

Experimental and numerical investigation of the behavior of cylindrical thin-walled GFRP Shells with different geometric Features under dental load

Hossein Showkati^{1*}, Babak Sarboland²

1- Professor, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Urmia University, urmia, Iran

2 -Ph.D. Student in Structural Engineering, Faculty of Engineering, International Pardis of Urmia University, Urmia, Iran

ABSTRACT

Structural applications of composite materials in various structures such as oil and gas industries, water supply systems, marine industries, aerospace and military industries are included. Especially in structures where a high ratio of strength to weight is important, these applications are increasing, a common example of which is cylindrical composite tanks. External loads may enter the tanks by means of compression tools such as falling objects or colliding with machines, etc. These loads may cause serious and sudden damage to the tanks. For this reason, it is very important to study the effect of such forces. This paper is the result of a laboratory study in which four samples of GFRP tanks with an inner diameter of 800 and 400 mm and a thickness of 4 mm were tested and examined under a dental load. Also, for numerical simulation of the tests performed, Abacus software was used and the load-displacement diagrams obtained from the experiment with finite element results were examined and analyzed, which shows the appropriate estimate of finite element analysis. The experimental results showed that reducing the sample length has a significant effect on increasing the bearing capacity and also the results obtained in vitro are in good agreement with the numerical simulation results.

ARTICLE INFO

Receive Date: 31 May 2020

Revise Date: 12 October 2020

Accept Date: 21 January 2021

Keywords:

Dental Load,
Laboratory,
GFRP Tanks,
Numerical Simulation,
Abacus Software,
Finite Element

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.233435.2158>

*Corresponding author: Hossein Showkati

Email address: h.showkati@urmia.ac.ir

تحقیقات آزمایشگاهی و عددی رفتار پوسته های استوانه ای جدار نازک از جنس مصالح GFRP با مشخصات هندسی متفاوت تحت اثر بارندانه ای

حسین شوکتی^{۱*}، بابک سربلند^۲

۱- استاد، گروه عمران دانشکده فنی دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۲- دانشجوی دکتری عمران-سازه، پردیس بین المللی دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

چکیده

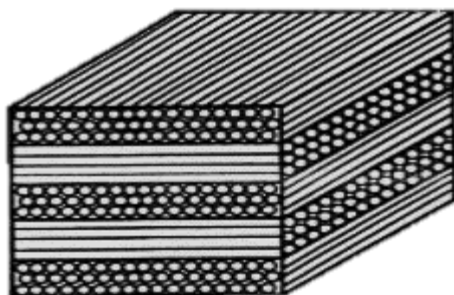
کاربردهای سازه ای مواد کامپوزیتی در سازه های مختلف مانند صنایع نفت و گاز، سیستم های آبرسانی، صنایع دریایی، صنایع هوا و فضا و نظامی را شامل می شود. به ویژه در سازه هایی که در آنها نسبت بالای استحکام به وزن حائز اهمیت است، این کاربردها در حال افزایش است. که یک نمونه رایج آن مخازن کامپوزیتی استوانه ای است. بارهای خارجی ممکن است به وسیله ابزارهای فشاری مانند سقوط اجسام و یا برخورد ماشین آلات و غیره به مخازن وارد گردد. این بارها ممکن است موجب خسارات و آسیب های جدی و ناگهانی در مخازن گردد. به همین دلیل بررسی اثر این گونه نیروها از اهمیت زیادی برخوردار است. این مقاله نتایج یک تحقیق آزمایشگاهی است که در آن چهار نمونه از مخازن GFRP با قطر داخلی ۸۰۰ و ۴۰۰ میلی متر و ضخامت ۴ میلی متر تحت بارندانه ای مورد آزمایش و بررسی قرار گرفته اند. همچنین جهت شبیه سازی عددی تست های انجام گرفته از نرم افزار آباکوس استفاده شده و نمودارهای بار-جابجایی حاصل از آزمایش با نتایج المان محدود مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت که نشان دهنده تخمین مناسب تحلیل المان محدود می باشد. نتایج آزمایشات نشان داد که کاهش طول نمونه در افزایش ظرفیت باربری تاثیر بسزایی دارد و همچنین نتایج بدست آمده در شرایط آزمایشگاهی، با نتایج شبیه سازی عددی انطباق خوبی دارند.

کلمات کلیدی: بارندانه ای، آزمایشگاه، مخازن GFRP، شبیه سازی عددی، نرم افزار آباکوس، المان محدود

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.233435.2158	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2021.233435.2158	۱۴۰۰/۱۲/۲۹	۱۳۹۹/۱۱/۰۲	۱۳۹۹/۱۱/۰۲	۱۳۹۹/۰۷/۲۱	۱۳۹۹/۰۳/۱۱
			حسین شوکتی		*نویسنده مسئول:	
			h.showkati@urmia.ac.ir		پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

مواد کامپوزیت موادی می‌باشند که شامل حداقل دو ماده مختلف بوده که به یکدیگر می‌چسبند. لایه‌ها به گونه‌ای روی یکدیگر قرار دارند که مقاومت لازم در جهات مورد نظر حاصل می‌شود. برای دستیابی به اهداف خاص، معمولاً از لایه‌های مختلف می‌توان استفاده نمود. برای مثال ساده‌ترین حالت یک چندلایه استفاده از دو فلز با ضرایب انبساط حرارتی متفاوت برای ساخت یک ترموستات می‌باشد. از انواع دیگر چندلایه‌ها می‌توان به فلزات روکش دار، لایه‌های شیشه-پلاستیک و لایه‌های کامپوزیت از الیاف و چسب اشاره کرد. مهم‌ترین چندلایه‌ها، چندلایه‌های کامپوزیت با بستر پلیمری می‌باشند. در این چندلایه‌ها با تغییر دادن جهت الیاف در لایه‌های مختلف، می‌توان بر اساس نیاز سازه به مقاومت و سختی در جهات مختلف دست یافت و یا چندلایه را به گونه‌ای طراحی کرد که کمترین وزن را داشته باشد. کاربرد این چندلایه‌ها در صنعت، روندی صعودی داشته و نمونه‌هایی از آن را می‌توان در صنایع نفت و گاز و سیستم‌های آبرسانی و فاضلاب، صنایع دریایی و صنایع هوا و فضا و نظامی و دیگر موارد مشاهده نمود. همچنین این مواد به‌ویژه در سازه‌هایی که در آن‌ها نسبت بالای استحکام به وزن و عمر خستگی حائز اهمیت است کاربرد دارند. این کاربردها در حال افزایش است که یک نمونه رایج آن مخازن کامپوزیتی استوانه‌ای است. این سازه‌ها تحت اثر بار دندانانه‌ای (دنت) دچار ترک و شکست می‌شوند. مطالعات آزمایشگاهی و عددی نشان می‌دهند که شکست و ترک ناشی از اعمال بار دندانانه‌ای (دنت) یکی از عوامل اصلی خطر در پوسته‌های استوانه‌ای جدار نازک است. از دیگر موضوعات مهم در طراحی سازه‌ها و از جمله سازه‌های پوسته‌ای، بحث پایداری و مقاومت این سازه‌ها در برابر بارهای وارده می‌باشد. اثر بار دندانانه‌ای (دنت) باعث ناپایداری این سازه‌ها می‌شود [۴]. لذا برای به دست آوردن مدلی که بتواند هم در مقابل این نوع بارها مقاومت کند و هم از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه باشد، باید این اثرات در رفتار سازه‌ای مخازن کامپوزیتی مورد توجه قرار گیرد. در این مقاله، اثر بار دندانانه‌ای (دنت) بر رفتار مخازن تحت حالت‌های مختلف هندسی شامل تغییر ارتفاع مورد بررسی قرار خواهد گرفت.



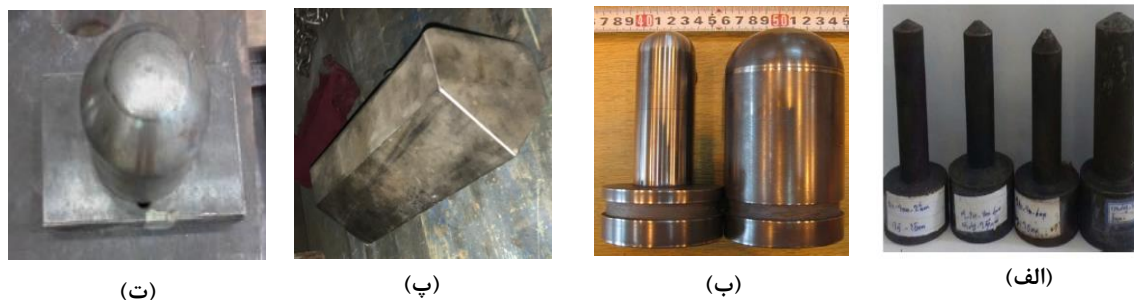
شکل ۱: کامپوزیت چندلایه

۱-۱- مزایای استفاده از مخازن کامپوزیتی

تولید و به کارگیری مخازن کامپوزیتی در حوزه‌های مختلف صنعت، پروژه‌های عمرانی و ... هیچ‌گونه مخاطره زیست‌محیطی ندارد علت این امر از آنجا نشأت می‌گیرد که کلیه مواد اولیه مورد استفاده در ساخت این مخازن، پس از انجام واکنش شیمیایی و تبدیل شدن به محصول (مخزن) از حالت خنثی برخوردار بوده و به همان شکل در محیط باقی مانده و هیچ‌گونه واکنشی از خود نشان نمی‌دهند همچنین با توجه به اینکه یکی از معضلات اساسی لوله‌ها و مخازن فولادی و چدنی که در صنعت آب مورد استفاده قرار می‌گیرند، موضوع زنگ زدن است. زنگ‌زدگی موجب فرسودگی لوله یا مخزن و ترکیدن آن و نشت آب می‌شود، در این حالت هزینه تعویض و یا تعمیر بسیار بالایی خواهند داشت اما لوله‌ها و مخازن فایبرگلاس به دلیل پلیمر بودن آن‌ها از کوچک‌ترین خطر زنگ‌زدگی برخوردار نبوده و به‌طور متوسط از عمر بهره‌برداری پنجاه ساله برخوردار می‌باشند [۸].

۲-۱- معرفی بار دندانه ای

بار دندانه‌ای یک بار نقطه‌ای و متمرکز است که با توجه به نوع هندسه، شکل و نحوه رفتار و برخورد با مقطع می‌تواند رفتار متفاوتی در سازه از خود نشان دهد [۶]. در آزمایشگاه درحالات مختلفی می‌تواند بر لوله یا مخزن وارد شود مانند بار دندانه ای گنبدی شکل، مخروطی یا کله‌قندی، کروی شکل، مستطیلی، گوه‌ای و نوک تیز (شکل ۲).



شکل ۲: انواع بار دندانه ای، الف) نوک تیز، ب) گروی، پ) گوه، ت) گنبدی

اما در واقعیت بار دندانه ای می‌تواند به صورت‌های مختلفی بر مخزن، لوله‌ها و یا سایر سازه‌ها وارد شده و باعث بروز خرابی‌های مختلف شود. مانند بلند شدگی یا Uplift در مخازن مهار نشده در هنگام بروز زلزله که در کنار هم می‌باشند، (شکل ۳)، بلندشدگی جزئی کف مخزن ناشی از لنگر واژگونی منجر به افزایش بیشینه فشار محوری در دیواره مخزن می‌شود. در نتیجه ممکن است در مقادیر کمتری از لنگر واژگونی، ناپایداری جداره رخ دهد. یکی از دلایل واژگونی مخازن تحریک افقی زلزله می‌باشد. فشار دینامیکی وارده بر دیواره مخزن به علت تحریک افقی بر مخزن شکل‌پذیر استوانه‌ای بر روی خاک صلب گردد. بلند شدگی مخزن علاوه بر ایجاد خطر بر مخزن مجاور باعث اعمال نوعی بار دندانه‌ای و در پی آن موجب شکست و ترک خوردگی خود مخزن می‌شود [۱]. از سایر بارهای دندانه ای وارده بر مخازن می‌توان بر برخورد شی مانند برخورد یک اتومبیل، کامیون و ...، سقوط آزاد اجسام از ارتفاعات بالاتر مثل سقوط مصالح سنگین از جرثقیل اشاره کرد (شکل ۳). برخورد گلوله به یک پوسته مثل پوسته مخزن را نیز می‌توان بار دندانه ای تلقی کرد که ممکن است باعث فرورفتگی و سوراخ شدن پوسته مخزن گردد. در نتیجه هدف اصلی در این تحقیق، بررسی کامل اثر بار دندانه ای بر مخازن استوانه‌ای کامپوزیتی جدار نازک GFRP با ارتفاع و قطرهای مختلف و بررسی رفتار این مخازن در برابر اعمال این نوع بارها می‌باشد.



(ب)



(الف)

شکل ۳: الف) بلندشدگی یا Uplift، ب) برخورد اشیاء

۱-۳- پیشینه تحقیق

GFRP^۱ مخفف عبارت پلیمر مسلح شده با الیاف شیشه می‌باشد. مخازن GFRP به دلیل مزایای بسیار زیادی که نسبت به مخازن ساخته شده با مصالح دیگر دارند، روزبه‌روز مورد استقبال بیشتری قرار می‌گیرند و در پروژه‌ها استفاده‌های فراوانی پیدا کرده‌اند. از این رو لازم است مطالعات و تحقیقات دقیق‌تری بر روی این‌گونه مخازن که رفتار متفاوتی نسبت به مخازن بتنی و فولادی دارند صورت گیرد. استانداردها بر روی بارهای متداول تمرکز نموده و مقدار مجاز آن‌ها و همین‌طور رفتار مجاز در اثر این نوع بارها را مشخص نموده‌اند و اما رفتار مخازن تحت بارهای دندانه‌ای هنوز به‌طور کامل مورد بررسی قرار نگرفته و رفتار این مخازن در اثر بارهای دندانه‌ای نامشخص می‌باشد. البته تحقیقات بسیار زیادی به‌صورت تئوری و آزمایشگاهی بر روی رفتار لوله‌های ساخته شده با مصالح دیگر (بتنی، فولادی و ...) در اثر بار دندانه‌ای انجام شده است؛ اما موضوع تأثیر بار دندانه‌ای بر پوسته‌های چندلایه کامپوزیتی تاریخچه نسبتاً کوتاهی دارد. با این حال، با توجه به کمبود منابع و مراجع جهت تحقیق و مطالعات بهینه در این مورد، معدود منابعی که در این مورد، تحت مطالعه قرار گرفته‌اند به شرح ذیل می‌باشد. ابارار و همکاران (۲۰۱۷) مطالعاتی در مورد بررسی‌های آزمایشگاهی روی رفتار پوسته‌های کامپوزیتی GFRP تولید شده به روش پیچش الیاف تحت فشار هیدرو استاتیک و بار محوری در دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد را بررسی کردند که شش آزمایش با نسبت‌های مختلف تنش‌های محوری و حلقوی به‌صورت بار محوری خالص (۰:۱) و (۰:۵:۱) و (۱:۱) و (۲:۱) و (۴:۱) و بار حلقوی خالص (۱:۰) مورد آزمایش قرار دادند که طی این آزمایش‌ها سه مد گسیختگی مجزا مشاهده شد. به این صورت گسیختگی کششی محوری در حالت بارگذاری محوری خالص، نشت در حالت بارگذاری محوری غالب و نشت موضعی در بارگذاری حلقوی غالب روی داد و با افزایش دما تأثیرات قابل‌ملاحظه‌ای روی مدهای گسیختگی و تنش‌ها حاصل شد. دی (۲۰۱۴) مخازن کامپوزیتی جدار نازک رشته پیچ شده با کاربردهای زیر دریایی را با آنالیز اجزای محدود مورد مطالعه قرار داد. هدف از این مطالعه، مقایسه میزان مقاومت در مقابل بار کم‌انرژی در دو حالت با تقویت کننده و بدون آن می‌باشد. مخازن از جنس کربن اپوکسی و با چیدمان (±۳۰/۹۰)، (±۴۵/۹۰) و (±۶۰/۹۰) می‌باشد. آنها به این نتیجه رسید که چیدمان (±۶۰/۹۰) بیشترین بار کم‌انژی را دارا است [۲]. الگازولی و همکاران (۱۹۸۸) نیز بر روی قطعات استوانه‌ای تحت بار موضعی و آزمایش‌های تجربی انجام دادند که نمودارهای بار-خیز و بار-تغییر مکان را ترسیم کردند و آن‌ها را مورد تحلیل و بررسی قرار دادند. آن‌ها در آزمایش‌های خود از چند نوع چیدمان الیاف با مشخصات مصالح مختلف استفاده نمودند و باهم مقایسه کردند [۳]. عیوضی نژاد و همکاران (۲۰۱۳) بررسی‌های تجربی بر روی ترکیب بار محوری و دندانه‌ای را توسط جک‌های هیدرولیکی عمودی و افقی، بر روی لوله‌های فولادی انجام دادند؛ و برای آن‌ها نمودارهای بار-تغییر مکان رسم نمودند. تغییر شکل‌های حاصل از آزمون با نرم‌افزار را مقایسه کردند که و تغییر شکل‌ها و نتایج تجربی و تئوری تطابق بسیار خوبی باهم داشتند. همچنین در یک تحقیق دیگر رفتار لوله‌ها را به‌صورت تجربی تحت بار محوری بررسی کردند و نتایج را با روش المان محدود مقایسه نمودند [۴]. گوهری (۲۰۱۲) تحقیقی بر روی صفحات استوانه‌ای GRP تحت فشار استاتیک خارجی به روش المان محدود انجام داد. وی زوایای الیاف ۹۰، ۶۰، ۴۰ درجه را در نظر گرفت و تنش و کرنش حداکثر را مورد بررسی قرار داد [۵]. جاجو (۲۰۱۴) در پایان‌نامه دکترای خود در مورد اثرات انواع بار دند بر روی پوسته‌های فولادی تحقیق کرد، طبق این پایان‌نامه سه نوع بار دندانه‌ای بر روی لوله وارد می‌شود: ۱- بار دندانه‌ای گنبدی شکل ۲- بار دندانه‌ای دایروی شکل ۳- بار دندانه‌ای مستطیلی شکل. در این تحقیق بار دندانه‌ای یک تغییر شکل پلاستیکی بر روی لوله به وجود آورد که این تغییر شکل باعث به وجود آمدن کرنش در دیواره لوله شد. همچنین در این تحقیق تأثیرات نوع شکل بار دند، عمق بار دند و فشارهای داخلی بر روی توزیع کرنش بر روی لوله را مورد بررسی قرار داد [۶]. جین (۲۰۱۳) تحقیقاتی بر روی پوسته‌های GRP با توجه به خصوصیات مصالح تشکیل‌دهنده آن‌ها جهت طراحی بهینه این لوله‌ها انجام شده است. این تحقیق روشی برای ارزیابی مقاومت و خرابی با توجه به خصوصیات مواد دیواره پوسته ارائه شد. همچنین در این مطالعه فرمولی جهت محاسبه بهینه ضخامت دیواره سازه برای لنگر خمش کل (مجموع لنگرهای حاصل از فشار عمودی زمین، فشار افقی زمین و بار زنده) انجام شد [۷]. موسوی و همکاران (۲۰۱۸) تحقیقات آزمایشگاهی و تئوریک رفتار پوسته‌های GFRP تحت اثر هم‌زمان نیروی محوری و بار دندانه‌ای را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق در تمامی نمونه‌های تست شده در آزمایشگاه مدهای شکست در وسط دهانه و به‌صورت فرورفتگی در زیر محل اعمال بار موضعی و با صدای ترک

¹ Glass Fiber Reinforced Polymer

خوردن پوسته همراه می‌باشد. همچنین مقاومت نمونه‌ها در حالت با بستر صلب بیشتر از حالت بدون بستر می‌باشد. چون در حالت بستر صلب، وجود بستر صاف و صلب مانع از ایجاد لنگر ثانویه ناشی از تغییر شکل خمشی می‌شود [۸]. پاراشار (۲۰۱۳) مکانیسم شکست پوسته‌های FRP متصل شده به وسیله چسب را با شکل الیاف مختلف مورد بررسی قرار داد که در این تحقیق مخازن با زوایای الیاف ۳۰، ۵۵ و ۶۰ درجه مورد بررسی قرار گرفت [۹]. پارک (۲۰۱۱) آزمایش‌هایی در مقیاس واقعی روی پوسته‌های GRP مدفون در خاک با قطر داخلی ۲۴۰۰ میلی‌متر جهت بررسی تغییر قطر افقی و عمودی انجام دادند که خیز افقی و عمودی کوتاه‌مدت در طی ۳۸۷ روز مورد اندازه‌گیری قرار داده شد. نتایج با فرمول لووا و آنالیز تفاضلات محدود مقایسه شد [۱۰]. رفیعی (۲۰۱۷) و همکاران میزان سفتی مخازن را با روش المان محدود محاسبه و با نتایج تجربی مقایسه کردند بدین‌صورت که با روش مدل‌سازی عددی میزان نیروی حاصل از ۵٪ تغییر مکان قطری برای مخازن کامپوزیتی را به دست آورد. سپس با استفاده از رابطه ارائه‌شده میزان سفتی مورد نظر را محاسبه و با میزان سفتی به‌دست‌آمده از آزمایشگاه مقایسه کرد [۱۱]. شوای و همکاران (۲۰۱۸) تحقیقات آزمایشگاهی و عددی در مورد پاسخ کشش پوسته‌ها طبق آئین‌نامه API 5L X52 تحت بار دندان‌های و فشار داخلی یکنواخت مورد بررسی قرار دادند که در این تحقیق نتایج آنالیزهای المان محدود نشان داده شد؛ که کرنش در منطقه وارد شدن بار دندان‌های به‌سرعت و با مقدار زیادی تغییر می‌کند [۱۲]. واکر و همکاران (۱۹۸۳) با فرض طول ثابت مخازن منطقه فرورفتگی آن را بررسی کردند. آن‌ها از طریق یک روش نیمه تجربی، یک نتیجه برای پاسخ بار-خیز در پوسته‌ها بیان کردند که مورد تأیید استاندارد API قرار گرفت و از آن استفاده می‌شود [۱۳]. ویزیکی و همکاران (۱۹۸۸) آزمایش تحلیلی پاسخ پوسته تحت اثر بار جانبی منفرد و با حضور نیروی محوری و لنگر را به‌وسیله یک مدل پوسته سه‌بعدی انجام دادند. آن‌ها همچنین تأثیر شرایط مرزی را هم مورد بررسی قرار دادند [۱۴]. زرین و همکاران (۲۰۱۸) تحقیقات آزمایشگاهی و تئوری پوسته‌های GRP تحت بار دندان‌های را بررسی شد و بدین‌صورت نتیجه گرفته شد که تمامی نمونه‌ها از ابتدا تا انتهای بارگذاری دارای رفتار خطی می‌باشند و با شیب یکسان پیش می‌روند که این رفتار ناشی از رفتار و خواص مصالح GRP می‌باشد. همچنین بروز تغییر شکل در سطح فوقانی گوه شدیدتر از سطح جانبی و به‌صورت فرورفتگی می‌باشد [۱۵]. امروزه فن آوری‌های جدید در تولید مخازن امکان کسب عملکرد بهتر با هزینه کمتر را فراهم نموده است. از جمله می‌توان به مخازن GFRP اشاره کرد که مخازنی سبک و مقاوم در برابر خوردگی می‌باشند و کاربرد متنوعی در صنایع مختلف دارند. و به دلیل مزایای بسیار زیادی مانند عدم مشکل زیست محیطی، قابلیت تولید مخزن در قطرهای مختلف، وزن کم، عدم اکسیداسیون در مقابل رطوبت و هوا و بهره‌وری اقتصادی موجب شده تا استقبال بیشتری از این مخازن در پروژه‌ها شود. از این رو لازم است مطالعات و تحقیقات دقیق‌تری بر روی این گونه مخازن که رفتار متفاوتی نسبت به مخازن فولادی و چدنی دارند صورت گیرد. مخازن ممکن است تحت تاثیر بارهای مختلفی قرار گیرند که رفتار مخازن نسبت به هر نوع بار متفاوت است. استانداردها بر روی بارهای متداول تمرکز نموده و مقدار مجاز آنها و همچنین رفتار مجاز در اثر این نوع بارها را مشخص نموده‌اند اما بارهای دندان‌های یا گوه‌ای که ممکن است در اثر برخورد ماشین‌آلات، سقوط مصالح و اجسام مختلف اتفاق افتد مورد بررسی قرار نگرفته و رفتار این نوع مخازن در اثر بارهای دندان‌های نامشخص می‌باشد. البته تحقیقات زیادی به صورت تئوری و آزمایشگاهی بر روی رفتار مخازن ساخته شده با مصالح فولادی، در اثر بار دندان‌های انجام گردیده و این امر انگیزه‌ای شد تا در این مقاله بر روی رفتار مخازن GFRP تحت تاثیر بارهای دندان‌های تحقیق و بررسی صورت گیرد.

۲- تحقیقات آزمایشگاهی

انجام تست بر روی نمونه‌های آزمایشگاهی به‌طوری‌که بتوان از نتایج حاصل از آن استفاده کرد و قابل مقایسه با نتایج تئوری و نرم‌افزاری باشد نیازمند شناخت کافی از مسئله و فرضیات حاکم و شرایط تأثیرگذار بر آن می‌باشد. هر عامل دیده نشده و اعمال نادرست در آزمایشگاه، ناکاملی و یا نقص در یک نمونه تست به نمونه دیگر باعث واگرایی در پاسخ‌های به‌دست‌آمده خواهد شد؛ بنابراین باید دقت کافی در مدل‌سازی رفتار مصالح در تحلیل نرم‌افزاری و انطباق مناسب شرایط تکیه‌گاهی و راه‌اندازی آن در آزمایشگاه با تحلیل نرم‌افزاری

سرعت اعمال بار و عدم وجود نقص قابل رؤیت در آن صورت بگیرد، تا بتوان با کمترین ضریب خطا مدل سازی نمونه های آزمایشگاهی انجام داد و نتایج ارزشمند آن برای استفاده های بعدی در دسترس قرار بگیرند.

۲-۱- معرفی نمونه های آزمایشگاهی

برای بررسی رفتار پوسته های جدار نازک کامپوزیتی تحت بار دندانه ای در این مرحله به تعداد ۴ نمونه آزمایشگاهی در دو مرحله تهیه و مورد آزمایش قرار گرفت که مشخصات مکانیکی در تمامی نمونه ها یکسان بوده و در مرحله اول از دو مخزن با شعاع یکسان ۴۰۰ میلی متر و به طول های متفاوت ۳۰۰ و ۷۰۰ میلی متر استفاده شد و در مرحله دوم از دو مخزن دیگر با شعاع یکسان ۲۰۰ میلی متر و به طول های متفاوت ۳۰۰ و ۷۰۰ میلی متر استفاده شده است (جدول ۱). لازم به یادآوری است که در رفتار پوسته های جدار نازک تحت بار دندانه ای پارامترهای هندسی بی بعد t/R و L/R به عنوان مهم ترین پارامتر مورد بررسی قرار می گیرد.

جدول شماره ۱: مشخصات هندسی مخازن

ردیف	اسم نمونه	شعاع (mm)	طول (mm)	ضخامت کل (mm)	تعداد لایه الیاف	زاویه الیاف
۱	L3R4	۴۰۰	۳۰۰	۴	۳	۹۰
۲	L7R4	۴۰۰	۷۰۰	۴	۳	۹۰
۳	L3R2	۲۰۰	۳۰۰	۴	۳	۹۰
۴	L7R2	۲۰۰	۷۰۰	۴	۳	۹۰

۲-۲- طراحی تکیه گاهها

در طراحی تکیه گاهها سعی شده است شرایطی محیا شود که از دوران نمونه های تحت تست در هنگام بارگذاری جلوگیری شود. بدین منظور از سه صفحه صلب که توسط میله های نگه دارنده که این صفحه ها را از بالا و پائین گیردار کرده اند تشکیل شده است. این صفحات به گونه ای طراحی شده اند که با قرار گرفتن نمونه در داخل شیار صفحات تقریباً هیچ حرکتی نداشته باشند (شکل ۴). برای کنترل مقاومت پیچ های استفاده شده در طراحی تکیه گاهها بیشترین نیرویی که در آزمایشگاه به عنوان بار دندانه ای قابل اعمال است در نظر گرفته شده است.

۲-۳- موقعیت نصب خیزسنج ها و کرنش سنج ها

جهت اندازه گیری میزان تغییر شکل ها از خیزسنج استفاده می شود. دقت اندازه گیری این خیزسنجها در حد یک صدم میلی متر می باشد. به طوری که هر دور چرخش کامل عقربه آن ها برابر با یک میلی متر جابجایی در راستای طولی می باشد (شکل ۴).



شکل ۴: سیستم Set up و ابزارهای اندازه گیری

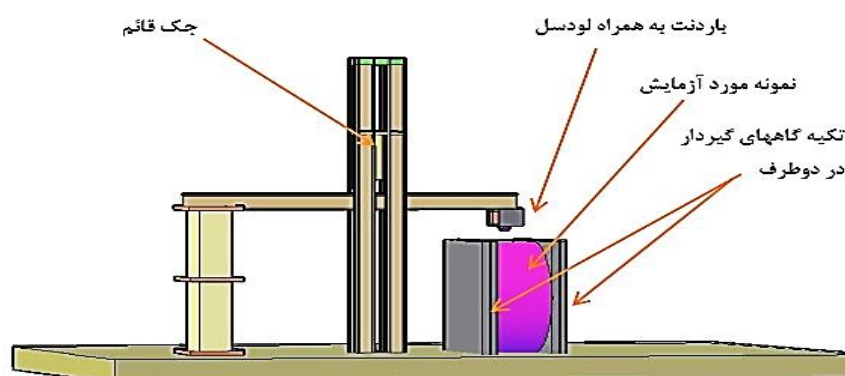
در این مقاله برای نشان دادن تغییر شکلها از خیزسنجها LVDT استفاده شده است. این ابزارهای اندازه گیری در قسمت های مختلف این نمونه و به صورت محیطی نصب شده است. در کلیه نمونه ها از سه عدد LVDT با موقعیت های C, B, A و یک عدد کرنش سنج استفاده شده است. در جدول ۲ محل نصب و فاصله ابزارهای اندازه گیری تا محل بار دندانهای در نمونه ها نشان داده شده است. تمام ابزارهای اندازه گیری توسط کابل رابط، اطلاعات به دست آمده نقاط مختلف را به دیتالاگر و نرم افزار مربوطه ارسال می کنند. تعدادی از این ابزارها و موقعیت آنها در شکل ۴ نشان داده شده است.

جدول شماره ۲: محل نصب و مختصات ابزارهای اندازه گیری

ردیف	اسم نمونه	فاصله تا محل اعمال بار (mm) LVDT۱(A)	فاصله تا محل اعمال بار (mm) LVDT۲(B)	فاصله تا محل اعمال بار (mm) LVDT۳(C)	کرنش سنج
۱	L۳R۴	۱۰۵	۹۸،۲	۶۷،۴	۱۰۰
۲	L۷R۴	۱۰۵	۱۲۰	۷۰	۱۰۴
۳	L۳R۲	۱۰۰	۹۸	۶۵	۱۰۱
۴	L۷R۲	۱۰۲	۱۱۸	۷۱	۱۰۵

۲-۴- سیستم بارگذاری عمود بر محور مخزن توسط جک قائم

یکی از پارامترهای بسیار حساس در انجام تست های آزمایشگاهی نحوه اعمال بارگذاری می باشد. جهت بررسی رفتار نمونه های آزمایشگاهی تحت اثر بار دندانهای از گوه به عنوان بار استفاده می شود. برای اعمال بارگذاری عمود بر محور مخزن در نقطه میانی طول مخزن، از جک هیدرولیکی به ظرفیت ۶۰۰ KH استفاده شد. این جک به سیستم ستونی قائم متشکل از چهار عدد ناودانی UPE۱۸۰ متصل می باشد. جهت اعمال نیروی متمرکز، گوه ای در انتهای جک قائم تعبیه شد. برای محاسبه میزان نیروی وارده توسط جک، لودسلی در انتهای آن قرار گرفت که مستقیماً میزان نیرو را به رایانه انتقال می داد (شکل ۵).



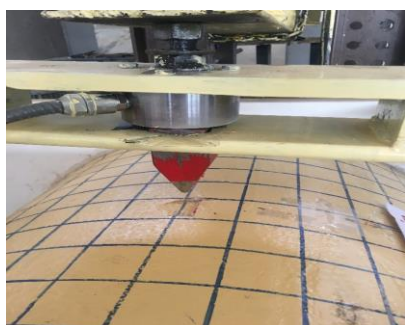
شکل ۵: شکل شماتیک سیستم آزمایشگاهی

پس از آماده سازی نمونه ها، آنها را بر روی تکیه گاه های مربوطه نصب و کرنش سنجها و خیزسنجها در موقعیت های از پیش تعیین شده با دقت فراوان به منظور اندازه گیری هرچه دقیق تر متصل گردیدند. هرگونه خطای ایجاد شده در طول بارگذاری همچون سرعت اعمال بارگذاری و خروج از مرکزیت بار سبب بی دقتی در نتایج خواهد شد. در این آزمایشها نیز سعی شد حتی الامکان از عوامل ایجادکننده خطا در روند آزمایش پرهیز شود. بارگذاری قائم به دلیل وارد کردن آن توسط جک هیدرولیکی دارای دقت کافی بوده و مقدار آن در هر مرحله تحت کنترل می باشد. در ابتدای کار با انجام بارگذاری صداهای خفیف ترک به طور متوالی شنیده می شود. بارگذاری قائم

تا جایی ادامه می‌یافت که سبب گسیختگی عضو شده و با ایجاد صدای شدید که نشان‌دهنده شکست مخزن می‌باشد به حداکثر مقدار بارگذاری قابل تحمل می‌رسد. بعد از رسیدن عضو به حداکثر ظرفیت خود، مقدار بارگذاری رفته‌رفته کاهش یافته و با مشاهده آن در صفحه رایانه، بارگذاری متوقف می‌شود.

۲-۵- بررسی مدهای شکست نمونه‌ها

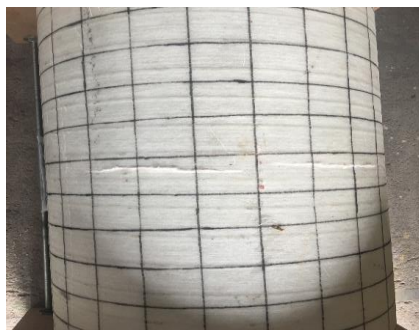
در تمامی نمونه‌های آزمایشگاهی مدهای شکست در وسط دهانه و در زیر محل اعمال بار موضعی رخ داده است. با آغاز اعمال بارگذاری قائم، الیاف به کاررفته در طول نمونه بر اساس کشش ایجادشده در آن‌ها شروع به گسیختگی کرده و در حین آزمایش این صدای ازهم‌گسیختگی الیاف به گوش می‌رسد و اعمال بارگذاری موضعی سبب تورفتگی سطح واقع در زیر محل اعمال بار شد. با نزدیک شدن بارگذاری قائم به میزان ظرفیت نهائی قابل تحمل ترک‌های مویی بر روی نمونه زیر محل اعمال بار پدیدار می‌شود. با رسیدن به حداکثر میزان بار موضعی قابل تحمل نمونه در محل اعمال بار گسیخته شده و در راستای محیطی شروع به رشد می‌کند (شکل ۶).



(ب)



(الف)



(ت)

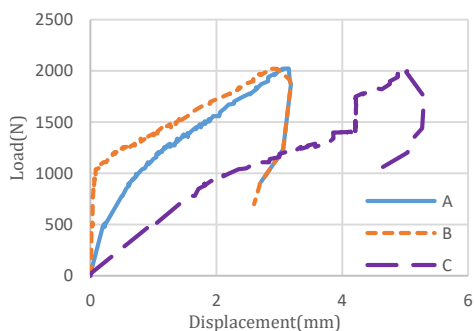


(پ)

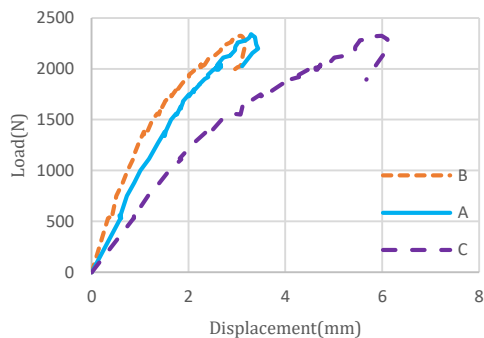
شکل ۶: تغییر شکل نهایی، (الف) نمونه L۳R۴، (ب) نمونه L۷R۴، (پ) نمونه L۳R۲، (ت) نمونه L۷R۲

۲-۶- منحنی‌های بار موضعی - تغییر شکل‌های ثبت شده توسط LVDT‌های نصب شده در اطراف گوه

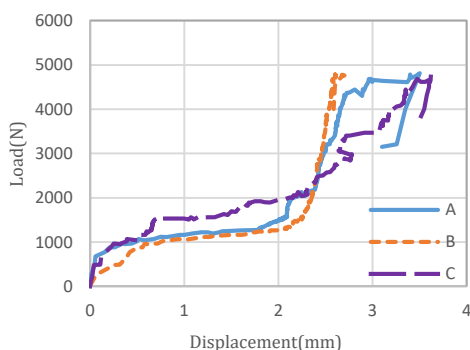
منحنی‌های بار موضعی - تغییر شکل برای چهار حالت بارگذاری با مشخصات هندسی متفاوت ارائه شده است. محور افقی تغییر شکل قائم و محور قائم بار موضعی را نشان می‌دهد (شکل ۷). تمامی منحنی‌ها تقریباً رفتار مشابهی در طول آزمایش دارند. در نمودارهای بار - تغییر شکل آزمایشگاهی، ۳ و ۲ و ۱ LVDT به ترتیب با موقعیت‌های A, B, C نشان داده شده است. در این نمودارها، منحنی‌ها رفته‌رفته از هم فاصله می‌گیرند (هرچند این اختلاف اندک است)؛ که این اختلاف در دو نمودار نشان از تغییر اندازه قطر عمودی در انتهای آزمایش نسبت به آغاز آن می‌باشد. این امر نشانگر بیضوی شدگی مقطع در لحظه پیش از شکست نمونه می‌باشد.



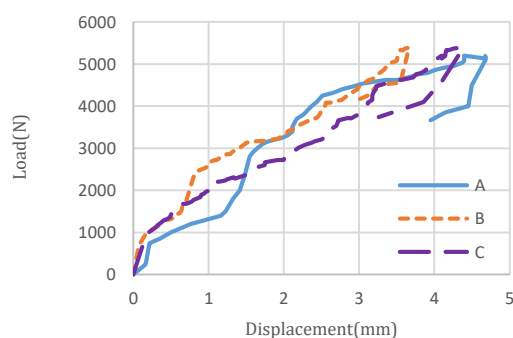
(ب)



(الف)



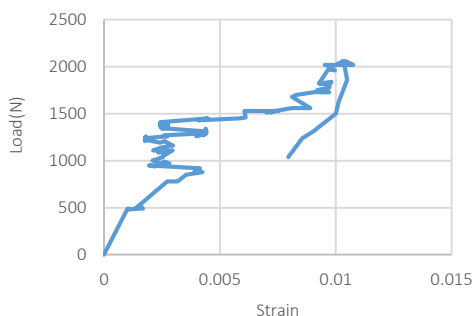
(ت)



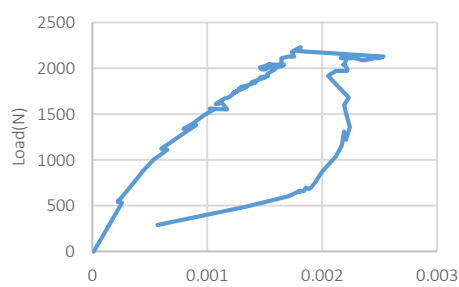
(پ)

شکل ۷: نمودار بار موضعی - تغییر شکل، (الف) نمونه L3R4، (ب) نمونه LYR4، (پ) نمونه LYR2، (ت) نمونه LYR2

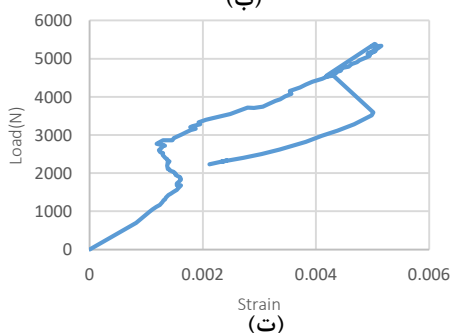
جهت مقایسه کرنش‌های ثبت شده به وسیله کرنش سنج‌ها در هر نمونه، منحنی بار موضعی - کرنش ثبت شده از دیتالاگر به ترتیب برای هر نمونه در یک نمودار جداگانه ارائه شده است (شکل ۸).



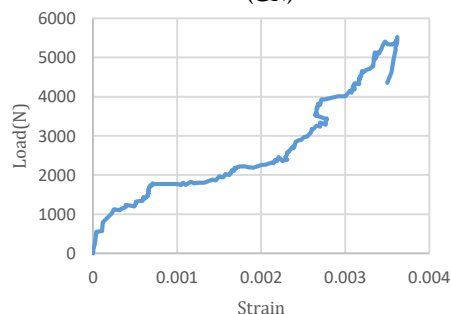
(ب)



(الف)



(ت)

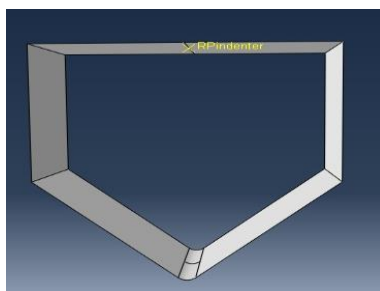


(پ)

شکل ۸: نمودار بار - کرنش، (الف) نمونه L3R4، (ب) نمونه LYR4، (پ) نمونه LYR2، (ت) نمونه LYR2

۳- تحلیل غیر خطی اثر بار دندانه ای بر مخزن به کمک روش عناصر محدود

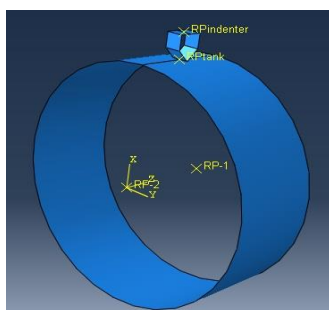
برای ارائه مدل اجزای محدود نمونه‌ها از نرم‌افزار ABAQUS استفاده شده است [۱۶]. نمونه‌های مدل‌سازی شده به صورت مخزن دارای ارتفاع ۳۰۰ و ۷۰۰ میلی‌متر و قطرهای ۴۰۰ و ۸۰۰ میلی‌متر می‌باشد. گوه مورد استفاده در آزمایشگاه همان‌طور از جنس فولاد مقاوم می‌باشد که سختی بسیار بالایی دارد، بنابراین در روش عددی نیز آن را جسم صلب فرض کرده و به صورت سه‌بعدی Discrete Rigid طراحی شده است و هیچ نیازی به تعریف خصوصیات فیزیکی مصالح برای این قطعات وجود ندارد (شکل ۹).



شکل ۹: گوه

۳-۱- تعریف تماس بین قطعات - Interaction

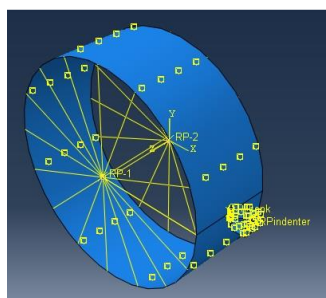
بعد از مدل‌سازی هندسی قطعات و تعیین مشخصات فیزیکی مصالح، بایستی قطعات مختلف را با توجه به شرایط مسئله در کنار هم قرارداد. در این بخش اعضای تعریف شده به صورت منفرد ایجاد شده و در انتها بر روی یکدیگر قرار گرفته و هندسه نهایی مسئله را تشکیل می‌دهند. تماس بین مخزن و گوه به صورت Surface to Surface در نظر گرفته شده است. این نوع تماس جهت تعریف تماس یک صفحه صلب و یک صفحه تغییر شکل پذیر و یا دو سطح تغییر شکل پذیر استفاده می‌شود (شکل ۱۰).



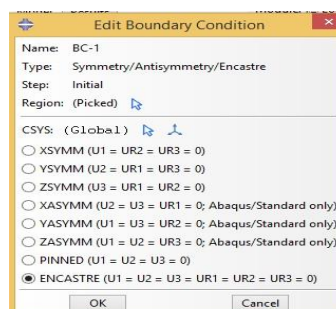
شکل ۱۰: تماس بین مخزن و گوه

۳-۲- تعریف شرایط مرزی و اعمال بارگذاری

در این مطالعه به منظور اعمال شرایط مرزی انتهایی مخزن، تمامی خصوصیات گره‌های موجود در لبه مخزن در آن ناحیه به نقطه‌ای در مرکز آن‌ها اختصاص داده شده تا اعمال شرایط مرزی تنها بر روی آن نقطه انجام شود. با انجام آنالیزهای مختلف مشاهده شد این شیوه بیشترین تطابق و بهترین دقت را در میان سایر روش‌ها داراست. تمامی درجات آزادی و انتقالی تکیه‌گاه‌ها کاملاً ثابت در نظر گرفته شد. تمام درجات آزادی انتقالی و دورانی در هردو تکیه‌گاه کاملاً مقید شد. این عامل سبب شد تا تکیه‌گاه‌ها حین بارگذاری عمودی ثابت بوده و جابجایی نداشته باشند. گوه نیز در راستای عمود بر محور طولی مخزن (جهت اعمال بار موضعی) آزادی حرکت داشت. به منظور دستیابی به رفتار نمونه در اثر اعمال بار از تحلیل غیر خطی هندسی با الگوریتم Riks استفاده شد. (شکل ۱۱).



(ب)

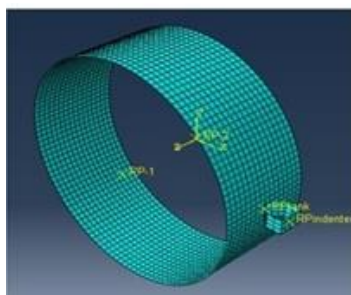


(الف)

شکل ۱۱: (الف) طراحی تکیه گاهها (ب) اعمال شرایط مرزی و بارگذاری

۳-۳- مش بندی

برای مش بندی المان چهارضلعی و چهار گرهمی (S4R) که یک المان دو انحنایی است و قابلیت تحلیل کرنش‌های بزرگ را دارا است و برای تحلیل نمونه‌ها، روش انتگرال‌گیری کاهش یافته مورد استفاده قرار می‌گیرد (شکل ۱۲).



شکل ۱۲: مش بندی

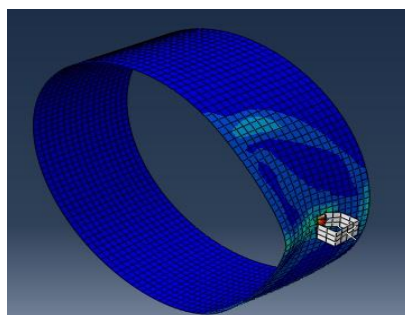
این نرم‌افزار قابلیت مدل‌سازی و تحلیل انواع مصالح به صورت الاستیک و پلاستیک را داراست که در این تحقیق با توجه به ماهیت مواد کامپوزیتی این مواد به صورت الاستیک و با در نظر گرفتن تعداد لایه‌ها و زوایای آن‌ها نسبت به محور X مدل‌سازی می‌شوند. بارگذاری و شرایط مرزی مدل در محیط بار مشخص می‌شود. مشخصات مکانیکی مصالح به کاررفته در مخازن از نوع غیر ایزوتروپیک بوده و مقادیر مدول یانگ، مدول برشی و ضرایب پوواسون در جهات مختلف در دسترس می‌باشد (جدول ۳).

جدول شماره ۳: مشخصات مکانیکی مخازن

ردیف	پارامتر	علائم اختصاری	مقادیر
۱	Young's Modulus(Pa)	E1, E2, E3	۲۱۷۱۰۰۰ و ۵۶۰۲۰۰ و ۵۶۰۲۰۰
۲	Shear Modulus(Pa)	G12, G13, G23	۱۹۹۰۰۰ و ۱۹۹۰۰۰ و ۲۶۰۳۰۰
۳	Poisson's ratio	Nu12, Nu13, Nu23	۰,۲۷۳ و ۰,۲۷۳ و ۰,۰۷۶

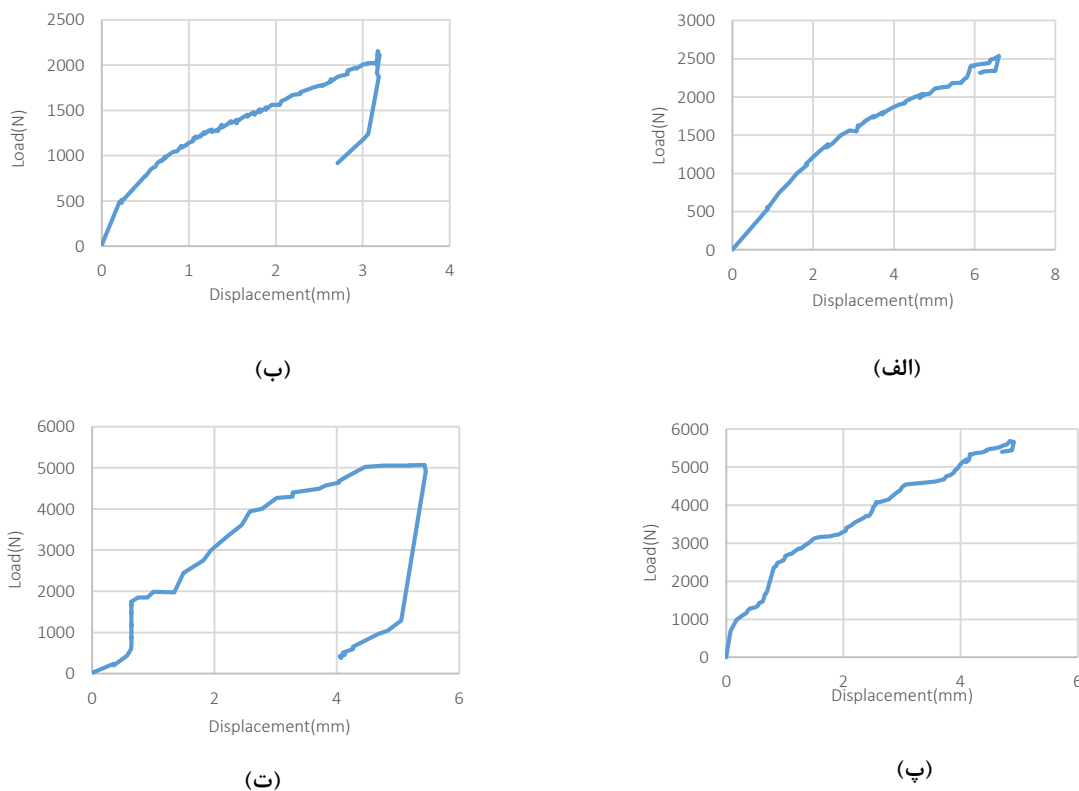
در مدل‌سازی نمونه‌ها از مدل کامپوزیت استفاده شده است. مخازن به صورت کامپوزیتی سه لایه شامل لایه آستری، لایه مقاوم مکانیکی و لایه خارجی با ضخامت کل ۴ میلی‌متر و زاویه الیاف ۹۰ درجه مدل‌سازی شده‌اند. الیاف مورد استفاده در این نمونه‌ها از جنس الیاف شیشه می‌باشند. الیاف شیشه، استحکام و سختی مناسبی دارد و خواص مکانیکی خود را در دماهای بالا حفظ می‌کند و همچنین مقاومت مناسبی در برابر رطوبت و خوردگی دارد و نسبتاً ارزان است. ساختمان الیاف شیشه یک شبکه سه‌بعدی از سیلیکون و اکسیژن است که به صورت غیرمنظم در کنار هم قرار گرفته‌اند الیاف شیشه، ساختمان آمورف یعنی غیر کریستالی و همسان دارند لذا دارای خواص

مکانیکی یکسان در تمام جهات می‌باشند این الیاف به انواع مختلفی تقسیم می‌شود. الیاف مورد استفاده در نمونه‌های آزمایشگاهی این تحقیق از نوع E می‌باشند حرف E از واژه E-GLASS گرفته شده یعنی تشکیل شده از شیشه‌های آلومینا-کلسیم و سیلیکات با حداکثر درصد وزنی قلیایی ۲ که برای مصارف عمومی و مقاومت الکتریکی بالا کاربرد دارد. این الیاف دارای مدول الاستیسته ۰/۸ GPa، مقاومت نهائی ۱۵۰۰ تا ۲۵۰ MPa و حداکثر کرنش نهائی ۳٪ تا ۱/۸٪ می‌باشند. E-GLASS ها از سیلیکات آلومینیوم کلسیم به دست می‌آیند که ۸۰ الی ۹۰ درصد تولیدات GFRP را تشکیل می‌دهند. با توجه به وجود گزینه‌های متنوع در اعمال شرایط مرزی، ایجاد شرایط تکیه‌گاهی بر روی نمونه مشابه آنچه در تست‌های آزمایشگاهی انجام می‌یابد از مهم‌ترین چالش‌های مدل‌سازی نرم‌افزاری بشمار می‌آید. در محل اعمال بار موضعی در وسط دهانه تغییر شکلی به سمت پایین به صورت فرورفتگی در نمونه ایجاد شده است (شکل ۱۳).



شکل ۱۳: گسیختگی نهائی

در محدوده وسط دهانه یک تنش یکنواخت در سطح فوقانی مخزن مشاهده می‌شود. این تنش به دلیل متقارن بودن بارگذاری می‌باشد. در روش عددی نمونه‌ها به ترتیب در ۲۵۳۸، ۲۱۵۵، ۵۶۸۹ و ۵۰۶۶ نیوتن دچار ترک شده و سپس افت بار اتفاق افتاد (شکل ۱۴).



شکل ۱۴: خروجی نمودارهای بار-جابجائی روش عددی (الف) نمونه L2R4، (ب) نمونه LYR4، (پ) نمونه L2R2، (ت) نمونه LYR2

۴- بررسی نتایج

۴-۱- نتایج مربوط به آزمایشات مرحله اول-روش عددی و آزمایشگاهی نمونه ها

در این بخش نتایج مربوط به روش آزمایشگاهی و تحلیل عددی به روش المان محدود مورد بررسی قرار گرفت. در این مرحله هر دو مخزن استوانه‌ای به شعاع ۴۰۰ میلی‌متر، ضخامت ۴ میلی‌متر و ارتفاع به ترتیب ۳۰۰ و ۷۰۰ میلی‌متر تحت بار دندانه‌ای موضعی قرار گرفته و رفتار آن‌ها به روش آزمایشگاهی و تحلیل عددی بررسی شد. مطابق جدول شماره ۴ رفتار مخازن در مقابل بار دندانه‌ای به روش آزمایشگاهی نسبت به روش عددی مورد مقایسه قرار گرفت. در آزمایش اول که مربوط به مخزن با ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر می‌باشد پس از اعمال بارگذاری، اولین صدای خفیف ترک در ۷۰۵ نیوتن اتفاق افتاد، سپس صداهای ترک به ترتیب در ۱۴۲۰، ۱۶۱۱، ۱۸۲۸ و ۲۰۵۶ نیوتن رخ داد. در نهایت در ۲۳۲۶ نیوتن صدای شدید ترک به وجود آمد و سبب ایجاد ترک در پوسته شد (شکل ۷-الف)؛ اما در روش عددی پوسته دربار ۲۵۳۸ نیوتن رفتار نهائی را از خود نشان داد و سبب ایجاد ترک شد. در آزمایش دوم که مربوط به مخزن با ارتفاع ۷۰۰ میلی‌متر است پس از اعمال بارگذاری اولین صدای خفیف ترک در ۵۸۰ نیوتن اتفاق افتاد. سپس صداهای ترک به ترتیب در ۹۹۱ و ۱۰۹۰ نیوتن رخ داد. در نهایت در ۲۰۰۶ نیوتن صدای شدید ترک به وجود آمد و سبب ایجاد ترک در پوسته شد، (شکل ۷-ب)؛ اما در روش عددی در ۲۱۵۵ نیوتن پوسته دچار ترک خوردگی شد. در این مقایسه، رفتار مخازن نسبت به اعمال بار دندانه‌ای در روش آزمایشگاهی نسبت به روش عددی در نمونه L۳R۴ ۸,۴٪ و در نمونه L۷R۴ ۷٪ کاهش را نشان می‌دهد (جدول ۴).

جدول شماره ۴: بررسی نتایج نمونه ها تحت اثر بار دندانه ای

ردیف	اسم نمونه	R(m)	L (m)	t(m)	L/R	R/t	P(N)		اولین صدای خفیف ترک (N)	درصد کاهش (reduction Percentage)
							عددی (Riks)	آزمایشگاهی (lab)		
							Lab/Riks			
۱	L۳R۴	۴۰۰	۳۰۰	۴	۰,۷۵	۱۰۰	۲۳۲۶	۲۵۳۸	۷۰۵	۸,۴٪
۲	L۷R۴	۴۰۰	۷۰۰	۴	۱,۷۵	۱۰۰	۲۰۰۶	۲۱۵۵	۵۸۰	۷٪
۳	L۳R۲	۲۰۰	۳۰۰	۴	۱,۵	۵۰	۵۳۹۰	۵۶۸۹	۲۴۸۱	۵,۳٪
۴	L۷R۲	۲۰۰	۷۰۰	۴	۳,۵	۵۰	۴۸۱۰	۵۰۶۶	۲۱۱۰	۵٪

۴-۲- نتایج مربوط به آزمایشات مرحله دوم-روش عددی و آزمایشگاهی نمونه ها

در این بخش نیز نتایج مربوط به روش آزمایشگاهی و تحلیل عددی به روش المان محدود دو مخزن استوانه‌ای به شعاع ۲۰۰ میلی‌متر، ضخامت ۴ میلی‌متر و دارای ارتفاع به ترتیب ۳۰۰ و ۷۰۰ میلی‌متر که تحت بار دندانه‌ای موضعی قرار گرفته‌اند، بررسی شد. مطابق جدول شماره ۴ رفتار مخازن در مقابل بار دندانه‌ای به روش آزمایشگاهی نسبت به روش عددی مورد مقایسه قرار گرفت. در آزمایش سوم ارتفاع مخزن مجدداً ۳۰۰ میلی‌متر می‌باشد. پس از اعمال بارگذاری اولین صدای خفیف ترک در ۲۴۸۱ نیوتن اتفاق افتاد، سپس صداهای ترک به ترتیب در ۳۷۷۴ و ۴۴۳۶ نیوتن رخ داد. در نهایت در ۵۳۹۰ نیوتن صدای شدید ترک به وجود آمد و سبب ایجاد ترک در پوسته شد (شکل ۷-پ)؛ اما در روش عددی، پوسته در ۵۶۸۹ نیوتن دچار ترک خوردگی شد. در آزمایش چهارم که مربوط به مخزن با ارتفاع ۷۰۰ میلی‌متر است پس از اعمال بارگذاری اولین صدای خفیف ترک در ۲۱۱۰ نیوتن اتفاق افتاد، سپس صداهای ترک به ترتیب در ۲۱۸۰ و ۲۴۱۲ نیوتن رخ داد. در نهایت در ۴۸۱۰ نیوتن صدای شدید ترک به وجود آمد و سبب ایجاد ترک در پوسته شد (شکل ۷-ت)؛ اما در روش عددی مخزن در ۵۰۶۶ نیوتن دچار ترک خوردگی شد. در این مقایسه، رفتار مخازن نسبت به اعمال بار دندانه‌ای در روش آزمایشگاهی نسبت به عددی در نمونه L۳R۲ ۵,۳٪ و در نمونه L۷R۲ ۵٪ کاهش را نشان می‌دهد (جدول ۴).

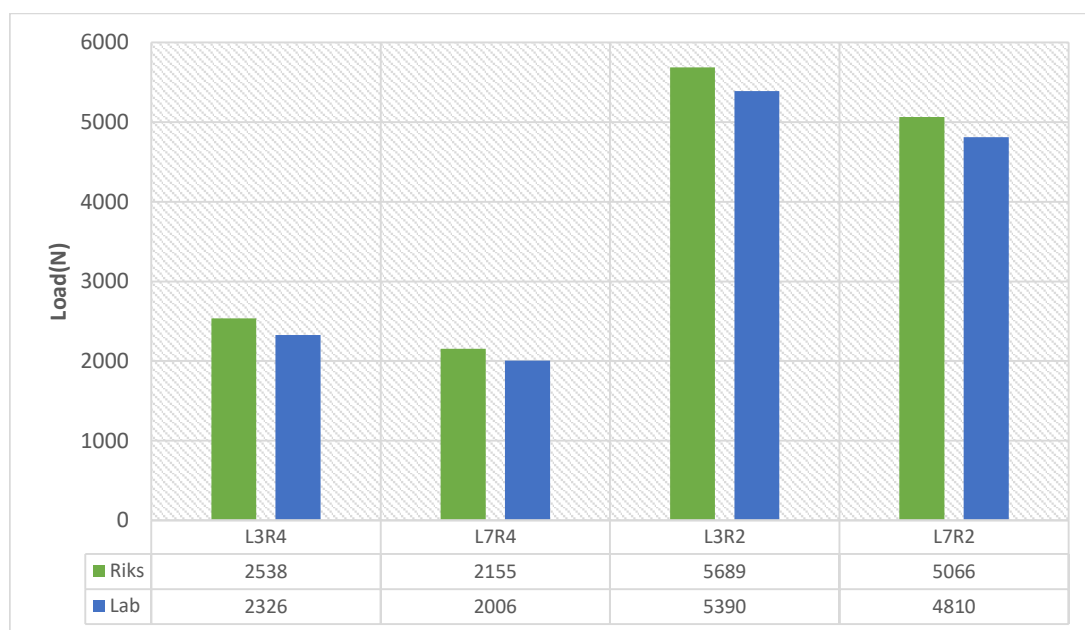
۴-۳- مقایسه نتایج روش عددی و آزمایشگاهی مرحله اول و دوم

در این بخش نتایج مربوط به رفتار مخازن در نمونه‌های LVR4 و L3R4 پس از اینکه تحت بار دندانه‌ای قرار گرفتند مجدداً با همان مشخصات مکانیکی ولی با شعاع کمتر تحت بار دندانه‌ای قرار گرفته و رفتار آن‌ها بررسی و نتایج این تست‌ها مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت که این نتایج در جدول ۴ و شکل ۱۵ ارائه شده است. مطابق جدول شماره ۴ و با توجه به مقایسه رفتار نمونه‌ها در دو روش آزمایشگاهی و عددی اولین تشابهی که در نتایج به دست آمده هر دو روش وجود دارد این است که مقدار بار دندانه‌ای برای ایجاد ترک در نمونه در حالت عددی نسبت به آزمایشگاه بیشتر است. قطعاً مقادیر عددی با توجه به تحلیل‌های نرم‌افزاری و با توجه به مشخصات مکانیکی که از کارخانه سازنده تهیه شده‌اند، به دست آمده است؛ اما مقادیر آزمایشگاهی کاملاً واقعی بوده و امکان به وجود آمدن اختلاف مابین نتایج عددی و آزمایشگاهی وجود دارد. این اختلاف ناشی از وجود ناکاملی در مشخصات مکانیکی، ناکاملی هندسی همچون تغییر در ضخامت، مدل‌سازی همراه با خطای شرایط تکیه‌گاهی نمونه‌های آزمایشگاهی، عدم جاگذاری و نصب ابزارهای اندازه‌گیری در محل‌های مناسب و یا سایر خطاها در طول آزمایش می‌باشد که در مدل‌سازی عددی لحاظ نمی‌شود. برای مثال در آزمایش اول نیروی ۲۵۳۸ نیوتن، مقدار به دست آمده برای گسیختگی نمونه تحت بار دندانه‌ای در تحلیل عددی است. در حالی که در روش آزمایشگاهی، نمونه در ۲۳۲۶ نیوتن ترک می‌خورد. در سایر آزمایشات هم این اختلاف وجود دارد که با توجه به جدول شماره ۴ در مقایسه بار نهایی وارد شده بر مخازن تحت اثر بار دندانه‌ای (P(n)) به این نتیجه می‌رسیم که بار نهایی در محاسبات عددی همیشه بزرگ‌تر از نتایج آزمایشگاهی می‌باشد؛ اما این درصد کاهش بار در هیچ‌یک از آزمایشات به بیش از ۱۰٪ نمی‌رسد و در حالت کلی همبستگی مناسبی بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج عددی به دست آمده از نرم‌افزار وجود دارد. در شکل ۱۵ با هم‌پوشانی نمودارهای بار موضعی - تغییر شکل تمامی نقاط هر نمونه، به این نتیجه می‌رسیم که بیشترین جابجایی مربوط به نقاطی می‌باشد که کاملاً نزدیک به بار دندانه‌ای باشد. برای مثال در مرحله اول، رفتار نهایی مخزن در LVDT3 (موقعیت C) نسبت به سایر LVDT ها بیشتر می‌باشد. در نمونه‌های ۳ و ۴ با توجه به اینکه شعاع ۲۰۰ میلی‌متر می‌باشد شاهد یک تفاوت عمده در رفتار پوسته نسبت به حالت قبل شدیم. مقاومت پوسته در مقابل گسیختگی و ترک خوردگی در این حالت به طور قابل توجهی نسبت به حالت قبل افزایش یافت. طبق جدول ۴ در مرحله اول آزمایشات تقریباً در ۲۰۰۰ نیوتن شاهد صدای شدید ترک خوردگی در محل اعمال بار دندانه‌ای شدیم و سوراخ شدگی در محل اعمال بار دندانه‌ای اتفاق افتاد ولی در مرحله دوم در بار تقریباً ۵۰۰۰ نیوتن شاهد صدای شدید ترک خوردگی در محل اعمال بار دندانه‌ای شدیم ولی پس از افت بار هیچ گسیختگی به جز چند ترک سطحی در مخزن ملاحظه نشد. در نتیجه هرچقدر قطر مخازن در پوسته‌های GFRP کمتر شود مقاومت آن در برابر بار دندانه‌ای بیشتر خواهد شد. پس در حالت کلی در این نمودارها با توجه به اینکه سطح فوقانی نمونه در ارتباط مستقیم با اعمال بار دندانه‌ای می‌باشد در نتیجه دچار بیشترین تغییر شکل نسبت به سایر قسمت‌ها را دارد. همچنین منحنی رسم شده تا لحظه شکست و ترک خوردن مخزن دارای شیب نسبتاً ثابت بوده و رفتار غیرخطی از خود نشان می‌دهد و پس از اینکه مخزن به حداکثر ظرفیت قابل تحمل رسیده و دچار ترک می‌شود با کاهش بار مواجه شده و مقدار جابجایی نیز در نمودار به تدریج کاهش می‌یابد.

۴-۴- صحت سنجی

در این تحقیق چهار نمونه آزمایشگاهی در دو مرحله مورد آزمایش قرار گرفت. با توجه به اینکه شعاع در نمونه‌های مرحله اول دوبرابر مرحله دوم بود، اما مقاومت در برابر ترک خوردگی نمونه‌ها در مرحله دوم در برابر بار دندانه‌ای بیش از دوبرابر مرحله اول بود. این نتایج نشان دهنده این است که هرچقدر شعاع مخزن کمتر باشد مقاومت مخزن در مقابل بار دندانه‌ای وارد شده بیشتر می‌باشد. همچنین در هر مرحله از دو نمونه با دو ارتفاع مختلف استفاده شد که مقاومت نهایی نمونه‌ای که شعاع یکسان و ارتفاع کمتر داشت نسبت به نمونه‌ای که ارتفاع بزرگتر داشت بیشتر بود. در سال ۲۰۱۴ آقای جاجو انواع اثرات بار دندانه‌ای را بر روی دونوع پوسته استوانه‌ای فولادی با شعاع متفاوت بررسی کرد، که بر طبق نتایج بدست آمده از اعمال بارهای دندانه‌ای دایره‌ای، مستطیلی و گنبدی به این نتیجه رسید که مقاومت نهایی مخازن در مقابل بار دندانه‌ای ارتباط مستقیم با شعاع پوسته‌ها دارد. و هرچقدر شعاع پوسته‌ها کمتر باشد مقاومت آنها در برابر انواع بارهای دندانه‌ای

بیشتر خواهد بود [۶]. همچنین آقای زرین و همکاران در سال ۲۰۱۸ تحقیقاتی را بر روی پوسته‌های استوانه‌ای GRP انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که تغییر شکل نهایی در پوسته‌ها در اثر اعمال بار دندانه‌ای به صورت فرورفتگی بوده و شدت تغییر شکل نیز بستگی به طول پوسته دارد. و با افزایش طول میزان فرورفتگی نیز افزایش می‌یابد [۱۵]. با مقایسه نتایج بدست آمده از تحقیقات گذشته و نمونه‌های این تحقیق نتیجه می‌گیریم که ما بین نتایج سازگاری وجود دارد. اما به دلیل اینکه تابحال تحقیقی در مورد اعمال بار دندانه‌ای بر روی مخازن GFRP صورت نگرفته است با مراجعه به تحقیقات مشابه گذشته بر روی سایر سازه‌های جدار نازک صحت نتایج مشاهده می‌شود.



شکل ۱۵: مقایسه بار نهایی گسیختگی روش عددی و آزمایشگاهی

۵- نتیجه گیری

تحقیق حاضر بررسی رفتار مخازن استوانه‌ای GFRP تحت بار دندانه‌ای به روش آزمایشگاهی و عددی بود که می‌توان به نتایج زیر اشاره نمود:

۵-۱- نتایج تحقیقات آزمایشگاهی

۱- با مقایسه نمودارهای بار موضعی- تغییر شکل ملاحظه می‌شود هر چهار نمونه از ابتدا تا انتهای بارگذاری دارای رفتار غیرخطی می‌باشند که این رفتار ناشی از مشخصات هندسی و خواص مصالح GFRP می‌باشد.

۲- در مراحل اولیه اعمال بار جانبی به وسیله گوه، عمده مقاومت مخزن توسط مقطع عرضی زیر گوه تأمین می‌شود و در ادامه بارگذاری عمده مقاومت مخزن توسط تارهای طولی تأمین می‌گردد که سهم تارهای طولی بیشتر می‌باشد.

۳- در تمامی نمونه‌ها، نمودارها با شیب تقریباً ثابتی از ابتدای آزمایش تا انتهای آن پیش می‌روند. تا نقطه‌ای که دچار شکست می‌شوند، عدم وجود رفتار خطی ناشی از اثر بیضوی شدن مقطع لوله و همچنین گسیختگی تدریجی تارهای طولی و ترد بودن مصالح GFRP سبب رخ دادن شکست به صورت ناگهانی می‌شود.

۴- با اندازه‌گیری تغییر قطرهای قائم و افقی در نمونه‌ها مشخص شد که میزان تغییر قطر قائم بیشتر از میزان تغییر قطر افقی مقطع می‌باشد.

۵-۲- نتایج تحلیل عددی

۱- رفتار مخازن استوانه‌ای جدار نازک از جنس GFRP همچون سایر مخازن فولادی جدار نازک تابع پارامترهای هندسی بوده و در نمونه‌های مختلف تغییر این پارامتر تفاوت‌های اساسی در ظرفیت باربری، مقاومت و پایداری ایجاد می‌نماید.

۲- مقاومت در برابر ترک خوردگی و ظرفیت باربری در نمونه‌های با قطر کمتر به مراتب بیشتر از نمونه‌های با قطر بزرگ‌تر، می‌باشد.

۳- تحلیل غیرخطی عددی تخمین مناسبی از میزان جابجایی‌ها تحت بارگذاری وارده داشته است. اختلاف در مقادیر نهائی جابجایی‌ها در نمونه‌های آزمایشگاهی و نرم‌افزاری ناشی از وجود ناکاملی در مشخصات مکانیکی، ناکاملی هندسی همچون تغییر در ضخامت، مدل‌سازی همراه با خطای شرایط تکیه‌گاهی نمونه‌های آزمایشگاهی می‌باشد که در مدل‌سازی نرم‌افزاری لحاظ نمی‌شود.

۵-۳- پیشنهادات برای تحقیقات آتی

۱- با توجه به اینکه در واقعیت احتمال اعمال بارهای مختلفی علاوه بر بار دندانه ای و همزمان با آن بر مخازن وجود دارد، لذا پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی مخازن با زاویه الیاف متفاوت و ترکیب سایر بارها با باردندانهای مورد بررسی قرار گیرد.

۲- پیشنهاد می‌شود در بررسی‌های آتی از مخازن با ضخامت‌ها و قطرهای متفاوت استفاده شود.

۳- امکان اعمال باردندانهای در هر نقطه و با هر زاویه در مخازن وجود دارد، لذا پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده تغییر محل در مخازن مورد توجه و بررسی قرار گیرد.

مراجع

- [1] Alemzadeh, H., Shakib, H. (2016). Numerical Study on the Response of Steel Ground Tanks with Free Rocking Motion under Horizontal Earthquake Excitation. *Journal of Steel and Structure*, Vol. 13, No. 20, pp 71-79.
- [2] Abrar, F. (2017). Impact Responses Compressive and Burst Tests of Glass/Epoxy (GRE) Composite Pipes. *Journal of Physics Conference Series IOP Publishing*, Vol. 48, No. 2, pp 174-186.
- [3] Elghazouli, M., Chtyssanthopoulos, F., Spagnoli, L. (1998). Experimental response of glass reinforced plastic cylinders under axial compression. *The 2nd International Conference on Mechanical Engineering*, Vol. 11, No. 4, pp 347-371.
- [4] Eyvazinezhad, S., Showkati, H. (2013). Thorough investigation of continuously supported pipelines under combined pre-compression and denting loads. *International Journal of pressure vessels and piping*, Vol. 104, No. 1, pp 83-95.
- [5] Gohari, E. (2012). First-ply of thick circular cylindrical GRP composite shell subjected to static external pressure via finite element simulation and analytical approaches. *Advanced Materials Research*, Vol. 463, No. 16, pp 477-483.
- [6] Jajo, J. (2014). *Dent behaviour of steel pipes under pressure load*. Ph.D. Thesis, University of Windsor, Canada.
- [7] Jin, N. (2013). Structural analysis and optimum design of GRP pipes based on properties of materials. *Journal Construction and Building Materials*, Vol. 38, No. 3, pp 316-326.
- [8] Mousavi, V. (2018). *Experimental and Theoretical Investigation of GFRP Pipe lines Behavior under the Simultaneous Effect of Axial Force and Dent Load*. MA Thesis. University of Urmia (In Persian).
- [9] Parashar, P. (2013). Adhesively bonded composite tubular joints. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, Vol. 38, No. 3, pp 58-68.
- [10] Park, J. (2011). A Safety Evaluation on the Ring Deflection of Buried GRP Pipes. *Journal of the Korean Society for Advanced Composite Structures*, Vol. 2, No. 2, pp 26-33.
- [11] Rafiee, R., Torabi, M. (2017). Stochastic prediction of burst pressure in composite pressure vessels. *Composite Structures*, Vol. 185, No. 2, pp 573-583.

- [12] Shuai, Y., Shuai, J., Zhang, X. (2018). Experimental and numerical investigation of the strain response of a dented API 5L X52 pipeline subjected to continuously increasing internal pressure. *Composite structures*, Vol. 53, No. 4, pp 427-435.
- [13] Walker, C., Ellians, K. (1983). Damage on offshore tubular bracing members. *IABSE Colloquium on Ship Collisions with Bridges and Offshore Structures*, Vol. 42, No. 2, pp 253-261.
- [14] Wierzbicki, N., Suh, K. (2014). Indentation of tubes under combined loading. *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 30, No. 3, pp 229-248.
- [15] Zarrin, A. (2018). *Experimental investigation behavior of GRP pipe under denting load*. MA Thesis. University of Urmia(In Persian).
- [16] Bagheri, B. and Abbasi, M. and Kehtabche, M. (2012). *Abacus Application Reference*. Kian Rayaneh Sabz Publication, Tehran.