پائیز ۱۳۹۴/ سال هشتم/ شماره سوم

فصلنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک جامدات

www.jsme.ir

فصلنامه علمی پژوهشی
مهندسی مکانیک جامدات

بررسی تأثیر پارامترهای هندسی سازه‌های مشبک استوانه‌ای کامپوزیتی در رفتار کمانشی

سیدعلی لطیفی رستمی [۱،*] ، رضا اکبری آلاشتی [۲] ، امین کلاه‌دوز [۳]

* نویسنده مسئول: latifi.rostami@students.semnan.ac.ir

چکیده

سازه‌های کامپوزیتی مشبک به دلیل نسبت مقاومت به وزن بالا به صورت گسترده‌ای در صنایع هوا- فضا مورد استفاده قرار می‌گیرند. شبکه ریب‌های تقویت‌شده ویژگی اصلی در این سازه‌ها است. با توجه به این ویژگی، نسبت مقاومت به وزن سازه به عنوان معیار طراحی در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش پارامترهایی از قبیل مشخصات فیزیکی ماده، ضخامت پوسته، زاویه، ضخامت و تعداد ریب روی توزیع میدان تنش و بار کمانشی پوسته مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای بررسی این تغییرات، روش تحلیل المان محدود ۳ بعدی و با استفاده از مدل صریح در نرم‌افزار ANSYS صورت پذیرفته و نتایج حاصل با نتایج تست‌های تجربی مقایسه می‌شود. افزایش ضخامت پوسته خارجی ۵۰ درصد افزایش استحکام سازه را در پی دارد و پارامتر بعدی که مؤثر است کاهش زاویه ریب است که افزایش ۳۰ درصدی بارویژه را بوجود می آورد. هرچند تقویت کننده ها (ریب ها) نقش اصلی در تحمل بار را دارند اما افزایش تعداد آنها چون افزایش وزن سازه را بدنبال دارد به نسبت دو پارامتر قبلی تأثیر چشمگیری در افزایش استحکام سازه ندارد.

واژه‌های کلیدی

کامپوزیت، سازه‌ی مشبک استوانه ای، مدل اجزاء محدود، تحلیل کمانش، ریب (تقویت کننده)

۱-کارشناس ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، مازندران، ایران.

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، مازندران، ایران.

۲- استادیار، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی‌شهر، اصفهان، ایران.

۱- مقدمه

پوسته‌های استوانه‌ای مشبک کامپوزیتی بواسطه دارا بودن ویژگی‌هایی همچون استحکام ویژه بالا، سبکی و مقاومت به خوردگی، امروزه بطور وسیعی در صنایع هوافضا و دریایی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

افزایش بازده پیکربندی و ساختمان سازه‌های مورد استفاده در صنایع هوافضا به نحوی که در عین سبکی قابلیت تحمل فراوان بار را داشته باشند، همواره از اهمیت بسیار بالایی برخوردار بوده است. امروزه، به منظور دست یابی به چنین سازه‌هایی، از سازه‌های مشبک استوانه‌ای ساخته شده از فیبرهای پلیمری استفاده می‌شود. در بسیاری از کاربردها مانند پوسته‌های بکار رفته در ساخت سازه‌های موشکی و دریایی، این پوسته‌ها اغلب تحت بار محوری فشاری قرار می‌گیرند. [۱]

جانوکی و همکاران [۱] از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی نتایج موجود برای کمانش سازه‌های استوانه‌ای کامپوزیتی تقویت شده، استفاده کردند. آنها از تئوری توزیع سفتی پیشرفته[1] برای بررسی کمانش سازه استفاده کردند. کمانش موضعی پوسته با استفاده از روش ریلی- ریتز و به عنوان یک ماده‌ی انیزوتروپ محاسبه شده و در ادامه کمانش محلی تقویت کننده‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفته است. وازیلیف و رازین [۲] علاوه بر تحلیل طراحی سازه‌های مشبک کامپوزیتی، پارامترهای هندسی مدل و روش‌های اساسی توسعه مدل برای تحمل فشارهای محوری را مورد بررسی قرار دادند. تفرشی [۳] پارامترهای مؤثر بر بار بحرانی کمانش و گشودگی پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی بدون تقویت کننده که تحت بار محوری فشاری قرار دارد را بررسی کرده است. نتایج ایشان نشان می‌دهد که بار بحرانی کمانش با افزایش ابعاد گشودگی در حدود ۲۰ درصد کاهش و با افزایش فشار داخلی تقریبا ۱۵ درصد افزایش می‌یابد. همچنین نشان داده است که برای اشکال مختلف گشودگی با مساحت مقطع مساوی، شکلی که دارای بیشترین عرض در جهت محیطی باشد، بار کمانش کمتری را تحمل می‌کند.

وودسنبت و همکاران [۴] از روش تحلیلی برای تعیین بارها و مدهای شکست کمانشی استفاده کرده و با ایجاد یک مدل اجزای محدود سه بعدی بر پایه توزیع سلول واحد، جواب‌های بدست آمده را راستی آزمائی نمودند. هیلبرگر و استارنس [۵] گشودگی در سازه‌های کامپوزیتی استوانه‌ای تحت فشار محوری را که در محل گشودگی تقویت شده-اند، مورد بررسی قرار داد و مقاومت سازه را با حالتی که تقویتی در محل گشودگی صورت نگرفته بود، مقایسه کردند. وازیلیف و همکاران [۶] به بررسی فرآیندهای طراحی، ساخت، آزمایش و تحلیل سازه‌های کامپوزیتی مشبک کربن – اپوکسی که از روش رشته‌پیچی پیوسته ساخته شده‌اند و در قالب‌های هواپیما استفاده می‌شدند، پرداخته و در مورد انواع روش‌های ساخت این سازه‌ها و تأثیر هر کدام بر روی استحکام ریب بحث کرده‌اند. در این تحقیق نشان داده شد که بازده وزنی و صرفه جویی هزینه در این سازه ها به مراتب بیش از سازه های مشابه با تقویت کننده های غیرکامپوزیتی است. کرگ و استاندر [۷] بهینه-سازی طراحی پوسته دارای نقص هندسی را تحت بار کمانشی مورد بررسی قرار دادند. از بسط های کارهونن-لووی[2] برای پیاده سازی عیوب استفاده کردند. همچنین مشاهده کردند که با گنجاندن نتایج تصادفی میانگین متغیرهای طراحی و قیودی برای بهینه سازی وزن پوسته

[1] Advanced smeared stiffener theory

[2] Karhunen - Loève

استفاده شده اند تغییر زیادی نکرده اند. زمانی که مقاومت[1] در قالب حداقل کردن ضریب تغییرات نیروی اوج نرمال تحت فشار محوری مورد توجه قرار می گیرد، طرح بهینه تغییر قابل توجهی می کند که منجر به طراحی خیلی سنگین تر می شود. توتارو و گردال [۸] بهینه‌سازی طراحی پوسته-های مشبک کامپوزیتی تحت فشار محوری را با استفاده از مدل پیوسته انجام دادند. در این تحقیق پارامترهای مؤثر نظیر سطح مقطع تقویت کننده، عرض سطح مقطع تقویت کننده محیطی و فاصله تقویت کننده ها به عنوان متغیر بهینه سازی در نظر گرفته شد و از یک مدل شبکه بندی شش ضلعی با ابعاد خاص استفاده شد و نهایتا نقاط طراحی بهینه را بدست آوردند. هولین و همکاران [۹] به منظور مشخص کردن استحکام کمانش موضعی کامپوزیت های مشبک متناوب، از روش تحلیلی بر پایه تئوری تیر– ستون استفاده کردند. آنها بر طبق معادلات تعادل، معادلات ساختاری را بدست آوردند و استحکام و عوامل قیدی شبکه‌های مختلف تحت فشار و کشش تک محوره را تعیین کردند. عوامل قیدی بدست آمده برای تمامی شبکه، بجز شبکه های مربعی، بین صفر و یک قرار دارند. در این تحقیق نشان داده شده است که شبکه ای که در آن گره ها ارتباطات بیشتری داشته باشند، قیدهای محکم تری دارند یعنی استحکامشان تقریبا بیشتر است. همچنین تحت حالت تنش صفحه ای شبیه سازی های عددی سطوح کمانشی را ارائه کردند. یزدانی و رحیمی [۱۰] به بررسی تجربی اثرات تغییر شکل شبکه و تعداد ریب‌های تقویت کننده مارپیچ در تحمل بار پوسته-های استوانه‌ای تقویت شده تمام کامپوزیتی پرداختند. بر مبنای نتایج این پژوهش مشخص گردید که برای استفاده بهینه از پوسته‌های تقویت شده نیاز به حداقل مقداری از چگالی شبکه است و از طرف دیگر پوسته‌هایی که با شبکه-های لوزی شکل ساخته شده بودند در بارگذاری محوری عملکرد مطلوب‌تری داشتند. موروزو و همکاران [۱۱] مدلسازی اجزای محدود و تحلیل کمانشی پوسته‌های کامپوزیتی مشبک را مورد توجه قرار داده و بارها و مدهای کمانشی پوسته‌های سالم و دارای گشودگی را تحت شرایط بارگذاری و هندسی مختلف مورد مقایسه قرار داده‌اند. همچنین نشان داده شد که برای پوسته با قطر و طول ۱ متر و با گشودگی ۶ ضلعی با طول ضلع ۷۵ میلی متر بار کمانش از حدود ۲۰۴۹ نیوتن به ۱۶۶۰ نیوتن کاهش یافته است.

ولمورگان و همکاران [۱۲] به مطالعه در زمینه روش رشته-پیچی سازه‌های کامپوزیتی مشبک تقویت شده پرداختند. در این تحقیق موضوع ساخت این استونه‌ها مدنظر بوده و سه نوع از این سازه‌ها شامل استوانه‌ی بدون تقویت کننده (فقط دارای پوسته)، سازه‌ی دارای تقویت کننده (بدون پوسته) و در نهایت پوسته مشبک دارای تقویت کننده (هم پوسته و هم تقویت کننده) مورد مطالعه تجربی قرار گرفت. فرایند ساخت بطور کامل و دقیق انجام شده و تست‌های فشاری محوری بر روی نمونه‌ها انجام گرفت. داده‌های حاصل از مطالعات تجربی با نتایج تحلیل اجزای محدود مورد مقایسه قرار گرفت و بر مبنای نتایج حاصل از این مقایسه و با استفاده از مفهوم شکل‌دهی ساده کارآمدترین ساختار تعیین شد. با بررسی و تحلیل عیوب با اندازه های مختلف در این سازه ها مشاهده شد که سازه بدون تقویت کننده بیشتر تحت تأثیر قرار می گیرد و بار کمانشی آن تغییرات قابل توجهی دارد. همچنین با استفاده از روش تحلیلی مشخص گردید که در این سازه ها محل تلاقی تقویت کننده ها به عنوان یک نقطه بحرانی محسوب می شود که ممکن است تحت کوپل خمشی یا برشی خراب شود. وازیلیف و همکاران [۱۳] مسأله پیشرفت‌ها و کاربردهای سازه مشبک کامپوزیتی را در صنعت هوافضا مورد مطالعه قرار دادند. این

[1] Robustness

مقاله مروری بر تجربه های اخیر روسیه در توسعه و کاربردهای ساختارهای شبکه کامپوزیت است. سازه‌های مشبک کامپوزیتی مورد بررسی بصورت استوانه‌ای و مخروطی هستند. نتایج این تحقیق بیان می کند که استفاده از تقویت کننده های کامپوزیتی کربن-اپوکسی تک جهته در مقایسه با نمونه های آلومینیومی وزن سازه را ۳۰-۴۰ درصد کاهش می دهد. پوسته بیرونی نازک (۱/۵ mm) تحت کشش ترک نمی خورد و تحت ضربه لایه لایه نمی شود. آسیب پوسته بیرونی موجب شکست سازه نمی شود بدلیل آنکه استحکام آن بوسیله تقویت کننده ها کنترل می شود. سازه های مشبک با ضخامت بالا را به کامپوزیت های نزدیک به آنها و یا سازه های فلزی بدون محدودیت وزن بالا می‌توان متصل کرد.

در این تحقیق اطلاعاتی در زمینه فرآیندهای ساخت، روش-های طراحی و تحلیل، خصوصیات مکانیکی عناصر ساختاری اساسی و کاربرد مفهوم طراحی کامپوزیت‌های مشبک در سازه‌های هوافضا ارائه شده است. همانطور که اشاره گردید، با توجه به کاربرد سازه‌های مشبک در صنایع هوافضا و دریایی، افزایش نسبت استحکام به وزن در طراحی این سازه‌ها از اهمیت فوق العاده‌ای برخوردار است. بنابراین تعداد، زاویه قرارگیری و ضخامت ریب به همراه ضخامت پوسته مشبک به عنوان پارامترهای موثر مورد بررسی قرار می‌گیرد. هدف این تحقیق، بررسی توزیع میدان تنش و رفتار کمانشی سازه‌های مشبک کامپوزیتی استوانه‌ای است. برای این منظور، ابتدا یک مدل اجزاء محدود از سازه کامپوزیتی با نرم افزار ANSYS شبیه‌سازی و به کمک نتایج آزمایشگاهی اعتبارسنجی می‌شود. سپس از نتایج تحلیل اجزای محدود برای بررسی پارامتری مختلف استفاده می-گردد.

۲- روش تحقیق

یک سازه کامپوزیتی مشبک را با قرارگیری ریب‌های کامپوزیتی متصل به یکدیگر که یک مجموعه پیوسته را به صورت دوبعدی (صفحه‌ای) یا سه‌بعدی (فضایی) تشکیل می‌دهند، می‌توان در نظر گرفت. این مجموعه از ریب‌ها که شکل شبکه‌ای را به سازه می‌دهند از الیاف پیوسته، چقرمه، سفت و محکم تشکیل شده‌اند. بدین ترتیب سازه‌های کامپوزیتی مشبک به دلیل داشتن استحکام بالا، نسبت وزنی کم و انعطاف‌پذیری در طراحی دارای قابلیت‌های کاربردی بیشتری نسبت به سازه‌های فلزی هستند. اجزای اصلی یک سازه مشبک شامل گره‌ها، ریب‌ها و سلول واحد در شکل (۱) نشان داده شده است.

شکل(۱): نمایی از سلول واحد

ریب‌ها نقش تقویت کننده و پشتیبان را برای پوسته بازی می کنند و نسبت به پوسته ظرفیت تحمل بار بیشتری دارند. هر سازه از تکرار چند سلول واحد تشکیل شود و استحکام سازه‌های مشبک کامپوزیتی رابطه مستقیم با این واحدها دارد. محل برخورد ریب‌های تشکیل دهنده سازه، گره نامیده می‌شود. پوسته‌های مشبک کامپوزیتی غالباً از ریب‌های مایل (هلیکال) تشکیل می‌شوند که ابعاد (عرض، ضخامت و تعداد) آنها، فاصله آنها نسبت به یکدیگر و زاویه قرارگیری نسبت به محور طولی پوسته، از خروجی‌های طراحی می‌باشند [۱۱]. موروزو و همکاران [۱۱] انواع بارگذاری‌ها بر روی این سازه مورد تست و تحلیل قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که کمانش عامل اصلی در شکست این سازه‌ها است. از سوی دیگر، کاربرد این سازه‌ها

در صنایع هوافضا و دریایی، وزن سازه را به عنوان یک عوامل مهم در طراحی و ساخت مطرح ساخته است. سازه-های کامپوزیتی سبک می‌توانند موجب افزایش راندمان سازه‌ها در این صنایع شوند.

پارامترهای هندسی سازه کامپوزیتی نقش بسزایی در مقدار بار کمانشی و وزن سازه دارد. تعداد، ضخامت و زاویه ریب‌ها به همراه ضخامت پوسته، اصلی‌ترین پارامترهای هندسی سازه را تشکیل می‌دهد (شکل ۲).

(الف)

(ب)

شکل (۲): الف) ریب‌ها و پوسته در سازه‌های کاموزیتی ب) سازه کامپوزیتی [۸].

۲-۱- مدلسازی

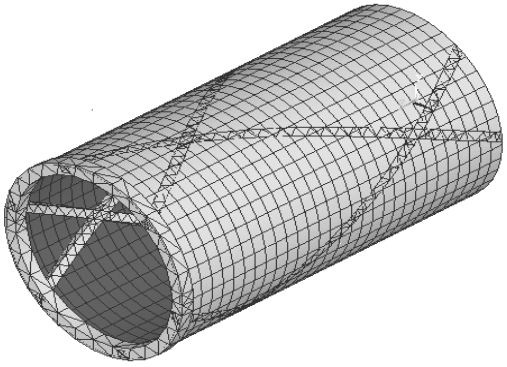
شکل (۳-الف) نمونه ساخته شده سازه کامپوزیتی را نشان می‌دهد. این سازه دارای شش ریب است که زوایای $\pm ۳۰^{\circ}$ را نسبت به محور استوانه تشکیل می‌دهند. زاویه قرارگیری فیبرها نسبت به راستای عمود بر محور استوانه در مدل اجزای محدود بر اساس مدل ساخته شده و برابر با $\pm ۱۴^{\circ}$ در نظر گرفته شده است. مقادیر پارامترهای هندسی سازه کامپوزیتی ساخته شده در جدول (۱) آورده شده است.

جدول(۱): پارامترهای سازه کامپوزیتی ساخته شده

ضخامت پوسته (mm)	شعاع خارجی (mm)	شعاع داخلی (mm)	Φ (^{o})	طول نمونه (mm)
۰/۸	۷۸	۷۲	۳۰	۳۰۰

در شبیه‌سازی اجزای محدود دو نوع المان مورد استفاده قرار گرفته است. نوع اول المان‌های SHELL99 و SOLID191 بوده که برای تحلیل خطی و بدست آوردن مدهای کمانشی مورد استفاده قرار گرفته اند. المان SHELL99 معمولاً برای مدلسازی پوسته‌هایی که خاصیت لایه‌ای دارند مورد استفاده قرار می گیرد و نسبت به SHELL91 فاقد برخی ویژگی‌های غیرخطی است. المان SOLID191 نیز المانی سازه‌ای و بصورت لایه‌ای بوده و قابلیت سفتی تنشی را دارا است. این المان دارای بیست گره و سه درجه آزادی انتقالی بوده و در اینجا برای مدلسازی پوسته‌ها و جامدات ضخیم لایه‌ای استفاده شده است. نوع دوم المان‌های در نظر گرفته شده، المان‌های SHELL91 و SOLID46 هستند. از این المان‌ها برای تحلیل غیرخطی و تعیین بار بحرانی کمانش استفاده شده است. SHELL91 المانی لایه‌ای است که در مدلسازی پوسته‌های لایه‌ای و ساختارهای ساندویچی ضخیم مورد استفاده قرار می‌گیرد. SOLID46 یک المان سازه‌ای با هشت گره بوده و از نظر کاربرد مشابه SOLID191 است، با این تفاوت که از این المان برای تحلیل غیرخطی می‌توان استفاده کرد. به علت آنکه پوسته‌های مشبک کامپوزیتی ساختار لایه‌ای دارند، المان‌هایی که در تحلیل استفاده می شوند نیز لایه‌ای در نظر گرفته شده است. مدل اجزای محدود استفاده شده در این مقاله در شکل (۳-ب) نشان داده شده است.

(الف)



(ب)

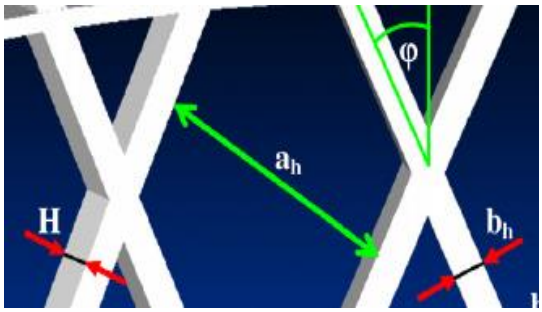
شکل (۳): الف) سازه کامپوزیتی مشبک ساخته شده ب) مدل اجزای محدود پوسته کامپوزیتی مشبک

هدف از تحلیل اجزای محدود، بررسی رفتار سازه کامپوزیتی بدون نیاز به آزمایش تجربی است. در واقع از تحلیل اجزای محدود به عنوان جایگزینی برای آزمایشات تجربی که غالباً زمانبر و پرهزینه هستند، استفاده شده است. بنابراین، برای تولید داده‌های شبیه‌سازی اجزاء محدود بجای آزمایشات تجربی استفاده شده است. ویژگی‌های مکانیکی مدل مورد نظر در جدول (۲) تعریف شده‌اند.

جدول (۲): ویژگی‌های مکانیکی مدل

	G_{yz} (GPa)	G_{xy},G_{xz} (GPa)	ν_{yz}	ν_{xy} , ν_{xz}	E_z , E_y (GPa)	E_x (GPa)
ریب	۰/۳	۱	۰/۱۵	۰/۲۵	۱/۹	۷
پوسته	۰/۳	۱	۰/۱۵	۰/۲۵	۱/۹	۶

شکل (۴) پارامترهای مؤثر در این سازه‌ها را نشان می‌دهد. در این شکل، φ زاویه ریب، a_h فاصله عمودی دو ریب متوالی، b_h پهنای ریب و H ضخامت ریب هستند. در نمونه مورد بررسی سطح مقطع ریب مربعی در نظر گرفته شده است. با ترکیب‌های مختلف از این پارامترها، هندسه‌های گوناگونی شکل می‌گیرد که با تحلیل اجزاء محدود این هندسه‌ها، بار کمانشی و وزن هر یک را می‌توان بدست آورد.



شکل (۴): نمایش پارامترهای مؤثر در سازه های کامپوزیتی

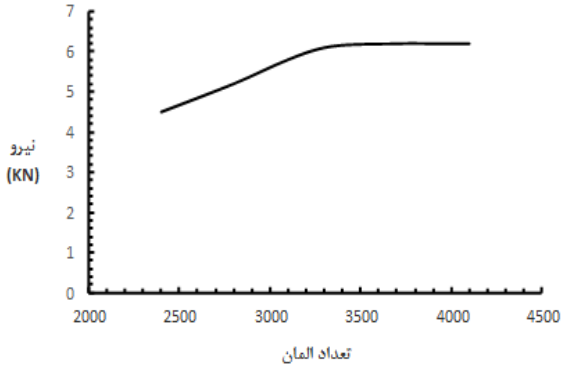
محدوده هریک از پارامترهای مورد بررسی با توجه به اینکه $0 < H \le R/20$.$0 < \frac{b_h}{a_h} < 1$ که R شعاع پوسته است، در جدول (۳) آورده شده است.

جدول (۳): پارامترهای موثر بررسی شده در این پژوهش

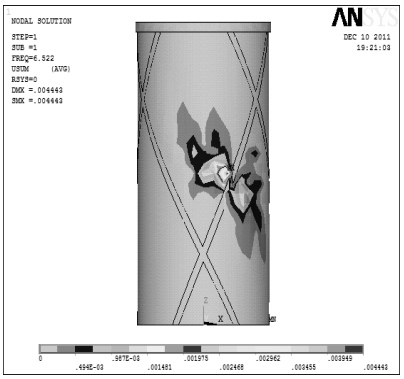
پارامتر	تعداد ریب (unit)	ضخامت ریب (mm)	زاویه ریب (mm)	ضخامت پوسته (mm)
بیشینه	۱۶	۲	۱۰	۰/۳
کمینه	۴	۹	۸۰	۱/۵

۲-۲- صحت‌سنجی شبیه‌سازی‌ها

در ابتدا تاثیر تعداد المان‌ها در پاسخ کمانشی پوسته مورد بررسی قرار گرفته، نتایج در شکل (۵) نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود، با افزایش تعداد المان‌ها جواب به یک مقدار مشخص همگرا می‌شود. با توجه به کاهش نرخ همگرایی با افزایش تعداد تقسیمات و نیز افزایش زمان محاسبه، تعداد بهینه المان‌ها در این تحلیل برابر ۳۳۴۰ المان انتخاب شد. همانطور که قبلاً گفته شد، برای محاسبه بار کمانشی نهایی در سازه و تحلیل خطی و بررسی مودهای کمانشی، نمونه ساخته شده تحت فشار محوری قرار می‌گیرد (شکل ۶).



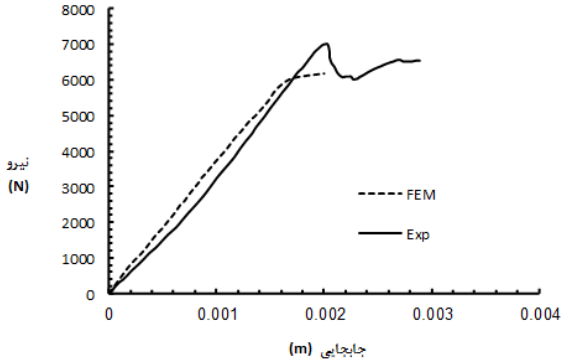
شکل (۵): تأثیر تعداد المان بر رفتار سازه



شکل (۶): نمونه ساخته شده تحت بار محوری به همراه مدل اجزاء محدود آن.

همانطور که از شکل مشخص است مودهای کمانشی در مدل اجزای محدود انطباق خوبی با نمونه تحت تست تجربی دارد که این همخوانی بیانگر صحیح انجام شدن مدلسازی اجزای محدود است. در بررسی رفتار سازه‌های مشبک کامپوزیتی علاوه بر مودهای کمانشی پارامتر تاثیرگذاری دیگری که مورد مطالعه قرار می‌گیرد بار نهایی کمانش می‌باشد و از پارامترهای مهم در بررسی رفتار این سازه‌ها می‌باشد. برای بررسی بار نهایی کمانش در نمونه ساخته شده و مدل اجزاء محدود، منحنی تغییرات نیرو – جابجایی برای هر یک از آنها صورت پذیرفت. شکل ۷ نمودار نیرو – جابجایی نمونه ساخته شده و مدل اجزاء محدود را نشان می‌دهد.

نتایج مقدار بار نهایی کمانش حاصل از شبیه‌سازی و آزمون‌های آزمایشگاهی را به ترتیب برابر ۶۱۸۰ نیوتن و ۶۵۴۲ نیوتن نشان می‌دهد که حاکی از تطابق بسیار مناسب نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی می‌باشد. بنابراین بر مبنای این انطباق‌های بیان شده، از شبیه سازی اجزاء محدود به جای آزمایشات تجربی برای بررسی پارامترهای مؤثر استفاده شده است. پارامترها در سطوح مختلف با هم ترکیب شده و سازه هایی با هندسه‌های متنوع را به وجود می‌آورند.



شکل (۷): نمودار نیرو– جابجایی نمونه ساخته شده (EXP) و مدل اجزاء محدود (FEM)

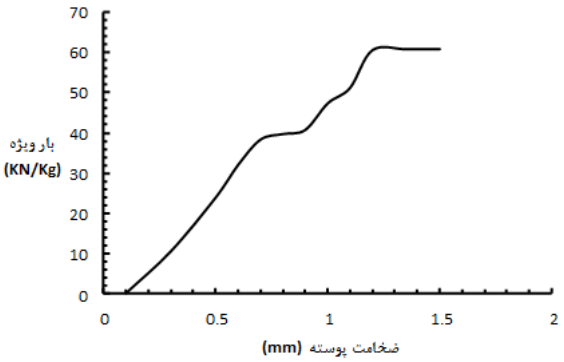
۳- نتایج و بحث

۳-۱- مقدمه

ازآنجاکه یکی از مهم‌ترین ویژگی این سازه‌ها وزن کم آنهاست لذا برای دست‌یابی به بهترین طرح در سازه‌های مشبک کامپوزیتی باید همزمان دو عامل نیرو کمانش و وزن مورد بررسی قرار گیرد. از این رو نسبت بار کمانشی قابل تحمل توسط سازه به وزن آن، یکی از اساسی‌ترین پارامترهای طراحی در سازه‌های کامپوزیتی مشبک بشمار می‌رود. برای هر یک از سازه های بدست آمده از طریق شبیه‌سازی اجزاء محدود، نسبت بار بحرانی کمانش به وزن محاسبه شده است و بر مبنای این معیار تحلیل انجام گرفته است.

۳-۲- ضخامت پوسته

تحلیل اجزای محدود برای ضخامت‌های مختلف پوسته از ۰/۳ میلیمتر تا ۱/۵ میلیمتر انجام گرفته است. افزایش ضخامت تأثیر بسزایی در افزایش بار نهایی دارد که این بیانگر افزایش میزان مقاومت نمونه است. اما این افزایش ضخامت دارای یک مقدار بهینه خواهد بود بدلیل آن که با افزایش ضخامت وزن سازه نیز افزایش می‌یابد و بار بررسی نتایج حاصل از افزایش ضخامت و مقایسه آن‌ها با یکدیگر مشاهده گردید که در هر مرحله میزان افزایش بار نهایی کمانش کاهش می‌یابد در حالی که درصد افزایش وزن بیشتر می‌شود. همچنین با ضخیم‌تر شدن پوسته رفتار مکانیکی سازه تغییر کرده و پوسته به عنوان عضوی که قابلیت تحمل بار بیشتری دارد تأثیرگذارتر خواهد بود و به تقویت کنندگی ریب کمک خواهد کرد. در شکل (۸) نمودار بار ویژه کمانش - ضخامت پوسته نشان داده شده است.

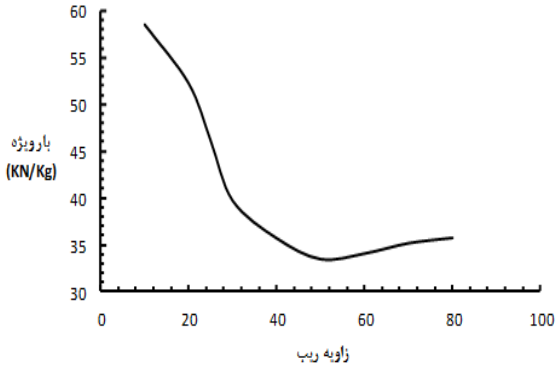


شکل (۸): نمودار بار ویژه کمانش- ضخامت پوسته خارجی

افزایش بار نهایی و بار ویژه کمانش با افزایش ضخامت پوسته بدین دلیل است که در ضخامت‌های کم پوسته عمده بار توسط ریب‌ها تحمل می‌شود اما با افزایش ضخامت نقش اجزای سازه در تحمل بار تغییر کرده و پوسته نقش مهمی در باربری سازه دارد و سعی در مقاومت در برابر تغییر شکل بشکه‌ای سازه دارد. البته باید به این نکته توجه شود که از نظر افزایش ضخامت پوسته مقدار بهینه‌ای وجود دارد و ممکن است بعد از یک ضخامت خاص منحنی بار ویژه دیگر تغییر چندانی با افزایش ضخامت نداشته باشد، زیرا وزن سازه افزایش می‌یابد.

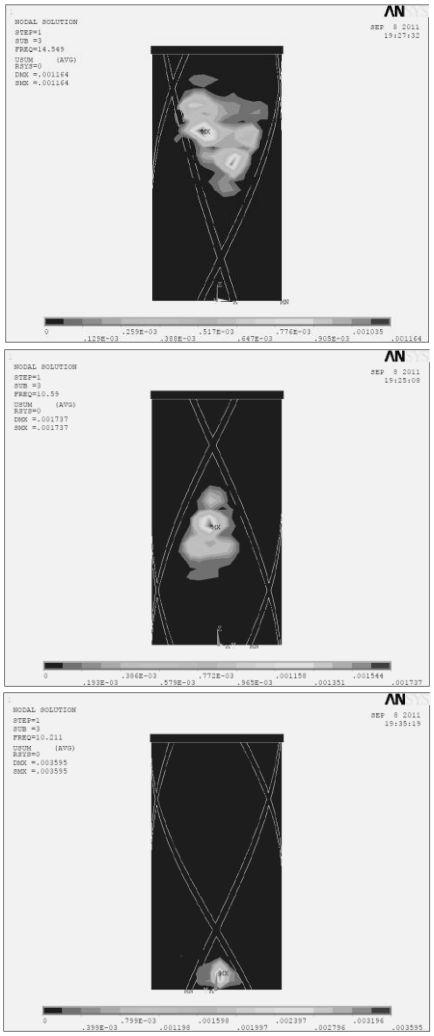
۳-۳- زاویه ریب

زاویه ریب همانگونه که در شکل (۴) مشخص است نسبت به محور استوانه سنجیده می‌شود. با افزایش زاویه ریب میزان مقاومت کمانشی سازه کاهش می‌یابد. این نتیجه معقول و منطقی است به این علت که بار اعمالی از نوع محوری است و هر چه زاویه ریب‌ها به جهت محوری نزدیک‌تر باشد سازه مستحکم‌تر شده و بار بیشتری را تحمل می‌کند. در شکل (۹) منحنی تغیرات بار ویژه - زاویه ریب نشان داده شده است.



شکل (۹): نمودار بار ویژه کمانش - زاویه ریب

همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش زاویه ریب میزان بار ویژه کاهش می‌یابد. با افزایش زاویه‌ی ریب‌ها نسبت به محور طولی استوانه مقدار گام آن‌ها کاهش یافته و به تبع آن مقدار چگالی تقویت‌کننده‌ها افزایش می‌یابد و در کل وزن سازه افزایش می‌یابد. اما یک نکته باید توجه شود که با کاهش زاویه ریب از ۳۰ درجه مودهای کمانشی بحرانی تر می‌شوند که این یک اثر مخرب برای پوسته خواهد داشت. در شکل (۱۰) تأثیر کاهش زاویه ریب نشان داده شده است.



(الف)

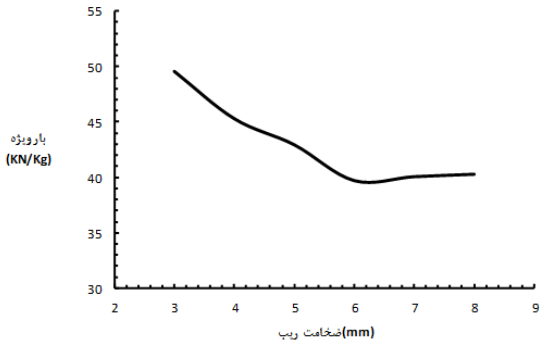
(ب)

(ج)

شکل (۱۰): مد کمانشی برای نمونه با زاویه ریب (الف) ۱۰° (ب) ۲۰° (ج) ۳۰°

۳-۴- ضخامت ریب

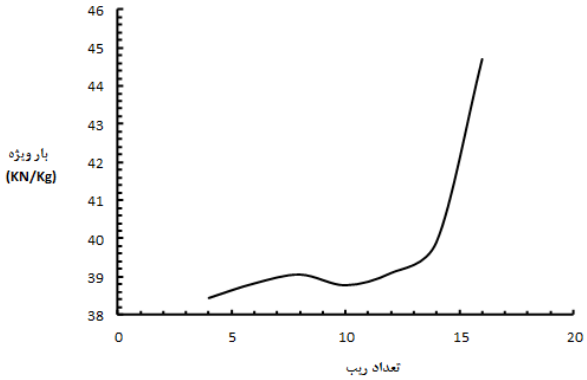
هدف از بررسی این پارامتر مشاهده اثرات تغییر سطح مقطع ریب بر روی مقاومت سازه است. با افزایش ضخامت ریب میزان بار نهایی کمانشی که سازه می تواند تحمل کند افزایش می‌یابد و از آنجا که در این سازه‌ها عمده بار توسط ریب‌ها تحمل می‌شود و ریب‌ها کارکرد ستونی دارند در نتیجه با افزایش سطح مقطع ریب سازه مستحکم تر می-گردد. از طرف دیگر با افزایش سطح مقطع ریب وزن سازه نیز تغییر می‌کند و شاهد افزایش وزن نیز هستیم که این افزایش وزن موجب کاهش بار کمانشی مخصوص می-گردد. پس از یک ضخامت معین از ریب، اثرات افزایش بار نهایی کمانشی قابل تحمل با افزایش وزن خنثی شده و در نتیجه همانطور که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود با افزایش ضخامت ریب بار مخصوص تغییر چندانی نمی‌کند.یکی از ویژگی های اصلی ریب‌ها انعطاف پذیری قابل توجه آنهاست. هنگامی که ضخامت ریب افزایش می یابد، بعلت اضافه شدن لایه های الیاف از میزان انعطاف پذیری ریب ها کاسته می شود. از این رو افزایش ضخامت ریب زیاد مطلوب نیست.



شکل (۱۱): نمودار بار ویژه کمانش – ضخامت ریب

۳-۵- تعداد ریب

از آنجاییکه ریب‌ها در این سازه‌ها نقش تقویت‌کنندگی دارند پس افزایش تعداد ریب‌ها می‌تواند نتیجه مطلوبی در افزایش مقاومت کمانشی سازه داشته باشد. با افزایش تعداد ریب‌ها شبکه تقویت‌کننده‌ها چگال‌تر گشته و رفتار تقویت-کننده‌ها بر رفتار پوسته خارجی غلبه کرده و وظیفه تحمل بار محوری به تقویت کننده ها محول می‌شود و در این حالت ریب‌های مارپیچ به عنوان ستون‌هایی هستند که بار محوری را تحمل می‌کنند و رفتار مناسب‌تری در باربری سازه دارند. در شکل (۱۲) اثرات افزایش تعداد ریب‌های مارپیچ بر روی بار ویژه کمانش نشان داده شده است.



شکل (۱۲): نمودار بار ویژه کمانش – تعداد ریب

با افزایش تعداد ریب‌های مارپیچ وزن سازه نیز افزایش می-یابد و این مورد سبب می‌شود بار ویژه افزایش چندانی نداشته باشد. همانطور که در شکل ملاحظه می‌شود تا یک تعداد ریب مشخص اثرات افزایش نیرو با افزایش وزن خنثی شده در نتیجه همانطور که از شکل مشخص است بار ویژه تقریباً ثابت است. اما از یک تعداد ریب به بعد میزان افزایش نیرو بیشتر از میزان افزایش وزن بوده و در نتیجه افزایش در بار ویژه مشاهده می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی اثر پارامترهای هندسی روی نسبت مقاومت به وزن سازه کامپوزیتی پرداخته شد. تعداد، ضخامت و زاویه ریب ها به همراه ضخامت پوسته، به عنوان پارامترهای مورد بررسی انتخاب شدند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت پوسته بیرونی تأثیر بسزایی در افزایش بار نهایی دارد بطوری که بار ویژه بیش از ۵۰ درصد افزایش داشته است که این بیانگر افزایش میزان مقاومت نمونه است. با ضخیم‌تر شدن پوسته رفتار مکانیکی سازه تغییر کرده و پوسته به عنوان عضوی که قابلیت تحمل بار بیشتری دارد تأثیرگذاری بیشتری خواهد داشت و به تقویت کنندگی ریب کمک خواهد کرد. همچنین با کاهش زاویه ریب میزان بار ویژه تقریباً ۳۵ درصد افزایش یافته است. با توجه به اینکه بار اعمالی از نوع محوری است، هر چه زاویه ریب-ها به جهت محوری نزدیک‌تر باشد سازه مستحکم‌تر شده و بار بیشتری را تحمل می‌کند. اما کاهش بیش از حد زاویه ریب موجب مودهای کمانشی مخرب در سازه می‌شود که باید مورد توجه قرار گیرد. با ضخیم تر شدن ریب مشاهده گردید که وزن سازه بیشتر شده و بر میزان افزایش بار کمانشی غلبه کرده است و همچنین از انعطاف پذیری سازه کاسته شده است. از آنجا که ریب‌ها در این سازه ها نقش تقویت کنندگی دارند پس افزایش تعداد ریب‌ها می‌تواند نتیجه مطلوبی در افزایش مقاومت کمانشی سازه داشته باشد. از طرفی با افزایش تعداد ریب‌های مارپیچ وزن سازه نیز افزایش می‌یابد. با افزایش تعداد ریب های سازه، افزایش مقاومت به کمانش در سازه نسبت به افزایش وزن سازه پیشی گرفته است. با بررسی نتایج مشخص شد که با این افزایش بار ویژه در حدود ۱۵ درصد رشد داشته است یعنی این افزایش، با توجه به افزایشی که پارامترهای ضخامت پوسته و زاویه ریب ایجاد می کنند، قابل توجه نخواهد بود. از میان پارامترهای بررسی شده در این پژوهش مشاهده می شود که ضخامت پوسته تأثیر بسزایی در تغییر رفتار سازه های مشبک کامپوزیتی نسبت به سایر موارد دارد.

مراجع:

[1] Januky N., Knight N.F., Ambur D.R., Optimal design of general stiffened composite circular cylinders for global buckling with strength constraints, *Composite Structure*, vol. 41, No. 3-4, 1998, pp. 243-252.

[2] Vasiliev V.V., Barynin V.A., Rasin A.F., Anisogrid lattice structures-survey of development and application, *Composite Structure*, vol. 54, No. 2-3, 2001, pp. 361-371.

[3] Tafreshi A., Buckling and post-buckling analysis of composite cylindrical shells with cutouts subjected to internal pressure and axial compressive loads, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 79, No. 5, 2002, pp. 351-359.

[4] Wodesenbent E., Kidane S., Pang S.S., Optimization for buckling load of grid stiffened composite panels, *Composite Structure*, vol. 60, No. 2, 2003, pp. 159-169.

[5] Hillburger M.W., Starnes Jr. J.M., Buckling behavior of compression-loaded composite cylindrical shells with reinforced cutouts, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, vol. 40, No. 7, 2005, pp. 1005-1021.

[6] Vasiliev V.V., Razin A.F., Anisogrid composite lattice structures for spacecraft and aircraft applications, *Composite Structure*, vol. 76, No. 1-2, 2006, pp. 182-189.

[7] Craig K.J., Stander N., Optimization of shell buckling incorporating Karhunen-Loeve-based geometrical imperfections, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 37, No. 2, 2008, pp. 185-194.

[8] Totaro G., Grdal Z., Optimal design of composite lattice shell structures for aerospace applications, *Aerospace Science and Technology*, Vol. 13, No. 4-5, 2009, pp. 157–164.

[9] Hualin F., Fengnian J., Daining F., Uniaxial local buckling strength of periodic lattice composites, *Materials and Design*, Vol. 30, No. 10, 2009, pp. 4136–4145.

[10] Yazdani M., Rahimi H., 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. 19, 2010, pp. 2568-2575.

[11] Mozorov E.V., Lopatin A.V., Nesterov V.A., Finite element and buckling analysis of anisogrid composite lattice cylidrical shells, *Composite Structure*, vol. 93, No. 2, 2011, pp. 308–323.

[12] Buragohain M., Velmurugan R., Study of filament wound grid-stiffened composite cylindrical structures, *Composite Structure*, vol. 93, No. 2, 2011, pp. 1031–1038.

[13] Vasiliev V.V., Barynin V.A., Razin A.F., Anisogrid composite lattice structures – Development and aerospace applications, *Composite Structure*, vol. 94, No. 3, 2012, pp. 1117–1127.