

## کمانش پافیلی و مقاوم سازی پوسته های استوانه ای جدار نازک فولادی با استفاده از مصالح کمپوزیتی FRP

مرتضی وکیلی<sup>۱</sup> و حسین شوکتی<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکترای عمران - سازه، دانشکده فنی، دانشگاه ارومیه

<sup>۲</sup> استاد گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه ارومیه

### چکیده

پوسته های استوانه ای از زمان های طولانی به عنوان مخازنی در ابعاد کوچک یا بزرگ جهت ذخیره سازی انواع مواد مانند نفت و مشتقات آن مورد استفاده قرار گرفته اند. نسبت شعاع به ضخامت این پوسته ها در رده هایی مانند ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ قرار می گیرد که بر این اساس این سازه های جدار نازک به علت فروریختگی در کمانش مورد توجه طراحان و آیین نامه ها قرار گرفته اند. در این مقاله ناپایداری الاستوپلاستیک پوسته استوانه ای در نزدیکی تکیه گاه تحت عنوان کمانش پافیلی مدنظر قرار گرفته است. این فرم از کمانش تحت فشار داخلی بالا به همراه فشار محوری رخ می دهد. در مقاله حاضر ابتدا کمانش پافیلی مورد بررسی قرار گرفته و سپس روش جدید مقاوم سازی پوسته های استوانه ای با استفاده از مصالح کمپوزیتی FRP ارائه شده است. این مسئله به روش عددی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن در مقاومت کمانشی پوسته های استوانه ای ارزیابی می شود. بررسی ظرفیت نهایی مخازن مقاوم سازی شده در فشارهای داخلی متفاوت نشانگر تأثیر مثبت مصالح کمپوزیتی FRP در مقاومت کمانشی مخازن و افزایش آن در شرایط مختلف تا حد دو برابر می باشد. همچنین نتایج تغییرات ارتفاع و موقعیت FRP در روند مقاوم سازی بررسی شده و مطابقت آن با ارتفاع و موقعیت رخداده پافیلی به عنوان بهترین نتیجه ارائه گردیده است.

**واژگان کلیدی:** پوسته استوانه ای، کمانش پافیلی، مقاوم سازی، FRP.

### ۱- مقدمه

نزدیک تکیه گاه موجب کاهش در سختی خمشی و تقویت جابجائی های موضعی در پوسته استوانه ای می شود. به عبارت دیگر در این فرآیند، تنش غشایی محیطی منتهی به افزایش می یابد و کمانش الاستوپلاستیک رخ می دهد. این ناپایداری الاستوپلاستیک نزدیک تکیه گاه به عنوان کمانش پافیلی مشهور است. خرابی های رخ داده ناشی از کمانش پافیلی سبب خرابی از سرویس شدن مخازن، عدم امکان بهره برداری و تخلیه مایعات محتوی آن ها می گردد. بنابر این با توجه به خروج از سرویس مخزن مفهوم مقاومت پس کمانشی مطرح نخواهد بود.

در سال ۲۰۰۶، Chen و همکارانشان [۱] پیشنهاد مقاوم سازی پوسته در مقابل کمانش پافیلی با استفاده از یک رینگ سخت کننده کوچک را دادند. ابعاد و موقعیت این سخت کننده در آن تحقیق استخراج و ارائه شده است.

در مقاله حاضر پیشنهاد دیگری برای مقاوم سازی پوسته های استوانه ای در مقابل کمانش پافیلی با استفاده از FRP ارائه

پوسته ها یکی از اجزاء ساختمانی و صنعتی هستند که در دنیای اطراف ما یافت می شوند. یکی از انواع این سازه ها که کاربرد فراوانی در پالایشگاه های نفتی دارد، مخازن فولادی می باشند که به صورت استوانه ای طراحی و اجرا می گردند. از دیدگاه هندسی این مخازن دارای ضخامت بسیار اندک در مقایسه با دو بعد دیگر بوده و به این ترتیب در زمره سازه های جدار نازک و شرایط مرتبط با آن قرار می گیرند. شکست کمانشی مخازن حاوی مایعات در شرایط و مدهای گوناگون امکان پذیر می باشد. یکی از مهمترین مدهای فروریختگی، کمانش ناشی از اثر بار مرکب در جداره مخزن می باشد. این کمانش، ناپایداری جداره پوسته استوانه ای است که تحت بارگذاری هم زمان فشار محوری و فشار داخلی با مقادیر بالا رخ می دهد. موقعیت رخداده این ناپایداری معمولاً در ناحیه نزدیک تکیه گاه خواهد بود. تحقیق حاضر ثابت می کند افزایش فشار داخلی و تسلیم جداره

شده است [۶]. Batikha و همکارانش در سال ۲۰۰۸، مطالعه تحلیلی رفتار کمانشی پوسته استوانه‌ای جدار نازک مقاوم‌سازی شده با FRP به همراه ناکاملی متقارن محور را ارائه نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که مقاومت کمانشی پوسته تحت نیروی محوری، به واسطه استفاده مقادیر اندکی از FRP در نواحی بحرانی دارای ناکاملی، افزایش قابل توجهی را تجربه نموده است [۷]. همچنین این نویسندگان در سال ۲۰۰۹، مقاوم‌سازی پوسته استوانه‌ای تحت بارگذاری فشار محوری و داخلی یکنواخت در مقابل کمانش پافیلی را با استفاده از FRP در محل بحرانی به روش تئوری خمشی الاستیک، طی مقاله‌ای ارائه دادند و با توجه به افزایش مقاومت کمانشی این روش را پروسه‌ای مؤثر جهت رفع مشکل کمانشی پافیلی تشخیص دادند [۸]. Ramadan و همکارانش در سال ۲۰۱۰، درصد بهبود ظرفیت نهایی لنگر تکیه‌گاهی مخازن بدلیل اضافه نمودن لایه‌های FRP را تا ۶۰ درصد برای برخی از آنان نتیجه‌گیری و ارائه نمودند [۹].

هدف این مقاله تحقیق روی مقاوم‌سازی پوسته‌های استوانه‌ای فولادی جدار نازک در برابر کمانش پافیلی با استفاده از مصالح کمپوزیتی FRP می‌باشد. در این مقاله، تحلیل اجزای محدود پوسته جهت به دست آوردن تأثیر مقاوم‌سازی مخازن با FRP روی افزایش مقاومت کمانشی پافیلی مورد استفاده قرار گرفته است. مدل‌سازی دقیق رفتار الیاف کمپوزیتی و چسب جهت بررسی رفتار پوسته استوانه‌ای در حالت مقاوم سازی با FRP مدنظر قرار گرفته و ابعاد و موقعیت مناسب آن ارائه شده است.

## ۲- تشریح مدل اجزای محدود

برای ارائه مدل اجزای محدود نمونه‌ها از نرم افزار ABAQUS استفاده شده است. نمونه‌های مدل‌سازی شده به صورت مخازن استوانه‌ای دارای ارتفاع ۵۰۰، شعاع ۲۵۰ و ضخامت دیواره ۰/۲۵ میلی‌متر می‌باشد. ابعاد انتخاب شده برای شعاع و ضخامت مدل، نسبت شعاع به ضخامت ۱:۱۰۰۰ را که مقیاس مناسبی از شرایط واقعی می‌باشد، ارائه می‌دهد. فرض شده است که مخزن به طور کامل از آب پر بوده و در ابتدا بار به صورت هیدرواستاتیکی بر دیواره وارد می‌شود. ضخامت مخزن در ارتفاع به طور یکنواخت نظر گرفته شده است. برای مدل‌سازی دیواره استوانه فولادی از المان S4R استفاده شده است. این المان یک المان پوسته‌ای چهار نقطه‌ای دو انحنایی است که قابلیت تحلیل کرنش‌های بزرگ را دارا می‌باشد [۱۰]. از این

شده است. مصالح کمپوزیت FRP دارای ویژگی‌ها و خواص ممتازی شامل مقاومت نسبت به دانستیه بالا و دوام بالا نسبت به مصالح‌حاست. مصالح کمپوزیت FRP دارای ویژگی‌ها و خواص ممتازی شامل مقاومت نسبت به دانستیه بالا و دوام بالا نسبت به مصالح سنتی می‌باشد. استفاده از FRP برای سطح بیرونی پوسته در بسیاری از موارد بعلت اجتناب از احتیاج به دسترسی به قسمت داخلی مخزن و خارج از سرویس نمودن سازه به طور ویژه می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. اتصال FRP به پوسته به وسیله چسب همچنین آسان‌تر از جوش به آن است. علاوه بر آن که تنش‌های پس‌ماند و ناکاملی روی پوسته به جای نمی‌گذارد، وقتی مواد حساس و یا مشتعل مانند محصولات نفتی در سازه ذخیره شده باشند، ایمنی منحصر به فردی را ایجاد می‌کند.

تحقیقات گسترده‌ای روی مقاوم‌سازی اعضای بتنی به وسیله FRP از سال ۱۹۹۰ به بعد صورت گرفته است. در این تحقیقات مقاوم‌سازی و طرح با استفاده از FRP در المان‌هایی مانند تیر، ستون، دال و غیره ارائه شده است. اما تحقیقات روی مقاوم‌سازی اعضای فولادی با FRP به صورت محدودی صورت گرفته است؛ با این وجود برخی تلاش‌ها جهت جبران این موضوع شروع و در برخی موارد منجر به نتایج جالبی نیز شده است. این تلاش‌ها در منابع گوناگون و در ارتباط با مقاوم‌سازی المان‌هایی مانند تیر، ستون، دیوارهای برشی فولادی و غیره ارائه شده است [۲-۴]. رویداد کمانش پافیلی و مقاوم‌سازی سازه فولادی مورد نظر در برابر آن در برخی کارهای تحقیقاتی در سال‌های گذشته مد نظر قرار گرفته و به صورت پیشنهاداتی برای بهبود مقاومت کمانشی پافیلی از جمله استفاده از مصالح FRP نتیجه‌گیری و ارائه شده است.

Teng و Hu [۵]، افزایش شکل‌پذیری لوله‌های فولادی تحت فشار محوری را به واسطه محبوس‌شدگی خارجی به وسیله جاکت FRP و حذف مد کمانشی موضعی پافیلی توسط آزمایش مورد بررسی قرار داده و اثبات نمودند. همچنین این نویسندگان در سال ۲۰۰۷، لوله‌های فولادی محبوس شده با FRP را تحت تست‌های محوری فشاری و مدل اجزای محدود بررسی و امید بخش بودن جاکتینگ FRP برای مقاوم‌سازی تیوب‌های فولادی تو خالی در هر دو حالت آزمایشگاهی و عددی، نتیجه‌گیری نمودند. در قسمت کوتاهی از این مقاله همچنین، پوسته استوانه‌ای جدار نازک تقویت شده با FRP تحت عملکرد ترکیبی فشار محوری و فشار داخلی با روش اجزای محدود آنالیز و افزایش بار نهایی محوری در پروسه مقاوم سازی نتیجه‌گیری

بندی شده است. در مرحله اول با تحلیل استاتیکی غیر خطی بار فشار داخلی به صورت هیدرو استاتیکی اعمال و سپس با حفظ اثرات آن، در مرحله دوم و در تحلیل Riks بار محوری بر روی نمونه استوانه‌ای در بالای آن اعمال شده است.

در نمونه‌هایی که با استفاده از FRP مقاوم‌سازی شده‌اند؛ تعریف اندرکنش بین فولاد و FRP با خواص چسب مد نظر قرار گرفته است. این اندرکنش به صورت رفتار Cohesive تعریف و با تحلیل امکان ایجاد آسیب، با مدل‌سازی رشد آسیب نیز همراه شده است. با ایجاد آسیب و رشد آن، امکان جداسازی بین فولاد و FRP به وجود می‌آید. شروع آسیب به آغاز تنزل پاسخ Cohesive در نقطه تماس اشاره می‌نماید. پروسه تنزل وقتی شروع می‌شود که تنش‌های تماسی و یا جداسازی‌های تماسی معیار شروع آسیب تعیین شده را ارضاء نمایند. چندین نوع مد شروع آسیب در نرم‌افزار موجود است که از آن میان معیار بیشینه تنش‌ها در این تحقیق مد نظر قرار گرفته است. ارائه مقادیر عددی بزرگ‌تر از یک در نرم‌افزار برای نسبت مقادیر تنش‌های نرمال و تماسی موجود و بیشینه مربوط به خواص چسب معیاری برای شروع آسیب خواهد بود. برای تعریف معیارهای بیشینه تنش‌ها از داده‌های کارخانه سازنده اپوکسی Sikadur-30 به عنوان بیشینه تنش‌های اسمی در هنگام شروع آسیب استفاده شده است. در این تعریف مقدار تنش نرمال ۳۰ مگاپاسکال و تنش‌های برشی ۱۸ مگاپاسکال به نرم‌افزار معرفی شده است.

### ۳- بررسی نتایج

#### ۳-۱- اثر تغییرات فشار داخلی در ظرفیت مخازن استوانه‌ای

برای بررسی اثر تغییرات فشار داخلی، هشت مخزن استوانه-ای با شرایط هندسی یکسان شامل ارتفاع ۵۰۰، شعاع ۲۵۰ و ضخامت دیواره ۰/۲۵ میلی‌متر که در شش نمونه با تغییرات حداکثر فشار هیدرواستاتیکی بین ۰/۰۵ تا ۰/۲ مگاپاسکال و در دو نمونه به صورت صرفاً فشار داخلی و صرفاً نیروی محوری مد نظر قرار گرفته است. مش‌بندی نمونه‌ها در ارتفاع و برای رسیدن به نتایج منطقی با ابعاد حداکثری ۵ میلی‌متر ارائه و مدل‌سازی شده است. بارگذاری نمونه‌های S1 تا S6 ابتدا با اعمال فشار داخلی و سپس نیروی محوری تا رسیدن به کمانش پافیلی همراه شده است. نمونه S0 نیز صرفاً با اعمال فشار داخلی و S7 با اعمال نیروی محوری تا وقوع کمانش بررسی شده‌اند. بررسی

المان همچنین برای مدل‌سازی مصالح کمپوزیتی با الیاف کربن CFRP نیز استفاده شده است. مش‌بندی مخزن فولادی و CFRP با دانسیته مناسب جهت به دست آوردن نتایج منطقی به صورت ۵ میلی‌متر در ارتفاع در نظر گرفته شده است. مصالح فولادی به صورت الاستوپلاستیک با تنش تسلیم، مدول الاستیسیته، ضریب پواسون، مقاومت نهایی و حداکثر کرنش به ترتیب ۲۴۰ مگاپاسکال، ۲۱۰ گیگاپاسکال، ۰/۳، ۳۷۰ مگاپاسکال و ۰/۳ در نظر گرفته شده‌اند. همچنین خواص مصالح کمپوزیتی به صورت مدول الاستیسیته، ضریب پواسون و مدول برشی در جهات طولی (جهت محلی ۱) و فرعی (جهت محلی ۲ و ۳) مطابق جدول (۱) در نرم‌افزار تعریف شده است.

جدول ۱- مشخصات مکانیکی مصالح کمپوزیتی CFRP

$E_1=235\text{GPa}$	$E_2=17\text{GPa}$	$E_3=17\text{GPa}$
$\nu_{12}=0.32$	$\nu_{13}=0.32$	$\nu_{23}=0.45$
$G_{12}=4.5\text{GPa}$	$G_{13}=4.5\text{GPa}$	$G_{23}=2.5\text{GPa}$

برای بررسی عملکرد مصالح کمپوزیتی، رفتار الاستیک خطی مصالح آسیب ندیده به همراه تئوری Hashin با محاسبه و ارائه چهار مد شکست این مصالح به صورت کشش الیاف، فشار الیاف، کشش ماتریس و فشار ماتریس در نرم‌افزار مدل‌سازی شده است [۱۰]. شروع آسیب در این مدل بر پایه نقطه آغازین تنزل سختی مواد می‌باشد. همچنین مدل رشد آسیب در مصالح کمپوزیتی پس از آغاز آن نیز بر اساس انرژی مورد نیاز این فرآیند در نرم‌افزار تعریف شده است. بر این اساس روند آغاز و رشد آسیب نیز در طول تحلیل بررسی شده است. CFRP مورد استفاده به صورت الیاف تک جهته و در جهت افقی با ضخامت ۰/۲ میلی‌متر مدل‌سازی شده‌اند.

در تحلیل نمونه‌های استوانه‌ای، شرایط مرزی در تکیه‌گاه پایین پوسته به صورت مفصلی در نظر گرفته شده است. بارگذاری مخزن استوانه‌ای جهت رسیدن به ترکیب حداکثری تنش محوری و محیطی برای رخداد کمانش پافیلی به صورت فشار داخلی هیدرواستاتیکی و نیروی محوری وارده از بالا ارائه شده است. بارگذاری هیدرواستاتیکی فشار داخلی فقط در ناحیه حداکثری در نمونه‌های مطالعه شده در مقاله افزایش یافته است. این نوع بارگذاری جهت افزایش تنش محیطی و بررسی نتایج آن در کمانش پافیلی نمونه‌ها در ناحیه تکیه‌گاهی ارائه شده است. روند بارگذاری در نرم‌افزار اجزای محدود در دو مرحله تقسیم-

مگاپاسکال و دو نمونه به صورت صرفاً فشار داخلی و صرفاً نیروی محوری مد نظر قرار گرفته است. نتایج هر سری از نمونه‌ها به طور مجزا در جداول (۳) و (۴) ارائه شده است. در این نمونه‌ها نیز بررسی ظرفیت نهایی مخازن در فشارهای داخلی متفاوت، تأثیر بالای فشار داخلی در کاهش ظرفیت این مخازن به لحاظ نیروی محوری را نشان می‌دهد.

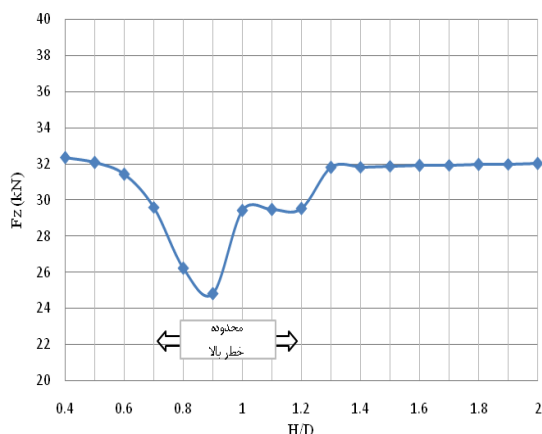
نمودار اندرکنش فشار داخلی-نیروی محوری برای کلیه نمونه‌ها در نسبت‌های مختلف ضخامت به شعاع در شکل (۳) ارائه شده است. این نمودار نشان می‌دهد که در نسبت‌های ضخامت به شعاع بالاتر در مخازن، ترکیب فشار داخلی و نیروی محوری منجر به مقاومت کمانشی کمتری می‌شود. به عبارت دیگر در این مخازن، کمانش در ترکیب نیروهای پایین‌تر رخ می‌دهد.

جهت بررسی اثر ارتفاع مخزن در ظرفیت مخازن تحت فشار داخلی و نیروی محوری، هفده نمونه با ثابت ماندن کلیه مشخصات و صرفاً با تغییرات نسبت ارتفاع به قطر مخزن از ۰/۴ تا ۲ مد نظر قرار گرفته است. در این نمونه‌ها قطر، ضخامت و حداکثر فشار هیدرواستاتیکی به طور یکسان و به ترتیب با مقادیر ۲۵۰ میلی‌متر، ۰/۲۵ میلی‌متر و ۰/۱ مگاپاسکال مدل-سازی شده‌اند. نتایج تحلیل عددی این نمونه‌ها در نمودار شکل (۴) ارائه شده است. بررسی نتایج نیروی محوری منجر به کمانش در حضور فشار داخلی نشان می‌دهد که در بازه نسبت ارتفاع به قطر ۰/۷ تا ۱/۲، کمانش پافیلی تحت نیروی محوری پایین‌تری رخ می‌دهد. به عبارت دیگر رخداد کمانش پافیلی در مخازنی با نسبت ارتفاع به قطر ۰/۷ تا ۱/۲ بیشتر محتمل می‌باشد.

ظرفیت نهایی مخزن در فشارهای داخلی متفاوت نشانگر تأثیر بالای فشار داخلی در کاهش ظرفیت مخزن به لحاظ نیروی محوری است. نیروی محوری منتج به کمانش در فشار داخلی ۰/۰۵ مگاپاسکال، ۴۴/۴۶۸ کیلو نیوتن و در فشار داخلی ۰/۲ مگاپاسکال، ۱۲/۳۵۹ نیوتن به دست آمده است که نشانگر کاهش ۷۲/۲۱ درصدی می‌باشد. این موضوع با جزئیات بیشتر در جدول (۲) ارائه شده است. نمودار اندرکنش فشار داخلی-نیروی محوری برای هشت نمونه در شکل (۱) ارائه شده است. این نمودار نرمالیزه شده قابل استفاده برای بررسی کمانش مخازن با نسبت ضخامت به شعاع ۱:۱۰۰۰ در شرایط اندرکنشی نیروی محوری و فشار داخلی می‌باشد. نرمالیزه نمودن فشار داخلی با نسبت فشار داخلی در  $R/tf_y$  و نیروی محوری با نسبت تنش محوری موجود بر تنش تسلیم مصالح صورت گرفته است. همچنین نمودارهای جابجایی قائم-نیروی محوری در طول تحلیل برای نمونه‌های S1 تا S6 در نمودار شکل (۲) ارائه شده است. در این نمودار نیز اثر فشار داخلی در کاهش ظرفیت مخازن به لحاظ نیروی محوری کاملاً مشهود است. برای بررسی اثر نسبت ضخامت به شعاع در ظرفیت مخازن تحت فشار داخلی و نیروی محوری نمونه‌های دیگری نیز مد نظر قرار گرفته است. هفت نمونه S8 تا S14 با نسبت ضخامت به شعاع ۱:۱۲۵۰ با شرایط هندسی یکسان شامل ارتفاع ۵۰۰ شعاع ۲۵۰ و ضخامت دیواره ۰/۲ میلی‌متر و هشت نمونه S15 تا S22 با نسبت ضخامت به شعاع ۱:۸۳۳ با شرایط هندسی ثابت شامل ارتفاع ۵۰۰ شعاع ۲۵۰ و ضخامت دیواره ۰/۳ میلی‌متر در نرم‌افزار مدل‌سازی شده‌اند. مطابق شرایط ذکر شده در بالا، نمونه‌ها با تغییرات حداکثر فشار هیدرواستاتیکی بین ۰/۰۵ تا ۰/۲

جدول ۲- مقایسه ظرفیت مخازن بر اساس تغییرات فشار داخلی با نسبت ضخامت به شعاع ۱:۱۰۰۰

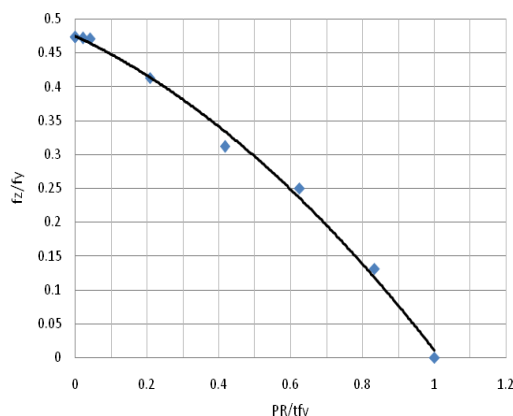
نمونه (بدون FRP)	فشار داخلی (MPa)	نیروی محوری منتج به کمانش مخزن (kN)	کاهش ظرفیت نسبت به S0	کاهش ظرفیت نسبت به نمونه قبل
S0	-	۴۴/۵۷۸	-	-
S1	۰/۰۰۵	۴۴/۴۶۸	۰/۲۵	۰/۲۵
S2	۰/۰۱	۴۴/۳۵۲	۰/۵۱	۰/۲۶
S3	۰/۰۵	۳۸/۹۲۵	۱۲/۶۸	۱۲/۲۴
S4	۰/۱۰	۲۹/۳۹۶	۳۴/۰۶	۲۴/۴۸
S5	۰/۱۵	۲۳/۶۰۳	۴۷/۰۵	۱۹/۷۱
S6	۰/۲۰	۱۲/۳۵۹	۷۲/۲۸	۴۷/۶۴
S7	۰/۲۴	-	-	-



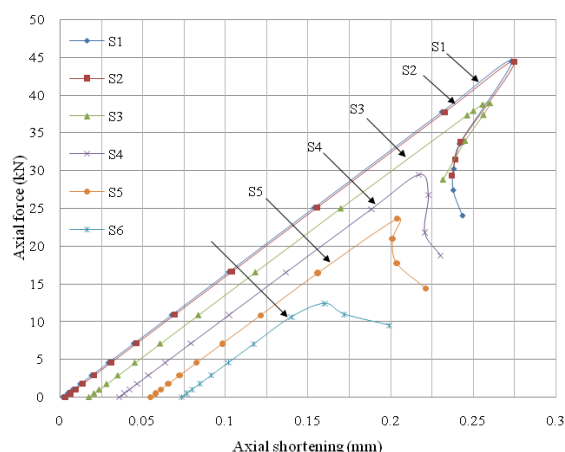
شکل ۴- نمودار نیروی محوری منجر به کمانش در حضور فشار داخلی ۰/۱ مگاپاسکال در نسبت‌های ارتفاع به قطر متفاوت

### ۲-۳- اثر مقاوم‌سازی با مصالح کمپوزیتی FRP روی ظرفیت مخازن استوانه‌ای

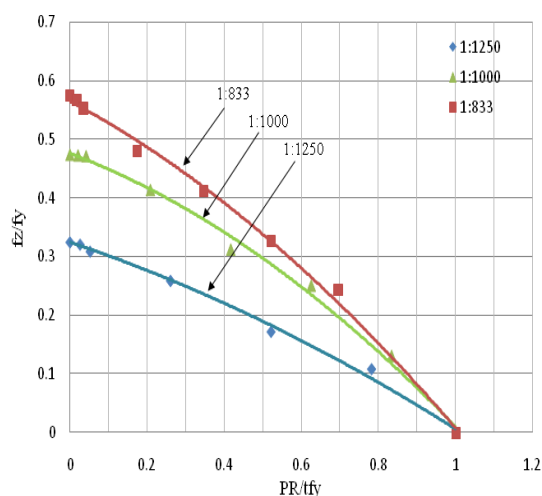
برای بررسی اثرات مقاوم‌سازی با FRP روی مخازن استوانه‌ای هشت مخزن استوانه‌ای با شرایط هندسی یکسان، در شش نمونه با تغییرات حداکثر فشار هیدرواستاتیکی بین ۰/۰۵ تا ۰/۲ مگاپاسکال (مانند بند قبل) و دو نمونه به صورت صرفاً فشار داخلی و صرفاً نیروی محوری در شرایط با و بدون FRP مطابق جدول (۵) مد نظر قرار گرفته است. ارتفاع FRP در این حالت بر اساس ارتفاع موج کمانش پافیلی ۲۰ میلی‌متر و در موقعیت قرارگیری ابتدای نمونه از تکیه‌گاه مدل‌سازی شده است. بارگذاری نمونه‌ها نیز مانند بند قبل، ابتدا با اعمال فشار داخلی و سپس نیروی محوری تا رسیدن به کمانش پافیلی همراه شده است. بررسی ظرفیت نهایی مخازن مقاوم‌سازی شده در فشارهای داخلی متفاوت نشانگر تأثیر مثبت FRP در ظرفیت مخزن می‌باشد. نیروی محوری منتج به کمانش در فشار داخلی ۰/۰۵ مگاپاسکال، در حالت بدون و با FRP به ترتیب ۴۴/۴۷ و ۴۹/۸۷ کیلونیوتن می‌باشد که نمایانگر رشد ۱۲/۱۴ درصدی در ظرفیت مخزن می‌باشد. در فشار داخلی ۰/۲ مگاپاسکال نیز در حالت بدون و با FRP نیروی محوری به ترتیب ۱۲/۳۶ و ۲۵/۰۱ کیلونیوتن به دست آمده است که نشانگر افزایش ۱۰۲/۳۷ درصدی است. بررسی دقیق بقیه نمونه‌ها نیز تأثیر بالای مقاوم‌سازی با مصالح کمپوزیتی را در فشارهای داخلی بالاتر به وضوح نشان می‌دهد.



شکل ۱- اندرکنش فشار داخلی - نیروی محوری مخازن با نسبت ضخامت به شعاع ۱:۱۰۰۰



شکل ۲- نمودار جابجایی قائم - نیروی محوری نمونه‌های S1 تا S6



شکل ۳- اندرکنش فشار داخلی - نیروی محوری مخازن با نسبت ضخامت به شعاع متفاوت

جدول ۳- مقایسه ظرفیت مخازن بر اساس تغییرات فشار داخلی با نسبت ضخامت به شعاع ۱:۱۲۵۰

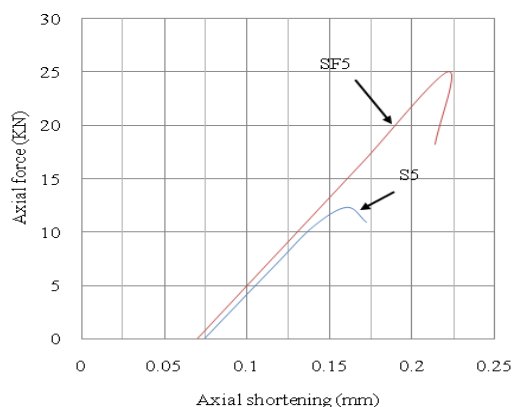
کاهش ظرفیت نسبت به نمونه قبل	کاهش ظرفیت نسبت به S8	نیروی محوری منتج به کمانش مخزن (kN)	فشار داخلی (MPa)	نمونه (بدون FRP)
-	-	۳۰/۶۱۸	-	S8
٪ ۱/۲۰	٪ ۱/۲۰	۳۰/۲۵۱	۰/۰۰۵	S9
٪ ۳/۶۹	٪ ۴/۸۴	۲۹/۱۳۵	۰/۰۱	S10
٪ ۱۶/۱۷	٪ ۲۰/۲۳	۲۴/۴۲۵	۰/۰۵	S11
٪ ۳۳/۴۹	٪ ۴۶/۹۵	۱۶/۲۴۴	۰/۱۰	S12
٪ ۳۶/۹۰	٪ ۶۶/۵۲	۱۰/۲۵۰	۰/۱۵	S13
-	-	-	۰/۱۹۲	S14

جدول ۴- مقایسه ظرفیت مخازن بر اساس تغییرات فشار داخلی با نسبت ضخامت به شعاع ۱:۸۳۳

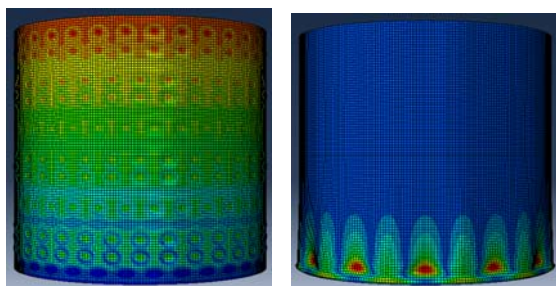
کاهش ظرفیت نسبت به نمونه قبل	کاهش ظرفیت نسبت به S16	نیروی محوری منتج به کمانش مخزن (kN)	فشار داخلی (MPa)	نمونه (بدون FRP)
-	-	۶۴/۸۹۰	-	S15
٪ ۱/۲۷	٪ ۱/۲۷	۶۴/۰۶۶	۰/۰۰۵	S16
٪ ۲/۵۲	٪ ۳/۷۶	۶۲/۴۵۰	۰/۰۱	S17
٪ ۱۳/۱۰	٪ ۱۶/۳۷	۵۴/۲۶۸	۰/۰۵	S18
٪ ۱۴/۲۵	٪ ۲۸/۲۹	۴۶/۵۳۵	۰/۱۰	S19
٪ ۲۰/۶۷	٪ ۴۳/۱۱	۳۶/۹۱۸	۰/۱۵	S20
٪ ۲۵/۴۲	٪ ۵۷/۵۷	۲۷/۵۳۵	۰/۲۰	S21
-	-	-	۰/۲۸۸	S22

جدول ۵- مقایسه ظرفیت مخازن در حالت با و بدون FRP

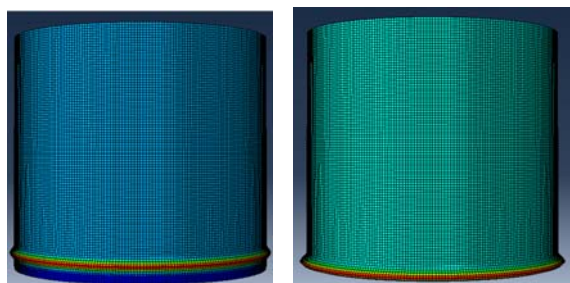
درصد افزایش ظرفیت مخزن مقاوم سازی شده نسبت به حالت بدون FRP	نیروی محوری منتج به کمانش مخزن (kN)	نمونه بدون FRP		فشار داخلی (MPa)
		S0	نمونه با FRP	
٪ ۱۲/۱۳	۴۴/۵۹	S0		۰/۰۰
	۵۰/۰۰	SF0		
٪ ۱۲/۱۴	۴۴/۴۷	S1		۰/۰۰۵
	۴۹/۸۷	SF1		
٪ ۱۲/۱۴	۴۴/۳۵	S2		۰/۰۱
	۴۹/۷۳	SF2		
٪ ۲۸/۰۸	۳۸/۹۲	S3		۰/۰۵
	۴۹/۸۵	SF3		
٪ ۵۸/۱۳	۲۹/۴۰	S4		۰/۱۰
	۴۶/۴۹	SF4		
٪ ۷۰/۳۴	۲۳/۶۰	S5		۰/۱۵
	۴۰/۲۰	SF5		
٪ ۱۰۲/۳۵	۱۲/۳۶	S6		۰/۲۰
	۲۵/۰۱	SF6		
٪ ۱۲/۱۳	۴۴/۵۹	S0		۰/۰۰
	۵۰/۰۰	SF0		
				0.268



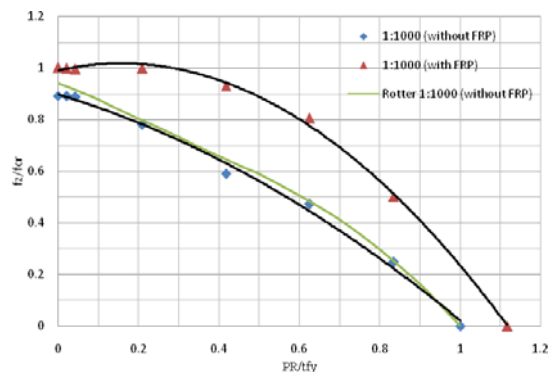
شکل ۶- نمودار مقایسه‌ای جابجایی قائم- نیروی محوری برای نمونه‌های S5 و SF5



شکل ۷- فرم کمانش نمونه اول بدون (راست) و با (چپ) FRP



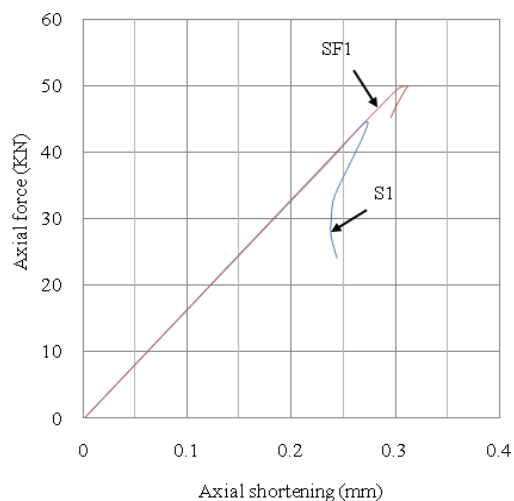
شکل ۸- فرم کمانش نمونه پنجم بدون (راست) و با (چپ) FRP



شکل ۹- اندرکنش فشار داخلی- نیروی محوری مخازن در حالت بدون FRP و مقاومت‌سازی شده با FRP

این موضوع با جزئیات بیشتر در جدول (۵) ارائه شده است. همچنین نمودارهای جابجایی قائم-نیروی محوری در طول تحلیل برای دو نمونه با فشار داخلی ۰/۰۵ و ۰/۲ مگاپاسکال به عنوان نمونه در شکل‌های (۵) و (۶) ارائه شده است. در شکل (۷) و (۸) نیز فرم تغییر شکل کمانش این دو نمونه در حالت با و بدون مقاومت‌سازی با افزایش مقیاس ۵ برابری ارائه شده است. در این شکل‌ها نیز اثرات FRP در ناحیه تکیه‌گاهی کاملاً مشهود می‌باشد.

همچنین نمودار اندرکنش فشار داخلی-نیروی محوری مخازن در حالت بدون FRP و مقاومت‌سازی شده با FRP در شکل (۹) نشان داده شده است. این نمودار به طور کلی قابل استفاده برای مخازن با نسبت ضخامت به شعاع ۱:۱۰۰۰ در حالت بدون و با FRP می‌باشد که در مقایسه با حالت بدون FRP، به وضوح نشانگر تأثیر مثبت حضور FRP در روند مقاومت‌سازی مخازن در برابر کمانش پافیلی می‌باشد. این دو نمودار با نمودار بررسی شده توسط Rotter [۱۱] که تأییدی برای حالت بدون FRP می‌باشد، همراه شده است. در این نمودارها نیروی محوری و تنش محوری منتج از آن با تنش محوری بحرانی الاستیک کلاسیک ( $f_{cr}=0.605Et/R$ ) نرمالیزه شده‌اند.



شکل ۵- نمودار مقایسه‌ای جابجایی قائم- نیروی محوری برای نمونه‌های S1 و SF1

### ۳-۳- اثر ارتفاع FRP در ظرفیت مخازن مقاوم سازی شده

هندسی، مصالح و بارگذاری مطابق شرایط گفته شده در قبل می‌باشند؛ اما موقعیت قرارگیری مصالح کمپوزیتی FRP جهت مقاوم سازی مخازن با حرکت از روی تکیه‌گاه تا ۱۵ میلی‌متر بالای تکیه‌گاه مطابق جدول (۷) تغییر یافته است.

در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) همچنین تغییر شکل کمانشی مخزن با مشخصات ذکر شده در بالا در پنج حالت اشاره شده در جدول (۷) ارائه شده است. نتایج تحلیل نمونه‌ها نشان می‌دهند قرارگیری FRP در ناحیه رخداد پافیلی که موقعیت آن در نزدیکی تکیه‌گاه است، بهترین نتیجه مقاوم سازی را ارائه خواهد داد. جدول (۷) نیز نشانگر افت بسیار زیاد در ظرفیت مخزن در شرایط عدم قرارگیری مناسب مصالح FRP می‌باشد.

برای بررسی اثر ارتفاع FRP در ظرفیت مخازن مقاوم سازی شده، ۲۵ نمونه استوانه‌ای با تغییرات ارتفاع FRP از ده تا پنجاه میلی‌متر با شروع از تکیه‌گاه به همراه تغییرات فشار داخلی از ۰/۰۵ تا ۰/۲ مگاپاسکال مدل سازی شده است. نمونه‌ها به لحاظ هندسی، مصالح و بارگذاری مطابق شرایط گفته شده در قبل می‌باشند. نتایج تحلیل نمونه‌ها در جدول (۶) ارائه شده است.

بررسی نیروی محوری منتهی به کمانش در حضور فشارهای داخلی از ۰/۰۵ تا ۰/۱ مگاپاسکال نشانگر تأثیر بسیار اندک افزایش ارتفاع FRP در ظرفیت کمانش می‌باشد. در این حالت شرایط بهینه و حداقلی ۲۰ میلی‌متری برای ارتفاع FRP که مطابق با ارتفاع موج کمانشی پافیلی است توصیه می‌گردد. اما در حالت فشار داخلی ۰/۲ مگاپاسکال افزایش ارتفاع سبب بهبود مضاعف ظرفیت مخزن شده است. البته در این حالت نیز ارتفاع FRP مطابق با ارتفاع موج کمانشی پافیلی (۲۰ میلی‌متر) تا حد مناسب و قابل انتظاری رفتار مخزن را بهبود می‌بخشد

### ۳-۵- اثر FRP در تغییر شکل شعاعی مخزن استوانه‌ای

برای بررسی اثر FRP در تغییر شکل شعاعی مخزن استوانه‌ای، دو نمونه تحت نیروی محوری در حضور فشار داخلی ۰/۰۱ و ۰/۱ مگاپاسکال (به ترتیب نمونه‌های S2 و S4 و متناظر مقاوم سازی شده آن‌ها SF2 و SF4) و ارتفاع ثابت ۲۰ میلی‌متر برای FRP با موقعیت قرارگیری شروع از تکیه‌گاه مورد بررسی قرار گرفته است.

### ۳-۴- اثر موقعیت FRP در ظرفیت مخازن مقاوم سازی شده

برای بررسی اثر موقعیت قرارگیری FRP در ظرفیت مخازن مقاوم سازی شده، پنج نمونه استوانه‌ای تحت نیروی محوری در حضور فشار داخلی ۰/۱ مگاپاسکال و ارتفاع ثابت ۲۰ میلی‌متر برای FRP مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این نمونه‌ها به لحاظ

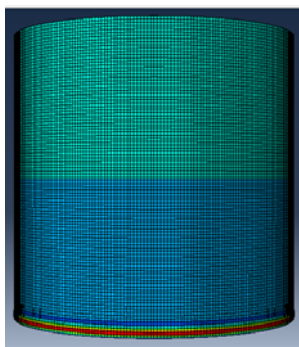
جدول ۶- مقایسه ظرفیت مخازن در حالت بدون و با FRP در شرایط ارتفاعی مختلف

ظرفیت مخزن با FRP به ارتفاع (kN) 5cm	ظرفیت مخزن با FRP به ارتفاع (kN) 4cm	ظرفیت مخزن با FRP به ارتفاع (kN) 3cm	ظرفیت مخزن با FRP به ارتفاع (kN) 2cm	ظرفیت مخزن با FRP به ارتفاع (kN) 1cm	ظرفیت مخزن بدون FRP (kN)	فشار داخلی (MPa)
۴۹/۶۵	۵۰/۰۲	۴۹/۷۲	۴۹/۸۷	۵۰/۰۴	۴۴/۴۷	۰/۰۰۵
۴۹/۸۲	۵۰/۰۵	۵۰/۰۳	۴۹/۷۳	۴۹/۳۰	۴۴/۳۵	۰/۰۱
۴۹/۹۶	۵۰/۰۴	۴۹/۹۲	۴۹/۸۵	۴۹/۰۵	۳۸/۹۲	۰/۰۵
۴۷/۴۴	۴۸/۰۱	۴۴/۶۰	۴۶/۴۹	۴۷/۲۶	۲۹/۴۰	۰/۱۰
۳۰/۰۲	۲۸/۱۳	۲۴/۹۲	۲۵/۰۱	۲۳/۴۱	۱۲/۳۶	۰/۲۰

جدول ۷- مقایسه ظرفیت مخازن در حالت‌های قرارگیری متفاوت برای FRP

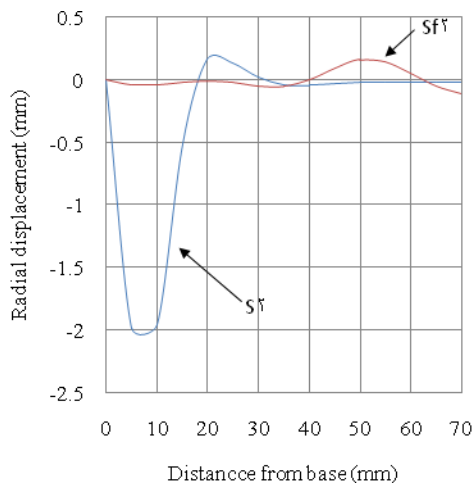
ظرفیت مخزن با FRP با 15mm حرکت به سمت بالای تکیه‌گاه (kN)	ظرفیت مخزن با FRP با 10mm حرکت به سمت بالای تکیه‌گاه (kN)	ظرفیت مخزن با FRP با 5mm حرکت به سمت بالای تکیه‌گاه (kN)	ظرفیت مخزن با FRP بدون حرکت به سمت بالای تکیه‌گاه (kN)	ظرفیت مخزن بدون FRP (kN)	فشار داخلی (MPa)
۲۶/۹۸	۳۶/۷۷	۴۵/۵۶	۵۰/۰۴	۲۹/۴۰	۰/۱۰



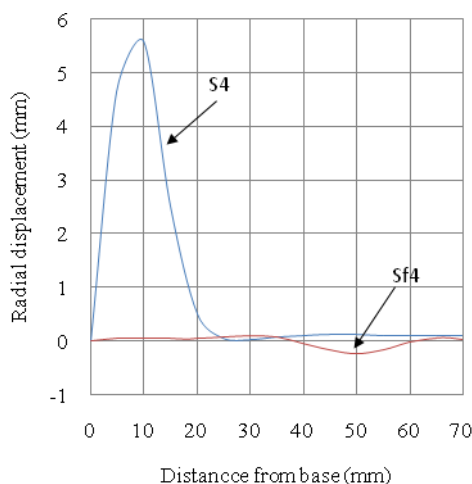


(ج)

شکل ۱۱- فرم تغییر شکل کمانش نمونه تحت نیروی محوری در حضور فشار داخلی ۰/۱ مگاپاسکال با الف) حرکت ۵ میلی متری FRP: به سمت بالا، ب) حرکت ۱۰ میلی متری FRP به سمت بالا و ج) حرکت ۱۵ میلی متری FRP به سمت بالا

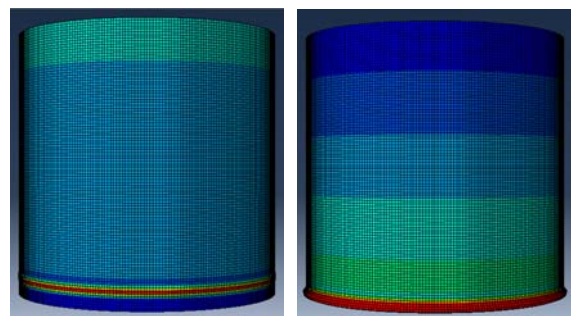


شکل ۱۲- تغییر شکل شعاعی نمونه های S2 و SF2 در ارتفاع



شکل ۱۳- تغییر شکل شعاعی نمونه های S4 و SF4 در ارتفاع

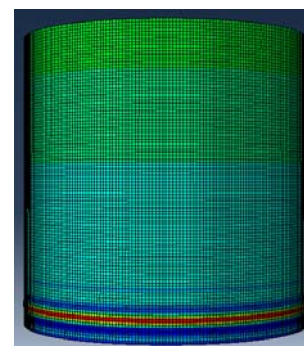
نمودار شکل های (۱۲) و (۱۳) تغییر شکل شعاعی دو نمونه را در ارتفاع و برای حالت بدون و با FRP که نشان دهنده تأثیر بسیار بالای این مصالح در کاهش تغییر شکل شعاعی می باشد ارائه نموده است. با توجه به این نمودارها تغییر شکل شعاعی در ناحیه حداکثر کاملاً حذف و با شدت بسیار پایین تر در ناحیه بالای FRP رخ داده است. بررسی نمونه های مشابه نیز تأیید کننده این نتیجه گیری می باشد.



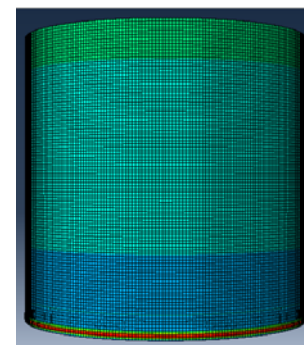
(ب)

(الف)

شکل ۱۰- فرم تغییر شکل کمانش نمونه تحت نیروی محوری در حضور فشار داخلی ۰/۱ مگاپاسکال: الف) بدون FRP، ب) بدون حرکت FRP



(الف)



(ب)

## ۳-۶- تنش در چسب و FRP

با توجه به امکانات موجود در نرم افزار و مدل سازی آسیب و امکان رشد آن، نتایج تحلیل کلیه نمونه های موجود نشانگر عدم آسیب دیدگی و ترک در FRP و چسب حتی در فشارهای بالا می باشد. البته در شرایط عملی باید هم پوشانی ناحیه ابتدایی و انتهایی FRP در دورپیچ نمودن مطابق آیین نامه های مرتبط مد نظر قرار گیرد.

## ۴- نتیجه گیری

با توجه به تحقیق جامع صورت گرفته که به صورت مختصر در این مقاله ارائه شده است؛ روش جدید مقاوم سازی پوسته های استوانه ای در مقابل کمانش پافیلی با استفاده از مصالح کمپوزیتی FRP روشی بسیار مفید تشخیص داده شده است که به طور کلی می توان به نتایج زیر اشاره نمود:

(الف) بررسی ظرفیت نهایی مخازن در فشارهای داخلی متفاوت نشان می دهد که افزایش فشار داخلی، منجر به کاهش ظرفیت مخازن به لحاظ نیروی محوری می شود.

(ب) نتایج نشان می دهند که در نسبت های ضخامت به شعاع بالاتر در مخازن، ترکیب فشار داخلی و نیروی محوری منجر به مقاومت کمانشی کمتری می شود. به عبارت دیگر در این مخازن، کمانش در ترکیب نیروهای پایین تر رخ می دهد.

(ج) بررسی نتایج نیروی محوری منجر به کمانش در حضور فشار داخلی نشان می دهد که رخداد کمانش پافیلی در مخازنی با نسبت ارتفاع به قطر  $0.7$  تا  $1.2$  بیشتر محتمل می باشد.

(د) بررسی ظرفیت نهایی مخازن مقاوم سازی شده در فشارهای داخلی متفاوت نشانگر تأثیر مثبت FRP در مقاومت کمانشی مخازن می باشد. افزایش مقاومت کمانشی در فشار داخلی پایین، کم و در فشارهای داخلی بالاتر، با تأثیر بسیار بالایی همراه می باشد.

(ه) بررسی تأثیر افزایش ارتفاع FRP در ظرفیت کمانشی نمونه ها در فشارهای داخلی متفاوت، نشانگر شرایط بهینه و حداقلی ۲۰ میلی متری برای ارتفاع FRP در کلیه موارد می باشد. به عبارت دیگر استفاده از FRP با ارتفاعی مطابق با ارتفاع موج کمانشی پافیلی در فرایند مقاوم سازی توصیه می گردد.

(و) نتایج تحلیل نمونه ها در مقاله نشان می دهند قرارگیری FRP در ناحیه رخداد پافیلی که موقعیت آن در نزدیکی تکیه گاه است بهترین نتیجه مقاوم سازی را ارائه خواهد داد. به عبارت

دیگر عدم قرارگیری مناسب مصالح FRP تأثیر مناسبی در رفتار کمانشی مخزن نخواهد داشت.

(ز) نتایج تحلیل کلیه نمونه های موجود نشانگر عدم آسیب دیدگی و ترک در FRP و چسب حتی در فشارهای داخلی بالا می باشد.

(ح) در کلیه نمونه ها تغییر شکل شعاعی در ناحیه حداکثر (رخداده در ناحیه کمانش پافیلی) به وسیله مقاوم سازی با FRP کاملاً حذف شده است.

## ۵- مراجع

- [1] Chen, J. F., Rotter, J. M., Teng, J. G., "A Simple Remedy for Elephant's Foot Buckling in Cylindrical Silos and Tanks", *Advances in Structural Engineering*, 2006, 9 (3), 409-420.
- [۲] شوکتی، ح.، طلوعی اردلانی، ق.، نیک آذر، م. اسماعیلی تیمورلویی، ه.، "رفتار خمشی تیر ورق های فولادی تقویت شده با لمینیت CFRP در بال کششی"، نهمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۹۱.
- [۳] شوکتی، ح.، اسماعیلی، ه.، "مطالعه پارامتری ظرفیت تیر ورق پل های فولادی با ناکاملی، تقویت شده با CFRP در بال و جان"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه ارومیه، ۱۳۹۰.
- [۴] شوکتی، ح.، نیک آذر، م.، "بررسی آزمایشگاهی تقویت جان تیروورق های پل های فولادی با CFRP در برابر کمانش قطری"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه ارومیه، ۱۳۹۰.
- [5] Teng, J. G., Hu, Y. M., "Suppression of Local Buckling in Steel Tubes by FRP Jacketing", *The 2<sup>nd</sup> International Conference on FRP Composites in Civil Engineering*, Adelaide, Australia, 2004.
- [6] Teng, J., Hu, Y. M., "Behaviour of FRP-Jacketed Circular Steel Tubes and Cylindrical Shells under Axial Compression", *Construction and Building Materials*, 2007, 21, 827-838.
- [7] Batikha, M., Chen, J. F., Rotter, M., "Fibre Reinforced Polymer Composites to Increase the Buckling Strength of Imperfect Cylindrical Shells", *International Conference on Structures and Granular Solids-From Scientific Principles to Engineering Applications*, Edinburgh, England, 1-2 July, 2008, 177-181.

- 
- [8] Batikha, M., Chen, J., Rotter, J., Teng, J., "Strengthening Metallic Cylindrical Shells against Elephant's Foot Buckling with FRP", *Thin-Walled Structures*, 2009, 47, 1078-1091.
- [9] Al-Kashif, M. A., Ramadan, H., Rashed, A., Haroun, M. A., "Effect of FRP Composites on Buckling Capacity of Anchored Steel Tanks", *Steel and Composite Structures*, 2010, 10 (4), 361-371.
- [10] ABAQUS, Version 6.10.1. ABAQUS/Standard User's Manual, ABAQUS Inc., US, 2010.
- [11] Rotter, J. M., "Elephant's Foot Buckling in Pressurized Cylindrical Shells", *Stahlbau*, 2006, 75 (9), 742-747.