



تحلیل و مقایسه بار کماتش سازه‌های تخت مشبک تحت بار فشاری محوری

مهناز ذاکری^{1*}، ابوالفضل جعفری²

1- استادیار، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران

* تهران، صندوق پستی 16569-83911، m.zakeri@kntu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 17 فروردین 1395

پذیرش: 01 خرداد 1395

ارائه در سایت: 15 تیر 1395

کلیدواژگان:

صفحه مشبک

بار کماتش

آزمایش تجربی

چگالی شبکه

شرایط مرزی

چکیده

پوسته‌های نازک تقویت‌شده با سازه‌های مشبک به‌طور گسترده‌ای در صنایع متعدد مهندسی به کار گرفته می‌شوند. بررسی رفتار پایداری سازه‌های مشبک و تعیین بار کماتشی آن‌ها تحت بار فشاری، مسئله‌ای است که تاکنون مورد توجه بسیاری از محققین بوده و مطالعات گسترده‌ای در این حوزه صورت پذیرفته است. در این مقاله شبکه جدیدی با نام دایاکوب معرفی شده و رفتار کماتشی آن ارزیابی می‌شود. بدین منظور، ابتدا رفتار کماتشی 5 نوع پانل تخت مشبک رایج شامل ساختارهای شش‌ضلعی، مثلثی، مربعی، لوزی و کاژومه تحت بار محوری فشاری مورد بررسی می‌گیرد و رفتار آن‌ها با شبکه دایاکوب مقایسه می‌شود. تاثیر چگالی شبکه به‌کار رفته در هر یک از ساختارها بر بار کماتشی این سازه‌ها در شرایط مرزی گوناگون تحلیل می‌شود. با توجه به تفاوت جرم نمونه‌ها از پارامتر بار بحرانی ویژه (نسبت بار کماتش به جرم سازه) برای مقایسه رفتار کماتشی پانل‌ها استفاده می‌شود. با استفاده از مدل‌سازی اجزای محدود و تحلیل عددی، شبکه‌ای که دارای بالاترین بار کماتشی در هر شرایط مرزی است مشخص می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد در صورتی که لبه‌های بارگذاری نشده در پانل‌های مشبک دارای تکیه‌گاه ساده باشند، شبکه جدید دایاکوب دارای بالاترین پایداری کماتشی در مقایسه با سایر ساختارها خواهد بود. در نهایت، صحت نتایج عددی تایید می‌گردد. دو نمونه از ساختارها شامل شبکه شش ضلعی و دایاکوب به صورت تجربی مورد آزمایش قرار گرفته و صحت نتایج عددی تایید می‌گردد.

Analysis and comparison of buckling load of lattice flat structures under axial compression loading

Mahnaz Zakeri*, Abolfazl Jafari

Aerospace Engineering, Khajeh Nasir Toosi University of Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 16569-83911, Tehran, Iran, m.zakeri@kntu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 05 April 2016
Accepted 21 May 2016
Available Online 05 July 2016

Keywords:
Lattice panel
Buckling load
Experiment
Grid density
Boundary conditions

ABSTRACT

Thin sheets stiffened with lattice structures are used widely in many engineering industries. Investigation of stability behavior for the grid structures and determination of the buckling load under compressive loads is an issue that has attracted the attention of many researchers, and extensive studies have been done in this field. In this paper, a new grid called Diacube is introduced and its buckling load is examined. For this aim, first, the buckling behavior of 5 common types of stiffened flat lattice panels containing hexagonal, triangular, square, diamond and kagome grid are investigated under compressive axial load; and the results are compared with Diacube grid. The effect of network density used in each structure on the buckling of these structures is studied under different boundary conditions. Regarding the mass difference of samples, specific critical load parameter (the buckling load to mass ratio) is used for comparison between the structures. Using the finite element modeling and numerical analysis, the grid that has the highest buckling load in each boundary condition is determined. It is found that if unloaded edges in lattice panels are simply supported, the new Diacube grid will have the highest buckling load among all structures. Finally, validity of the numerical result obtained for two samples of the structures including hexagonal and Diacube grid is evaluated experimentally; and the numerical results are confirmed.

1- مقدمه

مشابه سازه‌های مشبک امروزی هستند در سال 1921 در روسیه ساخته شدند. از آنجا که طراحی سازه‌های سبک‌تر با مقاومت بیشتر همواره مورد توجه طراحان سازه بوده است، در دو دهه اخیر حجم گسترده‌ای از پژوهش‌ها در زمینه طراحی سازه‌های تقویت شده به تحلیل سازه‌های مشبک تقویت شده اختصاص یافته است. امروزه پانل‌های مشبک سبک وزن معمولاً در شکل‌های گوناگون مانند شش ضلعی (نوع شبکه هگزگونال¹)، مثلثی (نوع شبکه ایزوگرید²)، مربعی (نوع شبکه اورتوگرید³)، لوزی (نوع شبکه دایاموند⁴)

صفحات مشبک تقویت‌شده با شبکه‌بندی‌های گوناگون به دلیل دارا بودن نسبت استحکام و سفتی به وزن قابل توجه نسبت به سازه‌های تقویت نشده و همچنین توان برابری بالا، در سال‌های اخیر کاربردهای فراوانی در صنایع گوناگون از جمله صنایع دریایی، خودروسازی، صنایع هسته‌ای، مخازن تحت فشار و به ویژه صنایع هوافضا داشته‌اند و پیشرفت‌های زیادی در زمینه ساخت ماشین‌های این سازه‌ها صورت گرفته است. اولین سازه‌های مشبک فلزی که

Please cite this article using:

M. Zakeri, A. Jafari, Analysis and comparison of buckling load of lattice flat structures under axial compression loading, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 6, pp. 333-344, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

و کاژومه⁵ (یا انیزوگرید⁶) مورد استفاده قرار می‌گیرند.

کمانش یکی از مهم‌ترین فازهای ناپایداری در سازه‌های تحت بارگذاری فشاری است، به گونه‌ای که به عنوان یکی از مهم‌ترین معیارهای طراحی صفحات تحت فشار مطرح می‌شود. در زمینه بررسی کمانش سازه‌های مشبک پژوهش‌های مختلفی به روش‌های تحلیلی، عددی و تجربی انجام شده و مقالات زیادی ارائه شده است.

در سال 1973 شرکت مک دائل داگلاس¹ یکی از اولین اطلاعات مدون برای تحلیل و طراحی سازه‌های ایزوگرید را در قالب یک هندبوک ارائه کرد [1]. در ادامه اسلیش و همکاران [2] با انجام آزمایش بر روی سازه‌های ایزوگرید ساخته شده از آلومینیوم، رفتار پایداری این سازه‌ها را مورد بررسی قرار دادند. سپس اندرسون [3] معادلاتی برای محاسبه بار کمانش سازه‌های مشبک فلزی که دارای هندسه تکرارپذیر مثلثی شکل بودند ارائه داد.

آکی و همکاران [4] بهینه‌سازی صفحات تخت با شبکه مثلثی تحت بارهای استاتیکی و دینامیکی را بررسی کردند. ایشان زاویه مناسب تقویت کننده‌های مثلثی را برای یک شرط مرزی خاص از سازه و با هدف بیشینه‌سازی بار بحرانی ویژه کمانش و فرکانس‌های طبیعی سازه، به صورت ترکیبی تعیین نمودند. مکانیزم تغییر شکل صفحات و پوسته‌های مشبک تقویت‌شده با شبکه‌بندی‌های گوناگون تحت بار فشاری توسط ژانک و همکاران [5] بررسی شد. ایشان با هدف کمینه کردن وزن سازه و افزایش بار کمانشی، روشی برای محاسبه سفتی معادل سازه و بار بحرانی کمانش ارائه کردند.

رحیمی و یزدانی [7,6] به‌صورت عددی و تجربی تاثیر شکل شبکه تقویت‌کننده‌ها و تعداد ریب‌های مارپیچ بر رفتار کمانشی پوسته‌های مشبک تقویت شده، تحت بار محوری را مورد بررسی قرار دادند. نتایج ایشان نشان می‌داد که به منظور تاثیرگذاری ریب‌های² مارپیچ بر مقاومت کمانشی سازه، به حداقل مقداری از چگالی شبکه نیاز است. همچنین ریب‌های مورب نسبت به ریب‌های محیطی از تاثیرگذاری بیشتری بر مقاومت کمانشی سازه برخوردار هستند. در پژوهشی دیگر، تاثیر پروفیل سطح مقطع تقویت‌کننده‌ها بر بار کمانش محوری پوسته‌های مشبک با شبکه‌بندی مثلثی، توسط رحیمی و همکاران [8] مورد بررسی قرار گرفت. ایشان با به‌کارگیری روش اجزای محدود، سطح مقطع پروفیلی را که در آن سازه دارای بالاترین بار کمانشی است معرفی نمودند. در سال 2013 قاسمی و یزدانی [9] با استفاده از تئوری تغییر شکل‌های برشی مرتبه اول تاثیر پارامترهایی همچون ضخامت پوسته و زاویه قرارگیری تقویت‌کننده‌ها بر بار بحرانی کمانش پوسته‌های مشبک، با شبکه‌بندی لوزی و تحت بار محوری را مورد بررسی قرار دادند. در پژوهشی دیگر کاظمی و رحیمی [10] به صورت عددی و تجربی تاثیر پارامترهایی همچون ضخامت ورق کامپوزیتی، شکل شبکه (مثلثی، لوزی و شش‌ضلعی) و تعداد شبکه بر بار کمانشی ورق‌های تقویت‌شده مشبک کامپوزیتی را مورد مطالعه قرار دادند. با توجه به متفاوت بودن جرم نمونه‌ها، از معیار بار ویژه (نسبت بار کمانش به جرم) استفاده شد. نتایج ایشان نشان می‌داد برای بارگذاری فشاری محوری و در حالتی که لبه‌های بارگذاری شده دارای تکیه‌گاه گیردار و لبه‌های بارگذاری نشده آزاد بودند، شبکه مثلثی بیشترین بار ویژه را در بین شبکه‌های مورد بررسی دارد.

وانگ و عبدالله [11] کمانش کلی و محلی صفحات و پوسته‌های تقویت شده با تقویت‌کننده‌های ایزوگرید و اورتوگرید و ساخته شده از مواد ایزوتروپ

و اورتوتروپ را مورد بررسی قرار دادند. ایشان از روش آغشته‌سازی بر پایه تئوری یکسان‌سازی برای محاسبه خصوصیات مکانیکی سازه معادل شده (شامل تقویت‌کننده و پوسته) استفاده نموده و اعتبار نتایج حاصل از روش نیمه تحلیلی خود را با مقایسه با نتایج اجزای محدود ارزیابی کردند. هوانگ و همکاران [12] تاثیر پارامترهایی نظیر ضخامت پوسته، عرض و ارتفاع تقویت‌کننده‌ها را بر رفتار کمانشی صفحات تخت مشبک تقویت‌شده با شبکه‌های مربعی، لوزی و مثلثی تحت شرایط مرزی تکیه‌گاه ساده مورد مطالعه قرار دادند. در تحقیق ایشان مشخص شد که هر یک از این پارامترها تاثیر قابل توجهی بر بار کمانش سازه دارد و همچنین ضخامت پوسته و ارتفاع تقویت‌کننده‌ها نسبت به عرض آن‌ها تاثیر بیشتری بر بار کمانشی سازه دارد.

اخیرا طالع‌زاده و رحیمی [13] با اصلاح نحوه ترکیب کردن ماتریس سفتی پوسته و تقویت‌کننده‌ها، روش جدیدی برای پوسته‌های مشبک تقویت‌شده به شیوه معادل‌سازی ارائه کرده و با استفاده از روش انرژی ریتز، بار بحرانی کمانش محوری را محاسبه نمودند. همچنین نتایج تحقیق نشان می‌داد که اگرچه افزایش تعداد تقویت‌کننده‌ها، بار بحرانی کمانش سازه مشبک را افزایش می‌دهد اما الزاما بار بحرانی ویژه را بهبود نمی‌بخشد. در پژوهشی دیگر تواترو [14] به تحلیل پانل‌های تخت مشبک بدون پوسته با شبکه تقویتی ایزوگرید و تحت بار فشاری محوری با هدف کمینه کردن وزن سازه و افزایش بار کمانشی پرداخت. پارامترهای مورد بررسی او سطح مقطع تقویت‌کننده‌ها، موقعیت و زاویه قرارگیری ریب‌ها بود.

با مرور مقالات موجود مشاهده می‌شود که علی‌رغم گستردگی پژوهش‌ها درخصوص رفتار کمانشی سازه‌های مشبک، تاکنون تحقیق جامعی که دربردارنده تاثیر شرایط مرزی و چگالی شبکه بر بار کمانش پانل‌های تخت مشبک بوده و همچنین تعیین‌کننده شبکه تقویتی مناسب برای شرایط مرزی مورد نظر در کاربردهای طراحی باشد، صورت نگرفته است.

هدف این مقاله، تحلیل و مقایسه رفتار کمانشی انواع ساختارهای مشبک تحت شرایط مرزی مختلف با استفاده از روش اجزای محدود و انتخاب مناسب‌ترین شبکه برای استفاده در مسائل طراحی است. بدین منظور 5 نوع شبکه تقویتی متداول تحت شرایط مرزی مختلف با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس مدل‌سازی شده و ضمن در نظر گرفتن تاثیر چگالی شبکه، ساختاری که بالاترین بار کمانش در هر شرایط مرزی را داراست مشخص می‌شود. علاوه بر این، شبکه جدیدی با ساختار لوزی-مکعب موسوم به دایاکیوب³ نیز مطرح شده و رفتار کمانشی آن مورد تحلیل و مقایسه با سایر شبکه‌ها قرار می‌گیرد. در نهایت با انجام آزمایش‌های کمانش تحت بار فشاری تک محوری بر روی نمونه‌های دایاکیوب و شش ضلعی، صحت نتایج بدست آمده مورد ارزیابی قرار گرفته و عملکرد پیش‌بینی شده برای پانل‌ها صورت تجربی نیز تایید می‌گردد. نتایج این پژوهش به طراحان سازه‌های تخت تقویت شده این امکان را می‌دهد که با توجه به شرایط مرزی حاکم بر سازه مورد نظر، بتوانند نوع شبکه تقویتی و همچنین چگالی شبکه مناسب برای آن را به‌گونه‌ای انتخاب نمایند که بیشترین مقاومت کمانشی را داشته باشد.

2- مدل‌سازی عددی

با توجه به پیچیدگی استفاده از روش‌های تحلیلی در بررسی رفتار کمانشی سازه‌های مشبک تحت شرایط مرزی مختلف، بسیاری از پژوهشگران به‌منظور دستیابی به پاسخ‌های این‌گونه مسائل، از روش‌های عددی استفاده می‌کنند. روش اجزای محدود از جمله روش‌های معمول عددی در بررسی رفتار

¹ Kagome

² Anisogrid

³ McDonnell Douglas

⁴ Ribs

⁵ Diacube

مربعی و لوزی برابر $L=212\text{ mm}$ می‌باشد. اما برای این که ضمن حفظ اندازه 212 میلی‌متر برای عرض تمام نمونه‌ها، شکل هندسی مناسبی از شبکه‌های شش‌ضلعی، مثلثی، کاژومه و دایاکيوب پدید آید، مقدار L برای این ساختارهای مشبک برابر 212 ± 8 در نظر گرفته شده است. این تفاوت در طول‌ها تاثیر اندکی بر بار کمانشی و تاثیر بسیار ناچیزی بر مقدار بار بحرانی ویژه کمانش (نسبت بار کمانش به جرم نمونه) این سازه‌ها دارد. مقادیر L برای تمامی مدل‌ها در جدول 1 مشخص شده‌اند. همچنین در هر 4 لبه پانل-های مدل شده قابی به اندازه 5 میلی‌متر در نظر گرفته شده است تا در تست‌های آزمایشگاهی نیز بتوان شرایط مرزی دلخواه را بر نمونه اعمال نمود. "شکل 3" یک نمونه از شبکه شش‌ضلعی-B را نشان می‌دهد.

برای انجام یک مطالعه و مقایسه جامع‌تر، هر شبکه با 5 چگالی سلولی مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد که در "شکل 2" با نمادهای A, B, C, D, E و نشان داده شده‌اند. پارامتر x که در جدول 1 آمده است اندازه سلول گسترش چگالی شبکه‌ها در عرض سازه (طبق شکل 1) را نشان می‌دهد. چگالی‌های نشان داده شده در "شکل 2" برای تمامی نمونه‌ها به گونه‌ای در نظر گرفته شده‌اند که وزن نمونه‌ها نزدیک به هم باشد. طوری که جرم تمامی مدل‌ها در محدوده‌ی 20 ± 70 گرم قرار می‌گیرد. با افزایش چگالی شبکه، جرم سازه نیز افزایش خواهد یافت. جرم تمامی نمونه‌ها با نماد M در جدول 1 مشخص شده است. همچنین در این جدول مقادیر N (تعداد سلول‌های به کار رفته در عرض سازه که اندازه آن با نماد x در "شکل 1" مشخص شده است) مشخص شده‌اند.

کمانشی سازه‌ها است. در این بخش بار کمانشی متداول‌ترین شبکه‌های مورد استفاده در پانل‌های تخت مشبک، با استفاده از روش اجزای محدود مدل-سازی و تحلیل می‌شود.

لازم به توضیح است که طراحان سازه بسته به اهداف طراحی و شرایط کاربرد سازه، از پانل‌های مشبک با حضور پوسته یا بدون آن استفاده می-نمایند. از آنجا که هدف اصلی این تحقیق مقایسه عملکرد شبکه‌های تقویت-کننده با یکدیگر است، از مدل‌سازی پوسته صرف‌نظر شده و تمامی نمونه‌ها بدون پوسته تحلیل می‌شوند. همان‌طور که در "شکل 1" مشاهده می‌شود 5 نوع شبکه تقویتی شامل شش‌ضلعی، مثلثی، مربعی، لوزی و کاژومه در نظر گرفته شده‌اند. علاوه بر این، ساختار جدیدی با نام دایاکيوب (شکل 1- و) توسط پژوهشگران این مقاله پیشنهاد شده و رفتار کمانشی آن مورد مطالعه و مقایسه قرار می‌گیرد.

از سوی دیگر تراکم یا چگالی شبکه تاثیر مستقیمی بر عملکرد آن خواهد داشت. از این رو اثر چگالی شبکه پانل‌های مشبک بر بار کمانشی این سازه‌ها نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. "شکل 2" چگالی‌های در نظر گرفته شده برای هر شبکه تقویتی را نشان می‌دهد. جهت رعایت اختصار برای نام-گذاری هر پانل و چگالی شبکه مربوط به آن، از نام و نماد اختصاری طبق "شکل 2" استفاده خواهد شد. برای مثال شبکه شش‌ضلعی با چگالی شبکه B با نماد شش ضلعی-B نمایش داده می‌شود.

عرض تمام نمونه‌ها 212 میلی‌متر است. به منظور حذف اثر ابعاد صفحات مشبک بر بار کمانش، نسبت منظری تمامی نمونه‌ها تقریباً یکسان و برابر با 1 انتخاب شده است. برای مثال، طول نمونه‌ها (L) برای شبکه‌های

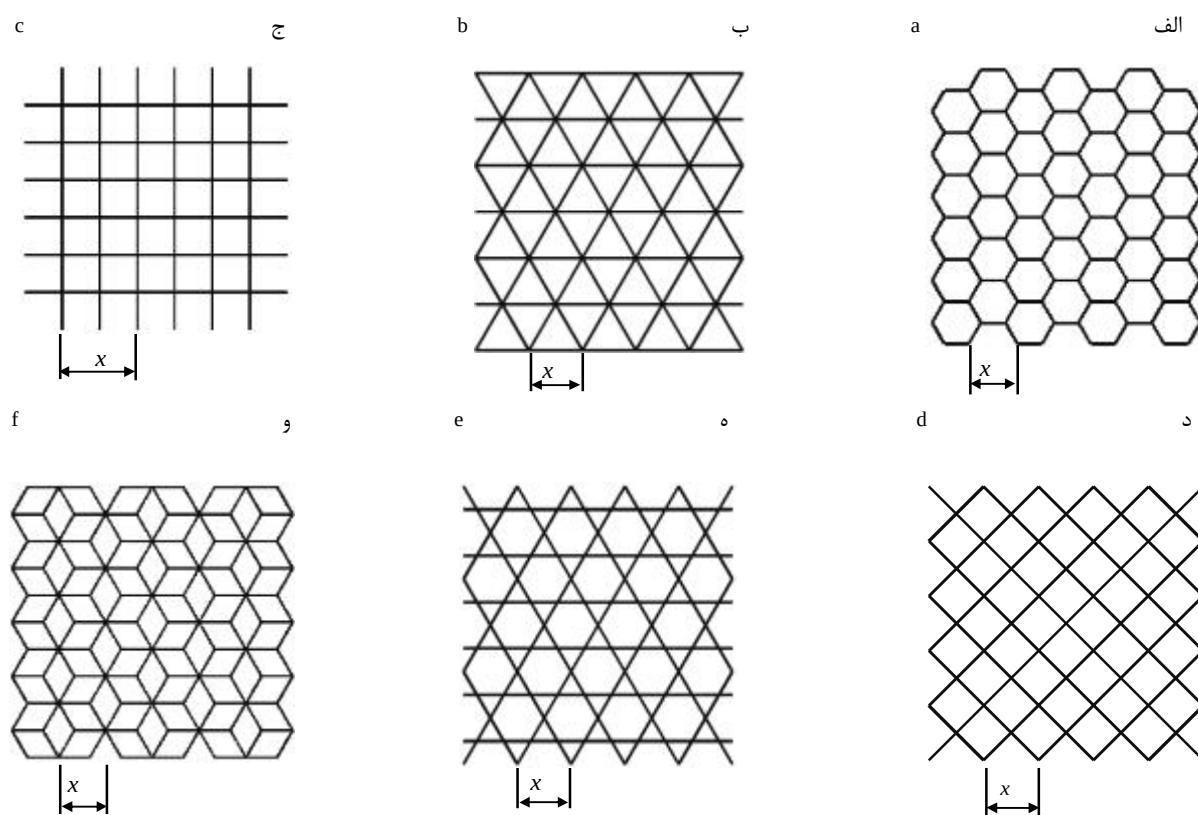


Fig. 1 Configuration of the lattice panels: a) Hexagonal, b) Triangular, c) Square, d) Diamond, e) Kagome, and f) Diacube

شکل 1 پیکربندی پانل‌های مشبک: الف) شش ضلعی، ب) مثلثی، ج) مربعی، د) لوزی، ه) کاژومه، و) دایاکيوب

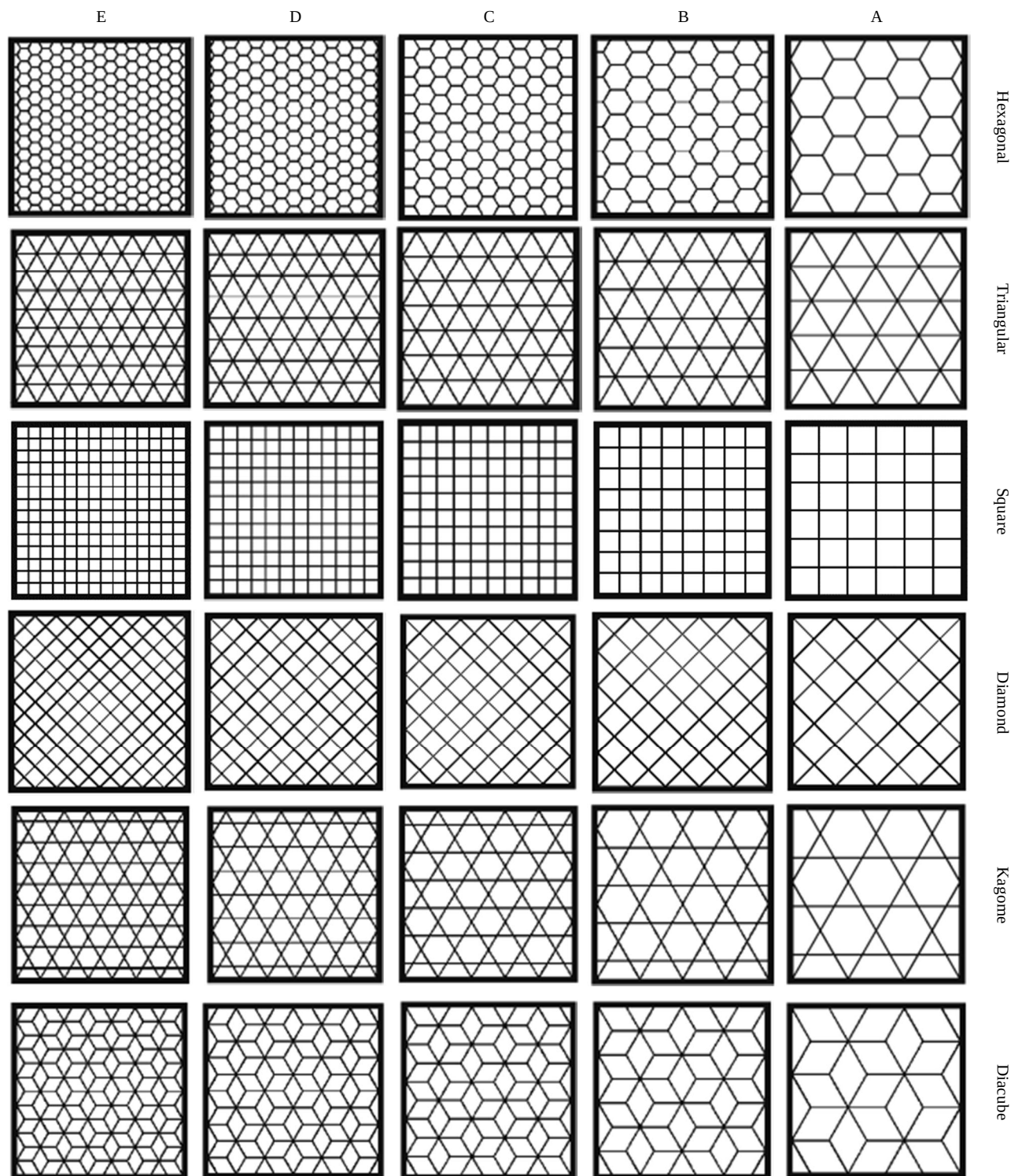


Fig. 2 Grid density intended for flat lattice structures

شکل 2 چگالی‌های شبکه در نظر گرفته شده برای سازه‌های تخت مشبک

تحت چهار حالت از شرایط مرزی مورد بررسی قرار می‌گیرد. این شرایط مرزی و نماد اختصاری مربوط به هر یک عبارتند از:

1- لبه‌های بارگذاری شده تکیه‌گاه گیردار، لبه‌های بارگذاری نشده تکیه‌گاه ساده (CC-SS)

2- چهار لبه تکیه‌گاه گیردار (CC-CC)

سطح مقطع ریب‌های تقویتی در همه نمونه‌ها مربعی شکل و با ابعاد 2×2 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. تمامی نمونه‌ها تحت بارگذاری فشاری تک‌محوری در راستای طولی (y) قرار گرفته‌اند. همان‌طور که در "شکل 3" نشان داده شده است، لبه‌های بارگذاری شده، در راستای طولی و لبه‌های بارگذاری نشده، در راستای عرضی (x) هستند. در این تحقیق رفتار پانل‌ها

جدول 1 مشخصات هندسی، مقادیر جرمی، بار کمانشی و بار بحرانی ویژه نمونه‌ها

Table 1 Geometry, mass values, buckling load and specific critical load of the specimens

SS-SS		SS-CC		CC-SS		CC-CC		M (gr)	L (mm)	N	x (mm)	نوع چگالی شبکه	
P_S	P_{cr}	P_S	P_{cr}	P_S	P_{cr}	P_S	P_{cr}						
50.37	2598	53.55	2762	92.79	4786	107.13	5526	51.6	206.85	4	50	A	شبکه ۱
53.19	3250	56.51	3453	98.43	6014	108.84	6650	61.1	214.08	6	33.33	B	
51.21	3694	58.25	4202	91.19	6578	105.48	7609	72.1	217.68	8	25	C	
49.37	4109	60.50	5035	89.31	7433	103.18	8588	83.2	211.20	10	20	D	
47.72	4292	64.08	5764	86.53	7784	102.37	9208	90.0	206.87	12	16.66	E	
31.99	2044	62.18	3973	66.53	4251	111.46	7121	63.9	218.50	4	50	A	شبکه ۲
32.06	2242	65.60	4587	70.19	4908	113.80	7958	69.9	219.84	5	40	B	
30.98	2360	69.40	5287	75.57	5757	114.23	8702	76.2	214.07	6	33.33	C	
30.68	2533	73.96	6106	78.31	6465	114.16	9425	82.6	209.93	7	28.57	D	
30.21	2690	75.73	6742	78.27	6968	114.32	10178	89.0	206.85	8	25	E	
21.97	1179	32.31	1734	59.60	3198	82.78	4442	53.7	212.00	3	33.33	A	شبکه ۳
22.14	1386	36.87	2308	60.24	3771	83.02	5197	62.6	212.00	4	25	B	
22.14	1584	39.64	2836	60.88	4356	81.35	5820	71.6	212.00	5	20	C	
22.08	1798	42.53	3464	61.37	4998	79.56	6480	81.4	212.00	6	22.22	D	
22.23	1988	44.58	3987	61.50	5501	76.61	6852	89.4	212.00	7	20	E	
28.32	1603	70.92	4014	75.11	4251	157.28	8902	56.6	212.00	4	50	A	شبکه ۴
28.66	1803	76.30	4801	75.49	4750	162.83	10245	62.9	212.00	5	40	B	
27.25	1887	80.82	5597	73.23	5071	157.44	10903	69.3	212.00	6	33.33	C	
26.01	1965	84.11	6356	70.39	5319	153.58	11606	75.6	212.00	7	28.57	D	
24.94	2042	85.31	6986	69.58	5698	146.42	11990	81.9	212.00	8	25	E	
26.29	1415	50.26	2705	63.08	3395	98.89	5322	53.8	214.07	3	66.67	A	شبکه ۵
27.33	1639	54.21	3250	64.79	3885	101.08	6061	60.0	206.85	4	50	B	
26.68	1925	57.91	4179	66.56	4803	102.91	7426	72.2	219.84	5	40	C	
25.36	1989	62.88	4931	67.81	5318	102.88	8068	78.4	214.07	6	33.33	D	
24.80	2103	65.21	5530	67.70	5741	102.78	8716	84.8	209.94	7	28.57	E	
64.56	3330	60.80	3136	117.84	6078	128.03	6604	51.6	204.45	3	66.67	A	شبکه ۶
65.76	3998	63.32	3850	122.80	7466	129.82	7893	60.8	214.07	4	50	B	
64.46	4555	67.34	4759	117.73	8320	125.89	8897	70.7	219.84	5	40	C	
63.31	4681	71.94	5319	114.76	8485	124.52	9207	73.9	204.45	6	33.33	D	
61.24	5102	75.49	6289	108.76	9061	120.72	10057	83.3	209.94	7	28.57	E	

3- لبه‌های بارگذاری شده تکیه‌گاه ساده، لبه‌های بارگذاری نشده

تکیه‌گاه گیردار (SS-CC)

4- چهار لبه تکیه‌گاه ساده (SS-SS)

شرایط مرزی گیردار بر گره‌های موجود در 5 میلی‌متر از لبه نمونه اعمال می‌شوند. برای شرایط مرزی گیردار تمامی درجات آزادی در گره‌ها مقید می‌شوند. اما لبه بالایی (لبه‌ای که به هنگام تست آزمایشگاهی در جهت بارگذاری حرکت خواهد نمود)، در جهت بارگذاری (جهت y) آزاد گذاشته می‌شود تا بتواند بار محوری را بر نمونه اعمال نماید. به منظور اعمال

شرایط مرزی تکیه‌گاه ساده، از گره‌های خط مرکزی لبه‌ها استفاده شده و جابه‌جایی خارج از صفحه (جهت z) به همراه چرخش حول محور x و z مقید می‌شوند.

ماده مورد استفاده برای تمامی پانل‌ها، آلومینیوم 7075-T6 است که کاربرد گسترده‌ای در صنایع هوایی و فضایی دارد. مدول الاستیسیته این آلیاژ برابر 72.394 GPa، ضریب پواسون 0.33، تنش تسلیم 535 MPa و استحکام نهایی آن 575 MPa است.

برای مدل‌سازی هندسی نمونه‌ها، ابتدا طرح دو بعدی آن‌ها ایجاد شده و

3-1- شرایط مرزی CC-SS

مقادیر بار بحرانی ویژه (P_S) برای نمونه‌های تحت شرایط مرزی CC-SS در نمودار "شکل 5" نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در این شرایط مرزی شبکه دایاکوب دارای بیش‌ترین P_S نسبت به دیگر شبکه‌های تقویتی است. راندمان این شبکه در بهترین حالت از چگالی شبکه (دایاکوب-B) به اندازه 24 درصد بیشتر از نزدیک‌ترین رقیب آن در بهترین چگالی آن (شش ضلعی-B) است. حال آن‌که با توجه به پارامترهای هندسی این دو مدل که مقادیر آن در جدول 1 ذکر شده است، مدل‌های دایاکوب-B و شش-ضلعی-B از نظر جرمی (M) و طولی (L) تقریباً با هم برابرند. تصویر مود کمانش کلی شبکه دایاکوب-B، شش ضلعی-B، مثلثی-D، مربعی-E، لوزی-B و کاژومه-D به ترتیب در "شکل‌های 6، 7، 8، 9، 10 و 11" نشان داده شده است.

درمورد تاثیر چگالی شبکه در حالت CC-SS ملاحظه می‌شود که در شبکه‌های دایاکوب و شش‌ضلعی با افزایش چگالی شبکه از حالت A به B مقدار P_S افزایش می‌یابد و در حالت B به بیش‌ترین مقدار خود می‌رسد. سپس با افزایش چگالی شبکه در حالت‌های E، D، C، علی‌رغم افزایش بار کمانشی، مقدار بار بحرانی ویژه کاهش می‌یابد. در شبکه دایاکوب بار بحرانی ویژه در حالت B به اندازه 13 درصد بیشتر از بدترین حالت چگالی شبکه (حالت E) می‌باشد. همچنین در شبکه رقیب یعنی شبکه شش‌ضلعی، در بهترین چگالی شبکه خود (حالت B) به میزان 14 درصد راندمان بهتری نسبت به بدترین حالت چگالی شبکه خود (حالت E) دارد.

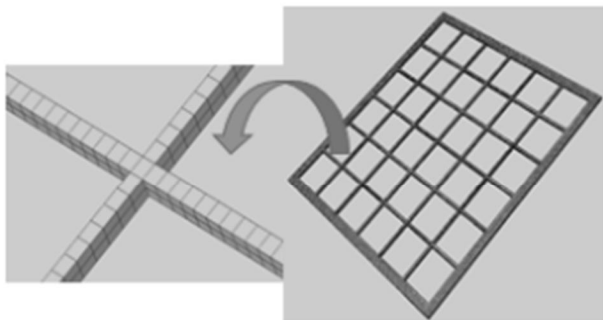


Fig. 4 Meshing detail for square-A specimen

شکل 4 جزئیات مش‌بندی پانل مربعی-A

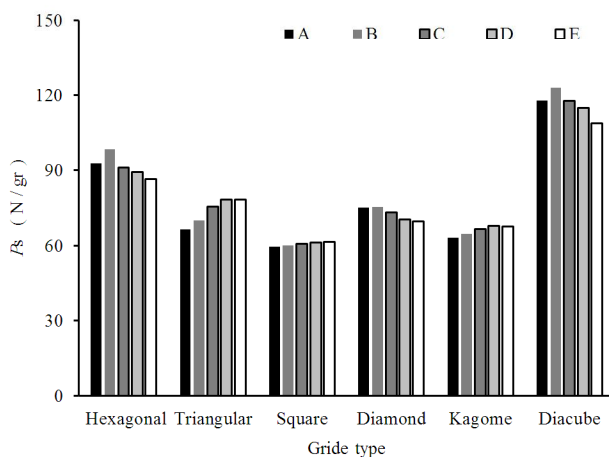


Fig. 5 Comparison of the specific critical load value under CC-SS boundary conditions

شکل 5 مقایسه مقادیر بار بحرانی ویژه در شرایط مرزی CC-SS

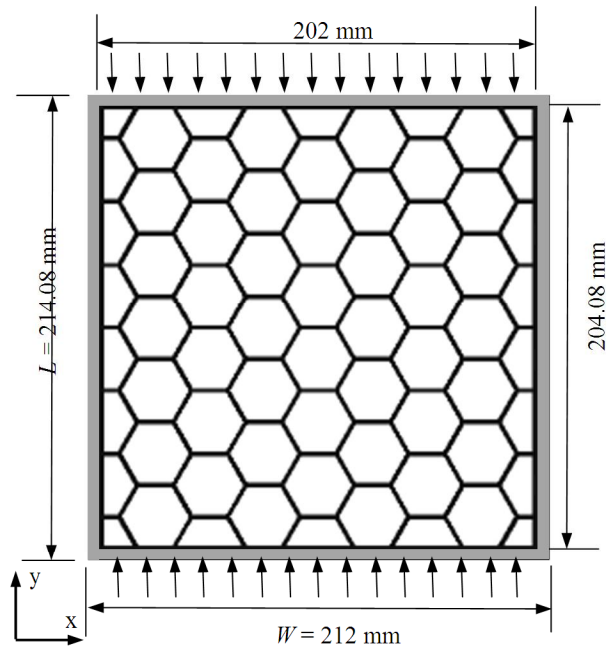


Fig. 3 Geometry and dimensions of hexagonal-B model

شکل 3 هندسه و ابعاد مدل شش‌ضلعی-B

سپس با گسترش آن در بعد سوم به اندازه 2 میلی‌متر، مدل‌ها ایجاد می‌شوند. به منظور دستیابی به پاسخ‌های صحیح در تحلیل اجزای محدود، استفاده از یک شبکه‌بندی مناسب در نمونه‌های مدل شده ضروری است. در این پژوهش با توجه به سه بعدی بودن ماهیت هندسی نمونه‌ها، از المان مکعبی شکل استفاده شده است. همچنین به دلیل ماهیت تغییر شکل‌ها در کمانش از توابع شکل مرتبه دوم استفاده شده و المان‌های مکعبی شکل مرتبه دوم (20 گرهی نوع C3D20R) به کار گرفته شدند. تعداد المان‌ها در هر نمونه، به چگالی شبکه و تعداد ریب‌های در نظر گرفته شده بستگی دارد و با افزایش تعداد المان‌ها در مش‌ریزی‌های مختلف، همگرایی نتایج جهت انتخاب مش مناسب بررسی شده است. به عنوان نمونه، "شکل 4" نحوه مش‌بندی پانل مربعی-A با 5692 المان را نشان می‌دهد. در ادامه، نتایج حاصل از حل عددی صفحات مشبک ارائه می‌شود.

3- بررسی نتایج

مقدار بار بحرانی کمانشی (P_{cr}) حاصل از نتایج عددی برای تمامی مدل‌ها برحسب نیوتن در جدول 1 مشخص شده است. با بررسی مقادیر بار کمانش موجود در این جدول ملاحظه می‌شود که برای تمامی شبکه‌ها با افزایش چگالی شبکه (از حالت A تا E) جرم و بار کمانشی سازه افزایش می‌یابد. لذا با توجه به متفاوت بودن جرم پانل‌ها، از پارامتر بار بحرانی ویژه (P_S) برای مقایسه بین رفتار این سازه‌ها استفاده می‌شود. P_S نسبت بار کمانشی به جرم سازه است که به صورت معادله (1) نشان داده شده و مقادیر آن نیز (برحسب نیوتن بر گرم) در جدول 1 آمده است.

$$P_S = \frac{P_{cr}}{M} \quad (1)$$

در ادامه اثر شرایط مرزی و همچنین چگالی شبکه بر بار کمانشی هر یک از پانل‌های مشبک به تفکیک بررسی می‌شود تا در هر حالت از شرایط مرزی، شبکه‌ای که دارای بالاترین بار بحرانی ویژه است مشخص گردد.

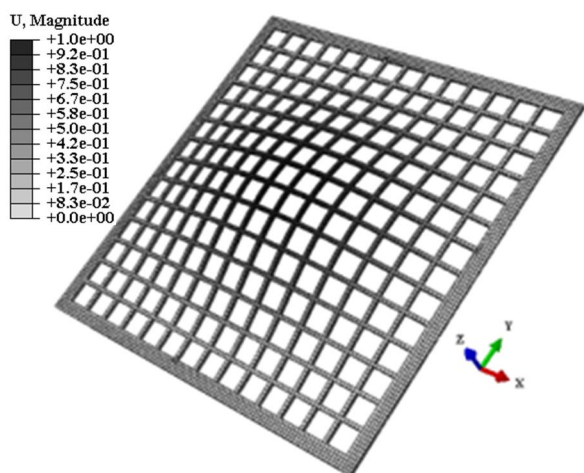


Fig. 9 Global buckling mode for square-E specimen under CC-SS boundary condition

شکل 9: مود کماتش کلی نمونه مربعی-E در شرایط مرزی CC-SS

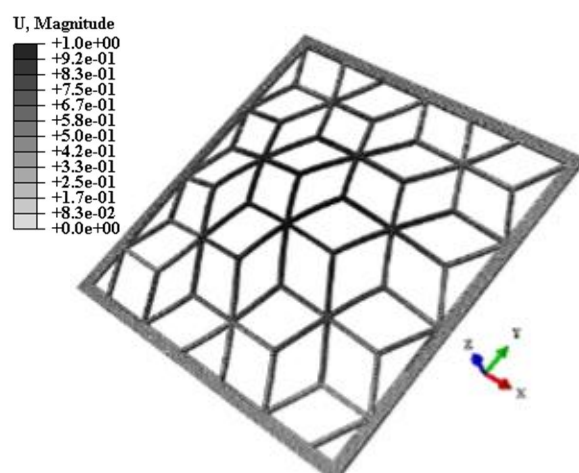


Fig. 6 Global buckling mode for diacube-B specimen under CC-SS boundary condition

شکل 6: مود کماتش کلی نمونه دایاکيوب-B در شرایط مرزی CC-SS

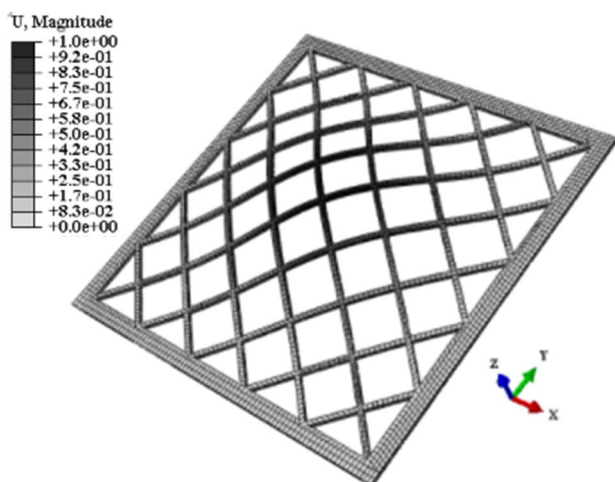


Fig. 10 Global buckling mode for diamond-B specimen under CC-SS boundary condition

شکل 10: مود کماتش کلی نمونه لوزی-B در شرایط مرزی CC-SS

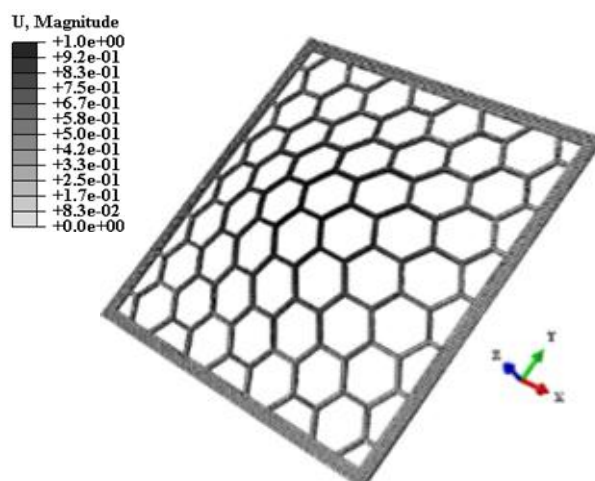


Fig. 7 Global buckling mode for hexagonal-B specimen under CC-SS boundary condition

شکل 7: مود کماتش کلی نمونه شش ضلعی-B در شرایط مرزی CC-SS

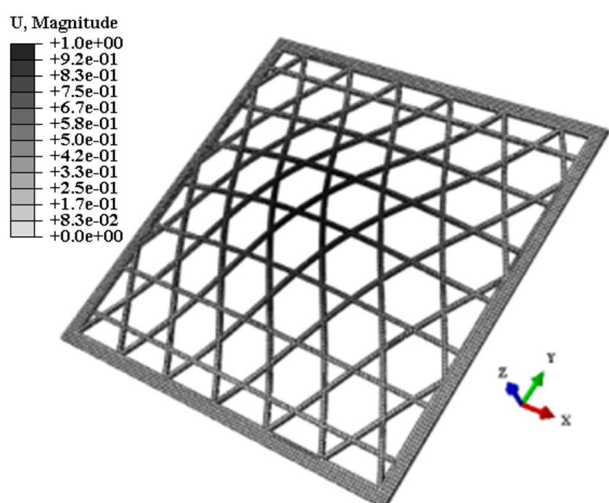


Fig. 11 Global buckling mode for kagome-D specimen under CC-SS boundary condition

شکل 11: مود کماتش کلی نمونه کاژومه-D در شرایط مرزی CC-SS

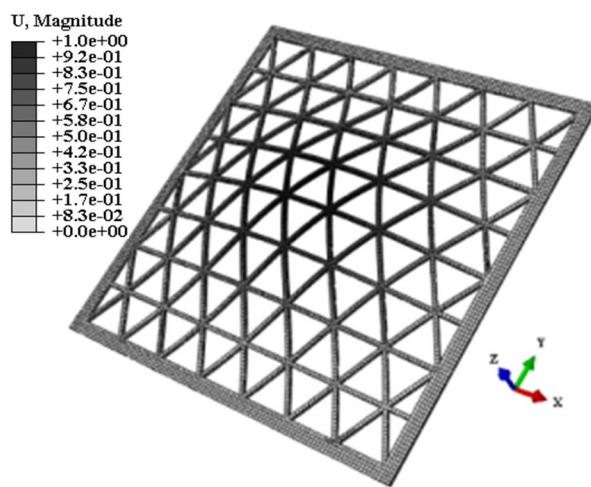


Fig. 8 Global buckling mode for triangular-D specimen under CC-SS boundary condition

شکل 8: مود کماتش کلی نمونه مثلثی-D در شرایط مرزی CC-SS

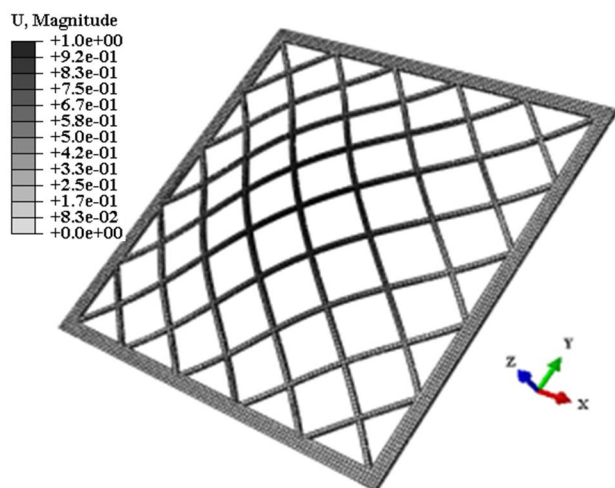


Fig. 13 Global buckling mode for diamond-B specimen under CC-CC boundary condition

شکل 13 مود کمانش کلی نمونه لوزی-B در شرایط مرزی CC-CC

شبکه مثلثی در تمامی چگالی‌های شبکه خود مقدار P_S بیشتری نسبت به شبکه کاژومه دارد.

3-3- شرایط مرزی SS-CC

در نمودار "شکل 14" مقادیر P_S برای پانل‌های مشبک مورد بررسی تحت شرایط مرزی SS-CC نمایش داده شده است. در این حالت، مقدار P_S برای تمامی شبکه‌ها با افزایش چگالی شبکه به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. ملاحظه می‌شود که در این شرایط مرزی نیز همانند شرایط CC-CC، شبکه لوزی که دارای ریب‌های مورب بوده و فاقد ریب‌های عرضی است، بیشترین مقدار P_S را بین سایر شبکه‌ها دارد. "شکل 15" مود کمانش کلی این شبکه را در حالت چگالی C نشان می‌دهد. این شبکه در حالتی که بیشترین چگالی شبکه را دارد (حالت E) دارای بالاترین مقدار P_S است و با افزایش چگالی شبکه از حالت A تا E مقدار P_S به اندازه 20 درصد افزایش می‌یابد.

شبکه لوزی در بهترین حالت از چگالی شبکه خود (حالت E) به میزان 13 درصد راندمان بهتری نسبت به نزدیک‌ترین رقیب خود یعنی شبکه دایاکیوب-E دارد. شبکه دایاکیوب نیز در بهترین حالت چگالی خود (دایاکیوب-E)، 24 درصد راندمان بهتری نسبت به شبکه دایاکیوب-A دارد. همانند حالت CC-CC از نظر مقدار P_S ، شبکه‌های مثلثی و کاژومه بعد از شبکه لوزی قرار گرفته‌اند و شبکه مربعی کمترین مقدار P_S را بین سایر شبکه‌ها دارد. به گونه‌ای که شبکه لوزی-E به میزان 164 درصد راندمان بهتری نسبت به شبکه مربعی-A دارد. همچنین شبکه مثلثی نیز هر چند از لحاظ ساختار هندسی مشابه شبکه کاژومه است اما عمدتاً راندمان بهتری نسبت به شبکه کاژومه دارد.

4-3- شرایط مرزی SS-SS

مقادیر P_S حاصل از تحلیل عددی پانل‌ها با تکیه‌گاه ساده در چهار لبه، در نمودار "شکل 16" ملاحظه می‌شود. در این شرایط مرزی مقدار P_S در شبکه‌های دایاکیوب و شش‌ضلعی به‌طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از سایر شبکه‌ها بوده و همانند حالت CC-SS، شبکه دایاکیوب دارای بیشترین بار بحرانی ویژه نسبت به سایر شبکه‌ها است. این شبکه در بهترین حالت از چگالی شبکه خود (دایاکیوب-B) 23 درصد راندمان بهتری نسبت به نزدیک‌ترین رقیب خود در بهترین چگالی شبکه آن (شش‌ضلعی-B) دارد. مود کمانش کلی

در شبکه مثلثی و کاژومه از حالت A تا D مقادیر P_S افزایش می‌یابد و در حالت E نسبت به حالت D تغییری نمی‌کند. در شبکه لوزی نیز از حالت A تا B، بار بحرانی ویژه اندکی افزایش یافته و سپس با افزایش چگالی شبکه کاهش می‌یابد. شبکه مربعی در حالت چگالی A، کمترین P_S را بین دیگر شبکه‌ها دارد. در این شبکه تغییر چگالی شبکه تأثیر قابل توجهی بر P_S ندارد.

2-3- شرایط مرزی CC-CC

نتایج بار کمانشی پانل‌ها در صورتی که نمونه‌های مدل‌سازی شده در هر چهار لبه ثابت شده باشند، در نمودار "شکل 12" نشان داده شده است. مود کمانشی رخ داده در تمامی مدل‌های این تحقیق از نوع کمانش کلی می‌باشد. ملاحظه می‌شود که در شرایط مرزی CC-CC شبکه لوزی دارای بیشترین بار بحرانی ویژه نسبت به سایر شبکه‌ها است. مود کمانش کلی این شبکه در "شکل 13" نشان داده شده است. در این پانل مشبک بار بحرانی ویژه (P_S) در حالت چگالی B به اندازه 11 درصد بیشتر از بدترین حالت چگالی (حالت E) می‌باشد. شبکه لوزی در بهترین حالت از چگالی شبکه خود (لوزی-B) 25 درصد راندمان بهتری نسبت به نزدیک‌ترین رقیب خود در بهترین چگالی آن (دایاکیوب-B) دارد. همچنین شبکه دایاکیوب در بهترین چگالی شبکه خود (حالت B) 8 درصد راندمان بهتری نسبت به بدترین حالت چگالی خود (حالت E) دارد. در این شرایط مرزی (CC-CC) شبکه مربعی دارای کمترین راندمان بار کمانشی بین دیگر شبکه‌ها است. طوری که شبکه لوزی-B به میزان 112% بار بحرانی ویژه بالاتری نسبت به شبکه مربعی-E دارد.

همان‌طور که در نمودار "شکل 12" ملاحظه می‌شود، در شبکه لوزی و نیز شبکه‌های شش‌ضلعی و دایاکیوب، با افزایش چگالی شبکه از حالت A به B بار بحرانی ویژه افزایش می‌یابد و در حالت B به بیشترین مقدار خود می‌رسد. سپس با افزایش چگالی شبکه در حالت‌های D, C, E، علی‌رغم افزایش بار کمانشی، بار بحرانی ویژه کاهش می‌یابد. این موضوع نشان می‌دهد که در این سازه‌ها اگر چه با افزایش چگالی شبکه بار کمانش سازه افزایش می‌یابد، اما الزاماً بار بحرانی ویژه بهبود نمی‌یابد. در شبکه‌های لوزی، شش‌ضلعی، مربعی و دایاکیوب اگر چه با افزایش چگالی شبکه بار کمانشی افزایش می‌یابد، اما مقدار P_S کاهش می‌یابد و به عبارتی این سازه‌ها در این حالت از شرایط مرزی در چگالی‌های پایین شبکه، نسبت بار به وزن بیشتری را تحمل خواهند کرد. در شبکه‌های مثلثی و کاژومه نیز P_S تا حالت چگالی C افزایش یافته و سپس با افزایش چگالی شبکه تا حالت E ثابت می‌ماند. همچنین

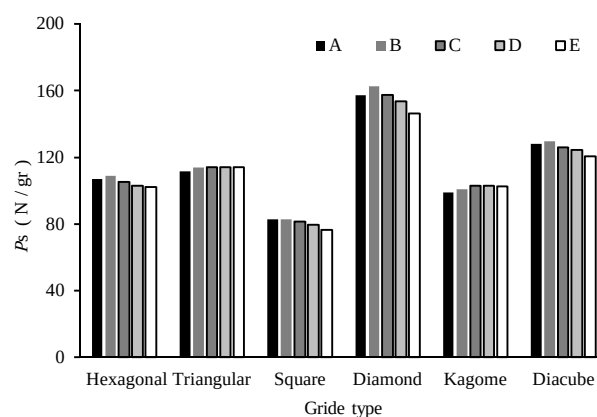


Fig. 12 Comparison of the specific critical load value under CC-CC boundary conditions

شکل 12 مقایسه مقادیر بار بحرانی ویژه در شرایط مرزی CC-CC

شبکه (دایاکيوب-E) می‌باشد. شبکه شش‌ضلعی نیز در بهترین حالت از چگالی شبکه خود (شش‌ضلعی-B) به میزان 11 درصد راندمان بیشتری نسبت به شبکه شش‌ضلعی-E دارد.

همانند حالت CC-SS از نظر مقدار P_S شبکه‌های مثلثی و کاژومه بعد از شبکه‌های لوزی، شش‌ضلعی و دایاکيوب قرار دارند و شبکه مربعی کمترین مقدار P_S را بین سایر شبکه‌ها دارد. به گونه‌ای که شبکه دایاکيوب-B به میزان 199 درصد راندمان بهتری نسبت به شبکه مربعی-A دارد. در شبکه مربعی با افزایش چگالی شبکه مقدار P_S تقریباً ثابت می‌ماند. همچنین در این حالت نیز شبکه مثلثی عمدتاً راندمان بهتری نسبت به شبکه کاژومه دارد.

در شبکه‌های دایاکيوب، مثلثی، شش‌ضلعی، لوزی و کاژومه با افزایش چگالی شبکه از حالت A به حالت B ابتدا P_S افزایش یافته و سپس با افزایش تراکم از حالت B تا E و بار بحرانی ویژه کاهش می‌یابد.

4- صحنه‌گذاری نتایج عددی با آزمایش تجربی

براساس نتایج عددی در بخش قبل، در صورتی که لبه‌های بارگذاری نشده دارای تکیه‌گاه ساده باشند (حالت‌های CC-SS و SS-SS)، شبکه پیشنهادی دایاکيوب دارای بالاترین بار بحرانی ویژه خواهد بود. با توجه اهمیت کاربردی این نتیجه و لزوم صحنه‌گذاری بر آن، نمونه‌ای از نتایج برای حالت CC-SS به صورت تجربی نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

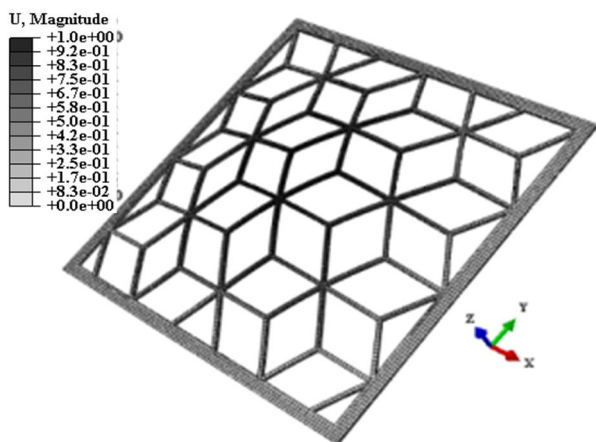


Fig. 17 Global buckling mode for model diacube-B in boundary condition SS-SS

شکل 17 مود کمانش کلی نمونه دایاکيوب-B در شرایط مرزی SS-SS

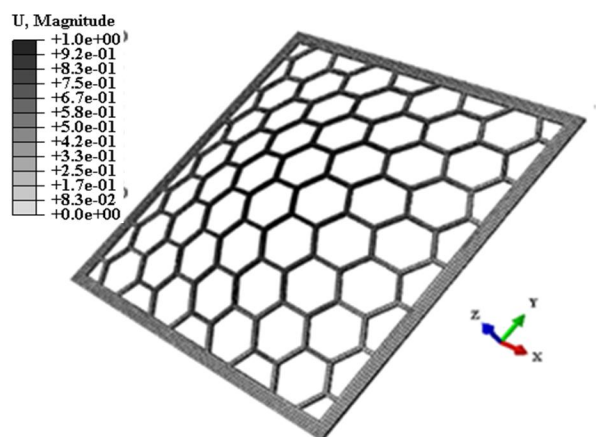


Fig. 18 Global buckling mode for model hexagonal-B in boundary condition SS-SS

شکل 18 مود کمانش کلی نمونه شش‌ضلعی-B در شرایط مرزی SS-SS

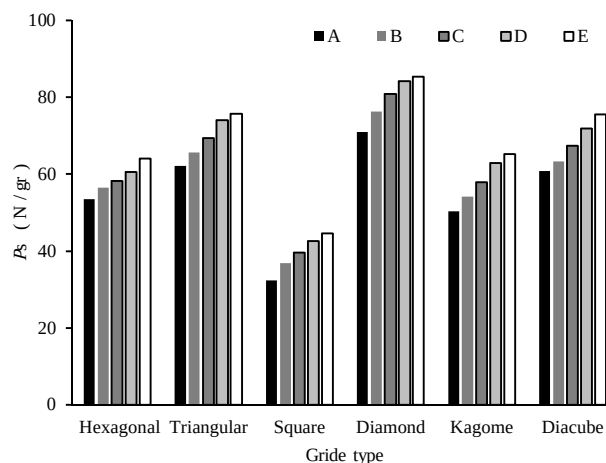


Fig. 14 Comparison of the specific critical load value under SS-CC boundary conditions

شکل 14 مقایسه مقادیر بار بحرانی ویژه در شرایط SS-CC

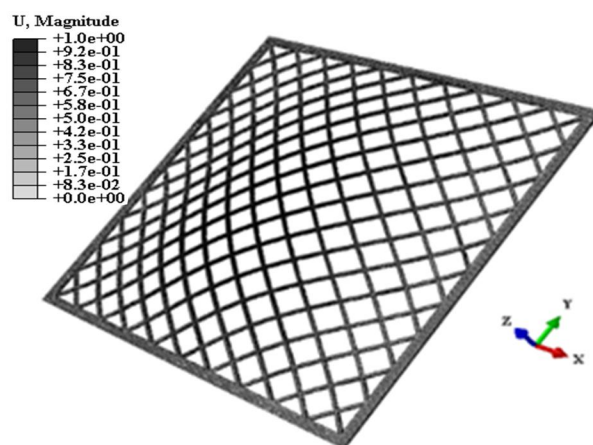


Fig. 15 Global buckling mode for diamond-E specimen under SS-CC boundary condition

شکل 15 مود کمانش کلی نمونه لوزی-E در شرایط مرزی SS-CC

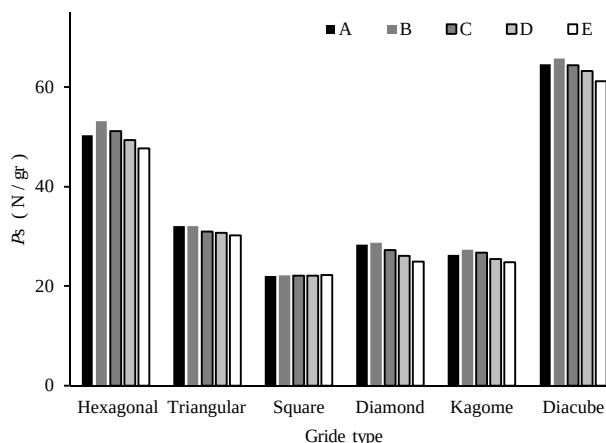


Fig. 16 Comparison of the specific critical load value under SS-SS boundary conditions

شکل 16 مقایسه مقادیر بار بحرانی ویژه در شرایط SS-SS

شبکه دایاکيوب-B و شش‌ضلعی-B به ترتیب در "شکل‌های 17 و 18" نشان داده شده است. بار بحرانی ویژه در بهترین حالت چگالی پانل مشبک دایاکيوب (دایاکيوب-B) به اندازه 7 درصد بیشتر از بدترین حالت چگالی

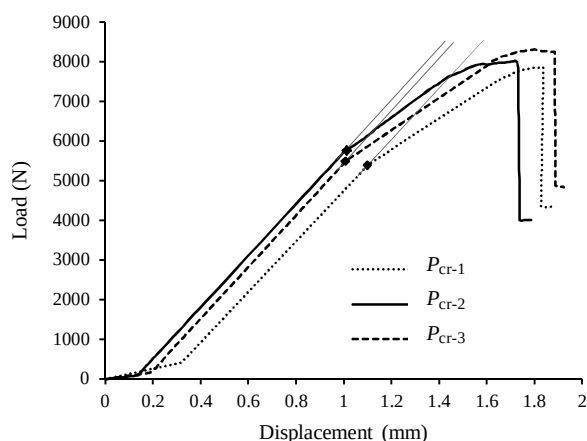


Fig. 21 Load-displacement diagram for hexagonal-B models

شکل 21 نمودار بار-جابجایی برای نمونه‌های شش ضلعی-B

نمونه از شبکه دایاکيوب-B در "شکل 22" نشان داده شده است. نقطه تغییر شیب این نمودارها به عنوان نقطه کمانش و بار متناظر آن به عنوان بار بحرانی کمانش در نظر گرفته می‌شود. لازم به ذکر است که تحلیل استاتیکی نیز برای نمونه‌هایی که تست آزمایشگاهی می‌شوند انجام شد تا اطمینان حاصل شود که تنش ناشی از بار وارد بر نمونه‌ها، قبل از بار کمانشی سازه وارد محدوده پلاستیک نخواهد شد.

طبق نتایج این تحلیل اجزای محدود، در نمونه شش ضلعی-B تحت بار کمانشی پانل (6014 نیوتن)، حداکثر تنش ایجاد شده معادل 287 MPa بوده و در نمونه دایاکيوب نیز با اعمال بار کمانشی پانل (7446 نیوتن)، حداکثر تنش ایجاد شده معادل 365 MPa است که فاصله زیادی با تنش تسلیم ماده که برابر 535 MPa است، دارند.

در "شکل 23" مود کمانشی نمونه شش ضلعی-B و در "شکل 24" مود کمانشی نمونه شش ضلعی-B در حالت تست آزمایشگاهی نشان داده شده است. نتایج حاصل از آزمایش‌ها برای 6 مدل در جدول 2 ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود متوسط بار کمانشی حاصل از تست تجربی اختلاف کمی با بار کمانشی حاصل از حل اجزای محدود داشته و میزان خطا در حدود 7-9 درصد است. این خطا معمولاً به دلیل معایب و نواقص هندسی اولیه در سازه واقعی می‌باشد و موجب می‌شود که بار کمانشی حاصل از نتایج تست همواره کمتر از بار کمانشی محاسبه شده در تحلیل‌های اجزای محدود باشد. توجه شود که حتی با وجود این مقدار خطا در نتایج تجربی، همانند نتایج عددی متوسط بار کمانشی برای نمونه دایاکيوب-B همچنان 25 درصد بیشتر از شش ضلعی-B است. این نتایج نشان‌دهنده پایداری بیشتر شبکه جدید دایاکيوب در شرایط مرزی CC-SS نسبت به سایر شبکه‌های موجود می‌باشد.

5- جمع بندی

در این مقاله رفتار کمانشی 5 نوع ساختار مشبک تقویت کننده متداول شامل شش ضلعی، مثلثی، مربعی، لوزی و کاژومه تحت بار فشاری محوری مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفت. همچنین شبکه جدیدی به نام دایاکيوب معرفی شده و مقاومت کمانشی آن با سایر شبکه‌ها مقایسه شد. تاثیر انواع شرایط مرزی و چگالی شبکه به کار رفته در هر یک از ساختارها بر بار کمانشی این پانل‌ها بررسی شد. با توجه به این که جرم نمونه‌ها تفاوت اندکی با هم داشتند

طبق نتایج عددی، در این شرایط مرزی شبکه دایاکيوب در شرایط بهترین چگالی شبکه خود (دایاکيوب-B) دارای بار کمانشی 7466 نیوتن و بار بحرانی ویژه 122.8 بوده و شبکه رقیب آن شش ضلعی است که در بهترین چگالی شبکه خود (شش ضلعی-B) دارای بار کمانشی 6014 نیوتن و بار بحرانی ویژه 98.43 می‌باشد. از این‌رو این شبکه‌ها برای بررسی و انجام آزمایش انتخاب شدند. برای ساخت نمونه‌ها از ورق آلومینیوم 7075-T6 به ضخامت 2 میلی‌متر و از تکنولوژی واترجت با دقت بالا استفاده شده است. مشخصات مکانیکی نمونه‌ها همانند مشخصات مورد استفاده در مدل‌سازی اجزای محدود است که در بخش 2 بیان شده است. تصویری از نمونه‌های تهیه شده در "شکل 19" نشان داده شده است.

برای اعمال بار فشاری و شرایط مرزی مورد نظر بر روی نمونه‌ها، فیکسچری از جنس فولاد کم کربن ST-37 طراحی و ساخته شد. شکل 20 نحوه قرارگیری یک نمونه از پانل‌های مشبک شش ضلعی را در داخل فیکسچر نشان می‌دهد. 5 میلی‌متر از لبه‌های بالا و پایین نمونه در فیکسچر ثابت شده‌اند تا شرایط تکیه‌گاه گیردار پیاده شود. همچنین لبه‌های کناری نمونه با زاویه 20 درجه تراش کاری شده‌اند تا در شیار تیرهای جانبی فیکسچر قرار گرفته و شرایط تکیه‌گاه ساده برای تست ایجاد شود. تست نمونه‌ها با استفاده از دستگاه هانس فیلد تحت بارگذاری جابه‌جایی با نرخ 0.25 mm/min بر نمونه‌ها انجام شده است.

بار بحرانی کمانش در هر مدل با استفاده از نمودار بار محوری نسبت به جابه‌جایی محوری (در راستای y) مشخص می‌شود. نمودار بار - جابه‌جایی حاصل از تست برای 3 نمونه از شبکه شش ضلعی-B در "شکل 21" و برای 3

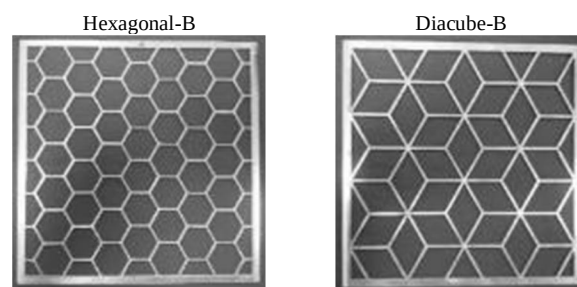


Fig. 19 Two models of produced samples before test

شکل 19 دو نمونه از مدل‌های تولید شده قبل از آزمایش

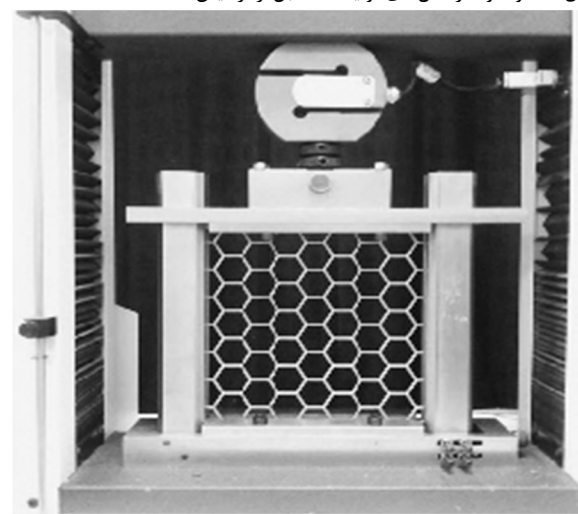


Fig. 20 A sample of hexagonal-B grid in the fixture

شکل 20 نمونه‌ای از شبکه شش ضلعی-B در داخل فیکسچر

جدول 2 مقایسه نتایج عددی و تجربی

Table 2 Comparison between numerical and experimental results

پانل مشبک	شماره نمونه	بار کمانش حاصل از تست (نیوتن)	متوسط بار کمانش تجربی (نیوتن)	بار کمانش حاصل از حل عددی (نیوتن)	درصد خطا
شش ضلعی B-	S1	5750			
	S2	5500	5550	6014	8.36
	S3	5400			
	S4	6900			
دایاکيوب B-	S5	7100	6933	7466	7.7
	S6	6800			

نتایج نشان می‌دهد که در تمامی شبکه‌ها و تحت تمامی شرایط مرزی، بار بحرانی کمانش با افزایش چگالی شبکه (که به همراه خود افزایش وزن سازه را دارد) افزایش می‌یابد، اما بسته به شرایط مرزی و نوع شبکه، افزایش چگالی شبکه می‌تواند باعث افزایش، ثابت ماندن و یا کاهش بار بحرانی ویژه شود و نحوه این تأثیرگذاری کاملاً متفاوت خواهد بود. این تغییرات و اختلاف‌های موجود در بار کمانشی شبکه‌های تقویتی مختلف، به شکل هندسی و ساختار تقویت کننده‌ها، و همچنین تراکم آن‌ها مربوط می‌شود.

مهمترین نتایج این پژوهش به شرح زیر است:

1- در شرایط مرزی CC-CC شبکه لوزی بیشترین P_S را در مقایسه با سایر شبکه‌ها دارد و در حالت چگالی B به میزان 25 درصد بار بحرانی بیشتری نسبت به شبکه رقیب (دایاکيوب B-) دارد. در این حالت لوزی B- به میزان 112 درصد راندمان بیشتری نسبت به شبکه مربعی E- (که دارای کمترین مقدار P_S است) دارد. بررسی رفتار کمانشی تمامی این پانل‌ها در این حالت از شرایط مرزی نشان می‌دهد که اگر چه با افزایش چگالی شبکه بار کمانش سازه افزایش می‌یابد، اما الزاماً بار بحرانی ویژه بهبود نمی‌یابد.

2- مشابه حالت CC-CC، در شرایط مرزی SS-CC شبکه لوزی بیشترین و مربعی کمترین میزان P_S را در مقایسه با دیگر شبکه‌ها دارند. در این حالت از شرایط مرزی شبکه لوزی در بهترین چگالی (حالت C) به میزان 20 درصد راندمان بیشتری نسبت به شبکه رقیب (دایاکيوب B-) دارد. همچنین شبکه لوزی C، 164 درصد راندمان بیشتری نسبت به بدترین شبکه در این شرایط مرزی (مربعی A-) دارد. در این شرایط مرزی بار بحرانی ویژه تمامی شبکه‌ها با افزایش چگالی شبکه افزایش می‌یابد.

3- در صورتی که شرایط مرزی CC-SS بر مسأله حاکم باشد شبکه جدید معرفی شده در این مقاله بیشترین بار بحرانی ویژه را در بین سایر شبکه‌ها داشته و بار بحرانی ویژه شبکه دایاکيوب B- تا 25 درصد بیشتر از شبکه رقیب (شش‌ضلعی B-) است.

4- برای حالتی که شرایط مرزی پانل مشبک از نوع SS-SS باشد، همانند حالت CC-SS، شبکه دایاکيوب B- تا 24 درصد بار بحرانی بیشتری نسبت به شبکه رقیب (شش‌ضلعی B-) دارد. به عبارتی در صورتی که لبه‌های بارگذاری نشده پانل‌های تخت مشبک تقویت شده از نوع تکیه‌گاه ساده باشند شبکه دایاکيوب بالاترین بار بحرانی ویژه را در بین سایر شبکه‌ها خواهد داشت.

5- با توجه به اهمیت نتایج حاصل شده برای شبکه دایاکيوب، صحت این نتایج عددی با انجام تست‌های آزمایشگاهی تحت شرایط مرزی CC-SS ارزیابی شد. نتایج آزمایشگاهی همخوانی خوبی با نتایج اجزای محدود داشته و شبکه دایاکيوب B- از نظر بار بحرانی ویژه، 25 درصد مقاومت کمانشی

از معیار بار بحرانی ویژه (نسبت بار کمانش به جرم سازه) برای مقایسه پانل‌ها استفاده شد تا تاثیر اختلاف جرم بر رفتار کمانشی حذف گردد.

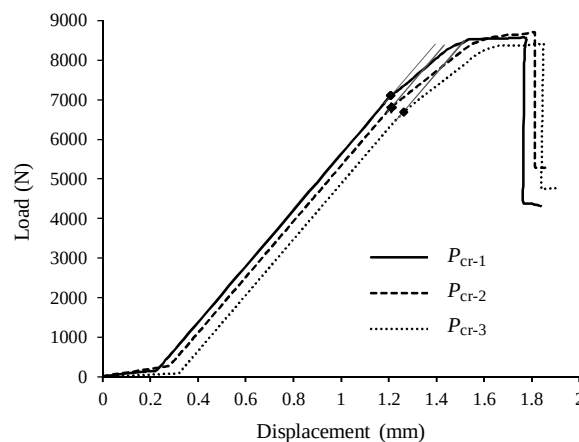


Fig. 22 Load-displacement diagram for diacube-B models

شکل 22 نمودار بار-جابجایی برای نمونه‌های دایاکيوب B-

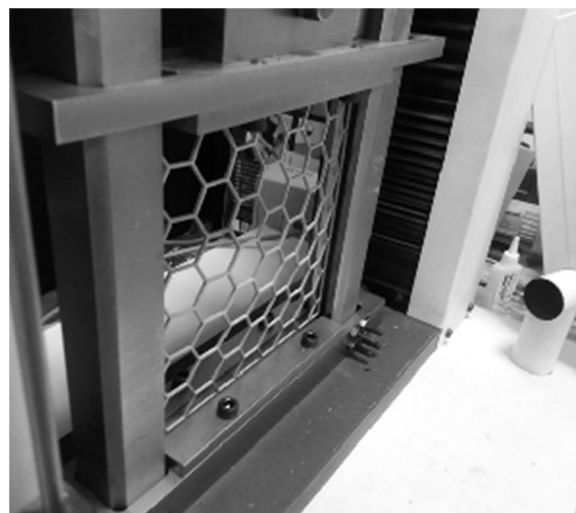


Fig. 23 Global buckling mode for hexagonal-B model in experiment

شکل 23 مود کمانش کلی نمونه شش‌ضلعی B- در تست تجربی



Fig. 24 Global buckling mode for diacube-B model in experiment

شکل 24 مود کمانش کلی نمونه دایاکيوب B- در تست تجربی

بالا تری نسبت به شبکه شش ضلعی B نشان داد.

نتایج این تحقیق می‌تواند زمینه‌ای برای بررسی چگونگی تاثیر شکل شبکه تقویت‌کننده‌ها در شرایط مرزی مختلف، در حوزه‌ی بررسی رفتار کمانشی به صورت تحلیلی و تقریبی باشد. با در نظر گرفتن بار بحرانی ویژه‌ی شبکه‌های بررسی شده در این تحقیق و با توجه به شرایط مرزی حاکم بر سازه مورد طراحی، طراحان سازه می‌توانند شبکه مورد نظر خود را از بین شبکه‌های بررسی شده به همراه بهترین چگالی شبکه آن را به گونه‌ای انتخاب نمایند که کمترین جرم و بیشترین بار قابل تحمل را داشته باشند.

6- مراجع

- [7] M. Yazdani, G. H. Rahimi, The effects of helical ribs number and grid types on the buckling of thin-walled GFRP-stiffened shells under axial loading, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 29, No. 17, pp. 2568-2575, 2010.
- [8] G. H. Rahimi, M. Zandi, S. F. Rasouli, Analysis of the effect of stiffener profile on buckling strength in composite isogrid stiffened shell under axial loading, *Aerospace Science and Technology*, Vol. 24, No. 1, pp. 198-203, 2013.
- [9] M. A. Ghasemi, M. Yazdani, S. M. Hoseini, Analysis of effective parameters on the buckling of grid stiffened composite shells based on first order shear deformation theory, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 10, pp. 51-61, 2013. (in Persian فارسی)
- [10] S. Kazemi Motlagh, G. H. Rahimi, Experimental and numerical analysis of buckling in grid stiffened composite plates, *M Sc Thesis*, Tarbiat Modares University, 2014. (in Persian فارسی)
- [11] D. Wang, M. M. Abdalla, Global and local buckling analysis of grid-stiffened composite panels, *Composite Structures*, Vol. 119, pp. 767-776, 2015.
- [12] L. Huang, A. H. Sheikh, Ching-Tai Ng, M. C. Griffith, An efficient finite element model for buckling analysis of grid stiffened laminated composite plates, *Composite Structures*, Vol. 122, pp. 41-50, 2015.
- [13] A. Talezadehlari, Gh. H. Rahimi, Buckling analysis of stiffened composite cylindrical shell based on the modified smear method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 11, pp. 319-329, 2015. (in Persian فارسی)
- [14] G. Totaro, Optimal design concepts for flat isogrid and anisogrid lattice panels longitudinally compressed, *Composite Structures*, Vol. 129, pp. 101-110, 2015.
- [1] *Isogrid Design Handbook*, NASA Marshall Space Flight Center, Report, CR-124075, February 1973.
- [2] P. Slysh, J. Dyer, J. Furman, J. Key, Isogrid structural tests and stability analyses, *Journal of Aircraft*, Vol. 13, pp. 778-785, 1976.
- [3] S. Anderson, Buckling of periodic structures, *Structural Dynamics & Materials Conference*, Seattle, WA, U.S.A., pp. 159-166, May 12-14, 1980.
- [4] W. Akl, A. El-Sabbagh, A. Baz, Optimization of the static and dynamic characteristics of plates with isogrid stiffener, *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 44, No. 8, pp. 513-523, 2008.
- [5] Z. Zhang, H. Chen, L. Ye, Progressive failure analysis for advanced grid stiffened composite plates/shells, *Composite Structures*, Vol. 86, No. 3, pp. 45-54, 2008.
- [6] M. Yazdani, G. H. Rahimi, A. A. Khatibi, S. Hamzeh, An experimental investigation into the buckling of GFRP stiffened shells under axial loading, *Science Research Essays*, Vol. 4, No. 9,