

## ساخت و تست فلنچ کامپوزیتی به روش تجربی و شبیه‌سازی

رضا آذرافزا<sup>۱\*</sup>، علی داور<sup>۲</sup>، حمید غفاری<sup>۲</sup>

۱- دانشیار، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوریهای ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

۲- دانشیار، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوریهای ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

۲- کارشناس ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات کردستان، سنندج، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۸/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۲۴)

### چکیده

فلنچ‌ها قطعاتی هستند که، امکان اتصال، تغییر راستا و دسترسی به منظور تعمیرات و بازرسی را در بین قطعات بزرگ و اصلی تجهیزات و سازه‌ها فراهم می‌کنند. در این تحقیق با توجه به اهمیت، حداکثر سبک‌سازی در کنار حفظ استحکام قطعات در سازه‌های هوایی، فلنچ و پوسته‌هایی کامپوزیتی ساخته شد که در سازه‌های هوایی نظیر راکت‌های شتاب دهنده و موشک‌های ماهواره‌بر، وظیفه‌ی اتصال قسمت‌ها و پوسته‌های بزرگ سازه را برعهده دارند. جنس فلنچ‌های مورد استفاده در این سازه‌ها، در سبک‌ترین حالت، آلومینیوم بوده است. در این تحقیق با هدف سبک‌سازی هرچه بیشتر، با روش رشته پیچی، تعداد ۴ عدد فلنچ و ۴ عدد پوسته کامپوزیتی در ۲ مجموعه ساخته شد، که هر مجموعه شامل ۲ فلنچ و ۲ پوسته می‌باشد. پس از اتصال فلنچ‌ها و پوسته‌ها به همدیگر، بر روی آنها تست‌های تجربی مودال و کشش انجام شده است. همچنین شبیه‌سازی عددی تست مودال و کشش، با نرم‌افزار انسیس، انجام پذیرفت. ارزیابی نتایج حاصل از تست‌ها و تحلیل عددی بر روی قطعات ساخته شده، مبین فرکانس ویژه بالای کامپوزیت نسبت به وزن، در مقایسه با نوع فولادی و آلومینیومی (در فرکانسهای پایین) می‌باشد. همچنین عامل تورق در تیغه‌ی فلنچ کامپوزیتی، بیشتر از شکست ماتریس و الیاف، در افزایش طول سازه بر اثر نیروی کشش تاثیر داشته است.

واژه‌های کلیدی: کامپوزیت، فلنچ، رشته پیچی، آنالیز مودال، تست کشش

## Fabrication and Testing of Composite Flange Using Experimental and Numerical Methods

Reza Azarafza<sup>\*</sup>, Ali Davar, Hamid Ghaffari

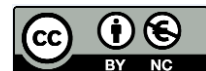
### Abstract

Flanges are parts that provide the possibility of connection, change of direction, access for repairs and inspection between large and main parts of equipment and structures. In this research, due to the importance of maximum lightening while maintaining the strength of parts in aerospace structures, composite flanges and shells were made, which are used in aeronautical structures such as boosting rockets and satellite carriers. They are responsible for connecting the parts and large shells of the structure. The material of the flanges used in these structures is aluminum in the lightest state, and in this research, with the aim of lightening as much as possible, 4 flanges and 4 shells were made in 2 sets, each set includes 2 flanges and 2 shells. After connecting the flanges and shells to each other, experimental modal analysis and tensile tests were performed. Also numerical simulation of the modal and tensile test was performed with ANSYS software. The results of experimental tests and numerical analysis on the manufactured parts show that the specific frequency of the composite flange is higher than that of the steel and aluminum flange (in low frequency range). Also, the delamination factor in the composite flange blade has more effect on increasing the length of the structure due to the tensile force, rather than the failure of the matrix and fibers.

**Key words:** Composite, Flange, Modal analysis, Tensile test, Filamet winding.

\* نویسنده پاسخگو: رضا آذرافزا، تلفن: ۰۹۱۲۶۴۷۹۴۰۴، پست الکترونیک: azarmut@mut.ac.ir

این مقاله تحت لایسنس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لایسنس از آدرس <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمایید.



## مقدمه

فلنچ‌ها قطعاتی هستند که، امکان اتصال، تغییر راستا و دسترسی به منظور تعمیرات و بازرسی را در بین قطعات بزرگ و اصلی تجهیزات و سازه‌ها فراهم می‌کنند. با توجه به ابعاد و اندازه بزرگ فلنچ‌های مورد استفاده در سازه‌های هوایی، کاهش وزن آنها، تاثیر زیادی بر کاهش وزن کل سازه، مصرف سوخت و انرژی داشته، و از طرفی باعث مأموریت بهتر آنها می‌گردد. جنس فلنچ استفاده شده در این سازه‌ها فلزی و از جنس آلومینیوم می‌باشد، که با توجه به قطر و ابعاد بزرگی که دارند، از وزن بالایی برخوردار می‌باشند. اهمیت این موضوع زمانی مشخص می‌گردد که تعداد قسمت‌ها و تکه‌های سازه‌ی هوایی زیاد بوده و در نتیجه تعداد فلنچ‌های بکار رفته در سازه نیز افزایش می‌یابد. در کاربردهای مهندسی، غالباً نیاز به تلفیق خواص مواد مختلف می‌باشد. به طور مثال در صنایع هوایی و فضایی، صنایع خودرو سازی، صنایع دریایی و زیر آبی امکان استفاده از یک نوع ماده که همه‌ی خواص مورد نظر را تامین نماید، وجود ندارد. کامپوزیت‌ها به دلیل داشتن قابلیت‌های شاخصی چون نسبت استحکام و سفتی ویژه بالا، در سازه‌ها و صنایع پیشرفته کاربرد وسیعی پیدا کرده‌اند. بنابراین بکارگیری مواد کامپوزیتی مناسب به جای فلزات و آلیاژهای آنها، در قطعات بزرگی مانند فلنچ‌های و یا پوسته‌های مورد استفاده در سازه‌های هوایی الزامی می‌گردد. در بعضی حالات، عدم کاهش وزن در یک سازه، منجر به توقف پروژه‌های مهم صنعتی می‌گردد. بنابراین هر مقدار که وزن مرده سازه کاهش یابد، مستقیماً می‌توان به مقدار سوخت وسیله‌ی هوایی اضافه نمود تا برد پرواز سازه افزایش یابد. همچنین کاهش وزن کلی سازه منجر به کاهش نیروی رانش موتورها، سطوح بال و سوخت گردد. از طرفی روش‌های ساخت مواد مرکب در سال‌های اخیر بسیار بهینه و اقتصادی شده، سرعت تولید قطعات کامپوزیتی افزایش یافته، و هزینه‌های تولید مواد مرکب مقرون به صرفه‌تر گشته است. بنابراین طراحی و ساخت فلنچ‌های کامپوزیتی همواره مورد توجه طراحان بوده و تحقیقات مختلفی در مورد آنها انجام شده است که به تعدادی از آنها اشاره می‌شود. تائو و همکاران [۱]، نوعی فلنچ با کاربرد و شکلی متفاوت که جنس آن آلومینیوم و در بال‌ها تفریحی مورد استفاده قرار می‌گیرد، به روش قالبگیری به انتقال رزین (RTM)<sup>۱</sup> ساختند. مارتینز و همکاران [۲]، عوامل موثر در فرآیند رشته پیچی لوله‌های

کامپوزیتی را بررسی نمودند. نتایج حاصل از تحقیق ایشان بعد از تحلیل با نرم‌افزار آباکوس<sup>۲</sup> نشان داد که، مناسب ترین زاویه پیچش در لوله‌های کامپوزیتی به روش رشته پیچی، ۵۳/۲۵ درجه بوده، اما زوایای بین ۳۰ تا ۹۰ درجه قابل قبول می‌باشند. ویلفیلد و همکاران [۳] تحقیقات تجربی و عددی را برای خزش و انقباض نامتقارن در طول، پس از پخت فلنچ از جنس پلیمر تقویت شده توسط الیاف شیشه (GFRP)<sup>۳</sup> انجام دادند. فلنچ با استفاده از روش دستی با قالب فولادی ساخته شد. بسیاری از کرنش‌سنج‌ها، بین لایه‌ها و روی سطوح بیرونی نصب شده بودند. آنها مشاهده کردند که همبستگی بین نتایج برگشت فنی، ضعیف است اما برای کرنش، نتایج خوب است. کورز [۴] تحقیقات تجربی، عددی و تحلیلی را بر روی طراحی اتصالات فلنچ پیچ و مهره‌ای شناور (فلنچ شل) ساخته شده از مواد GFRP با قابلیت کار در دماهای تا ۸۰ درجه سانتیگراد در صنایع شیمیایی، انجام داد. فانگیرو [۵] تحقیقات تجربی را بر روی توسعه اتصال لوله T شکل FRP انجام داد. پارچه‌های پشمی بافتنی سه بعدی با ساختارهای مختلف مانند نخ پشمی خطی، نخ متوسط آسیاب شده و نخ پشمی متوسط برای بهبود خواص مکانیکی، آزمایش شدند. برای ساخت اتصال از الیاف شیشه، رزین پلی استر و فرآیند RTM استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که نمونه PA Glass 544 Tex، بهترین عملکرد را برای ساخت اتصال T با کسر جرمی الیاف ۴۳ درصد نشان می‌دهد و این، نزدیک به مقدار مورد نظر ۴۰ درصد است. الجبوری و همکاران [۶] ساخت اتصال فلنچی پیچ‌دار GFRP را برای لوله‌های کامپوزیتی با استحکام بالا و مقاوم در برابر خوردگی با روش تجربی مطالعه نمودند. آنها چندین فلنچ GFRP ساختند و آزمایش‌های زیادی برای به دست آوردن فلنچ GFRP پیچ‌دار با ویژگی‌های بالا انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که کیفیت فلنچ‌های ساخته شده قابل قبول می‌باشند. الجبوری و همکاران [۷] تجزیه و تحلیل توسعه نشستی و استحکام فلنچ و پیچ فولادی با واشر آلومینیومی را با استفاده از المان محدود به صورت دو بعدی و سه بعدی با استفاده از نرم افزار انسیس<sup>۴</sup> انجام دادند. نتایج آنها نشان داد که روش اجزای محدود با استفاده از معیار فشار نفوذ روش مناسبی برای مطالعه رفتار نشستی در مقایسه با سایر روش‌ها است که نسبتاً زمان‌بر و پرهزینه هستند. جاسزاک و همکاران [۸] یک روش را برای نشستی در اتصالات فلنچ، پس از تغییر

تحقیق رشته پیچی بوده، که از الیاف شیشه و رزین اپوکسی در ساخت استفاده شده است. ابتکار در طراحی قالب فلنچ و روش پیچاندن الیاف به جهت سادگی و کارایی یکی از نقاط قوت این تحقیق می‌باشد. بعد از ساخت، تست‌های مودال و کشش بر روی پوسته‌ها با اتصال فلنچی، انجام گردید.

### انتخاب مواد و روش ساخت

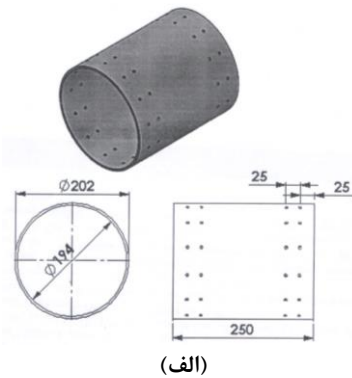
از بین روش‌های ساخت برای مواد کامپوزیتی، روش رشته پیچی به دلیل یک‌سری مزایا برای ساخت نمونه‌ها انتخاب گردید. مواد مورد استفاده الیاف شیشه (E-Glass) و رزین مورد استفاده از نوع اپوکسی می‌باشند که خواص آنها در جدول ۱ نشان داده شده است. کسر حجمی الیاف ۶۳٪ می‌باشد.

جدول ۱ - خواص مکانیکی رزین و الیاف مورد استفاده

خواص مواد	رزین اپوکسی	الیاف شیشه (E-Glass)
مدول یانگ (GPa)	۳/۴۵	۷۲
مدول برشی (GPa)	۱/۲۸	۲۸/۱
نسبت پواسون	۰/۳۴	۰/۲۸
دانسیتته (kg/m <sup>3</sup> )	۹۸۰	۱۹۰۰

### ابعاد و اندازه فلنچ‌ها و پوسته‌ها و ساخت آنها

برای تست تجربی ۴ عدد پوسته و ۴ عدد فلنچ مورد نیاز می‌باشد که ابعاد آنها در شکل ۱ نشان داده است. هر فلنچ باید به وسیله پرچ به یک پوسته متصل گردد. در نهایت برای تست مجموعه، باید این دو پوسته دارای فلنچ، به هم متصل گردند. در شکل ۲ نمایی از چگونگی اتصال پوسته‌ها و فلنچ‌ها نمایش داده شده است.



(الف)

شکل خط لوله، با استفاده از روش المان محدود پیشنهاد کردند. این مقاله همچنین نتایج محاسبات را بر روی توزیع تنش غیریکنواخت در جهت شعاعی و اثر ارائه می‌کند. الجبوری و همکاران [۹] مطالعه تجربی برای ساخت یک اتصال فلنچی پیچ و مهره‌ای GFRP برای لوله‌های کامپوزیت با استحکام و عملکرد بالا را انجام دادند و قالبی ساختند که کیفیت مواد کامپوزیت را تضمین و درجه سطح آن را کنترل می‌کند. حکیم و همکاران [۱۰] یک مدل تحلیلی توسعه‌یافته جدید که فلنچ‌های ناهمسانگرد را با استفاده از هاب و بدون هاب به هم متصل می‌کند، ارائه دادند. این مدل بر اساس ناهمسانگردی و تجزیه و تحلیل انعطاف‌پذیری همه عناصر از جمله واشر، پیچ و مهره و فلنچ می‌باشد. نتایج بدست آمده آنها نشان داد که مدل جدید، پتانسیل استفاده به عنوان یک ابزار جایگزین برای روش المان محدود برای تجزیه و تحلیل تنش‌ها و تغییر شکل اتصالات پیچ‌دار را دارد. وفادار و همکاران [۱۱] قابلیت اطمینان مدل‌سازی عددی اتصالات پیچ‌دار تقویت شده با الیاف را بر اساس همسانگردی ارزیابی کرده و نتایج را با مدل‌سازی اجزای محدود عددی مبتنی بر ناهمسانگرد مقایسه کردند. وفادار و همکاران [۱۲] یک مدل تحلیلی که یکپارچگی و سفتی اتصالات فلنچ پیچ‌دار تقویت شده با الیاف را بر اساس ناهمسانگردی و تجزیه و تحلیل انعطاف‌پذیری همه عناصر اتصال از جمله واشر، پیچ‌ها و فلنچ‌ها بررسی می‌کند، ارائه کردند. در نهایت، مدل تحلیلی توسعه‌یافته را با آزمایش تجربی و مدل‌سازی عددی با اندازه‌های مختلف اعتبارسنجی کردند. کریشناDasan و همکاران [۱۳] یک مدل تحلیلی با در نظر گرفتن تغییر سفتی لایه‌ها در امتداد سطح یاتاقان با در نظر گرفتن تغییر سفتی ورقه‌ها در امتداد محیط با استفاده از دو دنباله چیدمان پلیمر تقویت‌شده با الیاف کربن را ارائه دادند. مطالعه آنها برای بررسی شرایط تنش برشی در اطراف سوراخ و بررسی جوابهای عددی با محاسبات تحلیلی مولفه‌های تنش در امتداد سطح تماس هر جهت لایه است. الجبوری و همکاران [۱۴] اتصال فلنچ کامپوزیتی که برای اتصال لوله‌های کامپوزیتی که در کاربردهای نفت و گاز استفاده می‌شود و اتصالی با استحکام بالا و دارای مقاومت خوب در برابر خوردگی است را به روش تجربی و عددی بررسی کردند.

هدف از انجام این تحقیق، معرفی مواد جدید، روش جدید و ساختاری جدید در تولید فلنچ‌ها می‌باشد. روش تولید در این



(الف)



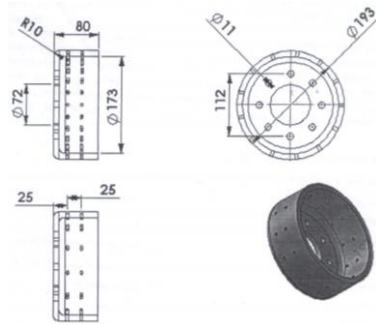
(ب)

شکل ۳- الف) قالب یک تکه برای ساخت ۲ فلنچ، ب) سطح قالب فلنچها آغشته به رزین اپکسی

سپس الیاف شیشه را که از سطل رزین عبور کرده بدون انقطاع با چیدمان گفته شده قبلی، برای فلنچ رشته پیچی می-شود. بعد از اجرای هر لایه، عمل آغشته سازی الیاف با رزین انجام گشته تا رزین به طور کامل در الیاف نفوذ کند جهت کنترل زوایا از گولیس زاویه سنج استفاده می گردد. مراحل ساخت و آماده کردن پوسته‌ها همانند ساخت فلنچها بوده و تنها شکل قالب و تعداد لایه‌ها با توجه به ضخامت ۴ میلیمتری آن، ۶ لایه و چیدمان آن  $[90_2, \pm 45, \pm 30]$  می باشد. بعد از پخت کامپوزیتها، آنها را برش داده و فوم داخل آنها خارج می گردد. شکل ۴ مراحل برش، خارج کردن فوم و فلنچها و پوسته‌های ساخته شده پس از ماشینکاری را نشان می دهد.

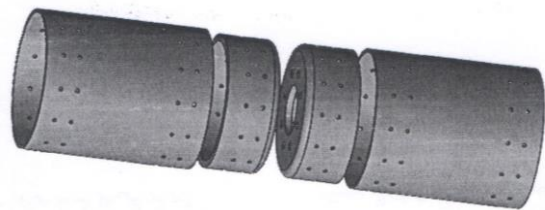


(الف)



(ب)

شکل ۱- الف) اندازه پوسته‌ها، ب) اندازه فلنچها برای ساخت



شکل ۲- نمایی از چگونگی اتصال پوسته‌ها و فلنچها

### ساخت پوسته‌ها و فلنچها

با توجه به ضخامت پوسته و فلنچ، برای ساخت فلنچ با ضخامت ۱۰ میلیمتر، از ۱۴ لایه و برای ساخت پوسته با ضخامت ۴ میلیمتر، از ۶ لایه استفاده شده است. همانطوریکه مشخص است، چیدمان لایه‌ها نقش مهمی در استحکام سازه به تنهایی و استحکام سازه با در نظر گرفتن اتصال مکانیکی دارد. بنابراین چیدمان مناسب برای افزایش استحکام، زوایای بین ۳۰ تا ۹۰ درجه برای الیاف می باشد [۲]. بنابراین برای فلنچ و پوسته چیدمان زیر انتخاب گردید.

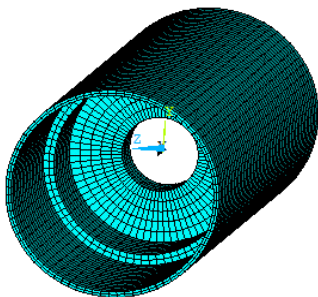
چیدمان لایه‌های پوسته:  $[90_2, \pm 45, \pm 30]$

چیدمان لایه‌های فلنچ:

$[90_2, \pm 30, 90_2, \pm 45, 90_2, \pm 45, \pm 30]$

برای ساخت فلنچها ابتدا قالب از جنس یونولیت فشرده آماده گردید. با توجه به اینکه تعداد فلنچهای مورد نظر ۴ عدد بوده، بنابراین برای هر ۲ عدد فلنچ یک قالب یک تکه آماده و روی مندریل نصب گردید. پس از ساخت، از وسط قالبها را برش داده و فلنچها از همدیگر جدا شدند. برای نجسبیدن کامپوزیت به قالب، سطح قالب را با مواد جدا کننده آغشته نموده، سپس یک لایه رزین روی آن پاشیده شده است. شکل ۳، قالب یک تکه و سطح قالب را که با رزین آغشته شده را نشان می دهد.

برای شبیه سازی پوسته با اتصال فلنجی، از نرم افزار انسیس استفاده شده است. پس از مدل سازی، به منظور بدست آوردن بار کششی و فرکانس های طبیعی، از المان Solid Layerd46 استفاده شده است. قبل از تحلیل، نقاط و المانها در محلی که روی هم افتادند، ممزوج یا ادغام شده اند. برای تحلیل بار کششی، تکیه گاه فوقانی استوانه بالا را گیردار نموده و تحریک نیرویی، به صورت کنترل جابجایی تکیه گاه پایین (تکیه گاه تحتانی استوانه پایین) تا حداکثر جابجایی ۲۰ میلیمتر، با سرعت ۰/۰۲ میلیمتر بر ثانیه انجام شده است. همزمان، نیروی عکس العمل در محل تکیه گاه گیردار (تکیه گاه فوقانی استوانه بالا) بدست آمده، بر حسب جابجایی تکیه گاه پایین، رسم شده است. برای تحلیل مودال، شرایط مرزی، به صورت دو سر آزاد در نظر گرفته شده و از حل گر لانکوزوس برای محاسبه فرکانس و شکل مود استفاده شده است. مدل شامل ۱۳۱۲۰ المان (۸۰ المان محیطی و ۱۶۴ المان طولی) و ۴۱۸۰۹ گره می باشد. شکل ۶ مدل مش بندی شده پوسته با فلنج را نشان می دهد.



شکل ۶- مدل مورد استفاده در نرم افزار انسیس

### تست تجربی مودال

برای صحت سنجی نتایج عددی، آزمایش مودال پوسته ای استوانه ای، به شرح زیر در آزمایشگاه انجام گردید. چیدمان آزمایش مطابق شکل ۷ می باشد. به منظور تعیین نقاط جهت اندازه گیری شتاب با شتاب سنج لیزری بر روی نمونه ی ساخته شده، مطابق شکل ۸- الف، سطح بیرونی مدل در هشت نقطه، با فاصله مساوی از یکدیگر، واقع در تمام طول آن، از ابتدا تا انتها علامت گذاری شد. سپس سطح مزبور در هر یک از این نقاط هشت گانه به صورت محیطی و در هشت نقطه با فواصل یکسان تقسیم بندی گردید. همچنین در شکل ۸- ب، تقسیم بندی نمونه در محیط نرم افزار آزمایش مودال، نشان داده



(ب)



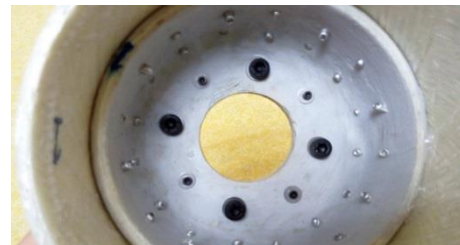
(ج)

شکل ۴- الف) برشکاری، ب) خارج کردن فوم، ج) فلنچها و پوسته های ساخته شده پس از ماشینکاری و پرداخت

جهت مونتاژ فلنج به پوسته از دو ردیف پرچ ۳ و ۵ به صورت یک در میان و جهت اتصال دو فلنج به یکدیگر از ۴ عدد پیچ M10 استفاده شده است. شکل ۵ اتصال آنها را نشان می دهد.



(الف)



(ب)

شکل ۵- الف) نمایش نحوه ی اتصال پوسته ها به فلنج با پرچ، ب) نمایش اتصال دو فلنج به یکدیگر با پیچ

شبیه سازی مجموعه پوسته ها با فلنج

آزمون کشش یکی از آزمون‌های مخرب در علم شناخت مواد است، که در آن یک نمونه‌ی استاندارد، یا قطعه مورد نظر، تحت اثر کشش تک محوری یا دو محوری، تا حد شکست مورد تست قرار می‌گیرد. از آنجایی که یکی از مورد کاربرد فلنچ کامپوزیتی در سازه‌های هوایی می‌باشد، بنابراین یکی از نیروهایی که در این سازه‌ها به قطعات اصلی تشکیل دهنده بدنه وارد می‌گردد، نیروی کشش در راستای طولی سازه می‌باشد. هدف از انجام آزمون کشش، بررسی اتصالات فلنچی بر روی پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی به روش رشته پیچی و بررسی چگونگی تخریب و شکست حاصل از کشش، بر روی فلنچ و پوسته می‌باشد. دستگاه مورد نظر جهت انجام تست، از نوع Zwick-1484- material prufung بوده، که حداکثر نیروی کششی (تناژ) آن ۲۰ تن می‌باشد. فک پایین دستگاه متحرک و فک بالایی دستگاه در هنگام تست ثابت می‌باشد. یک اکستنسومتر بر روی دستگاه نصب گردیده تا مقادیر دقیق تغییرات طول را ثبت نماید. مقدار سرعت حرکت فک‌های دستگاه برای تست ۰/۰۲ میلی‌متر بر ثانیه تنظیم گردید. جهت انجام تست کشش، یک فیکسچر، با ابعادی متناسب با دستگاه تست کشش و پوسته‌های کامپوزیتی ساخته شد. دسته فیکسچر از یک طرف داخل فک دستگاه کشش بوده و از طرف دیگر به صورت کاملاً انطباقی، در داخل پوسته قرار گرفته و به وسیله دو ردیف پرچ، مشابه با پرچ‌های اولیه، با آنها تثبیت شدند. شکل ۹ فیکسچرها و اتصال آن در دستگاه را نشان می‌دهد.



(الف)

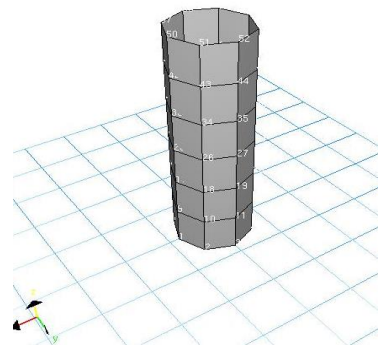
شده است. به این ترتیب، آزمایش مودال هشت بار، و هر بار با تاباندن نور لیزری و اندازه‌گیری شتاب با شتاب سنج لیزری بر روی سطح بیرونی مدل، به صورت محیطی انجام گرفت. تحریک مدل با استفاده از لرزش‌گر<sup>۵</sup> نصب شده در یک نقطه مشخص در نزدیک وسط لوله صورت پذیرفت. شرایط مرزی مجموعه کامپوزیتی ساخته شده در آزمایش، به صورت دو سر آزاد و با آویزان کردن مجموعه به وسیله یک کش، که وزن آن در مقایسه با وزن لوله قابل چشم‌پوشی است، در نظر گرفته شده است (شکل ۷).



شکل ۷- چیدمان آزمایش مودال



(الف)



(ب)

شکل ۸- انجام تقسیم بندی بر روی پوسته‌ها جهت آزمایش مودال:  
 الف) تست تجربی، ب) در محیط نرم‌افزار مودال

تست تجربی کشش

در طراحی سازه‌های هوایی، فرکانس ویژه اهمیت داشته و فرکانس ویژه ( $F^*$ ) برابر با نسبت فرکانس به جرم سازه می باشد. جرم مجموعه ساخته شده (۲ پوسته بعلاوه ۲ فلنچ با چشم پوشی از جرم اتصالات) برای هر سه نوع ماده عبارت است از:

$$M_{Com} = 5.5 \text{ kg} \quad , \quad M_{Al} = 9.7 \text{ kg} \quad , \quad M_{St37} = 27.4 \text{ kg}$$

جدول ۳- مقایسه فرکانس‌های بدست آمده از روش شبیه سازی برای سه ماده مختلف [Hz]

شماره مود	فولاد	آلومینیوم	کامپوزیت
۱	۷۱۲	۵۶۶/۷	۳۹۴/۳
۲	۱۱۶۴/۴	۹۶۹/۲	۵۶۵/۷
۳	۱۱۶۸/۱	۱۰۱۴/۲	۶۱۵/۵
۴	۱۲۴۴/۸	۱۱۰۶/۲	۶۲۱/۶
۵	۱۹۵۱/۱	۱۵۵۶/۸	۹۱۰/۷
۶	۱۹۹۱/۵	۲۴۰۷/۹	۹۳۴/۵
۷	۲۶۹۹/۲	۲۵۰۴/۲	۱۳۶۶/۳
۸	۳۰۶۹	۲۶۱۱/۳	۱۴۱۸/۳
۹	۳۰۹۸/۴	۲۶۵۴/۳	۱۴۳۴/۸
۱۰	۳۱۶۵/۵	۲۸۵۸/۴	۱۶۱۵/۹

جدول ۴ مقادیر فرکانس‌های ویژه برای پوسته فولادی، آلومینیومی و کامپوزیتی را در تمام مودها نشان می‌دهد. همانطوریکه مشاهده می‌گردد، در همه مودها، فرکانس ویژه برای ماده کامپوزیتی، بیشتر از فولاد می‌باشد. ولی فرکانس ویژه ماده کامپوزیتی تا فرکانس پنجم، بیشتر از آلومینیوم می‌باشد و بعد از فرکانس پنجم، فرکانس ویژه آلومینیوم، از کامپوزیت بیشتر شده است. چون در طراحی در کاربردهای عملی، معمولاً فرکانس‌های پایین، از اهمیت بالاتری برخوردار هستند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که فلنچ کامپوزیتی، بهتر فلنچ‌های فلزی می‌باشد.

جدول ۴- مقایسه فرکانس‌های ویژه بدست آمده از شبیه سازی عددی برای سه ماده مختلف [Hz/kg]

شماره مود	فولاد	آلومینیوم	کامپوزیت
۱	۲۵/۹۸	۵۸/۴۲	۶۳/۵۰
۲	۴۱/۸۴	۹۹/۹۲	۱۰۲/۸۹
۳	۴۲/۶۳	۱۰۴/۵۶	۱۱۱/۹۱
۴	۴۵/۴۳	۱۱۴/۰۴	۱۱۳/۰۱
۵	۷۱/۲	۱۶۰/۴۹	۱۶۵/۵۸



(ب)

شکل ۹- الف) فیکسچر جهت تست کشش، ب) قرار دادن سازه کامپوزیتی در بین فک‌های دستگاه تست کشش و نصب اکستنسومتر بر روی آن

## تحلیل نتایج

### تحلیل نتایج شبیه سازی تست مودال

جهت مقایسه، آنالیز مودال مجموعه (اتصال پوسته‌ها با فلنچ) برای سه ماده فولادی، آلومینیومی و کامپوزیتی به کمک نرم-افزار انسیس، انجام شده است. با استفاده از قانون مخلوطها، خواص مکانیکی کامپوزیت شیشه/ اپوکسی با استفاده از جدول ۱ و کسر حجمی الیاف بدست آمده و همراه خواص مکانیکی فولاد و آلومینیوم در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲- خواص مکانیکی کامپوزیت و فولاد مورد استفاده

خواص مواد	کامپوزیت الیاف شیشه/اپوکسی	آلومینیوم	فولاد St37
$E_1$ (GPa)	۴۶/۶۴	۷۰	۲۱۰
$E_2$ (GPa)	۸/۶۲	۷۰	۲۱۰
$G_{12}$ (GPa)	۳/۲۱	۲۶	۲۸/۱
$V_{12}$	۰/۳۱	۰/۳۵	۰/۳
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	۱۵۷۰	۲۷۴۰	۷۸۰۰

پس از تحلیل، فرکانس‌های طبیعی، برای ۳۵ مود بدست آمده و نتایج، برای ۱۰ مود اول، بر حسب هرتز (Hz)، در جدول ۳، مرتب شده‌اند. با توجه به بیشتر بودن مدول الاستیسیته فولاد و آلومینیوم نسبت به کامپوزیت، در همه موارد، فرکانس‌های فولاد و آلومینیوم، از کامپوزیت بیشتر می‌باشد. اما

۱۶۹/۹۰	۲۴۸/۲۴	۷۲/۶۸	۶
۲۴۸/۴۲	۲۵۸/۱۶	۸۰/۵۱	۷
۲۵۷/۸۷	۲۶۹/۲۰	۱۱۲/۰۱	۸
۲۶۰/۸۷	۲۷۳/۶۴	۱۱۳/۰۸	۹
۲۹۳/۸۰	۲۹۴/۶۸	۱۱۵/۲۰	۱۰

### تحلیل نتایج تجربی تست مودال

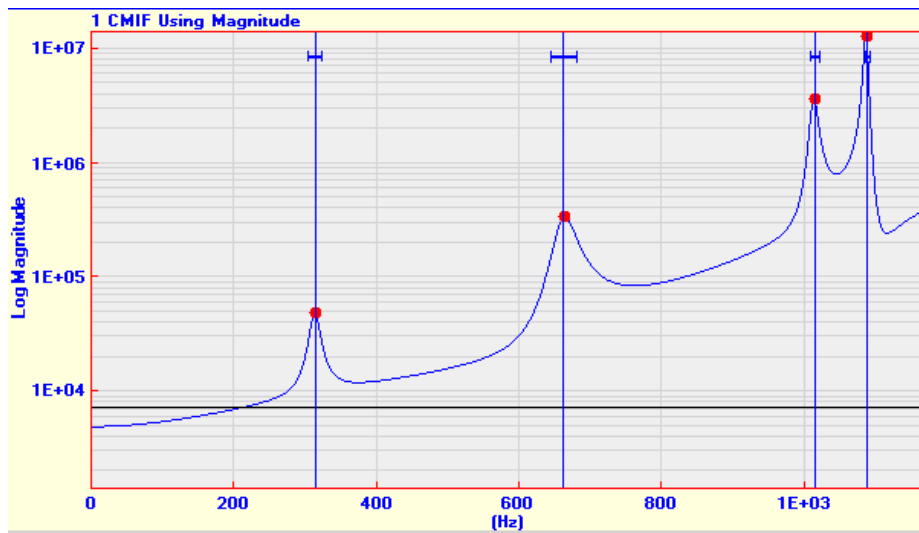
برای تست مودال تجربی، آزمایش در بازه‌ی فرکانسی صفر تا ۲۰۰۰ هرتز انجام گردید، و نمودارهای پاسخ فرکانسی بدست آمده، توسط یک کامپیوتر صنعتی رسم گردیده‌اند. سپس فرکانس‌های پوسته و شکل مودهای مربوطه از نمودارهای پاسخ

فرکانسی استخراج شده‌اند. لازم به ذکر است که تست مودال، برای دو حالت زیر انجام گردید:

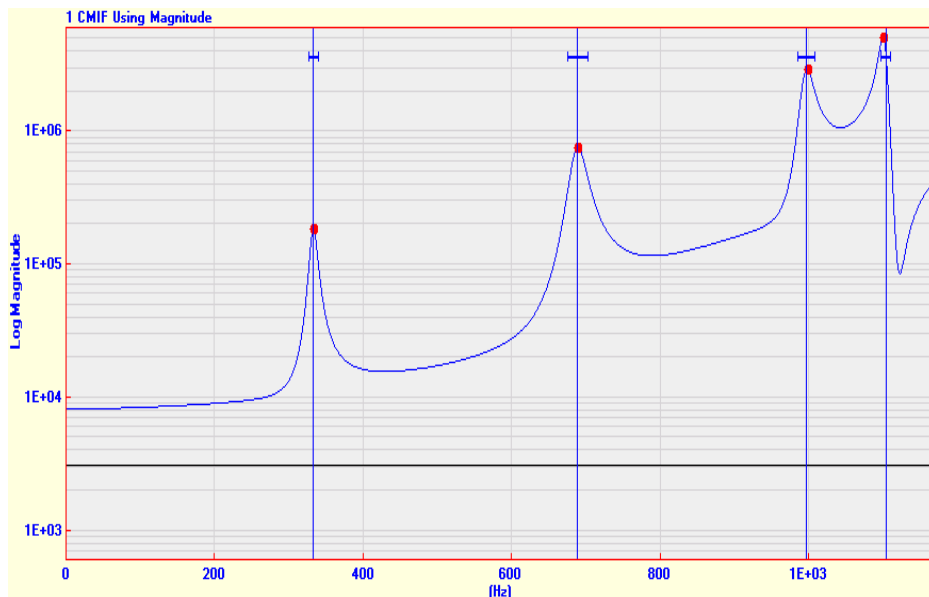
۱- حالت اول که پیچهای اتصال، نسبتاً شل باشند (گشتاور بستن آنها ۱۰ نیوتن-متر باشد).

۲- حالت دوم که پیچهای اتصال، کاملاً سفت باشند (گشتاور بستن آنها ۲۰ نیوتن-متر باشد).

شکل ۱۰ نمودار پاسخ فرکانسی، برای دو حالت بستن پیچها را نشان می‌دهد. همچنین مقدار فرکانسهای بدست آمده با تست تجربی، برای دو حالت بستن پیچها در جدول ۵ مشاهده می-شوند.



(الف)

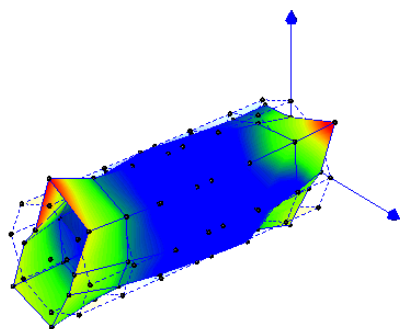


(ب)

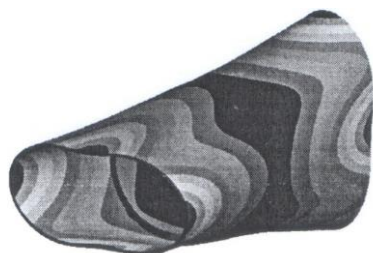
شکل ۱۰- نمودار پاسخ فرکانسی: (الف) در حالتی که پیچها سفت نشده‌اند، (ب) در حالتی که پیچها سفت شده‌اند



همچنین در شکل ۱۱، شکل مود بدست آمده تجربی و شبیه سازی عددی برای مود اول مشاهده می‌شوند.



(الف)



(ب)

شکل ۱۱- شکل مود بدست آمده برای مود اول، (الف) تجربی، (ب) شبیه سازی

### تحلیل نتایج تست کشش

جهت مقایسه حداکثر باری که مجموعه کامپوزیتی می‌تواند تحمل نماید، تست کشش مجموعه با دو روش تجربی و شبیه سازی انجام و نتایج آن با هم مقایسه شده‌اند. پس از انجام تست تجربی کشش، با گذشت زمان و افزایش مقدار نیرو، مطابق شکل ۱۲، مشاهده می‌گردد که یکی از فلنچ دچار شکست شده و دو پوسته، از همدیگر فاصله می‌گیرند.



شکل ۱۲- جدا شدن لبه‌های دو پوسته بر اثر کشش

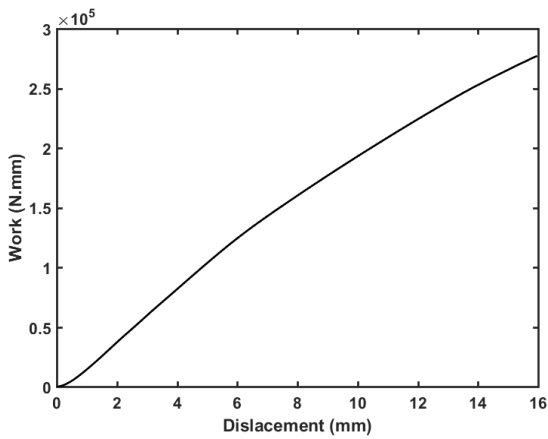
### جدول ۵- فرکانسهای بدست آمده از روش تجربی برای دو حالت

شماره فرکانس	فرکانسهای بدست آمده از تست مودال نتایج تجربی [Hz]	
	برای حالتی که پیچها کاملاً سفت باشند (گشتاور ۲۰ نیوتن- متر).	برای حالتی که پیچها نسبتاً شل باشند (گشتاور ۱۰ نیوتن- متر)
۱	۳۴۰	۳۲۰
۲	۶۲۰	۵۸۰
۳	۹۰۰	۸۷۰
۴	۱۴۲۰	۱۴۱۸

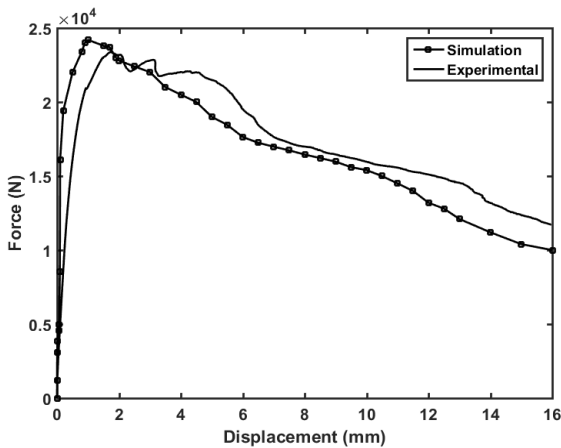
همانطوریکه از جدول ۵ مشاهده می‌شود، برای حالتی که پیچها سفت بوده‌اند فرکانسها بزرگتر از حالتی است که پیچها شل بوده‌اند. دلیل آن این است که وقتی پیچها سفت می‌شوند، سازه صلب‌تر شده و با توجه به آنکه جرم ثابت است، با افزایش صلبیت فرکانس طبیعی هم بالا رفته است. با توجه به آنکه در آنالیز مودال، از روش شبیه‌سازی عددی قبل از تحلیل، نقاط و المانها در محلی که روی هم افتادند، ممزوج یا ادغام شده‌اند، پس باید مقایسه فرکانسها برای شبیه سازی با حالتی که پیچها سفت بوده‌اند، انجام گردد. بنابراین در جدول ۶، نتایج عددی و تجربی مجموعه کامپوزیتی دو سر آزاد، برای حالتی که پیچها سفت بوده‌اند، با هم مقایسه و درصد خطا نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، نتایج با هم تطابق خوبی داشته و در صد خطا، کم می‌باشد. بعضی از فرکانسها که در شبیه سازی بدست آمده‌اند، در تست تجربی دیده نشده‌اند. در جدول ۶ مبنای مقایسه، نتایج تجربی بوده و فرکانسها، بر مبنای آن بر حسب شماره مود آمده‌اند.

### جدول ۶- مقایسه فرکانسهای بدست آمده از روش شبیه‌سازی و روش تجربی برای حالتی که پیچهای اتصال فلنچها سفت باشند

شماره مود	فرکانسها برای حالتی که پیچها سفت بوده‌اند [Hz]	
	تجربی	شبیه سازی
۱	۳۴۰	۳۴۹٫۳۴
۲	۶۲۰	۶۲۱٫۵۹
۳	۹۰۰	۹۱۰٫۶۹
۴	۱۴۲۰	۱۴۳۴٫۱۸
۵	۱۶۷۲	۱۶۶۱٫۳
۶	۱۹۸۰	۱۹۷۴٫۲



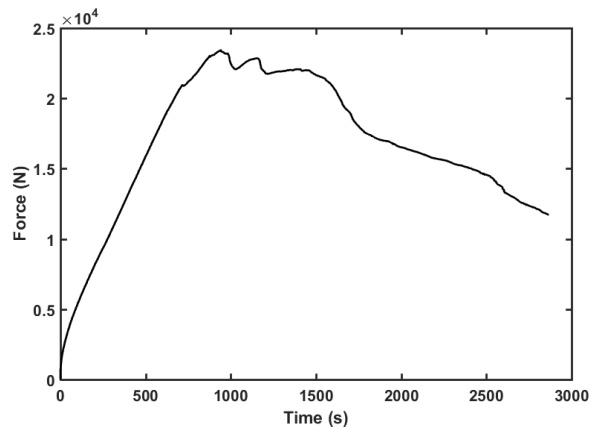
شکل ۱۴- نمودار کار انجام شده- جابجایی در تست تجربی



شکل ۱۵- نمودار نیرو- جابجایی محوری برای دو حالت شبیه سازی نرم افزاری و تست تجربی

از شکل ۱۴، مشاهده می شود مقدار کاری که در ۱۶ ثانیه انجام شده، در حدود ۲۷۵۰۰۰ نیوتن میلیمتر می باشد. همچنین از شکل ۱۵ مشاهده می شود، دو نمودار با هم تطابق نسبتاً خوبی دارند. مقدار خطای حداکثر نیروی تحمل شده در شبیه سازی عددی نسبت به تست تجربی، ۲/۴۳ درصد است. دلیل این خطا می تواند بخاطر وجود ترک های ریز اولیه یا موک در نمونه واقعی باشد، در حالیکه در شبیه سازی، نمونه، کاملاً سالم در نظر گرفته شده است. دلیل دیگر، می تواند عدم قطعیت در خواص مکانیکی مورد استفاده در شبیه سازی باشد. پس از انجام تست مجموعه از دستگاه جدا شده که شکل ۱۶ سازه بعد از انجام تست کشش را نشان می دهد.

همزمان با انجام تست، داده های تست، توسط کامپیوتر متصل به دستگاه، ثبت شده اند. می توان نمودارهای نیرو- زمان، کار- جابجایی و نیرو- جابجایی را با استفاده از این داده ها رسم نمود و از روی آن، حداکثر نیرو و مقدار کار انجام شده را بدست آورد. همچنین شبیه سازی عددی بار کششی مجموعه کامپوزیتی (اتصال پوسته ها با فلنچ) به کمک نرم افزار انسیس، تا حداکثر جابجایی ۲۰ میلیمتر در انتهای آزاد آن (در فک پایین دستگاه تست در راستای قائم به سمت پایین) انجام شد. پس از تحلیل، نمودار بارکششی بر حسب جابجایی، برای شبیه سازی نیز بدست آمد. شکل های ۱۳ و ۱۴، به ترتیب، نمودار نیرو- زمان و نمودار کار- جابجایی در تست تجربی را نشان می دهند. همچنین نتایج تست کشش برای دو روش تجربی و شبیه سازی با هم در شکل ۱۵، مقایسه شده اند. همانطوریکه از شکل ۱۳ و ۱۵ مشاهده می شود، مدت زمان انجام تست ۲۸۶۵ ثانیه و ماکزیمم نیروی کششی تسلیم ۲۰۹۵۰ نیوتن بوده که در ثانیه ۷۱۶،۵ و جابجایی ۰،۹۳۸ میلیمتر، همچنین ماکزیمم نیروی کششی نهایی ۲۳۴۳۰ نیوتن بوده که در ثانیه ۹۴۱،۱ و جابجایی ۱،۷۴۹ میلیمتر اتفاق افتاده است. همچنین مشاهده می شود ماکزیمم باری که پوسته در روش شبیه سازی تحمل نموده است، در حدود ۲۴۲۰۰ نیوتن می باشد.



شکل ۱۳- نمودار نیرو- زمان در تست تجربی

(ب)

شکل ۱۷- سطوح پوسته و فلنچ شماره ۱ کاملاً سالم می باشد: الف)  
سطح خارجی، ب) سطح داخلی

از آنجایی که تخریب در پوسته و فلنچ شماره ۲، تنها بر روی فلنچ رخ داده است، بنابراین جهت مشاهده دقیقتر، یک برش مقطعی در آن ایجاد می شود (شکل ۱۸).



شکل ۱۸- ایجاد برش در مقطع پوسته و فلنچ شماره ۲

با دقت در فلنچ شماره ۲ مشاهده شد که:

- ۱- ناحیه‌ی شروع تخریب و شکست الیاف، محدوده بین پیچ‌های اتصال و کنج انتهایی فلنچ می باشد (شکل ۱۹).
  - ۲- در لایه‌های زیرین تیغه فلنچ، هم شکست الیاف و ماتریس رخ داده، و هم تورق لایه‌ها اتفاق افتاده است (شکل ۲۰).
  - ۳- در لایه‌های وسطی تیغه فلنچ، تورق بوجود آمده و در لایه‌های رویی، مجدداً شکست الیاف و رزین مشاهده می گردد (شکل ۲۱).
  - ۴- اتصالات پرچی و پیچی کاملاً سالم مانده و دچار تغییر شکل نشده‌اند (شکل‌های ۱۸ و ۱۹).
- محل اتصالات بجز سطح زیر پیچ‌های اتصالی که دچار کمی لهیدگی شده‌اند، کاملاً سالم مانده‌اند (شکل ۲۲).



شکل ۱۹- ناحیه‌ی ایجاد شکست در فلنچ شماره ۲



شکل ۱۶- سازه بعد از انجام تست کشش

بعد از انجام آزمون کشش، جهت بررسی دقیق‌تر نتایج و تحلیل تست، قطعات مجموعه کامپوزیتی برش مقطعی داده شده و مورد بررسی قرار گرفت. در بازرسی چشمی از پوسته-های تفکیک شده از هم، مشخص گردید، که مجموعه پوسته و فلنچی که به فک بالای دستگاه تست کشش متصل بوده (شماره ۱)، کاملاً سالم بوده و در هیچ ناحیه‌ای از آن تخریب و شکست رخ نداده است. با توجه به آنکه فک بالای دستگاه ثابت می باشد شاید دلیل سالم ماندن آن همین مسئله باشد. یا اینکه در طی مراحل ساخت فلنچ‌ها، به دلیل احتمال خطای انسانی فلنچ دومی خوب ساخته نشده و در آن مک یا تخلخل بوجود آمده است. از طرفی اتصالات، شامل پرچ‌ها و پیچ‌ها کاملاً سالم بوده، و در محل اتصالات، آثار لهیدگی و تغییر شکل دیده نشد (شکل ۱۷).



الف)



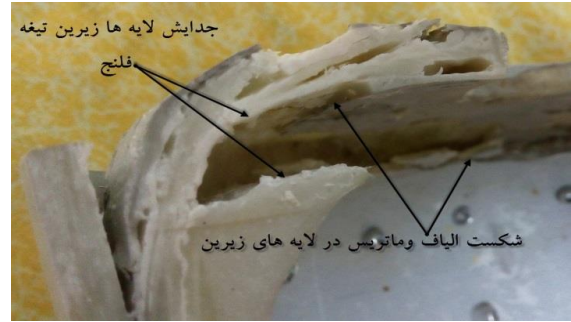


شکل ۲۳- پوسته کامپوزیتی شماره ۲ و اتصالات آن، کاملاً سالم مانده‌اند

بر اثر اعمال نیروی کششی، تمام قسمت‌های کامپوزیت، که الیاف در آن، هم راستای نیروی محوری کششی بوده، کاملاً سالم مانده و تنها در قسمت تیغه فلنچ، که راستای الیاف در آن بر راستای نیرو عمود بوده، شکست و تورق بوجود آمده است. همچنین بر اثر احتمال وجود خطای انسانی در مراحل ساخت (شامل وجود مک یا تخلخل)، یکی از فلنچ‌ها زودتر دچار شکست شده (فلنچ شماره ۲)، و نیروی کششی در ۲۰۹۵۰ نیوتن، توانسته است، باعث ایجاد اولین شکست در تیغه فلنچ، نزدیک محل پیچ‌ها (تمرکز تنش در آن ناحیه) گردد. این نیرو همان نیروی استحکام تسلیم فلنچ ۲ و کل سازه می‌باشد. بر اثر نیروی کششی فزاینده، از آنجایی که محل شکست بوجود آمده، ضعیف‌تر از سایر نقاط سازه می‌باشد، ادامه تخریب و شکست در همان محل، همراه با تورق لایه‌های تیغه فلنچ، اتفاق افتاده و افزایش طول در لبه پوسته‌ها بوجود آید. مقدار نیروی ۲۳۴۳۰ نیوتن، نهایت نیرویی است که فلنچ شماره ۲ تحمل نموده و در حقیقت نیروی استحکام کششی فلنچ ۲ می‌باشد. با عبور مقدار نیرو از نیروی استحکام کششی، در حالی که نیروی کششی رو به کاهش بوده همچنان افزایش طول بر اثر شکست و تورق لایه‌ها، با جابه‌جایی در لبه‌های پوسته ادامه پیدا می‌کند.

### نتیجه‌گیری

از آنجایی که جایگزینی مواد کامپوزیتی به جای فلزات در صنعت، بخصوص صنایع هوافضا امری غیر قابل اجتناب بوده، در این تحقیق برای اولین بار در ایران، به صورت علمی و آزمایشگاهی و با هدف حداکثر سبک سازی در سازه‌های هوایی، یک مدل فلنچ کامپوزیتی با روش رشته‌پیچی ساخته شد، که وظیفه‌ی آن اتصال پوسته‌های کامپوزیتی بزرگ، به



شکل ۲۰- شکست کامپوزیت و ایجاد تورق در لایه‌های زیرین تیغه فلنچ شماره ۲



شکل ۲۱- تورق در لایه‌های میانی تیغه‌ی فلنچ شماره ۲



شکل ۲۲- ایجاد لهیدگی در محل پیچ‌ها

مطابق شکل ۲۳ مشاهده می‌گردد، که پوسته کامپوزیتی کاملاً سالم بوده و هیچگونه آثار تخریب و شکستی در آن مشاهده نمی‌گردد.

## پی نوشت ها

- ۱ Resin Transfer Molding
- ۲ ABAQUS
- ۳ Glass Fiber Reinforced Polymer
- ۴ ANSYS
- ۵ Shaker

همدیگر، جهت ساخت یک سازه‌ی کامل می‌باشد. نتایج حاصل از ساخت، آزمایش، تحلیل عددی تست‌ها و بررسی دقیق نتایج بعد از آزمون‌ها، نشان داد که:

۱- از نظر اقتصادی، در روش رشته‌پیچی جهت ساخت قطعات مدور، هزینه ساخت قالب، و تهیه مواد اولیه، نسبتاً پایین بوده، سرعت اجرا بالا، و کنترل زوایا و لایه‌ها، به خوبی انجام می‌گیرد. امروزه جهت تولید قطعات در تعداد زیاد، می‌توان به سادگی تجهیزات اولیه تولید را مکانیزه نمود. حرکت دورانی و رفت و برگشتی مندرل، گردش محورهای دوک رشته‌پیچی، و سایر قسمت‌های دیگر، کاملاً اتوماتیک و به وسیله‌ی ماشین‌های کنترل عددی انجام می‌گیرد.

۲- همانطور که از آزمون کشش مشاهده شد، با وجود آنکه ضخامت پوسته‌ی کامپوزیتی تنها ۴ میلی‌متر بود، از آنجایی که راستای محوری الیاف تقریباً در جهت راستای نیروی کششی بوده، کامپوزیت به خوبی در برابر نیروی کششی مقاومت کرده و هیچ گونه آسیبی پیدا نکردند.

۳- اتصالات پرچی دو ردیفه با قطر ۵ میلی‌متر و اتصال پیچ‌های اتصال M10، با توجه به استحکام بالای سازه بسیار خوب عمل کرده، هیچ گونه جابه‌جایی نداشته، در نتیجه هیچ‌گونه خطایی بر اثر جابه‌جایی در آزمون کشش ایجاد نگردید و کاملاً سالم باقی ماندند.

۴- عامل شکست زود هنگام یکی از فلنچ‌ها، نسبت به فلنچ دیگر، احتمالاً وجود تخلخل یا مک بر اثر احتمال وجود خطای انسانی در مراحل ساخت بوده است.

۵- در فلنچ کامپوزیتی تمرکز تنش با توجه به شکل‌های مشاهده شده، در قسمت تیغه‌ایی فلنچ، بین محل پیچ‌ها و کنج ۹۰ درجه می‌باشد.

۶- با توجه به اشکال بدست آمده، در آزمایش کشش، عامل تورق در تیغه‌ی فلنچ، بیشتر از شکست ماتریس والیاف، در افزایش طول سازه بر اثر نیروی کشش تاثیر داشته است.

۷- مقدار حداکثر بار محوری کششی بدست آمده از روش شبیه سازی، ۲/۴۳ درصد بیشتر از مقدار بدست آمده از روش تجربی می‌باشد. دلیل این خطا می‌تواند بخاطر وجود ترک‌های ریز اولیه یا موک در نمونه واقعی باشد، در حالیکه در شبیه‌سازی، نمونه، کاملاً سالم در نظر گرفته شده است. دلیل دیگر، می‌تواند عدم قطعیت در خواص مکانیکی مورد استفاده در شبیه‌سازی باشد.

## منابع و مراجع

- [9] M. Aljuboury, M. J. Rizvib, S. Groveb and R. Cullenb, "Manufacturing and development of a bolted GFRP flange joint for oil and gas applications," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 235, No. 9, pp. 1507-1517, 2021.
- [10] A. H. Bouzid, A. K. Vafadar and A. D. Ngô, "On the modeling of anisotropic fiber-reinforced polymer flange joints," *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 143, No. 6, 061506, 2021.
- [11] A. K. Vafadar, A. H. Bouzid and A. D. Ngô, "Effect of material anisotropy on the structural integrity of composite bolted flanged joints," *Pressure Vessels and Piping Conference*. Vol. 57939. *American Society of Mechanical Engineers*, Paper No: PVP2017-65062, V002T02A004, 6 pages, 2017.
- [12] A. K. Vafadar, A. H. Bouzid and A. D. Ngô, "Analytical modeling of FRP hubbed flanges," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 188, 104247, 2020.
- [13] C. K. Krishnadasan, N. SivaShanmugam, B. Sivasubramonian, B. Nageswara Rao and R. Suresh, "Analytical studies and numerical predictions of stresses in shear joints of layered composite panels for aerospace applications," *Composite Structures*, Vol. 255, 112927, 2021.
- [14] M. Aljuboury, M. J. Rizvib, S. Groveb and R. Cullenb, "Bolted flange joint made of glass fibre reinforced polymer (GFRP) for oil and gas pipelines," *Pressure Vessels and Piping Conference*. Vol. 51678, *American Society of Mechanical Engineers*, Paper No: PVP2018-84593, V06AT06A039; 6 pages, 2018.
- [1] G. Tao, Z. Liu, M. Y. MingYun Lv and S. Che, "Research on Manufacture and Test of Advanced Composite Material Flange," *The Open Mechanical Engineering Journal*, Vol. 5, pp. 87-96, 2011.
- [2] L. A. L. Martin, F. L. Bastian and T. A. Netto, "Reviewing some design issues for filament wound composite tubes," *Materials and Design*, Vol. 55, pp. 242-249, 2014.
- [3] G. S. Whitfield, R. G. Reid and R. Paskaramoorthy, "Creep and unsymmetrical shrinkage during post-cure of GFRP pipe flanges", 2014. 7.
- [4] H. Kurz and E. Roos, "Design of floating type bolted flange connections with GRP flanges," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 89, pp. 1-8, 2012.
- [5] R. Fanguero, P. Nunes, F. Soutinho and M. Araújo, "Development of fibrous preforms for FRP pipe connections," *Composites Science and Technology*, Vol. 69, No. 9, pp. 1412-1416, 2009.
- [6] M. Aljuboury, M. J. Rizvi, S. Grove and R. Cullen, "Manufacturing glass fibre reinforced polymer (GFRP) bolted flange connections by using a vacuum infusion process," *Eleventh International Conference on Composite Science and Technology /ICCST/1, At: American University of Sharjah, Sharjah, UAE*. pp. 4-6, 2017.
- [7] M. Aljuboury, M. J. Rizvib, S. Groveb and R. Cullenb, "A numerical investigation of the sealing performance and the strength of a raised face metallic bolted flange joint," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. Vol. 189, 104255, 2021.
- [8] P. Jaszak, J. Skrzypacz, A. Borawski and R. Grzejda, "Methodology of Leakage Prediction in Gasketed Flange Joints at Pipeline Deformations," *Materials*, Vol. 15, 4354, 2022.