نشریه علمی پژوهشی



علوم و فناوری **کامپوزیت** http://jstc.iust.ac.ir

طراحي و تحلیل دریچه دسترسی مخازن کامپوزیتی تحت فشار خارجی

رضا بطالبلویی¹، محمود ذبیح پور²*، پویا دهستانی³، جواد بابایی¹

1-كارشناس ارشد، پژوهشكده علوم و فناوري شمال، دانشگاه صنعتي مالك اشتر، تهران

2- استادیار، مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالکاشتر، تهران

3- دکتری، پژوهشکده علوم و فناوری شمال، دانشگاه صنعتی مالکاشتر، تهران

*تهران، صندوق پستى 1774-zabihpoor@mut.ac.ir

چکیدہ	اطلاعات مقاله:
 بکارگیری کامپوزیتها در ساخت مخازن تحت فشار از زمینههای مهم کاربردی این مواد است. بررسی این موارد کاربردی، در حالت	دريافت: 98/07/10
پیچیدهتر اعمال فشار خارجی بسیار مورد توجه میباشد. یکی از معضلات اصلی در طراحی و ساخت مخازن تحت فشار خارجی	پذيرش: 99/10/03
کامپوزیتی،طراحی مناسب دریچههای ضروری مختلف بر روی آن و ملاحظات مربوطه است. از آنجا، بررسی استحکام و مقاومت سازهای	كليدواژگان
مخزن در موقعیت منافذ و دریچهها، اجتنابناپذیر میباشد. در این مقاله، ضمن ارائهی یک فرایند طراحی جهت ایجاد دریچه بر روی	مخازن كامپوزيتى
مخازن کامپوزیتی، شدت تأثیر حضور دریچه تحقیق گردید. نظر به اهمیت مواد و سازه کامپوزیتی در استقامت بدنه، سازه مخزن	دریچهٔ دسترسی
کامپوزیتی در نرمافزار قدرتمنداجزاء محدود آباکوس شبیهسازی گردید. در همین راستا، رفتار مکانیکی سازه بر اساس پارامترهای	تحليل اجزاى محدود
تاثیرگذار در تعریف طرحهای مختلف دریچه، مورد ارزیابی قرار گرفت. در نتایج حاصل، تاثیر حضور دریچهدر نسبت ابعادی بزرگ بر رفتار	كمانش
مخزن نشان داده شده است. در انتها، نتایج محاسبات اجزا محدود، اهمیت ملاحظات بکارگیری و طراحی صحیح حلقه تقویت-	فشار هيدرواستاتيك خارجي
کننده(قطعهی واسط) در دریچهها را به عنوان یکی از تمهیدات جبران کننده عوارض کاهشی بار کمانشی ناشی از وجود دریچه در مخزن	
نمایش داده است.	

Design and Analysis of Opening Closure on the Composite Vessel Subjected to External Pressure

Reza Batalebluie¹, MahmoodZabihpoor^{2*}, Pouya Dehestani¹, Javad Babaei¹

1-North Institute of Science & Technology, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran 2-Department of Aerospace Engineering, Malek Ashtar university of Technology, Tehran, Iran

*P.O.B. 15875-1774, Tehran, Iran, zabihpoor@mut.ac.ir

د کامپوزیت

Keywords	Abstract
Composite Vessels Opening closure FE Analysis Buckling External Hydrostatic Pressure	Composites are commonly used in pressure vessels. One of the critical problems in manufacturing composite vessel under the external pressure is sealed opening design and its considerations. It's required to review the body resistance in opening locations. In this paper, a special design process for opening closure presented and the influence of such cutouts on vessel body studied. Because of the importance of body resistance, the vessel material and structure mechanical performance were analytically evaluated. Then, Mechanical behavior of the vessel structure was investigated based on the parameters affecting the definition of different opening designs through finite element simulation and analysis in ABAQUS commercial code/software.Hence, the effect of the presence of openings, including the consequences of creating asymmetry in the structure, has been determined in a large aspect ratio. Finally, the results represents, the importance of complying practical requirements and implementation of reinforcement rings in the opening locations to get the suitable design as one of the most effective solutions to compensate the opening reduction consequences i.e.; buckling strength reduction and highly increasing asymmetry.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید: :Please cite this article using

Batalebluie, R. Zabihpoor, M. Dehestani, M. and Babaei, J., "Design and Analysis of Opening Closure on the Composite Vessel Subjected to External Pressure", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 3, pp. 1000-1012, 2020.

1–مقدمه

کامپوزیتها از ترکیب دو یا چند مادّه ی همگن و در جهت دستیابی به یک تعادل در خصوصیات مادی در محصول نهایی ساخته می شوند. در همین راستا می توان به تقویت استحکام¹ ، صلبیت² ، عمر خستگی، چقرمگی شکست، مقاومت محیطی و همچنین کاهش وزن و هزینه ی تولید بعنوان برخی از دلایل ایجاد و توسعه ی کامپوزیت ها اشاره نمود [1]. طبیعت غنی از مواردی است که در آنها از مواد کامپوزیتی استفاده شده است. بطور نمونه چوب یک ماده کامپوزیتی با ساختار الیافی است که در آن الیاف سلولزی در ماتریس خاصی با نام لیگنین³ قرار گرفته اند. الیاف سلولزی دارای استحکام کششی خوبی هستند اما بسیار انعطاف پذیر می باشند در حالی که ماتریس لیگنین نوبنههای مهندسی قدیمی کامپوزیتها می توان به سیمان و آسفالت اشاره کرد[2].

رایج ترین فرم مواد کامپوزیتی با کارایی سطح بالا، پلاستیکهای تقویت شده با الیاف⁴ هستند. در این گونه مواد الیاف با استحکام و صلبیت بالا و چگالی کم در یک زمینهی(ماتریس) پلاستیکی قرار می گیرند. در واقع استحکام و صلبیت بیشتر از ناحیهی الیاف به کار رفته تأمین می گردد و ماتریس پلاستیکی حفظ راستا و امتداد الیاف و توزیع بار گذاری پیرامون الیاف (بخصوص الیاف آسیب دیده) را بر عهده دارد[1]. سه دلیل برای استفاده از الیاف به عنوان یک ماده مهندسی با کارایی بالا عبارت است از[2]:

ایت به عوران یک سعد مهمنسی به عربی به عبرای میت ارایی. 1- قطر کوچک الیاف نسبت به اندازه دانهها⁵ که این ویژگی باعث میشود تا مقدار بزرگتری از استحکام نامی نسبت به فرم حجمی محقق شود. چرا که با کوچک شدن سایز ماده، احتمال وجود نقایص هندسی در ماده کمتر است.

2- نسبت بالای طول به قطر که زیاد بودن این پارامتر باعث می شود تا بخش زیادی از بار اعمال شده به کامپوزیت از طریق ماتریس به الیاف انتقال یابد. 3- انعطاف پذیری بالا در طراحی که مختص موادی با قطر کم و صلبیت پایین است. این ویژگی موجب می شود تا تکنیک های زیادی برای ساخت کامپوزیت با این الیاف مقدور باشد. در واقع انعطاف پذیری ذکر شده در این قسمت تابعی از مدول یانگ و قطر الیاف است. به طور مشخص هرچه صلبیت ماده کمتر باشد، راحت تر می توان در آن خمش ایجاد نمود که علت وابستگی انعطاف پذیری به قطر الیاف را می توان با توجه به فرمول ممان خمشی توجیه نمود.

عدم وجود خوردگی و پوسیدگی برای کامپوزیتها، هزینهی نگهداری را در کاربردهای دریایی کاهش میدهد. همچنین مزیت صرفهجویی وزنی در صورت به کارگیری کامپوزیتها باعث استفادهی گسترده از این مواد در حوزهی دریایی، هوایی و سایر صنایع شدهاست.

بکار گیری مواد کامپوزیتی در مخازن تحت فشار، مستلزم استحکام وآببندی کامل آنها میباشد. در شرایط اعمال فشار خارجی بر بدنه، علاوه بر خطر شکست مادی، احتمال وقوع پدیدهی کمانش نیز وجود دارد. پژوهشهای فراوانی به بررسی رفتار کمانشی و استحکامی آنها در شرایط بارگذاری مختلف پرداختهاند. مسیجر و همکارانش[3] با استفاده از روابط تحلیلی و بکارگیری یک الگوریتم ژنتیک، یک لایهچینی بهینه برای مخازن کامپوزیتی درشرایط

- ¹ Strength ² Stiffness
- ³Lignin ⁴Fibre reinforced plastic ⁵ Grain Size

فشار خارجی هیدرواستاتیکی ارایه کردهاند. آنها سپس به روش تجربی، الگوی لایه چینی بدست آمده را برای دو نمونه از جنس کربن- اپوکسی و شیشه- اپوکسی مورد بررسی قرار دادند. مقایسه ی نتایج تجربی و تحلیلی، حاکی از دقت بالای نتایج عددی است. مون و همکاران [4] کمانش لولههای 6 کامپوزیتی دارای الیاف کربن و رزین اپوکسی را که با روش رشته پیچی ساخته شدهاند، مورد بررسی قرار دادند. آنها فشار وقوع کمانش را برای سه الگوى پيچش [°90 ، °30±]، [°90 ، °45±] و [°90 ، °60±] با روش اجزای محدود محاسبه کردند و سپس با انجام آزمون تجربی، صحت نتایج بدست آمده از روش عددی را ارزیابی نمودند. اختلاف اندک موجود میان نتایج عددی و تجربی حاکی از دقت بالای روش عددی به کار رفته در این پژوهش میباشد. همچنین نتایج تحلیل و آزمون تجربی نشان دادند که بدنهی ساخته شده با الگوی پیچش مورب ${}^{\circ}60^{\pm}$ ، بیشترین تحمل را در مقابل فشار خارجی هیدرواستاتیک دارا میباشد. هور و همکاران[5] به روش عددی، رفتار پسکمانشی ⁷ در سیلندرهای کامپوزیتی تحت فشار هیدرواستاتیک خارجی را مورد مطالعه قرار دادند. آنها در برسی عددی از معیار حداکثر تنش برای لحظه ی شکست استفاده نمودند و برای اعتبارسنجی نتایج عددی، اقدام به بررسی تجربی بدنههای کامیوزیتی کربن- ایوکسی نمودند. گرچه تحلیل عددی نتوانست مودهای کمانشی ایجاد شده بر روی بدنه را بطور دقیق نمایش دهد، اما میزان فشار کمانش تخمین زده توسط آن به میزان واقعی بسیار نزدیک بود. هان و همکاران[6] بهصورت تحلیلی و عددی به بررسی رفتار کمانشی و پسکمانشی پوستههای استوانهای کامپوزیتی پرداختند. آنها بر پایه معادلات کمانش ارایه شده توسط ASME⁸و ABS⁹ یک رابطهی تحلیلی برای کمانش در کامپوزیتها به دست آوردند. لازم به ذکر است که در پژوهش مذکور مدلسازی عددی، به هر دو صورت خطی و غیرخطی استاتیکی انجام شده است.بطالبلویی و همکارانش در پژوهشی[7] نحوهی شکست بدنههای کامپوزیتی تقویتشده با تقویت کنندههای¹⁰ محیطی را تحت فشار خارجی هیدرواستاتیکی بهصورت تجربی و عددی مورد مطالعه قرار دادند. آنها در این پژوهش ضمن مطالعهی شکست کمانش در بدنهها، تغییرات میدان تنش را در موقعیتی که بیشترین تغییرشکل را داشت بررسی نمودند و همچنین توانستند با بهکارگیری تقویت کننده های محیطی، کاهش وزنی در حدود 5٪ نسبت به حالت عدم بکارگیری تقویت کننده در بدنه ایجاد نمایند.دهستانی و همکارانش در پژوهشی[8] نحوه ی شکست کمانشی مخازن جدارنازک کامپوزیتی را تحت فشار محوری مورد واکاوی قرار دادند. در تحقیق آنها به کمک روش اجزای محدود و با استفاده از نرمافزار آباکوس، تأثیر اغتشاشات هندسی بر بدنه مورد مطالعه قرار گرفت. در این مسیر از سه نوع تحلیل کمانش خطی، کمانش استاتیکی غیرخطی و دینامیکی بهره برده شد. نتایج نشان داد که تحلیلهای ديناميكي و استاتيكي با دقت نسبتاً خوبي، (حدود 3 تا 7 ٪)قادر به تخمين

احمدی[9] با استفاده از تئوری تحلیلی لایهای تنشهای برون صفحهای در پوستههای استوانهای کامپوزیتی با طول محدود را تحت بارگذاری شعاعی مورد بررسی قرار داد. همچنین با استفاده از تحلیل عددی پوسته کامپوزیتی

نيروى كمانش واقعى مىباشند.

نشریه علوم و فناوری**کا میو زیت**

⁶₇ Filament Winding

⁷Post-Buckling

⁸ American Society of Mechanical Engineering ⁹American Bureau of Shipping

¹⁰Stiffeners

از جنس کربن-اپوکسی را تحت فشار شعاعی داخلی و خارجی بررسی نمود. خلیلی و همکاران[10] به روش تجربی و عددی پدیدهی کمانش را در پوستههای کامپوزیتی مشبک بررسی کردند. آنها تأثیر پارامترهای مختلف طراحی را از جمله ضخامت پوسته، الگوی لایه چینی و ارتفاع ریب ها مطالعه نمودند.داداشی و رحیمی[11] رفتار کمانشی و پسکمانشی استوانههای کامپوزیتی رشته پیچی شده تحت بارگذاری فشاری جانبی بررسی نمودند. در پژوهش مذکور برای مدلسازی آسیب در بدنه از مدل هشین سه بعدی استفاده شد.نارکی و قابضی در مرجع [9] با روش تحلیلی، مخازن جدار ضخیم کامپوزیتی را تحت اثر فشار و دمای سیکلی داخلی مورد بررسی قرار دادند و تغییرات تنشها و کرنشها را مطالعه نمودند. باقری و همکارانش[10] به روش تحلیلی و با استفاده از الگوریتم ژنتیک، به بهینهسازی وزنی و کمانشی پوستههای تقویتشدهی کامپوزیتی لایهای پرداخته اند. انصاریان و جعفری[11] ارتعاشات یک پوستهی کامپوزیتی را با مایع داخلی بررسی نمودند. آنها فرکانس طبیعی از روش انرژی و اصل انرژی پتانسیل کمینه را محاسبه نمودند. همچنین آنها با نرمافزار آباکوس آنالیز مودال بدنه را انجام دادند.طراحی دریچه بر روی بدنههای مخازن همواره بدلیل ایجاد نواقص هندسی¹ و متعاقب آن، ایجاد تمرکز تنش در ناحیهٔ مربوطه، از اهمیت خاصی برخوردار است. بنابراین بررسی سازه در این موضع جهت پیش بینی رفتار مکانیکی مواد اجتنابناپذیر به نظر میرسد. در همین راستا پژوهشهای بسیاری بر روی تأثیر دریچهها در وقوع شکست در سازهها و مخازن كامپوزيتى انجام شده است.الياسى و همكارانش [12] مخازن كامپوزيتى با برشهای دایروی را تحت فشارهیدرواستاتیک خارجی مورد بررسی قرار دادند. در پژوهش آنها موقعیت مناسب برای ایجاد دریچه بر روی مخزن با استفاده از روش اجزای محدود تعیین گردید. همچنین آنها برای ارزیابی نتایج شبیهسازی، رفتار مکانیکی دو نمونه را در آزمون فشار خارجی تا نقطهی شکست مورد بررسی قرار دادند که نتایج آن، حاکی از دقت بالای مدلسازی بود. نتایج پژوهش مذکور نشان داد که با افزایش اندازه دریچه فشار کمانش مخزن كاهش مىيابد. تفرشى[13] پاسخ مكانيكى مخازن كامپوزيتى داراى دریچهی مربعی را در مواجهه با پدیدهی کمانش و پس کمانش تحت فشار محوری با استفاده از روش اجزای محدود مورد بررسی قرار داد. مطابق نتایج او با افزایش اندازهی دریچهها، پدیدهی کمانش زودتر اتفاق میافتد و در واقع بار کمانشی کاهش مییابد. طاهری و همکارانش در مرجع [14] بصورت عددی و تجربی رفتار کمانش بدنه های استوانه ای کامپوزیتی دارای دریچه را تحت فشار محوري مورد مطالعه قرار دادند. أنها تأثير اغتشاشات هندسي اوليه را بر شکست کمانشی بدنهها مورد بررسی قرار دادند. در آن تحقیق جهت راستی آزمایی نتایج عددی، بدنه ای از جنس شیشه- اپوکسی با الگوی [23.90]، 23-، 90] تحت فشار محورى قرار گرفت. نتايج تجربى از مطابقت مناسب با نتایج عددی حکایت داشته است.

یکی از مسائل مهندسی مهم در حوزهی طراحی مخازن و سازههای تحت فشار هیدرواستاتیک، انتخاب سازو کاری برای نصب در پوش های متناظر با سوراخهای ایجاد شده بر روی دریچه های ایجاد شده در بدنه می باشد. در واقع پژوهش های انجام شده بر روی تأثیر دریچه ها بر مخازن کامپوزیتی، صرفاً بر روی بحث تأثیر منافذ در مقاومت کلی متمرکز شده اند و از تأثیرات الزامات نصب دریچه ها و سازوکارهای آنها صرف نظر کرده اند[15-2]. شایان ذکر

(2)

است که بزرگ بودن اندازه ی دریچه بر روی بدنه منجر به پیچیدگی طراحی موقعیت نصب دریچه خواهد شد. همچنین بر خلاف مخازن فلزی که می توان با عملیات جوشکاری قطعات تقویت کننده را به به بدنه اصلی متصل کرد، در بدنه های کامپوزیتی، این امکان به دلیل محدودیت های فرآیند ساخت با دشواری های فراوانی همراه می باشد که این مهم، یک طراحی مناسب را می طلبد [22-22].

پژوهش حاضر که با هدف بررسی تاثیر دریچه بر رفتار مکانیکی مخازن کامپوزیتی انجام شده ، به ارائه یک طراحی منحصر به فرد متناسب با دریچههای با ابعاد نسبتاً بزرگ پرداخته است. در این مسیر پاسخ مکانیکی بدنه به ایجاد دریچه بر روی مخازن کامپوزیتی ارزیابی گردید.

2- اهمیت ویژگیهای رفتارهای مکانیکی مواد کامپوزیت

خواص کامپوزیت از خواص مواد پایه ی آنها مشتق می شود. بدین ترتیب، کامپوزیت ها دارای اکثر ویژگی های مفید مواد پایه ی خود می باشد. بط ور نمونه کامپوزیت های پلیمری، به دلیل استحکام بالای الیاف، دارای مقاومت بالایی در راستای الیاف می باشند. همچنین ماتریس به عنوان جزء اصلی دوم کامپوزیت، الیاف را در جای خود نگه می دارد و خواص الکتریکی یا شیمیایی کامپوزیت را بهبود می بخشد. با استفاده از روابط موجود برای خواص مکانیکی کامپوزیت ها و ویژگی های پایه برای الیاف و رزین می توان خواص کامپوزیت مورد مطالعه را بدست آورد. در جدول 1، خواص مکانیکی برای الیاف شیشه و رزین اپوکسی آورده شده است.

جدول 1 مشخصات الياف و رزين ماتريس [17-15] Table 1 Properties of Fiber & Matrix [15-17]

رزين	الياف شيشه	را. ام ت	
Epoxy	E-Glass	پر ا لتتر	
1380	2580	چگالی (kg/m ³)	
4.6	69	مدول يانگ (GPa)	
0.36	0.22	ضريب پواسون	
60	3450	استحکام کششی (MPa)	
100	1550	استحکام فشاری (MPa)	

با جایگذاری مقادیر ارایه شده در جدول 1 و درصد حجمی اجزای کامپوزیت در روابط (1) تا (4)، چگالی و خواص مکانیکی کامپوزیت مورد مطالعه در این پژوهش بدست آمد [18]:

$$\rho = (\rho_f . V_f) + (\rho_m . V_m) \tag{1}$$

$$E_1 = (E_f \cdot V_f) + (E_m \cdot V_m)$$

$$E_{2} = (E_{f}.E_{m}) / (E_{m}.V_{f} + E_{f}.V_{m})$$
(3)

$$\boldsymbol{v}_{12} = \boldsymbol{v}_f \cdot \boldsymbol{V}_f + \boldsymbol{v}_m \cdot \boldsymbol{V}_m \tag{4}$$

که در آنها $\rho = E_2 \cdot E_1 \cdot \rho$ به ترتیب چگالی، مدول الاستیسیته در جهت عمود بر الیاف و ضریب پواسون است جهت الیاف، مدول الاستیسیته در جهت عمود بر الیاف و ضریب پواسون است و V_f و V_f درصد حجمی رزین میباشد. همچنین پارامتر مدول برشی بطور جداگانه برای الیاف و رزین از رابطه (5) محاسبه شد و سپس با استفاده از رابطه (6) این پارامتر برای کامپوزیت بدست آمد[13].

¹ Geometrical Imperfections

$$G = E / 2(1+\nu) \tag{5}$$

$$G_{12} = (G_f \cdot G_m) / (G_f \cdot V_m + G_m \cdot V_f)$$
(6)

در روابط (5) و (6)، G مدول برشی برای مواد همسانگرد و G_{12} مدول برشی برای مواد همسانگرد و G_{12} مدول برشی برشی در صفحه 2-1 می باشد. همچنین مدول برشی G_{23} برابر مدول برشی رزین در نظر گرفته شد. با توجه به روابط فوق برای کامپوزیتی از جنس E-glass/Epoxy که درصد حجمی الیاف در آن برابر 55 % باشد، ثوابت مکانیکی مطابق جدول 2 محاسبه می شود.

جدول 2 مشخصات ماده مرکب

Table 2 Properties of the Composite				
	مقدار	واحد	پارامتر	
-	40.02	GPa	E_1	
	9.45	GPa	E_2	
	0.283	—	V_{12}	
	3.5	GPa	G_{12}	
	3.5	GPa	G_{13}	
	1.7	GPa	G_{23}	
	2040	kg/m ³	ρ	

استحکام کامپوزیتها همانند مدول یانگ از ترکیب خواص الیاف و رزیـن قابل دستیابی است. قابل ذکر استکه روابط ارایه شده بـرای اسـتحکام از دقـت کمتری نسبت به مدول یانـگ برخـوردار اسـت چـرا کـه تأثیرپـذیری پـارامتر استحکام از ناهمگونیهای هندسـی و منـاطق تمرکـز تـنش بسیار بیشـتر از مدول یانگ آن است. بطور کلی در کامپوزیتها، استحکام عرضی بسیار کمتر از استحکام طولی است. همچنین ممکن است که استحکام کششـی و فشـاری در یک راستا دو مقدار متفاوت باشند. در ساختار لایـهای کـامپوزیتی معمـولاً استحکام کششی عرضی کمترین مقدار استحکام را دارا میباشد.

در محاسبهی مدول یانگ و استحکام بـرای کامپوزیـتهـا، یـک فـرض کلیدی بر اساس چسبندگی کامل بین رزین و الیاف در نظر گرفته میشود. بر اساس این فرض جابجایی و کرنش در الیاف و رزیـن و کامپوزیـت بـا یکـدیگر برابر است.

$$\mathcal{E}_c = \mathcal{E}_f = \mathcal{E}_m \tag{7}$$

در رابطه یاخیر پارامتر ٤ نشاندهنـده یکرنش میباشـد. همچنـین زیـر نویسهای f، c و m به ترتیب نشاندهنده یکامپوزیت، الیاف و مـاتریس میباشد.



Fig. 1 Schematic of stress distribution in of composite elements [19] شکل 1 شمای توزیع تنش در اجزای کامپوزیت[19]

با توجه به فرض فوق و شکل 1 رابطه تنش بوجود آمـده در کامپوزیـت و هریک از اجزای تشکیل دهندهی آن بصورت زیر خواهد بود:

$$\sigma_{c1} = \sigma_{fl} v_f + \sigma_{ml} v_m \tag{8}$$

در رابطهی (8)، σ و V، تنش و درصد حجمی است و زیرنویس lنشان دهنده ی جهت طولی الیاف است. با ترکیب قانون تنشهای طولی در کامپوزیت و نمودارهای تنش_کرنش الیاف و رزین می توان به رابطهای برای محاسبه ی استحکام طولی کامپوزیت دست یافت. در شکل زیر شمای کلی نمودار تنش – کرنش برای کامپوزیت های پایه پلیمری و اجزای تشکیل دهنده ی آن در کنار یکدیگر ارایه شده است. لازم به ذکر است که برای کامپوزیتهای پایه سرامیکی این نمودار به گونه ای متفاوت است.

همانگونه که در شکل (2) مشاهده مـیشـود، کـرنش رزیـن در لحظـهی شکست بزرگتر از کرنش الیاف در لحظهی شکست میباشد (e_{nl} > e_{fl}).

در ادامه برای بیان استحکام کامپوزیتها از مدل ارائه شده توسط کلی و دیویس¹ [19] استفاده خواهد شد. مطابق این مدل سه فرض استفاده شده برای محاسبهی استحکام عبارتست از:

1- استحکام در همه الیاف ا اهم برابر است.
 2- رفتار ماده تا لحظه شکست بصورت خطی الاستیک است.

- رحد عدم عدم عدم المحد بمراح على محمد عدم المحد - 3
 - كرنش طولى در رزين، الياف و كاميوزيت با هم برابر است.

با توجه به شکل 2، کامپوزیت در کرنشی معادل کرنش شکست الیاف، دچار واماندگی خواهد شد که برابر است با:

$$e_{f1} = \frac{S_{fl}}{E_{fl}} \tag{9}$$

که در آن S_{fl} استحکام نهایی الیاف و e_{fl} کرنش الیاف در راستای طولی در لحظهی شکست است.



Fig. 2 Schematic of Mechanical Behaviour (stress-strain relationship) of Fiber & Matrix in a Polymeric Matrix CompositeResults of threepoint bending test for composite plate[19]

¹Kelly & Davies

نشریه علوم و فناوری **کا میو زیت**



Fig. 3 Diagram of Analytical & Experimental values of «liongitudinal compressive strength vs volumetric percent of fiber for E-glass/Epoxy composite[19]

شکل 3 نمودار مقادیر تئوری و تجربی استحکام فشاری طولی برای کامپوزیت Eglass-Epoxy به ازای مقادیر مختلف الیاف[19] که در آن S_{f12} و S_{m12} استحکام برشی الیاف و رزیـن مـیباشـند. مطـابق نتایج آزمایشگاهی برای کامپوزیت E-glass/Epoxy بـا درصـد حجمـیهـای مختلف الیاف، مقادیر به دست آمده به مقادیر حاصل از رابطهی مـود شکست کششی عرضی بسیار نزدیک است. شکل زیـر مقـادیر بدسـت آمـده از روابط مودهای شکست مختلف و نتایج آزمایشگاهی برای استحکام فشاری محوری را برای درصد حجمیهای محوری را برای درصد حجمیهای مختلف الیاف نشان میدهد.

از آنجایی که شکست در یک لایه 1 کامپوزیتی تحت کشش عرضی در میزان تنش کمتری به وقوع می پیوندد، در اغلب مواقع این حالت از شکست به عنوان اولین مرحله شکست اتفاق می افت. بر همین اساس در ساختارهای کامپوزیتی لایه 2 ، شکست اولین لایه 3 معمولاً به علت کشش عرضی اتفاق می افتد. در واقع پایین بودن میزان استحکام عرضی کششی و متعاقباً کرنش نهایی متناظر آن، به علت وجود تمرکز کرنش در رزین اطراف الیاف می باش. در ابطه ی محاسبه ی است می گردد.

$$S_T^+ = E_2 e_T^+ = E_2 \frac{e_m}{F} = \frac{E_2 s_m^+}{E_m F}$$
(16)

در رابطهی (16)، پارامتر ⁺³ استحکام نهایی ماتریس و F معکوس ضریب تمرکز کرنش است که نسبت کرنش عرضی ماتریس به کامپوزیت میباشد. پس از فرا رسیدن شکست الیاف اگر رزین قادر باشد تا نیرو را تحمل نماید، کرنش کامپوزیت قادر است تا کرنش شکست رزین افزایش یابد. اما در عمل رسیدن به نقطهی شکست الیاف به منزلهی شکست کامپوزیت خواهد بود. زمانیکه تنش الیاف به حداکثر تنش خود یعنی مقدار S_{fl} میرسد، تنش طولی در رزین برابر خواهد بود با: $S_{ml} = E_m e_d$ (10)

بنابراین تنش کامپوزیت در ایـن لحظـه کـه همـان اسـتحکام کششـی طـولی کامپوزیت میباشد برابر است با:

$$S_{L}^{+} = S_{fl}V_{f} + S_{mfl}(1 - V_{f})$$
(11)

نظر باینکه مود شکست در بارگذاری فشاری طولی با کششی متفاوت است، استحکام کامپوزیت در این دوحالت با یکدیگر متفاوت است. یطور کلی سه مود گسیختگی اصلی برای حالت فشاری طولی در نظر گرفته میشود که هر یک از آنها ممکن است برای نوع خاصی از کامپوزیتها تقدم داشته باشد. این مودهای گسیختگی عبارتند از [19]:

- گسیختگی کمانشی الیاف در مقیاس میکرو²
 - شکست کششی عرضی³
 - گسیختگی برشی الیاف بدون کمانش⁴

گسیختگی کمانشی الیاف در مقیاس میکرو در دو حالت متفاوت عرضی و برشی اتفاق میافتد. در حالت عرضی رشتههای الیاف به صورت موجهای سینوسی تغییرشکل میدهند. این مود شکست برای کامپوزیتهایی با درصد حجمی بسیار پایینالیاف موضوعیت دارد و این در حالی است که برای حالتهای واقعی حالت مود برشی اتفاق میفتد. در حالت برشی جابجایی همهی رشتههای الیاف با یکدیگر همفاز هستند. در صورتیکه مود شکست فشاری بصورت کمانش برشی باشد، استحکام فشاری طولی کامپوزیت از رابطهی زیر بدست میآید[17].

$$S_L^- = \frac{G_m}{1 - V_f} \tag{12}$$

در صورتی که مود شکست در بارگذاری فشاری طولی، از نوع شکست کششی عرضی باشد، رابطهی استحکام به صورت زیر خواهد بود [17]:

$$S_{L}^{-} = \frac{E_{1}e_{T}^{+}}{V_{12}}$$
(13)

در رابطهی (13)، پارامتر
$$e_T^+$$
، حداکثر کرنش کششی عرضی کامپوزیـت
است که بر حسب حداکثر کرنش کششی عرضی ماتریس e_m^+ از رابطهی زیـر
محاسبه میشود:

$$e_T^+ = e_m^+ (1 - \sqrt[3]{V_f})$$
(14)

رابطهی استحکام فشاری طولی برای مود گسیختگی برشی بدون کمانش
که بیشتر برای کامپوزیتهای کربنی استفاده میشود، عبارتست از [19]:
$$S_L^- = 2(s_{f\,12}V_f + s_{m12}V_m)$$

⁴ Lamina

⁵ Laminates

⁶ First Ply Failure

¹ Fiber Microbuckling ² Transverse Tensile Rupture

³ Shear Failure of fibers without buckling

$$F = \frac{e_m}{e_T^+} \tag{17}$$

پارامتر F با افزایش درصد حجمی الیاف افزایش مییابد و برای کامپوزیتهایی که بخش زیادی از آنها را الیاف تشکیل میدهد، مشکل آفرین است. برای کامپوزیتهایی که شرط 1 $< E_m / E_{f2}$ را ارضا نمایند، میزان ضریب تمرکز کرنش از نمودار ارائه شده در زیر محاسبه می گردد [19].

همانگونه که در شکل فوق مشاهده می گردد، با افزایش درصد حجمی الیاف، ضریب تمرکز افزایش مییابد. در واقع بر اساس این نمودار افزایش درصد حجمی الیاف برای بهبود استحکام طولی باعث کاهش استحکام عرضی میشود که امری نامطلوب برای میزان استحکام بدنه میباشد. از همین رو در فرآیند رشته پیچی حداکثر درصد حجمی الیاف حدود 60٪ میباشد. استحکام فشاری عرضی نیز همانند استحکام کششی عرضی محاسبه می گردد با این تفاوت که در روابط از استحکام و کرنش فشاری ماتریس استفاده گردد. حد بالای خاصیت استحکام برشی کامپوزیت برابر همین خاصیت رزین میباشد. از همین رو در پژوهش حاضر استحکام برشی کامپوزیت برابر رزین میباشد. گرفته شد. بدین ترتیب با توجه به روابط ارائه شده و انتخاب درصد حجمی الیاف 55٪ (که بر اساس مطالب مذکور در این قسمت، در محدودهی مجاز میباشد)، مقادیر استحکام کامپوزیت ساخته شده از الیاف شیشه نوع-E میباشد)، مقادیر استحکام فشاری در این قسمت، در محدودهی مجاز میباشد)، مقادیر استحکام فشاری در این قسمت، در محدوده مجاز میباشد)، مقادیر استحکام فشاری در این قسمت، در محدوده محمای میباشد)، مقادیر استحکام فشاری در این قسمت، دا مین میباز میبای محاسبهیاستحکام فشاری در راستای الیاف از رابطه می گر است که مانشی الیاف در مقیاس میکرو در حالت برشی (رابطه 12) استفاده شد.



Fig. 4 Diagram of compositestrain concentration factor Inverse vs volumetric percent of fiber[19]

شکل 4 نمودار ضریب تمرکز کرنش کامپوزیت بر حسب درصد حجمی الیاف[19]

جدول 3 مشخصات استحکامی ماده مرکب

Table 3 Strengths of the Composite				
مقدار	واحد	پارامتر		
2000	MPa	استحکام کششی در جهت الیاف		
333	MPa	استحکام فشاری در جهت الیاف		
22.3	MPa	استحکام کششی در جهت عمود بر الیاف		
37.2	MPa	استحکام فشاری در جهت عمود بر الیاف		
34.6	MPa	استحكام برشي		

3- ساخت لولههای کامپوزیتی و سوراخکاری آنها

برای ساخت قطعات کامپوزیتی روشهای مختلفی نظیر روش پالتروژن و رشته پیچیوجود دارد. با توجه به الزامات هر یک از روش ها که در منابع مختلف آورده شده است روش متداول برای تولید لولهها و مخازن تحت فشار کامیوزیتی، فرآیند رشته پیچیمی باشد. در این روش الیاف از دوکهای مختلف باز می شود و ضمن عبور از یک مخزن حاوی رزین، آغشته به رزین می گردد. سپس الیاف رزیناندود پس از گذشتن از بین چند غلتک که جهت گرفتن رزين اضافه و يكنواخت كردن توزيع آن روى الياف در سيستم تعبيه می شوند، به دور یک استوانه مدور (مانـدرل⁴)، پیچیـده مـیشـود. بـا کشـیده شدن الیاف در حین پیچیدن بر روی ماندرل،الیاف مقاومت و سختی مناسب را درسازه پيدا مي كند [17]. در اين روش مي توان به جاي الياف از نوارها يا پارچه به صورت دستی و اتوماتیک استفاده نمود.با توجه به پیوسته بودن مواد در لولهها و مخازن کامیوزیتی تولید شده، ایجاد نمودن دریچهها و منافذ بر روی آنها مستلزم طراحی سازوکاری برای اتصال دریچه به بدنه و رعایت الزامات ماشینکاری کامپوزیتها میباشد. همانگونه که معیارهای طراحی و روش ها برای کامپوزیت های لایه ای و ساندویچی در حال گسترش اند، طراحی اتصالات بین کامیوزیت ها یا کامیوزیت با فلزات دیگر نیز در حال گسترش و توسعه میباشد. محققان بر این باورند که مراحل پیشرفت در اتصال آلومینیومها در دهه های 1940 و 1950می تواند یک نقشه راه خوب برای اتصال های کامپوزیتی باشد؛ گرچه بعضی از روش های اعمال شده برای آلومینیوم (مانند جوشکاری) در کامپوزیت ها غیر قابل اجراست[20]. یکی از انواع اتصالات بکار رفته در ساختارهای کامپوزیتی که در این پژوهش نیز بکار گرفته شده است، اتصالات مکانیکی می باشند. به طور نمونه استفاده از پیچهابرای برقراری اتصال بین دو قطعهی همواره مورد توجه بوده است. یک از معایب به کارگیری این اتصالات، آسیب دیدن کامپوزیت در موضع سوراخها در اثر تمرکز تنش موجود در اطراف پیچ و همچنین ناپیوستگی اجزای کامیوزیت در این ناحیه می باشد که در شکل زیر نشان داده شده است. برای برطرف کردن این مشکل از واسط فلزی بین کامپوزیت و پیچ استفاده می شود تا از تماس مستقیم کامپوزیت با دندانههای پیچ جلوگیری میشود. شکل زیـر شمای کلی بکارگیری قطعات فلزی واسط را نشان میدهد.



Fig. 5 Application of metal interface in bolted joint between two composites[20]

شکل 5 بکارگیری اتصالات پیچی بین دو کامپوزیت[20]

نشریه علوم و فناوری **کا میو زیت**

¹Mandrel



Fig. 6 Schematic of metal interface in bolted joint in composites [20] شکل 6 شمای کلی بکارگیری واسط فلزی در اتصالات مکانیکی پیچی در کامپوزیتها [20]

4-طراحی دریچه بر روی بدنههای کامپوزیتی

در غالب پژوهشهای انجام شده، تأثیر متعلقات لازم برای آببندی دریچهها در نظر گرفته نمی شود. البته این امر به دلیل زمینهی کاربردی بدنه می باشد. به طور مثال، در صورتی که بدنه سوراخ شده بعنوان مجرا در یک سیستم هوایی بکار رفته باشد، دیگر متعلقات آببندی و یا گازبندی برای آن کارایی نخواهد داشت. اما در کاربردهایی دریایی باید تأثیر این متعلقات را در بررسی ها لحاظ نمود. تعبیه نمودن یک دریچه بر روی بدنه کامپوزیتی برای اهدافی نظیر بازرسی و نصب تجهیزات متصل به بدنه، در کاربردهای دریایی مستلزم استفاده از یک سازوکار دقیق برای آبندی بدنه می باشد.

در پژوهش حاضر برای بکارگیری دریچههای بزرگ بر روی بدنهی کـامپوزیتی ، سازوکاری منحصر به فرد پیشنهاد شده است. معمولاً دریچههای تعبیه شـده

بر روی بدنه ها دارای ابعاد کوچکی نسبت به خود بدنه ی اصلی می باشند. طراحی این دریچه ها به گونه ای است که بخشی از موضع منفذ روی بدنه به صورت پلهدار سوراخکاری می شود. با این روند یک نشیمنگاه مسطح برای آب بندیبر روی بدنه ایجاد می گردد. این طرح به دلیل محدودیت هندسی برای استفاده همراه دریچه های بزرگ مناسب نمی باشد. از همین رو، در پژوهش حاضر ضمن پیشنهاد یک طراحی منحصر به فرد برای دریچه های بزرگ، به بررسی تاثیر آن بر پایداری و مقاومت سازه پرداخته شده است.

طراحی پیشنهاد شده برای دریچههای بزرگ بر روی بدنههای کامپوزیتی به گونهای است که سطح نشیمنگاه آببند دریچه توسط یک قطعهی واسط ایجاد می گردد. قطعهی واسط از طریق اتصالات پیچی به بدنهی کامپوزیتی متصل می شود. به دلیل وجود سوراخهای رزوهدار جنس این قطعه از آلیاژ فولاد زنگ نزن انتخاب شد. برای اتصال واسطه، چند پیچ که تعداد آنها با توجه به جنس و فشار اعمالی محاسبه می گردد، دور تا دور محیط منفذ جانمایی می شود. آببندی بین قطعهی واسط و بدنه با استفاده از اورینگ صورت می پذیرد. بنابراین برای این طرح باید انحنای داخلی بدنه بر روی سطح خارجی قطعهی واسط ایجاد گردد. مطابق مطالب بیان شده، برای استفاده از اتصالات پیچی باید از بوش های حائل میان پیچ و کامپوزیت استفاده گردد تا بدنهی کامپوزیتی آسیب نبیند. طراحی مذکور در شکل آکشان داده شده است.



Fig. 7 Design of semi-big clousure on composite shell; "a"Assembly, 'b' Interface Part

شکل 7 طراحی دریچههای نسبتاً بزرگ بر روی بدنهی کامپوزیتی؛ «الف» مونتاژ دریچه بر روی بدنه، «ب» قطعهی واسطه

یکی از نکات مهم در این طرح، تعیین آرایش پیچها میباشد. با توجه به وجود فشار خارجی بر بدنه، دریچه و قطعهی واسطه تمایل به پایین آمدن دارند که با مقاومت پیچها، در جای خود نگه داشته میشوند. بنابراین پیچها باید از استحکام کافی در برابر نیروی اعمالی از طرف دریچه برخوردار باشد. مجموع نیروی اعمالی بر پیچها برابر حاصلضرب فشار (P) در مساحت تصویر سطح قطعهی واسط تا موقعیت شیار اورینگ، بر صفحهی افق است. بنابراین نیروی اعمالی بر هرپیچ از رابطهی زیر محاسبه می گردد.

$$\overline{F} = \frac{P\pi D_b^2}{4n} \tag{18}$$

در رابطهی فوق پارامتر n نشاندهندهی تعداد پیچها و D_b قطر شیار آببندی روی قطعهی واسط است. ضریب اطمینان n_i برای انتخاب پیچ با استفاده از قواعد طراحی بهصورت زیر محاسبه می گردد [21]:

$$n_l = \frac{L'}{L} = \frac{S_p A_l - F_i}{C\overline{F}}$$
(19)

علوم و فناوری *کا میو زیت*

که در آن F_i ، A_i ، S_p و C به ترتیب تنش گواه، سطح مقطع تحت F_i ، A_i کشش، نیروی پیشبار پیچ و ضریب سهم پیچ از کل نیروی اعمالی بر اتصال است. نظر به اینکه حداکثر نیروی پیشبار F_i ،برای اتصاالات دائم، برابر می باشد و برای اتصال نشت بند دار C = 1 ، رابطه (19) می باشد و مورت $0.9S_pA_r$ زير تغيير مىيابد[21]:

$$n_l = \frac{0.1 \, S_p.A_l}{\overline{F}} \tag{20}$$

در پیچهایی که راستای آنها بر صفحهی افقی غیرعمود است، علاوه بر تنش نرمال، تنش برشی نیز بوجود میآید. در این حالت از معیار فون-میسز استفاده می گردد. در شکل زیر بصورت شماتیک موقعیت این پیچها نشان داده شده است.



Fig. 8 Directions of bolts on interface part

شکل 8 راستای پیچهای تعبیه شده بر روی قطعهی واسط

محاسبهی ضریب اطمینان از مقایسهی نیروی اعمالی به پیچ با نیرویی که به ${S}_p$ ازای آن تنش معادل فون میسز در مقطع پیچ به مقدار تنش گواه میرسد، امکانپذیر است. گفتنی است که تنش نرمال ترکیبی از نیروی ییشبار و مؤلفهی نرمال برآمده از فشار خارجی میباشد. روابط تنش نرمال، برشی و تنش فون- میسز ایجاد شده در پیچ بر اساس فشارعبارتند از:

$$\sigma_n = \frac{C\overline{F}_n + F_i}{A_i} \to \sigma_n = \frac{\overline{F}\cos\alpha + F_i}{A_i}$$
(21)

$$\sigma_{t} = \frac{\overline{F}_{t}}{A} = \frac{\overline{F}\sin\alpha}{A}$$
(22)

$$\overline{\sigma} = \sqrt{\sigma_n^2 + 3\sigma_i^2} \tag{23}$$

با قرار دادن روابط (21) و (22) در رابطهی تنش فون- میسز (23)، و برابر دانستن آن با تنش گواه، یک معادلهی جبری ایجاد می گردد. با حل این معادله، حداكثر نيروى قابل تحمل پيچ بدست مي آيد. با مشخص بودن فشار اعمالي و ضريب اطمينان و با استفاده از روابط فوق مي توان پيچ مورد نظر را انتخاب نمود.

1-4- هندسهی مسئله

جهت بررسی اثرات سازهای و تنشی طراحی ارائه شده در این پژوهش، یک بدنهی کامپوزیتی دارای دریچه مورد مطالعه قرار گرفت. این بدنهی كامپوزيتي از جنس شيشه⊣پوكسي به طول 1500 و قطر خارجي 450 و ضخامت 10 میلیمتر در نظر گرفته شد. درصد حجمی الیاف در این کامپوزیت برابر 55٪ تعیین شد. هر یک از لایههای کامپوزیتی دارای ضخامت 0.5 میلیمتر میباشند. همچنین لایهچینی در این بدنه، مطابق [90°، +45°، -45°, 90°،+45° ,-45°, 90°،+45° ,-45°, 90°]sym الگوى

در نظر گرفته شد. در واقع در این لایهچینی حدود 30٪ از الیاف بصورت محیطی و بقیه بصورت مارپیچیتابیده شده است. بر اساس این لایهچینی، در سطح داخلي و خارجي بدنه، الياف بصورت محيطي پيچيده مي شوند. موقعيت دریچه در وسط و مقطع میانی بدنه لحاظ شد. دریچه ایجاد شده بر روی این بدنه دارای قطر 120 میلیمتر است. ابعاد قطعهی واسطهی طراحی شده در جدول 4 ارایه شده است.

[90°, +45°, -45°, 90°, +45°, -45°, 90°, +45°, -45°, 90°]sym

جدول 4 ابعاد قطعهی واسططراحی شده

Table 4 Dimensions of Interface Part				
	مقدار	واحد	پارامتر	رديف
-	10	mm	Н	1
	2.2	mm	h	2
	190	mm	Da	3
	175	mm	Db	4
	100	mm	Dc	5
	14	deg	α1	6
	20	deg	α2	7

لازم یه ذکر است که در انتخاب آرایش پیچها بهتر است کهکمترین تعداد پیچ استفاده شود. از همین رو از پیچهای با استحکام بالا بهره برده شد. بر اساس استانداردهای مهندسی برای بیان میزان استحکام پیچها از مقادیر 8.8، 10.9و 12.9 و ... به عنوان درجه استحكام پیچها استفاده می گردد. در جدول زير استحكام كششى و تنش گواه پيچها متناظر با درجه استحكام ارايه شده است. آرایشهای مختلف بر مبنای فشار 10 بار و ضریب اطمینان 1.5 برای ابعاد مذکور محاسبه گردید و در جدول 4 ارایه شده است. با توجه به آرایشهای ارایه شده در این جدول، پنجمین آرایش به عنوان آرایش بهتر انتخاب شد. گر چه این ترکیب نسبت به دومین ترکیب دارای تعداد پیچ بیشتری است اما به دلیل کوچکتر بودن سوراخهای لازم بر روی بدنه، مناسبتر به نظر میرسد.

جدول 5 آرایش پیچھا

Table 5 Arrangement of Bolts

تعداد	مساحت سطح کششی (mm ²)	تنش گواہ (MPa)	استحکام کششی (MPa)	درجه استحکام	سايز پيچ	رديف
8	58	640	800	8.8	M10	1
6	58	900	1000	10.9	M10	2
14	36.6	640	800	8.8	M8	3
10	36.6	900	1000	10.9	M8	4
8	36.6	1000	1200	12.9	M8	5

5- مدلسازی اجزای محدود

ارزیابی سازهای بدنه کامپوزیتی دارای دریچه با استفاده از روش اجزای محدود و نرمافزار قدرتمند آباکوس المانجام گردید. در شکل9، مدلسازی لایـهچینـی بدنهی کامپوزیتی مورد بررسی در نرمافزار آباکوس نمایش داده شده است.

¹ABAOUS



Fig. 9 Layout in the composite

شکل 9 لایهچینی در بدنهی کامپوزیتی مورد مطالعه

با توجه به نسبت ضخامت به قطر هندسهی مذکور، بدنهی کامپوزیتی بهصورت پوسته² مدل شد.نظربه این که بدنهی مورد مطالعه بطور همهجانبه تحت فشار خارجی قرار می گیرد، باید هم فشار شعاعی و هم فشار محوری وارده بر بدنه در مدلسازی اعمال گردد. همچنین با توجه به اینکه برای آببندی دو انتهای بدنه در حالت واقعی از درپوشهای دایروی استفاده خواهد شد، لبههای بدنه در راستای محیطی و شعاعی مقید گردید ولی امکان جابجایی در راستای محوری برای آنها اعمال شد.

$$U_r = U_\theta = UR_r = UR_\theta = UR_z = 0 \tag{24}$$

در فرآیند مدلسازی عددی این مساله، فشار کمانش ابتدا با استفاده از تحلیل کمانش خطی³ تخمین زده شد و سپس با تحلیل استاتیک تنشهای ایجاد شده در بدنه مورد ارزیابی قرار گرفت. در شبکهبندی مخزن، از المانهای چهاروجهی استفاده گردید. با توجه به تاثیرگذاری اندازهی المانها بر روی تعیین فشار لازم برای وقوع کمانش، تعداد بهینهی المانها بهدست آمد. مطابق نتایج تحقیق همگرایی مقدار 25 میلی متر برایاندازه دانهبندی ۳در المانها، متناظر با تغییرات بسیار جزیی نتایج (نشان داده شده بر روی نمودار) انتخاب گردید. در شکل زیر نمودار همگرایی المانها بر اساس تحلیل کمانش ارایه شده است.



شكل 10 نمودار همگرایی مشبندی

Shell Linear Buckle

³ Seeding

بر اساس آنالیز همگرایی با رسیدن اندازه المان به میزان 25 میلیمتر، خطای نتیجه نسبت به نتیجهی متناظر با اندازهی بزرگتر المان، به کمتر از 1 ٪ میرسد که قابل قبول است.جهت مدلسازی هندسهی بدنهی دارای دریچه، باید علاوه بر ایجاد سوراخ بزرگ، سوراخهای متناظر با بوش پیچهای اتصال قطعهی واسط به بدنه، مدل گردد. با توجه به الزامات گفته شده، این سوراخها باید بصورت پلهدار بر روی بدنه ایجاد گردد. از همین رو به دلیل اختلاف ضخامت این قسمت از بدنه با دیگر قسمتها، بایستی از تکنیک گسستهسازی در بدنه استفاده شود. ضخامت قسمتهای مجاور بوشها برابر 5.5میلی متر است. شکل زیر مدلسازی منفذ دریچه و سوراخهای مجاور آن را در نرمافزار آباکوس نمایش میدهد.

5-1-صحتسنجی روش مدلسازی

جهت بررسی صحت و سقم روش مدلسازی و نتایج آزمایشگاهی مرجع [3] استفاده شد. در پژوهش مذکور بدنه یکامپوزیتی به قطر داخلی 152 و طول 400 میلیمتر مورد بررسی قرار گرفت. جنس کامپوزیت شیشه- اپوکسی در ساختار این بدنه به کار گرفته شد. لازم به ذکر است که برای این کامپوزیت مدول یانگ در راستای الیاف و عمود بر آن و مدول برشی به ترتیب برابر مدول یانگ در راستای الیاف و عمود بر آن و مدول برشی به ترتیب برابر کامپوزیت 2018 و 5.83 گیگاپاسکال میباشد. همچنین ضریب پواسون این کامپوزیت 2018 در نظر گرفته شد. مطابق نتایج شبیهسازی عددی و آزمایشگاهی فشار وقوع پدیده یکمانش در این بدنه برای لایه چینی آرمایشگاهی فشار وقوع پدیده یکمانش در این بدنه برای لایه چینی روش مدلسازی ارائه شده در پژوهش حاضر فشار کمانش این بدنه برابر 83 برا محاسبه شد. بدین ترتیب می توان گفت که خطاینتایج در حدود 1/ میباشد که بر دقت بسیار بالای این روش دلالت می کند. در تکمیل فرآیند محتسنجی مسأله، تطابق رفتار کمانشی مدل و نمونه ی تجربی موید صحت است. تشابه و انطباق مود کمانشی اول در مدل و نمونه ی تجربی موید صحت نتایج حاصل از مدلسازی است (شکل 13).





در شکل 12 مشبندی انجام شده بر روی بدنه نشان داده شده است.

ىشريە علوم و فناورى**كا ميو زيىت**



Fig. 12 Meshing on body with opening

شکل 12 مشبندی بدنه دارای دریچه



Fig. 13 Experimental & Numerical Buckling Mode in the studied body: a)Experimental specimen[3], b)Numerical results

شکل 13 مود کمانش در بدنهی بررسی شده به روش آزمایشگاهی و عددی: الف)نمونهی آزمایشگاهی و ب)نتیجهی عددی

6- نتايج و تفسير

سیلندر کامپوزیتی تحت فشار هیدرواستاتیک یا در اثر وقوع پدیدهی کمانش دچار شکست میشود و یا در اثر شکست مادی به واماندگی میرسد. بدین ترتیب با توجه به مطلب اخیر و هندسهی مورد مطالعه در این پژوهش، باید ابتدا به ساکن فشار وقوع پدیدهی کمانش را بررسی نمود. در همین راستا با استفاده از تحلیل کمانش خطی، فشار کمانش در بدنه دارای دریچه و بدنهی سالم مقایسه گردید. بدین ترتیب تأثیر کمانشی سوراخکاریهای انجام شده بر بدنه تعیین شد. سپس با استفاده از تحلیل استاتیک به مطالعهی میزان تنشهای به وجود آمده در بدنه در مواجهه با شرایط بارگذاری بر اساس معیار تسای- هیل پرداخته شد.



b)

Fig. 14 Buckling Mode in the bodies: a)without opening; b)with opening

شکل 14 مود کمانش در بدنههای کامپوزیتی: الـف)بـدون دریچـه، ب)دارای دریچه با قطعهی واسط

6-1- بررسی فشار کمانش

فشار کمانش (اولین مود) برای بدنه یسالم و بدنه یدارای دریچه بررسی شد. با توجه به نتایج مقدار فشار کمانش برای هر دو بدنه یکسان و برابر 12.5 بار بدست آمد. این در حالی است که بدون در نظر گرفتن قطعه ی واسط تقویت کننده، فشار کمانش بدنه یدارای دریچه به میزان 11.5 بار بدست آمد. در واقع بر اساس تحلیل کمانش خطی استفاده از این قطعه ی واسط تقویت کننده در موضع دریچه حدود 8.7٪ بر فشار کمانش بدنه افزوده است. این مطلب بر نقش بسیار مهم و تأثیر گذار قطعه ی واسط تقویت کننده در بدنههای دارای دریچههای نسبتاً بزرگ دلالت می کند.مود کمانش در هر دو بدنه دارای شکل یکسانی است که در آنها دو موج محیطی و یک موج طولی ایجاد شدهاست.تغییر شکل بدنهها در مود اول کمانش در شکل 14 نشان داده میشود.

6-2- بررسی استاتیکی

در ادامه با استفاده از تحلیل استاتیکی مقدار تنشها ایجاد شده در اثر فشار کمانش در بدنههای کامپوزیتی بررسی شد. بدین ترتیب هر دو بدنه تحت فشار12.5بار قرار گرفت. برای حذف خطاهای عددی ایجاد شده در حل استاتیکی، نتایج بدست آمده در دو انتهای بدنه که شرایط مرزی اعمال شد، در نظر گرفته نشد. با توجه به مود کمانش که بیشترین تغییرشکل در قسمت میانی بدنه ایجاد می گردد، نتایج در این قسمت مورد توجه قرار گرفت. مطابق نتایج بزرگترین مقدار شاخص معیار تسای-هیل برای بدنهی بدون دریچه برابر 0.247 بود. این مقدار حاکی از ان است که شکست مادی بدنه در





فشاری بالاتر از فشار کمانش بدنه است. بدین ترتیب شکست بدنه در اثر وقوع پدیده ی کمانش خواهد بود. لازم به ذکر است که مطابق انتظار در تحلیل استاتیک، توزیع فشار بر تمامی لایههای کامپوزیت به گونهای است که شاخص تسای- هیل در قسمت میانی بدنه مقداری یکسان است. علت آن، وجود تقارن در هندسه و بارگذاری است. در شکل 15 کانتور شاخص تسای-هیل بر روی بدنه بدون دریچه در بحرانی ترین لایه نشان داده شده است.

با توجه به وجود منافذی بر روی بدنه ی دارای دریچه، انتظار نمی رود که شاخص تسای – هیل بر بدنه و در موضع دریچه ها مقدار یکسان داشته باشد. در واقع به دلیل وجود تمرکز تنش در اطراف منافذ دریچه، شاخص تسای – هیل در این موقعیت نسبت به قسمتهای دیگر متفاوت خواهد بود. مطابق نتایج پارامتر شاخص تسای – هیل در بحرانی ترین لایه به مقدار 1.089 (بیش از مقدار واحد) رسیده است. بنابراین می توان نتیجه گرفت که ایجاددریچه بر بدنه ی کامپوزیتی ضمن کاهش فشار کمانش، زمان شکست مادی را بر شکست کمانشی منطبق می نماید. در شکل 17 پراکندگی شاخص تسای – هیل در لایه های مختلف بدنه ی دارای دریچه نشان داده شده است.

همان گونه که در شکل(16) مشاهده می شود فشار کمانش برای بدنه ی دارای دریچه بدون در نظزر گرفتن اثر واشر تقویت کننده در حدود 10.1 بار و برای بدنه ی سالم و بدنه ی دارای دریچه و واشر تقویت کننده در حدود 12.5 بار می باشد.در واقع رفتار بدنه ی دارای دریچه بدون واشر تقویت کننده همانند بدنه ای بدون دریچه با اعوجاجات هندسی اولیه (مانند خارج از مرکزی بدنه در مقطع میانی به میزان 2 یا 3 میلیمتر) است.

تفاوت پاسخ مکانیکی بدنه ی کامپوزیتی با وجود دریچهی نسبت به حالت بدنهی سالم، علاوه برتحلیل کمانش خطی با استفاده از تحلیل "Static,Riks" و براساس روش زمانی "Arc Length" مطالعه شد. مطابق نتایج این بررسی، رفتار بدنهی دارای دریچه بدون در نظر گرفتن تأثیر متعلقات آببندی همانند بدنهی دارای اعوجاج اولیه هندسی است. در شکل زیر تغییرات بیشینهی جابجایی برحسب فشار برای بدنهی کامپوزیتی با استفاده از تحلیل "Static,Riks" ارایه گردیده است.

همچنین گرچه با بکارگیری قطعه واسط فشار کمانش بدنه در حد بدنهی سالم باقی ماند، اماتغیرشکل بدنهی دارای دریچه نسبت به بدنهی سالم تا



Fig. 16 Diagram of pressure vs maximum displacement شكل 16 نمودار فشار بر حسب حداكثر جابجايي در بدنه

رسیدن به لحظهی کمانش بسیار بیشتر است. بدین ترتیب بایستی در طراحیها سعی گردد تاحتی المقدور کمترین تعداد دریچه با ابعاد کوچک ایجاد گردد تا از این طریق تعداد عوامل و پارامترهای غیرخطی تحمیل شده بر بدنه کاهش و فشار کمانش افزایش یابد.

6-3- بررسی تأثیر دریچه بر اساس طولهای مختلف مخازن

در ادامه تأثیر دریچه بر فشار کمانش در بدنههایی با طولهای مختلف پرداخته شده است. بر همین اساس فشار کمانش در بدنههای 2.5،1.5 و 3.5 متری بررسی شد که نتایج آن در شکل 18 آورده شده است.



Fig. 18 Diagram of buckling pressure in various length of composite bodies $% \left({{{\mathbf{F}}_{\mathbf{r}}}_{\mathbf{r}}} \right)$

شکل 18 نمودار فشار کمانش بدنهی کامپوزیتی با طولهایمختلف در دو حالت بدون دریچه و دارای دریچه

همانگونه که در شکل (18) مشاهده می گردد با افزایش طول بدنه موجود دریچه تأثیری بر فشار کمانش بدنه نمی گذارد. همچنین با افزایش طول بدنه، پایداری بدنه در مقابل پدیدهی کمانش به صورت چشمگیری کاهش مییابد.

1010



Fig. 17 Tsai-Hill contour in layers of the body with cutout: a)2nd layer, b)8th layer &c)20th layer شکل 17 کانتور شاخص تسای- هیل در لایههای مختلف در بدنهی کامپوزیتی دارای دریچه: الف)لایهی دوم، ب)لایهی هشتم و ج)لایهی بیستم

7- نتیجهگیری

Stiffeners under External Hydrostatic Pressure, In Persian, Journal of Modelling in Engineering of Semnan University, 25, 16(54), pp: 24-34, 2018.

- [8] Alizadeh, E., Babaei, J., Dehestani, P., Batalebluie, R., Behrooz, H., Study of The effect of thickness and initial geometric imperfection of cylindrical composite shell on the buckling behavior in axial pressure, In Persian, Journal of Modelling in Engineering of Semnan University, 11, 16(53), pp.:121-134, 2018.
- [9] Ahmadi, I., Analysis of interlaminar stresses in cross-ply composite cylinders subjected to radial loads," in Persian. Journal of science and technology of composites, Vol. 2, No. 3, pp 43-54, 2015.
- [10] Khalili, S.M.R. Sedigh, Y. and HosseinAhari, S.M., Experimental and numerical study of the buckling of semi-cylindrical composite lattice, In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, 3(3), pp. 269-276, 2016.
- [11] Dadashi, A. and Rahimi, G.H., Experimental and numerical investigation of buckling and post-buckling behavior of filament wound composite cylinders under lateral compression loading by parallel rigid plates", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, 6(1), pp. 151-165,2019.
- [12] Elyasi, M., Yousefinezhad, G. H., Zabihpoor, M.,Determination of mechanical response of composite cylinders including Circular cutout subjected to uniform external hydrostatic pressure, In Persian, Journal of Modarres Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 9, pp 360-370, 2015.
- [13] Tafreshi, A., Delamination buckling and post buckling in composite cylindrical shells under combined axial compression and external pressure, Composite Structures Journal, Vol. 72, pp. 401-418, 2006.
- [14] Taheri, B.,Omidi, F., Shokrieh, M., Experimental and Numerical investigation of buckling behavior of composite cylinders with cutout, journal of Thin-Walled Structures, Vol. 116, pp. 136-144, 2017.
- [15] Herakovich, C. T., Mechanics of Fibrous Composites Materials, 2nd ed., University of Virginia, USA, 1998.
- [16]Kaw, A.K., Mechanics of Composite Materials, 2nd ed., CRC Press, USA, 2006.
- [17]Mohsenishakib, M., Mechanics of Composite Structures, In Persian, Imam Hossein University Press, IRI, 2013.
- [18] Harris, B., Fatigue in composites, CRC Press, USA, 2003.
- [19] Gibson, R.F., Principles of Composite Material Mechanics, 4th ed., CRC Press, USA, 2015.
- [20] ASM Handbook, Composites- Vol. 21, 2001.
- [21]Budynas, R. G.,Nisbett, J. K.,Shigley'sMechanical Engineering Design, 10th ed., McGraw-HillEducation, 2015.
- [22]ShenK., Pan G., Optimizing the buckling strength of filament winding composite cylinders under hydrostatic pressure, Journal of Reinforced plastics and composites, https://doi.org/10.1177/0731684418765989, 37(13), pp.892-904, 2018.
- [23]Ghasemi A.R., Hajmohammad M.H., Mass and buckling criterion optimization of stiffened carbon/epoxy composite cylinder under external hydrostatic pressure, Lat. Am. j. solids struct.,http://dx.doi.org/10.1590/1679-78253881, 15(1), Rio de Janeiro, 2018.
- [24]ShenK., Pan G., Jiang J., Huang Q., Shi y., Stability of Filament-Wound Composite Cylinders Subjected to Hydrostatic Pressure, Journal of Northwestern Polytechnical University, 36(5), 839-847, 2018, DOI:10.22075/JME.2017.10883.1042.
- [25]Shen, K. & Pan, G. ,Journal of Shanghai Jiaotong Univ.(Sci.), 2019, https://doi.org/10.1007/s12204-019-2087-1.

در پژوهش حاضر ضمن بررسی تاثیر دریچه بر رفتار مکانیکی مخازن كامپوزيتي تحت فشار هيدرواستاتيك،خواص استحكامي ماده و تحليلي مبتنی بر تنشهای ایجاد شده در بدنه یکامپوزیتی مطالعه شد. همچنین یک طراحی منحصر به فرد ومتناسب با دریچههای بـا ابعـاد نسـبتاً بـزرگ بـر روی مخازن کامپوزیتی تحت فشار خارجی ارایه گردید.بدنه ی کامپوزیتی از جنس E-glass Epoxy به طول 1500، قطر خارجي 450 و ضخامت 10 میلیمتر مورد بررسی قرار گرفت. مطابق نتایج با تعبیه نمودن یک دریچـه بـر بدنه، فشار كمانش نسبت به حالت سالم به ميزان 10 تا 15 درصد كاهش یافت. در واقع عدم تقارن ناشی از ایجاد دریچه، پایداری کلی بدنه در مواجهه با فشار هیدرواستاتیک خارجی که هم بصورت شعاعی و هم محوری بر بدنه اعمال مى شود را تحت تأثير كاهنده قرار داده است. علاوه بر آن، با ايجاد دریچه، علاوه بر کاهش فشار کمانش، تغییر شکل بدنه نیز تا قبل از رسیدن به مرحلهی کمانش قابل ملاحظه است که می تواند با الزامات کاربردی مخزن تطابق نداشته باشد. همچنین مطابق نتایج، وقوع کمانش نسبت به شکست مادی در بدنهی سالم سریعتر است. این در حالی است که در بدنه ی دارای دریچه، به دلیل ایجا تمرکز تنش این دو شکست به یکدیگر نزدیک شدهان.د. لازم بـــه ذكـــر اســـت كـــه بـــر اســاس نتايج،قطعـــهى واســط به کار گرفته شده در متعلقات دریچه، فشار کمانش را در حدود 19 درصد نسبت به حالت بدون قطعه ی واسط افزایش می دهد (لازم به ذکر است که با توجه به دقت بالاتر تحليل "Static, Riks" مقادير به دست امده از اين تحليل مبنای نتیجه گیری قرار گرفت). بنابراین در نظر گرفتن تأثیر صلبیت قطعهی واسط بر بدنه به ویژه در تحلیل رفتار و استحکام کمانش مخازن کامپوزیتی تحت فشار خارجی علیه غم پیچیدگی های محاسباتی و مدلسازی، حایز اهمىت است.

7- مراجع

- Shenoy, R. A., Wellicome, J.F., Composite Materials in maritime structures; Vol. 1: Fundamental Aspect," .Cambridge UniversityPress, UK, 1993.
- [2] Chawla, K., Composite Materials: Science and engineering, Springer, 2013.
- [3] Messager, T., Pyrz, M., Gineste, B., Chauchot, P., Optimal lamination of thin underwater composite cylindrical vessels, Composite Structures Journal. Vol. 58, pp. 529-537 ,2002.
- [4] Moon, C. J., Kim, I. H., Choi, B. H., Kweon, J. H., Choi, J. H., Buckling of filament-wound composite cylinders subjected to hydrostatic pressure for underwater vehicle applications, Composite Structures Journal, Vol. 92, pp. 2241-2251, 2010.
- [5] Hur, S., H., Son, H. J., Kweon, J. H., Choi, J. H., Postbuckling of composite cylinders under external hydrostatic pressure, Composite Structures Journal, Vol. 86, pp.114-12, 2008.
- [6] Han, J. Y., Jung, H. Y., Cho, J. R., Choi, J. H.,Bae, W. B., Buckling analysis and test of composite shells under hydrostatic pressure, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 201, pp.742–745, 2008.
- [7] Alizadeh, E., Babaei, J., Batalebluie, R., Behrooz, H., Numerical and Experimental Study of Reinforced Composite Vessels with Hoop