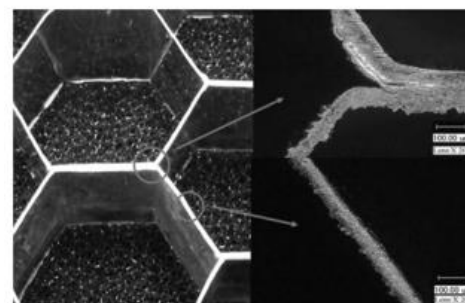
۲- مبانی نظری و معادلات مکانیکی در تحلیل سازه‌های لانه‌زنبوری ارتوتروپیک

سازه‌های لانه‌زنبوری به دلیل ساختار هندسی منحصر به فرد خود، به عنوان یکی از کارآمدترین ساختارهای سبک‌وزن در صنایع پیشرفته شناخته می‌شوند. این سازه‌ها از واحدهای تکرار شونده با هندسه شش‌ضلعی تشکیل شده‌اند که با قرار گرفتن منظم در کنار یکدیگر، شبکه‌ای سبک، مستحکم و مقاوم در برابر تغییر شکل ایجاد می‌کنند. طراحی هندسه شش‌ضلعی باعث می‌شود تا با حداقل مصرف مواد، حداکثر استحکام و ظرفیت جذب انرژی فراهم شود. این ویژگی‌ها، سازه‌های لانه‌زنبوری را به گزینه‌ای ایده‌آل برای کاربردهایی مانند ساخت ماهواره‌ها تبدیل کرده است، جایی که نسبت استحکام به جرم اهمیت حیاتی دارد. در شکل ۱ نمایشی از یک ساختار لانه‌زنبوری با واحد تکرار شونده شش‌ضلعی (الف) در بعد میکروسکوپی (ب) نشان داده شده است.

(الف)



(ب)



شکل (۱): تصویری از ساختار لانه‌زنبوری واقعی [۲۵-۲۶]

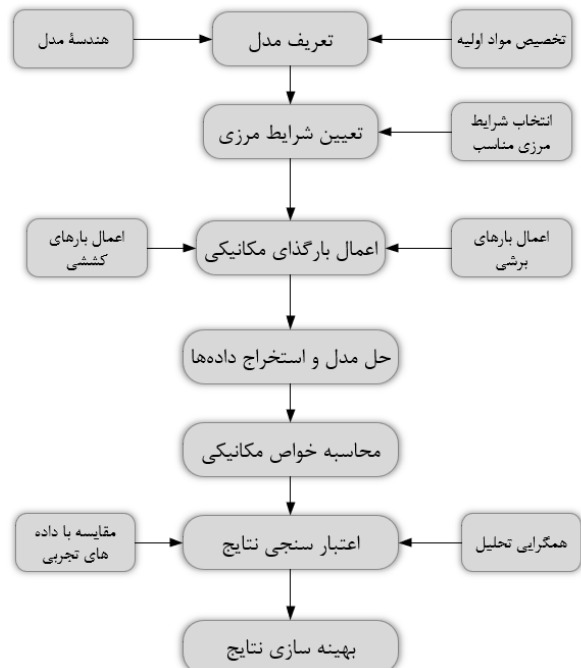
رفتار مکانیکی این سازه‌ها به دلیل ساختار شبکه‌ای و ناهمسان‌گرد بودن، با استفاده از مدل‌سازی مواد ارتوتروپیک توصیف می‌شود. مواد ارتوتروپیک به دسته‌ای از مواد گفته می‌شود که خواص

روش‌ها می‌توانند دقت بالایی داشته باشند و رفتار واقعی سازه را تحت بارهای مختلف نشان دهند، اما به دلیل نیاز به ساخت نمونه‌های واقعی و انجام آزمایش‌های متعدد، هزینه‌بر و زمان‌بر هستند. علاوه بر این، در تحلیل سازه‌های پیچیده یا بزرگ، انجام آزمایش‌های تجربی عملی نیست.

روش‌های تحلیلی نیز معمولاً شامل مدل‌های ریاضی و تئوری‌های مکانیک جامدات برای پیش‌بینی خواص سازه‌های لانه‌زنبوری هستند. این روش‌ها به دلیل سادگی و سرعت در انجام محاسبات، برای تحلیل‌های اولیه و طراحی‌های مفهومی مناسب‌اند، اما معمولاً در شرایط پیچیده و غیرخطی دقت کمتری دارند. در این میان، همگن‌سازی به عنوان یک روش کارآمد، به دلیل قابلیت کاهش پیچیدگی‌های محاسباتی و امکان تحلیل در مقیاس میکروسکوپی، بر سایر روش‌ها ترجیح داده می‌شود. در جدول ۱ مقایسه بین روش‌های مختلف تعیین خواص مکانیکی آورده شده است. همگن‌سازی با تبدیل ساختار پیچیده و سلولی لانه‌زنبوری به یک ماده همگن با خواص مؤثر، نیاز به شبیه‌سازی‌های دقیق میکروسکوپی را از بین می‌برد و تحلیل‌ها را به‌طور قابل توجهی ساده‌تر می‌کند. علاوه بر این، همگن‌سازی به‌ویژه در تحلیل‌های سریع و بهینه‌سازی طراحی‌های اولیه بسیار مفید است، زیرا خواص مؤثر مواد را به راحتی پیش‌بینی می‌کند و نیاز به انجام آزمایش‌های زمان‌بر یا شبیه‌سازی‌های پیچیده را کاهش می‌دهد [۲۷].

جدول (۱): مقایسه رویکردهای مختلف تعیین خواص مکانیکی

روش	تجربی	عددی	تحلیلی
دقت	دقت بسیار بالا، اما هزینه‌بر و زمان‌بر	دقت بالا، به‌ویژه در مدل‌های پیچیده.	دقت متوسط و وابسته به فرضیات مدل
کاربرد	مناسب برای تأیید نهایی و اعتبارسنجی مدل‌های تحلیلی و عددی.	مناسب برای تحلیل‌های دقیق و به‌ویژه در شرایط پیچیده بارگذاری.	مناسب برای تحلیل‌های اولیه و طراحی مفهومی.
محدودیت‌ها	هزینه‌بر و زمان‌بر، نیاز به نمونه‌های فیزیکی و تجهیزات آزمایشگاهی.	نیاز به منابع محاسباتی بالا و زمان زیاد برای مدل‌های پیچیده.	فرضیات ساده‌سازی ممکن است باعث کاهش دقت در شرایط پیچیده شود.



شکل (۲): روند گام‌به‌گام تحلیل و بهینه‌سازی خواص مکانیکی سازه‌های لانه‌زنبوری

۲-۱- بررسی رویکردهای مختلف در تعیین خواص مکانیکی سازه‌های لانه زنبوری

در تحلیل سازه‌های لانه‌زنبوری، روش‌های مختلفی برای بررسی رفتار مکانیکی این سازه‌ها وجود دارد که شامل روش‌های عددی، روش‌های تجربی و روش‌های تحلیلی هستند. هر یک از این روش‌ها مزایا و معایب خاص خود را دارند، اما همگن‌سازی به عنوان یک روش کارآمد، به دلیل ویژگی‌های خاص خود، در بسیاری از موارد بر سایر روش‌ها برتری دارد.

روش‌های عددی مانند روش اجزاء محدود امکان شبیه‌سازی دقیق سازه‌های لانه‌زنبوری را فراهم می‌آورند و به تحلیل رفتار آن‌ها تحت بارگذاری‌های مختلف کمک می‌کنند. با این حال، این روش‌ها نیاز به منابع محاسباتی زیادی دارند و تحلیل‌های پیچیده‌ای را می‌طلبند که زمان و هزینه زیادی را می‌طلبند. همچنین، شبیه‌سازی‌های دقیق در مقیاس میکروسکوپی به دلیل پیچیدگی ساختار سلولی لانه‌زنبوری، در مواردی می‌تواند محدودیت‌های قابل توجهی ایجاد کند.

روش‌های تجربی شامل آزمایش‌هایی مانند کشش، فشار و برش برای تعیین خواص مکانیکی سازه‌های لانه‌زنبوری هستند. این

هستند که در آن‌ها از تقریب‌های هندسی و قوانین ترکیب مواد برای محاسبه خواص مؤثر سازه‌های لانه‌زنبوری استفاده می‌شود. این روش‌ها با در نظر گرفتن ساختار سلولی به‌عنوان مجموعه‌ای از تیرها یا قاب‌های سازه‌ای، خواص مکانیکی معادل را بر اساس توزیع بار و تغییر شکل‌های موضعی تعیین می‌کنند.

جدول (۲): روش‌های مختلف همگن‌سازی تحلیلی [۲۸]

نام روش	ویژگی
گیبسون و اشبی ^۴	در این روش، دیواره‌های سلولی لانه‌زنبوری به‌عنوان تیرهای انعطاف‌پذیر در نظر گرفته می‌شوند. بر اساس تئوری تیرها، تغییر شکل این تیرها تحت بارگذاری محاسبه شده و از آن برای تعیین خواص مکانیکی همگن‌شده مانند مدول ینگ، مدول برشی و نسبت پواسون استفاده می‌شود.
هوه و بکر ^۵	این روش بر پایه‌ی معادل‌سازی انرژی کرنش عمل می‌کند. در این تکنیک، واحد سلولی به‌عنوان مجموعه‌ای از تیرهای متصل به هم مدل‌سازی شده و تغییر شکل آن‌ها تحت بارگذاری محاسبه می‌شود. سپس، بر اساس انرژی کرنش به‌دست‌آمده، ماتریس سختی معادل برای کل ساختار تعیین می‌شود.
مستر و اوانز ^۶	این روش نسخه‌ی بهبودیافته‌ی مدل گیبسون و اشبی است که واحد سلولی را به بخش‌های مجزا (خمشی، کششی و لولایی) تقسیم می‌کند. در این روش، تأثیر مکانیزم‌های مختلف تغییر شکل هر بخش به‌طور جداگانه بررسی شده و سپس خواص مکانیکی معادل کل سلول تعیین می‌شود.

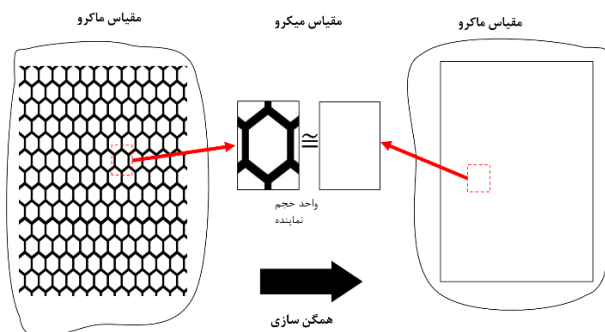
۲. روش‌های همگن‌سازی عددی: در این دسته، از روش‌های

عددی مانند تحلیل اجزاء محدود برای محاسبه خواص مکانیکی معادل هسته‌های لانه‌زنبوری استفاده می‌شود. در این روش‌ها، یک حجم نماینده از ساختار انتخاب شده و تحت بارگذاری‌های مختلف تحلیل می‌شود تا پاسخ مکانیکی مؤثر آن به‌دست آید.

جدول (۳): روش‌های مختلف همگن‌سازی عددی [۲۸]

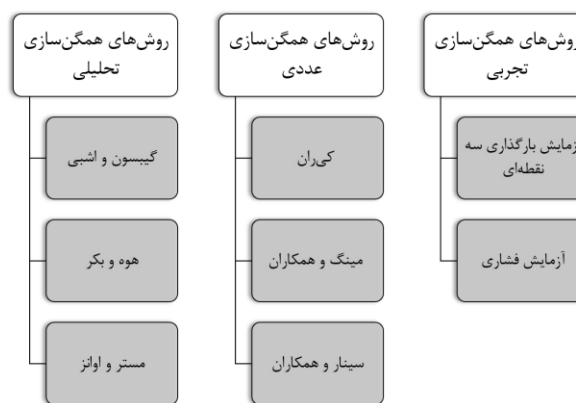
نام روش	ویژگی
کی‌ران ^۷	این روش از تحلیل اجزاء محدود برای مقایسه‌ی نیروهای واکنش در یک مدل دقیق از لانه‌زنبوری و یک مدل همگن‌شده استفاده می‌کند. ابتدا یک مدل ساندویچی شامل هسته‌ی واقعی ساخته می‌شود و سپس یک مدل معادل با خواص مکانیکی تخمین‌زده‌شده ایجاد می‌شود. اختلاف بین نیروهای واکنش در دو مدل برای ارزیابی دقت مدل همگن‌شده مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در یک مدل‌سازی دقیق، ساختار لانه‌زنبوری شامل سلول‌های شش‌ضلعی متصل به هم است که به دلیل توزیع نیرو و تغییر شکل‌های پیچیده، نیازمند شبکه‌بندی بسیار دقیق و تعداد بالایی از المان‌های اجزاء محدود است. به کمک روش همگن‌سازی، ساختار سلولی به‌عنوان یک محیط پیوسته با خواص مکانیکی مؤثر در نظر گرفته می‌شود. این روش بر اساس حجم نماینده صورت می‌گیرد، که یک نمونه کوچک اما نماینده کل ساختار است (شکل ۳).



شکل (۳): مفهوم رویکرد همگن‌سازی در تعیین خواص مکانیکی

رویکرد همگن‌سازی در تعیین خواص مکانیکی ساختار لانه زنبوری به سه دسته اصلی تحلیلی، عددی و تجربی تقسیم می‌شوند (شکل ۴).



شکل (۴): روش‌های مختلف همگن‌سازی [۲۸]

۱. روش‌های همگن‌سازی تحلیلی: روش‌های همگن‌سازی

تحلیلی مبتنی بر مدل‌های ریاضی و روابط تئوری مکانیک جامدات

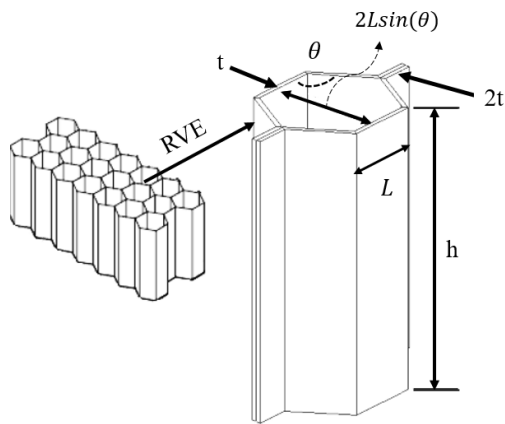
⁶ Master & Evans

⁷ Kayran

⁴ Gibson & Ashby

⁵ Hohe & Becker

هندسه در سازه های ساندویچی به ویژه در کاربردهای فضایی مورد استفاده گسترده قرار گیرد. در این راستا، ابعاد سلول واحد نماینده باید به گونه ای انتخاب شود که بتواند به صورت آماری و ماکروسکوپی، رفتار مکانیکی کل سازه را نمایش دهد. برای انتخاب حجم واحد نماینده، دو معیار اصلی باید رعایت شود: نخست، اندازه آن باید به گونه ای باشد که تغییر در ابعاد تأثیر معناداری بر خواص مکانیکی نظیر مدول های الاستیسیته و ضرایب پواسون نداشته باشد. دوم، حجم واحد نماینده باید بتواند توزیع های ارتوتروپیک و ناهمسانگرد مواد را در راستاهای مختلف به درستی نمایش دهد (شکل ۵).



شکل (۵): هندسه حجم واحد در هسته یک سازه ساندویچ پنل

شرایط مرزی اعمال شده بر سلول واحد نماینده، باید با هندسه ی سلول تطابق داشته باشد تا دقت تحلیل افزایش یابد. متغیرهای هندسی مؤثر در انتخاب حجم واحد نماینده شامل طول ضلع سلول، ضخامت دیواره، ارتفاع سلول و نسبت های ابعادی آن است که همگی بر رفتار مکانیکی سازه تأثیر گذارند. این متغیرها تعیین کننده توزیع تنش و کرنش و همچنین نحوه انتقال بار درون سازه هستند. بنابراین، انتخاب صحیح سلول واحد نماینده علاوه بر کاهش پیچیدگی محاسباتی، دقت شبیه سازی های عددی را نیز بهبود می بخشد [۳۰-۲۹].

تخصیص مواد در مدل سازی سازه های لانه زنبوری تأثیر بسزایی در دقت تحلیل های مکانیکی دارد. انتخاب مواد باید بر اساس خواص مکانیکی نظیر مدول الاستیسیته، چگالی و استحکام تسلیم صورت گیرد. آلیاژهای آلومینیوم، به ویژه نوع ۵۰۵۲، به دلیل ترکیب

مینگ و همکاران ^۸	در این روش، یک حجم نماینده از هسته ی لانه زنبوری انتخاب شده و تحت بارگذاری های مختلف در تحلیل اجزاء محدود بررسی می شود. سپس با استفاده از رابطه های سازه ای و معادلات حاکم بر مکانیک جامدات، خواص مکانیکی معادل استخراج می شود. این روش دقت بالایی در تحلیل تغییر شکل های درون صفحه ای دارد.
سینار و همکاران ^۹	این روش از تحلیل مودال و بهینه سازی عددی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک استفاده می کند. ابتدا یک مدل سه بعدی از هسته ی لانه زنبوری ساخته شده و فرکانس های طبیعی آن محاسبه می شود. سپس، یک مدل همگن شده دو بعدی ایجاد شده و خواص مکانیکی مؤثر آن به گونه ای تنظیم می شود که فرکانس های طبیعی مدل همگن شده با مدل واقعی مطابقت داشته باشد.

۳. روش های همگن سازی تجربی: این روش ها بر پایه

آزمایش های مکانیکی عملی طراحی شده اند که در آن ها خواص مؤثر هسته های لانه زنبوری مستقیماً از داده های آزمایشگاهی استخراج می شود. این روش ها برای کالیبره کردن مدل های تحلیلی و عددی و بررسی رفتار واقعی سازه ها استفاده می شوند [۲۸].

در این پژوهش، به جای مدل سازی مستقیم تمام ریزساختارها یک تحلیل اجزاء محدود در مقیاس میکروسکوپی انجام شده و خواص مکانیکی همگن شده استخراج می شود. این داده ها سپس در تحلیل های ماکروسکوپی بدون نیاز به انجام شبیه سازی های چندمقیاسی هم زمان، به کار گرفته می شوند.

۲-۲- اصول انتخاب هندسه سلول واحد و تخصیص مواد در

تحلیل سازه های لانه زنبوری

انتخاب هندسه و ابعاد مناسب سلول واحد نماینده (سلول واحد نماینده) در تحلیل سازه های لانه زنبوری تأثیر مستقیمی بر دقت نتایج عددی دارد. حجم واحد نماینده کوچک ترین بخش تکرارشونده ای از ساختار است که باید ویژگی های مکانیکی کل سازه را به طور دقیق نمایش دهد. برای این منظور، رعایت الزامات هندسی از جمله تقارن، تناسب با ساختار کلی و بازنمایی صحیح رفتار مکانیکی ضروری است. هندسه شش ضلعی به عنوان رایج ترین ساختار در هسته های لانه زنبوری، تعادلی بهینه میان استحکام و جرم ایجاد کرده و به دلیل توزیع یکنواخت تنش، کارایی بالایی در برابر بارهای فشاری و خمشی دارد. این ویژگی ها باعث شده است که این

^۹ Cinar et al

^۸ Ming et al.

۰/۰۰۱ اعمال می‌شود، در حالی که جابجایی‌ها در راستای محورهای Y و Z برابر صفر در نظر گرفته می‌شوند. این شرایط برای شبیه‌سازی بارگذاری‌هایی که تاثیر عمده‌ای در راستای محور X دارند، مناسب است. معادلات حاکم بر این نوع شرایط مرزی در رابطه ۲ تا ۴ آورده شده است:

$$u_x(L_x, y, z) = u_x(0, y, z) + \epsilon_x L_x \quad (2)$$

$$u_y(L_x, y, z) = u_y(0, y, z) + \gamma_{xy} L_x \quad (3)$$

$$u_z(L_x, y, z) = u_z(0, y, z) + \gamma_{xz} L_x \quad (4)$$

شرایط مرزی در راستای محور Y : در این حالت، جابجایی در راستای محور Y به مقدار ۰/۰۰۱ تنظیم می‌شود، و جابجایی‌ها در راستای محورهای X و Z برابر صفر خواهند بود. این شرایط مرزی زمانی استفاده می‌شود که بارگذاری عمده در جهت محور Y اعمال شود و تاثیرات در راستای این محور مورد نظر باشد. معادلات حاکم بر این نوع شرایط مرزی در رابطه ۵ تا ۷ آورده شده است:

$$u_x(x, L_y, z) = u_x(x, 0, z) \quad (5)$$

$$u_y(x, L_y, z) = u_y(x, 0, z) + \epsilon_y L_y \quad (6)$$

$$u_z(x, L_y, z) = u_z(x, 0, z) + \gamma_{yz} L_y \quad (7)$$

شرایط مرزی در راستای محور Z : در این حالت، جابجایی در راستای محور Z به مقدار ۰/۰۰۱ تعیین می‌شود، در حالی که جابجایی‌ها در راستای محورهای X و Y برابر صفر قرار می‌گیرند. این شرایط مرزی برای تحلیل‌هایی که بارگذاری در جهت محور Z انجام می‌شود، کاربرد دارد. معادلات حاکم بر این نوع شرایط مرزی در رابطه ۸ تا ۱۰ آورده شده است:

$$u_x(x, y, L_z) = u_x(x, y, 0) \quad (8)$$

$$u_y(x, y, L_z) = u_y(x, y, 0) \quad (9)$$

$$u_z(x, y, L_z) = u_z(x, y, 0) + \epsilon_z L_z \quad (10)$$

جلوگیری از حرکات جسم صلب: حرکات جسم صلب^{۱۱} به حرکت‌هایی اطلاق می‌شود که در آن‌ها جسم بدون تغییر شکل، تنها

مناسب استحکام و وزن کم، در ساخت لانه‌زنبوری‌ها کاربرد گسترده‌ای دارند. تحلیل‌های عددی و تجربی نشان داده‌اند که استفاده از آلومینیوم ۵۰۵۲ در لانه‌زنبوری‌ها منجر به بهبود رفتار مکانیکی تحت بارگذاری فشاری می‌شود. همچنین، کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف کربن به دلیل نسبت بالای استحکام به وزن، گزینه‌های مناسبی برای مدل‌سازی لانه‌زنبوری‌ها هستند. انتخاب ماده مناسب باید با توجه به کاربرد نهایی سازه و شرایط بارگذاری مورد انتظار انجام شود تا عملکرد بهینه حاصل گردد [۳۱].

۲-۳- تعیین شرایط مرزی در تحلیل سازه‌های لانه‌زنبوری

برای تحلیل دقیق سازه‌های لانه‌زنبوری، دو نوع شرایط مرزی تعریف می‌شود:

۲-۳-۱- شرایط مرزی دوره‌ای^{۱۰}

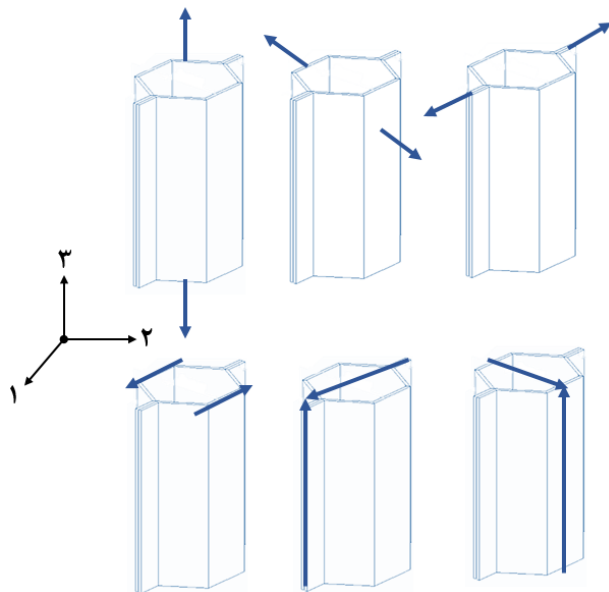
این نوع شرایط مرزی برای مواد یا ساختارهای تکرارشونده همچون لانه‌زنبوری‌ها به کار می‌رود. در سازه‌های لانه‌زنبوری که به صورت ساختارهای شبکه‌ای یا سلولی طراحی می‌شوند، رفتار هر واحد هندسی به گونه‌ای است که مشابه آن در سایر نقاط ساختار تکرار می‌شود. بنابراین، برای شبیه‌سازی رفتار کلی سازه به جای مدل‌سازی کامل ساختار، می‌توان از شرایط مرزی دوره‌ای بهره برد تا تنها یک بخش از ساختار مدل‌سازی شود. در این روش، حرکت یا بارگذاری وارد شده به یک سلول، به‌طور دوره‌ای در سایر سلول‌ها نیز منتقل می‌شود، که باعث افزایش کارایی تحلیل‌ها می‌گردد. در تحلیل سازه‌های لانه‌زنبوری، برای مدل‌سازی دقیق رفتار سیستم تحت بارگذاری‌های مختلف، باید شرایط مرزی خاصی را اعمال شود. این شرایط مرزی تعیین می‌کنند که در هر بارگذاری، کدام حرکات یا تغییرات در سازه محدود شوند و کدام‌ها آزاد باقی بمانند. در این راستا، سه حالت اصلی شرایط مرزی در نظر گرفته می‌شود که در هر یک از آن‌ها، یکی از جابجایی‌ها در راستای محورهای سه‌گانه (X, Y, Z) به مقدار ثابت ۰/۰۰۱ تنظیم شده و مقادیر سایر جابجایی‌ها برابر صفر قرار می‌گیرند. این شرایط مرزی به شرح زیر دسته‌بندی می‌شوند:

شرایط مرزی در راستای محور X : در این حالت، در سطوح عمود بر محور X ، جابجایی در راستای محور X به مقدار

^{۱۱} Rigid Body Motion

^{۱۰} Periodic Boundary Conditions

آنها در مقیاس ماکروسکوپی، از حجم واحد نماینده استفاده می شود. در این فرایند، با استفاده از شرایط بارگذاری مختلف و تحلیل نیروهای وارد بر سطح سلول، ماتریس سفتی مواد به دست آمده و خواص مکانیکی از آن استخراج می شود. برای انجام این محاسبات، شش حالت بارگذاری مختلف در نظر گرفته می شود که شامل بارگذاری های کششی و برشی در جهتهای مختلف است. در شکل ۶ شماتیک این شش حالت بارگذاری روی حجم واحد نماینده نشان داده شده است.



شکل (۶): شماتیک شش حالت بارگذاری روی حجم واحد نماینده

برای یک ماده ارتوتروپیک، رابطه بین تنش و کرنش از طریق معادله ۱ محاسبه می گردد.

زمانی که کرنش در راستای محور X به اندازه 0.001 اعمال می شود و سایر کرنش ها صفر در نظر گرفته می شوند، در واقع بار کششی تک جهته در راستای محور X اعمال می شود. در این حالت، ستون اول ماتریس سفتی به دست می آید که ارتباط میان کرنش اعمال شده در راستای X و تنش های ناشی از آن را نشان می دهد. در این حالت، رابطه تنش-کرنش برای یک ماده ارتوتروپیک به صورت معادله ۱۴ خواهد بود:

جابجا می شود (مثل چرخش یا جابجایی آزاد). برای جلوگیری از این نوع حرکت ها در سیستم (که می تواند منجر به نتایج غلط شود)، باید اطمینان حاصل شود که هیچ قسمتی از سازه به طور آزاد و بدون محدودیت حرکت نکند. برای این کار معمولاً در بعضی از نقاط، شرایط اضافی مانند قرار دادن جابجایی ها در صفر یا اعمال نیروی ثابت به سیستم اعمال می شود. معادلات حاکم بر این نوع شرایط مرزی در رابطه ۱۱ تا ۱۳ آمده است:

$$u_x(\text{a point with } x = 0) = 0 \quad (11)$$

$$u_y(\text{a point with } y = 0) = 0 \quad (12)$$

$$u_z(\text{a point with } z = 0) = 0 \quad (13)$$

۲-۳-۲- شرایط مرزی غیر دوره ای^{۱۲}

این نوع شرایط مرزی در تحلیل های غیر تکرار شونده یا مدل سازی بخشی از سازه ها استفاده می شود. در این روش، هیچ گونه تکرار یا پیوند مستقیم میان واحدهای مجاور وجود ندارد و تنها بخشی از ساختار که مورد تحلیل قرار می گیرد، مدل سازی می شود. این نوع شرایط زمانی کاربرد دارد که نیاز به تحلیل بخش های خاصی از سازه باشد یا زمانی که رفتار سیستم تحت تاثیر شرایط محیطی یا بارگذاری های خاص قرار دارد.

سازه های لانه زنبوری به دلیل ماهیت تکرار شونده خود، اغلب با استفاده از شرایط مرزی دوره ای تحلیل می شوند. در این روش، رفتار مکانیکی یک حجم واحد تحلیل شده و به کل سازه تعمیم داده می شود، زیرا واحدهای مجاور رفتار مشابهی دارند.

با این حال، شرایط مرزی غیر دوره ای نیز در برخی موارد خاص در سازه های لانه زنبوری کاربرد دارند، از جمله:

۱. زمانی که بخشی از سازه تحت بارگذاری موضعی یا متمرکز قرار دارد، مانند تحلیل آسیب یا تغییر شکل در یک ناحیه خاص.
۲. در مواردی که نیاز است تنها یک بخش محدود از سازه تحلیل شود، مانند لبه ها یا نقاط اتصال.

۲-۴- تعیین خواص مکانیکی سازه های لانه زنبوری

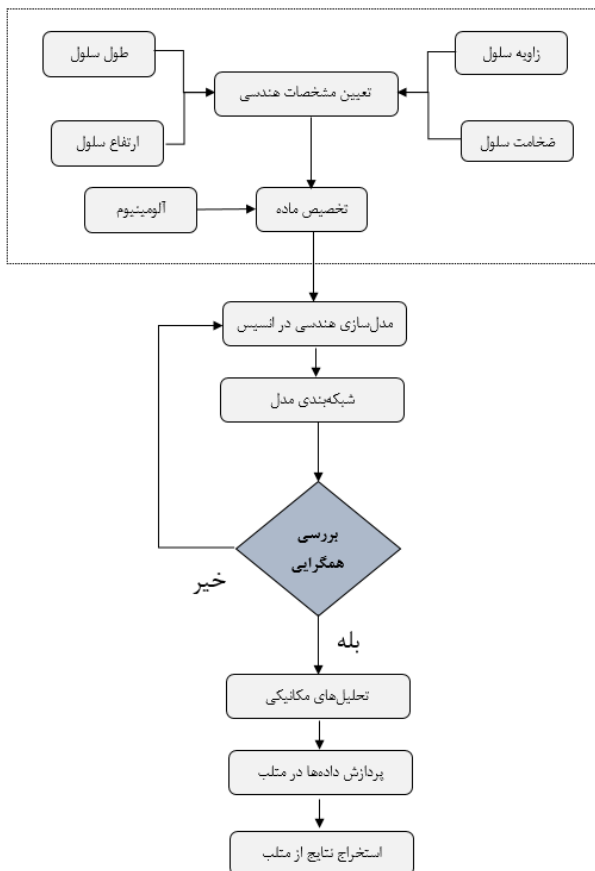
در مواد ارتوتروپیک، خواص الاستیک در سه جهت اصلی متغیر بوده و می توانند به صورت متفاوتی در راستاهای مختلف رفتار کنند. برای محاسبه ثابت های الاستیکی مواد ارتوتروپیک و توصیف رفتار

¹² Non-Periodic Boundary Conditions

۳- تحلیل عددی و استخراج خواص مکانیکی سازه‌های لانه‌زنبوری

تحلیل عددی سازه‌های لانه‌زنبوری به منظور تعیین خواص مکانیکی مؤثر، نیازمند یک روش سیستماتیک است که بتواند رفتار این ساختارها را با دقت بالا شبیه‌سازی کند. از آنجا که این سازه‌ها دارای ساختاری متناوب و ناهمسانگرد هستند، تعیین خواص مکانیکی آن‌ها مستلزم مدل‌سازی هندسی دقیق، مش‌بندی بهینه، تحلیل‌های مکانیکی و پردازش داده‌های استخراج‌شده از شبیه‌سازی‌های عددی است. در این بخش، یک روش عددی جامع برای تعیین خواص مکانیکی این سازه‌ها ارائه می‌شود که شامل مراحل مدل‌سازی، مش‌بندی، تحلیل مکانیکی، پردازش داده‌ها و بهینه‌سازی است.

در شکل ۷، فلوچارت کلی روش تحلیل ارائه شده و سپس هر یک از مراحل اصلی این فرآیند به تفصیل مورد بررسی قرار می‌گیرد.



$$\begin{pmatrix} D_{11} \\ D_{21} \\ D_{31} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{1}{0.001} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \end{pmatrix} \quad (14)$$

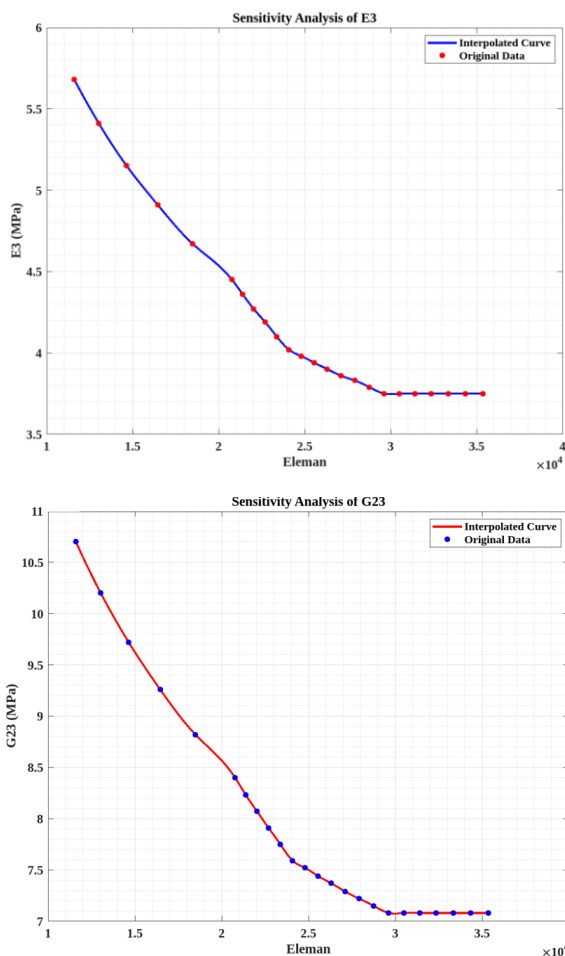
شرایط مرزی دوره‌ای مطابق با نوع بارگذاری بر حجم واحد اعمال می‌گردد. روابط موجود در معادله ۱۵ شرایط مرزی را نشان می‌دهد.

$$\begin{pmatrix} u_x(L_x, y, z) = u_x(0, y, z) + \epsilon L_x \\ u_y(L_x, y, z) = u_y(0, y, z) \\ u_z(L_x, y, z) = u_z(0, y, z) \\ u_x(x, L_y, z) = u_x(x, 0, z) \\ u_y(x, L_y, z) = u_y(x, 0, z) \\ u_z(x, L_y, z) = u_z(x, 0, z) \\ u_x(x, y, L_z) = u_x(x, y, 0) \\ u_y(x, y, L_z) = u_y(x, y, 0) \\ u_z(x, y, L_z) = u_z(x, y, 0) \end{pmatrix} \quad (15)$$

از ترکیب معادلات ۱۴ و ۱۵ تکرار این مراحل برای دو جهت دیگر، درایه‌های ماتریس C محاسبه می‌گردد. با معکوس سازی این ماتریس می‌توان خواص مکانیکی سازه لانه‌زنبوری شامل مدول‌های الاستیسیته، مدول‌های برشی و ضرایب پواسون را بدست آورد (معادله ۱۶).

$$[C^{-1}] = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_x} & \frac{-v_{yx}}{E_y} & \frac{-v_{zx}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-v_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & \frac{-v_{zy}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-v_{xz}}{E_x} & \frac{-v_{yz}}{E_y} & \frac{1}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{yz}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xz}} \end{pmatrix} \quad (16)$$

به منظور بررسی استقلال نتایج به شبکه بندی، یک هسته لانه زنبوری با ضخامت دیواره ۰/۰۵۱ میلی متر، طول ضلع ۹.۳۷۵ میلی متر و زاویه سلولی ۶۰ درجه تحت بارگذاری محوری و برشی مورد بررسی قرار گرفت. مدل با پنج سطح مختلف از اندازه مش تحلیل شد و تغییرات مدول الاستیسیته و مدول برشی استخراج گردید. نتایج این بررسی در نمودار موجود در شکل ۹ آورده شده است. براساس این شکل در ۲۷ هزار المان، نتایج به همگرایی می رسد.



شکل ۹: تحلیل حساسیت به شبکه بندی

۳-۲- تحلیل های مکانیکی

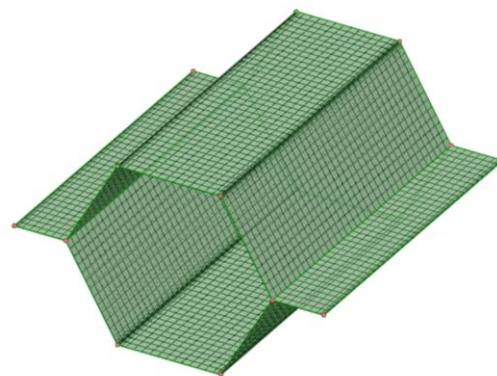
به منظور تعیین خواص مکانیکی مؤثر سازه های لانه زنبوری، مجموعه ای از تحلیل های مکانیکی در محیط نرم افزار انسیس انجام

شکل ۷: خلاصه ای از مراحل مورد نیاز برای محاسبه خواص مکانیکی سازه لانه زنبوری با استفاده از روش ارائه شده در این مقاله

۳-۱- مدل سازی هندسی و تولید شبکه مش

در نخستین مرحله، هندسه حجم واحد نماینده که کوچک ترین بخش تکرارشونده ی سازه های لانه زنبوری است، در محیط نرم افزار انسیس ایجاد می شود. متغیرهای هندسی نظیر طول ضلع سلول، ضخامت دیواره، ارتفاع سلول و زاویه سلول چگالی ماده پایه به گونه ای تنظیم می شوند که نمایانگر رفتار مکانیکی کل ساختار باشند. پس از تکمیل مدل سازی، فرآیند شبکه بندی تطبیقی^{۱۳} به منظور افزایش دقت تحلیل انجام شده و با استفاده از مطالعه همگرایی مش اندازه و چگالی مش بهینه می شود تا خطای عددی به حداقل رسد.

در فرآیند شبیه سازی و تحلیل عددی سازه های لانه زنبوری، به منظور افزایش دقت محاسبات و دستیابی به نتایج معتبر، شبکه بندی حجم واحد نماینده با استفاده از المان های مربعی انجام شد. این نوع شبکه بندی به دلیل ساختار منظم و هندسه مناسب، قادر است توزیع تنش و کرنش را با دقت بالاتری مدل سازی کند. همچنین، استفاده از المان مربعی به کاهش خطاهای عددی ناشی از تغییر شکل های پیچیده و افزایش دقت همگرایی در تحلیل های عددی کمک می کند. اندازه و تراکم المان ها به گونه ای تنظیم شد که ضمن حفظ دقت بالا، هزینه های محاسباتی بهینه باقی بماند. این شبکه بندی برای مدل سازی دقیق تر رفتار مکانیکی سازه لانه زنبوری تحت بارگذاری های مختلف و استخراج خواص مکانیکی مؤثر سلول واحد نماینده استفاده شده است (شکل ۸).



شکل ۸: مدل شبکه بندی شده حجم واحد نماینده

¹³ Adaptive Meshing

۴- نتایج و تحلیل داده‌ها

ویژگی‌های مکانیکی سازه‌های لانه‌زنبوری به‌شدت تحت تأثیر متغیرهای هندسی آن‌ها قرار دارد. در بین این متغیرها، ضخامت دیواره سلول، زاویه سلول و اندازه ضلع سلول از مهم‌ترین عواملی هستند که بر رفتار مکانیکی ساختار لانه‌زنبوری تأثیر می‌گذارند. بررسی دقیق این متغیرها از طریق تحلیل‌های پارامتریک، درک بهتری از رفتار مکانیکی این ساختارها فراهم کرده و امکان طراحی بهینه را فراهم می‌سازد. در این بخش، تأثیر ضخامت دیواره سلول و زاویه سلول بر مدول الاستیسیته، مدول برشی و ضرایب پواسون سازه‌های لانه‌زنبوری بررسی می‌شود. این متغیرها به صورت مستقیم بر توزیع تنش و کرنش در ساختار، تأثیر گذاشته و تعیین اثر آن‌ها از طریق تحلیل عددی، اطلاعات ارزشمندی برای بهینه‌سازی طراحی ارائه خواهد کرد.

در این مقاله، مدول‌های الاستیسیته و برشی هسته‌ی لانه‌زنبوری با استفاده از روش همگن‌سازی عددی و تحلیل اجزای محدود محاسبه شده‌اند. این روش امکان تعیین رفتار مکانیکی مؤثر این ساختارها را بدون نیاز به مدل‌سازی تمام جزئیات هندسی در مقیاس ماکروسکوپی فراهم می‌کند. در گام نخست، یک حجم واحد نماینده (RVE) از ساختار لانه‌زنبوری در نرم‌افزار ANSYS مدل‌سازی شده است. این سلول شامل متغیرهای هندسی کلیدی مانند ضخامت دیواره، ارتفاع سلول و زاویه سلولی است. انتخاب حجم نماینده باید به گونه‌ای باشد که رفتار مکانیکی کل سازه را بازتاب دهد. در ادامه، شرایط مرزی دوره‌ای به‌منظور نمایش رفتار یکپارچه ساختار و جلوگیری از اثرات لبه‌ای اعمال شد. به‌منظور استخراج مدول‌های الاستیسیته، بارگذاری‌های کششی و فشاری در راستاهای محوری اعمال شد. در هر تحلیل، کرنش کنترل‌شده‌ی کوچک به مدل داده شد و واکنش‌های نیرو در مرزهای مدل ثبت گردید. سپس، با استفاده از روابط تنش-کرنش خطی و محاسبه‌ی تنش میانگین در سطح مقطع، مدول‌های الاستیسیته در راستاهای مختلف به‌دست آمدند. برای استخراج مدول‌های برشی نیز، بارگذاری برشی کنترل‌شده در راستاهای مختلف اعمال شد و تغییر شکل‌های ناشی از این بارگذاری ثبت و مدول‌های برشی استخراج شدند.

پس از تکمیل تحلیل‌ها، داده‌های عددی در قالب ماتریس سفتی) سازمان‌دهی شدند و با معکوس‌سازی این ماتریس خواص

می‌شود. این تحلیل‌ها شامل تحلیل استاتیکی و تحلیل برشی هستند که هر یک نقش مهمی در استخراج متغیرهای مکانیکی مؤثر ایفا می‌کنند. در این بخش، روش اعمال بارگذاری، شرایط مرزی، نحوه‌ی استخراج داده‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱-۲-۳- تحلیل استاتیکی برای تعیین مدول الاستیسیته

تحلیل استاتیکی به‌منظور تعیین مدول الاستیسیته و در راستاهای مختلف سازه انجام می‌شود. در این تحلیل، حجم واحد نماینده تحت بارگذاری کششی و فشاری در راستاهای محوری قرار می‌گیرد. برای این منظور، یک جابجایی کنترل‌شده بر لبه‌های مشخصی از اعمال شده و نیروهای واکنشی در راستای دیگر اندازه‌گیری می‌شود. توزیع کرنش و تنش حاصل از این بارگذاری برای تعیین ضرایب الاستیک مؤثر استفاده می‌شود. در این مرحله، فرضیات زیر در نظر گرفته می‌شود:

- تنش‌های اعمال شده در حد الاستیک باقی می‌مانند.
- اثرات غیرخطی نظیر تسلیم یا تغییرشکل‌های بزرگ در این تحلیل نادیده گرفته می‌شوند.
- شرایط مرزی دوره‌ای برای افزایش دقت تحلیل به‌کار گرفته می‌شود.

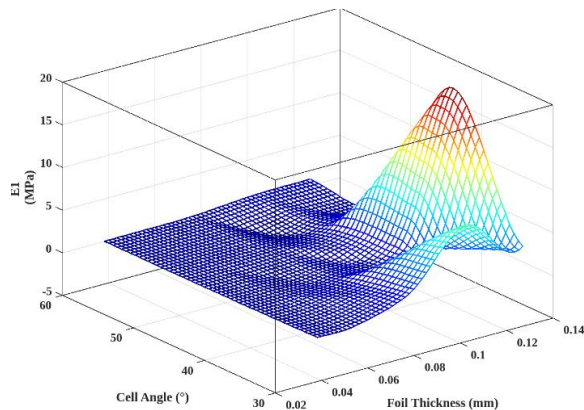
خروجی‌های این تحلیل شامل مدول‌های الاستیسیته در راستاهای طولی و عرضی و همچنین نسبت پواسون مؤثر است.

۲-۲-۳- تحلیل برشی برای تعیین مدول برشی مؤثر

در این بخش، سازه لانه‌زنبوری تحت بارگذاری برشی خالص قرار گرفته و مدول برشی استخراج می‌شود. برای این منظور، لبه‌های بالا و پایین حجم واحد نماینده به گونه‌ای جابجا می‌شوند که تغییر شکل برشی در ساختار ایجاد گردد. در این تحلیل، تأثیر ضخامت دیواره‌های سلولی، نسبت ابعادی و زاویه سلول‌های لانه‌زنبوری بر مقدار مدول برشی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

تحلیل‌های مکانیکی ارائه‌شده در این بخش، مجموعه‌ای از آزمون‌های عددی را دربرمی‌گیرد که امکان استخراج دقیق خواص مکانیکی مؤثر سازه‌های لانه‌زنبوری را فراهم می‌کنند. تحلیل استاتیکی، اطلاعات مربوط به سفتی محوری و ضرایب پواسون را ارائه می‌دهد، درحالی‌که تحلیل برشی به تعیین پارامترهای برشی مؤثر می‌پردازد.

الاستیسیته کاهش می‌یابد. این کاهش به دلیل افزایش انعطاف‌پذیری ساختار در زوایای بالاتر است که موجب کاهش مقاومت در برابر تغییر شکل‌های محوری می‌شود.

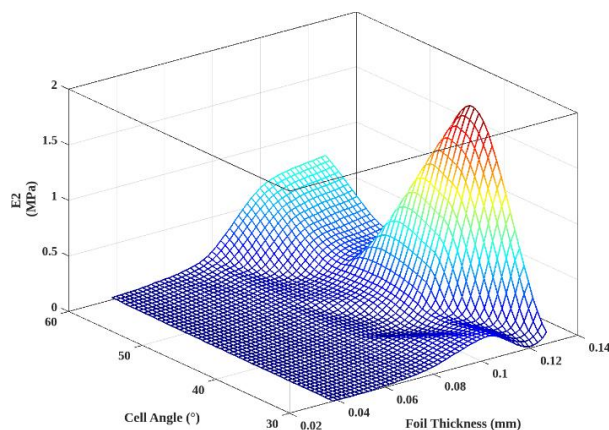


شکل ۱۰: تأثیر ضخامت و زاویه سلول ساختار لانه زنبوری بر مدول

الاستیسیته در راستای محوری E_1

۴-۱-۲- بررسی مدول الاستیسیته در راستای عرضی (E_2)

تغییرات ضخامت دیواره سلول تأثیر مشابهی بر مدول الاستیسیته در راستای عرضی دارد. با افزایش ضخامت دیواره، مدول الاستیسیته در راستای عرضی نیز افزایش می‌یابد. این افزایش به دلیل تقویت ساختار در برابر تنش‌های عرضی است. در این راستا، زاویه سلول نیز تأثیرات خود را به طور مشابهی نشان می‌دهد. با افزایش زاویه سلول، مقاومت سازه در برابر تغییر شکل‌های عرضی کاهش می‌یابد و مدول الاستیسیته در این راستا کاهش می‌یابد (شکل ۱۱).



شکل ۱۱: تأثیر ضخامت و زاویه سلول ساختار لانه زنبوری بر مدول

الاستیسیته در راستای عرضی E_2

مکانیکی همگن‌شده‌ی سازه تعیین شد. برای اعتبارسنجی روش عددی، نتایج به دست آمده با مدل تحلیلی گیبسون-اشبی مقایسه شدند.

جدول ۴ متغیرهای هندسی مورد مطالعه و محدوده تغییرات آن‌ها را نشان می‌دهد که با توجه به داده‌های ارائه شده در کاتالوگ شرکت Hexweb در تحلیل عددی برای بررسی تأثیر این متغیرها بر خواص مکانیکی سازه‌های لانه زنبوری به کار گرفته شده‌اند.

جدول (۴): متغیرهای هندسی استفاده شده در طراحی و تحلیل سازه

لانه زنبوری

متغیر هندسی	مقادیر	واحد
ضخامت دیواره	۰/۱۲۷ - ۰/۱۰۲ - ۰/۰۷۶ - ۰/۰۵۱ - ۰/۰۳۸۱	mm
زاویه سلول	۶۰ - ۵۰ - ۴۰ - ۳۰	deg
اندازه سلول	۱۲/۵ - ۹/۳۷۵ - ۶/۳۵ - ۳/۱۷۵	mm

۴-۱- بررسی تأثیر ضخامت دیواره سلول و زاویه سلول بر

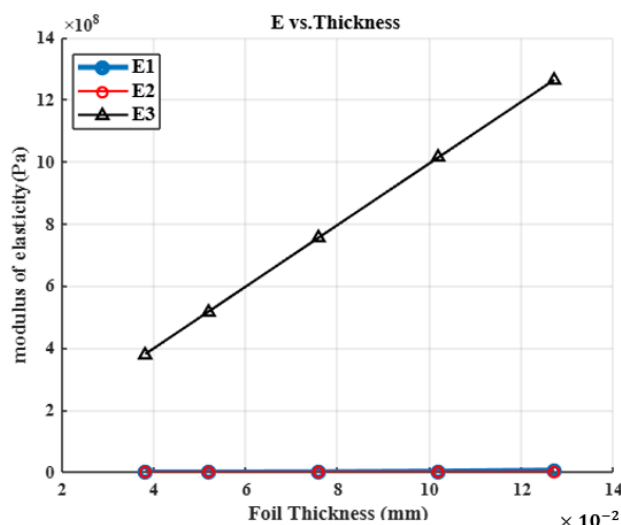
مدول الاستیسیته

مدول الاستیسیته یکی از ویژگی‌های اساسی در تحلیل رفتار مکانیکی سازه‌های لانه زنبوری است که نقش مهمی در تعیین سفتی سازه‌ها تحت بارگذاری‌های مختلف ایفا می‌کند. بررسی تأثیر متغیرهای هندسی نظیر ضخامت دیواره و سلول زاویه سلول بر مدول الاستیسیته در سازه‌های لانه زنبوری اهمیت زیادی دارد. این دو پارامتر به طور مستقیم بر توزیع تنش‌ها، کرنش‌ها و رفتار سازه تحت بارهای اعمالی تأثیر می‌گذارند. به منظور بررسی دقیق تأثیر ضخامت دیواره سلول و زاویه سلول مطابق با جدول ۴ تحلیل‌های عددی برای استخراج مدول الاستیسیته در شرایط بارگذاری مختلف مطابق با شکل ۶ انجام شده است. شکل ۹ تا ۱۱ تأثیر ضخامت و زاویه سلول سازه لانه زنبوری بر مدول الاستیسیته را نشان می‌دهد.

۴-۱-۱- بررسی مدول الاستیسیته در راستای محوری (E_1)

بر اساس شکل ۱۰ با افزایش ضخامت دیواره سلول، مدول الاستیسیته در راستای محوری افزایش می‌یابد. این امر نشان‌دهنده افزایش مقاومت ساختار در برابر تغییر شکل‌های الاستیک است. دیواره‌های ضخیم‌تر در برابر بارهای محوری مقاوم‌تر بوده و سختی کلی ساختار در این راستا افزایش می‌یابد. همچنین، زاویه سلول تأثیر قابل توجهی بر مدول الاستیسیته در راستای محوری دارد. با افزایش زاویه سلول از ۳۰ درجه به ۶۰ درجه، مدول

می‌رسد. این روند نشان‌دهنده‌ی اهمیت مدول الاستیسیته عمودی است که در واقع در سازه‌های هانی‌کامبی برای ارزیابی عملکرد کلی تحت بارهای عمودی نقش اساسی ایفا می‌کند. در طراحی سازه‌های لانه‌زنبوری مدول الاستیسیته راستای عمودی به دلیل تأثیر بیشتر بارهای عمودی، بسیار حیاتی است.

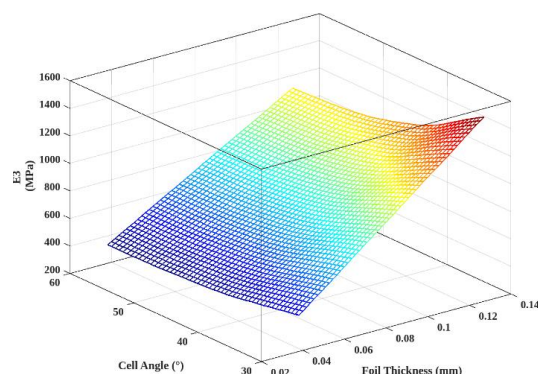


شکل (۱۳): مقایسه مدول‌های الاستیسیته سازه لانه‌زنبوری متأثر از تغییر ضخامت دیواره سلول

همان‌طور که در این نمودار شکل ۱۴ مشخص است، مدول الاستیسیته عمودی در زاویه‌های مختلف به‌طور قابل‌توجهی بزرگتر از مدول‌های محوری و عرضی است. در این نمودار، با افزایش زاویه سلول، مدول الاستیسیته عمودی نسبت به تغییرات زاویه‌ای بیشتر ثابت می‌ماند، در حالی که مدول‌های محوری و عرضی به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابند.

۳-۱-۴- بررسی مدول الاستیسیته در راستای عرضی (E_3)

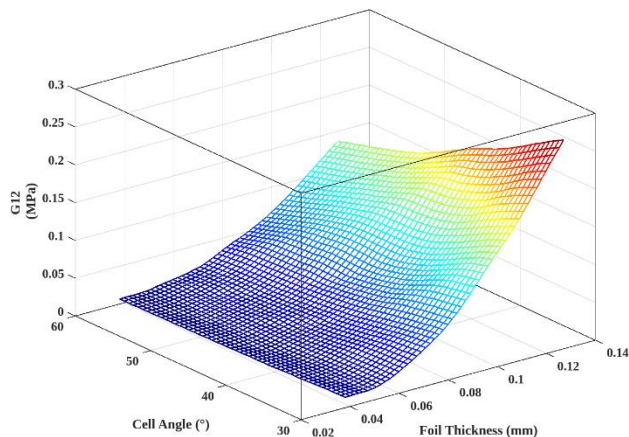
برخلاف دو راستای دیگر، مدول الاستیسیته در راستای عمودی به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر تغییرات ضخامت دیواره قرار دارد. با افزایش ضخامت دیواره، مدول الاستیسیته در این راستا نیز به‌شدت افزایش می‌یابد. این امر به دلیل کاهش تغییر شکل‌های عمودی و مقاومت بیشتر دیواره‌های سلول در برابر بارهای عمودی است. همچنین، تأثیر زاویه سلول بر مدول الاستیسیته عمودی کمتر از سایر راستاها است، اما به‌طور کلی با افزایش زاویه سلول، این مقدار نیز کاهش می‌یابد.



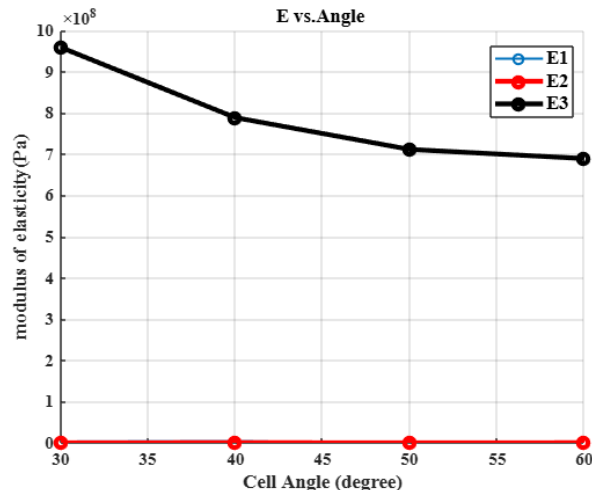
شکل (۱۴): تأثیر ضخامت و زاویه سلول ساختار لانه‌زنبوری بر مدول الاستیسیته در راستای ارتفاعی E_3

تغییرات مدول الاستیسیته در سه جهت به ویژگی‌های هندسی سازه‌های لانه‌زنبوری مرتبط است. افزایش ضخامت دیواره، سفتی ساختار را افزایش داده و باعث کاهش تغییر شکل در راستای‌های مختلف، به‌ویژه در راستای‌های محوری و عمودی می‌شود. این تغییرات موجب افزایش مدول الاستیسیته به دلیل افزایش مقاومت به کشش و فشار می‌گردد. با افزایش زاویه سلول، ساختار انعطاف‌پذیرتر می‌شود و مدول الاستیسیته کاهش می‌یابد. در زوایای بزرگ‌تر، تنش‌ها به‌طور متفاوتی توزیع شده و ساختار به راحتی تغییر شکل می‌دهد. در نمودار موجود در شکل ۱۳، مدول الاستیسیته در سه جهت سبب به ضخامت دیواره سلول مقایسه شده است. این نمودار به‌ویژه اهمیت مدول الاستیسیته در راستای عمودی را نشان می‌دهد. مدول الاستیسیته در راستای عمودی به‌وضوح بزرگتر از مدول‌های الاستیسیته در راستای محوری و عرضی است. با افزایش ضخامت دیواره سلول، مدول الاستیسیته عمودی به‌طور خطی افزایش می‌یابد و در نهایت به مقادیر بسیار بالاتر از سایر راستاها

که باعث کاهش مقاومت در برابر تغییر شکل های برشی می شود (شکل ۱۵).



شکل (۱۵): تأثیر ضخامت و زاویه سلول ساختار لانه زنبوری بر مدول برشی در راستای محوری G_{12}



شکل (۱۴): مقایسه مدول های الاستیسیته سازه لانه زنبوری متأثر از تغییر زاویه سلول

در ادامه، تأثیر زاویه و ضخامت سلول بر مدول برشی بررسی خواهد شد تا ارتباط میان این پارامترها و عملکرد کلی سازه به طور جامع تحلیل شود.

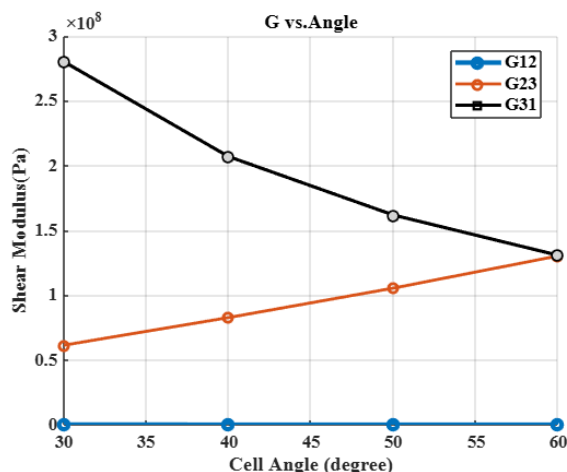
۴-۲-۴ بررسی تأثیر زاویه سلول و ضخامت سلول بر مدول برشی

مدول های برشی در سه راستا از جمله ویژگی های کلیدی در تحلیل رفتار سازه های لانه زنبوری هستند که نشان دهنده مقاومت سازه در برابر تغییر شکل های برشی است. تغییرات هندسی مانند ضخامت دیواره سلول و زاویه سلول تأثیر زیادی بر این پارامترها دارند. در این بخش، تأثیر این دو پارامتر بر مدول برشی بررسی شده و روند تغییرات آنها بر اساس داده های به دست آمده از تحلیل های عددی تفسیر می شود.

۴-۲-۴-۱ بررسی مدول برشی (G_{12})

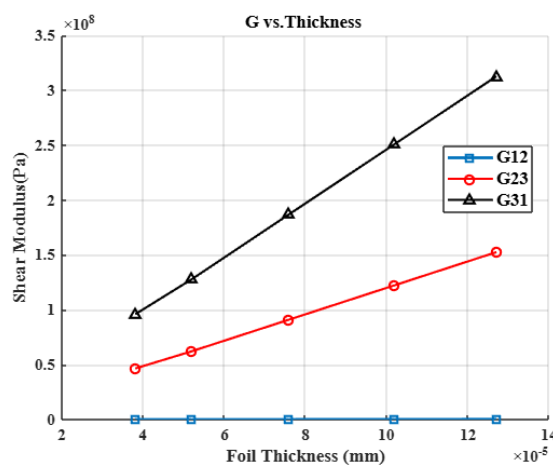
با افزایش ضخامت دیواره سلول، مدول برشی G_{12} به طور خطی افزایش می یابد. این افزایش به دلیل افزایش مقاومت دیواره ها در برابر تغییر شکل های برشی است. دیواره های ضخیم تر به طور مؤثری در برابر نیروهای برشی مقاومت بیشتری نشان می دهند که منجر به بهبود مدول برشی در این راستا می شود. با افزایش زاویه سلول از ۳۰ درجه به ۶۰ درجه، مدول برشی کاهش می یابد. این کاهش به دلیل تغییر جهت دیواره های سلولی و افزایش انعطاف پذیری ساختار است

در نمودار موجود در شکل ۱۸، مدول برشی در سه جهت برحسب زاویه سلول مقایسه شده است. این نمودار به‌ویژه اهمیت مدول برشی در راستای ۲ و ۳ همچنین ۱ و ۳ را نشان می‌دهد.

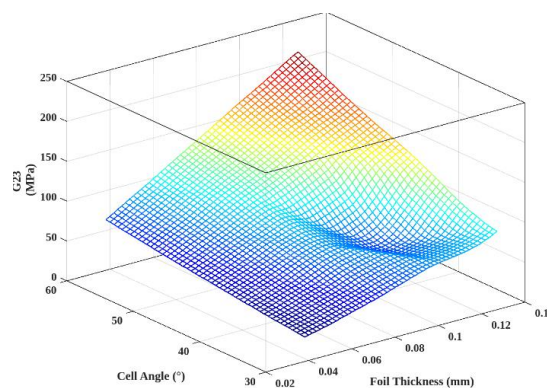


شکل (۱۸): مقایسه مدول‌های برشی سازه لانه‌زنبوری متأثر از تغییر زاویه سلول

در نمودار موجود در شکل ۱۹، مدول برشی در سه جهت برحسب تغییر ضخامت سلول مقایسه شده است. این نمودار به‌ویژه اهمیت مدول برشی در راستای ۲ و ۳ همچنین ۱ و ۳ را نشان می‌دهد. طبق این نمودار مشخص است که با افزایش ضخامت دیواره سلول، مدول برشی افزایش یافته است.



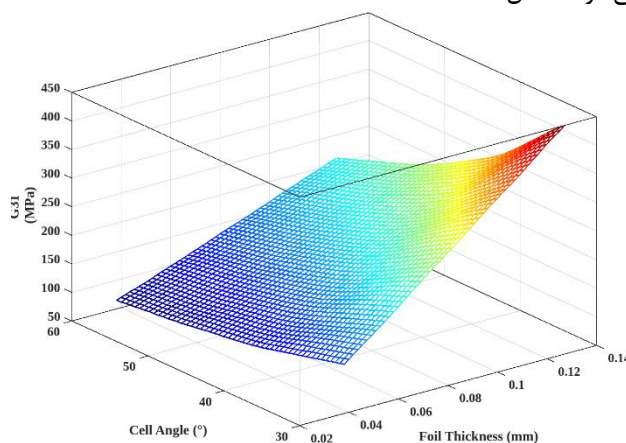
شکل (۱۹): مقایسه مدول‌های برشی سازه لانه‌زنبوری متأثر از تغییر ضخامت سلول



شکل (۱۶): تأثیر ضخامت و زاویه سلول ساختار لانه‌زنبوری بر مدول برشی در راستای محوری G_{23}

۳-۲-۴- بررسی مدول برشی (G_{31})

مشابه سایر راستاها، افزایش ضخامت دیواره سلول موجب افزایش مدول برشی می‌شود. این نشان‌دهنده افزایش مقاومت ساختار در برابر تغییر شکل‌های برشی در راستای عمودی است. دیواره‌های ضخیم‌تر مقاومت بیشتری در برابر تغییر شکل‌های برشی عمودی دارند و سفتی ساختار را در این راستا افزایش می‌دهند. این تحلیل نشان می‌دهد که مدول برشی در راستای ۳ و ۱ به طور غیرخطی تحت تأثیر زاویه سلول قرار دارد. به‌طور خاص، در زاویه‌های کمتر (۳۰ تا ۵۰ درجه) افزایش مدول برشی را شاهد هستیم که به دلیل نحوه چیدمان دیواره‌ها و رفتار مکانیکی بهینه در این زوایا باشد. اما در زاویه‌های بزرگ‌تر (بالای ۵۰ درجه)، ساختار لانه‌زنبوری انعطاف‌پذیرتر می‌شود و این باعث کاهش سفتی ساختار در برابر تغییر شکل‌های برشی عمودی و در نتیجه کاهش مدول برشی می‌شود (شکل ۱۷).



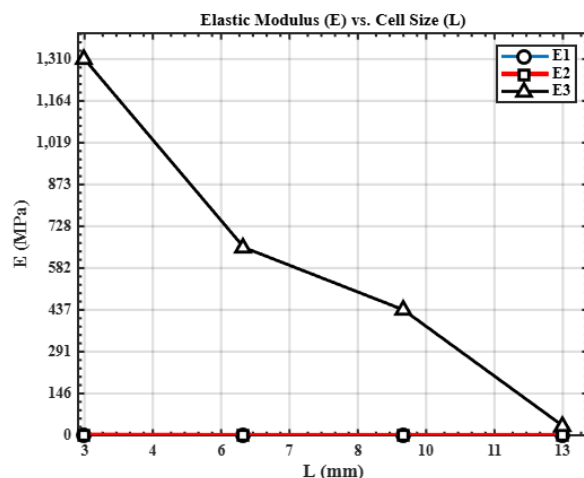
شکل (۱۷): تأثیر ضخامت و زاویه سلول ساختار لانه‌زنبوری بر مدول برشی در راستای محوری G_{31}

۴-۳- بررسی تأثیر اندازه سلول بر مدول الاستیسیته و

مدول برشی

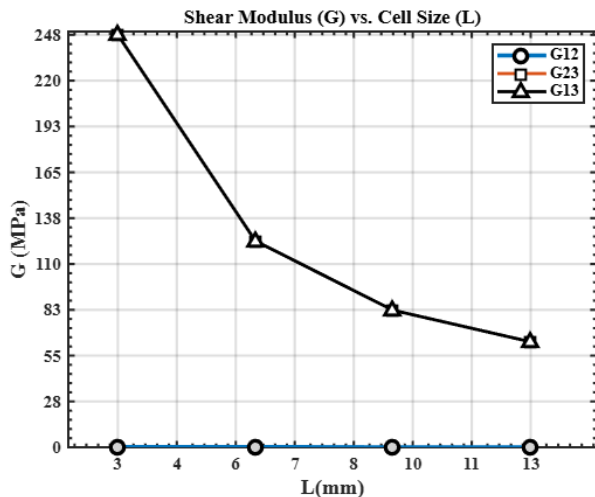
اندازه‌ی ضلع سلول یکی از متغیرهای کلیدی در طراحی و تحلیل سازه‌های لانه‌زنبوری است که به‌طور قابل توجهی بر ویژگی‌های مکانیکی این ساختارها تأثیر می‌گذارد. تغییر در اندازه‌ی ضلع سلول می‌تواند بر مدول الاستیسیته، مدول برشی و ضرایب پواسون سازه‌های لانه‌زنبوری تأثیرات چشمگیری بگذارد. این پارامتر به‌طور مستقیم بر توزیع بار و نحوه‌ی انتقال تنش‌ها درون ساختار تأثیر دارد و می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مؤثر در بهینه‌سازی عملکرد سازه‌های لانه‌زنبوری در شرایط مختلف مورد استفاده قرار گیرد. در این بخش، تأثیر اندازه‌ی ضلع سلول بر مدول الاستیسیته و مدول برشی سازه‌های لانه‌زنبوری بررسی می‌شود. اندازه‌ی طول ضلع سلول سازه‌ی لانه‌زنبوری مطابق با جدول ۴ مورد بررسی قرار گرفته است.

مطابق با شکل ۲۰، با افزایش اندازه‌ی سلول (L)، مدول الاستیسیته کاهش می‌یابد. این رابطه معکوس نشان‌دهنده این است که ساختارهای با سلول‌های بزرگ‌تر سفتی کمتری دارند. در ساختارهای با سلول‌های کوچک‌تر، توزیع تنش یکنواخت‌تر از ساختارهایی با سلول بزرگ است. این امر منجر به سفتی بیشتر می‌شود. در مقابل، سلول‌های بزرگ‌تر ممکن است باعث تمرکز تنش و کاهش سفتی کلی شوند. همچنین، این نمودار بیانگر اهمیت مدول الاستیسیته در جهت عمودی نسبت به دو جهت دیگر است.



شکل (۲۰): مقایسه مدول‌های برشی سازه‌ی لانه‌زنبوری متأثر از اندازه سلول

در شکل ۲۱، با افزایش زاویه سلول، مدول برشی کاهش می‌یابد. این رابطه معکوس نشان‌دهنده این است که ساختارهای با سلول‌های بزرگ‌تر سفتی کمتری دارند. همچنین، این نمودار بیانگر اهمیت مدول برشی راستای ۳ و ۱ همچنین ۲ و ۳ که دقیقاً بر یکدیگر منطبق هستند.



شکل (۲۱): مقایسه مدول‌های برشی سازه‌ی لانه‌زنبوری متأثر از اندازه سلول

۴-۴- جمع‌بندی نتایج مدل‌سازی تأثیر متغیرهای هندسی بر خواص مکانیکی

نتایج این مقاله نشان داد که خواص مکانیکی هسته‌های لانه‌زنبوری به‌شدت تحت تأثیر متغیرهای هندسی آن‌ها قرار دارد. بررسی متغیرهای ضخامت دیواره، زاویه سلولی و اندازه‌ی سلول نشان داد که این عوامل تأثیر مستقیمی بر مدول‌های الاستیسیته و برشی دارند.

اثر ضخامت دیواره: افزایش ضخامت دیواره منجر به افزایش مدول‌های الاستیسیته و برشی در تمامی راستاها شد. این افزایش ناشی از کاهش تغییرشکل‌پذیری و افزایش مقاومت ساختاری در برابر نیروهای اعمالی است.

اثر زاویه سلولی: افزایش زاویه سلولی موجب کاهش مدول‌های الاستیسیته در راستای محوری و عرضی شد، اما در برخی راستاهای برشی، بسته به جهت بارگذاری، تأثیر متفاوتی مشاهده گردید. این موضوع نشان‌دهنده‌ی تغییر مسیر توزیع تنش در هندسه‌های مختلف لانه‌زنبوری است.

جدول (۵): صحت سنجی نتایج روش ارائه شده در این مقاله

متغیر مکانیکی	مدل گیبسون - اشبی	رویکرد مقاله	درصد خطا
مدول الاستیک E_3 (MPa)	۴۳۷/۲۳	۴۳۷/۵۷	+ ۰/۰۷ %
مدول برشی G_{31} (MPa)	۸۲/۱۶	۸۲/۳۵	+ ۰/۲۳ %
مدول برشی G_{23} (MPa)	۸۲/۱۶	۸۲/۳۵	+ ۰/۲۳ %
چگالی (kg/m^3)	۱۷/۱۲	۱۷/۰۳	- ۰/۵۲ %

۶- نتیجه گیری

در این مقاله، روش‌های مختلف برای تعیین خواص مکانیکی هسته لانه‌زنبوری مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتند. روش همگن‌سازی به عنوان یک رویکرد دقیق و کارآمد شناسایی شد که به دلیل کاهش پیچیدگی محاسبات و توانایی نمایش رفتار مکانیکی ماکروسکوپیک سازه، بر سایر روش‌ها ترجیح داده می‌شود. برای تحلیل تأثیر پارامترهای هندسی بر خواص مکانیکی، یک کد پارامتریک پیشرفته در نرم‌افزار متلب توسعه داده شد که قابلیت تعریف سلول واحد نماینده با تنظیم متغیرهای هندسی مانند زاویه، ضخامت دیواره، ارتفاع و طول سلول را دارد. پس از تعریف هندسه حجم واحد نماینده، تحلیل‌های عددی با استفاده از روش المان محدود انجام شد و شرایط مرزی دوره‌ای و بارگذاری‌های درون و برون صفحه‌ای اعمال گردید.

نتایج این مقاله نشان داد که تغییرات در متغیرهای هندسی مانند ضخامت دیواره، زاویه سلول و اندازه سلول تأثیر معناداری بر خواص مکانیکی سازه‌های لانه‌زنبوری دارند. افزایش ضخامت دیواره باعث افزایش مدول‌های الاستیسیته و مدول‌های برشی شد، در حالی که افزایش زاویه سلول منجر به کاهش این خواص گردید. همچنین، اندازه سلول نیز تأثیر قابل توجهی بر خواص مکانیکی داشت، به‌طوری که سلول‌های کوچک‌تر سفتی بیشتری نسبت به سلول‌های بزرگ‌تر نشان دادند.

این یافته‌ها می‌توانند نقش مهمی در طراحی سازه‌های فضایی سبک‌وزن و مقاوم ایفا کنند. بهینه‌سازی هسته‌ی لانه‌زنبوری بر اساس شرایط بارگذاری مورد انتظار، امکان کاهش وزن سازه‌ها در عین حفظ استحکام مکانیکی را فراهم می‌کند. از آنجا که وزن سازه‌های فضایی تأثیر مستقیمی بر هزینه‌های پرتاب دارد، بهینه‌سازی این ساختارها از منظر مکانیکی و وزنی می‌تواند منجر به کاهش هزینه‌های ساخت و بهبود عملکرد سازه‌ها در محیط فضا شود. علاوه بر این، امکان طراحی سازه‌های تطبیقی بر اساس نیازهای

اثر اندازه‌ی سلول: افزایش اندازه‌ی سلول موجب کاهش مدول‌های الاستیسیته و برشی شد، که این مسئله نشان می‌دهد سازه‌های لانه‌زنبوری با سلول‌های کوچک‌تر سختی بیشتری دارند و برای کاربردهای نیازمند استحکام بالا مناسب‌تر هستند.

۵- صحت‌سنجی

در فرآیند شبیه‌سازی‌های عددی، صحت‌سنجی نتایج یکی از مراحل اساسی برای اطمینان از صحت و دقت مدل‌ها محسوب می‌شود. هسته لانه‌زنبوری به دلیل پیچیدگی‌های هندسی و رفتار ارتوتروپیک خود چالش‌های خاصی در مدل‌سازی دارند که صحت‌سنجی دقیق و جامع اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. در این راستا در این بخش، روش ارائه شده در این مقاله جهت تعیین خواص مکانیکی هسته لانه‌زنبوری با استفاده از مدل تحلیلی گیبسون-اشبی که با داده‌های آزمایشگاهی تطابق مطلوبی دارد [۳۱]، صحت‌سنجی می‌گردد. معادلات ۱۷ تا ۲۲ جهت تعیین مدول‌های الاستیسیته و برشی که براساس مدل گیبسون - اشبی می‌باشد، استفاده شده است [۳۲]. در این راستا یک هسته لانه‌زنبوری با ضخامت ۰/۵۰۸ میلی‌متر، طول ضلع ۹/۵۲۵ میلی‌متر تحت زاویه ۶۰ درجه که از جنس آلومینیوم ۵۰۵۶ می‌باشد، نخست با رویکرد ارائه شده در این مقاله و سپس با مدل تحلیلی گیبسون - اشبی مدل‌سازی شده است. نتایج حاصل شده از خواص مکانیکی این هسته لانه‌زنبوری در جدول ۵ ارائه شده است. مطابق با جدول مذکور خطای مدل ارائه شده در این مقاله کمتر از یک درصد است و با دقت بسیار خوبی قابلیت تعیین خواص مکانیکی سازه‌های لانه‌زنبوری را دارد.

$$E_1 = E_s \left(\frac{t}{l} \right)^3 \frac{\cos \theta}{(h/l + \sin \theta) \sin^2 \theta} \quad (17)$$

$$E_2 = E_s \left(\frac{t}{l} \right)^3 \frac{h/l + \sin \theta}{\cos^3 \theta} \quad (18)$$

$$E_2 = E_s \left(\frac{t}{l} \right)^3 \frac{h/l + 1}{(h/l + \sin \theta) \cos \theta} \quad (19)$$

$$G_{12} = E_s \left(\frac{t}{l} \right)^3 \frac{h/l + \sin \theta}{(h/l)^2 \cos \theta (1 + 16 h/l)} \quad (20)$$

$$G_{31} = E_s \left(\frac{t}{l} \right)^3 \frac{\cos \theta}{h/l + \sin \theta} \quad (21)$$

$$\left(\frac{t}{l} \right)^3 \frac{h/l + \sin \theta}{(h/l + 1) \cos \theta} \leq \frac{G_{23}}{G_s} \leq \left(\frac{t}{l} \right)^3 \frac{(h/l + \sin \theta)^2}{(h/l + \sin \theta) \cos \theta} \quad (22)$$

- honeycomb cores,” *Appl. Compos. Mater.*, vol. 12, pp. 213–227, 2005.
- [11] G. Sun, D. Chen, X. Huo, G. Zheng, and Q. Li, “Experimental and numerical studies on indentation and perforation characteristics of honeycomb sandwich panels,” *Compos. Struct.*, vol. 184, pp. 110–124, 2018.
- [12] A. Montazeri, A. Hasani, and M. Safarabadi, “Bending performance and failure mechanism of 3D-printed hybrid geometry honeycombs with various Poisson’s ratios,” *J. Sandwich Struct. Mater.*, vol. 25, no. 7, pp. 709–729, 2023.
- [13] W. Ashraf, M. R. Ishak, M. Y. Zuhri, N. Yidris, and A. M. Ya’Acob, “Experimental investigation on the mechanical properties of a sandwich structure made of flax/glass hybrid composite facesheet and honeycomb core,” *Int. J. Polym. Sci.*, vol. 2021, Art. no. 8855952, 2021.
- [14] D. M. Wang, J. Wang, and Q. H. Liao, “Investigation of mechanical property for paper honeycomb sandwich composite under different temperature and relative humidity,” *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 32, no. 13, pp. 987–997, 2013.
- [15] L. Shang, Y. Wu, Y. Fang, and Y. Li, “High-temperature mechanical properties of a vented Ti–6Al–4V honeycomb sandwich panel,” *Materials*, vol. 13, no. 13, Art. no. 3008, 2020.
- [16] M. F. Ashby and L. J. Gibson, *Cellular Solids: Structure and Properties*, 2nd ed. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 1997, pp. 175–231.
- [17] Y. Liu, Z. Qin, and F. Chu, “A nonlinear repeated impact model of auxetic honeycomb structures considering geometric nonlinearity and tensile/compressive deformation,” *J. Appl. Mech.*, vol. 90, no. 9, 2023.
- [18] M. Zahed, R. Ardeshtari Jouneghani, and M. Safarabadi, “Reinforcement of 3D-printed re-entrant structures using additional supports under three-point bending: Experimental and numerical analyses,” *Adv. Eng. Mater.*, vol. 26, no. 1, Art. no. 2301252, 2024.
- [19] M. Khodaei, *et al.*, “On the ballistic impact behavior of foam-filled honeycomb core/composite skin sandwich panels,” *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 45, no. 5, Art. no. 244, 2023.
- [20] A. Montazeri, A. Saeedi, E. Bahmanpour, and M. Safarabadi, “Heterogeneous hexagonal honeycombs with nature-inspired defect channels under in-plane crushing,” *Mater. Lett.*, vol. 366, Art. no. 136564, 2024.
- [21] S. Upreti, V. K. Singh, S. K. Kamal, A. Jain, and A. Dixit, “Modelling and analysis of honeycomb sandwich structure using finite element method,” *Mater. Today Proc.*, vol. 25, pp. 620–625, 2020.
- [22] X. Wu, H. Yu, L. Guo, L. Zhang, X. Sun, and Z. Chai, “Experimental and numerical investigation of static and fatigue behaviors of composites honeycomb sandwich structure,” *Composite Structures*, vol. 213, pp. 165–172, 2019.
- [23] E. C. Onyibo and B. Safaei, “Application of finite element analysis to honeycomb sandwich structures: A review,” *Rep. Mech. Eng.*, vol. 3, no. 1, pp. 192–209, 2022.
- [24] A. Abbadi, Y. Koutsawa, A. Carmasol, S. Belouettar, and Z. Azari, “Experimental and numerical characterization of honeycomb sandwich composite panels,” *Simul. Model. Pract. Theory*, vol. 17, no. 10, pp. 1533–1547, 2009.
- [25] Y. Wang, Y. Gan, H. Liu, L. Han, J. Wang, and K. Liu, “Surface quality improvement in machining an aluminum

خاص مأموریت‌های فضایی وجود دارد، به‌گونه‌ای که هندسه‌ی هسته‌ی لانه‌زنبوری بتواند برای تحمل بارهای متفاوت بهینه شود. روش ارائه‌شده در این مقاله به دلیل توانایی کنترل دقیق متغیرهای هندسی و دقت بالا، می‌تواند به‌عنوان یک ابزار کارآمد در طراحی و بهینه‌سازی سازه‌های فضایی سبک‌وزن و مقاوم مورد استفاده قرار گیرد. این روش نه تنها هزینه‌های محاسباتی را کاهش می‌دهد، بلکه امکان تحلیل دقیق رفتار مکانیکی سازه‌های لانه‌زنبوری تحت شرایط بارگذاری مختلف را فراهم می‌کند. در نهایت، این پژوهش نشان می‌دهد که با بهینه‌سازی پارامترهای هندسی، می‌توان به طراحی سازه‌هایی با عملکرد مکانیکی بهبودیافته دست یافت.

تعارض منافع

“هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.”

مراجع

- [1] F.-X. Irisarri, C. Julien, D. Bettebghor, F. Lavelle, Y. Guerin, K. Mathis, *et al.*, “A general optimization strategy for composite sandwich structures,” *Struct. Multidiscip. Optim.*, vol. 63, pp. 3027–3044, 2021.
- [2] T. J. Hause, *Sandwich Structures: Theory and Responses*. Cham, Switzerland: Springer, 2021, pp. 1–3.
- [3] B. J. Kim, “Development of a satellite structure with the sandwich T-joint,” *Compos. Struct.*, vol. 92, no. 2, pp. 460–468, 2010.
- [4] M. R. Hajighasemi, *et al.*, “Design and manufacture of a smart macro-structure with changeable effective stiffness,” *Int. J. Appl. Mech.*, vol. 12, no. 1, Art. no. 2050001, 2020.
- [5] A. Aborehab, M. Kassem, A. F. Nemnem, M. Kamel, and H. Kamel, “Configuration design and modeling of an efficient small satellite structure,” *Eng. Solid Mech.*, vol. 8, no. 1, pp. 7–20, 2020.
- [6] S. Chen and H. Huang, “Optimum design of a space frame and its application in satellite structure,” *J. Spacecr. Rockets*, vol. 47, no. 6, pp. 1063–1066, 2010.
- [7] Z. Daneshjoo, F. Shokri, “Layout and Configuration Design of a Remote Sensing Satellite Subsystems,” *J. Space Sci. Technol. Appl*, vol. 4 (1), p.:39-51, 2024.
- [8] M. Walker and R. Smith, “A procedure to select the best material combinations and optimally design composite sandwich cylindrical shells for minimum mass,” *Mater. Des.*, vol. 27, no. 2, pp. 160–165, 2006.
- [9] Seyed Mohammad Navid Ghoreishi, Mohammad Aminjafari, Amir Sedaghati, Ehsan Zabihian, “Design, Analysis and Structural Test of Telecommunication Satellite Based on ECSS Standard”, *Journal of Space Science, Technology and Applications*, vol 3 (1), p.: 48-63, 2023.
- [10] Y. Aminanda, B. Castanié, J. J. Barrau, and P. Thevenet, “Experimental analysis and modeling of the crushing of

- sandwich plate in structural dynamics,” *Int. J. Space Struct.*, vol. 36, no. 2, pp. 105–116, 2021.
- [30] T. Kanit, S. Forest, I. Galliet, V. Mounoury, and D. Jeulin, “Determination of the size of the representative volume element for random composites: Statistical and numerical approach,” *Int. J. Solids Struct.*, vol. 40, nos. 13–14, pp. 3647–3679, 2003.
- [31] L. J. Gibson and M. F. Ashby, “The mechanics of three-dimensional cellular materials,” *Proc. R. Soc. Lond. A Math. Phys. Sci.*, vol. 382, no. 1782, pp. 43–59, 1982.
- [32] S. Malek and L. Gibson, “Effective elastic properties of periodic hexagonal honeycombs,” *Mech. Mater.*, vol. 91, pp. 226–240, 2015.
- honeycomb by ice fixation,” *Chin. J. Mech. Eng.*, vol. 33, Art. no. 1, pp. 1–8, 2020.
- [26] R. Ciepielewski and D. Miedzińska, “A study of aluminum honeycomb structures under dynamic loading, with consideration given to the effects of air leakage,” *Materials*, vol. 16, no. 6, Art. no. 2211, 2023.
- [27] S. Malek and L. Gibson, “Effective elastic properties of periodic hexagonal honeycombs,” *Mech. Mater.*, vol. 91, pp. 226–240, 2015.
- [28] N. Ahmed, N. Zafar, and H. Z. Janjua, “Homogenization of honeycomb core in sandwich structures: A review,” in *Proc. 16th Int. Bhurban Conf. Appl. Sci. Technol. (IBCAST)*, Islamabad, Pakistan, 2019, pp. 402–407.
- [29] A. Aborehab, M. Kamel, A. F. Nemnem, and M. Kassem, “Finite element model updating of a satellite honeycomb