



Available Online: <http://jmst.kmsu.ac.ir>

Original Article



Numerical Analysis of Core Cell Geometry Effect on the Mechanical Behavior of Sandwich Composites

Fatemeh Asadi Talebbeigi, Saeed Jaamei *

Department of Marine Engineering, School of Engineering, Persian Gulf University, Bushehr, Iran

* Corresponding Author Email: jaameisa@pgu.ac.ir

Received: 16 September 2019

Revise Date: 24 October 2022

Accepted: 8 November 2022

DOI: 10.22113/jmst.2022.201854.2310

ABSTRACT

Among the myriad new industrial materials designed for under-load structures, honeycomb composites are emerging as superior substitutes for conventional materials across various industries. This study explores the mechanical behavior of sandwich beams with three distinct core cell configurations: rectangular, honeycomb, and triangular. Modal analysis was utilized to investigate the vibration characteristics, and subsequent studies assessed the impact of core thickness on mechanical performance. Results reveal that, in terms of natural frequencies, deflections, and the strength-to-weight ratio, the configurations rank as rectangular, honeycomb, and triangular in descending order. Increasing core thickness reduces beam deflection and enhanced load-bearing capacity, despite increased weight. A comparison between isotropic plates and honeycomb composites demonstrates that bending stiffness can be improved by up to seven times with just a 25% increase in volume. The numerical findings are validated against empirical data, showing a close agreement with only a 4% discrepancy.

Keywords: ANSYS; Free vibration; Honeycomb Sandwich Panel; Numerical Analysis; Strength to weight ratio.

1. INTRODUCTION

The development of advanced materials for structural applications is crucial for improving performance and efficiency in various industries. Honeycomb composites, characterized by their lightweight and high-strength properties, have shown considerable promise as replacements for traditional materials. This study investigates the effects of different core cell configurations and core thicknesses on the mechanical properties of honeycomb sandwich beams. The goal is to enhance understanding of how these factors influence vibration characteristics, deflection, and strength-to-weight ratios, thereby providing insights into optimizing honeycomb composites for structural applications.

2. MATERIALS AND METHODS

Three core cell configurations were selected for this study: rectangular, honeycomb, and triangular. Each configuration was used as the core of a sandwich beam, and their mechanical behaviors were evaluated using numerical simulations. Modal analysis was performed to study the vibration characteristics of the beams. In addition, the core height was varied to examine its effect on the mechanical properties, including

Copyrights:

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted Journal of Marine Science and Technology. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



natural frequencies, deflection, and strength-to-weight ratio. The simulations were conducted using ANSYS software, and the results were compared with empirical data to validate the numerical findings.

3. RESULTS

The numerical analysis indicated that the natural frequencies, deflections, and strength-to-weight ratios of the beams varied significantly with core cell configuration. The rectangular configuration exhibited the highest natural frequencies, while the triangular configuration had the lowest. Deflection and Von-Mises stress analysis revealed that increasing the core thickness generally reduced beam deflection and improved the load-bearing capacity. Notably, when comparing honeycomb composites to isotropic plates, the former demonstrated up to seven times greater bending stiffness with only a 25% increase in volume. The validation of numerical results against empirical data showed a high degree of accuracy, with only a 4% difference.

4. DISCUSSION AND CONCLUSION

This study confirms that honeycomb composites are highly effective in improving the mechanical performance of sandwich beams. The choice of core cell configuration significantly influences the natural frequencies, deflections, and strength-to-weight ratios. Increasing core thickness enhances structural performance, though at the cost of increased weight. The findings also highlight the substantial benefits of honeycomb composites over isotropic plates in terms of bending stiffness. The close agreement between numerical and empirical results underscores the reliability of the numerical simulations used in this study. Future work may explore additional core configurations and material properties to further optimize honeycomb composites for various structural applications.



مقاله پژوهشی

Available Online: <http://jmst.kmsu.ac.ir>



تحلیل عددی تاثیر هندسه سلول های هسته بر رفتار مکانیکی کامپوزیت های ساندویچی

فاطمه اسدی طالب بیگی، سعید جامعی*

گروه مهندسی دریا، دانشکده مهندسی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران

* نویسنده مسئول، پست الکترونیک: jaameisa@pgu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۱۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۸/۰۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۲۵

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22113/jmst.2022.201854.2310

چکیده

از میان طیف گسترده ی مصالح نوین، کامپوزیت های مشبک در طراحی سازه های تحت بار، جایگزین بسیار مناسبی برای مصالح معمولی در صنایع مختلف می باشند. در بخش اول این مطالعه، سه چیدمان مختلف برای هسته های یک تیر ساندویچی در نظر گرفته شده و تاثیر شکل سلول ها بر رفتار مکانیکی سازه بصورت عددی بررسی شده است. ابتدا وضعیت ارتعاشی هر تیر به کمک تحلیل مودال بررسی شده و در بخش دوم با تغییر ضخامت هسته پانل های ساندویچی مشبک با شبکه های شش ضلعی مشابه، به بررسی عددی تاثیر ضخامت هسته بر رفتار مکانیکی کامپوزیت پرداخته شده است. نتایج حاکی از آن است که فرکانس طبیعی، خیز و نسبت استحکام به وزن پانل ها به ترتیب نزولی به چیدمان های مربعی، شش ضلعی و مثلثی تعلق داشته است. خیز و تنش معادل نتایجی بودند که از شبیه سازی عددی هر مدل به دست آمدند. با افزایش ضخامت هسته، نسبت استحکام به وزن به صورت چشمگیر افزایش می یابد، بطوریکه با افزایش هرچه بیشتر ارتفاع هسته، خیز تیر کاهش و آستانه ی قدرت تحمل بار و استحکام افزایش می یابد. در حالتی که ضخامت هسته لانه زنبوری برابر با ضخامت پوسته است، تنها با ۲۵٪ افزایش حجم مصالح می توان سختی خمشی را نسبت به ورق صلب را تا ۷/۱۲ برابر رساند. مقایسه و اعتبارسنجی داده های به دست آمده از تحلیل عددی با نتایج آزمایشگاهی موجود نشان می دهد که تنها با ۴ درصد اختلاف، همخوانی بسیار نزدیکی بین نتایج وجود دارد.

واژگان کلیدی: انسیس، ارتعاش آزاد، کامپوزیت ساندویچی لانه زنبوری، تحلیل عددی، نسبت استحکام به وزن

نسبت استحکام به وزن بالاتر و بهبود خواص مکانیکی در مقایسه با فلزات، قابلیت اطمینان، جذب بهتر انرژی، کاهش هزینه های طول عمر، افزایش مقاومت خمشی (Azarafra et al., 2017) کاهش اثرات خستگی و افزایش عمر مفید سازه در صنایع هوا فضا، کشتی سازی، حمل و نقل ریلی، سکوهای دریایی و غیره با استقبال روبه رو شده اند (Wang et al., 2021).

۱. مقدمه

در طراحی اجزای سازه های تحت بار به منظور تحمل هرچه بیشتر آسیب ها، مصالحی ارزشمند هستند که علاوه بر وزن کم و افزایش عمر مفید سازه، استحکام بالایی نیز داشته باشند. برای تولید یک طرح بهینه، دو عامل مذکور را باید توأماً در تمام مراحل فرایند طراحی در نظر گرفت. از میان مصالح نوین صنعتی، انواع کامپوزیت ها، به خصوص کامپوزیت های ساندویچی به دلیل

Copyrights:

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted Journal of Marine Science and Technology. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



۱. مقدمه

ورق پوسته را تغییر داده و ارتعاش آزاد پانل را به صورت عددی و تجربی مطالعه کردند. نتایج به دست آمده نشان داد که افزایش ضخامت پوسته موجب افزایش سختی پانل لانه‌زنبوری شده است. مطالعه انجام شده توسط Liu et al. (2018) بر روی کامپوزیت‌های دارای هسته Y- شکل نشان می‌دهد که با افزایش چگالی نسبی هسته، تنش ماکزیمم منحنی تنش- کرنش افزایش می‌یابد. از نتایج تحقیق Peng et al. (2021) که با الهام از مدل‌های زیستی به توسعه سلول‌های نوینی برای هسته کامپوزیت‌ها پرداخته‌اند، می‌توان بعنوان راهنما برای توسعه سازه‌های ساندویچی نوین استفاده کرد. در مدل توسعه داده شده توسط Wang et al. (2021) از سه لایه ورق برای بررسی رفتار کامپوزیت‌ها در معرض بارهای فشاری استفاده شده است. این تحقیق نشان می‌دهد که در صورت استفاده از لایه‌های دوبعدی دارای سلول‌های دایره‌ای، سازه در مقابل بارهای فشاری تک‌محوری عملکرد بهتری خواهد داشت. Liu et al. (2019) در مطالعه صورت گرفته بر روی هسته‌های لانه‌زنبوری نومیکس، به بررسی اثر ضخامت پوسته و جهت قرار گرفتن سلول‌های هسته بر پاسخ مکانیکی سازه کامپوزیتی در مقابل بارهای خمشی پرداخته‌اند.

در مطالعه پیش رو، پس از صحت‌سنجی نتایج با مدل‌های آزمایشگاهی موجود، به بررسی سه چیدمان مختلف برای هسته تیر کامپوزیتی ساندویچی از منظر سختی خمشی و قابلیت افزایش نسبت استحکام به وزن سازه پرداخته شده است.

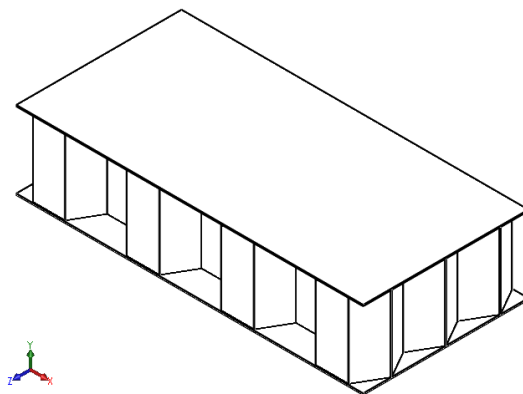
۲. مواد و روش‌ها

کامپوزیت‌های ساندویچی از دو لایه‌ی خارجی بعنوان پوسته و لایه‌ی میانی هسته تشکیل می‌شوند. هسته یک ساختار کامپوزیتی با توجه به اهداف طراحی ممکن است بصورت سلول‌هایی با شکل‌های متفاوت هسته یا از جنس فوم باشد. مطالعات نشان داده است که هسته‌های لانه‌زنبوری دارای زاویه ۱۲۰ درجه فرکانس طبیعی بالاتری دارند (Ameen and Mashloosh, 2015)، به این معنا که سختی بیشتر و جرم کمتری خواهند داشت. به منظور صحت‌سنجی نتایج تحقیق، ابتدا یک پانل ساندویچی با شکل هسته شش‌ضلعی که Ameen و Mashloosh (2015) بررسی کرده‌اند شبیه‌سازی شده (شکل ۱) و فرکانس‌های طبیعی شش شکل مود اول در جدول (۱) با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

مقایسه فرکانس طبیعی مدل مطالعه شده توسط Ameen و Mashloosh (2015) نشان می‌دهد که حداکثر خطا بین نتایج دو مطالعه ۶ درصد بوده است (جدول ۱). مطابق شکل (۲)، روند تغییرات فرکانس‌های طبیعی دو نمونه نیز یکسان بوده است.

در طراحی اجزای سازه‌ای تحت بار به منظور تحمل هرچه بیشتر آسیب‌ها، مصالحی ارزشمند هستند که علاوه بر وزن کم و افزایش عمر مفید سازه، استحکام بالایی نیز داشته باشند. برای تولید یک طرح بهینه، دو عامل مذکور را باید توأماً در تمام مراحل فرایند طراحی در نظر گرفت. از میان مصالح نوین صنعتی، انواع کامپوزیت‌ها، به خصوص کامپوزیت‌های ساندویچی به دلیل نسبت استحکام به وزن بالاتر و بهبود خواص مکانیکی در مقایسه با فلزات، قابلیت اطمینان، جذب بهتر انرژی، کاهش هزینه‌های طول عمر، افزایش مقاومت خمشی (Azarafa et al., 2017) کاهش اثرات خستگی و افزایش عمر مفید سازه در صنایع هوا فضا، کشتی‌سازی، حمل و نقل ریلی، سکوها دریایی و غیره با استقبال روبه‌رو شده‌اند (Wang et al., 2021).

در طراحی کامپوزیت‌های ساندویچی، دو عامل مصالح و هندسه در تعیین خواص سازه‌ی نهایی دخیل هستند و با تغییر هر عامل می‌توان خواص مختلفی به دست آورد. چیدمان سلول‌های این دسته از مصالح، مستقیماً بر ویژگی‌های مکانیکی آن‌ها تاثیرگذار است و با تغییر هندسه می‌توان انواع مختلف کامپوزیت با خواص مکانیکی متفاوت تولید کرد. گروهی از محققان در سال ۲۰۱۵، به بررسی تاثیر جنس مصالح سلول‌ها بر ویژگی‌های مکانیکی پرداختند. انجام آزمایش‌های ضربه و فشار بر روی نمونه‌ها نشان داد که هسته آلومینیومی در مقایسه با هسته‌های پلی‌پروپیلین و پلی‌استیرین در آزمایش ضربه دچار بیشترین تغییر شکل و در شرایط اعمال بار فشاری دچار کماتش دائمی می‌شود (Heidarinejad et al., 2013). Liu et al. (1998) تغییر شکل سازه‌ی ساندویچی تحت دو نوع بارگذاری شبه‌استاتیکی و دینامیکی را به دو روش بررسی کرده‌اند و نتایج عددی خود را به کمک مدل‌سازی ساختار ساندویچی در نرم‌افزار المان محدود و اعمال بار ضربه‌ای اعتبارسنجی نموده‌اند. گروهی از پژوهشگران رفتار پانل‌های ساندویچی تحت خمش را بصورت تئوری محاسبه و نسبت استحکام به وزن دو پانل آلومینیومی صلب و لانه‌زنبوری را با یکدیگر مقایسه کرده‌اند (Liu et al., 2019). تحلیل خواص مکانیکی پانل‌های کامپوزیتی در دو حالت با/بدون در نظر گرفتن سختی خمشی توسط شرکت هگزوب انجام شد. مقایسه‌ی نتایج آزمایش‌های عددی و تجربی حاکی از اعتبار نتایج آن‌ها بوده است. در مطالعه‌ی دیگر، امکان کنترل ارتعاشات تیر ساندویچی دارای هسته مغناطیسی بر پایه منطق فازی مطالعه شده است. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از این روش برای میراسازی ارتعاشات ناخواسته سیستم موثر بوده است (Heidarinejad et al., 2013). Mashloosh و Ameen (2015) با تغییر زاویه سلول‌ها (۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه) و قرار دادن پانل‌ها در شرایط ارتعاش آزاد و شبیه‌سازی عددی نمونه‌ها به این نتیجه رسیدند که زاویه سلول ۱۲۰ درجه منجر به افزایش فرکانس طبیعی پانل نسبت به سایر زوایا می‌شود. آن‌ها همچنین ضخامت



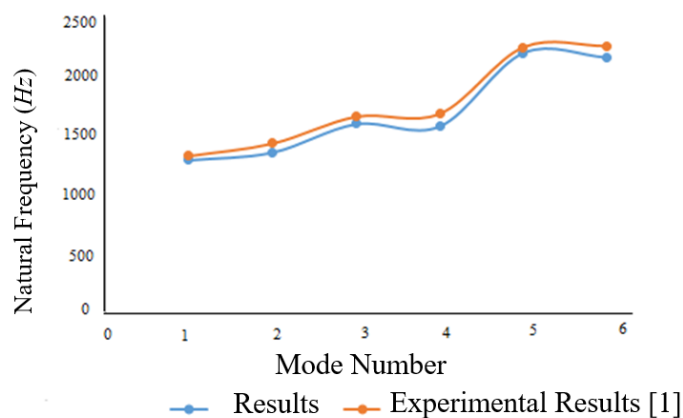
شکل ۱- مدل هندسی

Fig. 1- geometric model

جدول ۱- مقایسه فرکانس طبیعی در مدهای ۱:۶ با نتایج آزمایشگاهی

Table 1- Comparison of natural frequencies in modes 1:6

Natural frequency (Hz)	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4	Mode 5	Mode 6
Numerical	1298.3	1363.1	1601.5	1583.1	2199.3	2160.1
Experimental	1328.9	1434.3	1660.1	1686	2246.2	2255.1



شکل ۲- اعتبارسنجی نتایج با مقایسه فرکانس طبیعی

Fig. 2- Results verification by comparison of natural frequencies

در مرحله‌ی اول هر مدل در وضعیت ارتعاش آزاد قرار گرفته و فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای کمانشی استخراج شده‌اند. شش شکل مود اول محتمل‌ترین پاسخ‌های سازه در شرایط ارتعاشی هستند. تحلیل مودال سه مدل با هسته‌های مثلثی، مربعی و لانه‌زنبوری در مازول انسیس انجام شده است.

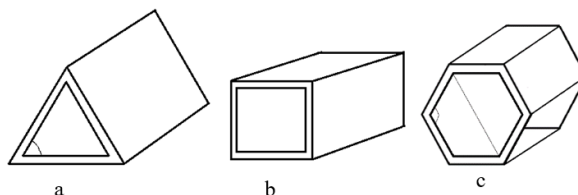
سپس تست خمش برای هر مدل شبیه‌سازی شده است. برای این منظور در هر حالت شبیه‌سازی، بارهای مختلفی به انتهای سازه اعمال می‌شوند تا نقطه‌ی شکست به دست آید.

نحوه اعمال شرایط مرزی اعم از نیرو و بارهای تکیه‌گاهی در شکل (۵) نشان داده شده است. این روش اعمال نیرو برای تمام شبیه‌سازی‌های مطالعه پیش رو یکسان بوده است و همانطور که در ادامه خواهد آمد، در بخش اول تنها مقادیر نیروی قابل تحمل و در بخش دوم ارتفاع سلول‌های هسته برای هر مدل متفاوت خواهد بود.

در مطالعه‌ی پیش رو، سه شکل مثلثی، مربعی و شش‌ضلعی برای هسته‌ها در نظر گرفته شده است. با هدف یکسان‌سازی فیزیک مساله، مساحت مقطع هر سه مدل با هم برابر و معادل ۱۴۰ میلی‌متر مربع در نظر گرفته شده است. شکل (۳) تصویر هسته هر یک از سه مدل را نشان می‌دهد.

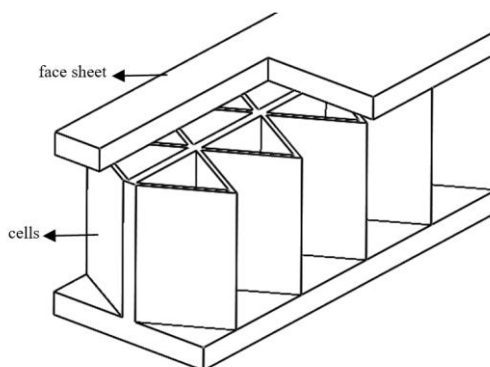
در شبیه‌سازی این مدل‌ها فرض شده است که هسته مشبک بصورت عمود بین دو ورق صلب قرار گرفته است (شکل ۴) و اتصالات بین هسته و پوسته پانل‌های ساندویچی بصورت صلب مدل‌سازی شده است.

به منظور بررسی تاثیر شکل هسته بر رفتار مکانیکی پانل ساندویچی، تیر صلب و هندسه‌ی سه مدل ساندویچی با ضخامت هسته ۴ سانتی‌متر به کمک نرم‌افزار سالیدورکس تهیه شد. ابعاد مدل‌ها در جدول (۲) ارائه شده است.



شکل ۳- سلول‌های هسته

Fig. 3- Core Cells



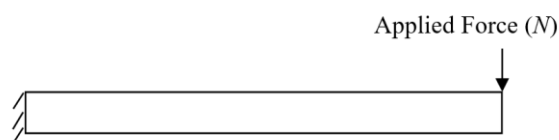
شکل ۴- نحوه‌ی قرار گرفتن هسته مشبک نسبت به ورق‌های پوسته

Fig. 4- accommodation of cells between face sheets

جدول ۲- ابعاد مدل‌ها

Table 2- Model Dimensions

Models	Core Height (cm)	Panel Height (cm)	Shell thickness (cm)
1	0	1	2*0.5
2	1	2	2*0.5
4	3	4	2*0.5

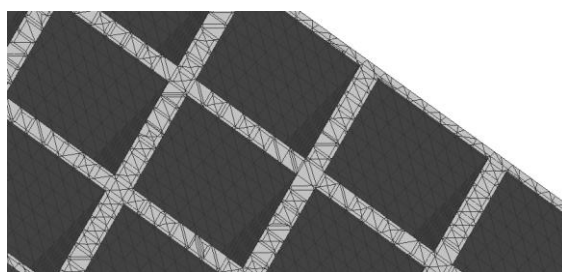


شکل ۵- مدل سازه‌ای

Fig. 5- structural model

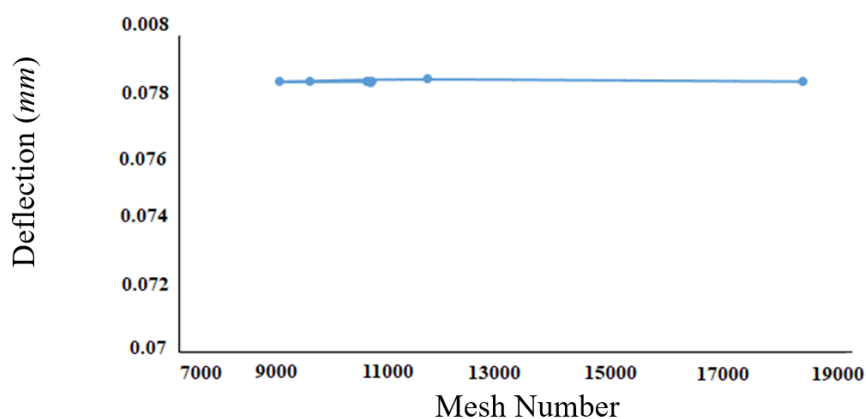
همانطور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، پاسخ مدل از تعداد ۱۱۳۲۰ مش شروع به همگرایی کرده است. لذا در سایر مدل‌سازی‌ها از تعداد مش مشابه استفاده خواهد شد. همگرایی مش در مطالعات عددی از آن جهت حائز اهمیت است که موجب صرفه‌جویی در وقت و هزینه خواهد شد (Ameen and Mashloosh, 2015).

مش‌بندی مدل‌ها از طریق روش مش‌بندی پوسته مثلثی (Triangular Face Meshing) در نرم‌افزار آنسیس انجام شده است. در اولین مرحله از مدل‌سازی، همگرایی مش‌بندی بررسی شد. برای این منظور تیر مدل (ب) در نه حالت مختلف با تعداد و اندازه‌ی المان متفاوت تحت بارگذاری قرار داده شد. نمونه مش اعمال شده به مدل (ب) در شکل (۶) به تصویر کشیده شده است.



شکل ۶- مش ساختاری

Fig. 6- Structural Mesh



شکل ۷- مطالعه‌ی همگرایی مش

Fig. 7- Mesh convergence study

در نظر گرفته شده است، صرفاً مطالعه‌ی رفتار سازه تا پیش از تغییر شکل پلاستیک سازه‌ها بوده است. چرا که سازه با گذر از تنش تسلیم دچار تغییر شکل پلاستیک می‌شود.

با توجه به هدف مطالعه مبنی بر بررسی تاثیر ضخامت هسته بر رفتار مکانیکی پانل لانه‌زنبوری، ساختار کامپوزیتی با چیدمان سلول‌های هسته شش‌ضلعی انتخاب شده است. مدل منتخب برای سلول هسته در کلیه‌ی مدل‌سازی‌های مطالعه‌ی پیش رو، زاویه هسته‌ها ۱۲- درجه در نظر گرفته شده است. شکل ۸، یک سلول لانه‌زنبوری دارای زاویه ۱۲۰ درجه را نشان می‌دهد که ابعاد هندسی آن در جدول (۱) آورده شده است.

معیار مقایسه‌ی نتایج به دست آمده، تنش تسلیم فولاد معادل ۲۳۵ نیوتن بر میلی‌متر مربع بوده است و در نهایت تنش فون مایسس در ازای اعمال حداکثر نیروی قابل تحمل پانل باید از تنش تسلیم فولاد کمتر باشد. به این ترتیب، در هر یک از سه مدل‌سازی ابتدا بارگذاری با یک بار فرضی انجام شده و در هر مرحله با کم و زیاد کردن نیرو و مقایسه‌ی تنش فون مایسس و تنش تسلیم فولاد، حداکثر نیروی قابل تحمل توسط هر پانل به دست آمده است.

ضریب ایمنی که به صورت نسبت تنش تسلیم به تنش پیش‌بینی شده برای سازه تعریف می‌شود، در موارد فوق تنها کمی از ۱ بیشتر است. این در حالی است که در مصالحی که برای مقاصد صنعتی طراحی می‌شوند، این مقدار باید حداقل ۲ باشد. اما آنچه در این مقاله

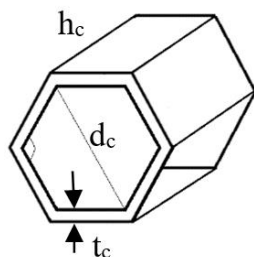
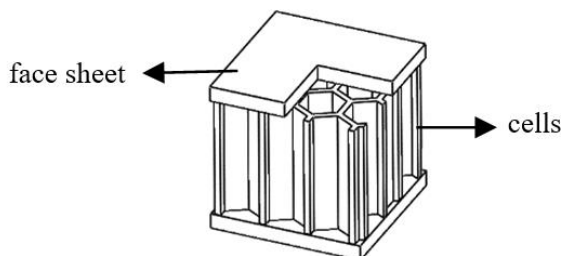


Fig. 8 Effective Dimensions in design of a unit honeycomb cell with 120 degree angle

شکل ۸ ابعاد موثر در طراحی یک سلول لانه‌زنبوری دارای زاویه ۱۲۰ درجه

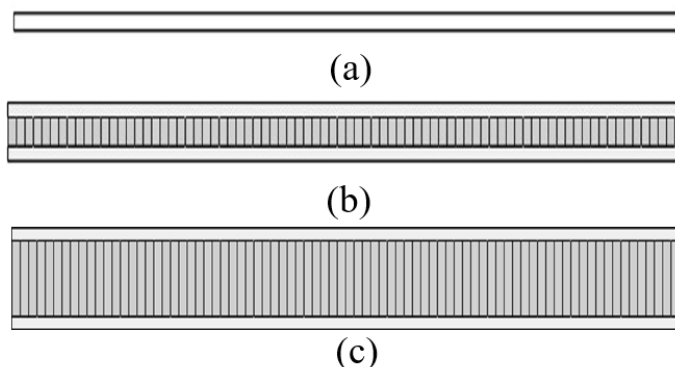
ابعاد مدل‌های به کار رفته در این بخش مشابه جدول (۲) می‌باشد. شکل سلول‌های هسته در این بخش بعنوان متغیر در نظر گرفته شده است. تصویر این نمونه‌ها در شکل (۱۰) ارائه شده است. هر مدل بطور مجزا بصورت یک تیر یک‌سر درگیر (Cantilever beam) شبیه‌سازی شده است (شکل ۵). برای این منظور در هر حالت شبیه‌سازی، بارهای مختلفی به انتهای سازه اعمال می‌شوند تا نقطه‌ی شکست به دست آید.

زاویه α در این شکل ۱۲۰ درجه، قطر سلول (d_c) ۱/۵ سانتی‌متر، ضخامت دیواره‌ی سلول (t_c) ۱ میلی‌متر و ارتفاع سلول (h_c) در هر یک از مدل‌ها بین ۰، ۱ و ۳ سانتی‌متر متغیر می‌باشد. جدول (۳) ابعاد پوسته و هسته پانل‌های ساندویچی طراحی شده برای سه مدل مجزا را به کمک نرم‌افزار سالی‌دورکس نشان می‌دهد. در شبیه‌سازی این مدل‌ها فرض شده است که لایه‌ی لانه‌زنبوری بصورت عمود بین دو ورق تخت قرار گرفته است (شکل ۹). در این طراحی اتصالات بین هسته و پوسته پانل‌های ساندویچی به صورت صلب مدل‌سازی شده است.



شکل ۹ نحوه‌ی قرار گرفتن هسته لانه‌زنبوری نسبت به ورق‌های پوسته

Fig. 9- accommodation of honeycomb cells between face sheets



شکل ۱۰- مدل‌های هندسی (الف) مدل یک، (ب) مدل دو (ج) مدل سه

Fig. 10- Geometric Models (a) Model 1 (b) Model 2 (c) Model 3

برخورد می‌کنند، پیش‌بینی می‌شود که هر دو اعداد زوج و فرد فعال هستند که منجر به کاهش پاسخ در تمام فرکانس‌های طبیعی پانل می‌شود.

مقادیر خیز ماکزیمم مربوط به مودهای اول تا ششم سه پانل بطور خلاصه در جدول (۴) آورده شده است. با مقایسه‌ی ماکزیمم شکل مود مدل‌ها در هر فرکانس، مشاهده می‌شود که در تمام وضعیت‌ها چیدمان هسته مربعی و مثلثی به ترتیب دارای کمترین و بیشترین خیز شده‌اند.

در مطالعه Wang et al. (2019) برای مقایسه ویژگی‌های ارتعاش پانل با هسته ساندویچ لانه زنبوری متقاطع سلسله مراتبی با پانل با هسته ساندویچ لانه زنبوری سلسله مراتبی، یک پارامتر فرکانس بدون بعد، پیشنهاد شده است. در این مطالعه ادعا شده است که پارامتر فرکانس حساسیت متفاوتی نسبت به پارامترهای هندسی از جمله نسبت ضخامت صفحه به ورق، نسبت ضخامت دیوار به ورق و چگالی نسبی فوم پرکننده داشته است.

۳. نتایج

شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ کانتورهای خیز مودهای ارتعاشی شش مود اول مدل‌ها را نشان می‌دهند. در این کانتورها مقادیر خیز و نحوه‌ی تغییر شکل‌های ارتعاشی در هر مود قابل مشاهده است. فرکانس‌های طبیعی مربوط به این شبیه‌سازی‌ها به ترتیب در جدول (۳) آورده شده است. نتایج این تحلیل نشان می‌دهد که شکل هسته مربعی و مثلثی به ترتیب دارای بیشترین و کمترین مقادیر فرکانس طبیعی هستند. در مطالعه انجام شده توسط Tanimoto et al. (2001) با بررسی اثرات هندسه هسته لانه زنبوری و ضخامت مواد صورت بر فرکانس ویژه نشان داده شده است که خواص ارتعاش ویژه به شدت به سفتی مصالح پوسته‌های خارجی و هندسه هسته لانه زنبوری بستگی دارد. Griese et al. (2015) با مقایسه دو هندسه لانه زنبوری و آکوستیک در هفت چپش مختلف و بررسی خواص از دست دادن انتقال صوتی در کامپوزیت‌های ایزوتروپیک نتیجه گرفتند که فرکانس‌های طبیعی با شماره‌های فرد با رزونانس‌های پانل لانه زنبوری همسو می‌شوند که منجر به افت زیادی در انتقال فشار صوت می‌شود. برای امواج صفحه‌ای که در زوایایی غیر از صفر درجه طبیعی

جدول ۳ - فرکانس طبیعی مدل‌ها بر حسب هر تری

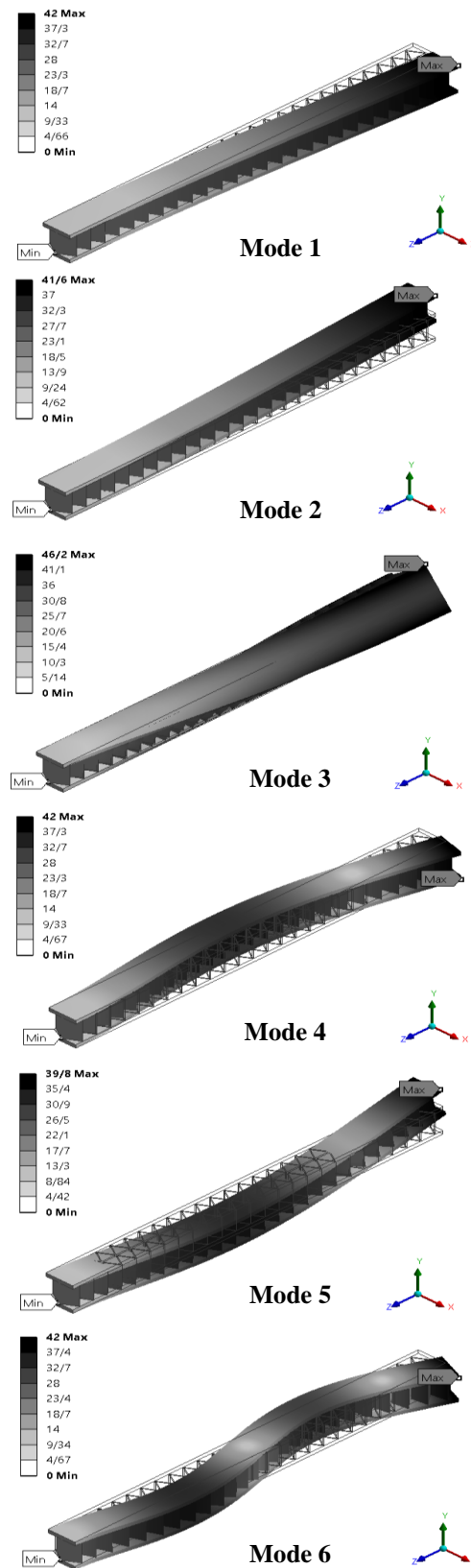
Table 3- Natural frequencies of models in Hz

Core geometry	ω_{n1}	ω_{n2}	ω_{n3}	ω_{n4}	ω_{n5}	ω_{n6}
Triangle	88.74	140.26	543.58	814.00	938.11	1471.3
Square	117.52	143.14	706.97	828.64	1049.7	1867.9
Hexagonal	94.93	151.97	564.17	582.05	845.79	1577.7

جدول ۴ - ماکزیمم خیز مدل‌ها بر حسب میلی‌متر

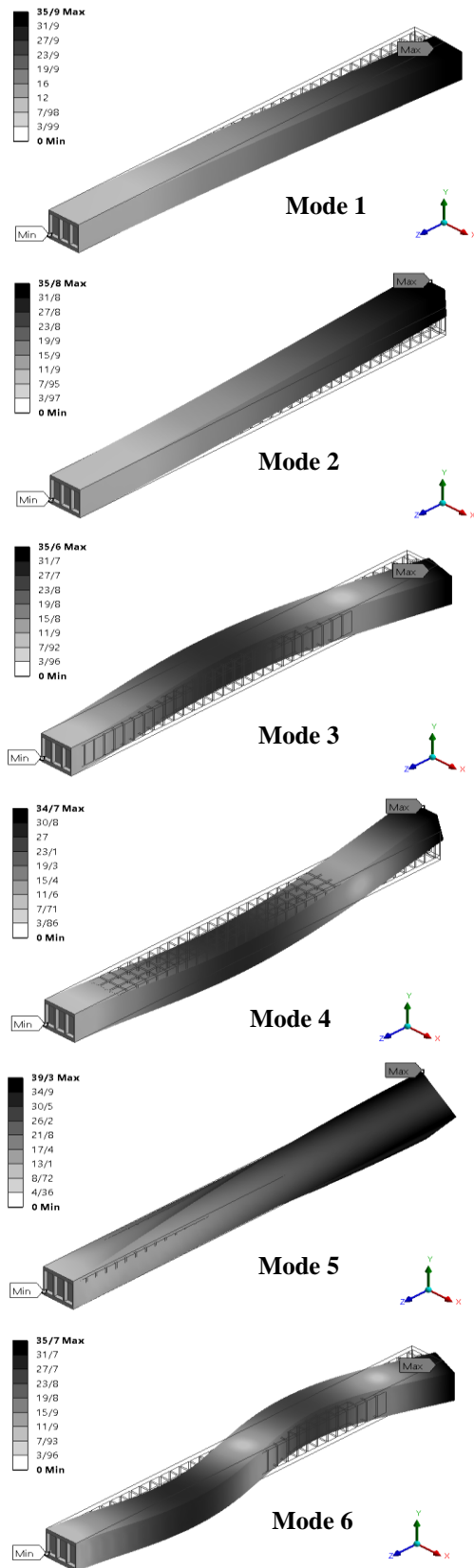
Table 4- Models' maximum deflection in mm

Core geometry	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4	Mode 5	Mode 6
Triangle	42	41.6	46.2	46.2	39.8	42
Square	35.9	35.8	35.6	34.7	39.3	35.7
Hexagonal	38.5	38.4	38.7	37.5	42.1	38.8



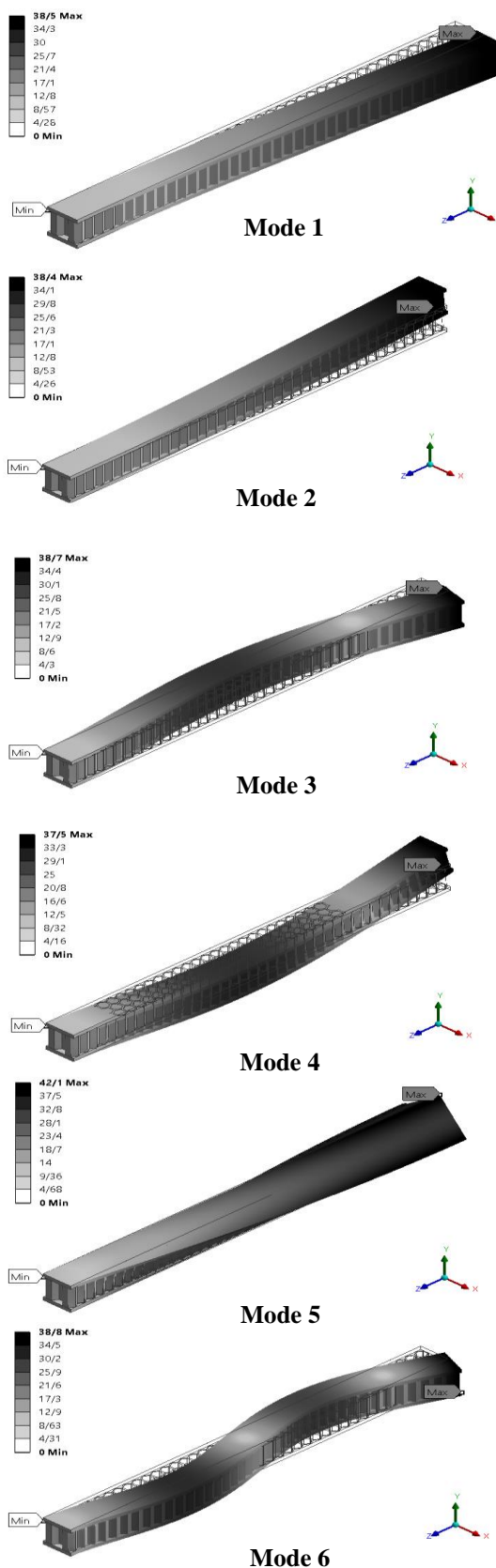
شکل ۱۱- خیز تیر دارای هسته‌های مثلثی در شکل مودهای مختلف (میلی‌متر)

Fig. 11- Deflection of beam with triangular core cells in different mode shapes (mm)



شکل ۱۲- خیز تیر دارای هسته‌های مربعی در شکل مودهای مختلف (میلی متر)

Fig. 12- Deflection of beam with rectangular core cells in different mode shapes (mm)



شکل ۱۳- خیز تیر دارای هسته‌های شش ضلعی در شکل مودهای مختلف (میلی‌متر)
 Fig. 13- Deflection of beam with honeycomb core cells in different mode shapes (mm)

حداکثر آستانه‌ی تحمل نیروی خمشی هستند. این مقادیر در جدول (۵) ارائه شده است.

در مرحله دوم هر تیر بصورت یک‌سردرگیر در انسیس شبیه‌سازی شده است. بررسی حداکثر نیروی قابل تحمل هر مدل نشان می‌دهد که تیرهای دارای هسته مثلثی و مربعی به ترتیب دارای حداکثر و

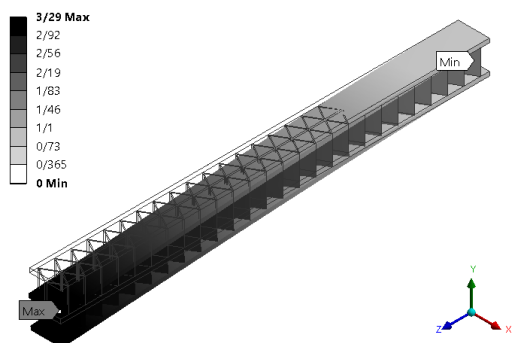
جدول ۵- حداکثر بار قابل تحمل، خیز و تنش معادل توسط هر مدل

Table 5- Maximum bearing load, deflection, and equivalent stress of each model

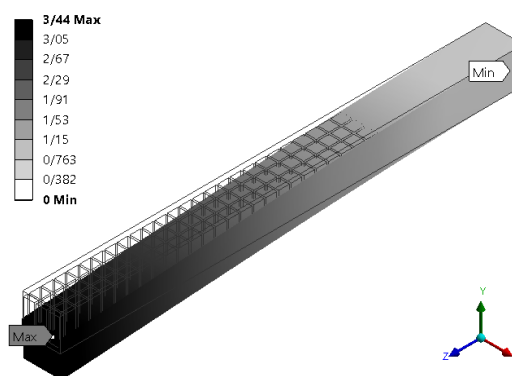
Core	Equivalent Stress (MPa)	Maximum Force (N)	Deflection(mm)
Triangle	210	4390	3.29
Square	210	5620	3.44
Hexagonal	210	4200	3.06

است که بیشترین خیز در سر آزاد تیر دارای هسته‌های مربعی مشاهده می‌شود. کانتورهای مربوط به خیز هر یک از سه مدل در شکل (۱۴) به تصویر کشیده شده است.

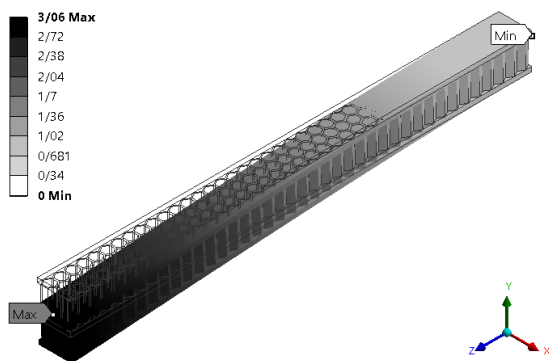
همانطور که انتظار می‌رود، ماکزیمم خیز هر تیر دقیقا در سر آزاد آن به وقوع می‌پیوندد. مقایسه‌ی ماکزیمم مقدار خیز هر یک از مدل‌ها که در جدول ۵ درج شده است، نشان می‌دهد که خیز تیر دارای سلول‌های شش‌ضلعی دارای کمترین مقدار بوده است. این در حالی



(a)



(b)

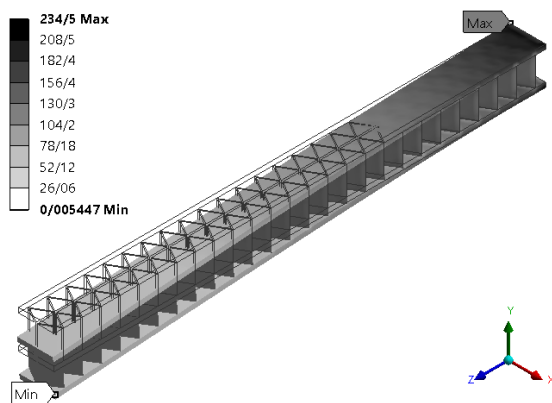


(c)

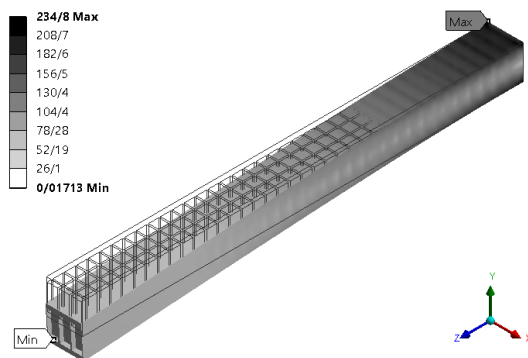
شکل ۱۴- خیز مربوط به مدل (الف) یک، (ب) دو، (ج) سه بر حسب میلی‌متر
 Fig. 14- Deflection of model (a) one, (b) two, (c) three in mm

قبل ذکر شد، از مقادیر تنش معادل فون مایسیس به منظور تعیین حداکثر نیروی قابل تحمل توسط هر پانل استفاده شده است.

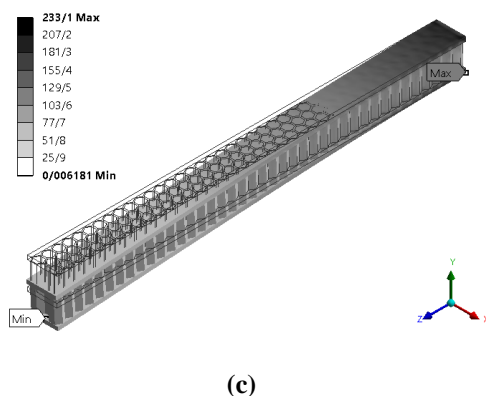
کانتورهای مربوط به تنش فون مایسیس هر مدل در شکل (۱۵) نشان داده شده است. مطابق این شکل، ماکزیمم مقادیر تنش در نزدیکی نقاط تکیه‌گاهی رویت می‌شوند. همانطور که در بخش‌های



(a)



(b)



شکل ۱۵- تنش فون-مایسس مربوط به مدل (الف) یک، (ب) دو، (ج) سه بر حسب مگاپاسکال
 Fig. 15- Von-Mises Stress of model (a) one, (b) two, (c) three in MPa

جدول ۶- نتایج تحلیل عددی تیر ساندویچی با چیدمان مختلف هسته در ماژول مکانیکال انسیس

Table 6- Numerical Analysis Results of sandwich beam with different core configurations in ANSYS mechanical Module

Core	Proportional bending rigidity	Bending rigidity	Deflection (mm)	Load/Volume	Load Capacity	Proportional Volume	Volume (cm ³)
Triangle	37.38	1334.4	3.29	15.2	4390	0.74	289.19
Square	45.76	1633.9	3.44	14.3	5620	1.10	393.99
Hexagonal	38.45	1372.6	3.06	12.24	4200	0.88	343.22

محاسبه نسبت ماکزیمم بار قابل تحمل به حجم هر پانل امکان مقایسه دو مورد فوق را تامین کرده است. به این ترتیب چیدمان‌های مثلثی، مربعی و شش ضلعی قدرت تحمل بارهایی به ترتیب ۱۵/۳، ۱۴/۳ و ۱۲/۲۴ نسبت به حجم مصالح خود را داشته‌اند.

پس از به دست آوردن مقادیر خیز و آستانه بار قابل تحمل هر تیر، نسبت استحکام به وزن مدل‌ها با استفاده از مفهوم سختی خمشی (نسبت بار به خیز) بررسی شده است. مقادیر این جدول نشان می‌دهند که تیرهای دارای چیدمان مربعی، لانه‌زنبوری و مثلثی با دارا بودن سختی خمشی ۴۵/۷۶، ۳۸/۴۵ و ۳۷/۳۸ برابر تیر اویلری با ابعاد مشابه، استحکام به وزن چشمگیرتری نسبت به تیر مذکور داشته‌اند.

مقادیری که در جدول ۷ ارائه شده است، نتایج آزمایشگاهی نمونه‌های واقعی است (Liu et al., 2018) که برای نشان دادن صحت نتایج مقاله پیش رو در این قسمت آورده شده است.

نتایج عددی حاصل از مدل‌سازی‌های انجام شده در جدول ۶ طبقه‌بندی شده است. شبیه‌سازی‌های مذکور در مورد یک تیر صلب با ابعاد ۵۲*۳/۷۵*۴ سانتی‌متر نیز انجام شده و از نتایج آن به منظور مقایسه‌ی نسبی مدل‌ها استفاده شده است.

مقایسه‌ی حجم مدل‌ها با تیر صلب نشان می‌دهد که افزودن هسته‌های مثلثی و شش‌ضلعی موجب کاهش حجم نسبی پانل شده است، در حالی که هسته مربعی حجم نسبی پانل را ۱۰٪ افزایش داده است. می‌توان اظهار کرد که هسته‌های مثلثی از نظر حجم نسبی نسبت به دو چیدمان دیگر بهینه‌تر هستند.

بررسی حداکثر بار قابل تحمل مدل‌ها نشان می‌دهد که چیدمان مربعی هسته با ماکزیمم بار ۵۶۲۰ نیوتن، آستانه تحمل نیروی بیشتری داشته است. چیدمان‌های مثلثی و لانه‌زنبوری از این نظر در رده‌های دوم و سوم قرار گرفته‌اند.

جدول ۷- مقایسه نتایج حل عددی و آزمایش نمونه واقعی تیر با هسته شش ضلعی (Liu et al., 2018)

Table 7- Comparison of numerical solution and real specimens' test results of beam with honeycomb cells (Liu et al., 2018)

Results	Bending Rigidity compared to Euler's beam
Numerical Model	38.55
Real Model	37

با بررسی حداکثر نیروی قابل تحمل هر مدل، می‌توان چنین ادعا کرد که اگر بین ورق صلب، لایه‌ای لانه‌زنبوری با ضخامتی برابر ضخامت ورق صلب (۱ سانتی‌متر) قرار بگیرد، قدرت تحمل نیرو توسط پانل تا ۴ برابر افزایش می‌یابد. این در حالی است که اگر ضخامت هسته مذکور ۳ برابر ضخامت ورق صلب ابتدایی (مجموع ضخامت پوسته‌ها) باشد، آستانه‌ی تحمل نیرو توسط پانل بیش از ۹ برابر می‌شود. این مقادیر در جدول (۸) ارائه شده است.

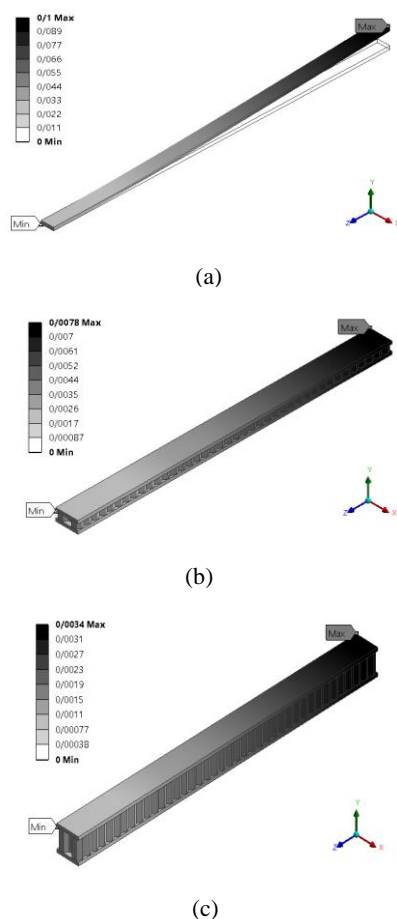
جدول ۸- حداکثر بار قابل تحمل، خیز و تنش معادل توسط هر مدل

Table 8- Maximum bearing load, deflection and equivalent stress of each model

Model	Equivalent Stress (MPa)	Maximum force (N)	Deflection (mm)
Model 1	210	500	14
Model 2	220	2000	7.88
Model 3	230	4880	3.51

می‌دهد که با قرار گرفتن هسته‌ای لانه‌زنبوری به ضخامت ۱ سانتی‌متر بین پوسته‌ها، خیز پانل نسبت به ورق صلب ۴۴٪ کاهش می‌یابد. این در حالی است که با ۳ برابر شدن ضخامت هسته نسبت به پوسته، خیز نسبت به پانل صلب تقریباً ۷۵٪ کاهش می‌یابد.

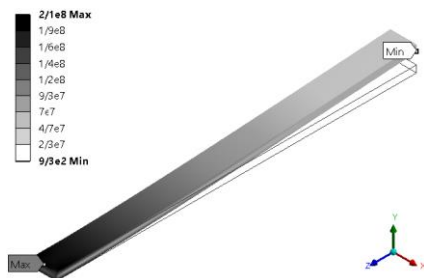
کانتورهای مربوط به خیز هر یک از سه مدل در شکل (۱۶) به تصویر کشیده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود، ماکزیمم خیز هر تیر دقیقاً در سر آزاد آن به وقوع می‌پیوندد. مقایسه‌ی ماکزیمم مقدار خیز هر یک از مدل‌ها که در جدول (۲) درج شده است، نشان



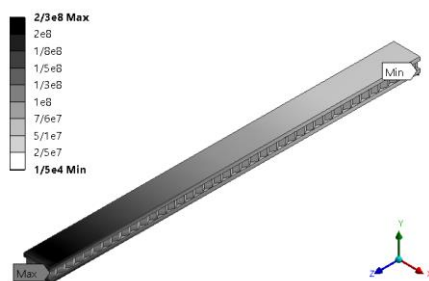
شکل ۱۶- خیز مربوط به مدل (الف) یک، (ب) دو، (ج) سه بر حسب میلی‌متر
Fig. 16- Deflection of model (a) one, (b) two, (c) three in mm

پس از به دست آوردن مقادیر خیز و تنش معادل، نسبت استحکام به وزن مدل‌ها با استفاده از مفهوم سختی خمشی بررسی شده است. نتایج عددی حاصل از مدل‌سازی‌های انجام شده به طور خلاصه در جدول (۳) آورده شده است.

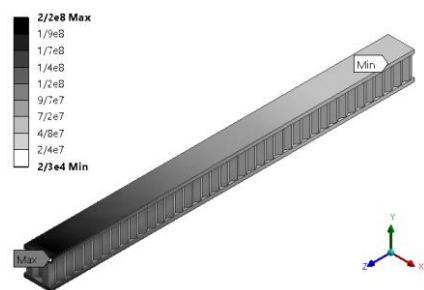
کانتورهای مربوط به تنش فون مایسس هر مدل در شکل (۱۷) نشان داده شده است. مطابق این شکل، ماکزیمم مقادیر تنش در نزدیکی نقاط تکیه‌گاهی رویت می‌شوند. همانطور که در بخش‌های قبل ذکر شد، از مقادیر تنش معادل فون مایسس به منظور تعیین حداکثر نیروی قابل تحمل توسط هر پانل استفاده شده است.



(a)



(b)



(c)

شکل ۱۷- تنش فون-مایسس مربوط به مدل (الف) یک، (ب) دو، (ج) سه بر حسب پاسکال
Fig. 17- Von-Mises Stress of model (a) one, (b) two, (c) three in Pa

هریک از ورق‌ها به ترتیب افزایش ضخامت $1/28$ ، $4/091$ و $7/109$ به دست آمده است. به این معنا که پانل صلب قادر به تحمل باری معادل $1/28$ حجم مصالح به کار رفته در آن است. لذا می‌توان چنین نتیجه گرفت که با افزایش ضخامت هسته لانه‌زنبوری، نسبت باری که سازه تحمل می‌کند در مقایسه با میزان افزایش حجم مصالح مورد استفاده در ساخت آن به طرز چشمگیری افزایش می‌یابد.

مقادیر جدول (۹) نشان می‌دهد که حجم مصالح مورد استفاده در ساخت مدل دو نسبت به مدل یک، $1/253$ برابر و حجم مصالح مورد استفاده در ساخت مدل سه نسبت به مدل یک، $1/76$ برابر شده است. اما این افزایش حجم مصالح و در نتیجه افزایش وزن سازه‌ها در مقایسه با نسبت بار قابل تحمل که به ترتیب ۴ و بیش از ۹ برابر شده، قابل توجه است. بطوریکه نسبت بار قابل تحمل به حجم

جدول ۹- نتایج تحلیل عددی مدل‌های ۱-۳ در ماژول مکانیکال انسیس

Table 9- Numerical Analysis Results of models 1-3 in ANSYS mechanical Module

Model	Proportional Bending rigidity	Bending Rigidity	Deflection (mm)	Load/Volume	Load Capacity	Proportional Volume	Volum (cm ³) e
Model 1	1.00	35.7	13.8	1.28	500	1.00	390.0
Model 2	7.12	253.8	7.9	4.09	2000	1.25	488.9
Model 3	38.94	1390.9	3.5	7.11	4880	1.76	686.4

جدول ۱۰- نتایج آزمایش نمونه‌های واقعی (Liu et al., 2018)

Table 10 Real specimens' test results (Liu et al., 2018)

Model	Flexural rigidity compared to solid plate
Model 1	1
Model 2	7
Model 3	37

مشابه یکدیگر بوده‌اند. ماکزیمم و مینیمم مقادیر خیز و فرکانس طبیعی به ترتیب مربوط به چیدمان‌های مربعی و مثلثی بوده است.

در بخش دوم، هر تیر بصورت یک‌سردرگیر مدل شده است. مقادیر تنش معادل فون‌مایسس و خیز، بعنوان نتایج این شبیه‌سازی استخراج شده‌اند. در گام اول وضعیت شکست سازه به کمک مقایسه‌ی مقادیر تنش معادل مدل و تنش تسلیم فولاد بررسی شده است. نسبت استحکام به وزن به کمک مقادیر حجم و خیز هر پانل محاسبه شده است. نتایج این شبیه‌سازی نشان می‌دهد که نسبت استحکام به وزن تیرهای دارای چیدمان هسته مربعی، شش‌ضلعی و مثلثی به ترتیب نسبت به تیر ساده معمولی با ابعاد مشابه بصورت چشمگیری بیشتر است.

در این مطالعه تاثیر تغییر ضخامت هسته بر رفتار مکانیکی سازه‌های ساندویچی با هسته لانه‌زنبوری بصورت عددی تحلیل شده است. در مدل اول، یک تیر ساده اوپلری و در مدل‌های دو و سه، هسته‌های لانه‌زنبوری با ضخامت‌های به ترتیب ۱ و ۳ سانتی‌متری بصورت عمودی بین ورق پوسته طراحی شده و بصورت یک سر درگیر مدل شده‌اند. مقادیر تنش معادل فون‌مایسس و خیز مدل‌ها بعنوان نتایج این شبیه‌سازی استخراج شده‌اند. در گام اول وضعیت شکست سازه به کمک مقایسه‌ی مقادیر تنش معادل مدل و تنش تسلیم فولاد بررسی شده است. تحلیل حجم و خیز هر پانل، امکان محاسبه نسبت استحکام به وزن را فراهم آورده است.

نتایج این شبیه‌سازی نشان می‌دهد که نسبت استحکام به وزن تیرهای دارای هسته لانه‌زنبوری نسبت به تیرهای اوپلری معمولی بصورت چشمگیری بیشتر است و با افزایش هرچه بیشتر ضخامت هسته لانه‌زنبوری؛ میزان تحمل بار توسط سازه، نسبت بار قابل تحمل به حجم مصالح به کار رفته و سختی خمشی پانل بطور بهینه افزایش

با توجه به تعریف سختی خمشی تیر به صورت نسبت بار قابل تحمل به خیز و مقادیر به دست آمده در جدول (۳) می‌توان چنین نتیجه گرفت که در حالتی که ضخامت هسته لانه‌زنبوری برابر با ضخامت پوسته است، تنها با ۲۵٪ افزایش حجم مصالح می‌توان سختی خمشی را نسبت به ورق صلب را تا ۷/۱۲ برابر رساند. این در حالی است که با ۱/۷۶ برابر شدن مصالح نسبت به ورق صلب، سختی خمشی ۳۸/۹۴ برابر خواهد شد. مقادیری که در جدول (۱۰) ارائه شده است، نتایج آزمایشگاهی نمونه‌های واقعی (Liu et al., 2018) است که برای نشان دادن صحت نتایج مقاله پیش رو در این قسمت آورده شده است.

تفاوت بسیار کم مقادیر جدول (۴) با نتایج عددی مقاله پیش رو، شاهد صحت نتایج به دست آمده است، به طوری که در مورد سختی خمشی هریک از پانل‌ها نسبت به ورق صلب، نمونه دوم تنها ۰/۱۷٪ و نمونه سوم تنها ۰/۲۵٪ با مقادیر این جدول اختلاف دارند. این تفاوت اندک ناشی از تفاوت اندک عرض پانل‌های تحت مدل‌سازی در مطالعه‌ی صورت گرفته و نمونه‌های واقعی تحت آزمایش بوده است.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

در این مطالعه اثر چیدمان هسته بر رفتار مکانیکی سازه‌های ساندویچی با چیدمان متفاوت هسته بصورت عددی تحلیل شده است. سه مدل سازه‌ای با سلول‌های مثلثی، مربعی و شش‌ضلعی با ضخامت ۳ سانتی‌متر که بصورت عمودی بین ورق پوسته قرار داشتند، طراحی شدند.

در مرحله اول رفتار مدل‌ها در شرایط ارتعاش آزاد بررسی شده است. نتایج حاکی از آن است که شکل مودهای کمانشی هر سه مدل

می‌یابند. بدیهی است که با افزایش ضخامت هسته لانه‌زنبوری، میزان تغییر شکل‌ها کاهش می‌یابد.

فهرست علائم	
height of the cell(<i>cm</i>)	h
effective diameter of the cell(<i>cm</i>)	d
thickness of the cell(<i>mm</i>)	t
علائم یونانی	
Angle of the cell	α
زیر نویس‌ها	
Core of a composite cell	c

References:

- Ameen, H.A. and Mashloosh, K.M., 2015. Experimental and numerical analysis of AA3003 honeycomb sandwich panel with different configurations. *American Journal of Scientific Industrial Research*, 2, pp.25-32. <https://doi.org/10.5251/ajsir.2015.6.2.25.32>
- Azarafr, R., Davar, A. and Mahmoodi, A., 2017. Three-point bending test of metal and composite sandwich panels with grid stiffened core. *Journal of Science and Technology of Composites*, 3(4), pp.377-388.
- Griese, D., Summers, J.D. and Thompson, L., 2015. The effect of honeycomb core geometry on the sound transmission performance of sandwich panels. *Journal of Vibration and Acoustics*, 137(2), p.021011. <https://doi.org/10.1115/1.4029043>
- Heidarinejad, G., Pasharshahri, H. and Mazaheri, K., 2013. Evaluation of induced-flow in a two-room compartment fire using large eddy simulation. *Modares Mechanical Engineering*, 13(4), pp.74-85. Dor: 20.1001.1.1027594 0.1392.13.4.13.1
- Liu, Q.S., Roux, B. and Velarde, M.G., 1998. Thermocapillary convection in two-layer systems. *International journal of heat and mass transfer*, 41(11), pp.1499-1511. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(97\)00277-9](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(97)00277-9).
- Liu, J., Liu, J., Mei, J. and Huang, W., 2018. Investigation on manufacturing and mechanical behavior of all-composite sandwich structure with Y-shaped cores. *Composites Science and Technology*, 159, pp.87-102. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.01.026>
- Liu, Y., Liu, W., Gao, W., Zhang, L. and Zhang, E., 2019. Mechanical responses of a composite sandwich structure with Nomex honeycomb core. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 38(13), pp.601-615. <https://doi.org/10.1177/0731684419836492>
- Peng, C., Fox, K., Qian, M., Nguyen-Xuan, H. and Tran, P., 2021. 3D printed sandwich beams with bioinspired cores: Mechanical performance and modelling. *Thin-Walled Structures*, 161, p.107471. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.107471>
- Tanimoto, Y., Nishiwaki, T., Shiomi, T. and Maekawa, Z., 2001. A numerical modeling for eigenvibration analysis of honeycomb sandwich panels. *Composite Interfaces*, 8(6), pp.393-402. <https://doi.org/10.1163/156855401753424433>
- Wang, Y.J., Zhang, Z.J., Xue, X.M. and Zhang, L., 2019. Free vibration analysis of composite sandwich panels with hierarchical honeycomb sandwich core. *Thin-Walled Structures*, 145, p.106425. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106425>
- Wang, Z., Wang, X., Gao, T. and Shi, C., 2021. Mechanical behavior and deformation mechanism of triply periodic minimal surface sheet under compressive loading. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 28(19), pp.2057-2069. <https://doi.org/10.1080/15376494.2020.1829756>