

تحقیقات آزمایشگاهی و عددی رفتار پوسته‌های استوانه‌ای جدار نازک با مصالح GFRP تحت اثر بار دندانهای

حسین شوکتی*^۱، بابک سربلند^۲

^۱ استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه

^۲ دانشجوی دکتری عمران-سازه، پردیس بین‌الملل، دانشگاه ارومیه

دریافت: ۱۳۹۹/۲/۱۸، بازنگری: ۱۳۹۹/۹/۲۹، پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۶، نشر آنلاین: ۱۳۹۹/۱۰/۶

چکیده

در دو دهه اخیر مخازن کامپوزیتی (Composite tanks) به دلیل مزایای زیادی که نسبت به مخازن چدنی و فولادی دارند کاربردهای گسترده‌ای پیدا کرده‌اند. به همین دلیل شناخت کامل این مصالح، کمک بسیار زیادی به انتخاب، کاربرد و محافظت از آن‌ها می‌کند. 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 آسیب‌های جدی و ناگهانی در مخازن گردد. لذا تحقیق و بررسی بر روی رفتار این مخازن در برابر بارهایی مانند بار دندانهای ضرورت پیدا می‌کند. در تحقیق حاضر، سعی شده است نمونه‌های مختلف آزمایشگاهی را از نوع GFRP در آزمایشگاه سازه‌های جدار نازک تحت بار دندانهای قرار دهیم تا رفتار این پوسته‌ها بررسی شود. سپس نمودارهای بار-جابجایی حاصل از آزمایش با نتایج حاصل از المان محدود مورد بررسی و تحلیل قرار بگیرد که نشان‌دهنده تخمین مناسب از المان محدود می‌باشد. تحقیق حاضر می‌تواند در پروژه‌های شرکت نفت و سازمان آب و انواع مخازنی که در معرض بارهای موضعی می‌باشند، مورد استفاده قرار گیرد. هدف از این تحقیق، بررسی نحوه اعمال بار دندانهای بر مخازن و خطرات ناشی از اعمال آن بر مخازن و نحوه مقاومت در برابر این بار می‌باشد. در نتیجه مخازن GFRP با توجه به داشتن مزایای سازه‌های نظیر مقاومت در برابر بار دندانهای و ضربه جایگزین مناسبی برای مخازن فولادی و چدنی خواهند بود.

کلیدواژه‌ها: بارهای دندانهای موضعی، شرایط آزمایشگاهی، مخازن GFRP، مقاومت.

۱- مقدمه

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 دندان-ای (دنت)^۱ دچار ترک و شکست می‌شوند. مطالعات آزمایشگاهی و عددی نشان می‌دهند که شکست و ترک ناشی از اعمال بار دندانهای 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

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 موردنظر 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 روکش‌دار، 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 براساس نیاز سازه به مقاومت و سختی در جهات مختلف دست یافت و یا چندلایه را

1. Dental Load

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۴۴-۳۱۹۴۲۹۸۷

آدرس ایمیل: h.showkati@urmia.ac.ir (ح. شوکتی)، b.sarboland@urmia.ac.ir (ب. سربلند).

مخازنی که در کنار هم می‌باشند در هنگام بروز زلزله در مخازن مهار نشده (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. بلندشدگی 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 (عالم‌زاده و همکاران، ۱۳۹۵). از سایر بارهای دنت وارده بر مخازن می‌توان بر برخورد شیء 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 دنت تلقی کرد که ممکن است باعث فرورفتگی و سوراخ شدن پوسته مخزن گردد. در نتیجه هدف اصلی در این تحقیق، بررسی کامل اثر بار دنت 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)



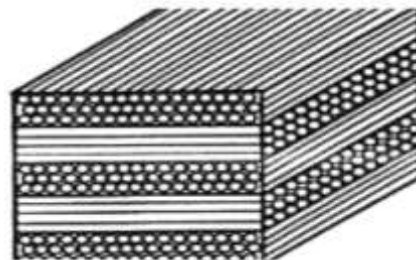
(د)



(ج)

شکل ۲- انواع بار دندان‌های: (الف) نوک تیز، (ب) کروی، (پ) گوه، (ت) گنبدی

بارهای وارده می‌باشد. اثر بار دندان‌های باعث ناپایداری این سازه‌ها می‌شود. 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 سازه‌های مخازن کامپوزیتی مورد توجه قرار گیرد. در این مقاله، اثر بار دندان‌های بر رفتار مخازن تحت حالت‌های مختلف هندسی شامل تغییر ارتفاع مورد بررسی قرار خواهد گرفت.



شکل ۱- کامپوزیت چندلایه

۲- 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 این که 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 کوچک-ترین خطر زنگ‌زدگی برخوردار نبوده و به طور متوسط از عمر بهره‌برداری پنجاه ساله برخوردار می‌باشند.

۲-۱- معرفی بار دندان‌های

بار دندان‌های یک بار نقطه‌ای و متمرکز است که با توجه به نوع هندسه و شکل و نحوه رفتار و برخورد با مقطع می‌تواند رفتار متفاوتی در سازه از خود نشان دهد، در آزمایشگاه به انواع مختلف می‌تواند بر لوله یا مخزن وارد شود مانند بار دنت گنبدی شکل، مخروطی یا کله قندی، کروی شکل، مستطیلی، گوه‌ای و نوک تیز (شکل (۲)). اما در واقعیت بار دنت می‌تواند به صورت‌های مختلفی بر مخزن، لوله‌ها و یا سایر سازه‌ها وارد شده و باعث بروز خرابی-های مختلف شود (Jajo, ۲۰۱۴). مانند بلندشدگی یا Uplift در

کمانشی در دو حالت با تقویت کننده و بدون آن می‌باشد. مخازن از جنس کربن اپوکسی و با چیدمان $(\pm 30/90)$ ، $(\pm 45/90)$ و $(\pm 60/90)$ می‌باشد. او به این نتیجه رسید که چیدمان $(\pm 60/90)$ بیش‌ترین بار کمانشی را دارا است.

Elghazouli 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 با هم مقایسه کردند.

Eyvazinejad 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.

Gohari و همکاران (۲۰۱۲) تحقیقی بر روی صفحات استوانه-ای GRP تحت فشار استاتیکی خارجی به‌روش المان محدود انجام دادند. آن‌ها زوایای الیاف ۹۰، ۶۰، ۴۰ درجه را در نظر گرفتند و تنش و کرنش حداکثر را مورد بررسی قرار دادند.

Jajo (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 به‌وجود آورد که این تغییر شکل باعث به‌وجود 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.

Jin (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.

Mousavi و همکاران (۲۰۱۸) تحقیقات آزمایشگاهی و تئوریک رفتار پوسته‌های GFRP تحت اثر هم‌زمان نیروی محوری



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

۳- پیشینه تحقیق

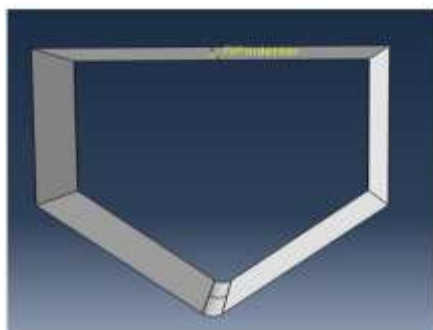
مخازن GFRP به دلیل مزایای بسیار زیادی که نسبت به مخازن ساخته شده با مصالح دیگر دارند، روز به‌روز مورد استقبال بیشتری قرار می‌گیرند و در پروژه‌ها استفاده‌های فراوانی پیدا کرده‌اند. از این‌رو لازم است مطالعات و تحقیقات دقیق‌تری بر روی این‌گونه مخازن که رفتار متفاوتی نسبت به مخازن بتنی و فولادی دارند صورت 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 چند لایه 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 مورد مطالعه قرار گرفته‌اند به شرح ذیل می‌باشد.

Abarar و همکاران (۲۰۱۷) مطالعاتی در مورد بررسی‌های آزمایشگاهی روی رفتار پوسته‌های کامپوزیتی GFRP تولید شده به‌روش پپچ الیاف تحت فشار هیدرواستاتیک 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 $(0:1)$ و $(1:5)$ و $(1:1)$ و $(2:1)$ و $(4:1)$ و بار حلقوی خالص $(1:0)$ مورد آزمایش قرار دادند که طی این آزمایشات سه مد گسیختگی مجزا مشاهده شد. به این صورت گسیختگی کششی محوری در حالت بارگذاری محوری خالص، نشد در حالت بارگذاری محوری غالب و نشد موضعی در بارگذاری حلقوی غالب روی داد و با افزایش دما تأثیرات قابل ملاحظه‌ای روی مدهای گسیختگی و تنش‌ها حاصل شد.

Day (۲۰۱۴) مخازن کامپوزیتی جدار نازک رشته پیچ شده با کاربردهای زیردریایی را با آنالیز اجزای محدود مورد مطالعه قرار داد. هدف از این مطالعه، مقایسه میزان مقاومت در مقابل بار

۴- تحلیل غیر خطی اثر بار دندانه‌ای بر مخزن به کمک روش عناصر محدود

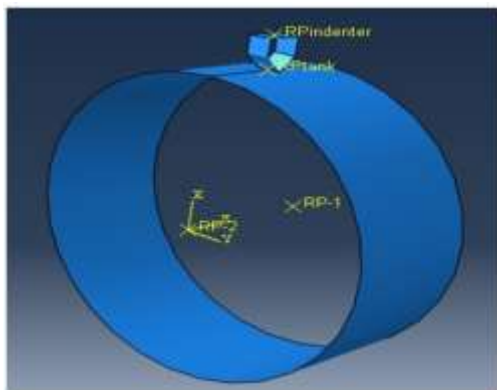
برای ارائه مدل اجزای محدود نمونه‌ها از نرم‌افزار ABAQUS استفاده شده است نمونه‌های مدل‌سازی شده به صورت مخازن دارای ارتفاع ۵۰۰ و ۷۰۰ میلی‌متر و قطرهای ۴۰۰ و ۸۰۰ میلی‌متر می‌باشد. گوه مورد استفاده در آزمایشگاه همان‌طور از جنس فولاد مقاوم می‌باشد که سختی بسیار بالایی دارد، بنابراین در روش عددی نیز آن را 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 (۴)).



شکل ۴- گوه

۴-۱- 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 قرار داد. 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 شکل‌پذیر و یا دو سطح تغییر شکل‌پذیر استفاده می‌شود (شکل (۵)).



شکل ۵- تماس بین مخزن و گوه

و بار دندانه‌ای را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق در تمامی نمونه‌های تست شده در آزمایشگاه مدهای شکست در وسط دهانه و به صورت فرورفتگی در زیر محل اعمال بار موضعی و با صدای ترک 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. Parashar (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. Park (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 Lowa و آنالیز تفاضلات محدود مقایسه شد.

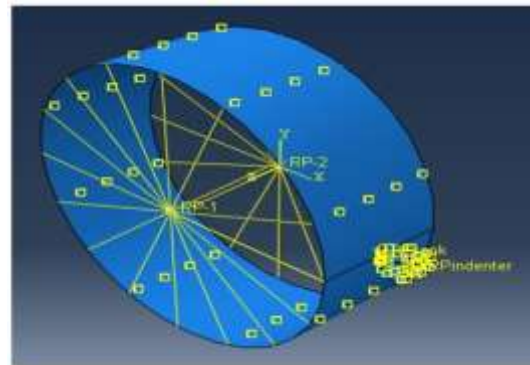
Rafiee (۲۰۱۷) و همکاران میزان سفتی مخازن را با روش المان محدود محاسبه و با نتایج تجربی مقایسه کردند بدین صورت که با روش مدل‌سازی عددی میزان نیروی حاصل از ۵٪ تغییر مکان قطری برای مخازن کامپوزیتی را به دست آورد. سپس با استفاده از رابطه ارائه شده میزان سفتی مورد نظر را محاسبه و با میزان سفتی به دست آمده از آزمایشگاه مقایسه کرد.

Shuai 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 به سرعت و با مقدار زیادی تغییر می‌کند. Walker و همکاران (۱۹۸۳) با فرض طول ثابت مخازن منطقه فرورفتگی آن را بررسی کردند. آن‌ها از طریق یک روش نیمه‌تجربی، یک نتیجه برای پاسخ بار-خیز در پوسته‌ها بیان کردند که مورد تأیید استاندارد API قرار گرفت و از آن استفاده می‌شود.

Weizbicki و همکاران (۱۹۸۸) آزمایش تحلیلی پاسخ پوسته تحت اثر بار جانبی منفرد و با حضور نیروی محوری و لنگر را به وسیله یک مدل پوسته سه‌بعدی انجام دادند. آن‌ها همچنین تأثیر شرایط مرزی را هم مورد بررسی قرار دادند. Zarrin و همکاران (۲۰۱۸) تحقیقات آزمایشگاهی و تئوری پوسته‌های GRP تحت بار دندانه‌ای را بررسی شد و بدین صورت 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 به صورت فرورفتگی می‌باشد.

۴-۲- تعریف شرایط مرزی

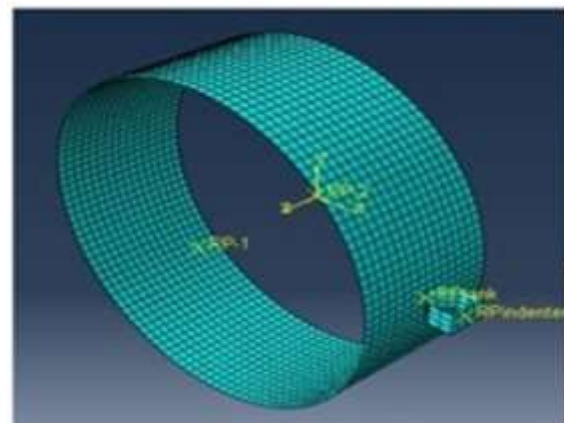
در این مطالعه به منظور اعمال شرایط مرزی انتهایی مخزن، تمامی خصوصیات گره‌های موجود در لبه مخزن در آن ناحیه به نقطه‌ای در مرکز آن‌ها اختصاص داده شده تا اعمال شرایط مرزی تنها بر روی آن نقطه انجام شود. با انجام آنالیزهای مختلف مشاهده شد این شیوه بیش‌ترین تطابق و بهترین دقت را در میان سایر روش‌ها داراست. تمامی درجات آزادی و انتقالی تکیه گاه‌ها کاملاً ثابت در نظر گرفته شد (شکل (۶)).



شکل ۶- اعمال شرایط مرزی

۴-۳- مش‌بندی

گوه نیز در راستای عمود بر محور طولی آزادی حرکت دارد. برای مش‌بندی المان چهار ضلعی و چهار گرهی (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 (۷)).

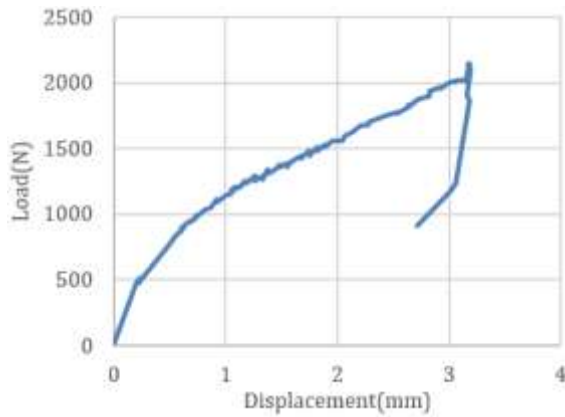


شکل ۷- مش‌بندی

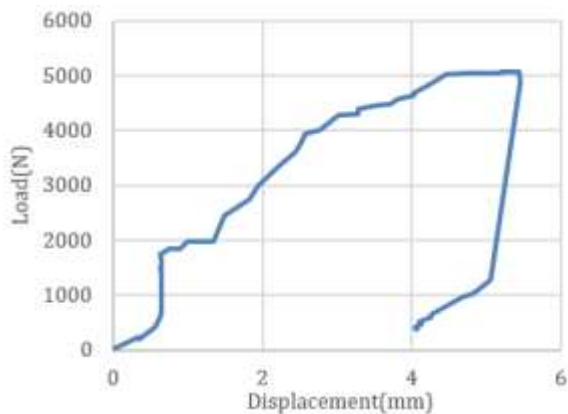
این نرم‌افزار قابلیت مدل‌سازی و تحلیل انواع مصالح به صورت الاستیک و پلاستیک را داراست که در این تحقیق با توجه به ماهیت مواد کامپوزیتی این مواد به صورت الاستیک و با در نظر گرفتن تعداد لایه‌ها و زوایای آن‌ها نسبت به محور X مدل‌سازی می‌شوند. بارگذاری و شرایط مرزی مدل در محیط بار مشخص می‌شود. مشخصات مکانیکی مصالح به کاررفته در مخازن از نوع غیرایزوتروپیک بوده و مقادیر مدول یانگ، مدول برشی و ضرایب پوواسون در جهات مختلف در دسترس می‌باشد (جدول (۱)). 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 غیر منظم در کنار هم قرار گرفته‌اند الیاف شیشه، ساختمان آمورف^۲ 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 شیشه-های 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 MPa تا ۲۵۰ و حداکثر کرنش نهائی ۰/۳ تا ۰/۱/۸ می‌باشند. E-GLASS ها از سیلیکات آلومینیوم کلسیم به دست می‌آیند که ۸۰ الی ۹۰ درصد تولیدات GFRP را تشکیل می‌دهند. باتوجه 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 به‌شمار می‌آید.

جدول ۱- مشخصات مکانیکی مخازن

ردیف	پارامتر	علائم اختصاری	مقادیر
۱	Young's Modulus (Pa)	E1, E2, E3	21710000, 5602000, 5602000
۲	Shear Modulus (Pa)	G12, G13, G23	1990000, 1990000, 2603000
۳	Poisson's ratio	Nu12, Nu13, Nu23	0/273, 0/273, 0/076



(ج)



(د)

شکل ۹- خروجی نمودارهای بار- جابه‌جائی روش عددی:
 (الف) نمونه L5R4، (ب) نمونه L7R4، (ج) نمونه L5R2، (د) نمونه L7R2

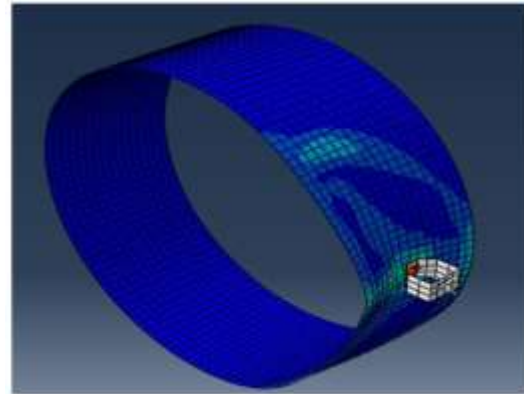
۵- تحقیقات آزمایشگاهی

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 به‌دست آمده خواهد شد. بنابراین باید دقت کافی در مدل‌سازی رفتار مصالح، شرایط تکیه-گاهی و راه‌اندازی آن در آزمایشگاه، سرعت اعمال بار و بررسی دقیق نمونه‌های آزمایشگاهی و عدم وجود نقص قابل رویت در آن صورت بگیرد تا بتوان با کم‌ترین ضریب خطا مدل‌سازی نمونه‌های آزمایشگاهی انجام داد و نتایج ارزشمند آن برای استفاده‌های بعدی در دسترس قرار بگیرند.

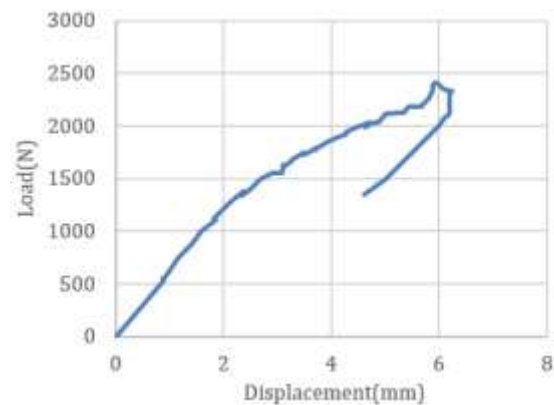
۵-۱- معرفی نمونه‌های آزمایشگاهی

برای بررسی رفتار پوسته‌های جدار نازک کامپوزیتی تحت بار دندانه‌ای در این مرحله به تعداد ۴ نمونه آزمایشگاهی در دو مرحله

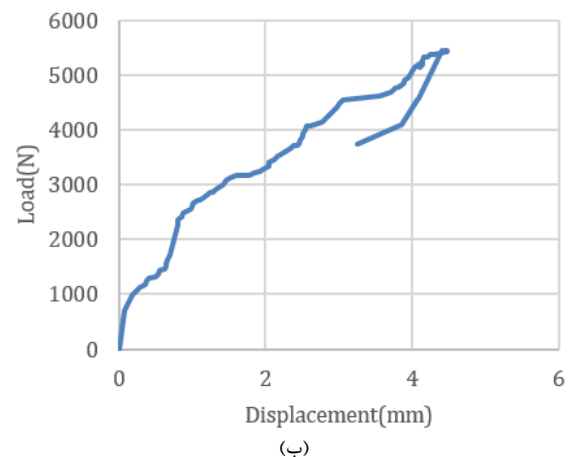
در محل اعمال بار موضعی در وسط دهانه تغییر شکلی به-سمت پایین به‌صورت فرورفتگی در نمونه ایجاد شده است (شکل (۸)). در محدوده وسط دهانه یک تنش یکنواخت در سطح فوقانی مخزن مشاهده می‌شود. این تنش به‌دلیل متقارن بودن بارگذاری می‌باشد. در روش عددی نمونه‌ها به‌ترتیب در ۲۴۱۳، ۲۱۵۵، ۵۴۵۵ و ۵۰۶۶ نیوتن دچار ترک شده و سپس افت بار اتفاق افتاد (شکل (۹)).



شکل ۸- گسیختگی نهائی



(الف)



(ب)

۵-۳- موقعیت نصب خیزسنج‌ها و کرنش‌سنج‌ها

جهت اندازه‌گیری میزان تغییر شکل‌ها از خیزسنج استفاده می‌شود. دقت اندازه‌گیری این خیزسنج‌ها در حد یک صدم میلی-متر می‌باشد. به طوری که هر دور چرخش کامل عقربه آن‌ها برابر با یک میلی‌متر جابه‌جائی در راستای طولی می‌باشد. در این مقاله برای نشان دادن خیزسنج‌ها از عبارت LVDT^۲ استفاده شده است. این ابزارهای اندازه‌گیری در قسمت‌های مختلف این نمونه و به صورت محیطی نصب شده است. در کلیه نمونه‌ها از سه عدد LVDT با موقعیت‌های A، B، C و یک عدد کرنش‌سنج استفاده شده است. در نمونه سوم به دلیل نقص فنی آزمایشگاهی امکان استفاده از کرنش‌سنج نشد. در جدول (۳) محل نصب و فاصله ابزارهای اندازه‌گیری تا محل بار دندانه‌ای در نمونه‌ها نشان داده شده است. تمام ابزارهای اندازه‌گیری توسط کابل رابط، اطلاعات به دست آمده نقاط مختلف را به دیتالاگر و نرم‌افزار مربوطه ارسال می‌کنند. تعدادی از این ابزارها و موقعیت آن‌ها در شکل (۱۰) نشان داده شده است.



شکل ۱۰- سیستم Set up و ابزارهای اندازه‌گیری

تهیه و مورد آزمایش قرار گرفت که مشخصات مکانیکی در تمامی نمونه‌ها یکسان بوده و در مرحله اول از دو مخزن با شعاع یکسان ۴۰۰ میلی‌متر و به طول‌های متفاوت ۵۰۰ و ۷۰۰ میلی‌متر استفاده شد و در مرحله دوم از دو مخزن دیگر با شعاع یکسان ۲۰۰ میلی‌متر و به طول‌های متفاوت ۵۰۰ و ۷۰۰ میلی‌متر استفاده شده است (جدول (۲)). لازم به یادآوری است که در رفتار پوسته‌های جدار نازک تحت بار دندانه‌ای پارامترهای هندسی بی-بعد R/t و L/R به‌عنوان مهم‌ترین پارامتر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

جدول ۲- مشخصات هندسی مخازن

ردیف	اسم نمونه	شعاع (mm)	طول (mm)	ضخامت کل (mm)	تعداد لایه الیاف	زاویه الیاف
۱	L5R4	۴۰۰	۵۰۰	۴	۳	۹۰
۲	L7R4	۴۰۰	۷۰۰	۴	۳	۹۰
۳	L5R2	۲۰۰	۵۰۰	۴	۳	۹۰
۴	L7R2	۲۰۰	۷۰۰	۴	۳	۹۰

۵-۲- طراحی تکیه‌گاه‌ها

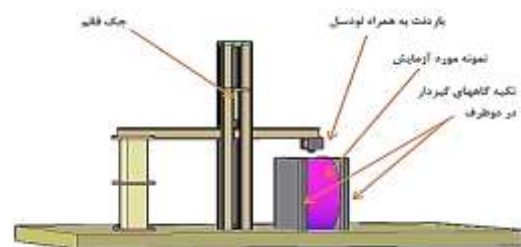
در طراحی تکیه‌گاه‌ها سعی شده است شرایطی محیا شود که از دوران نمونه‌های تحت تست در هنگام بارگذاری جلوگیری شود. بدین منظور از سه صفحه صلب که توسط میله‌های نگهدارنده که این صفحات را از بالا و پائین گیردار کرده‌اند تشکیل شده است. این صفحات به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که با قرار گرفتن نمونه در داخل شیار صفحات تقریباً هیچ حرکتی نداشته باشند (شکل (۱۰)). برای کنترل مقاومت پیچ‌های استفاده شده در طراحی تکیه‌گاه‌ها بیش‌ترین نیرویی که در آزمایشگاه به‌عنوان بار دندانه‌ای قابل اعمال است در نظر گرفته شده است.

جدول ۳- محل نصب و مختصات ابزارهای اندازه‌گیری

ردیف	اسم نمونه	فاصله تا محل اعمال بار (mm) LVDT1 (A)	فاصله تا محل اعمال بار (mm) LVDT2 (B)	فاصله تا محل اعمال بار (mm) LVDT3 (C)	فاصله تا محل اعمال بار کرنش سنج (mm)
۱	L5R4	۱۵۰	۹۸/۲	۶۷/۴	۱۰۰
۲	L7R4	۱۵۰	۱۲۰	۷۰	۱۰۴
۳	L5R2	۱۰۰	۹۸	۶۵	-
۴	L7R2	۱۰۲	۱۱۸	۷۱	۱۰۵

۵-۴- سیستم بارگذاری عمود بر محور مخزن توسط جک قائم

یکی از پارامترهای بسیار حساس در انجام تست‌های آزمایشگاهی نحوه اعمال بارگذاری می‌باشد. جهت بررسی رفتار نمونه‌های آزمایشگاهی تحت اثر بار دندان‌های از گوه به‌عنوان بار استفاده می‌شود. برای اعمال بارگذاری عمود بر محور مخزن در نقطه میانی طول مخزن، از جک هیدرولیکی به ظرفیت ۶۰۰KH استفاده شد. این جک به سیستم ستونی قائم متشکل از چهار عدد ناودانی UPE180 متصل می‌باشد. جهت اعمال نیروی متمرکز، گوه‌ای در انتهای جک قائم تعبیه شد. برای محاسبه میزان نیروی وارده توسط جک، لودسل^۴ در انتهای آن قرار گرفت که مستقیماً میزان نیرو را به رایانه انتقال می‌داد (شکل (۱۱)).



شکل ۱۱- شکل شماتیک سیستم آزمایشگاهی

پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، آن‌ها را بر روی تکیه گاه‌های مربوطه نصب و کرنش‌سنج‌ها و خیزسنج‌ها در موقعیت‌های از پیش تعیین شده با دقت فراوان به‌منظور اندازه‌گیری هرچه دقیق تر متصل گردیدند. هرگونه خطای ایجاد شده در طول بارگذاری همچون سرعت اعمال بارگذاری و خروج از رکزیت 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 به‌دلیل وارد کردن آن توسط جک هیدرولیکی دارای دقت کافی بوده و مقدار آن در هر مرحله تحت کنترل می‌باشد. در ابتدای کار با انجام بارگذاری صداهای خفیف ترک به‌طور متوالی شنیده می‌شود. 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.

۶- بررسی مدهای شکست نمونه‌ها

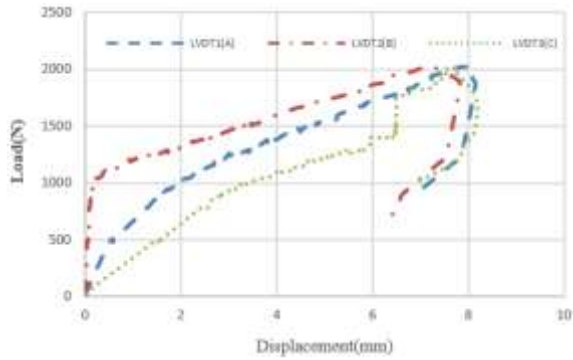
در تمامی نمونه‌های آزمایشگاهی مدهای شکست در وسط دهانه و در زیر محل اعمال بار موضعی رخ داده است. با آغاز اعمال بارگذاری قائم، الیاف به‌کار رفته در طول نمونه براساس کشش ایجاد شده در آن‌ها شروع به گسیختگی کرده و در حین آزمایش این صدای ازهم گسیختگی الیاف به‌گوش می‌رسید و اعمال بارگذاری موضعی سبب تورفتگی سطح واقع در زیر محل اعمال بار شد. با نزدیک شدن بارگذاری قائم به‌میزان ظرفیت نهایی 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 بارگسیخته شده و در راستای محیطی شروع به رشد می‌کند (شکل (۱۲)).

۶-۱- منحنی‌های بارموضعی - تغییر شکل‌های ثبت شده

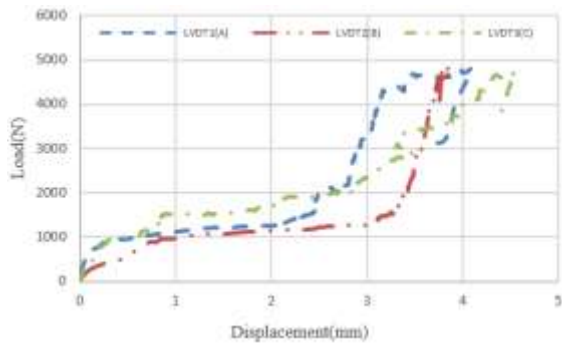
توسط LVDT‌های نصب‌شده در اطراف گوه

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 (۱۳)). تمامی منحنی‌ها تقریباً رفتار مشابهی در طول آزمایش دارند. جهت مقایسه کرنش‌های ثبت شده به‌وسیله کرنش‌سنج‌ها در هر نمونه، منحنی بار موضعی - کرنش ثبت شده از دیتالاگر به‌ترتیب برای هر نمونه در یک نمودار جداگانه ارائه شده است (شکل (۱۴)).

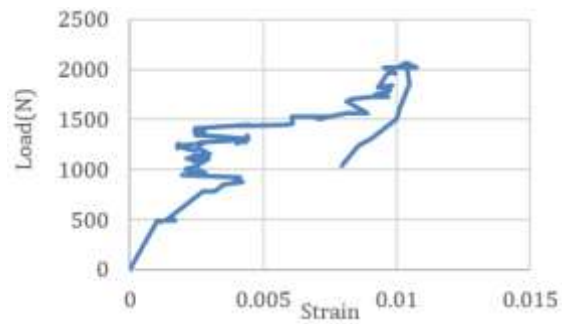
در نمودارهای بار - تغییرشکل آزمایشگاهی، LVDT1, 2, 3 به ترتیب با موقعیت‌های A, B, C نشان داده شده است. در این نمودارها، منحنی‌ها رفته‌رفته از هم فاصله می‌گیرند (هرچند این اختلاف اندک است). که این اختلاف در دو نمودار نشان از تغییر اندازه قطر عمودی در انتهای آزمایش نسبت به آغاز آن می‌باشد. این امر نشانگر بیضوی‌شدگی مقطع در لحظه پیش از شکست نمونه می‌باشد.



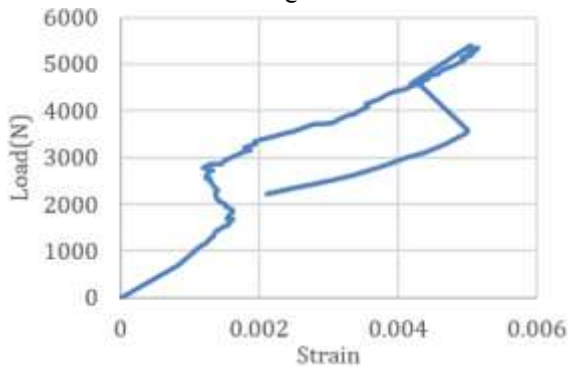
(الف)



(ب)



(ج)



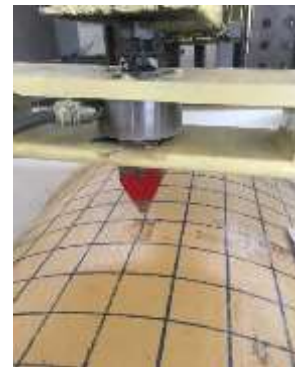
(د)

شکل ۱۳- نمودار بار موضعی - تغییر شکل: الف) نمونه L5R4،

ب) نمونه L7R4، ج) نمونه L5R2، د) نمونه L7R2



(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۱۲- تغییر شکل نهایی: الف) نمونه L5R4، ب) نمونه L7R4،

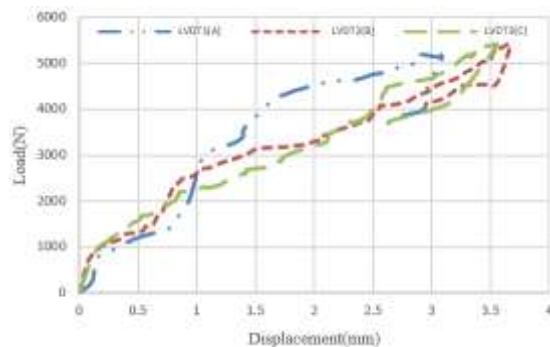
ج) نمونه L5R2، د) نمونه L7R2

۶- بررسی نتایج

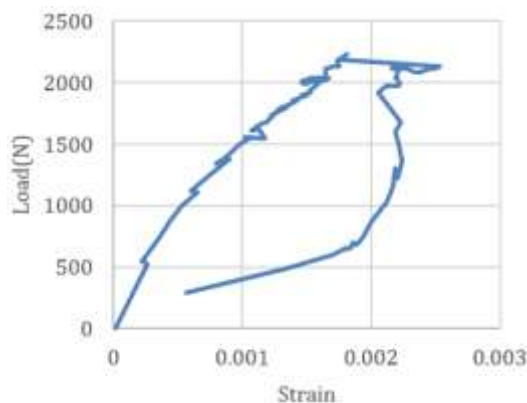
۶-۱- نتایج مربوط به آزمایشات مرحله اول- روش عددی

و آزمایشگاهی نمونه‌ها

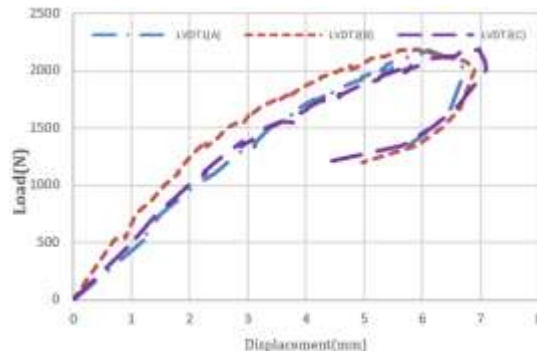
در این بخش نتایج مربوط به روش آزمایشگاهی و تحلیل عددی به روش المان محدود مورد بررسی قرار گرفت. در این مرحله هر دو مخزن استوانه‌ای به شعاع ۴۰۰ میلی‌متر، ضخامت ۴ میلی‌متر و ارتفاع به ترتیب ۵۰۰ و ۷۰۰ میلی‌متر تحت بار دندانه‌ای موضعی قرار گرفته و رفتار آن‌ها به روش آزمایشگاهی و تحلیل عددی بررسی شد. مطابق جدول (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 ۵۰۰ میلی‌متر می‌باشد پس از اعمال بارگذاری، اولین صدای خفیف ترک در ۶۱۲ نیوتن اتفاق افتاد، سپس صداهای ترک به ترتیب در ۱۳۴۰، ۱۵۶۰، ۱۷۳۰ و ۱۹۲۰ نیوتن رخ داد. در نهایت در ۲۱۸۰ نیوتن صدای شدید ترک به وجود آمد و سبب ایجاد ترک در پوسته شد (شکل ۱۳-الف)). اما در روش عددی پوسته دربار ۲۴۱۳ 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 ۱۳-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 L5R4 با ۱۰٪ و در نمونه L7R4 با ۷٪ کاهش را نشان می‌دهد (جدول (۴)).



(الف)



(ب)



(ج)

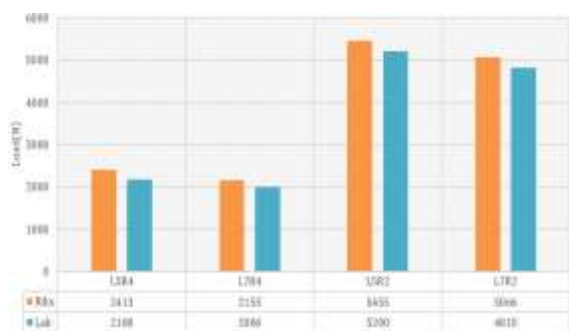
شکل ۱۴- نمودار بار- کرنش: الف) نمونه L5R4، ب) نمونه L7R4.

ج) نمونه L7R2

جدول ۴- بررسی نتایج نمونه‌ها تحت اثر بار دندانه‌ای

درصد کاهش (reduction Percentage)	Lab/Riks	P (N)		اولین صدای خفیف ترک (N)	R/t	L/R	t (mm)	L (mm)	R (mm)	اسم نمونه	ردیف
		آزمایشگاهی (Lab)	عددی (Riks)								
٪۱۰	٪۹۰	۲۱۸۰	۲۴۱۳	۶۱۲	۲۰۰	۰/۶۲۵	۴	۵۰۰	۸۰۰	L5R4	۱
٪۷	٪۹۳	۲۰۰۶	۲۱۵۵	۵۸۰	۲۰۰	۰/۸۷۵	۴	۷۰۰	۸۰۰	L7R4	۲
٪۴/۵	٪۹۵/۵	۵۲۰۰	۵۴۵۵	۲۳۳۷	۱۰۰	۰/۶۲۵	۴	۵۰۰	۴۰۰	L5R2	۳
٪۵	٪۹۵	۴۸۱۰	۵۰۶۶	۲۱۱۰	۱۰۰	۰/۸۷۵	۴	۷۰۰	۴۰۰	L7R2	۴

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 ۲۴۱۳ نیوتن، مقدار به‌دست آمده برای گسیختگی نمونه تحت بار دندانه‌ای در تحلیل عددی است. درحالی‌که در روش آزمایشگاهی، نمونه در ۲۱۸۰ نیوتن ترک می‌خورد. در سایر آزمایشات هم این اختلاف وجود دارد که با توجه به جدول (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 هیچ یک از آزمایشات به بیش از ۱۰٪ نمی‌رسد و در حالت کلی همبستگی مناسبی بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج عددی به‌دست 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 جابه‌جائی مربوط به نقاطی می‌باشد که کاملاً نزدیک به بار دندانه‌ای باشد. برای مثال در مرحله اول، رفتار نهائی مخزن در LVDT3 (موقعیت C) نسبت به سایر LVDT ها بیشتر می‌باشد. در نمونه‌های ۳ و ۴ با توجه به این که شعاع ۲۰۰ mm می‌باشد، شاهد یک تفاوت عمده در رفتار پوسته نسبت به حالت قبل شدیم. مقاومت پوسته در مقابل گسیختگی و ترک‌خوردگی در این حالت به‌طور قابل توجهی نسبت به حالت قبل افزایش یافت. مقدار بار دندانه‌ای تا بیش ۵۰۰۰ نیوتن هم افزایش یافته است ولی جابه‌جائی مخزن در LVDT3 (C) که بسیار نزدیک به مخزن می‌باشد حداکثر تا ۳/۷mm می‌باشد و در LVDT های ۱ و ۲ (A, B) به‌دلیل دور بودن از بار دندانه‌ای، جابه‌جائی به مراتب کم‌تر از LVDT3 (C) را دارند. همین موضوع در نمونه آزمایشی چهارم هم کاملاً مشهود است. اما نتیجه مهم دیگری که از مقایسه ظرفیت باربری در شکل (۱۵) به‌دست می‌آید افزایش مقاومت پوسته در برابر گسیختگی پس از کاهش اندازه قطر آن می‌باشد.



شکل ۱۵- مقایسه بار نهائی گسیختگی روش عددی و آزمایشگاهی

۲-۶- نتایج مربوط به آزمایشات مرحله دوم- روش عددی و آزمایشگاهی نمونه‌ها

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 به‌ترتیب ۵۰۰ و ۷۰۰ میلی‌متر که تحت بار دندانه‌ای موضعی قرار گرفته‌اند، بررسی شد. مطابق جدول (۴) رفتار مخازن در مقابل بار دندانه‌ای به روش آزمایشگاهی نسبت به روش عددی مورد مقایسه قرار گرفت. در آزمایش سوم ارتفاع مخزن مجدداً ۵۰۰ میلی‌متر می‌باشد. پس از اعمال بارگذاری اولین صدای خفیف ترک در ۲۳۳۷ نیوتن اتفاق افتاد، سپس صداهای ترک به‌ترتیب در ۳۱۵۸ و ۳۶۲۱ و ۴۱۱۵ نیوتن رخ داد. در نهایت در ۵۲۰۰ نیوتن صدای شدید ترک به‌وجود آمد و سبب ایجاد ترک در پوسته شد (شکل (۱۳-پ)). اما در روش عددی، پوسته در ۵۴۵۵ نیوتن دچار ترک‌خوردگی 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 به‌ترتیب در ۲۱۸۰ و ۲۴۱۲ نیوتن رخ داد. در نهایت در ۴۸۱۰ نیوتن صدای شدید ترک به‌وجود آمد و سبب ایجاد ترک در پوسته شد (شکل (۱۳-ت)). اما در روش عددی مخزن در ۵۰۶۶ نیوتن دچار ترک‌خوردگی شد. در این مقایسه، رفتار مخازن نسبت به اعمال بار دندانه‌ای در روش آزمایشگاهی نسبت به عددی در نمونه L5R2 با ۴/۵٪ و در نمونه L7R2 با ۵٪ کاهش را نشان می‌دهد (جدول (۴)).

۳-۶- مقایسه نتایج روش عددی و آزمایشگاهی مرحله اول و دوم

در این بخش نتایج مربوط به رفتار مخازن در نمونه‌های L5R4 و L7R4 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 (۴) و با توجه به مقایسه رفتار نمونه‌ها در روش آزمایشگاهی و عددی اولین تشابهی که در نتایج به‌دست آمده هر دو روش وجود دارد این است که مقدار بار دندانه‌ای برای ایجاد ترک در نمونه درحالت 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، به‌دست آمده است. اما مقادیر آزمایشگاهی کاملاً واقعی بوده و امکان به‌وجود 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

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

۷) تحلیل غیرخطی عددی تخمین مناسبی از میزان جابه‌جائی‌ها تحت بارگذاری وارده داشته است. اختلاف در مقادیر نهائی جابه‌جائی‌ها 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.

۸- قدردانی

از مدیریت و همکاران محترم کارخانه فراسان در تهیه نمونه‌های تست (مخازن GFRP) کمال تشکر و امتنان را داریم. همچنین از کارشناس محترم آزمایشگاه سازه‌های جدار نازک دانشکده فنی دانشگاه ارومیه، جناب آقای مهندس جعفر عظیم‌زاده، به دلیل همکاری ایشان در انجام تست نمونه‌های آزمایشگاهی قدردانی می‌شود.

۹- مراجع

عالم‌زاد ح، شکیب ح، "مطالعه عددی پاسخ مخازن زمینی فولادی با حرکات گهواره‌ای آزاد تحت اثر تحریک افقی زلزله"،

انجمن سازه‌های فولادی ایران، ۱۳۹۵، ۱-۹.

Abrar F, "Impact Responses, compressive and burst tests of glass/epoxy (gre) composite pipes", Journal of Physics Conference Series Iop Publishing, 2017, 48 (2), 174-186.

American Petroleum Institute (API 650), "Welded steel tanks for oil storage: downstream segment", 11st Edition, 2007.

Dey KM, Pandey PL, "A Comparison Study of Filament Wound Composite Cylindrical Shell used in under Water Vehicle Application by Finite Element Method", The 5th International & 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference, India, 2014.

Elghazouli, Chtyssanthopoulos, Spagnoli, "Experimental response of glass reinforced plastic cylinders under axial compression", The 2nd International Conference on Mechanical Engineering, 1998, 11, 347-371.

Eyvazinezhad S, Showkati H, "Thorough investigation of continuously supported pipelines under combined pre-compression and denting loads", International Journal of pressure vessels and piping, 2013, 104, 83-95.

Gohari "First-ply of thick circular cylindrical GRP composite shell subjected to static external pressure via finite element simulation and analytical approaches", Advanced Materials Research, 2012, 463, 477-483.

طبق جدول (۴) در مرحله اول آزمایشات تقریباً در ۲۰۰۰ نیوتن شاهد صدای شدید ترک خوردگی در محل اعمال بار دندانانه-ای شدیم و سوراخ‌شدگی در محل اعمال بار دندانانه‌ای اتفاق افتاد ولی در مرحله دوم در بار تقریباً ۵۰۰۰ نیوتن شاهد صدای شدید ترک خوردگی در محل اعمال بار دندانانه‌ای شدیم ولی پس از افت بار هیچ گسیختگی به جز چند ترک سطحی در مخزن ملاحظه نشد. در نتیجه هر چقدر قطر مخازن در پوسته‌های GFRP کم‌تر شود مقاومت آن در برابر بار دندانانه‌ای و بار ناشی از ضربه بیشتر خواهد شد. پس در حالت کلی در این نمودارها با توجه به این که سطح فوقانی نمونه در ارتباط مستقیم با اعمال بار دندانانه‌ای 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 این که مخزن به حداکثر ظرفیت قابل تحمل رسیده و دچار ترک می‌شود با کاهش بار مواجه شده و مقدار جابه‌جائی نیز در نمودار به تدریج کاهش می‌یابد.

۷- نتیجه‌گیری

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

۱) با مقایسه نمودارهای بار موضعی- تغییر شکل ملاحظه می‌شود هرچهار 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) 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.

- Jajo JO, "Dent behaviour of steel pipes under pressure load", PhD Thesis, University of Windsor, Canada, 2014.
- Jin NJ, "Structural analysis and optimum design of GRP pipes based on properties of materials", *Construction and Building Materials*, 2013 38 (3), 316-326.
- Mousavi V, "Experimental and Theoretical Investigation of GFRP Pipe lines Behavior under the Simultaneous Effect of Axial Force and Dent Load", MA Thesis, University of urmia, Iran, 2018.
- Parashar P, "Adhesively bonded composite tubular joints: Review", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2013, 38 (4), 58-68.
- Park JS, "A Safety Evaluation on the Ring Deflection of Buried GRP Pipes", *Journal of the Korean Society for Advanced Composite Structures*, 2011, 2 (2), 26-33.
- Rafiee R, Torabi MA, "Stochastic prediction of burst pressure in composite pressure vessels", *Composite Structures*, 2017, 185 (2), 573-583.
- Shuai Y, Shuai J, Zhang X, "Experimental and numerical investigation of the strain response of a dented API 5L X52 pipeline subjected to continuously increasing internal pressure", *Composite structures*, 2018, 53 (4), 427-435.
- Walker C, Ellians K, "Damage on offshore tubular bracing members", *IABSE Colloquium on Ship Collisions with Bridges and Offshore Structures*, 1983, 42, 253-261.
- Wierzbicki N, Suh K, "Indentation of tubes under combined loading", *International Journal of Mechanical Sciences*, 30, 229-248.
- Zarrin A, "Experimental investigation behavior of GRP pipe under denting load", MA Thesis, University of Urmia, Iran, 2018.

EXTENDED ABSTRACT

Experimental and Numerical Investigation of the Behavior of Cylindrical Thin-Walled GFRP Shells under Dental Load

Hossain Showkati^{a,*}, Babak Sarboland^b

^a Faculty of Civil Engineering, University of urmia, Urmia, Iran

^b Faculty of Civil Engineering, Pardis University, Urmia, Iran

Received: 08 May 2020; **Review:** 20 December 2020; **Accepted:** 27 December 2020

Keywords:

Local dental loads, Experimental investigation, GFRP tanks, Resistance.

1. Introduction

In this study, we attempt to have numerical and software analysis of behavior, deformation and strain caused by local dental loads (dent) in GFRP tanks. The load-displacement and the load- Strain diagrams in experimental and software conditions have also been analyzed, compared and evaluated. The research can be used in oil company projects, water organization and different types of tanks which are exposed to local loads. the experimental and theoretical researches on GFRP tubes and tanks under dental loads and concluded that all samples have linear behavior from beginning to end and proceed with the same slope which is due to the behavior of the GFRP materials (Zarrin, 2018). To test the behavior of experimental specimen under the influence of Dent's load, wedge is used. In another studies different types of dental loads are applied to the tanks like Dome-shaped dental load, Circular dental load and Rectangular dental load (Jajo, 2014). To understand the importance and necessity of research, we must first study the dental load, how it is applied to the tanks, the dangers of applying it to the tanks and the ways of resistance against these loads.

2. Methodology

2.1. FE modeling

Nonlinear analysis of dental load effect on tank by using finite element method. The ABAQUS software has been used to present the finite element model of the samples. Modeled samples are tanks with 500 and 700 mm height and diameter of 400 and 800mm. In multilayer composite cylindrical shell modeling in software ABAQUS, for meshing a quadrilateral and quadruple element (S4R), which is a two curve element and is capable of analyzing large strains, the reduced integration method was used to analyze the samples. In this study, in order to apply the boundary conditions of the tank, all properties of the nodes on the edge of the tank in that area are assigned to a point in their center so that the boundary conditions can be applied only at that point. There is a deformation to down in shape of concavity at the site of the local load in the middle of the crater (Fig. 1).

* Corresponding Author

E-mail addresses: h.showkati@urmia.ac.ir (Hossain Showkati), b.sarboland@urmia.ac.ir (Babak Sarboland).

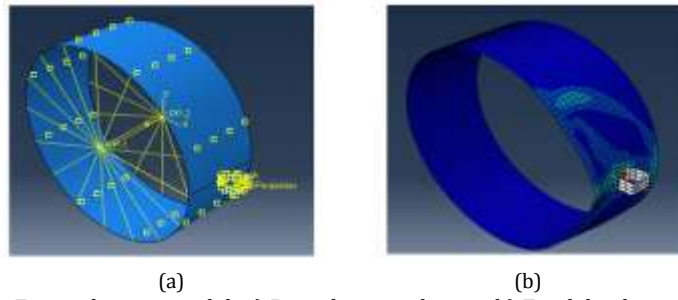


Fig. 1. Finite element model: a) Boundary conditions, b) Final displacement

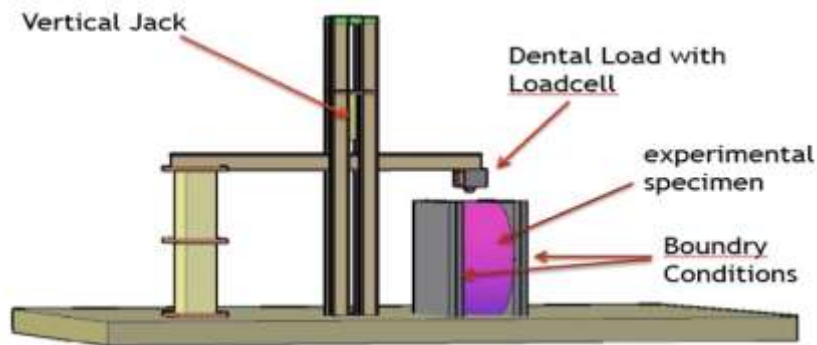


Fig. 2. Schematic mode of specimen

2.2. Experimental Investigation

In this study, to test the behavior of Composite thin shells under Dent load, four experimental specimen were prepared and tested which have the same mechanical properties (Table 1) and the only different variable in them is the height and radius of the shell (Table 2). The suitable R/t according to the thickness limit for these shells at the factory and laboratory limits, 200 mm and 400mm radius and thickness of 4 mm were selected. In the specimens used in this research, different ratios of R/t and L/R will be used. It should be recalled that in the behavior of thin shells under Dent load, dimensional geometric parameters R/t and L/R are considered as the most important parameters.

Table 1. Mechanical properties

Row	Parameter	Abbreviation signs	Amounts
1	Young's Modulus (Pa)	E1, E2, E3	21710000, 5602000, 5602000
2	Shear Modulus (Pa)	G12, G13, G23	1990000, 1990000, 2603000
3	Poisson's ratio	Nu12, Nu13, Nu23	0/273, 0/273, 0/076

Table 2. Geometric properties

Row	Specimen Name	Diameter (mm)	Height (mm)	Thickness (mm)	Number of fiber layers	Angle of fiber layers
1	Spec-1	800	500	4	3	90
2	Spec-2	800	700	4	3	90
3	Spec-3	400	500	4	3	90
4	Spec-4	400	700	4	3	90

In different parts of this specimen in the middle of the height different measuring instruments are installed. This tool includes a strain gauge to measure strain at a specific point in the intended direction and LVDT is used to measure the displacement values of different points on the shell. All measuring instruments by the interface cable send the obtained information to data logger and related software.

3. Results and discussion

After loading the first slight noise of crack is heard then other crack noises happened respectively and steady sounds of cracking is heard and at last extreme crack voice came out and dropped load. Fig. 3 shows the final load-displacement charts for LVDTs.

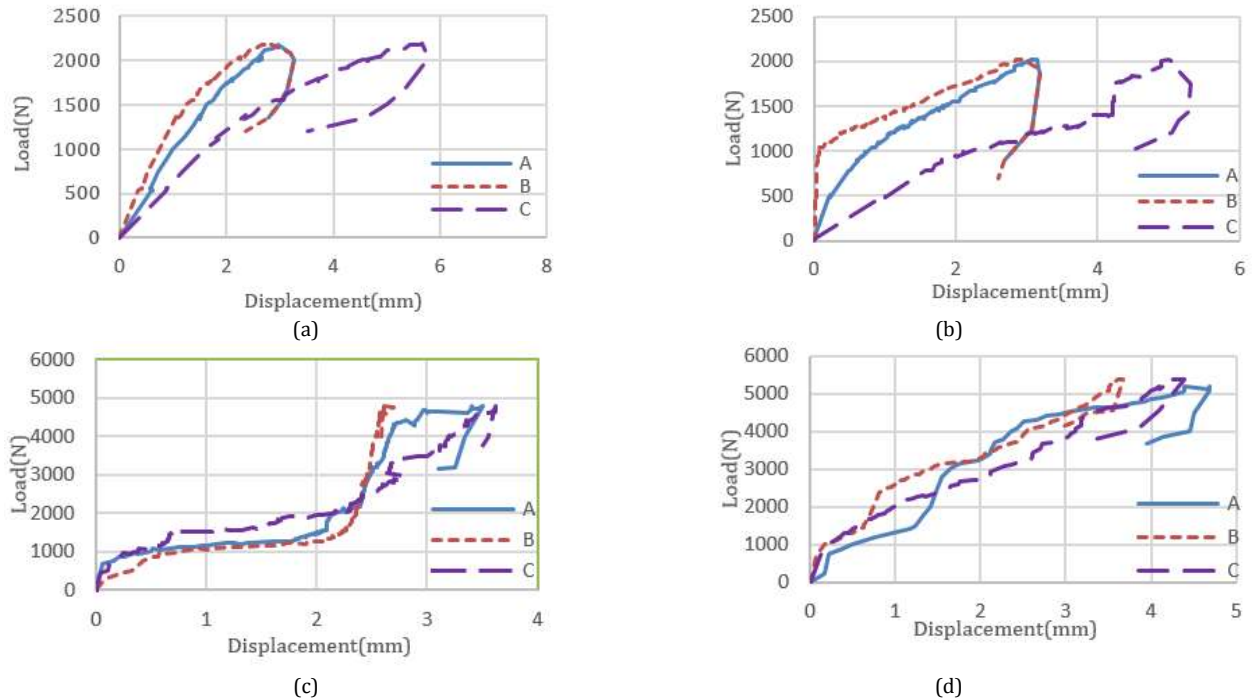


Fig. 3. Final charts: a) Load-Displacement- Spec 1, b) Load-Displacement- Spec 2, c) Load-Displacement- Spec 3, d) Load-Displacement- Spec 4

In the first Specimen after loading the first slight noise of crack is heard in the 612 (N) then other crack noises happened respectively in 1340, 1560, 1730 and 1920 (N) and in the 2180 (N) extreme crack voice came out . In the second specimen after loading the first slight noise of crack is heard in the 880 (N) then other crack noises happened respectively after 1090 (N) and in the 2006 (N) extreme crack voice came out. And in the third specimen after loading the first slight noise of crack is heard in the 2110 (N) then other crack noises happened respectively after 2180 (N) and in the 4810 (N) extreme crack voice came out. At last in the fourth specimen after loading the first slight noise of crack is heard in the 2337 (N) then other crack noises happened respectively after 3353 (N) and in the 5200 (N) extreme crack voice came out and then dropped load.

4. Conclusions

In the Table 3, P is the amount of dental load applied to the specimen which causes cracking. As you can see in this table according to the comparison of the behavior of the specimens in four numerical and experimental methods, the first similarity in the results of four specimens are that the amount of denting load to make cracks in the specimen is less in numerical than in the laboratory. Certainly numerical values have been obtained with respect to software analyzes and according to the mechanical characteristics of the Farasan factory. However the experimental values are quite real and the error rate in the laboratory may be due to the lack of installation of measuring instruments at appropriate locations or other errors during the test.

Table 3. Comparing and results

Row	Specimen Name	R (mm)	L (mm)	t (mm)	L/R	R/t	P (n)	
							Experimental	Numerical
1	Spec-1	800	500	4	0.625	200	2180	2413
2	Spec-2	800	700	4	0.875	200	2006	2155
3	Spec-3	400	500	4	0.625	100	4810	5066
4	Spec-4	400	700	4	0.875	100	5200	5455

5. References

- Jajo JO, "Dent behaviour of steel pipes under pressure load", PhD Thesis, University of Windsor, Canada, 2014.
- Zarrin A, "Experimental investigation behavior of GRP pipe under denting load", MA Thesis, University of Urmia, Iran, 2018.