

بررسی عددی و تجربی مخازن کامپوزیتی تقویت شده با رینگ های محیطی تحت فشار خارجی

ابراهیم علیزاده^۱، جواد بابایی^۲، رضا بطلوبویی^{۲*} و حسین بهروز^۲

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۲۸ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۶/۱۵	مخازن کامپوزیتی بدلیل نسبت بالای استحکام به وزن، بطور گسترده ای در حوزه ی صنایع دریایی و هوایی بکار می روند. نحوه ی شکست مخازن کامپوزیتی تحت بارگذاری فشاری هیدرواستاتیک با توجه به هندسه و خواص مواد قابل تعیین می باشد. استفاده از تقویت کننده های کامپوزیتی در مخازن کامپوزیتی در عمل متحمل دشواری های بسیاری در فرآیند ساخت می باشد. از طرفی بدلیل پایین بودن مدول یانگ در کامپوزیت ها، نمی توان انتظار تاثیر چشمگیری از بکارگیری آنها بعنوان تقویت کننده داشت. در پژوهش حاضر، با توجه به اهمیت تقویت کننده های فلزی، رفتار مخازن کامپوزیتی دارای تقویت کننده فلزی در لحظه ی شکست مطالعه شد. در همین راستا رفتار یک بدنه ی کامپوزیتی در حالت استفاده از تقویت کننده ی فلزی و حالت بدون تقویت کننده به روش اجزای محدود مورد مطالعه قرار گرفت. مطابق نتایج استفاده از یک تقویت کننده محیطی فلزی که وزن آن معادل ۳/۶٪ از وزن بدنه ی کامپوزیتی است، فشار شکست کمانش را به میزان ۲۵٪ افزایش داد. همچنین بر اساس نتایج، افزایش فشار کمانش در بدنه های کامپوزیتی از طریق بکارگیری تقویت کننده محیطی فولادی نسبت به افزایش این پارامتر از طریق افزایش ضخامت بدنه ی کامپوزیتی، افزایش وزنی کمتری را ایجاد می نماید. جهت صحت گذاری بر نتایج عددی به دست آمده یک بدنه ی کامپوزیتی از جنس شیشه- اپوکسی که جداری درونی آن با استفاده از یک تقویت کننده محیطی فلزی تقویت شده بود تا رسیدن به مرحله ی شکست تحت فشار هیدرواستاتیک خارجی قرار گرفت که نهایتاً در فشار ۱۶ بار شکسته شد. فشار تخمین زده شده توسط نرم افزار آباکوس با مقدار تجربی اختلاف بسیار کمی داشت که بیانگر دقت بالای مدلسازی عددی پژوهش حاضر می باشد.
واژگان کلیدی: مخازن کامپوزیتی، تقویت کننده، روش اجزای محدود، فشار هیدرواستاتیک خارجی، شکست کمانش.	

۱- مقدمه

کاربرد فراوانی دارد، با توجه به نوع کاربرد و نحوه ی بارگذاری از اهمیت ویژه ای برخوردار است [۱-۴]. متعاقباً بکارگیری مواد کامپوزیتی در سازه هایی نظیر مخازن تحت فشار، مستلزم شناخت رفتار آنها تحت شرایط عملیاتی و راه هایی برای افزایش کارایی آنها می باشد. کاربرد فراوان مخازن و بدنه های کامپوزیتی موجب گردیده است تا

امروزه مواد مرکب بدلیل دارا بودن ویژگی های متمایزی مانند نسبت استحکام به وزن، صلبیت به وزن و مقاومت به خوردگی کاربرد فراوانی در حوزه ی صنایع دریایی و هوا- فضا دارند. طراحی و ساخت مخازن تحت فشار کامپوزیتی که بیشتر در صنایع هوافضا، دریایی و خطوط انتقال سیالات

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: batalebluie@gmail.com

۱. استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

۲. کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

و متغیر بودن ضخامت بدنه‌ها را مورد بررسی قرار داد. پریادارسینی و همکارش [۱۰] مخازن کامپوزیتی از جنس الیاف کربن پیشرفته را بصورت تجربی و عددی تحت فشار محوری مورد بررسی قرار دادند و تاثیر لایه‌چینی‌های مختلف و نواقص هندسی اولیه را بر بار کمانشی مطالعه نمودند.

هور و همکاران [۱۱] به روش عددی، رفتار پس‌کمانشی^۲ در سیلندرهای کامپوزیتی تحت فشار هیدرواستاتیک خارجی مورد مطالعه قرار دادند. آنها در بررسی عددی از معیار حداکثر تنش برای لحظه‌ی شکست استفاده نمودند. آنها برای اعتبارسنجی نتایج عددی، اقدام بررسی تجربی بدنه‌های کامپوزیتی کربن-اپوکسی نمودند. گرچه تحلیل عددی نتوانست موج‌های کمانشی ایجاد شده بر روی بدنه را بطور دقیق بدست آورد، اما میزان فشار کمانش تخمین زده توسط آن به میزان واقعی بسیار نزدیک بود.

هان و همکاران [۱۲] بصورت تحلیلی و عددی به بررسی رفتار کمانشی و پس‌کمانشی پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی پرداختند. آنها بر پایه معادلات کمانش ارایه شده توسط ASME^۳ و ABS^۳ یک رابطه‌ی تحلیلی برای کمانش در کامپوزیت‌ها بدست آوردند. لازم به ذکر است که در پژوهش مذکور مدل‌سازی عددی، به هر دو صورت خطی و غیرخطی استاتیکی انجام شده است.

الیاسی و همکارانش [۱۳] مخازن کامپوزیتی با برش‌های دایروی را تحت فشار هیدرواستاتیک خارجی را مورد بررسی قرار دادند. در پژوهش آنها موقعیت مناسب برای ایجاد دریچه بر روی مخزن با استفاده از روش اجزای محدود یافت شد. 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 کاهش می‌یابد.

همواره یکی از راهکارهای قابل توجه برای افزایش استحکام و کاهش وزن مخازن بکارگیری تقویت‌کننده‌ی محیطی می‌باشد. پیشتر استفاده از تقویت‌کننده‌هایی با جنس مشابه بدنه در مخازن فلزی و نحوه‌ی قرارگیری و هندسه‌ی تقویت‌کننده‌ها بسیار مورد توجه پژوهشگران بوده است [۱۴-۱۷].

پژوهشگران زیادی به بررسی رفتار کمانشی و استحکامی آنها در شرایط بارگذاری مختلف پرداختند.

لی و همکاران [۵] علاوه بر بررسی شکست کمانش برای بدنه‌های کامپوزیتی ساندویچی، شکست مادی را هم که بر اساس مقایسه تنش‌ها با تنش تسلیم و نهایی ماده است بررسی کردند. در این مسیر آنها صحت نتایج بدست آمده از روش المان محدود را با نتایج روش‌های تجربی بررسی نمودند. نتایج حاکی از آن بود که با افزایش ضخامت لایه‌ها، نقطه‌ی بهینه در طراحی هندسه‌ی پژوهش مذکور بر اساس شکست مادی محاسبه گشت. بنابراین آنها پیشنهاد دادند که در طراحی مخازن سیلندری کامپوزیتی ساندویچی علاوه بر شکست کمانش، معیارهای شکست استاتیکی نیز باید در نظر گرفته شود.

مون و همکاران [۶] کمانش لوله‌های کامپوزیتی دارای الیاف کربن و رزین اپوکسی را که با روش رشته‌پیچی^۱ ساخته شده‌اند، مورد بررسی قرار دادند. آنها فشار وقوع کمانش را برای سه الگوی پیچش [۹۰°، ±۳۰°]، [۹۰°، ±۴۵°] و [۹۰°، ±۶۰°] با روش اجزای محدود محاسبه کردند و سپس با انجام آزمون تجربی، صحت نتایج بدست آمده از روش عددی را ارزیابی کردند. اختلاف کم موجود میان نتایج عددی و تجربی حاکی از دقت بالای روش عددی بکار رفته در این پژوهش می‌باشد. همچنین نتایج تحلیل و آزمون تجربی نشان دادند که بدنه‌ی ساخته شده با الگوی پیچش مورب ۶۰° بیشترین تحمل را در مقابل فشار خارجی هیدرواستاتیک دارا می‌باشد.

مسیجر و همکارانش [۷] با استفاده از روابط تحلیلی و بکارگیری یک الگوریتم ژنتیک، یک لایه‌چینی بهینه برای مخازن کامپوزیتی ارایه کرده‌اند. آنها سپس به روش تجربی، الگوی لایه‌چینی بدست آمده را برای دو نمونه از جنس کربن-اپوکسی و شیشه-اپوکسی مورد بررسی قرار دادند. مقایسه‌ی نتایج تجربی و تحلیلی، حاکی از دقت بالای نتایج عددی است.

رایو و همکارانش [۸] تاثیر زاویه‌ی الیاف بر تنش‌های وارد بر مخزن کامپوزیتی را در تعداد لایه‌های مختلف مورد بررسی قرار دادند. بلاچات [۹] لوله‌هایی با مقاطع دایروی و غیردایروی را تحت فشار خارجی مطالعه کرد و تاثیر شرایط مرزی، نحوه‌ی لایه‌چینی، اعوجاجات هندسی اولیه

^۳ American Bureau of Shipping

^۱ Filament Winding

^۲ Post-Buckling

مختلف مورد بررسی قرار گرفت. سپس برای صحت‌سنجی نتایج عددی بدست آمده، طی یک فرآیند آزمایشگاهی، بدنه‌ی کامپوزیتی پس از تقویت بوسیله‌ی رینگ‌های محیطی تا رسیدن به شکست، تحت فشار هیدرواستاتیک خارجی قرار گرفت. علاوه بر مطالب مذکور تاثیر ترتیب چینش لایه‌ها در راستای ضخامت بدنه‌های کامپوزیتی مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین بر اساس فشار کمانش، میزان کاهش وزنی در اثر بکارگیری تقویت‌کننده‌های محیطی نسبت به حالت متناظر بدون تقویت‌کننده مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲- خصوصیات مکانیکی

با استفاده از روابط موجود برای خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها و ویژگی‌های پایه برای الیاف و رزین می‌توان ویژگی‌های کامپوزیت مورد مطالعه را بدست آورد. ویژگی‌های الیاف و رزین استفاده شده در پژوهش حاضر در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: مشخصات الیاف و رزین ماتریس [۲۰ و ۲۱]

ضریب پواسون	مدول یانگ GPa	چگالی kg/m ³	
۰/۲۲	۶۹	۲۵۸۰	الیاف E-glass
۰/۳۵	۳/۵۹	۱۳۸۰	رزین Vinyl-Ester

با جاگذاری مقادیر ارائه شده در جدول ۱ و درصد حجمی اجزای کامپوزیت در روابط (۱) تا (۴)، چگالی و خواص مکانیکی کامپوزیت مورد مطالعه در این پژوهش بدست آمد [۲۲]:

$$\rho = (\rho_f V_f) + (\rho_m V_m) \quad (1)$$

$$E_1 = (E_f V_f) + (E_m V_m) \quad (2)$$

$$E_2 = (E_f \cdot E_m) / (E_m V_f + E_f V_m) \quad (3)$$

$$v_{12} = v_f V_f + v_m V_m \quad (4)$$

که در آنها ρ ، E_1 ، E_2 و v_{12} به ترتیب چگالی، مدول الاستیسیته در جهت الیاف، مدول الاستیسیته در جهت عمود بر الیاف و ضیقوت‌کننده پواسون است و V_f درصد حجمی الیاف و V_m درصد حجمی رزین می‌باشد. همچنین پارامتر مدول برشی بطور جداگانه برای الیاف و رزین از

چنگ‌هو و ژی [۱۸] به بررسی قطاع‌های 120° از یک پوسته‌ی کامپوزیتی که در راستای عرضی و طولی آن از تقویت‌کننده‌های کامپوزیتی هم‌جنس با بدنه استفاده شده، پرداختند. آنها نمونه‌ها را تحت فشار محوری قرار دادند و موج‌های ایجاد شده بر روی آن را مطالعه نمودند. بر پایه‌ی نتایج عددی، اگر در لبه‌هایی از پوسته که در جهت طولی قرار دارند، تقویت‌کننده‌های طولی بکار نرفته باشد، کمانش در همین نواحی اتفاق می‌افتد. این در حالیست که در صورت تقویت خوب لبه‌ها در راستای طولی، کمانش در وسط بدنه اتفاق می‌افتد.

مهدی و سبایی [۱۹] بطور تجربی خردشوندگی^۱ را در لوله‌های کامپوزیتی دارای تقویت‌کننده‌های شعاعی مورد بررسی قرار دادند. مطابق نتایج این پژوهش، ویژگی‌های هندسی بدنه‌ها در نحوه‌ی خردشوندگی بسیار تاثیرگذار است. آنها لوله‌هایی با چهار سطح مقطع متفاوت بررسی کردند و بهترین شکل را براساس بار خردشوندگی و میزان جذب انرژی تعیین نمودند. نتایج این پژوهش نشان داد که تقویت لوله‌ها در جهت شعاعی بار خردشوندگی و میزان جذب انرژی را بهبود می‌بخشد.

نظرباینکه یکی از دلایل اصلی بکارگیری کامپوزیت‌ها کاهش وزنی تجهیزات است، می‌توان با بکارگیری تقویت‌کننده‌های محیطی در مخازن کامپوزیتی، کاهش موثرتری در وزن ایجاد نمود. استفاده از تقویت‌کننده‌های کامپوزیتی در مخازن کامپوزیتی در عمل متحمل دشواری‌های بسیاری در فرآیند ساخت می‌باشد. از طرفی بدلیل پایین بودن صلبیت (مدول یانگ) کامپوزیت‌ها، نمی‌توان انتظار تاثیر چشمگیری از بکارگیری آنها بعنوان تقویت‌کننده داشت. بنابراین بهتر آن است که از تقویت‌کننده‌های فلزی (ترجیحاً فولادی) که دارای صلبیت بیشتری هستند، استفاده شود.

در پژوهش حاضر که با هدف بررسی عملکرد تقویت‌کننده‌های فولادی در مخازن کامپوزیتی تحت فشار هیدرواستاتیک خارجی انجام شده است، میزان فشار لازم برای وقوع کمانش در هر دو حالت استفاده و یا عدم استفاده از تقویت‌کننده به روش اجزای محدود و با استفاده از نرم‌افزار آباکوس^۲ برای یک هندسه‌ی مشخص تعیین شد. همچنین تغییرات شاخص معیار تسای-هیل^۳ برای لایه‌های

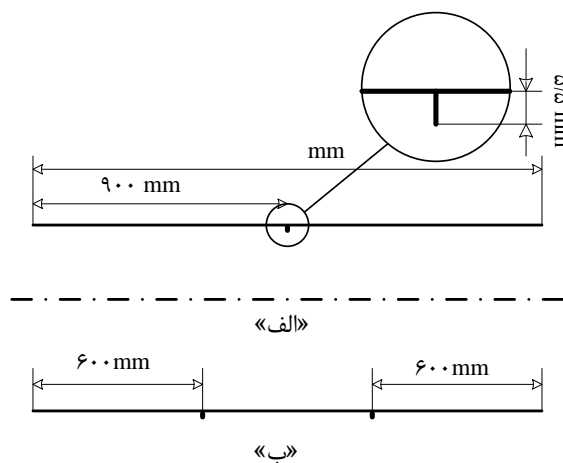
³ Tsui-Hill Criterion

¹ Crushing

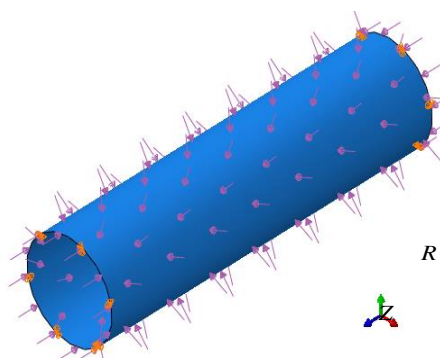
² Abaqus

پوسته‌ای مدل شد. تقویت‌کننده‌های محیطی استفاده شده در این پژوهش دارای پهنای ۴۰۰ و ضخامت ۵/۵ میلی‌متر است.

نظربه‌اینکه بدنه‌ی مورد مطالعه بطور همه‌جانبه تحت فشار خارجی قرار می‌گیرد، باید هم فشار شعاعی و هم فشار محوری وارده بر بدنه در مدلسازی اعمال گردد. در همین راستا برای اعمال فشار محوری که از طریق دو انتها به بدنه وارد می‌آید، از بارگذاری گسترده‌ی طولی به لبه‌های انتهایی پوسته استفاده شد. همچنین با توجه به اینکه برای آب‌بندی دو انتهای بدنه در حالت واقعی از درپوش‌های دایروی استفاده شد، لبه‌های بدنه در راستای محیطی و شعاعی مقید گشت. در شکل‌های (۱) و (۲) نحوه‌ی مدلسازی هندسی، موقعیت تقویت‌کننده‌ها، بارگذاری و شرایط مرزی بر روی بدنه نشان داده شده است.



شکل ۱: مدلسازی هندسی؛ «الف» بدنه‌ی دارای یک تقویت‌کننده و «ب» بدنه‌ی دارای دو تقویت‌کننده



شکل ۲: اعمال بارگذاری فشاری محیطی و محوری بر بدنه و شرایط مرزی بر دو انتهای آن

لایه‌چینی بکار رفته در بدنه‌ی کامپوزیتی به‌گونه‌ایست که هر لایه دارای ضخامت حدود ۰/۵ میلی‌متر می‌باشد و

رابطه (۵) محاسبه شد و سپس با استفاده از رابطه (۶) این پارامتر برای کامپوزیت بدست آمد [۲۲].

$$G = E / 2(1 + \nu) \quad (5)$$

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

در روابط فوق G مدول برشی برای مواد همسانگرد و G_{1-2} مدول برشی در صفحه‌ی ۱-۲ می‌باشد. بدین ترتیب ویژگی‌های مکانیکی کامپوزیت استفاده شده در این پژوهش مطابق جدول ۲ محاسبه شد.

شایان ذکر است که G_{2-3} برابر مدول برشی رزین در نظر گرفته شد. از آنجاییکه رفتار کامپوزیت‌ها بصورت ترد می‌باشد، پس از وارد کردن ثوابت مهندسی این مواد در محدوده‌ی الاستیک، استحکام آنها در نقطه‌ی شکست در راستاهای مختلف مطابق جدول ۳ به مدل وارد شد.

جدول ۲: مشخصات ماده مرکب

پارامتر	واحد	مقدار
E_1	GPa	۴۲/۸
E_2	GPa	۸/۳
ν_{1-2}	—	۰/۲۷۲
G_{1-2}	GPa	۳/۱
G_{1-3}	GPa	۳/۱
G_{2-3}	GPa	۱/۳۳
ρ	kg/m ³	۲۱۰۰

جدول ۳: مشخصات استحکامی ماده مرکب [۲۳]

مقدار	واحد	پارامتر
۸۰۰	Mpa	استحکام کششی در جهت الیاف
۵۰۰	Mpa	استحکام فشاری در جهت الیاف
۳۰	Mpa	استحکام کششی در جهت عمود بر الیاف
۱۰۰	Mpa	استحکام فشاری در جهت عمود بر الیاف
۶۰	Mpa	استحکام برشی

۳- مدلسازی اجزای محدود

جهت بررسی عددی رفتار مخازن کامپوزیتی تقویت شده توسط رینگ‌های محیطی تحت فشار هیدرواستاتیک خارجی، از نرم‌افزار آباکوس استفاده شد. بدنه‌ی بررسی شده در این پژوهش دارای طول ۱۸۰۰، قطر خارجی ۴۸۰ و ضخامت ۱۲ میلی‌متر می‌باشد. با توجه به نسبت ضخامت به قطر هندسه‌ی مذکور، بدنه‌ی کامپوزیتی بصورت

همانگونه که در شکل (۴) مشاهده می‌شود با افزایش تعدادالمان‌ها (ریزتر شدن آنها)، فشار وقوع کمناش کاهش می‌یابد تا جایی که دیگر ریزتر شدن المان‌ها، تأثیر چندانی بر فشار کمناش نمی‌گذارد. بنابراین مش‌بندی دارای ۱۱۵۲۰ المان (که بر اساس آن اندازه‌ی هر ضلع المان ۱۵ میلی‌متر است) بعنوان مش‌بندی بهینه انتخاب گشت تا از این طریق هم دقت نتایج در حد مطلوبی به دست بیاید و هم تحلیل‌ها از لحاظ زمانی کوتاه‌تر باشد.

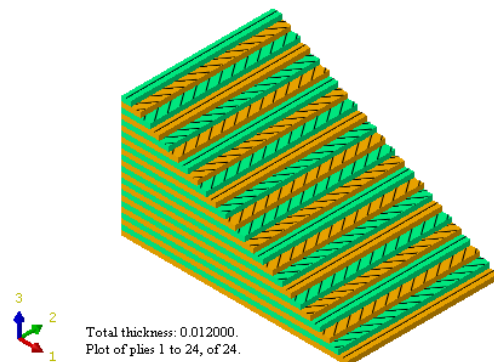
از آنجایی که رفتن ماده به محدوده‌ی پلاستیک موجب کاهش سفتی ماده می‌گردد، اعمال خواص پلاستیک به مدلسازی می‌تواند نتایج تحلیل عددی را به واقعیت نزدیک‌تر نماید. از همین رو در شبیه‌سازی این مساله علاوه بر خواص الاستیک، ویژگی‌های پلاستیک جنس فولاد St37 بکار رفته در تقویت‌کننده نیز مدل شد. خواص مکانیکی فولاد استفاده شده در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴: مشخصات مکانیکی فولاد	
پارامتر	مقدار
مدول یانگ (GPa)	۲۰۷
ضریب پواسون	۰/۳
استحکام نهایی (MPa)	۳۸۰
درصد ازدیاد طول	٪ ۸

۴- بررسی تجربی

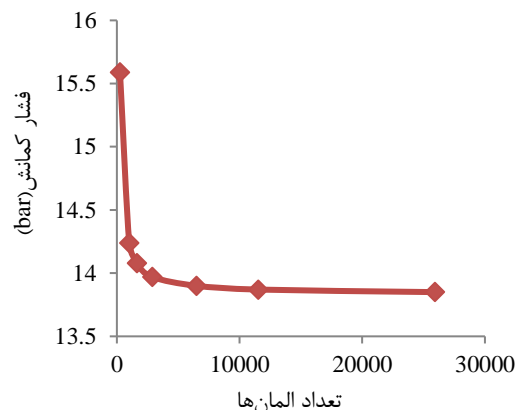
نظر به پیچیدگی مدلسازی مخازن کامپوزیتی و جهت صحت‌سنجی نتایج تحلیل عددی، یک نمونه مخزن کامپوزیتی بصورت تجربی تا رسیدن به نقطه‌ی شکست تحت فشار هیدرواستاتیک خارجی قرار گرفت. این بدنه‌ی کامپوزیتی دارای طول ۱/۸ متر، قطر خارجی ۴۸۰ و ضخامت ۱۲ میلی‌متر بود و یک تقویت‌کننده‌ی محیطی به ضخامت ۵/۵ و پهنای ۴۰ میلی‌متر در وسط بدنه تعبیه شد. مراحل انجام آزمون فشار خارجی بدینگونه بود که ابتدا بدنه‌ی کامپوزیتی به درون مخزن آزمون فشار خارجی منتقل شد و مخزن از منور بطور کامل مسدود شد. سپس مخزن فشار خارجی مورد استفاده از آب پر شد و با استفاده از اتصال یک کپسول گاز ازت پرفشار به مخزن، فشار داخلی آن مطابق استاندارد ASTM D2924 تا رسیدن به لحظه‌ی شکست بدنه افزایش داده شد. شایان ذکر است که به دلیل

مطابق الگوی $sym [90^\circ, +54^\circ, -54^\circ]$ پیچیده شده‌است که بر اساس آن در سطح داخلی و خارجی بدنه، الیاف بصورت محیطی پیچیده شده‌اند. علت انتخاب این لایه‌چینی در قسمت نتایج توضیح داده شده است. شکل (۳) نحوه‌ی لایه‌چینی را در مدل آباکوس نشان می‌دهد. در فرآیند مدلسازی عددی این مساله، فشار کمناش ابتدا با استفاده از تحلیل کمناش خطی^۱ و سپس با تحلیل استاتیک غیرخطی^۲ تخمین زده شد. همچنین در تحلیل استاتیک غیرخطی تنش‌های ایجاد شده در بدنه مورد ارزیابی قرار گرفت. در شبکه‌بندی مخزن از المان‌های نوع S4R^۳ استفاده گردید. المان پوسته‌ای مذکور دارای ۴ گره می‌باشد. با توجه به تاثیرگذاری اندازه‌ی المان‌ها بر روی تعیین فشار لازم برای وقوع کمناش، تعداد بهینه‌ی المان‌ها به دست آمد. آزمون همگرایی برای تعداد المان‌ها بر اساس تحلیل کمناش خطی انجام شد.



شکل ۳: الگوی لایه‌چینی بدنه در نرم‌افزار آباکوس

شکل ۴ نمودار همگرایی مش‌بندی برای نمونه‌ی مذکور را نشان می‌دهد.



شکل ۴: نمودار همگرایی مش‌بندی

³ 4-node doubly curved thin or thick shell, reduced integration, finite membrane strains.

¹ Buckle

² Static, Riks

می‌باشد.

در این قسمت از پژوهش با توجه به ثابت در نظر گرفتن ضخامت لایه‌های بکار رفته و با استفاده از دو زاویه $\pm 54^\circ$ و 90° ، حالات مختلف لایه‌چینی مورد بررسی قرار گرفته است تا بهترین لایه‌چینی از این میان انتخاب گردد. لازم به ذکر است که در لایه‌چینی‌های اراه شده در جدول ۵ سهم زوایای مختلف در ضخامت یکسان است.

جدول ۵: فشار کمانش در لایه‌چینی‌های مختلف

ردیف	لایه‌چینی	فشار کمانش (bar)
۱		۱۳/۸۷
۲	$[\pm 54^\circ, 90^\circ, -54^\circ]_{\text{sym}}$	۱۳/۳۳
۳	$[90^\circ, \pm 54^\circ]_A$	۱۳/۰۱
۴	$[\pm 54^\circ, 90^\circ]_A$	۱۳/۷۱
۵	$[\pm 54^\circ, 90^\circ, -54^\circ]_A$	۱۳/۲۹

همانگونه که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، هرچه موقعیت قرارگیری لایه‌ی 90° به سطح خارجی نزدیک‌تر باشد، فشار کمانش بیشتر می‌گردد، به گونه‌ای که در لایه‌چینی‌های ۱ و ۴ که الیاف در بیرونی‌ترین لایه بصورت محیطی پیچیده شده‌اند، بیشترین فشار کمانش دیده می‌شود.

همچنین کمترین فشار کمانش متعلق به لایه‌چینی ۳ است که در آن بیشترین فاصله میان سطح خارجی و لایه‌ی 90° وجود دارد. نکته‌ی دیگر این که در لایه‌چینی ۱ که دارای بیشترین فشار کمانش است، زاویه‌ی الیاف هم در سطح داخلی و هم در سطح خارجی 90° می‌باشد. بنابراین می‌توان گفت که لایه‌های 90° نقشی مهم در میزان مقاومت مخازن به پدیده‌ی کمانش ایفا می‌نمایند. نهایتاً لایه‌چینی $[\pm 54^\circ, +54^\circ, -54^\circ]_{\text{sym}}$ بعنوان لایه‌چینی کاربردی در این پژوهش تعیین شد.

۲-۵- بررسی تاثیر بکارگیری تقویت‌کننده‌ها در بدنه‌ی کامپوزیتی

در این پژوهش، رفتار کمانشی بدنه‌های کامپوزیتی به روش اجزای محدود و با استفاده از تحلیل‌های کمانش خطی و استاتیک غیرخطی مورد بررسی قرار گرفت. مطابق نتایج، شکل مود کمانش مطابق شکل (۶) برای همه‌ی حالات مختلف دارای دو موج محیطی و یک موج طولی بدست آمد.

فشار کمانش بدست آمده از نتایج تحلیل خطی برای بدنه‌ی مورد مطالعه در حالات مختلف در جدول ۶ آورده شده

بویانسی مثبت بدنه‌ی کامپوزیتی آب‌بند شده، امکان جابجایی برای آن درون مخزن فشار خارجی پس از آنگیری کامل مخزن وجود داشت. از همین رو با استفاده از دو میله‌ی فولادی که بصورت افقی به دیواره‌های داخلی مخزن جوش داده شد، بدنه‌ی کامپوزیتی مهار گردید. شکل (۵) نحوه‌ی مهار کردن بدنه‌ی کامپوزیتی را در مخزن آزمون فشار خارجی نشان می‌دهد.



شکل ۵: مخزن آزمون فشار خارجی و نحوه‌ی مهار کردن بدنه‌ی کامپوزیتی

۵- نتایج و بحث

۵-۱- بررسی لایه‌چینی

مطابق مراجع بکارگیری لایه‌چینی‌های شامل دو زاویه‌ی $\pm 54^\circ$ و 90° در مخازن کامپوزیتی تحت فشار مورد توجه پژوهشگران و سازندگان بوده است. در واقع انتخاب زاویه‌ی $\pm 54^\circ$ معطوف به بکارگیری مخازن کامپوزیتی در فشار داخلی است چرا که با توجه به نسبت مؤلفه‌های محیطی و محوری ناشی از فشار داخلی، این لایه‌چینی استحکام استاتیکی مخزن را بیشینه می‌نماید [۷]. از طرفی در مخازنی با طول بلند که نیروهای محیطی بر بدنه سهم بیشتری را نسبت به نیروهای محوری دارد، باید از لایه‌هایی با زاویه‌ی 90° استفاده نمود. چرا که هم سطح جانبی مؤثر بدنه بزرگتر است و هم خود تنش محیطی بزرگتر از تنش محوری است (مطابق روابط ۷-۹).

$$\sigma_\theta = P.D / 2t \quad (7)$$

$$\sigma_x = P.D / 4t \quad (8)$$

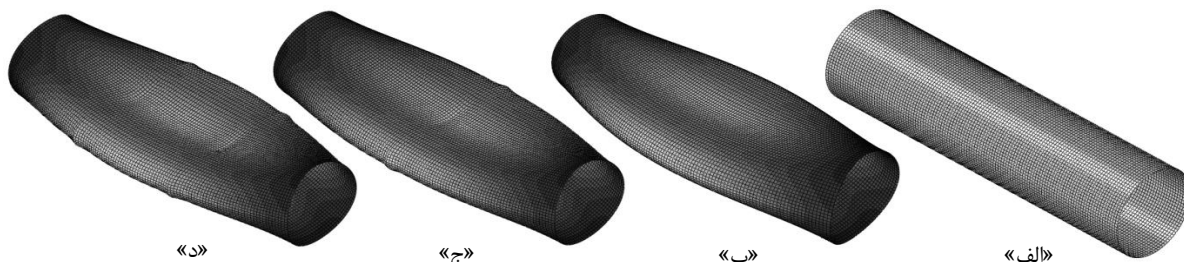
$$\sigma_r \cong 0 \quad (9)$$

در روابط فوق σ_r و σ_x و σ_θ به ترتیب تنش‌های محیطی، محوری و شعاعی ایجاد شده در مخزنی با ضخامت t و قطر متوسط D تحت فشار یکنواخت هیدرواستاتیک P

جدول ۶: فشار کمانش در حالات مختلف استفاده از تقویت کننده تقویت کننده‌ی محیطی بدست آمده از تحلیل کمانش خطی

میزان افزایش مقاومت به کمانش (%)	فشار کمانش (bar)	تعداد تقویت کننده تقویت کننده	ردیف
-	۱۳/۸۷	۰	۱
۲۵	۱۷/۳۴	۱	۲
۳۸/۷	۱۹/۲۴	۲	۳

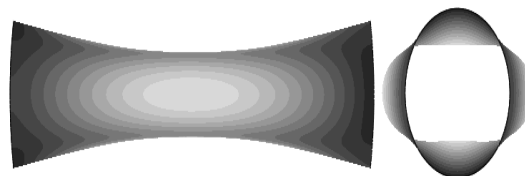
در گام بعدی از مدلسازی با استفاده از تحلیل غیرخطی استاتیک، به بررسی این بدنه تحت فشار هیدرواستاتیک خارجی پرداخته شد. شرایط مرزی در نظر گرفته شده در این تحلیل همانند تحلیل کمانش خطی می باشد. همانند تحلیل کمانش خطی، در نتایج این تحلیل نیز بیشترین جابجایی در وسط بدنه ایجاد شد. همچنین فشار کمانش



شکل ۷: مدل هندسی بدنه به ترتیب؛ «الف» شکل اولیه و تصویر تغییرشکل یافته در حالت «ب» بدون تقویت کننده، «ج» دارای یک تقویت کننده و «د» دارای دو تقویت کننده

مطابق شکل (۸)، پس از رسیدن فشار به میزان لازم برای کمانش، دیگر برای افزایش جابجایی به افزایش فشار نیازی نیست که بیانگر رسیدن بدنه به حالت ناپایداری است. در واقع پس از رسیدن به حالت ناپایداری، جابجایی‌های شدیدی در بدنه اتفاق می افتد و نهایتاً منجر به شکست بدنه می گردد. مطابق نتایج تحلیل استاتیک غیرخطی، کمانش برای بدنه‌های بدون رینگ، دارای یک تقویت کننده و دو تقویت کننده به ترتیب در فشار ۱۳/۶، ۱۷/۲ و ۱۹/۱ بار اتفاق می افتد. بنابراین می توان گفت که در مسئله حاضر، نتایج تحلیل کمانش خطی به نتایج تحلیل استاتیک غیرخطی بسیار نزدیک است. در تحلیل استاتیکی، تغییرات شاخص معیار تسای- هیل در هر لایه مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۹) شاخص تسای - هیل را برای لایه‌های کامپوزیتی در فشارهای مختلف تا رسیدن به لحظه شکست در اولین لایه نشان می دهد.

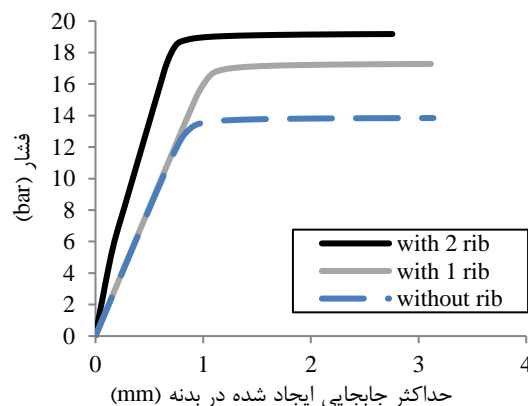
است. همچنین شکل (۷) تصاویر تغییرشکل یافته‌ی بدنه را در حالت‌های مختلف بکارگیری تقویت کننده تقویت کننده محیطی در تحلیل کمانش خطی نشان می دهد. تأثیر تقویت کننده‌ی محیطی در حالت تغییرشکل یافته به وضوح مشخص می باشد.



شکل ۶: شکل مود کمانش

نتایج بدست آمده از تحلیل خطی به وضوح نشان می دهد که بکارگیری تقویت کننده‌های محیطی باعث افزایش بار کمانشی در بدنه کامپوزیتی خواهد شد.

تخمین زده شده در این تحلیل به مقادیر بدست آمده از تحلیل کمانش خطی بسیار نزدیک است. در شکل (۸) نمودار تغییرات فشار بر حسب حداکثر جابجایی ایجاد شده در بدنه‌ی کامپوزیتی (که در وسط بدنه ایجاد می گردد) برای هر سه حالت مختلف آورده شده است.



شکل ۸: نمودار فشار بر حسب حداکثر جابجایی در هر لحظه

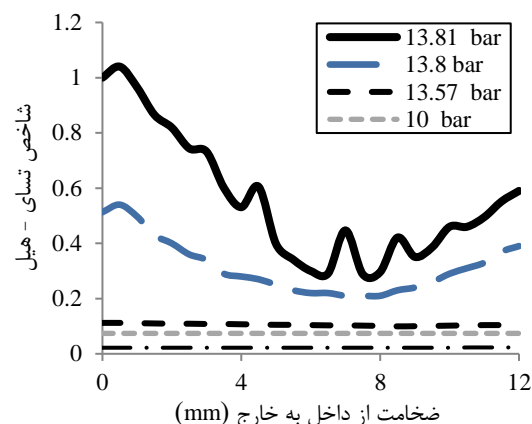
اما در فشارهای بالاتر تغییرات شاخص تسای- هیل یک روند متفاوت را نشان می‌دهد به گونه‌ای که با افزایش جزیی فشار، این پارامتر چند برابر می‌گردد که این امر حاکی از ناپایدار شدن بدنه می‌باشد. بنابراین پدیده‌ی کمانش بر اساس تحلیل استاتیک غیرخطی برای بدنه‌ی بدون تقویت‌کننده در فشار ۱۳/۶ بار اتفاق می‌افتد. مطابق نمودار در فشار ۱۳/۸۱ بار شاخص تسای - هیل برای اولین مرتبه به مقداری بیش از یک می‌رسد که این به منزله‌ی وقوع شکست در بدنه می‌باشد. در واقع تغییرات سریع شاخص تسای- هیل نشان‌دهنده‌ی رفتار پس کمانشی بدنه می‌باشد. همانند رفتار بدنه‌ی بدون تقویت‌کننده، در بدنه‌های دارای تویت‌کننده نیز روند افزایش شاخص تسای - هیل در ابتدا یک سیر تدریجی را طی می‌نماید. اما پس از رسیدن به حد مشخص (فشار کمانش) با افزایش اندک فشار، شاخص تسای- هیل بطور چشمگیری افزایش می‌یابد و نهایتاً به مقدار واحد می‌رسد. بنابراین بر اساس تحلیل استاتیک غیرخطی فشار کمانش برای بدنه‌های دارای یک و دو تقویت‌کننده حدود ۱۷/۲ و ۱۹/۱ بار محاسبه شد زد. همچنین شایان ذکر است که برای همه‌ی بدنه‌های بررسی شده، لایه‌ای که به سطح داخلی نزدیک‌تر است زودتر از بقیه‌ی لایه‌ها دچار شکست می‌گردد.

۳-۵- نتایج تجربی

همانگونه که در قسمت‌های قبل اشاره شد، جهت صحت‌سنجی نتایج تحلیل اجزای محدود، یک آزمون فشار خارجی مخرب بر روی بدنه‌ی کامپوزیتی با یک عدد تقویت‌کننده‌ی محیطی از جنس فولاد St37 انجام شد. بر اساس نتایج این آزمون، بدنه‌ی کامپوزیتی تقویت‌شده در فشار خارجی ۱۶ بار دچار شکست شد. بنابراین فشار کمانش محاسبه شده از روش اجزای مدلسازی استفاده شده در این پژوهش، حدود ۸/۴٪ با مقدار تجربی متفاوت است که بیانگر دقت بالای نتایج‌ی باشد. گفتنی است که مطابق انتظار شکست در دورترین نقطه از تکیه‌گاه یعنی در وسط بدنه اتفاق افتاد. همچنین مسیر ترک‌های ایجاد شده حاکی از تطابق بسیار زیاد شکست تجربی با مود کمانش اولیه بدست آمده از تحلیل عددی می‌باشد. شکل (۶) نحوه‌ی شکست بدنه را نمایش می‌دهد.

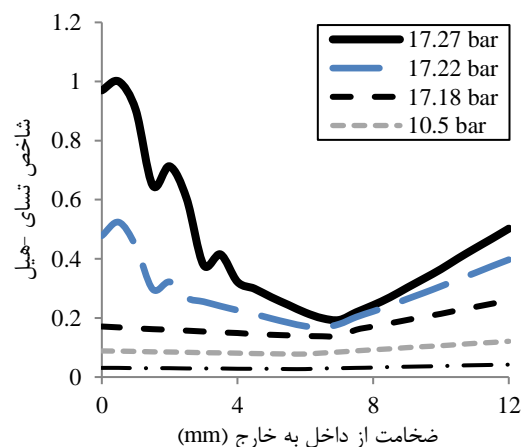
۳-۴- بررسی کاهش وزنی

یکی از دلایل عمده‌ی بکارگیری کامپوزیت‌ها در حوزه‌های

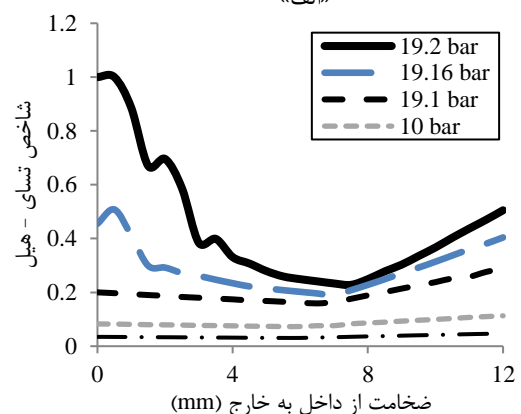


شکل ۹: شاخص تسای- هیل در لایه‌های بدنه‌ی کامپوزیتی بدون تقویت‌کننده تا رسیدن به شکست در اولین لایه

همانگونه که در شکل پایین مشاهده می‌گردد در بدنه‌ی بدون تقویت‌کننده، در محدوده‌ی فشار صفر تا حدود ۱۳/۶ بار، افزایش میزان شاخص تسای - هیل برای لایه‌های مختلف با یک روند تدریجی و متناسب با نرخ افزایش فشار، صورت می‌گیرد.



«الف»

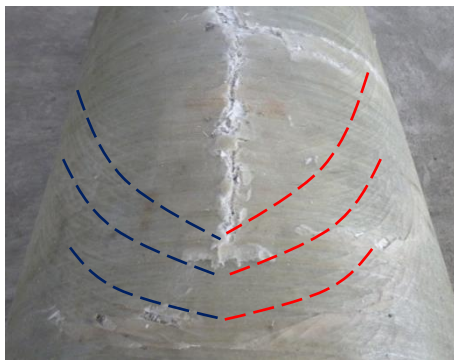


«ب»

شکل ۱۰: شاخص تسای- هیل برای لایه‌های کامپوزیت تا رسیدن به شکست در اولین لایه؛ «الف» بدنه‌ی دارای یک تقویت‌کننده و «ب» بدنه‌ی دارای دو تقویت‌کننده

که قطر خارجی آنها همانند دیگر مخازن ۴۸۰ میلی‌متر باشد. آرایش لایه‌چینی برای این مخازن در تعداد و ترتیب قرارگیری لایه‌ها همانند مخازن دارای تقویت‌کننده در نظر گرفته شد با این تفاوت که ضخامت لایه‌های آنها متفاوت بود. بررسی وزنی حالات مختلف مخازن در جدول ۷ آورده شده است. همانگونه که در جدول فوق مشاهده می‌شود، بکارگیری تقویت‌کننده‌های فولادی در کنار بدنه‌ی کامپوزیتی مورد مطالعه می‌تواند کاهش وزنی را مضاعف نماید به گونه‌ای که این امر در همین بدنه حدود ۵٪ بوده است.

مختلف، چگالی پایین این مواد است. در عین حال می‌توان با استفاده از تقویت‌کننده‌های فلزی در کنار مخازن کامپوزیتی کاهش وزنی بیشتری در مخازن ایجاد نمود. در این قسمت از پژوهش به بررسی ظرفیت وزنی ایجاد شده از بکارگیری تقویت‌کننده‌های فولادی در بدنه‌های کامپوزیتی پرداخته شده است. در همین راستا ابتدا وزن حالات مختلف مخازن که در قسمت قبل مطرح شد محاسبه گشت. سپس وزن مخازن کامپوزیتی که در آنها از تقویت‌کننده استفاده نمی‌شود ولی در فشارهای مشابه مخازن تقویت‌شده دچار کماتش می‌شوند بدست آمد. مخازن متناظر بدون تقویت‌کننده به گونه‌ای طراحی شد



«ب»



«الف»



«ج»

شکل ۱۱: مواضع شکست در بدنه‌ی کامپوزیتی پس از آزمون فشار خارجی؛ «الف» مواضع شکست در بدنه، «ب» مسیر رشد ترک‌ها پس از شکست و «ج» تقویت‌کننده‌های تقویت‌کننده در قبل و بعد از شکست

جدول ۷: فشار کماتش در حالات مختلف استفاده از تقویت‌کننده تقویت‌کننده‌ی محیطی بدست آمده از تحلیل کماتش خطی

درصد کاهش وزنی (%)	وزن بدون تقویت‌کننده (kg)	ضخامت بدون تقویت‌کننده (mm)	وزن بدنه دارای تقویت‌کننده (kg)	تعداد تقویت‌کننده	فشار کماتش (bar)	ردیف	
						تقویت‌کننده	تقویت‌کننده
۵/۱	۷۲/۶	۱۳/۱	۶۹/۱	۱	۱۷/۳۴	۱	
۵/۳	۷۵/۳	۱۳/۶	۷۱/۵	۲	۱۹/۲۴	۲	

تقویت‌کننده‌های کامپوزیتی در مخازن کامپوزیتی در عمل متحمل دشواری‌های بسیاری در فرآیند ساخت می‌باشد. از طرفی بدلیل پایین بودن صلبیت (مدول یانگ) کامپوزیت‌ها، نمی‌توان انتظار تاثیر چشمگیری از بکارگیری آنها بعنوان تقویت‌کننده داشت. بنابراین در پژوهش حاضر،

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش تأثیر استفاده از تقویت‌کننده‌ی محیطی فولادی بر رفتار مکانیکی مخازن کامپوزیتی تحت فشار هیدرواستاتیک خارجی به روش اجزای محدود و بصورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. در واقع استفاده از

کمانشی شده است. بنابراین می‌توان با استفاده از تقویت‌کننده‌های محیطی فلزی در مخازن کامپوزیتی تحت فشار خارجی، مقاومت بدنه را در برابر پدیده‌ی کمانش بدون تغییر ضخامت آن افزایش داد.

۳- بررسی عددی تنش‌های بوجود آمده در بدنه بر اساس معیار شکست تسای - هیل در کامپوزیت‌ها نشان می‌دهد که بیشترین تنش‌ها در درونی‌ترین لایه‌ها ایجاد می‌شود و به همین دلیل اولین لایه‌ای که دچار شکست می‌گردد، لایه‌ی داخلی مخازن می‌باشد.

۴- بکارگیری تقویت‌کننده‌های محیطی در بدنه‌های کامپوزیتی موجب کاهش وزنی مؤثرتری در مخازن می‌گردد. نتایج نشان داد که وزن بدنه‌ی دارای یک تقویت‌کننده معادل با بدنه‌ی بدون تقویت‌کننده (از نظر فشار کمانش) در حدود $5/1\%$ سبک‌تر است. همچنین وزن بدنه‌ی دارای دو تقویت‌کننده در مقایسه با بدنه‌ی معادل بدون تقویت‌کننده، در حدود $5/3\%$ سبک‌تر است.

با توجه به اهمیت استفاده از تقویت‌کننده‌های فلزی، رفتار مخازن کامپوزیتی دارای تقویت‌کننده فلزی در لحظه‌ی شکست مطالعه شد که نتایج کلی آن به شرح زیر است:

۱- مقایسه‌ی نتایج تحلیل اجزای محدود با نتایج آزمون تجربی نشانگر اختلاف حدود $8/4\%$ می‌باشد. این مطلب بیانگر صحت و دقت بالای روش استفاده شده در این پژوهش برای مدلسازی رفتار کامپوزیت‌ها است. همچنین شباهت مود شکست تجربی به مود کمانش بدست آمده از تحلیل عددی بر قابلیت اعتمادپذیری شیوه‌ی مدلسازی می‌افزاید.

۲- افزایش یک تقویت‌کننده‌ی محیطی در وسط بدنه‌ی مورد مطالعه در این پژوهش، فشار کمانش را به میزان 25% درصد افزایش می‌دهد. همچنین تحلیل شبیه‌سازی اجزای محدود نشان می‌دهد که اگر تعداد تقویت‌کننده‌های تقویت‌کننده‌ی محیطی به دو عدد افزایش یابد، مقدار فشار کمانش $38/7\%$ درصد افزایش می‌یابد. بعبارت دیگر افزایش تعداد تقویت‌کننده‌های تقویت‌کننده موجب افزایش فشار

مراجع

- [1] T.A. Sabik, I. Kreja, "Stability analysis of multilayered composite shells with cut-outs". Archives of Civil And Mechanical Engineering, Vol. 11, No. 1, 2011, pp 195-207.
- [2] A. Ahmadi, R. Akbari, "Mechanical buckling analysis of functionally graded thick cylindrical shells using third order shear deformation theory". Journal of Modeling in Engineering, Semnan University, Vol. 12, 2014, pp. 129-142.
- [3] A. Ahmadi, J. Skandari, H. Poorshahsavari, "Three dimensional buckling analysis of FG cylindrical panels under various thermal load conditions". Journal of Modeling in Engineering, Semnan University, Vol. 14, No. 46, 2016, pp. 39-50.
- [4] H. Shariatmadar, H. Abbaszadeh, "Modeling of Buckling Restrained Braces Subjected to Dynamic loads". Journal of Modeling in Engineering, Semnan University, Vol. 4, 2009, pp. 1-11.
- [5] G.C. Lee, J. H. Kweon, J. H. Choi, "Optimization of composite sandwich cylinders for underwater vehicle application". Composite Structures Journal, Vol. 96, 2013, pp. 691-697.
- [6] C.J. Moon, I. H. Kim, B. H. Choi, J. H. Kweon, J. H. Choi, "Buckling of filament-wound composite cylinders subjected to hydrostatic pressure for underwater vehicle applications". Composite Structures Journal, Vol. 92, No. 9, 2010, pp. 2241-2251.
- [7] T. Messenger, M. Pyrz, B. Gineste, P. Chauchot, "Optimal lamination of thin underwater composite cylindrical vessels". Composite Structures Journal, Vol. 58, No. 4, 2002, pp. 529-537.
- [8] Y. Rao, M. Krishna, K. Vijay, "Composite Pressure Vessels". International Journal of Research in Engineering and Technology (IJRET), Vol.1, No. 4, December 2013, pp. 598-618.

- [9] J. Blachut, "Buckling and first ply failure of composite toroidal pressure hull". *Journal of Computers and Structures*, Vol. 82, No. 23-26, 2004, pp. 1981-1992.
- [10] R.S. Priyadarsini, Kalyanaraman "Numerical and experimental study of buckling of advanced fiber composite cylinders under axial compression", *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, Vol. 12, No.4, 2012, pp. 651-676.
- [11] S.H. Hur, H.J. Son, J.H. Kweon, J.H. Choi "Postbuckling of composite cylinders under external hydrostatic pressure". *Journal of Composite Structures*, Vol. 86, No. 1-3, 2008, pp.114-124.
- [12] J.Y. Han, H.Y. Jung, J.R. Cho, J.H. Choi, W.B. Bae, "Buckling analysis and test of composite shells under hydrostatic pressure". *Journal of materials processing technology*, Vol. 201, No. 1-3, 2008, pp. 742-745.
- [۱۳] م. البیاسی، ح. یوسفی نژاد گیلده، و م. ذبیح پور، "تعیین پاسخ مکانیکی مخازن کامپوزیتی با برش دایره‌ای تحت فشار هیدرواستاتیک خارجی یکنواخت"، نشریه مهندسی مکانیک مدرس دوره ۱۵، شماره ۹، ۱۳۹۴، صفحه ۳۶۰-۳۷۰.
- [14] P. Forys, "Optimization of cylindrical shells stiffened by rings under external pressure including their post-buckling behaviour". *Journal of Thin-Walled Structures*, Vol. 95, 2015, pp. 231-243.
- [15] A. Terada, S. Shimamoto, "Collapse of Ring-Stiffened Thin Cylindrical Shells under Uniform Pressure". *Journal of Zosen Kiokay*, Vol. 1960, No 108, January 2010, pp. 199-210.
- [16] C.T.F. Ross, J. Etheridge, "The Buckling and Vibration of tube-stiffened under external hydrostatic pressure" *Ocean Engineering Journal*, Vol. 27, No. 12, December 2010, pp. 1373-1390.
- [17] M. Bagheri, A.A. Jafari, M. Sadeghifar, "Multi-objective optimization of ring stiffened cylindrical shells using a genetic algorithm". *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 330, No. 2, 2011, pp. 374-384.
- [18] L. Chenghu, W. Zhe, "Buckling of 120° stiffened composite cylindrical shell under axial compression-Experiment and Simulation". *Journal of Composite Structures*, Vol. 128, 2015, pp. 199-206.
- [19] E. Mahdi, T.A. Sebaey, "An experimental investigation into crushing behavior of radially stiffened GFRP composite tubes". *Journal of Thin-Walled Structures*, Vol. 76, November 2014, pp. 8-13.
- [20] C.T. Heracovich, *Mechanics of fibrous composites*. John Wiley & Sons Press, USA, 1998.
- [21] ASM, *ASM Handbook Volume 21, Composites*. ASM International, 2001.
- [22] B. Harris, *Fatigue in composites*. CRC Press, USA, 2003.

[۲۳] م. محسنی شکیب، مکانیک سازه‌های مرکب، ویرایش دوم، انتشارات دانشگاه امام حسین، ۱۳۸۷.