



مطالعه تجربی و عددی کمانش نیم استوانه مشبک کامپوزیتی

سید محمدرضا خلیلی^{۱*}، یاسر صدیق^۲، سید مهیار میر محمد حسین آهاری^۲

۱- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

تهران، صندوق پستی ۱۹۹۹۱۴۳۳۴۴، khalili@kntu.ac.ir

اطلاعات مقاله

دریافت: ۹۵/۲/۱۳

پذیرش: ۹۵/۲/۱۷

کلیدواژگان:

کامپوزیت

نیم استوانه مشبک

ریب

کمانش

چکیده

سازه‌های مشبک کامپوزیتی از سازه‌های نوین هستند که به دلیل دارا بودن فوایدی همچون استحکام ویژه بالا، سبکی و مقاومت به خوردگی، کاربرد روزافزونی در صنایع مختلف دارند. از جمله کاربرد این سازه‌ها در صنایع موشکی، ماهواره‌برها، بدنه هواپیماها و صنایع دریایی می‌باشد. این سازه‌ها معمولاً از دو بخش پوسته و بخش مشبک تشکیل می‌شوند. بخش مشبک این سازه‌ها از سیستم ریب‌های مورب، حلقوی و طولی تشکیل شده است. در هنگام بارگذاری، انتقال نیرو از پوسته به ریب‌ها اتفاق می‌افتد و ریب‌ها بار را در کل سازه پخش می‌کنند. در این مقاله ابتدا به نحوه ساخت نیم استوانه مشبک کامپوزیتی اشاره می‌شود. در ادامه با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس به بررسی رفتار کمانشی سازه نیم استوانه مشبک کامپوزیتی پرداخته شده است. به منظور تحلیل شرایط مختلف تاثیر پارامترهای مختلف از جمله ضخامت پوسته و زاویه لایه‌های پوسته نیز در تحلیل عددی بررسی شده است. همچنین میزان تاثیر پارامترهای مختلف از جمله الگوهای گوناگون و ارتفاع ریب توسط تحلیل المان محدود به دست آمده است. علاوه بر این، برای اعتبارسنجی نتایج حاصل از نرم‌افزار، آزمایش تجربی نیز انجام پذیرفته و مقایسه‌ای بین نتایج تجربی و عددی انجام شده است.

Experimental and numerical study of the buckling of semi-cylindrical composite lattice

Seyed Mohammad Reza Khalili*, Yaser Sedigh, Seyed Mahyar Mir Mohammad Hossein Ahari

Department of Mechanical Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

*P.O.B. 1999143344, Tehran, Iran, khalili@kntu.ac.ir

Keywords

Composite
Semi-cylindrical Lattice
Rib
Buckling

Abstract

Composite lattice structures, due to their advantages such as high strength, light weight and resistance to corrosion are recently employed in various industrial applications including aerospace and marine structures. These structures are usually composed of two major parts: the shell and the lattice structure. The lattice part is made of a system of Helical, Hoop or axial ribs. During loading, the loads are transferred to the ribs and the ribs distribute the loads throughout the structure. In the present paper, first the fabrication of the semi-cylindrical lattice structure is explained. Then, the buckling behavior of the semi-cylindrical lattice structure is investigated using the ABAQUS finite element software. The effect of various parameters such as the thickness and ply angles in the shell laminate were studied. Moreover, the effect of rib parameters such as different patterns and the rib thicknesses were obtained by finite element analysis. In addition, in order to validate the results, a comparison between the experimental and finite element results was performed.

۱- مقدمه

صفحه‌ای ایجاد می‌کند. وجود این تفاوت، نشان دهنده مقاومت ذاتی به آسیب در برابر ضربه، لایه لایه شدگی و انتشار ترک می‌باشد. علاوه بر این با توجه به خودکار بودن فرآیند تولید، ساخت سازه مشبک نسبت به لمینت‌های کامپوزیتی ساده‌تر می‌باشد و نیازی به انجام فرآیندهای خلاء یا پخت در دستگاه اتوکلاو^۱ نبوده و کاهش هزینه را در بر خواهد داشت. با توجه به خصوصیات مکانیکی خوب سازه‌های مشبک کامپوزیتی، این سازه‌ها در

از جمله سازه‌های کامپوزیتی که در چند دهه گذشته مورد توجه محققان بوده، سازه‌های کامپوزیتی مشبک می‌باشد. اخیراً سازه‌های مشبک کامپوزیتی به عنوان راه حلی برای جایگزینی سازه‌های مرسوم کامپوزیتی از جمله لمینیت‌ها و ساندویچ پنل‌ها مورد توجه قرار گرفته‌اند. سازه مشبک به وسیله شبکه‌ای محکمی از اتصال ریب‌ها تعریف می‌شود. این پیکربندی، یک ساختار قوی و انعطاف پذیر را برای مواد کامپوزیت بدون در نظر گرفتن ساختارهای

¹. Autoclave

Please cite this article using:

Khalili, S.M.R. Sedigh, Y. and Hossein Ahari, S.M. M. M., "Experimental and numerical study of the buckling of semi-cylindrical composite lattice". In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 3, No. 3, pp. 269-276, 2016.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

قاسمی و همکاران نیز مطالعه تحلیلی را بر روی کمانش سازه مشبک با الگوی لوزی انجام داده‌اند. آن‌ها در این مطالعه از روش معادل‌سازی استفاده نموده‌اند [۸]. یوسف زاده و اسکندری‌جم نیز در سال ۲۰۰۹ تحقیقی را با موضوع تعیین ماتریس سفتی استوانه کامپوزیتی مشبک تحت بار محوری انجام داده‌اند. در این تحقیق از روش تحلیلی و عددی استفاده شده است [۹]. وجود تحقیقات در این زمینه و به تبع آن کاربرد روز افزون این نوع کامپوزیت‌ها نشان دهنده اهمیت این نوع از سازه‌های کامپوزیتی می‌باشد.

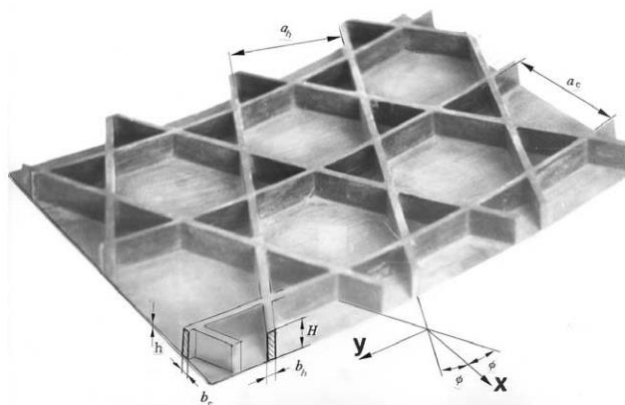
در این مقاله، در ابتدا مدل عددی سازه ارائه شده و بار کمانش نیم‌استوانه مشبک کامپوزیتی بررسی شده است. با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس بار کمانش برای الگوهای شش ضلعی، لوزی و مثلثی به‌دست آمده است. در ادامه میزان تأثیر برخی پارامترها از جمله ضخامت پوسته، زاویه پوسته و ارتفاع ریب نیز با استفاده از نرم‌افزار المان محدود ارائه شده است. علاوه بر تحلیل المان محدود، نمونه در ابعاد طراحی شده با استفاده از قالب مورد نظر ساخته شد و برای بررسی کمانش تحت بار محوری قرار گرفت. همچنین نتایج حاصل از تحلیل المان محدود با نتایج تجربی به‌دست آمده اعتبارسنجی شدند.

۲- مدل‌سازی

همان‌طور که بیان شد، سازه مشبک استوانه‌ای از دو بخش پوسته و شبکه‌ای از ریب‌ها تشکیل شده است. قسمت پوسته شامل پارامترهایی از جمله ضخامت (h)، طول (L)، تعداد لایه‌ها (n) و زاویه لایه‌ها می‌باشد. قسمت مشبک نیز شامل پارامترهای ارتفاع ریب (H)، پهنا ریب (b)، زاویه ریب‌ها (ϕ)، فاصله ریب‌ها از هم (a) و تعداد ریب‌ها است. در شکل ۱ پارامترهای سازه مشبک کامپوزیتی نشان داده شده است.

پارامترها و خواص مکانیکی بکار رفته در مدل‌سازی و تحلیل المان محدود بر طبق نمونه ساخته شده توسط مؤلفین مقاله می‌باشد. نمونه ساخته شده دارای چهار ریب هلیکال با زاویه $\pm 60^\circ$ درجه نسبت به محور استوانه است. برای مدل‌سازی نمونه و تحلیل المان محدود در نرم‌افزار آباکوس نیاز به پارامترهای هندسی و مکانیکی مورد نیاز می‌باشد.

پارامترهای مورد نیاز برای طراحی ریب‌ها شامل ارتفاع (شعاع داخلی و شعاع خارجی)، زاویه، طول و تعداد ریب و پارامترهای مورد نیاز برای طراحی پوسته شامل ضخامت لایه‌ها، زاویه لایه‌ها (ϕ) و طول پوسته می‌باشند. مقادیر مورد نیاز برای طراحی نمونه، در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۱ پارامترهای سازه مشبک کامپوزیتی [۱۰]

بسیاری از کاربردها نسبت به سازه‌های کامپوزیتی لانه زنبوری و سازه‌های مشبک آلومینیومی ارجحیت داده شده‌اند [۱].

یکی از جامع‌ترین تحقیق‌هایی که در مورد انواع الگوهای مشبک انجام شده است، به مطالعات چن و سائ^۱ در سال ۱۹۹۵ مربوط می‌شود. در تحقیقات آنان اثر انواع بارگذاری‌ها بر روی انواع الگوهای مشبک بررسی شده و مقایسه‌های خوبی میان خواص مکانیکی انواع ساختارهای مشبک، ساندویچی و چند لایه صورت گرفت [۲]. توماس^۲ در سال ۱۹۹۹ بر روی ساخت سازه مشبک استوانه‌ای و بررسی شکست و خمش ریب‌ها در بارگذاری فشاری پرداخت. او هدف از این آزمایش را شناسایی حالت‌های مختلف شکست در اجزاء مختلف، مانند از کار افتادن ریب‌ها، خمش پوسته و مقاومت کل سازه بیان کرد [۳].

هایرتس^۳ و همکاران در سال ۲۰۰۲ بر روی تئوری ساخت سازه‌های مشبک تحقیقاتی را انجام داده‌اند. آنها دو روش را برای ساخت این سازه‌ها که دارای ویژگی‌های کیفیت بالا و صرفه جویی در هزینه می‌باشند را بیان کردند که عبارتند از: روش استفاده از قالب ترکیبی و روش استفاده از بلوک‌ها. هر دو روش برای رسیدن به یک درک مناسب از قرارگیری قالب نیازمند فرایند آزمون و خطا می‌باشند. تحقیقاتی بر روی رفتار این روش‌ها صورت گرفته است و نتایج با استفاده از نتایج تجربی صحت‌سنجی شده است [۴]. واسیلیف^۴ و همکارانش در سال ۲۰۱۲ به بررسی کاربرد سازه‌های مشبک در ساختارهای هوافضایی که در سالهای گذشته در روسیه انجام شده است پرداخته‌اند. آنها بیان کرده‌اند که وزن عالی و صرفه جویی در هزینه حاصل از استحکام و سفتی بالای ریب‌های تک‌جهته از ویژگی‌های برجسته این سازه‌ها می‌باشد و با استفاده از دستگاه‌های سیم‌پیچی خودکار، ساخت این سازه‌ها نیز با هزینه کمتری صورت می‌گیرد [۵].

تحقیقات مفیدی نیز در داخل کشور بر روی این نوع از سازه‌ها انجام شده است. اسکندری‌جم و همکارانش در سال ۲۰۱۳ بر روی بهینه‌سازی سازه‌های مشبک حلقه‌ای پژوهشی انجام دادند. بهینه‌سازی وزن سازه‌های مشبک کامپوزیتی حلقه‌ای (استوانه‌ای و مخروطی) یکی از مسائل مهم می‌باشد. نخست معادلات مشخصه استخراج شد که برای دستیابی به سفتی شبکه با توجه به هندسه سازه می‌باشد. همچنین روابط و فرض‌های بهینه‌سازی این سازه‌ها با توجه به استحکام کمانشی ارائه شده است. آنالیز خطی سازه مشبک مخروطی شکل با استفاده از آنالیز المان محدود توسط نرم‌افزار آباکوس^۵ انجام شده است. در این تحلیل با استفاده از المان تیر تیموشنکو، استحکام کمانشی سازه مشبک تحت بار بحرانی محوری مورد بررسی قرار گرفت [۶].

رحیمی و همکارانش در سال ۲۰۱۳ در مقاله‌ای رفتار کمانشی پوسته استوانه‌ای مشبک کامپوزیتی با الگوی شبکه مثلثی با ریب‌های محیطی و مارپیچی تحت بار محوری را بررسی کرده‌اند. در این تحلیل مقاطع ریب‌ها دارای مساحت یکسان ولی با پروفایل‌های مختلف می‌باشند. تأثیر این اختلافات در پروفایل‌ها بر روی مقاومت کمانشی بررسی شده است. برای تحلیل عددی از نرم‌افزار انسیس^۶ استفاده شده است و بار کمانشی الاستیک و نسبت مقاومت کمانشی به وزن برای هر مدل به‌دست آمده و با هم مقایسه شده‌اند [۷].

1. Chen & Tsai
2. Thomas
3. Huybrechts
4. Vasiliev
5. ABAQUS
6. ANSYS

شکل ۳ نمونه استوانه‌ای مشبک ساخته شده نشان داده شده است که هنوز قالب از داخل نمونه بیرون کشیده نشده است. نمونه استوانه‌ای به دست آمده با برش دقیقی به دو نیم‌استوانه تبدیل می‌شود. در شکل ۴ نمونه به دست آمده با الگوی لوزی نشان داده شده است.



شکل ۳ نمایی از نمونه استوانه‌ای مشبک کامپوزیتی رشته پیچی شده

جدول ۱ پارامترهای هندسی نیم استوانه مشبک کامپوزیتی

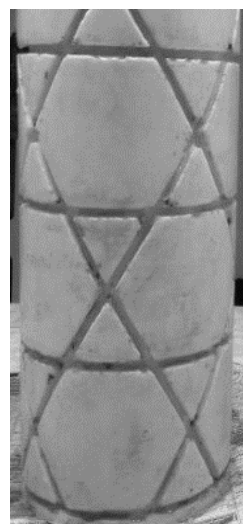
پارامتر	نماد	مقدار
ضخامت پوسته (mm)	h	۱.۲
شعاع داخلی (mm)	R_i	۵۵
ارتفاع ریب	H	۶۱.۲
تعداد لایه‌ها	n	۳
زاویه ریب‌ها (درجه)	ϕ	± 60
طول نمونه (mm)	L	۲۵۰
پهنای ریب (mm)	b	۵.۲

۳- فرآیند ساخت

ساخت سازه‌های مشبک کامپوزیتی از جمله مسائلی می‌باشد که تأثیر مهمی بر روی خواص و کارایی سازه، هزینه و زمان ساخت این سازه‌ها دارد. در اینجا به طور مختصر فرآیند ساخت نمونه شرح داده می‌شود. جهت فرآیند رشته پیچی، قالبی از جنس سیلیکون به شکل استوانه توخالی تهیه شده است. همانگونه که در شکل ۲ نشان داده شده است، هنگامی که همه شیارهای حلقوی رشته پیچی شوند الگوی حاصله به شکل شش ضلعی خواهد بود. اما اگر دو شیار حلقوی میانی رشته پیچی نشوند، الگوی به دست آمده، الگوی لوزی خواهد بود.



شکل ۴ نمایی از نمونه نیم استوانه‌ای مشبک کامپوزیتی در دستگاه آزمایش



شکل ۲ نمایی از قالب جهت تهیه نمونه

۴- تحلیل المان محدود

در ابتدا سازه مشبک طراحی شده در نرم‌افزار کتیا^۲، به نرم‌افزار المان محدود انتقال داده می‌شود. در ادامه در تحلیل المان محدود سازه مشبک کامپوزیتی در نرم‌افزار آباکوس برای پوسته از المان پوسته‌ای^۳ سه بعدی با مشخصه SBR و برای قسمت مشبک (ریب‌ها) از المان سالیید^۴ سه بعدی با مشخصه C3D20R استفاده شده است. با استفاده از تحلیل المان محدود برای به دست آوردن موده‌های کمانش و بارهای بحرانی از تحلیل خطی و غیرخطی استفاده شد. شرایط مرزی و بارگذاری اعمال شده در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به نگهدارنده^۵ طراحی شده برای آزمایش تجربی، در تحلیل المان

قالب بر روی محور دستگاه رشته پیچی قرار می‌گیرد. فرآیند رشته پیچی بدین صورت است که الیاف بعد از آغشته شدن به رزین با توجه به حرکت دورانی و انتقالی تعیین شده در دستگاه، در داخل شیارها قرار می‌گیرند. این فرآیند تا زمانی که شیارها پر شوند ادامه پیدا می‌کند. بعد از پر شدن شیارها برای ساخت پوسته، پارچه‌های آغشته شده به رزین به دور قالب پیچیده می‌شوند. جهت خروج رزین اضافه، اطمینان از اتصال ریب به پوسته و بوجود آمدن سطحی صاف، از نوارهای هیت شیرینک^۱ استفاده شد.

بعد از اتمام رشته پیچی و پیچش پوسته، به منظور یکنواخت شدن رزین در کل نمونه دستگاه به مدت معین به حرکت دورانی ادامه خواهد داد. در آخر کار بعد از پخت و خشک شدن نمونه، با توجه به اینکه قالب از انعطاف پذیری بالایی برخوردار بود، قالب از داخل نمونه بیرون کشیده می‌شود. در

2. Catia
3. Shell
4. Solid
5. Fixture

1. Heat shrink

جدول ۲ خواص مکانیکی پوسته

مقادیر	خواص
1900	چگالی $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
$E_1 = 45.00 \text{ GPa}$	خواص
$E_2 = 45.00 \text{ GPa}$	
$E_3 = 5.8 \text{ GPa}$	
$G_{12} = G_{13} = 2.05 \text{ GPa}$	الاستیک
$G_{23} = 2.68 \text{ GPa}$	
$\nu_{12} = \nu_{13} = 0.272$	
$\nu_{23} = 0.0838$	

جدول ۳ خواص مکانیکی ریب

مقادیر	خواص
2000	چگالی $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
$E_1 = 34.00 \text{ GPa}$	خواص
$E_2 = 5.46 \text{ GPa}$	
$E_3 = 5.46 \text{ GPa}$	
$G_{12} = G_{13} = 1.9 \text{ GPa}$	الاستیک
$G_{23} = 2.5 \text{ GPa}$	
$\nu_{12} = \nu_{13} = 0.275$	
$\nu_{23} = 0.0798$	

در جداول ۲ و ۳، ν ، E و G ها، ضرایب ثابت ماده (ضریب پواسون، مدول ارتجاعی و مدول برشی ماده) و اندیسهای ضرایب، جهت های اصلی ماده را نشان میدهند (جهت ۱ جهت الیاف و جهت ۲ و ۳ جهات عمود بر الیاف است).

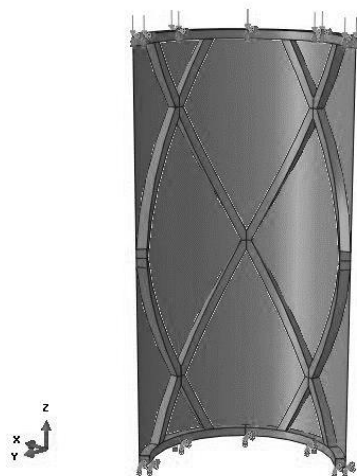
درصد حجمی استفاده شده برای الیاف ۵۰ درصد محاسبه شد و با استفاده از روابط موجود، خواص مکانیکی کامپوزیت به دست آمد. البته لازم به ذکر است که در ساخت پوسته از پارچه های دوجهته از الیاف شیشه استفاده شد.

در آزمایش تجربی، نگهدارنده نمونه بر روی دستگاه قرار داده شد. بعد از آن نمونه نیم استوانه مشبک کامپوزیتی تهیه شده در بین دو نگهدارنده جاگذاری شد. آزمایش تجربی توسط دستگاه در شکل ۷ در حالتی که نمونه در بین دو نگهدارنده قرار دارد نشان داده شده است. بعد از انجام تست و اعمال بارگذاری فشاری، مودهای کمانش نمونه بررسی شد و مقادیر بار بحرانی کمانش به دست آمد. محل کمانش محلی نمونه بعد از اعمال بار کمانش در شکل ۷ نشان داده شده است. بار بحرانی کمانشی به دست آمده برای نمونه با مشخصات موجود در جدول ۱ برابر با ۱۳۰۰۰ N ثبت شد. نتایج به دست آمده در ادامه با نتایج مدل المان محدود مقایسه و بررسی شده اند.



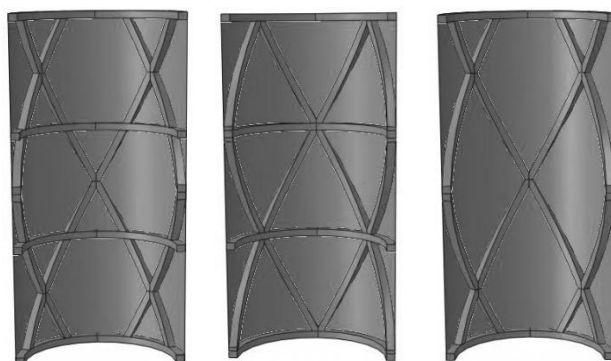
شکل ۷ رفتار کمانشی نمونه بعد از اعمال بار

محدود شرایط مرزی در یک انتها ($z=0$) به صورت گیردار ($u_x=u_y=u_z=0$) در نظر گرفته شده است. همچنین در انتهای دیگر ($z=L$) شرط مرزی به صورت ($u_x=u_y=0$) اعمال شده است.



شکل ۵ مدل عددی نیم استوانه مشبک با الگوی شش ضلعی

در شکل ۶، مدل سه بعدی نیم استوانه مشبک کامپوزیتی با الگوهای لوزی، مثلثی و شش ضلعی نشان داده شده است.



شکل ۶ مدل عددی نیم استوانه مشبک با الگوی لوزی، مثلثی و شش ضلعی

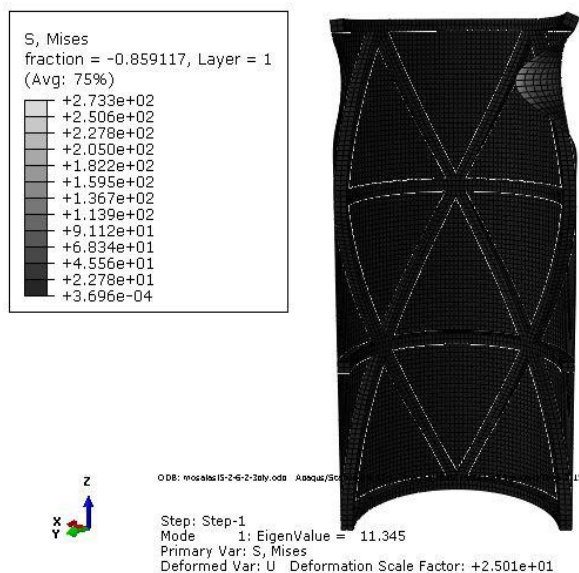
۵- نتایج

۵-۱- اعتبارسنجی آزمایشگاهی

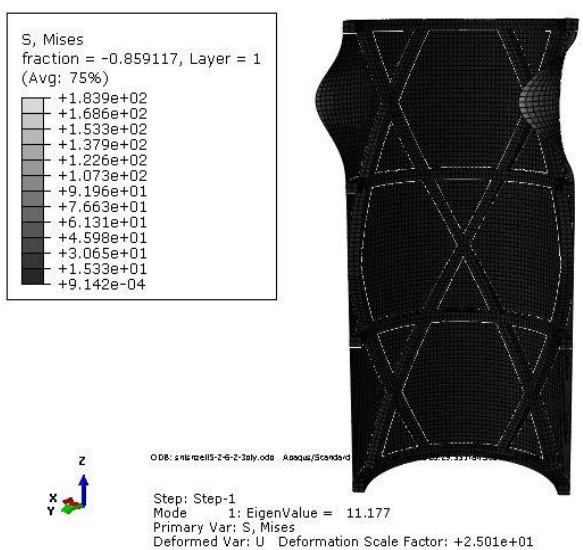
در این تحقیق به دو صورت تجربی و تحلیل المان محدود، مقادیر کمانش و مودهای کمانش نیم استوانه مشبک کامپوزیتی مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از تحلیل المان محدود، ارائه یک مدل نرم افزاری می باشد که نتایج آن همخوانی خوبی با نتایج به دست آمده از آزمایشات تجربی دارد. در تحلیل المان محدود پارامترهای مختلفی از جمله ضخامت پوسته، زاویه لایه های پوسته و ارتفاع ریب مورد بررسی قرار گرفته است. البته لازم به ذکر است که میزان تأثیر این پارامترها برای نمونه هایی با الگوی لوزی، مثلثی و شش ضلعی به دست آمد.

با در نظر گرفتن خواص مکانیکی الیاف شیشه و اپوکسی و مراجعه به روابط میکرومکانیکی لایه ها، خواص مکانیکی پوسته و ریبها به ترتیب در جدول ۲ و جدول ۳ آورده شده است.

مثلی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همچنین مود کمانش سازه با الگوی شش ضلعی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۸ دیده می‌شود، مود کمانش نیم استوانه مشبک کامپوزیتی با الگوی لوزی به صورت مود محلی کمانش می‌باشد. علت ایجاد مود کمانش محلی می‌تواند به خاطر ضخامت کم پوسته نسبت به ارتفاع ریب می‌باشد. ضخامت پوسته در شکل ۸، ۱/۲ میلی‌متر و ارتفاع ریب برابر با ۶/۲ میلی‌متر می‌باشد. محل کمانش محلی در نمونه نیم استوانه با الگوی لوزی در دو سمت بالایی پوسته بوده که بین ریب حلقوی بالایی و نیم گره میانی نمونه می‌باشد. در شکل ۱۰ نیز مود کمانش نمونه نیم استوانه با الگوی مثلثی نشان داده شده است. مقدار ویژه به دست آمده ۱۰ درصد نسبت به مقدار ویژه نمونه با الگوی لوزی افزایش پیدا می‌کند. مود کمانش نمونه نیم استوانه با الگوی مثلثی نیز به صورت مود محلی کمانش می‌باشد. محل کمانش نیز بر روی پوسته و در دو طرف بالایی آن می‌باشد. همچنین محل مود کمانش بین دو ریب حلقوی بالایی و میانی نمونه است. مود کمانش نمونه نیم استوانه مشبک کامپوزیتی با الگوی شش ضلعی در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

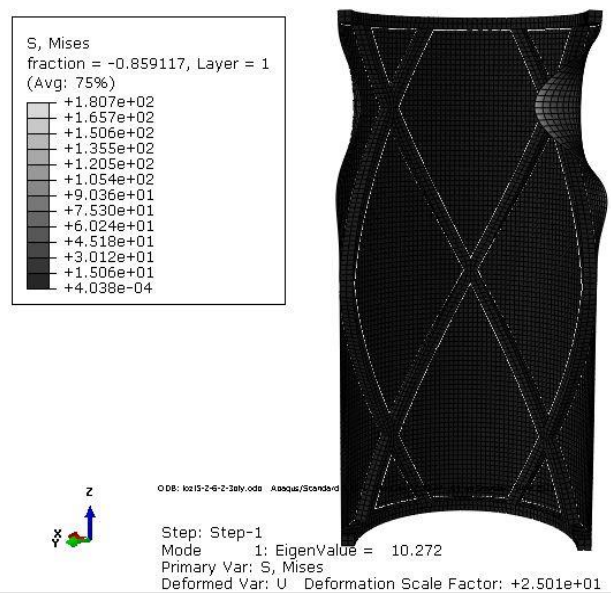


شکل ۱۰ رفتار کمانشی نمونه با الگوی مثلثی

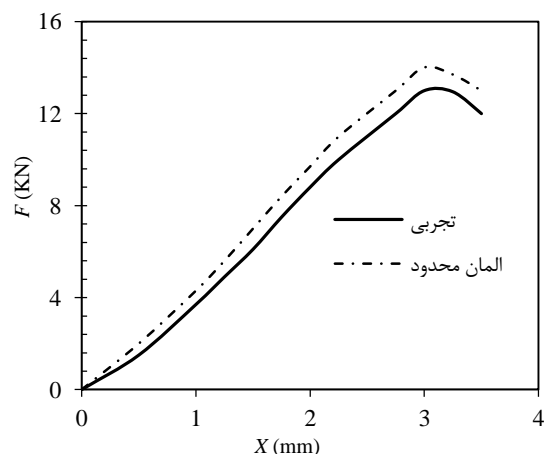


شکل ۱۱ رفتار کمانشی نمونه با الگوی شش ضلعی

در تحلیل المان محدود، در ابتدا با تغییر تعداد المان‌ها، با توجه به کاهش نرخ همگرایی با افزایش تعداد المان‌ها و نیز افزایش زمان محاسبه، تعداد المان بهینه انتخاب شد. ابتدا رفتار کمانشی نیم استوانه مشبک با الگوی لوزی و دارای ویژگی‌های هندسی نمونه تجربی که در جدول ۱ آورده شده، مورد بررسی قرار گرفت. رفتار کمانشی این نمونه در شکل ۸ آورده شده است. مشاهده می‌شود که در دو ناحیه بالایی پوسته، کمانش محلی رخ داده است. با استفاده از تحلیل خطی کمانش توسط نرم افزار المان محدود آباکوس بار بحرانی برابر با ۱۴۰۱۰N به دست آمد. در شکل ۹ منحنی نیرو بر حسب جابجایی برای نمونه با مشخصات مندرج در جدول ۱ در آزمایش تجربی و تحلیل عددی مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که نتایج حاصل از مدل المان محدود به اندازه حدود ۷ درصد نسبت به مدل تجربی اختلاف دارد که این اختلاف قابل قبول می‌باشد.



شکل ۸ رفتار کمانشی نمونه با الگوی لوزی در تحلیل المان محدود



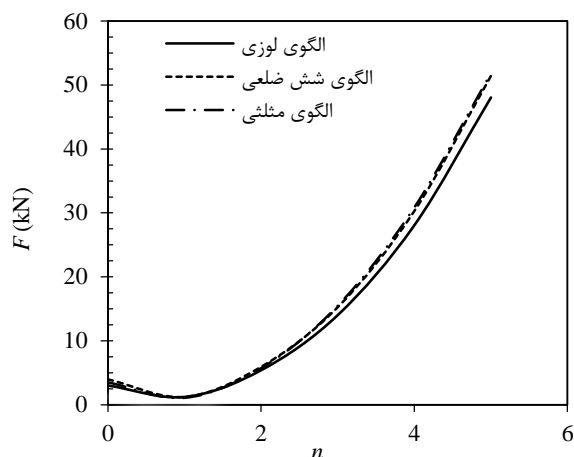
۵-۲- مودهای کمانش الگوهای مختلف

با استفاده از نرم افزار المان محدود مودهای کمانش برای نیم استوانه مشبک با الگوهای لوزی، الگوی مثلثی و الگوی شش ضلعی به دست آمد. مود کمانش سازه با الگوی لوزی در شکل ۸ آورده شده است. مود کمانش سازه با الگوی

۴-۵- اثر ضخامت پوسته

با استفاده از تحلیل المان محدود مقدار بار بحرانی کمانش بر حسب ضخامت پوسته برای نمونه‌های نیم استوانه مشبک با الگوهای لوزی، شش ضلعی و مثلثی به دست آمد که در شکل ۱۲ نشان داده شده است. با توجه به اینکه ضخامت هر لایه ۰/۴ میلی‌متر در نظر گرفته شده است، در شکل ۱۲ میزان بار بحرانی بر حسب تعداد لایه‌ها بیان شده است.

نتایج برای سازه با طول ۲۵۰ میلی‌متر و شعاع داخلی ۵۵ میلی‌متر ارائه شده است. در این سازه ضخامت ریب ۵/۲ میلی‌متر و ارتفاع ریب ۶/۲ میلی‌متر می‌باشد. با توجه به شکل ۱۲، مشاهده می‌شود که با افزودن اولین لایه از پوسته به دلیل ضخامت اندک پوسته بار بحرانی کمانش کاهش پیدا می‌کند ولی در ادامه با افزودن به تعداد لایه‌ها میزان بار بحرانی کمانش افزایش می‌یابد و این افزایش در بار بحرانی کمانش سیر صعودی دارد. با توجه به شکل ۱۲، مشخص است که منحنی‌های بار بحرانی کمانش برای نمونه با الگوی شش ضلعی و الگوی مثلثی اختلاف کمی با یکدیگر دارند. منحنی بار بحرانی کمانش برای نمونه با الگوی لوزی برای تعدادهای مختلف لایه، پایین‌تر از دو منحنی دیگر می‌باشد.



شکل ۱۲ نمودار بار بحرانی کمانش بر حسب تعداد لایه‌ها

۵-۵- اثر ارتفاع ریب

یکی دیگر از پارامترهایی که در میزان بار بحرانی کمانش سازه تأثیر مستقیم دارد، مقدار ارتفاع ریب می‌باشد. با استفاده از نرم افزار المان محدود آباکوس مقدار بار بحرانی کمانش بر حسب ارتفاع ریب در شکل ۱۳ آورده شده است. در حالت‌های مختلف شعاع داخلی پوسته خارجی یکسان و برابر ۶۱/۲ میلی‌متر در نظر گرفته شد. طول نمونه برابر با ۲۵۰ میلی‌متر و ضخامت پوسته برابر با ۱/۲ میلی‌متر می‌باشد. تأثیر الگوها بر بار بحرانی کمانش نیز در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که میزان بار بحرانی کمانش با افزایش ارتفاع ریب افزایش می‌یابد. علاوه بر این، شیب منحنی نمونه مشبک با الگوی لوزی از شیب منحنی نمونه‌های مشبک با الگوی مثلثی و شش ضلعی کمتر می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که نمونه مشبک با الگوی مثلثی افزایش بیشتری را در میزان بار بحرانی کمانش نسبت به دو الگوی دیگر دارد.

مقدار ویژه نمونه با الگوی شش ضلعی نسبت به مقدار ویژه نمونه با الگوی لوزی حدود ۸ درصد افزایش و نسبت به مقدار ویژه نمونه با الگوی مثلثی حدود ۱/۵ درصد کاهش یافته است. محل مود کمانش نمونه با الگوی شش ضلعی همانند الگوهای دیگر در قسمت بالایی پوسته می‌باشد. سطح ناحیه کمانش در نمونه با الگوی شش ضلعی نیز نسبت به نمونه با الگوی لوزی به خاطر وجود ریب حلقوی در ناحیه میانی نمونه کمتر می‌باشد.

مقدار ویژه نمونه با الگوی شش ضلعی نسبت به مقدار ویژه نمونه با الگوی لوزی حدود ۸ درصد افزایش و نسبت به مقدار ویژه نمونه با الگوی مثلثی حدود ۱/۵ درصد کاهش یافته است. محل مود کمانش نمونه با الگوی شش ضلعی همانند الگوهای دیگر در قسمت بالایی پوسته می‌باشد. سطح ناحیه کمانش در نمونه با الگوی شش ضلعی نیز نسبت به نمونه با الگوی لوزی به خاطر وجود ریب حلقوی در ناحیه میانی نمونه کمتر می‌باشد.

۳-۵- اثر زاویه لایه‌های پوسته

با تغییرات در هندسه مدل المان محدود، تأثیر برخی پارامترهای مهم در رفتار کمانشی سازه مشبک کامپوزیتی از جمله زاویه لایه‌های پوسته مورد بررسی قرار گرفته است. در جدول ۴ نتایج حاصل از تغییر در زوایای لایه‌های پوسته آورده شده است. چون خواص مربوط به لایه‌های دوجبهته می‌باشد، تغییر در زاویه لایه‌ها به اندازه ۴۵ درجه صورت پذیرفت. در این جدول میزان بار بحرانی کمانش برای هر نمونه که به صورت تحلیل المان محدود به دست آمده، نشان داده شده است.

با تغییر در زوایای لایه‌های بیرونی مشاهده می‌شود که میزان بار بحرانی همواره بیشتر از بار بحرانی نمونه‌ای می‌باشد که لایه‌ها با زاویه صفر درجه هستند. این افزایش در بار بحرانی سیر صعودی را دارد. با تغییر در دو لایه بیرونی بار بحرانی به اندازه ۴۷ درصد افزایش می‌یابد. با تغییر در چهار لایه بیرونی میزان بار بحرانی حدود ۵۴ درصد افزایش خواهد داشت. در حالی که با تغییر در زوایای لایه‌های داخلی بار بحرانی کمانش سیر صعودی دارد ولی مقدار بار بحرانی کمتر از بار بحرانی کمانش نمونه با لایه‌های صفر درجه می‌باشد.

با تغییر در دو لایه داخلی پوسته بار بحرانی به اندازه ۲۷ درصد کاهش می‌یابد. همچنین با تغییر در چهار لایه داخلی بار بحرانی به اندازه ۲۱ درصد کاهش داشته است. بار بحرانی نمونه‌ای که زاویه همه لایه‌ها تغییر داده شده، نسبت به بار بحرانی نمونه اول، افزایش ۳۱ درصدی دارد. با توجه به جدول ۴ میزان تغییر قابل توجه در بار بحرانی با تغییر در زوایای لایه‌ها قابل بررسی است.

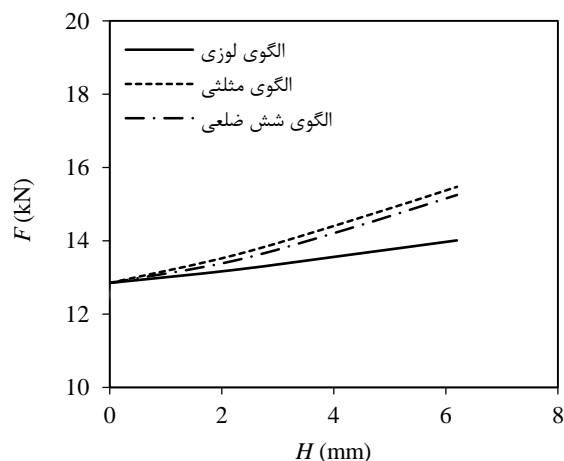
جدول ۴ نتایج حاصل از تغییر زوایای لایه‌های پوسته نیم استوانه مشبک

شماره	زاویه لایه‌ها (درجه)	بار بحرانی کمانش (N)
۱	$[0,90]_3$	۱۴۰۱۰
۲	$[0,90,0,90,-45,45]$	۲۰۶۸۰
۳	$[0,90,-45,45,-45,45]$	۲۱۵۵۱
۴	$[-45,45,0,90,0,90]$	۱۰۱۶۱
۴	$[-45,45,-45,45,0,90]$	۱۱۱۰۲
۵	$[-45,45]_3$	۲۰۲۴۲

L	طول سازه (mm)
n	تعداد لایه‌های پوسته
X	جابجایی (mm)
علایم یونانی	
δ	ضخامت ریب (mm)
ϕ	زاویه ریب (درجه)
φ	زاویه پوسته (درجه)

۸- مراجع

- [1] Huybrechts, S. and Tsai, S., "Analysis and Behavior of Grid Structures," Composite Science and Technology, Vol. 56, No. 9, pp. 1001-1015, 1996.
- [2] Tsai, S.W. and Chen, H.J., "Analysis and Optimum Design of Composite Grid Structures, Journal of Composite Materials," Vol. 30, No. 4, pp. 503-534, 1996.
- [3] Kim, T.D., "Fabrication and Testing of Composite Isogrid Stiffened Cylinder," Journal of Composite Structures, Vol. 45, No. 1, pp. 1-6, 1999.
- [4] Huybrechts, S.M. Meink, T.E. Wenger, P.M. and Ganley, J.M., "Manufacturing Theory for Advanced Grid Stiffened Structures," Journal of Composite: Part A, Vol. 33, No. 2, pp. 155-161, 2002.
- [5] Vasiliev, V. Barynin, V. and Razin, A., "Anisogrid Composite Lattice Structure - Development and Aerospace Applications," Journal of Composite Structures, Vol. 94, No. 3, pp. 1117-1127, 2012.
- [6] Jam, J.E. Noorabadi, M. and Namdaran, N., Taghavian, H., Mohammadi, M., "Optimal Design of Annular Lattice Structures," In Persian, Journal of Science and today's world, Vol. 2, No. 1, pp. 42-57, 2013.
- [7] Rahimi, G.H. Zandi, M. and Rasouli, S.F., "Analysis of the Effect of Stiffener Profile on Buckling Strength in Composite Isogrid Stiffened Shell under Axial Loading," In Persian, Journal of Aerospace Science and Technology, Vol. 24, No. 1, pp. 198-203, 2013.
- [8] Ghasemi, M.A. Yazdani, M. and Hosseini, S.M., "Analysis Of Parameters Affecting On Buckling Of Composite Reinforced Shell With First Shear Deformation Theory," In Persian, Modares Mechanical Engineering, Vol. 13, No. 10, pp. 51-61, 2013.
- [9] Yousefzadeh, M. and Jam, J.E., "Determine Fo The Stiffness Matrix Of Composite Lattice Cylinders Under Axial Load", In Persian, 8th international conference of Iranian Aerospace Society, ST1071, 2009.
- [10] Vasiliev, V. Barynin, V. and Rasin, A., "Anisogrid Lattice Structures - Survey of Development and Application," Journal of Composite Structures, Vol. 54, No. 2, pp. 361-370, 2001.



شکل ۱۳ بار بحرانی کمانش بر حسب ارتفاع ریب

۶- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این پژوهش، نمونه نیم استوانه مشبک با الگوی لوزی ساخته شد و میزان بار بحرانی کمانش آن به دست آمد. در ادامه مدل المان محدود نیز ارائه شد. مقایسه نتایج عددی با نتایج تجربی، نشان می‌دهد که نتایج حاصل از مدل المان محدود دارای دقت خوبی می‌باشند. مودهای کمانش نشان می‌دهد که الگوهای مختلف تأثیر چندانی بر روی مود کمانش محلی نمونه‌ها نداشته است ولی بر روی اندازه مقدار ویژه کمانش نمونه‌ها تأثیر قابل توجهی داشته است.

با استفاده از مدل المان محدود تنش و بار بحرانی کمانش برای نیم‌استوانه مشبک کامپوزیتی با پوسته به دست آمد. با افزایش اولین لایه بار بحرانی کمانش به دلیل ضخامت ناچیز پوسته کاهش می‌یابد ولی در ادامه با افزایش ضخامت پوسته، افزایش در بار بحرانی کمانش سازه اتفاق می‌افتد. با تغییر در زاویه لایه‌ها تغییرات متفاوتی در بار بحرانی کمانش مشاهده شد که نشان دهنده تأثیر زیاد این زاویه‌ها بر بار بحرانی کمانش نیم استوانه مشبک کامپوزیتی می‌باشد. این تغییر در زاویه لایه‌های پوسته ممکن است باعث افزایش یا حتی کاهش بار بحرانی کمانش شود. همچنین مشاهده شد که در بین حالت‌های مختلف بار بحرانی سازه حدود ۵۰ درصد تغییر داشت.

نتایج نشان می‌دهد که در حالی که نمونه با الگوی مثلثی بار بیشتری را تحمل می‌کند، ولی با افزایش ضخامت پوسته افزایش یکنواختی در میزان بار بحرانی کمانش در الگوهای مختلف به وجود می‌آید. همچنین منحنی بار بحرانی کمانش برای نمونه با الگوی لوزی برای تعداد مختلف لایه‌ها، پایین‌تر از دو منحنی الگوهای مثلثی و شش ضلعی می‌باشد. با تغییر در پارامتر ارتفاع ریب نیز مشاهده می‌شود که، با افزایش ارتفاع ریب بار بحرانی سازه با شیب ملایم در همه الگوها افزایش می‌یابد که میزان این افزایش در نمونه با الگوهای مثلثی و شش ضلعی از نمونه با الگوی لوزی بیشتر بود. در بین الگوهای مثلثی و شش ضلعی با افزایش ارتفاع ریب میزان افزایش بار بحرانی کمانش برای الگوی مثلثی بیشتر از الگوی شش ضلعی می‌باشد.

۷- فهرست علایم

F	نیرو (kN)
F_{cr}	بار بحرانی کمانش (kN)
H	ارتفاع ریب (mm)

