



Available in:
Journal.isrc.ac.ir

Journal of
Space Science, Technology
& Applications (Persian)

Vol. 2, No. 2, pp.: 60-77
2022

DOI:
10.22034/jssta.2022.364725.1095

Article Info

Received: 2022-10-21
Accepted: 2022-12-5

Keywords

Twist pattern, Hydrostatic
pressure, Radial
displacement

How to Cite this article

Alireza Zarezadeh, Mohammad Hossein Alaei, Mohsen Heydari Beni, Ali Davar, Jafar Skandari jam. "Effect of Process Parameters on Microstructure and Efficiency of Tubular Alumina Catalyst Prepared by Doped Anodizing Method with Platinum Particles", *Journal of Space Science, Technology and Applications*, vol 2 (2), p 60-77, 2023.

Experimental and Numerical Analysis of the Effect of Filament Curvature Pattern on the Internal Hydrostatic Threshold of GFRP Composite Cylinder Made by Filament Winding Process

Alireza Zarezadeh¹, Mohammad Hossein Alaei², Mohsen Heydari Beni³
Ali Davar⁴, Jafar Skandari jam^{5*}

1. Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran, alireza.zzm@chmail.ir
2. Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran, mhallaee@mut.ac.ir
3. Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran, mohsenheydari1371@gmail.com
4. Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran, a_davar@mut.ac.ir
- 5,*. Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran, eskandari@mut.ac.ir (Corresponding author)

Abstract

The filament winding process is one of the most important and widely used processes in the manufacture of composite structures in order to achieve high strength and rigidity. In this process, there are important parameters such as fiber tension, how the fibers are twisted, the effect of layering, twisting angle, fiber twisting pattern of fibers, type of material suitable for twisting, etc., which can play a significant role in this the strength of the processstructure. In this regard, the twisting pattern has been less studied by researchers less than other parameters. In this research, the effect of fiber twisting pattern on the hydrostatic pressure threshold of epoxy glass cylinder has been investigated. For this purpose, first, glass/epoxy cylinders with 4 four different twisting patterns were made with ± 54 arrangement and subjected to hydrostatic test with internal pressures of 5-50 bar, where the amount of radial displacement in the middle of the cylinder was measured experimentally. In the following, the amount of radial displacement of cylinders due to the internal pressure was is also modeled using numerical analysis (Abaqus) and compared with experimental results. In order to validate the experimental and numerical results, theoretical model was used and the results were compared. All of the results obtained were in acceptable limits and showed that the twist pattern having with finer texture has a higher compressive strength. Also, the simulation results showed a good agreement with the experimental results.



تحلیل تجربی و عددی اثر الگوهای پیچش الیاف بر آستانه تحمل فشار هیدرواستاتیک داخلی در قطعه کامپوزیتی شیشه- اپوکسی ساخته شده به روش رشته پیچی

علیرضا زارعزاده^۱، محمدحسین علایی^۲، محسن حیدری بنی^۳، علی داور^۴، جعفر اسکندری جم^{۵*}

۱. دانش آموخته کارشناسی ارشد، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران،

ایران، alireza.zzm@chmail.ir

۲. استادیار، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران،

mhallaee@mut.ac.ir

۳. دانشجوی دکتری، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران،

mohsenheydari1371@gmail.com

۴. دانشیار، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران،

a_davar@mut.ac.ir

۵.*. استاد، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران،

eskandari@mut.ac.ir (نویسنده مسئول)

دسترس پذیر در نشانی:
Journal.isrc.ac.ir

دو فصلنامه

علوم، فناوری و
کاربردهای فضایی

سال دوم، شماره ۲، صفحه ۶۰-۷۷
پاییز و زمستان ۱۴۰۱

DOI:
10.22034/jsssta.2022.364725.1095

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۲۹

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۱۴

واژه‌های کلیدی

رشته-پیچی، الگوی بیچش، فشار
هیدرواستاتیک، جابه‌جایی شعاعی

نحوه استناد به این مقاله

علیرضا زارعزاده، محمدحسین علایی، محسن حیدری بنی، علی داور، جعفر اسکندری جم. "تحلیل تجربی و عددی اثر الگوهای پیچش الیاف بر آستانه تحمل فشار هیدرواستاتیک داخلی در قطعه کامپوزیتی شیشه- اپوکسی ساخته شده به روش رشته پیچی". دو فصلنامه علوم، فناوری و کاربردهای فضایی، جلد دوم، شماره دوم، صفحات ۶۰-۷۷، ۱۴۰۱.

چکیده

فرایند رشته‌پیچی، یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین فرآیندهای فرایندهای ساخت سازه‌های کامپوزیتی برای دستیابی به مقاومت و استحکام بالا است. در این فرآیند فرایند رشته‌پیچی، پارامترهای مهمی هم‌چون کشش الیاف، نحوه پیچیدن الیاف، اثر لایه‌چینی، زاویه پیچش، الگوی پیچش الیاف، نوع مواد مناسب پیچش و غیره وجود دارد که می‌توانند نقش بسزایی در استحکام سازه، نقش به‌سزایی داشته باشند. در این راستا، الگوی پیچش، کم‌تر از دیگر پارامترها، مورد بررسی محققین محققان قرار داشته گرفته است. بر این اساس، در این تحقیق، تأثیر الگوی پیچش الیاف بر آستانه تحمل فشار هیدرواستاتیک استوانه شیشه اپوکسی، مورد بررسی قرار گرفته‌شده است. برای این منظور، ابتدا با چهار الگوی مختلف پیچش، لوله‌هایی به روش رشته‌پیچی با استفاده از الیاف شیشه و رزترین اپوکسی با چیدمان $\pm 54^\circ$ ساخته و تحت آزمون هیدرواستاتیک با فشارهای داخلی ۵ تا ۵۰ بار قرار گرفته شد و میزان جابه‌جایی شعاعی در وسط قطعه به روش تجربی اندازه‌گیری شده است. در ادامه، میزان جابه‌جایی شعاعی لوله‌ها، ناشی از فشار داخلی لوله‌ها، با استفاده از تحلیل عددی نیز مدل شده و با نتایج تجربی مقایسه شده است. هم‌چنین، برای صحت‌گذاری بر نتایج تجربی و عددی، از روابط تحلیلی نیز استفاده شده و نتایج آن با تحلیل‌های تجربی و عددی مورد مقایسه قرار گرفته است. تمامی نتایج در یک بازه قابل قبول قرار گرفته و نشان داد که الگوی پیچش با بافت ریزتر، استحکام فشاری بالاتری دارد. هم‌چنین، نتایج شبیه‌سازی، تطابق خوبی با نتایج تجربی نشان داده است.

موروزو^۴ و همکاران [۳]، به بررسی تأثیر الگوهای پیچش بر روی خواص مکانیکی پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی با دیواره نازک پرداختند. آن‌ها با یک مدل‌سازی ویژه نشان دادند که می‌توان توزیع تنش و کرنشی که تابع الگوی پیچش است را با اندازه واحدهای مثلثی شکل و تعداد آن‌ها در هر واحد طول، در هر دو جهت طولی و محیطی به دست آورد. نتایج عددی به دست آمده از تحلیل‌های المان محدود نشان داد که تفاوت قابل توجهی در مقادیر تنش در سطح لایه که برای پوسته‌های استوانه‌ای تک لایه‌ای با الگوهای پیچش مختلف محاسبه شده است، وجود دارد. توزیع‌های تنش در امتداد طول پوسته و محیط آن یکنواخت نیستند و حداکثر فشار وارده در طول الیاف بالاتر از مقادیر محاسبه شده با استفاده از روش‌های مدل‌سازی متعارف است.

باکیان^۵ و همکاران [۴]، در پژوهشی بر اساس الاستیسیته ناهمسان‌گرد سه‌بعدی، یک روش الاستیک دقیق برای تنش‌های حرارتی و تغییر شکل لوله‌ها تحت فشار داخلی و گرادیان دما را مورد بررسی قرار دادند. تأثیر میدان دما در معادلات حاکم بر ترموالاستیسیته از طریق یک قانون تشکیل دهنده در نظر گرفته شده است. کوپلینگ گسترش برشی نیز به دلیل زوایای چیدمان در نظر گرفته شده است. توزیع تنش، کرنش و تغییر شکل برای طرح‌های مختلف لوله زاویه‌دار با استفاده از تئوری آنها بررسی شده است.

انصاری و همکاران [۵]، در سال ۲۰۱۰ بر اساس الاستیسیته ناهمسان‌گرد سه‌بعدی، تحلیل تنش لوله‌های کامپوزیت چند لایه تحت فشار داخلی سیکلی و بارگذاری دما را انجام داده‌اند. توزیع تنش، کرنش و تغییر شکل وابسته به زمان به صورت عددی با استفاده از تکنیک تفاضل محدود محاسبه شد. فشار و دما به صورت متقارن حول محور سیلندر و مستقل از مختصات محوری در نظر گرفته شد. هر لایه از لوله‌ها از یک ماده همگن، ناهمسان‌گرد و الاستیک خطی ساخته شده و فرض بر این بوده است که خواص مواد با افزایش دما تغییر نمی‌کند. نتایج عددی به دست آمده از مدل آن‌ها با سایر نتایج منتشر شده مقایسه شده و تطابق خوبی حاصل شده است.

فرایند رشته‌پیچی، به خاطر وزن سبک، استحکام بالا و قیمت پایین محصول، در صنایع شیمیایی، خودرو، دریایی، نظامی و هوافضا کاربرد دارد. مزایای اولیه رشته‌پیچی این است که، الیاف به طور پیوسته پیچیده شده، و در جهت بارگذاری آرایش می‌یابند. در این روش، نیاز به پخت در کوره^۱، به کم‌ترین مقدار خود می‌رسد، و محصول نهایی با کم‌ترین حجم حباب و بیش‌ترین درصد حجمی الیاف، قابل حصول است. این روش، کاربرد وسیعی در ساخت بدنه پرتابگر، بدنه موشک، موتورهای موشک، دوش‌پرتاب‌ها و غیره دارد. تحقیقات حاضر اثبات می‌کند که رشته‌پیچی یک روش دقیق و اقتصادی است.

حال به بررسی برخی مطالعات پیشین انجام شده در زمینه فرایند رشته‌پیچی در استوانه‌های کامپوزیتی پرداخته می‌شود. در سال ۲۰۰۲، تاکایاناگی^۲ و همکاران [۱]، به صورت تحلیلی و تجربی به بررسی استحکام و سفتی استوانه‌های کامپوزیتی ساخته‌شده به روش رشته‌پیچی تحت بارگذاری فشار داخلی پرداختند. در پژوهش آن‌ها، پارامترهای سفتی، تغییر شکل و استحکام استوانه‌های رشته‌پیچی تحت زوایای ۳۰، ۴۵، ۵۵ و ۷۰ درجه و هم‌چنین استوانه کامپوزیتی تحت زاویه ۵۵ درجه بررسی شد. مقادیر پارامترهای کرنش و جابه‌جایی شعاعی آزمون تجربی و تحلیلی در زاویه‌های ۴۵ و ۵۵ درجه بر یکدیگر منطبق شدند و برای کرنش استوانه کامپوزیتی مقادیر آزمون تجربی کم‌تر از نتایج به دست آمده از حل تحلیلی آن بوده است.

در سال ۲۰۰۲، پرناس و کاتیرسی^۳ [۲]، به مطالعه تحلیلی برای طراحی و پیش‌گویی رفتار مخازن و استوانه‌های کامپوزیتی تحت فشار داخلی و بارگذاری ترکیبی مکانیکی دمایی پرداختند. آن‌ها یک حل تحلیلی برای رفتار سازه‌های کامپوزیتی استوانه‌ای در بارگذاری‌های ترکیبی شبیه‌سازی شده برای موتورهای پیش‌ران موشک‌ها ارائه کردند. بارگذاری‌ها شامل فشار داخلی، نیروی محوری، گشتاور و هم‌چنین بارگذاری دمایی و رطوبتی بوده است.

4 Morozov
5 Bakaiyan

1 Autoclave
2 Takayanagi
3 Parnas & Katirci

ترک خوردگی ماتریس در سطوح بیرونی/ داخلی، ترک‌های شعاعی، لایه‌لایه شدن، شکافتن و نشت می‌تواند رخ دهد.

خدابخشی و اسدی [۱۰]، در پژوهشی به شبیه‌سازی شکست با معیارهای تسای-وو^۶ و هاشمین^۷ با روش اجزای محدود و با استفاده از آباکوس^۸ پرداخته‌اند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که زمینه لوله کامپوزیتی تحت کشش و الیاف این لوله که تحت فشار و کشش قرار دارند، دچار شکست نشده اما زمینه لوله کامپوزیتی تحت فشار، دچار شکست شده است. ضریب شدت تنش در زاویه لایه‌چینی $55 \pm$ دچار افت ناگهانی شده اما با افزایش زاویه، مقدار این ضریب افزایش یافته است.

هستی^۹ و همکاران [۱۱]، در پژوهشی-یک مدل المان محدود سه‌بعدی برای بررسی یکپارچگی ساختاری لوله کامپوزیتی تحت فشار ترکیبی، کشش و گرادیان حرارتی با در نظر گرفتن تنش تسلیم همسان‌گرد و شکست ورقه در سطح لایه با توجه به معیار مبتنی تنش استفاده شده است. نتایج آنها نشان داد که ترکیب لایه‌های جهت‌گیری شده در $55 \pm$ می‌تولند تعادل خوبی را بین تقویت‌کننده‌های محیطی و محوری ایجاد کند.

با توجه به آنچه بیان شد، می‌توان دریافت که تأثیر بسیاری از پارامترهای رشته‌پیچی بر خواص مکانیکی استوانه‌های کامپوزیتی به صورت جامع مورد بررسی قرار گرفته است. اما یکی از مسائلی که تاکنون به‌طور کامل به آن پرداخته نشده، تأثیر الگوهای پیچش الیاف بر آستانه تحمل فشار هیدرواستاتیک داخلی است که در این تحقیق به آن پرداخته شده است.

۲- روش تحقیق

پارامترهای مختلفی در فرایند رشته‌پیچی وجود دارد که توسط محققان بسیاری مورد بررسی قرار گرفته است. در این میان، تأثیر الگوی پیچش یکی از پارامترهای کم‌تر بررسی شده است که در این تحقیق به آن پرداخته خواهد شد. برای این منظور، ابتدا با استفاده از فرضیات و روابط طراحی به محاسبه

بوهافس^۱ و همکاران [۶]، یک روش تحلیلی برای مطالعه پاسخ مکانیکی لوله‌های کامپوزیت جدار ضخیم تحت فشار داخلی را توسعه داده‌اند. آنها در روش خود در نظر گرفتند که کشش سطحی باید در سطح مشترک بین دو لایه مجاور، تمام شرایط مرزی اعمال شده بر تنش‌های شعاعی و حلقه‌ای را که با استفاده از یک مدل خاص برای استوانه‌های کامپوزیتی چند لایه ضخیم پیشنهاد شده توسط تسای^۲، برآورده کند. روش تحلیلی آنها در مقایسه با سایر روش‌های تحلیلی و عددی ساده، سریع‌تر و دقیق‌تر است.

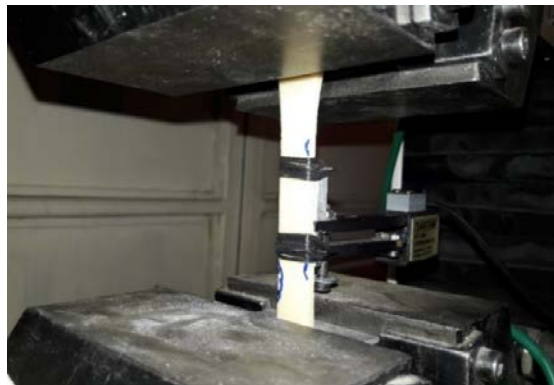
سیام اودین^۳ و همکاران [۷]، در تحقیقی نتایج حاصل از مدل‌سازی المان محدود تنش در دیسک کامپوزیتی با ساختار الگوهای پیچش مختلف را بررسی کرده و اعلام کردند که به ویژه در دیسک‌های با ضخامت کم، الگوهای پیچش تأثیر به‌سزایی بر خواص مکانیکی قطعه نهایی ساخته شده دارد.

سولو^۴ در سال ۲۰۱۷ [۸]، لوله‌های کامپوزیتی تحت فشار داخلی را با استفاده از روش اجزای محدود سه بعدی مورد تجزیه و تحلیل قرار داده است. لوله‌های کامپوزیتی از کربن/ اپوکسی با زوایای جهت‌گیری مختلف الیاف ساخته است. تجزیه و تحلیل المان محدود برای پیش‌بینی بارهای شکست انجام شده است. مقادیر تنش شعاعی، مماسی، محوری و برشی از طریق تحلیل‌های عددی روی لوله‌های کامپوزیت و لایه‌های چسب به دست آمد. اثرات زوایای جهت الیاف، عرض هم‌پوشانی و لایه چسب مورد بررسی قرار گرفت.

جمی^۵ [۹]، در پژوهشی پاسخ ضربه با سرعت پایین بر لوله‌های کامپوزیت تحت فشار داخلی، رشته‌پیچی شده هیبریدی کربن- شیشه را مورد مطالعه قرار داده است. لوله‌های هیبریدی با زاویه رشته‌پیچی $55 \pm$ درجه با استفاده از لایه‌های شیشه و فیبر کربن در توالی‌های مختلف روی هم‌به‌روش رشته‌پیچی خودکار تولید شدند. نتایج نشان داد که تشکیل آسیب مانند

6 Tsai-Wu
7 Hashin
8 Abaqus
9 Hastie

1 Bouhafis
2 Tsai
3 Sayem Uddin
4 Sulu
5 Gemi



شکل ۲. آزمون کشش نمونه رزین پخته شده

حلقه‌های معروف به NOL^2 ، منطبق با استاندارد ASTM D 2290 می‌توانند به وسایله یک حلقه مستقل یا توسط براده برداری حلقوی یک استوانه به دست آیند. خواص حاصل از این آزمون، در قطعات رشته‌پیچی و حل عددی مورد استفاده قرار گرفته است. ابعاد حلقه NOL ، بر اساس استاندارد (ASTM D 2290) در جدول (۱) آمده است. در شکل (۳)، پیچش حلقه NOL ، کنترل کشش و آغشته‌سازی به منظور ساخت نمونه‌ها نشان داده شده است.

فرایند پخت حلقه‌های NOL ، باید مطابق با دمای پخت قطعه تحت طراحی باشد. فرایند پخت این حلقه‌ها در جدول (۲) برای پخت قطعات NOL نشان داده شده است.

جدول ۱. ابعاد و پارامترهای مورد نیاز برای ساخت حلقه‌های NOL

ابعاد حلقه NOL	
$D_m=5.75$ inch	قطر داخلی
$W=0.25$ inch	عرض (پهنا)
$t=0.125$ inch	ضخامت مورد قبول
دیگر پارامترها	
22 ± 5 °C	دمای رزین و الیاف در زمان پیچش
معادل مقدار در نظر گرفته شده برای کل سازه	نسبت حجمی
مطابق با سیکل در نظر گرفته شده برای پخت سازه	سیکل پخت

ضخامت پوسته استوانه‌ای پرداخته شده و سپس تأثیر الگوی پیچش با استفاده از ماتریس A، B و D مورد تحلیل قرار گرفته است. در ادامه، با پیشنهاد رهیافتی جدید در مدل‌سازی پوسته‌های کامپوزیتی در نرم‌افزار آباکوس، چگونگی تأثیر الگوهای مختلف پیچش بر عکس‌العمل سازه، تحت فشار هیدرواستاتیک داخلی از طریق روش المان محدود نیز بررسی شده است. سپس، اقدام به ساخت نمونه و انجام آزمون‌های تجربی شده است. در نهایت برای راستی‌آزمایی، نتایج آزمون نمونه‌های تجربی ساخته شده با نمونه‌های نرم‌افزاری مورد مقایسه قرار گرفته است.

۱-۲ ساخت کوپن آزمون‌ها و مشخصه‌سازی مواد

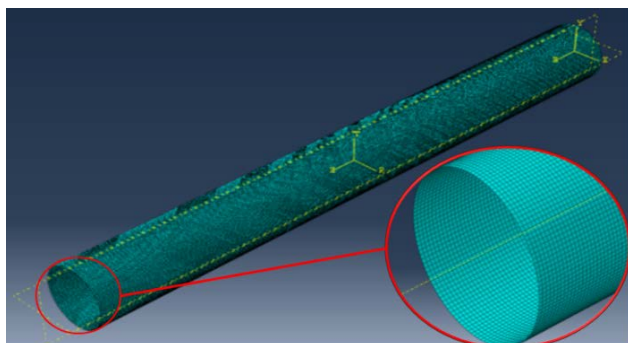
در این تحقیق، برای قالب‌گیری رزین‌های اپوکسی از قالب سیلیکونی استفاده شد و برای یکنواخت‌سازی فرایند ساخت، تمامی نمونه‌ها در پنج قالب سیلیکونی ساخته شدند. قالب‌های سیلیکونی مورد استفاده به منظور ساخت نمونه‌های دمبلی شکل، برای انجام آزمون کشش در شکل (۱) قابل مشاهده است.



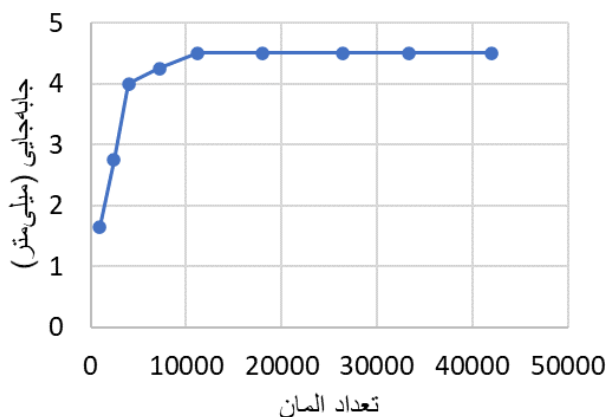
شکل ۱. قالب سیلیکونی برای ساخت نمونه دمبلی

در این تحقیق، ساخت نمونه‌های کشش و آزمون آن‌ها مطابق استاندارد ASTM D638 توسط دستگاه آزمون کشش مدل STM 150 (شرکت سه‌نتام) انجام گرفته است. همچنین، برای انجام آزمون کشش از حسگر اکستنسومتر^۱ برای اندازه‌گیری دقیق کرنش قطعه استفاده شده که در شکل (۲) قابل مشاهده است. سرعت کشش در این آزمون، ۵ میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شده است.

مطابق شکل (۶) قابل مشاهده است. پوسته استوانه، دارای ۳۳۳۸۴ المان و تعداد ۳۳۲۸۰ گره است. نوع مش بندی نیز برای استوانه چهار وجهی^۲ انتخاب شده است.



شکل ۵. مش بندی از نوع المان پوسته ای S4R



شکل ۶. هم گرایی مش بندی

۲-۳- فرایند ساخت مندرل^۳ و استوانه کامپوزیتی

مراحل ساخت استوانه کامپوزیتی به شرح زیر است:

- تعیین روش ساخت مندرل
 - تعیین شرایط الگوی رشته پیچی با در نظر گرفتن پارامترها و مقادیر آنها
 - انجام آزمایشها (به کمک پمپ هیدرولیکی)
- به منظور ساخت مندرل به طول ۱/۵ متر، استوانه ای از جنس ST37 و مانیسمن^۴ به طول ۱/۵ متر، به قطر بیرونی ۱۰۸ میلی متر و قطر داخلی ۹۸ میلی متر از رده ۸۰ تهیه شده است که برای نمونه مورد نظر باید قطر بیرونی ۱۰۵/۵ میلی متر باشد.

3 Mandrel
4 Manisman

در این تحقیق، به منظور ساخت حلقه های NOL، بر اساس اندازه های مفروض، قالب مربوطه طراحی و ساخته شده است. در شکل (۴)، حلقه های NOL ساخته شده قابل مشاهده است.



شکل ۳. پیچش حلقه NOL، کنترل کشش و آغشته سازی برای ساخت نمونه هایی از حلقه

جدول ۲. فرایند پخت و شرایط ساخت حلقه های NOL

شرایط محیطی ساخت	زمان پخت (دقیقه)	دمای پخت (سانتی گراد)
دمای ۲۵ درجه سانتی گراد و رطوبت ۴۷ درصد	۴۸۰	۹۰
	۲۴۰	۱۲۰



شکل ۴. حلقه های NOL ساخته شده

۲-۲ مدل سازی المان محدود

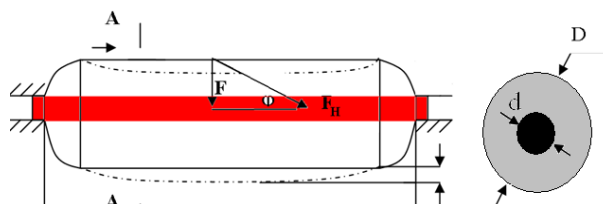
برای تحلیل المان محدود، از نرم افزار آباکوس ۶/۱۴ استفاده شده است. با توجه به اینکه نیاز است قطعه کامپوزیتی تحت آزمون هیدرواستاتیکی قرار گیرد، مدل سازی آزمون هیدرواستاتیکی آن توسط حل گر استاتیکی با احتساب معیارهای خطی هندسی انجام شده است. هم چنین، خروجی های مورد نیاز مثل جابه جایی، تنش، کرنش و هم چنین خروجی های وابسته به حل که کاربر، خود آنها را تعریف می کند فعال شده است. مش بندی مورد نظر کانوکشنال شل^۱ و مطابق شکل (۵)، از نوع المان پوسته ای S4R است. هم چنین، هم گرایی مش بندی

1 Conventional Shell
2 quadratic

I_x ممان اینرسی مندرل نسبت به محور x ها است که از طریق رابطه (۲) قابل محاسبه است [۱۳]:

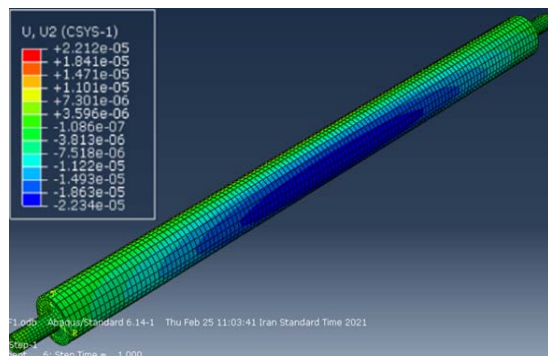
$$I_x = \frac{\pi D^4}{64} \quad (2)$$

در شکل (۸)، نیروهای وارد به مندرل و دسته‌های نگه‌دارنده در فرایند رشته‌پیچی نشان داده شده است.



شکل ۸. نیروهای وارد به مندرل و دسته‌های نگه‌دارنده در فرایند رشته‌پیچی

در شکل (۹)، کانتور خیز مندرل در نرم‌افزار آباکوس نشان داده شده است. همان‌طور که از اطلاعات این شکل برمی‌آید، حداکثر خیز ایجاد شده در مرکز مندرل بسیار کم‌تر از حد بحرانی (۴ میلی‌متر) است.

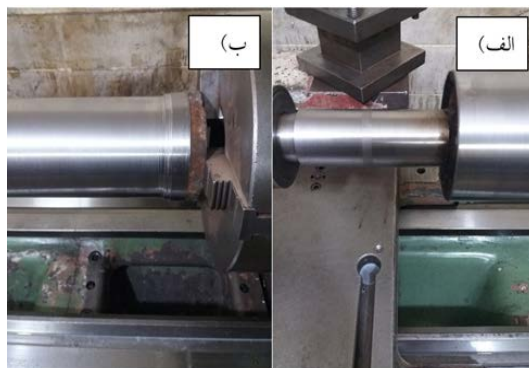


شکل ۹. کانتور خیز مندرل در نرم‌افزار آباکوس

پس از ساخت مندرل، مرحله نخست برای ساخت نمونه‌ها، آماده‌سازی مندرل و پاک‌سازی آن است. بدین صورت که سه مرتبه با دستمال تنظیف، سطح روی مندرل به تینر آغشته و تمیز شده است. پس از آن، برای هر مرحله ساخت نمونه، چهار مرتبه سطح کل مندرل واکس زده شده و سپس با دستمال تمیز پاک‌سازی شده است. همچنین، در آخرین مرتبه واکس زدن (پنجمین بار)، واکس روی سطح مندرل تمیز نشده تا استوانه

آن استوانه تهیه شده توسط عملیات تراشکاری به قطر مورد نظر رسانیده شده است. همچنین، دو فلنج (پولکی) به قطر داخلی استوانه ۹۸ میلی‌متر و ضخامت ۱۰ میلی‌متر برای پوشاندن قطر داخلی دو سر استوانه تهیه و به دو سر آن جوش داده شده است. همچنین، یکی از مهم‌ترین قطعاتی که باید قبل از هر چیز برای ساخت مندرل، طراحی و آماده شود، دسته‌های نگه‌دارنده آن است. آن‌ها که نگه‌دارنده مندرل بوده و از مرکز آن می‌گذرد، از طریق سه نظام به دستگاه رشته‌پیچی بسته شده و گشتاور دستگاه را در هنگام پیچش به مندرل منتقل می‌کند.

استوانه‌هایی هر کدام به طول ۱۰۰ میلی‌متر، به قطر بیرونی ۴۰ میلی‌متر و قطر داخلی ۳۵ میلی‌متر از جنس مانیسیمان رده ۱۶۰ به‌عنوان دسته‌های نگه‌دارنده در دو طرف مندرل، تهیه و به فلنج (پولکی) جوش داده شده است. در شکل (۷)، تراشکاری الف) دسته‌های نگه‌دارنده و ب) انتهای استوانه آن قابل مشاهده است.



شکل ۷. تراشکاری الف) دسته‌های نگه‌دارنده و ب) انتهای استوانه

مندرل، یک تیر دو سر گیردار در نظر گرفته می‌شود. بیش‌ترین خمش در نقطه وسط مندرل اتفاق می‌افتد، مقدار این خمش y_{max} از طریق رابطه (۱) قابل محاسبه است [۱۳]:

$$y_{max} = \frac{FL^3}{48EI_x} \quad (1)$$

در رابطه بالا، L طول مندرل، E مدول الاستیسیته ماده اصلی سازنده مندرل، F نیروی کشش باند الیاف است. با توجه به نوع مندرل که از جنس ST37 است، $E=200\text{Gpa}$ در نظر گرفته شده است.



شکل ۱۱. ساخت پوسته با فرایند رشته پیچی

پس از اتمام فرایند رشته پیچی، نمونه بر اساس فرایند پخت به پیشنهاد شرکت تأمین کننده، در دما و زمان معینی که اطلاعات آن در جدول (۲) آمده، قرار گرفته است. در شکل (۱۲)، نمونه خارج شده از کوره مشاهده می شود.



شکل ۱۲. خروج نمونه از کوره

پس از بیرون آوردن قطعه از کوره، از یک کشنده برای خارج نمودن استوانه کامپوزیتی ساخته شده، استفاده شده است. برای این منظور، ابتدا مندرل بر روی یک یونولیت قرار داده شده تا سطح آن به ابتدای کشنده نزدیک شود. سپس، به کمک سیم بکسل و جرثقیل، نمونه ساخته شده از مندرل بیرون کشیده شده است. در شکل (۱۳)، خروج نمونه از مندرل و نمایی از ریل کشنده قابل مشاهده است.

کامپوزیتی در پایان عملیات ساخت نمونه، راحت تر از مندرل خارج شود. در شکل (۱۰)، مندرل آماده سازی شده قابل مشاهده است.



شکل ۱۰. مندرل آماده سازی شده

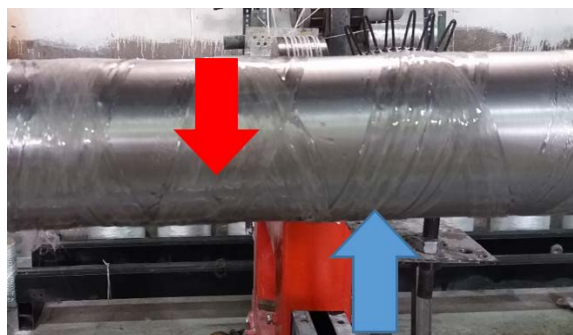
در تمامی نمونه ها، موارد آماده سازی مندرل، میزان مواد خام، زاویه پیچش الیاف، شرایط مراحل پخت نظیر (مدت زمان قرارگیری و درجه حرارت کوره) و مراحل بیرون کشیدن نمونه ساخته شده یکسان است. مواد خام مورد استفاده برای هر نمونه شامل الیاف شیشه به میزان ۸۴۰ گرم، رزین اپوکسی به میزان ۷۵۰ گرم، هاردنر به میزان ۷۰ گرم و شتاب دهنده به میزان ۱۵ گرم است.

۲-۴- ساخت پوسته با فرایند رشته پیچی

یکی از مهم ترین بخش های هر سازه کامپوزیتی، چگونگی لایه چینی شامل زوایای الیاف در هر لایه است. در بررسی تحقیق های مشابه که استوانه های کامپوزیتی تحت فشار مورد مطالعه قرار گرفته اند، نتیجه حاصل بهترین زاویه برای این نوع بارگذاری زوایای بین ۵۲ تا ۵۶ درجه است [۲] و ۶. از طرفی با نزدیک شدن این زوایا به صفر درجه، ماکزیمم نیروی محوری قابل تحمل و با نزدیک شدن به ۹۰ درجه، بیشینه نیروی شعاعی قابل تحمل افزایش می یابد. در این تحقیق، زاویه پیچش الیاف $54 \pm$ درجه است و این بدان دلیل است که قطر مندرل کم است. همچنین، از پیچش ۹۰ درجه (شعاعی) صرف نظر شده است، چراکه پیچش شعاعی باعث می شود، در هنگام آزمایش هیدرواستاتیک داخلی، تأثیر الگوی پیچش خیلی کم شود. لازم به ذکر است، در این تحقیق، زاویه پیچش فقط به صورت محوری است. در شکل (۱۱)، ساخت پوسته با فرایند رشته پیچی قابل مشاهده است.

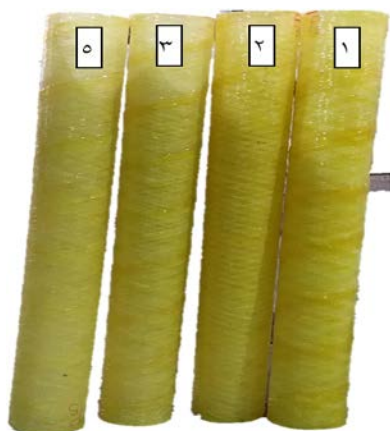
و الیاف در مراحل بعدی پشت باندهای قبلی قرار می‌گیرد. الگوی پیچش شماره ۳، بدین شکل است که در دفعه دوم، پیچش سطح بین الیاف اولیه پیچیده شده را به سه قسمت تقسیم نموده و الیاف در مراحل بعدی پشت باندهای قبلی قرار می‌گیرد. در الگوی پیچش شماره ۵، در دفعه دوم پیچش، سطح بین الیاف اولیه پیچیده شده را به پنج قسمت تقسیم نموده و الیاف در مراحل بعدی پشت باندهای قبلی قرار می‌گیرد. الگوی ۴ نیز به الگوهای ۳ و ۵ نزدیک است.

در شکل (۱۵)، نمایی از کنار هم قرار گرفتن دسته الیاف‌های اول و دوم در الگوی ۱ قابل مشاهده است. دسته الیاف اول با فلش آبی و دسته دوم با فلش قرمز رنگ مشخص شده است.



شکل ۱۵. نمایی از کنار هم قرار گرفتن دسته الیاف‌های اول و دوم

هم‌چنین، در شکل (۱۶) همه نمونه استوانه‌های کامپوزیتی با الگوهای ۱، ۲، ۳ و ۵ مشاهده می‌شود.



شکل ۱۶. استوانه‌های کامپوزیتی ساخته شده با الگوهای پیچش مختلف



شکل ۱۳. خروج نمونه از مندرل و نمایی از ریل کشنده

برای ساخت نمونه‌ها، از الگوهای پیچش ۱، ۲، ۳ و ۵ استفاده شده است. دلیل عدم استفاده از الگوی ۴، نزدیک بودن این الگو به الگوهای ۳ و ۵ است. برای هر نمونه الگو، تعداد ۳ عدد استوانه طبق مراحل ذکر شده در بالا ساخته شده است. کنترل کردن و نحوه الگوی پیچش با نرم‌افزار و از طریق کدنویسی انجام شده است. هم‌چنین، در الگوهای مختلف، نحوه کدنویسی‌ها برای الگوهای پیچش نیز متفاوت است. قسمتی از این کدنویسی برای نمونه شماره ۱ در شکل (۱۴) نشان داده شده است.

G01 G64 G91 G94
 X-220.4816493 F1000
 X-593.483144 Y+1125 F2000
 X-220.4816493 F1000
 X-593.483144 Y-1125 F2000

 X-220.4816493 F1000
 X-593.483144 Y+1125 F2000
 X-220.4816493 F1000
 X-593.483144 Y-1125 F2000

شکل ۱۴. کد نوشته شده برای ساخت نمونه با الگوی پیچش شماره ۱

لازم به ذکر است که در الگوی شماره ۱، الیاف پیچیده شده در مرحله اول و دوم دقیقاً در کنار هم قرار می‌گیرند. الگوی پیچش شماره ۲، بدین صورت است که در دفعه دوم، پیچش سطح بین الیاف اولیه پیچیده شده را به دو قسمت تقسیم نموده



شکل ۱۸. صفحه تراز چسبانیده شده برای بالا بردن دقت اندازه-

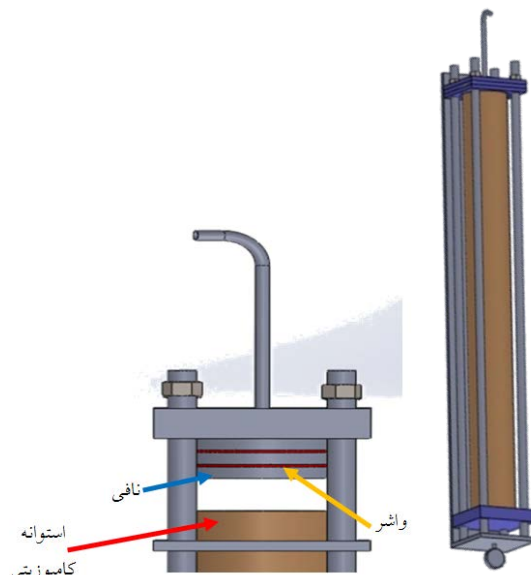
گیری

برای ثبت میزان جابه‌جایی آستانه، از ساعت نشانگر^۱ ASIMETO ISO 17025 با پایه مغناطیسی و دقت یک میکرومتری استفاده شده است. همچنین، برای مقید کردن قطعه، قرارگیری ساعت نشانگر و به دست آوردن جابه‌جایی آستانه کامپوزیتی، از فیکسچر^۲ (دستگاه آزمون هیدرواستاتیک) ساخته شده در شکل (۱۹) استفاده شده است. این ساعت‌ها، به‌صورت دقیق، وسط و در هر دو طرف آستانه مقید شده که در شکل (۲۰) نشان داده شده است.



شکل ۱۹. دستگاه مورد استفاده در آزمون هیدرواستاتیک

۲-۵- آزمون هیدرواستاتیک داخلی آستانه کامپوزیتی
 آزمون هیدرواستاتیک آستانه‌های تحت فشار داخلی، اطلاعات مختلفی را به مهندسین طراح داده است. دستیابی به این اطلاعات منوط به چگونگی برگزاری آزمون و تجهیزات ثبت اطلاعات به دست آمده از آزمون هیدرواستاتیک دارد.
 نحوه انجام این آزمون، بر اساس استاندارد مربوطه، نیاز به رعایت نکات ایمنی و به‌کارگیری تجهیزات مناسب و کافی دارد. در شکل (۱۷)، نمای کلی دستگاه آزمون فشار هیدرواستاتیک و نمای دقیق‌تر از اتصالات و نحوه آب‌بندی آستانه کامپوزیتی نشان داده شده است. برای آب‌بند کردن نمونه‌ها، از دو آستانه آهنی (نافی) به همراه دو اورینگ NBR (واشر) که بر روی آستانه‌ها (نافی) قرار دارد، استفاده شده است.



شکل ۱۷. نمایی از دستگاه آزمون فشار هیدرواستاتیک داخلی

در رشته‌پیچی آستانه‌های کامپوزیتی، اعوجاج‌هایی بر روی پوسته ایجاد شده که این اعوجاج‌ها باعث عدم دقت در اندازه‌گیری جابه‌جایی شده است. از این‌رو، صفحه‌های تراز (حد معیار) بر روی وسط آستانه (محل قرارگیری ساعت‌های نشانگر) چسبانیده شده تا دقت اندازه‌گیری را افزایش دهد. در شکل (۱۸)، قطعه چسبانیده شده به آستانه نشان داده شده است.

2 Fixture

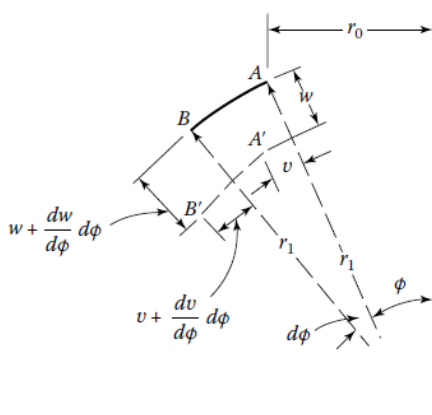
1 Indicator watch

۲-۶- تئوری محاسبه جابه‌جایی شعاعی [۷]

المان AB به طول $r_1 d\theta$ از نصف‌النهار، در پوسته بدون کرنش در نظر گرفته شده است. شکل (۲۷) که المانی از دایره است، تغییر مکان‌ها در راستای مماس بر نصف‌النهار و در جهت عمود بر سطح میانی به ترتیب با v و w نشان داده شده است. بعد از تحت کرنش قرار گرفتن پوسته، AB به موقعیت $A'B'$ تغییر مکان داده است. در تئوری زیر، از تقریب تغییر شکل کوچک استفاده شده و از جملات مرتبه بالای بی‌نهایت کوچک صرف نظر شده است. تغییر شکل ایجاد شده در یک المان به طول بی‌نهایت کوچک $r_1 d\theta$ را می‌توان مرکب از یک افزایش طول $(\frac{dv}{d\theta}) d\theta$ ناشی از تغییر مکان‌های مماسی و یک کاهش طول $w d\theta$ ایجاد شده بر اثر تغییر مکان شعاعی w دانست. بنابراین، کرنش نصف‌النهاری ϵ_θ ، کل تغییر شکل بر واحد طول المان برابر است با [۱۴]:

$$\epsilon_\theta = \frac{1}{r_1} \frac{dv}{d\theta} - \frac{w}{r_1} \quad (3)$$

تغییر شکل یک المان از دایره موازی را می‌توان به همین شیوه بررسی کرد. در شکل (۲۲)، المانی از یک دایره قابل مشاهده است. می‌توان نشان داد که افزایش شعاع r_1 دایره ناشی از تغییر مکان‌های v و w عبارت است از $v \cos\theta - w \sin\theta$. تا زمانی که محیط دایره موازی مستقیماً متناسب با دایره خود منبسط شود خواهیم داشت [۱۴]:



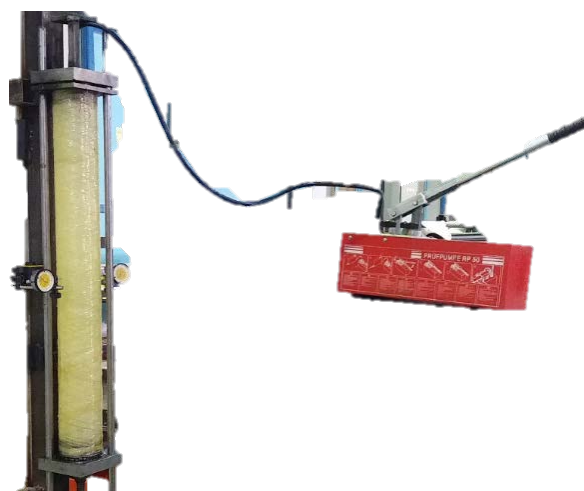
شکل ۲۲. المان دایره



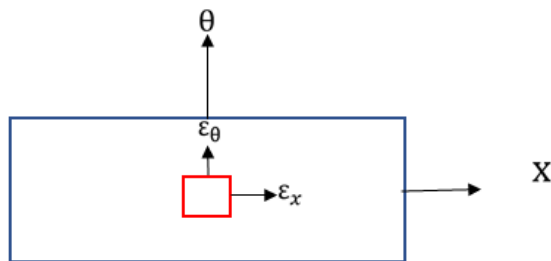
شکل ۲۰. نمایی از قرار گرفتن ساعت‌ها بر روی استوانه

در نهایت، به منظور ایجاد فشار هیدرواستاتیک داخلی، بعد از جای‌گذاری نافی‌ها در دو طرف هر استوانه و ثابت کردن آن بر روی فیکسچر (دستگاه آزمون هیدرواستاتیک داخلی) ساخته شده، روغن با فشار بالا از سمت نافی بالایی استوانه به درون آن تزریق شده است.

روغن هیدرواستاتیک، تا فشار ۵۰ بار به داخل استوانه کامپوزیتی وارد شده است. از این‌رو، میزان جابه‌جایی آن در دو سمت معین شد. تجهیزات کلی ساخته شده و مورد استفاده به منظور انجام آزمون هیدرواستاتیک، در شکل (۲۱) نشان داده شده است.



شکل ۲۱. تجهیزات آزمون هیدرواستاتیک



شکل ۲۳. کرنش‌های وارد به استوانه تحت بارگذاری فشار داخلی

بنابراین، از شکل (۲۳)، معادله‌های (۱۱) تا (۱۳) حاصل شده است:

$$P_0 = 2\pi r_0 \quad , \quad P_1 = 2\pi r_1 \quad (11)$$

$$\epsilon_\theta = \frac{\Delta P}{P_0} = \frac{P_1 - P_0}{P_0} = \frac{2\pi r_1 - 2\pi r_0}{2\pi r_0} = \frac{r_1 - r_0}{r_0} \quad (12)$$

$$r_0 \epsilon_\theta = \Delta r = U_r \quad (13)$$

در معادله‌های بالا، P_1 محیط استوانه بعد از فشار، r_1 شعاع استوانه بعد از فشار، P_0 محیط استوانه قبل از فشار، r_0 شعاع استوانه قبل از فشار است. Δr عددی است که نرم‌افزار آباکوس گزارش داده و در اعداد آزمون تجربی نیز اندازه‌گیری شده است. U_r نیز در واقع همان Δr است که میزان جابه‌جایی شعاعی در استوانه را نشان داده است.

۳- نتایج و بحث

با توجه به آن که فرایند رشته‌پیچی نسبت به دیگر روش‌ها، محصولات یکنواختی از لحاظ هندسه، خواص مکانیکی و غیره تولید می‌نماید. پارامترهای قابل تنظیم در این فرایند، مانند سرعت پیچش الیاف، میزان ماندگاری الیاف در حمام رزین، دمای رزین مورد استفاده در هنگام آغشته‌سازی الیاف و غیره، تأثیر به‌سزایی در ضخامت پوسته نهایی دارد. در این تحقیق، با کنترل پارامترهای ساخت سعی شده تا ضخامت نمونه‌های ساخته‌شده ثابت باشد. اختلاف بسیار پایین ضخامت نمونه‌ها، نشان دهنده کنترل مناسب پارامترهای ساخت است. پارامترهایی که برای این تحقیق انجام شده، در جدول (۳) ارائه شده است.

$$\epsilon_\theta = \frac{1}{r_0} (v \cos \theta - w \sin \theta) \quad (4)$$

باتوجه به $r_0 = r_2 \sin \theta$ ، کرنش محیطی به صورت معادله (۵) است:

$$\epsilon_\theta = \frac{1}{r_2} (v \cot \theta - w) \quad (5)$$

حذف w از معادله‌های (۳) و (۵) منتهی به معادله دیفرانسیل (۶) برای v شده است:

$$\frac{dv}{d\theta} - v \cot \theta = r_1 \epsilon_\theta - r_2 \epsilon_\theta \quad (6)$$

کرنش‌ها و تنش‌های پوسته‌ای از طریق قانون هوک به یکدیگر ربط پیدا کرده است:

$$\epsilon_\theta = \frac{1}{E} (\sigma_\theta - \nu \sigma_\theta) \quad , \quad \epsilon_\theta = \frac{1}{E} (\sigma_\theta - \nu \sigma_\theta) \quad (7)$$

با قرار دادن عبارت فوق در معادله (۶)، معادله (۸) به دست آمده است:

$$\frac{dv}{d\theta} - v \cot \theta = \frac{1}{E} [\sigma_\theta (r_1 + \nu r_2) - \sigma_\theta (r_2 + \nu r_1)] \quad (8)$$

هنگامی که تنش‌های پوسته‌ای معلوم است، تغییر شکل‌های متقارن پوسته حاصل از دوران را می‌توان با انتگرال‌گیری معادله (۸) محاسبه کرد. در معادله زیر:

$$\frac{dv}{d\theta} - v \cot \theta = f(\theta) \quad (9)$$

حل معادله (۹) بالا، عبارت است از:

$$v = \left[\int \frac{f(\theta)}{\sin \theta} d\theta + c \right] \sin \theta \quad (10)$$

ثابت انتگرال‌گیری c از شرط مرزی به دست آمده است. همچنین، با پیدا کردن v ، w از معادله (۵) به آسانی قابل محاسبه است.

در شرایطی که پوسته و بارگذاری متقارن محوری باشد، معادلات به صورت زیر ساده می‌شوند. شکل (۲۳)، کرنش‌های وارد به استوانه تحت فشار داخلی، ϵ_x کرنش در راستای طولی استوانه و ϵ_θ کرنش در راستای محیطی استوانه است [۱۴].

جدول ۳. پارامترهای ساخت

نیروی کشش الیاف (N)	سرعت پیچش الیاف (RPM)	دمای رزین (سانتی-گراد)
۲۰	۴-۵	۴۲±۵

۳-۱- نتایج خواص مکانیکی

همان‌طور که بیان شد، به منظور صحت‌سنجی رهیافت پیشنهادی تحقیق، باید نمونه‌های ساخته شده به وسیله روش المان محدود، مدل‌سازی شده و نتایج بارگذاری با یکدیگر مقایسه شود. بر این اساس، برای تحلیل المان محدود سازه باید خواص مکانیکی ماده تشکیل دهنده تعیین و در نرم‌افزار تحلیلی تعریف شود. در ادامه، نتایج آزمون‌های استاندارد صورت گرفته بر روی مواد سازنده نمونه‌ها ارائه شده است. از این نتایج، برای مدل‌سازی نمونه‌های استوانه‌ای ساخته شده در نرم‌افزار آباکوس استفاده شد. نتایج آزمون کشش رزین، در جدول (۴) ارائه شده است.

جدول ۴. نتایج آزمون کشش رزین

خواص	نماد	واحد	مقدار
مدول الاستیک	E	GPa	۲/۵
ضریب پواسون	ν	-	۰/۲۳
مدول برشی	G	GPa	۱/۲
استحکام کششی	S_T	MPa	۴۳

در جدول (۵)، مقادیر حاصل از آزمون کشش بر روی نمونه‌های NOL ارائه شده است.

جدول ۵. نتایج آزمایش کشش بر روی نمونه‌های NOL شیشه - اپوکسی

قطعه	حداکثر نیروی شکست (KN)	سطح مقطع (mm ²)	حداکثر تنش (MPa)
NOL 1	۵۲/۷۵	۵۰/۱	۱۰۵۳
NOL 2	۵۱/۱	۵۳/۱۸	۹۶۱
NOL 3	۴۲/۷۵	۴۵/۱۷	۹۴۶
NOL 4	۴۸/۷۵	۴۶/۳	۱۰۵۲
	\bar{X}		۱۰۰۳

جدول (۶)، جدول خواصی است که در مدل‌سازی استفاده شده است. بر این اساس، خواص در راستای الیاف E_1 و S_1 ، بر اساس آزمون NOL به دست آمده است. در راستای عرضی E_2 ، S_2 و E_3 و S_3 بر اساس یک فرض محافظه‌کارانه، استحکام و مدول رزین قرار داده شد. همچنین G_{12} ، ν_{12} و غیره بر اساس آزمون‌های انجام شده در کارگاه کامپوزیت به دست آمده است. خواص به دست آمده در جدول (۶)، قابل مشاهده است.

۳-۲- ضخامت نمونه‌های ساخته شده

ضخامت نمونه‌های طراحی و ساخته شده در جدول (۷) قابل مشاهده است.

۳-۳- روابط تحلیلی به منظور به دست آوردن ماتریس ABD

در این تحقیق، از نرم‌افزار دی سی ام^۱، برای محاسبه ماتریس ABD هر الگو به صورت جداگانه استفاده شده است.

برای مدل‌سازی نمونه‌های المان محدود، به برآورد ماتریس A، B و D نیاز است. بر این اساس، با توجه به آن‌که ماتریس‌های سفتی نمونه ساخته شده با الگوی شماره یک نامتقارن و نمونه‌های ساخته شده با الگوی شماره پنج، متقارن است. برای محاسبه این ماتریس‌ها، ترتیب لایه‌چینی برای نمونه شماره یک متقارن و برای نمونه شماره پنج نامتقارن تعریف شده است.

همان‌طور که قابل پیش‌بینی است، تنها ضرایب ماتریس B، برای دو نمونه متفاوت است. به گونه‌ای که ضرایب ماتریس B برای مدل متقارن صفر به دست آمده است. برای به دست آوردن ماتریس سفتی الگوی ۲ و ۳ با ثابت فرض کردن ضرایب ماتریس‌های A و D، مقادیر ماتریس B با میان‌یابی ضرایب از الگوهای ۱ و ۵ قابل محاسبه است. در جدول (۸)، مقادیر ماتریس B در نمونه‌ها ارائه شده است.

۳-۴- نتایج شبیه‌سازی انجام شده

در آزمون تجربی اندازه‌گیری میزان جابه‌جایی شعاعی توسط دو ساعت نشانگر در وسط استوانه انجام شده است. به همین منظور، در نمونه‌های تحلیلی نیز میزان جابه‌جایی در وسط استوانه محاسبه شده است. در شکل (۲۴)، کانتورهای جابه‌جایی شعاعی در فشار ۵۰ بار برای نمونه‌های با الگوی ۱، ۲، ۳ و ۵، از راست به چپ بر حسب میلی‌متر قابل مشاهده است.

جدول ۶. خواص مواد شیشه اپوکسی

ν_{12}	G_{23}	G_{13}	G_{12}	E_{22}	E_{11}
۰/۳	۱/۲۵ GPa	۱/۲۵ GPa	۴/۰۸۵ GPa	۵GPa	۲۶/۶ GPa

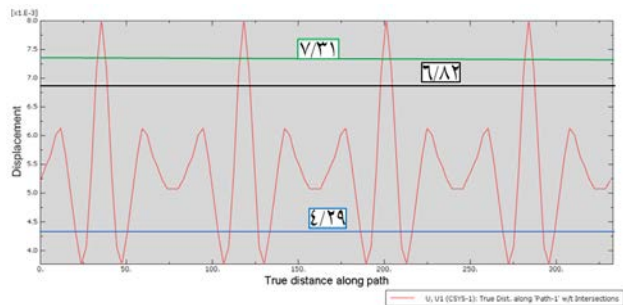
جدول ۷. ضخامت نمونه‌های طراحی و ساخته شده

شماره نمونه (الگو)	ضخامت تئوری (mm)	ضخامت تجربی (mm)
۱	۳/۳	۳/۴
۲	۳/۳	۳/۳
۳	۳/۳	۳/۵
۵	۳/۳	۳/۲

جدول ۸. ضرایب ماتریس B در نمونه‌ها

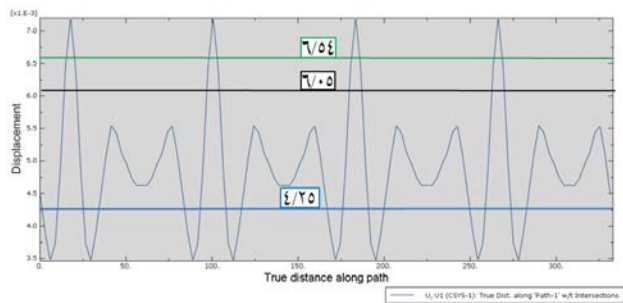
شماره الگو	۱	۲	۳	۵
B13	-۷۹۰۰	-۵۳۰۰	-۲۶۰۰	۰
B23	-۱۲۶۰۰	-۸۴۰۰	-۴۲۰۰	۰

در شکل (۲۵) تا شکل (۲۸)، نمودارهای جابه‌جایی شعاعی در وسط استوانه در فشار ۵۰ بار به صورت ۳۶۰ درجه بر حسب میلی‌متر نشان داده شده است. واحد جابه‌جایی شعاعی به میلی‌متر است. نمودارهای سینوسی ارائه شده، از نرم‌افزار آباکوس استخراج شده است.

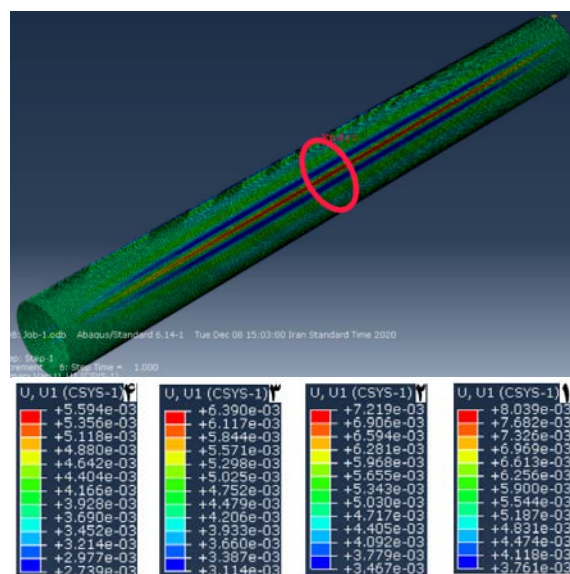


شکل ۲۵. نمودار جابه‌جایی شعاعی در وسط استوانه نمونه شماره ۱ در فشار ۵۰ بار به صورت ۳۶۰ درجه بر حسب میلی‌متر

در الگوی پیچش شماره ۱ در فشار ۵۰ بار، در نرم‌افزار المان محدود کم‌ترین مقدار جابه‌جایی ۳/۷۶۱ میکرومتر و بیش‌ترین مقدار جابه‌جایی ۸/۰۳۹ میکرومتر است. همچنین، در ساخت نمونه تجربی، جابه‌جایی شعاعی اندازه‌گیری شده در سمت راست استوانه (صفر درجه) ۶/۸۲ میکرومتر و جابه‌جایی شعاعی اندازه‌گیری شده در سمت چپ استوانه (۱۸۰ درجه) ۴/۲۹ میکرومتر است. از این‌رو، می‌توان نتیجه گرفت که اعداد حاصل از نتایج نمونه تجربی در بین بازه موجود در نرم‌افزار المان محدود قرار گرفته است.



شکل ۲۶. نمودار جابه‌جایی شعاعی در وسط استوانه نمونه شماره ۲ در فشار ۵۰ بار به صورت ۳۶۰ درجه بر حسب میلی‌متر



شکل ۲۴. جابه‌جایی شعاعی در فشار ۵۰ بار در نمونه‌ها بر حسب میلی‌متر

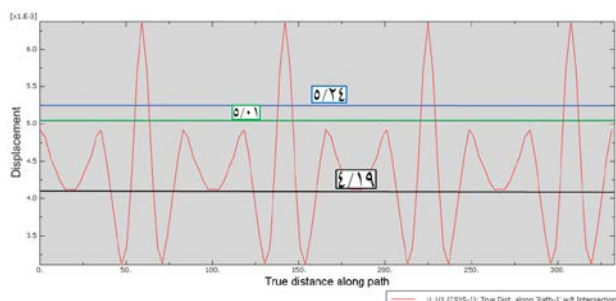
در الگوی پیچش شماره ۵ در فشار ۵۰ بار، در نرم‌افزار المان محدود کم‌ترین مقدار جابه‌جایی ۲/۷۳۹ میکرومتر و بیش‌ترین مقدار جابه‌جایی ۵/۵۹۴ میکرومتر است. هم‌چنین در ساخت نمونه تجربی، جابه‌جایی شعاعی اندازه‌گیری شده در سمت راست استوانه (صفر درجه) ۴/۶۴ میکرومتر و جابه‌جایی شعاعی اندازه‌گیری شده در سمت چپ استوانه (۱۸۰ درجه) ۳/۸۹ میکرومتر است. از این‌رو می‌توان نتیجه گرفت که اعداد حاصل از نتایج نمونه تجربی در بین بازه موجود در نرم‌افزار المان محدود قرار گرفته است. در شکل‌های بالا، خطوط آبی رنگ نشان دهنده جابه‌جایی شعاعی اندازه‌گیری شده به روش تجربی در سمت چپ استوانه برحسب میلی‌متر (۱۸۰ درجه) و خطوط مشکی رنگ نشان‌دهنده جابه‌جایی شعاعی اندازه‌گیری شده به روش تجربی در سمت چپ استوانه برحسب میلی‌متر (صفر درجه) است. خطوط سبز رنگ نیز نشان‌دهنده جابه‌جایی شعاعی اندازه‌گیری شده به روش تحلیلی است.

۳-۵- مقایسه نتایج (المان محدود، تجربی و تحلیلی)

جابه‌جایی شعاعی نمونه‌های مختلف تحت بارگذاری فشار هیدرواستاتیک داخلی توسط دو ساعت نشانگر اندازه‌گیری شده است. در جدول‌های (۹) تا (۱۲)، میزان جابه‌جایی‌های اندازه‌گیری شده به همراه نتایج شبیه‌سازی برای چهار نمونه مورد بررسی قابل مشاهده است.

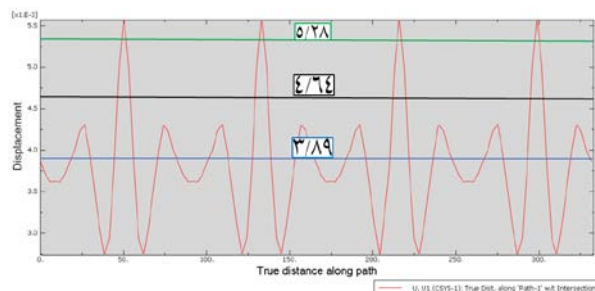
در جدول (۹)، جابه‌جایی شعاعی تحت بارگذاری فشار هیدرواستاتیک داخلی گزارش شده است. همان‌طور که در جدول مشهود است، مقادیر جابه‌جایی شعاعی در روش تجربی، در بین بازه روش شبیه‌سازی المان محدود قرار گرفته است. همان‌طور که قابل‌ملاحظه است، الگوی جابه‌جایی شعاعی در هر دو روش تجربی و شبیه‌سازی در یک بازه قرار گرفته است.

در الگوی پیچش شماره ۲ در فشار ۵۰ بار، در نرم‌افزار المان محدود، کم‌ترین مقدار جابه‌جایی ۳/۴۶۷ میکرومتر و بیش‌ترین مقدار جابه‌جایی ۷/۲۱۹ میکرومتر است. هم‌چنین، در ساخت نمونه تجربی، جابه‌جایی شعاعی اندازه‌گیری شده در سمت راست استوانه (صفر درجه) ۶/۰۵ میکرومتر و جابه‌جایی شعاعی اندازه‌گیری شده در سمت چپ استوانه (۱۸۰ درجه) ۴/۲۵ میکرومتر است. از این‌رو، می‌توان نتیجه گرفت که اعداد حاصل از نتایج نمونه تجربی در بین بازه موجود در نرم‌افزار المان محدود قرار گرفته است.



شکل ۲۷. نمودار جابه‌جایی شعاعی در وسط استوانه نمونه شماره ۳ در فشار ۵۰ بار به صورت ۳۶۰ درجه برحسب میلی‌متر

در الگوی پیچش شماره ۳ در فشار ۵۰ بار، در نرم‌افزار المان محدود کم‌ترین مقدار جابه‌جایی ۳/۱۱۴ میکرومتر و بیش‌ترین مقدار جابه‌جایی ۶/۳۹ میکرومتر است. هم‌چنین، در ساخت نمونه تجربی، جابه‌جایی شعاعی اندازه‌گیری شده در سمت راست استوانه (صفر درجه) ۴/۱۹ میکرومتر و جابه‌جایی شعاعی اندازه‌گیری شده در سمت چپ استوانه (۱۸۰ درجه) ۵/۲۴ میکرومتر است. از این‌رو، می‌توان نتیجه گرفت که اعداد حاصل از نتایج نمونه تجربی در بین بازه موجود در نرم‌افزار المان محدود قرار گرفته است.



شکل ۲۸. نمودار جابه‌جایی شعاعی در وسط استوانه نمونه شماره ۵ در فشار ۵۰ بار به صورت ۳۶۰ درجه برحسب میلی‌متر

جدول ۱۲. جابه‌جایی شعاعی الگوی شماره ۵ (میلی‌متر)

درصد خطا	ر	د	ج	ب	الف	فشار هیدرواستاتیک (bar)
۱۲/۳۴	۰/۵۲	۰/۴۹	۰/۳۵	۰/۵۵۹	۰/۲۷۴	۵
۱۴/۲	۱/۰۷	۰/۹۶	۰/۷۸	۱/۱۱۹	۰/۵۴۷	۱۰
۱۷/۱۶	۱/۴۸	۱/۰۵	۱/۳۹	۱/۶۷۸	۰/۸۲۲	۱۵
۱۲/۸۲	۲/۰۹	۱/۴۶	۱/۹۵	۲/۳۳۷	۱/۰۹۵	۲۰
۱۸/۴۸	۲/۳۶	۱/۸۷	۲/۲۸	۲/۷۹۷	۱/۳۶۹	۲۵
۱۵/۳۷	۲/۹۸	۲/۸۴	۲/۴۶	۳/۳۵۶	۱/۶۴۳	۳۰
۱۹/۸۱	۳/۲۵	۳/۱۴	۲/۸۵	۳/۹۱۶	۱/۹۱۷	۳۵
۱۱/۰۶	۴/۲۲	۳/۹۸	۳/۳	۴/۴۷۵	۲/۱۹۱	۴۰
۱۶/۵۶	۴/۸۱	۳/۲۳	۴/۲	۵/۰۳۴	۲/۴۶۵	۴۵
۱۷/۰۵	۵/۲۸	۳/۸۹	۴/۶۴	۵/۵۹۴	۲/۷۳۹	۵۰

جدول ۹. جابه‌جایی شعاعی الگوی شماره ۱ (میلی‌متر)

درصد خطا	ر	د	ج	ب	الف	فشار هیدرواستاتیک (bar)
۱۴/۰۳	۰/۷۱	۰/۶۸	۰/۳۶	۰/۷۹۱	۰/۳۸۳	۵
۱۳/۲	۱/۲۱	۰/۸۹	۱/۳۸	۱/۵۹	۰/۷۸۱	۱۰
۱۴/۹۳	۲/۲۷	۱/۳۱	۲/۰۵	۲/۴۱	۱/۱۳۸	۱۵
۱۱/۰۹	۲/۹۴	۲/۸۳	۱/۵۸	۳/۱۸۳	۱/۵۶۲	۲۰
۱۸/۰۱	۳/۴۶	۲/۰۸	۳/۲۵	۳/۹۶۴	۱/۹۵۱	۲۵
۹/۹۷	۴/۵۴	۲/۴۹	۴/۳۳	۴/۸۱	۲/۳۲۵	۳۰
۱۷/۰۵	۵/۳۲	۴/۶۸	۲/۷۳	۵/۶۴۲	۲/۷۳۴	۳۵
۱۳/۹۲	۵/۹۵	۵/۴۵	۳/۰۴	۶/۳۳۲	۳/۱۲۶	۴۰
۱۷/۶۷	۶/۰۳	۵/۹۲	۳/۴۷	۷/۱۹۱	۳/۵۱۶	۴۵
۱۵/۱۶	۷/۳۱	۴/۲۹	۶/۸۲	۸/۰۳۹	۳/۷۶۱	۵۰

جدول ۱۰. جابه‌جایی شعاعی الگوی شماره ۲ (میلی‌متر)

درصد خطا	ر	د	ج	ب	الف	فشار هیدرواستاتیک (bar)
۱۷/۱۳	۰/۶۲	۰/۴۰	۰/۵۹	۰/۷۱۲	۰/۳۴۵	۵
۱۱/۷۶	۱/۳۱	۱/۲۶	۰/۷۲	۱/۴۲۸	۰/۶۹۹	۱۰
۱۵/۶۶	۱/۹۷	۱/۲۴	۱/۸۳	۲/۱۷	۱/۰۲۴	۱۵
۱۰/۹	۲/۶۴	۱/۶۸	۲/۵۵	۲/۸۶۲	۱/۴۱۱	۲۰
۱۸/۱۲	۳/۲۵	۲/۹۴	۱/۹۲	۳/۵۹۱	۱/۷۲۴	۲۵
۱۵	۳/۸۳	۲/۵۴	۳/۶۷	۴/۳۱۸	۲/۰۹۳	۳۰
۱۲/۹۴	۴/۹۶	۴/۴۳	۲/۷۵	۵/۰۸۹	۲/۴۶۱	۳۵
۹/۹۸	۵/۲۷	۵/۱۳	۳/۱۵	۵/۶۹۹	۲/۸۱۴	۴۰
۱۴/۰۹	۵/۸۵	۵/۵۶	۳/۵۶	۶/۴۷۲	۳/۱۶۵	۴۵
۱۶/۱۹	۶/۵۴	۴/۲۵	۶/۰۵	۷/۲۱۹	۳/۴۶۷	۵۰

جدول ۱۱. جابه‌جایی شعاعی الگوی شماره ۳ (میلی‌متر)

درصد خطا	ر	د	ج	ب	الف	فشار هیدرواستاتیک (bar)
۱۳/۱۱	۰/۵۸	۰/۵۵	۰/۳۸	۰/۶۳۳	۰/۳۰۷	۵
۱۵/۰۹	۱/۱۲	۰/۶۸	۱/۰۸	۱/۲۷۲	۰/۶۲۵	۱۰
۱۱/۳	۱/۸۳	۱/۰۸	۱/۷۱	۱/۹۲۸	۰/۹۱۱	۱۵
۱۸/۰۷	۲/۴۳	۲/۰۹	۱/۶۴	۲/۵۵۱	۱/۲۴۹	۲۰
۱۳/۳	۲/۸۹	۲/۷۵	۲/۰۷	۳/۱۷۲	۱/۵۶۱	۲۵
۱۰/۸۶	۳/۶۷	۲/۳۱	۳/۴۳	۳/۸۴۸	۱/۸۶	۳۰
۱۴/۷	۳/۹۱	۳/۸۵	۲/۹	۴/۵۱۴	۲/۱۸۷	۳۵
۱۵/۶۹	۴/۳۸	۴/۲۷	۳/۳۴	۵/۰۶۵	۲/۴۹۹	۴۰
۱۵/۵۲	۴/۹۴	۳/۴۹	۴/۸۶	۵/۷۵۳	۲/۸۱۳	۴۵
۱۷/۹۹	۵/۰۱	۵/۲۴	۴/۱۹	۶/۳۹	۳/۱۱۴	۵۰

در جدول‌های (۹) تا (۱۲)، حروف استفاده شده به صورت زیر تعریف می‌شوند:

الف: کمینه جابه‌جایی شعاعی در شبیه‌سازی المان محدود (برحسب میکرومتر)

ب: بیشینه جابه‌جایی شعاعی در شبیه‌سازی المان محدود (برحسب میکرومتر)

ج: جابه‌جایی شعاعی اندازه‌گیری شده به روش تجربی در سمت راست استوانه (برحسب میکرومتر) (صفر درجه)

د: جابه‌جایی شعاعی اندازه‌گیری شده به روش تجربی در سمت چپ استوانه (برحسب میکرومتر) (۱۸۰ درجه)

ر: جابه‌جایی شعاعی به دست آمده به روش تحلیلی (برحسب میکرومتر)

در شکل (۲۹)، تفاوت جابه‌جایی شعاعی نمونه‌های مختلف در فشار ۵۰ بار به صورت تجربی، شبیه‌سازی و تحلیلی قابل مشاهده است. تمایز نتایج نشان داده شده در این شکل، نشان‌دهنده اثر الگوی پیچش است.

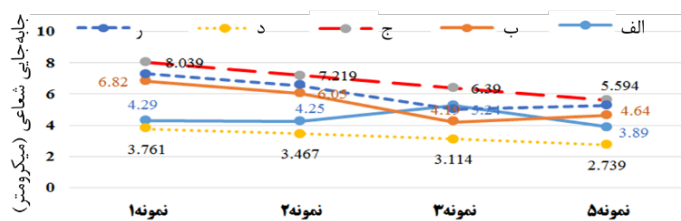
- در الگوی پیچش شماره ۱ در فشار ۵۰ بار، در نرم افزار المان محدود بیشترین مقدار جابه‌جایی ۸/۰۳۹ میکرومتر بوده که نسبت به الگوی پیچش شماره ۵ که بیشترین مقدار جابه‌جایی ۵/۵۹۴ میکرومتر است، ۳۰ درصد جابه‌جایی بیش‌تری داشته است و همچنین در نمونه تجربی، حداکثر جابه‌جایی شعاعی اندازه‌گیری شده در سمت راست استوانه شماره ۱ (صفر درجه) ۶/۸۲ میکرومتر و برای شماره ۵، ۴/۶۴ میکرومتر است که موید اختلاف ۳۲ درصدی نمونه‌ها در تست تجربی است. نتایج نمونه تجربی شماره ۱ با اختلاف ۱۵/۱۶ درصد در بین بازه موجود در نرم‌افزار المان محدود قرار گرفته است.

- نتایج نمونه تجربی شماره ۲ با اختلاف ۱۶/۱۹ درصد در بین بازه موجود در نرم‌افزار المان محدود قرار گرفته است.

- نتایج تجربی نمونه شماره ۳ با ۱۷/۹۹ درصد اختلاف در بین بازه موجود در نرم‌افزار المان محدود قرار گرفته است. نتایج تجربی نمونه شماره ۵ با اختلاف ۱۷/۰۵ درصد در بین بازه موجود در نرم‌افزار المان محدود قرار گرفته است. استفاده از ماتریس A، B و D برای بررسی تأثیر الگوی پیچش در تحلیل المان محدود نمونه‌ها، یک رهیافت پیشنهادی در این تحقیق است. انطباق نتایج تحلیل المان محدود، آزمون‌های تجربی و روش تحلیلی دقت قابل قبولی را برای این روش نشان می‌دهد.

تعارض منافع

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است."



شکل ۲۹. جابه‌جایی شعاعی نمونه‌های مختلف در فشار ۵۰ بار، الف: جابه‌جایی تجربی سمت چپ استوانه، ب: جابه‌جایی تجربی سمت راست استوانه، ج: بیشینه جابه‌جایی تحلیل عددی، ج: کمینه جابه‌جایی تحلیل عددی، ج: جابه‌جایی نتایج تحلیلی

در این تحقیق با مقایسه جابجایی‌های محاسبه شده می‌توان دریافت، رفتار مکانیکی پوسته‌های رشته‌پیچی شده که با جابه‌جایی شعاعی نمونه‌ها تحت فشار هیدرواستاتیک داخلی به دست آورده شده است، تابعی از الگوی پیچش است.

درواقع با افزایش شماره الگوی پیچش یا به عبارتی با هرچه ریزبافت‌تر شدن پوسته استوانه ساخته شده، جابه‌جایی شعاعی استوانه کاهش می‌یابد. این موضوع بیانگر آن است که هر چقدر پوسته به صورت ریزبافت‌تر تولید شود، رفتار نهایی سازه به سمت پوسته‌های با لایه متقارن نزدیک می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، با در نظر داشتن اهمیت کاهش وزن در استوانه‌های کامپوزیتی، تأثیر الگوهای پیچش مختلف الیاف تحت فشار هیدرواستاتیک داخلی بر استوانه‌های کامپوزیتی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد:

- الگوی پیچش بر روی نمونه‌های ساخته شده، نمونه‌های طراحی شده توسط نرم‌افزار آباکوس و همچنین روش تحلیلی تحت فشار هیدرواستاتیک داخلی تأثیرگذار است.
- از میان الگوهای یاد شده، الگوی شماره ۵، کم‌ترین جابه‌جایی به دلیل ریزبافت بودن و در پی آن بیش‌ترین استحکام و الگوی شماره ۱ بیش‌ترین جابه‌جایی را داشته است.

[11] J. C. Hastie, I. A. Guz, & M. Kashtalyan, "Structural integrity of deepwater composite pipes under combined thermal and mechanical loading," *Procedia Structural Integrity*, 28, pp.: 850-863, 2020.

[۱۲] م. رونق، مقدمه‌ای بر فرایندهای تولید، فرمنش، ۱۳۹۲.

[13] C. Ugural, *Stresses in beams, plates and shells*, 3rd ed., CRC Press, Boca Raton London New York, 2010.

[14] A. Onder, et al., "Burst failure load of composite pressure vessels," *Composite Structures*, vol. 89, no. 1, pp. 159-166, 2009.

[1] H. Takayanagi, M. Xia, and K. Kemmochi, "Stiffness and strength of filament-wound fiber-reinforced composite pipes under internal pressure," *Advanced Composite Materials*, vol. 11, no. 2, pp. 137-149, 2002.

[2] L. Parnas, and N. Katirci, "Design of fiber-reinforced composite pressure vessels under various loading conditions," *Composite structures*, vol. 58, no. 1, pp. 83-95, 2002.

[3] E. V. Morozov, "The effect of filament-winding mosaic patterns on the strength of thin-walled composite shells," School of Mechanical Engineering, University of KwaZulu-Natal, Howard College, Durban 4041, 2006.

[4] H. Bakaiyan, H. Hosseini, & E. Ameri, "Analysis of multi-layered filament-wound composite pipes under combined internal pressure and thermomechanical loading with thermal variations," *Composite Structures*, 88(4), pp.:532-541, 2009.

[5] R. Ansari, F. Alisafaei, & P. Ghaedi, "Dynamic analysis of multi-layered filament-wound composite pipes subjected to cyclic internal pressure and cyclic temperature," *Composite Structures*, 92(5), pp.:1100-1109, 2010.

[6] M. Bouhafaf, Z. Sereir, & A. Chateaufneuf, "Probabilistic analysis of the mechanical response of thick composite pipes under internal pressure," *International journal of pressure vessels and piping*, 95, pp.:7-15, 2012.

[7] N. D. Sayem Uddin, V. Morozov, "The effect of filament winding mosaic pattern on the stress state of filament wound composite flywheel disk," School of Engineering and Information Technology, The University of New South Wales, Canberra ACT, 2014.

[8] I. Y. Sülü, "Mechanical behavior of internal pressurized composite pipes jointed with embedded tubular sleeves," *Materials Testing* 59.3: pp.:272-277, 2017.

[9] L. Gemi, "Investigation of the effect of stacking sequence on low velocity impact response and damage formation in hybrid composite pipes under internal pressure. A comparative study," *Composites Part B: Engineering*, 153, pp.: 217-232, 2018.

[10] A. Khodabakhshi, H. Asadi Gilakejani, "Failure Analysis of Glass Fiber Reinforced Plastic Pipes and Crack Inlet Opening with J-Integral Criteria Under Internal Pressure," *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, vol 52, Issue 5, pp. 1179-1192, 2020.



COPYRIGHTS

© 2023 by the authors. Licensee Iranian Space Research Center of Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)