

تأثیر شرایط مرزی در کمانش مخازن استوانه‌یی فولادی با ضخامت متغیر تحت نشست موضعی

سینا ناصرنیا (دانشجوی دکتری)

حسین شوکتی* (استاد)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه ارومیه

مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۴۰۰)
دوره‌ی ۲ - ۳۷، شماره‌ی ۲/۳، ص. ۸۳-۷۳، (پژوهشی)

استفاده از سازه‌های جدار نازک به دلیل وزن کم و مقاومت بالای آنها، مقبولیت بالایی دارد. به منظور کاهش وزن و قیمت، مخازن با ضخامت متغیر در ارتفاع خود ساخته می‌شوند. نشست فونداسیون در زیر دیواره‌های مخزن به سبب ویژگی خاک رخ می‌دهد، که به ۳ مؤلفه‌ی نشست: یکنواخت، تیلت و موضعی تقسیم می‌شود. در این بین، نشست موضعی بیشترین تأثیر را در پوسته‌ی مخزن دارد، که سبب جابه‌جایی‌های شعاعی بزرگ، کمانش پوسته، و حتی گسیختگی مخزن می‌شود. در پژوهش حاضر، ۱۷ عدد مخزن استوانه‌یی فولادی به روش عددی در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شدند و تحت نشست موضعی قرار گرفتند و مقادیر نشست، بار معادل کمانشی و تغییر شکل شعاعی آنها مقایسه شد. نتایج آنالیز غیرخطی حاکی از رفتار مناسب و مقبول مخازن با ضخامت متغیر در قیاس با نمونه‌های با ضخامت ثابت بوده و همچنین حلقه‌ی سخت‌کننده، آثار مثبتی در رفتار کمانشی مخازن مذکور داشته است.

واژگان کلیدی: ضخامت متغیر، مخازن استوانه‌یی، نرم‌افزار اجزاء محدود، نشست موضعی، حلقه‌ی سخت‌کننده.

۱. مقدمه و تاریخچه‌ی پژوهش

مخازن استوانه‌یی فولادی به عنوان پوسته‌هایی تعریف می‌شوند که ضخامت بسیار اندک در مقایسه با دو بُعد دیگر دارند و از این رو در زمره‌ی سازه‌های جدار نازک و با ویژگی‌های مخصوص قرار می‌گیرند. معمولاً ساخت مخازن به صورت ضخامت متغیر در ارتفاع صورت می‌پذیرد. دلیل این امر رعایت موارد اقتصادی و همچنین کاهش وزن مؤثر سازه است. کاهش وزن سازه، پارامتر مثبتی در طراحی محسوب و سبب کاهش هزینه‌ی ساخت می‌شود. یکی از پدیده‌های بسیار مهم، که در مخازن فولادی رخ می‌دهد، نشست است. نشست موضعی زیر دیواره‌ی مخازن به سبب ویژگی‌های خاص خاک زیر آن رخ می‌دهد. این پدیده می‌تواند در تغییر شکل‌ها و نحوه‌ی کمانش پوسته‌ی مخزن فولادی تأثیر عمده‌یی بگذارد. شکل هندسی مخزن استوانه‌یی، نسبت‌های هندسی و شرایط مرزی مختلف در آن، رفتار کلی سازه را تحت الشعاع قرار می‌دهد. در پژوهش حاضر، تأثیر تغییرات ابعادی و شرایط مرزی در رفتار کمانشی مخازن استوانه‌یی فولادی با ضخامت ثابت و متغیر تحت اثر نشست موضعی بررسی شده است. در شکل ۱، نمونه‌یی از مخزن استوانه‌یی فولادی، که روی زمین و پی بتنی قرار گرفته است، مشاهده می‌شود.

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳/۱۰/۱۳۹۹، اصلاحیه ۱۴/۰۱/۱۴۰۰، پذیرش ۲۴/۰۲/۱۴۰۰.

DOI:10.24200/J30.2021.57229.2895

۲. پیشینه‌ی پژوهش

به سبب اهمیت بالا و نقش حیاتی مخازن ذخیره، تاکنون پژوهش‌های مختلفی در موضوع مخازن استوانه‌یی جدار نازک فولادی صورت پذیرفته است. استفاده از روابط تئوریک جهت تحلیل پوسته‌های استوانه‌یی، یکی از ابتدایی‌ترین و مهم‌ترین اقدام‌ها در این راستاست. در خصوص مباحث تئوریک در فرمول‌بندی و تحلیل سازه‌های پوسته‌یی جدار نازک ذکر شده، یکی از نخستین معادلات غیرخطی تعادل برای پوسته‌های استوانه‌یی با ضخامت‌های ثابت به صورت مجموعه روابط ۱،^[۱] ارائه شده است، که در حال حاضر نیز به سبب جواب‌هایی با دقت مناسب استفاده می‌شوند.

$$N_x = \int_{-h/2}^{h/2} \bar{\sigma}_x (\lambda + z/a) dz \quad N_\theta = \int_{-h/2}^{h/2} \bar{\sigma}_\theta dz$$

$$N_{x\theta} = \int_{-h/2}^{h/2} \bar{\tau}_{x\theta} (\lambda + z/a) dz \quad N_{\theta x} = \int_{-h/2}^{h/2} \bar{\tau}_{\theta x} dz$$

$$Q_\theta = \int_{-h/2}^{h/2} \bar{\tau}_{\theta z} dz \quad Q_x = \int_{-h/2}^{h/2} \bar{\tau}_{xz} (\lambda + z/a) dz$$

و کاو^۵ (۲۰۱۰)، مقاومت کماتشی مخازن استوانه‌یی فولادی را تحت نشست‌های هارمونیک بررسی کردند و اظهار داشتند که مسیر تعادل برای مخازن تحت نشست هارمونیک، رفتار کاملاً غیرخطی دارد و از اصل جمع آثار قوا در خصوص آن نمی‌توان بهره برد.

در مطالعه‌ی دیگری، ژائو و همکارانش (۲۰۱۱)^[۱۰]، آنالیز پایداری مخازن فولادی با سقف متحرک را تحت نشست‌های موضعی بررسی کردند و در سال ۲۰۱۳^[۱۱] نیز در بررسی کماتش مخازن فولادی تحت نشست موضعی دریافتند که مؤلفه‌های نشست در مخازن فولادی به دو دسته مؤلفه‌ی نشست کلی و موضعی تقسیم می‌شوند.

گانگ^۶ و همکاران (۲۰۱۳)^[۱۲] آثار حلقه‌ی سخت‌کننده را در مخازن بدون سقف تحت نشست‌های هارمونیک بررسی کردند. ژائو و همکارانش (۲۰۱۳)^[۱۱] نیز رفتار کماتشی در مخازن فولادی را تحت نشست‌های موضعی بررسی کردند و توصیه‌هایی را جهت طراحی هر چه بهتر مخازن مذکور ارائه دادند. چن و همکارانش (۲۰۱۵)^[۱۳] نیز روش برآزش منحنی^۷ را جهت اندازه‌گیری نشست مخازن ذخیره بررسی کردند.

به منظور استفاده‌ی بهینه از مصالح و پایان آوردن وزن و قیمت تمام شده‌ی سازه، مخازن فولادی استوانه‌یی می‌توانند با ضخامت متغیر در ارتفاع خود ساخته شوند. مطالعات انجام پذیرفته در این خصوص محدود است و نیاز به مطالعات بیشتری در این بخش احساس می‌شود.

لذا در سال ۲۰۱۶^[۱۴]، محمد خلیل و شامل^۸، آثار ضخامت‌های مختلف دیواره‌ی مخازن رو باز را در رفتارشان تحت نشست‌های هارمونیک بحرانی تعیین کردند و آنها را تحت موج‌های نشست متعددی با دامنه‌های نشست یکسان قرار دادند و مود کماتش و نتایج نشست قائم بحرانی مخازن مذکور را مقایسه کردند. فن^۹ و همکاران (۲۰۱۶)^[۱۵] در بررسی کماتش مخازن فولادی تحت نشست اندازه‌گیری شده بر اساس مدل پیش‌بینی منحنی بواسون به این نتیجه رسیدند که تحلیل کماتشی در مخازن با سقف متحرک با همان اندازه و مصالح تحت نشست یکسان سبب رفتار کماتشی در مخزن نمی‌شود. اما در مقایسه با کماتش مخزن با سقف ثابت، جابه‌جایی شعاعی بالای دیواره‌ی مخزن، عامل کنترل‌کننده در تخمین رفتار و وضعیت حد نهایی مخزن با سقف متحرک خواهد بود.

تاراسنکو^{۱۰} و همکاران (۲۰۱۶)^[۱۶] تغییرشکل‌های مفاصل را در سازه‌های فولادی مخازن و سیستم گاز در هنگام وقوع نشست فونداسیون بررسی کردند. گانگ و همکاران (۲۰۱۷)^[۱۷] نیز در بررسی مقاومت کماتشی مخازن استوانه‌یی فولادی تحت نشست‌های هارمونیک بیان کردند که مؤلفه‌های هارمونیک با تعداد موج‌های بالا می‌توانند سبب تغییر موج‌های کماتشی در مخازن تحت نشست‌های جزئی شوند. گرجت^{۱۱} و همکاران (۲۰۱۸)^[۱۸] نتایج آزمایش نشست مخازن با مصالح شکر ملاس را تجزیه و تحلیل کردند و نشان دادند که مقادیر نشست به دست آمده از تحلیل عددی بیشتر از مقادیر نشست‌های واقعی است. بیشترین اختلاف در مقادیر در چرخه‌ی تخلیه‌های اول و دوم پُر کردن مخزن ذخیره به دست آمد. وانگ^{۱۲} و همکاران (۲۰۱۹)^[۱۹] ارتعاش آکوستیک در خصوص پوسته‌های استوانه‌یی غوطه‌ور را با ضخامت متغیر بررسی کردند.

ایگناتویکوز و هواتالا^{۱۳} (۲۰۲۰)^[۲۰] گسیختگی مخازن استوانه‌یی فولادی را تحت نشست‌های فونداسیون بررسی کردند و روش مشابهی برای تعیین اثر وضعیت تغییرشکل لایه‌ی زیرین در قسمت پایین مخازن فولادی استوانه‌یی در حالت تنش در محدوده‌ی کشسان در صفحات پایین و پوسته ارائه دادند. گوزی و بوهر^{۱۴} (۲۰۲۰)^[۲۱] تناسب ابعادی را جهت مخازن ذخیره‌سازی از نوع



شکل ۱. مخزن استوانه‌یی فولادی قرار گرفته روی پی بتنی.

$$M_x = a \int_{-h/2}^{h/2} \bar{\sigma}_x (1 + z/a) z dz$$

$$M_\theta = a \int_{-h/2}^{h/2} \bar{\sigma}_\theta z dz$$

$$M_{x\theta} = a \int_{-h/2}^{h/2} \bar{\tau}_{x\theta} (1 + z/a) z dz$$

$$M_{\theta x} = a \int_{-h/2}^{h/2} \bar{\tau}_{\theta x} z dz \quad (1)$$

که در آنها، a شعاع متوسط پوسته و پارامترهای N نیروهای برشی و قائم در صفحه، پارامترهای Q ، نیروهای برشی عرضی و پارامترهای M گشتاورهای خمشی و پیچشی هستند. پارامترهای σ و τ هم معرف مؤلفه‌های تنش در هر نقطه از ضخامت پوسته هستند.

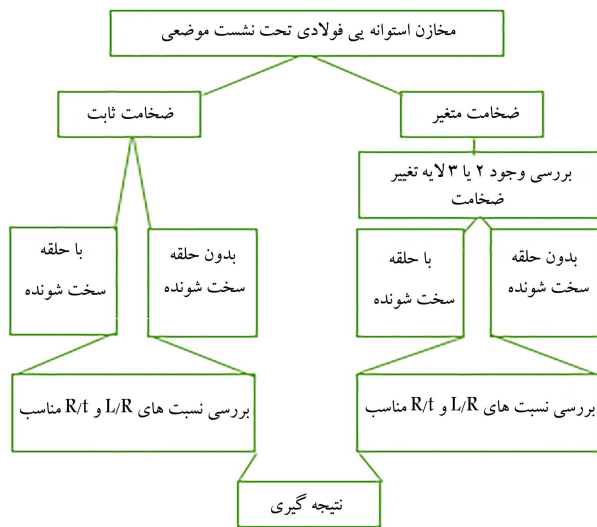
تیموتی^۱ و همکاران (۱۹۸۹)^[۲] در بررسی مخازن فولادی تحت نشست در زیر دیواره‌ی خود دریافتند که وجود دیواره‌های مخزن باعث می‌شود که نواحی بالایی مخازن با سقف متحرک به سمت داخل و خارج حرکت کنند، اما فشارهای قابل توجهی در دیوارها ایجاد نکنند. اعوجاج ناشی از نشست دیواره‌ها می‌تواند باعث ایجاد مشکل در پشت سقف متحرک مخازن و کماتش آنها شود.

پس از آن کامیاب و پالم در سال‌های ۱۹۸۹ الی ۱۹۹۴^[۳-۶] نشست‌های هارمونیک و مفاصل اصلی مقاوم در برابر باد را بررسی و نتایج به دست آمده را با استفاده از معادلات تغییرشکل اصلاح شده‌ی دانل^۲، که شامل طیف گسترده‌یی از تعداد موج‌ها بوده است، استفاده کردند. انصاریان و جنیدی (۱۹۹۹)^[۷] در مطالعه‌ی کماتش خطی در پوسته‌های استوانه‌یی تحت اثر نشست عمودی لبه‌ها، پوسته‌های یکنواخت را بررسی کردند و دریافتند که برای تعداد موج‌های کم، موج کماتشی برشی به وجود می‌آید و مود مذکور توسط کماتش محوری کنترل می‌شود، که با افزایش تعداد موج‌ها رابطه دارد.

روتر و هولست^۳ (۲۰۰۵)^[۸] نیز رفتار کماتشی پوسته‌های استوانه‌یی را تحت بار محوری فشاری در حالت نشست موضعی، که در حالت بالازدگی موضعی در حالت پیوسته با تغییرات سینوسی برای پوسته‌ها در نظر گرفته شده بود، بررسی کردند. ژائو^۴ و همکارانش (۲۰۱۰)^[۹] مطالعات گسترده‌یی را در مورد کماتش پوسته‌های استوانه‌یی تحت نشست با استفاده از روش اجزاء محدود انجام دادند. همچنین ژائو

جدول ۱. مشخصات کلی مربوط به نمونه‌های مخازن مدل‌سازی شده.

نام نمونه	مشخصات نمونه	نسبت L/R	نسبت معادل R/t	حلقه‌ی تقویتی
C1	نمونه‌ی مخزن فولادی استوانه‌یی به ارتفاع ۲۴ میلی‌متر با ضخامت ثابت ۳/۰ میلی‌متر	۰/۴۸	۱۶۶۷	دارد
C2	نمونه‌ی مخزن فولادی استوانه‌یی به ارتفاع ۲۴ میلی‌متر با ضخامت ثابت ۶/۰ میلی‌متر	۰/۴۸	۸۳۳	ندارد
C3	نمونه‌ی مخزن فولادی استوانه‌یی به ارتفاع ۲۴ میلی‌متر با ضخامت ثابت ۶/۰ میلی‌متر	۰/۴۸	۸۳۳	دارد
C4	نمونه‌ی مخزن فولادی استوانه‌یی به ارتفاع ۲۴ میلی‌متر با ضخامت ثابت ۸/۰ میلی‌متر	۰/۴۸	۶۲۵	دارد
C5	نمونه‌ی مخزن فولادی استوانه‌یی به ارتفاع ۴۸ میلی‌متر با ضخامت ثابت ۶/۰ میلی‌متر	۰/۹۶	۸۳۳	دارد
V1	نمونه‌ی مخزن فولادی استوانه‌یی به ارتفاع ۲۴ میلی‌متر با ۲ دولا یه ضخامت متغیر ۳/۰ و ۵/۰ میلی‌متر	۰/۴۸	۱۰۰۰~۱۶۶۷	ندارد
V2	نمونه‌ی مخزن فولادی استوانه‌یی به ارتفاع ۲۴ میلی‌متر با ۲ دولا یه ضخامت متغیر ۳/۰ و ۵/۰ میلی‌متر	۰/۴۸	۱۰۰۰~۱۶۶۷	دارد
V3	نمونه‌ی مخزن فولادی استوانه‌یی به ارتفاع ۲۴ میلی‌متر با ۲ دولا یه ضخامت متغیر ۵/۰ و ۶/۰ میلی‌متر	۰/۴۸	۸۳۳~۱۰۰۰	ندارد
V4	نمونه‌ی مخزن فولادی استوانه‌یی به ارتفاع ۲۴ میلی‌متر با ۲ دولا یه ضخامت متغیر ۵/۰ و ۶/۰ میلی‌متر	۰/۴۸	۸۳۳~۱۰۰۰	دارد
V5	نمونه‌ی مخزن فولادی استوانه‌یی به ارتفاع ۲۴ میلی‌متر با ۲ دولا یه ضخامت متغیر ۳/۰ و ۸/۰ میلی‌متر	۰/۴۸	۱۰۰۰~۱۶۶۷	ندارد
V6	نمونه‌ی مخزن فولادی استوانه‌یی به ارتفاع ۲۴ میلی‌متر با ۲ دولا یه ضخامت متغیر ۳/۰ و ۸/۰ میلی‌متر	۰/۴۸	۱۰۰۰~۱۶۶۷	دارد
V7	نمونه‌ی مخزن فولادی استوانه‌یی به ارتفاع ۴۸ میلی‌متر با ۲ دولا یه ضخامت متغیر ۳/۰ و ۵/۰ میلی‌متر	۰/۹۶	۱۰۰۰~۱۶۶۷	دارد
V8	نمونه‌ی مخزن فولادی استوانه‌یی به ارتفاع ۴۸ میلی‌متر با ۲ دولا یه ضخامت متغیر ۵/۰ و ۶/۰ میلی‌متر	۰/۹۶	۸۳۳~۱۰۰۰	دارد
V9	نمونه‌ی مخزن فولادی استوانه‌یی به ارتفاع ۲۴ میلی‌متر با ۳ دولا یه ضخامت متغیر ۳/۰، ۵/۰ و ۶/۰ میلی‌متر	۰/۴۸	۸۳۳~۱۶۶۷	ندارد
V10	نمونه‌ی مخزن فولادی استوانه‌یی به ارتفاع ۲۴ میلی‌متر با ۳ دولا یه ضخامت متغیر ۳/۰، ۵/۰ و ۶/۰ میلی‌متر	۰/۴۸	۸۳۳~۱۶۶۷	دارد
V11	نمونه‌ی مخزن فولادی استوانه‌یی به ارتفاع ۲۴ میلی‌متر با ۳ دولا یه ضخامت متغیر ۳/۰، ۵/۰ و ۸/۰ میلی‌متر	۰/۴۸	۱۰۰۰~۱۶۶۷	ندارد
V12	نمونه‌ی مخزن فولادی استوانه‌یی به ارتفاع ۲۴ میلی‌متر با ۳ دولا یه ضخامت متغیر ۳/۰، ۵/۰ و ۸/۰ میلی‌متر	۰/۴۸	۱۰۰۰~۱۶۶۷	دارد



شکل ۲. فلوجارت روند بررسی نمونه‌ها.

۳. پارامترهای مورد بررسی

در پژوهش حاضر، ۱۷ مخزن استوانه‌یی فولادی به روش عددی مدل‌سازی شدند و تحت نشست موضعی در لبه‌ی پایینی خود قرار گرفتند. در جدول ۱، مشخصات کلی مربوط به نمونه‌های مدل‌سازی شده ارائه شده است. قطر نمونه‌ها به سبب قابلیت مقایسه با نمونه‌ی آزمایشگاهی برابر ۱۰۰۰ میلی‌متر و حلقه‌ی تقویت‌کننده از نوع نبشی ۳ × ۳ × ۳۰ میلی‌متر منظور شده است. نمونه‌های با ضخامت

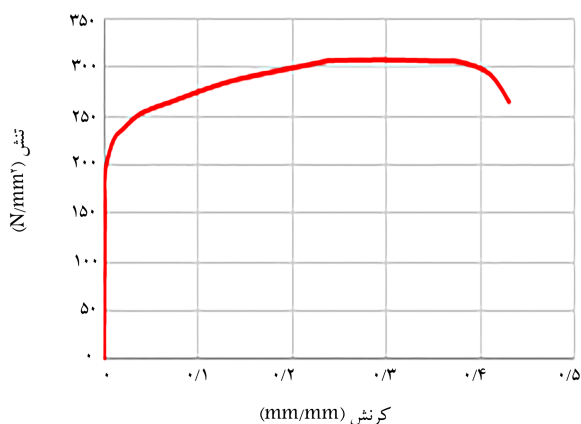
سقف باز، که تحت نشست‌های جزئی قرار می‌گیرند، را به دست آوردند و روشی را برای ارزیابی میزان نشست جزئی مجاز برای مخازن ذخیره‌سازی با سقف باز، عمودی و بالای سطح زمین با استفاده از نشست‌های هارمونیک مرتبه‌ی بالاتر از مشخصات واقعی نشست ارائه دادند.

دلیل مهمی که سبب ساخت مخازن با ضخامت متغیر می‌شود، این است که مخازن فولادی معمولاً دارای ابعاد بسیار بزرگ هستند و از این جهت بسیار اقتصادی و مقرون به صرفه خواهند بود تا ضخامت آن در نواحی که تنش کمتری تحمل می‌شود، کاهش یابد. لذا بیشتر مخازن در دنیای واقعی به این صورت ساخته و بهره‌برداری می‌شوند.

با توجه به مطالعات پیشین انجام پذیرفته در این خصوص، در زمینه‌های نشست مخازن و همچنین مخازن با ضخامت‌های متغیر و موارد دیگر، تاکنون بررسی جامعی که به صورت هم‌زمان شرایط تغییر ضخامت در ارتفاع و بحث نشست موضعی و همچنین شرایط مرزی مختلف و ارتفاع مخازن را به صورت هم‌زمان مورد مطالعه قرار دهد، یافت نشده است. همچنین توصیه‌های آیین‌نامه‌های مرتبط از جمله API 650 در این خصوص محدود بوده و فقط به ارائه‌ی چند رابطه در خصوص تعیین نشست مجاز مخازن فولادی اشاره شده است. با توجه به موارد ذکر شده و خلأ موجود در مطالعات پیشین، در نهایت هدف بر آن شد که در بررسی حاضر، مخازن استوانه‌یی فولادی با ضخامت متغیر با در نظر گرفتن پارامترهای تغییر تعداد و ضخامت لایه‌های پوسته، وجود یا عدم وجود حلقه‌ی سخت‌کننده‌ی عرضی در بالای پوسته و همچنین بررسی اثر نسبت ارتفاع به شعاع (نسبت L/R برای دو ارتفاع مشخص) تحت نشست موضعی قرار گرفته و رفتار آنها با مخازن با ضخامت ثابت مقایسه شود. از این رو انتظار می‌رود تا پژوهش مد نظر راهگشای ابهامات در این راستا باشد. در شکل ۲، شمایی کلی از روند بررسی انجام شده مشاهده می‌شود.



شکل ۳. نمونه‌ی نصب شده بر روی سیستم اعمال نشست.



شکل ۴. منحنی تنش - کرنش به دست آمده از آزمون کششی ورق فولادی.

لازم به ذکر است که شیار دستگاه ساخته شده جهت اعمال نشست، علی‌رغم دقت بالای ساخت، هنگام بارگذاری در تماس کامل و ۱۰۰٪ با لبه‌ی پایینی نمونه قرار نمی‌گیرد و به تدریج با اعمال نیرو، تماس کامل حادث می‌شود. از این رو و با توجه به میلی‌متری بودن مقادیر اعمال نشست، پس از اندکی نیرو، لبه‌ی مذکور تماس کامل پیدا می‌کند و مقادیر به آنچه در نتایج عددی به آن اشاره شد، می‌رسد؛ که این مورد جزء خطاهای آزمایشگاهی قابل قبول در نظر گرفته می‌شود. با وجود این، در شکل ۵ تطابق خوبی میان نتایج عددی و آزمایشگاهی برای نمونه‌ی شماره‌ی ۳ مشاهده می‌شود. دلیل پایین بودن بار معادل آزمایشگاهی در ابتدای مسیر این است که کلیه‌ی لبه‌های نمونه، بر قسمت داخلی شیار دستگاه تماس نداشته و پس از اعمال نشست به میزان حدود ۵/۰ میلی‌متر تماس کامل صورت گرفته است. باقی موارد را می‌توان مناسب و مطلوب ارزیابی کرد و باقی تفاوت‌ها ناشی از شرایط آزمایشگاهی است.

۲.۴. نحوه‌ی مدل‌سازی

جهت مدل‌سازی نمونه‌های عددی، ابتدا هندسه‌ی تک‌تک المان‌های استفاده شده به همراه ابعاد مرتبط با المان پوسته ایجاد شده است، که شامل پوسته‌های استوانه‌یی به همراه حلقه‌های تقویت‌کننده است. سپس در قسمت مشخصات، خصوصیات مصالح مشخص شده و چگالی و خواص کشسان، شامل: مدول کشسانی و ضریب پواسون مطابق جدول ۲ به مصالح تعلق گرفته است. خواص خمیری، شامل: تنش

ثابت با نماد C و نمونه‌های با ضخامت متغیر با نماد V نام‌گذاری شده‌اند. در جدول ۱، مشخصات کلی نمونه‌های مذکور ارائه شده است، که در آن پارامترهای: L معرف ارتفاع پوسته، R معرف شعاع پوسته و t معرف ضخامت پوسته هستند. در خصوص نمونه‌های انتخاب شده جهت مدل‌سازی اجزاء محدود می‌توان این موارد را بیان کرد:

(۱) در مورد بحث تغییر ضخامت در ارتفاع مخزن، سه حالت کلی در نظر گرفته شده است، که شامل نمونه‌های: با ضخامت ثابت، با دو لایه‌ی تغییر ضخامت، و با سه لایه‌ی تغییر ضخامت هستند.

(۲) ضخامت‌های نمونه‌های مذکور باید در محدوده‌ی قرارگیری قرار سازه در زمهره جدار نازک قرار گیرد و اتصال کامل و سرتاسری لایه‌های با ضخامت مختلف به نحوی مدل‌سازی شده‌اند تا از رخداد پدیده‌ی تمرکز تنش جلوگیری به عمل آید. بنابراین نسبت‌های R/t از 50° الی 1667° متغیر بوده است.

(۳) در انتخاب نمونه‌ها سعی شده است که تأثیر ارتفاع کلی مخزن در نظر گرفته شود. بدین سبب دو ارتفاع 24° و 48° میلی‌متری برای ارتفاع کلی مخزن بررسی شده است.

(۴) در انتخاب نمونه‌ها با توجه به قطر مخازن، که همگی برابر 1000° میلی‌متر بودند، سعی شد تا از نسبت‌های مختلفی در ضخامت لایه‌ها استفاده شود.

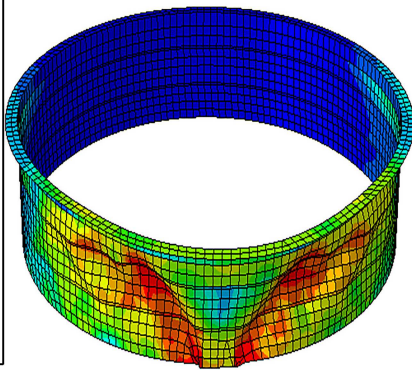
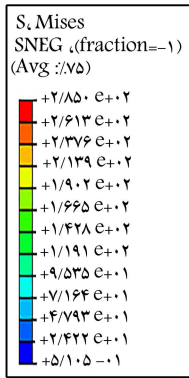
(۵) در نمونه‌های مدل‌سازی شده، وجود و عدم وجود حلقه‌ی تقویتی و تأثیر آن در عملکرد و محدود ساختن تغییرشکل‌های شعاعی در مخازن و ارتفاع‌های متفاوت بررسی شده است. لازم به ذکر است که در نمونه‌های با حلقه‌ی تقویتی، حلقه‌ی مذکور فقط در لبه‌ی بالایی پوسته و فقط به تعداد یک عدد استفاده و به صورتی جوش داده شده است که لبه‌ی عمود بر سطح پوسته در بالاترین ارتفاع پوسته قرار گیرد.

(۶) در نهایت لازم به ذکر است که با در نظر گرفتن ۴ پارامتر کلی به این شرح در مجموع ۱۷ نمونه مخزن فولادی جهت مدل‌سازی به روش عددی انتخاب شدند، که شامل: تغییر در ارتفاع کلی مخزن، تعداد لایه‌های تغییر ضخامت، نسبت‌های ضخامت لایه‌ها و بررسی تأثیر حلقه‌ی سخت‌کننده بوده است.

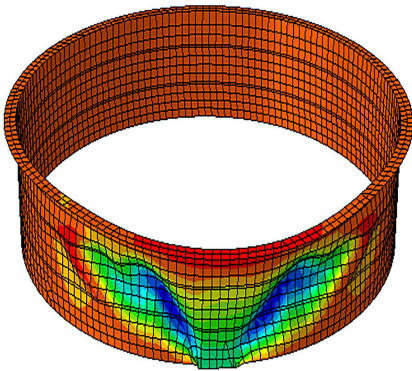
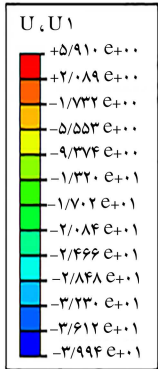
۴. مدل‌سازی عددی

۴.۱. صحت‌سنجی

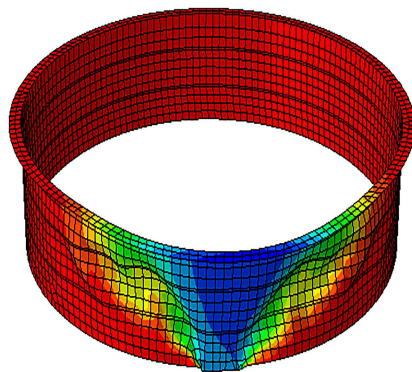
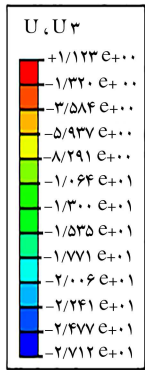
در نوشتار حاضر، به منظور صحت‌سنجی در نتایج نمونه‌های مدل‌سازی شده، نتایج به دست آمده از یک نمونه‌ی آن با یک نمونه‌ی ساخته شده و آزمون شده در سیستم آزمونی که توسط ناصری و شوکتی (۲۰۲۱)،^[۲۱] ساخته شده بود، مقایسه شده است. در شکل ۳، نمونه و سیستم اعمال نشست مشاهده می‌شود. جهت بررسی بهتر در نوشتار حاضر، از مفهوم بار معادل استفاده شده است. لازم به ذکر است که منظور از بار معادل یک بار مجازی است که در واقع مقدار نیرویی است که برای ایجاد تغییرشکل معادل نشست لازم است. از آنجایی که در بررسی حاضر، مقادیر نشست به تدریج افزایش می‌یابد، در واقع می‌توان بار معادل را برابر مقدار نیرویی تعریف کرد که برای ایجاد تغییرشکل عمودی معادل نشست لازم است. پس از آزمایش کشش نمونه‌ی ورق استفاده شده در نمونه‌ی آزمایشگاهی، که نمودار تنش - کرنش آن در شکل ۴ مشاهده می‌شود، مقایسه‌ی منحنی بار معادل - نشست نمونه‌های آزمایشگاهی و عددی شماره‌ی ۳ صورت گرفته است (شکل ۵).



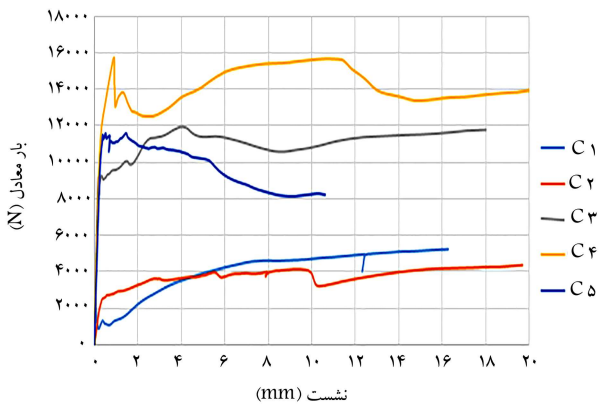
شکل ۶. تنش فون میزس.



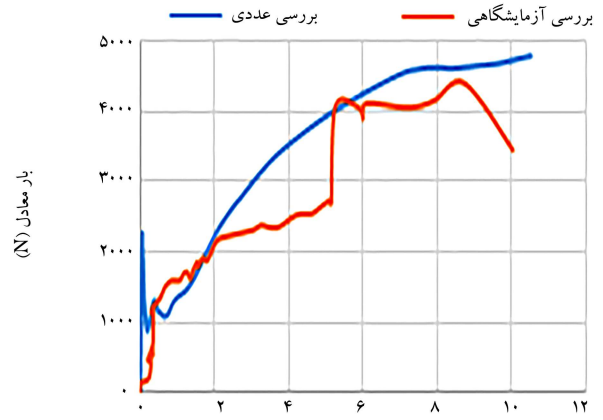
شکل ۷. تغییرشکل شعاعی.



شکل ۸. تغییرشکل عمودی.



شکل ۹. منحنی بار قائم معادل - نشست جداره‌ی مخزن نمونه‌های با ضخامت ثابت.



شکل ۵. مقایسه‌ی منحنی بار معادل - نشست به دست آمده از دو روش عددی و آزمایشگاهی نمونه‌ی شماره ۳.

جدول ۲. مشخصات مصالح فولادی.

پارامتر	مقدار
چگالی	$7/85 \times 10^{-5} N/mm^2$
مدول کشسانی	$2 \times 10^5 N/mm^2$
ضریب پواسون	$0/3$

تسلیم و کرنش تسلیم نیز در گام های مختلف به نمونه تخصیص داده شده است. در تحلیل حاضر از المان S4R، که یک المان ۴ گره‌یی با انحنای دوطرفه با انتگرال کاهش یافته است، استفاده شده است. هر گره از المان S4R، ۶ درجه آزادی شامل ۳ درجه آزادی انتقالی و ۳ درجه آزادی دورانی دارد. در نهایت، لبه‌ی پایینی مخزن مطابق با آنچه در واقعیت نیز وجود دارد و معمولاً متصل به فونداسیون بتنی است، در برابر تغییرمکان و دوران در ۳ راستا مقید و فقط چیزی حدود ۵٪ محیط، که معادل محل نشست موضعی است، به صورت آزاد مدل‌سازی شده و نشست وارد بر سازی پوسته نیز به صورت کنترل تغییرمکان در محل اشاره شده تا زمان رسیدن ناحیه‌یی از پوسته به حد نهایی مصالح فولادی اعمال شده است.

۳.۴. نتایج

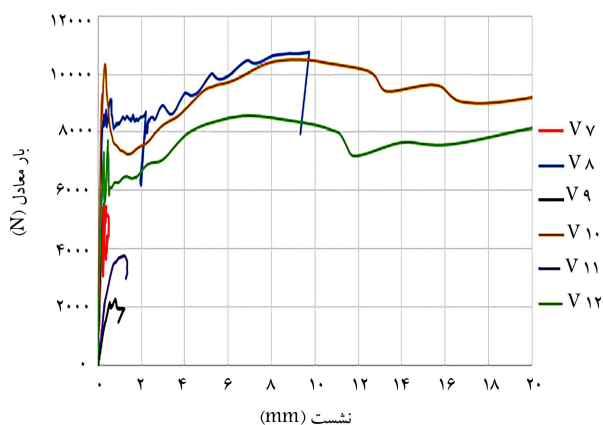
پس از مدل‌سازی نمونه‌ها طبق جدول ۱، آنالیز غیرخطی انجام شده و مقادیر تنش طبق معیار فون میزس و تغییرشکل در راستای شعاعی و عمودی به دست آمده است. در شکل ۶، تنش طبق معیار فون میزس، در شکل ۷، تغییرشکل به وجود آمده در پوسته در جهت شعاعی و در شکل ۸، تغییرشکل در جهت عمودی مشاهده می‌شوند. در نهایت پس از مدل‌سازی با روش عددی تحت نرم‌افزار آباکوس^{۱۴}، نتایج به دست آمده در جدول ۳ ارائه شده است.

۴.۴. نمودارهای بار معادل - نشست

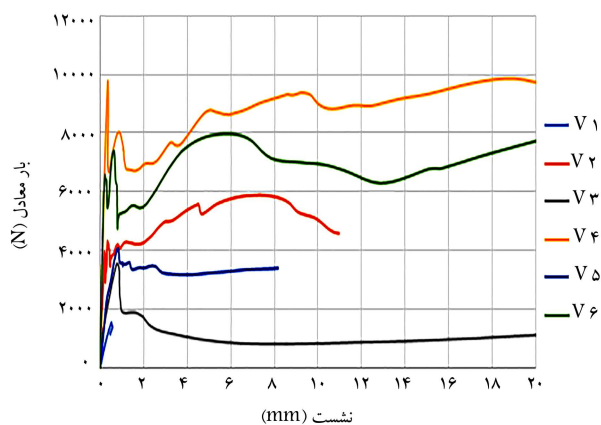
در شکل ۹، نمودار بار معادل - نشست برای نمونه‌های با ضخامت ثابت و در شکل‌های ۱۰ و ۱۱، نمودار بار معادل - نشست برای نمونه‌های با ضخامت متغیر مشاهده می‌شوند، که در آنها محور افقی نشست موضعی در یک لبه‌ی مخزن بر حسب میلی‌متر و محور قائم معرف بار معادل نشست مذکور بر حسب نیوتن است. لازم به ذکر است که بیشینه‌ی میزان نشست به عدد ۲۰ میلی‌متر محدود شده است. نمودارهای اخیر نشان می‌دهند که بار معادل متناسب با میزان نشست در

جدول ۳. مقادیر تنش و تغییر شکل حاصل شده در نمونه‌ها تحت آنالیز غیرخطی.

نام نمونه‌ها	بیشینه‌ی تغییر مکان شعاعی در زاویه‌ی ۴۵ درجه بالای صفحه‌ی انتقال نیرو (میلی متر)	بار معادل بیشینه (نیوتن)	بیشینه‌ی تغییر مکان عمودی حاصل شده U_3 (میلی متر)	بیشینه‌ی تغییر مکان شعاعی بالای پوسته (میلی متر)
C1	۲۰/۶۷۳۷	۵۲۳۷/۹۸	۱۶/۲۶۴۶	۰/۶۱۸۳
C2	۲۵/۷۳۶	۴۳۶۶/۸۴	۱۹/۶۸۴۸	۱۸/۹۰۴۷
C3	۴/۲۵۷۲	۱۱۷۶۹/۰	۲۰/۰۰	۱۲/۵۰۲
C4	۴۰/۰۶۹	۱۵۶۶۱/۶	۲۰/۰۰	۷/۴۰۶۹
C5	۳۸/۴۵۶	۱۱۵۷۴/۹	۱۰/۶۱۱۳	۵/۲۰۰۱
V1	۲/۸۵۰۴	۱۵۳۸/۶۳	۰/۵۸۰۹	۶/۸۵۷۲
V2	۳۴/۱	۵۸۸۱/۸۲	۰/۷۶۸۹	۱۰/۹۶۵
V3	۷۳/۷۵۱	۳۵۳۷/۶۸	۲۰/۰۰	۱۳۸/۳۱۱
V4	۲۷/۳۶۷	۱۰۵۳۰/۲	۲۰/۰۰	۴/۶۵۳۵
V5	۴۷/۳۶۹	۴۰۵۱/۸۴	۸/۱۶۸۶	۳۹/۰۱۶
V6	۲۷/۷۸۵	۱۰۸۶۸/۹	۲۰/۰۰	۳/۸۲۹۲
V7	۸/۳۸۸	۵۵۳۷/۸۱	۰/۴۱۳۲	۰/۴۵۳۶
V8	۴۲/۳۵۵	۱۰۷۴۷/۳	۹/۷۳۷۸	۲/۵۳۳۴
V9	۲/۶۸۴	۲۲۶۳/۴۷	۱/۲۰۹۵	۹/۷۳۳۴
V10	۳۶/۹۸	۱۰۹۴۲/۵	۲۰/۰۰	۰/۰۰۲۵۱۱
V11	۶/۱۳۶۳	۳۷۶۳/۱۱	۱/۳۵۴۷	۱۰/۰۹۲۲
V12	۴۳/۹۸۱	۸۵۶۹/۸۸	۲۰/۰۰	۳/۰۱۸۸



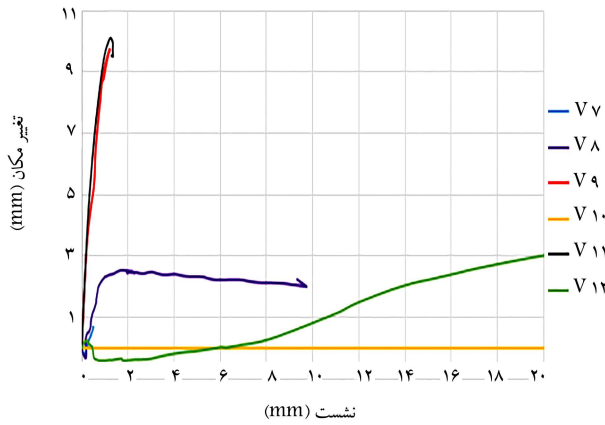
شکل ۱۱. منحنی بار قائم معادل - نشست جداره‌ی مخزن نمونه‌های با ضخامت متغیر.



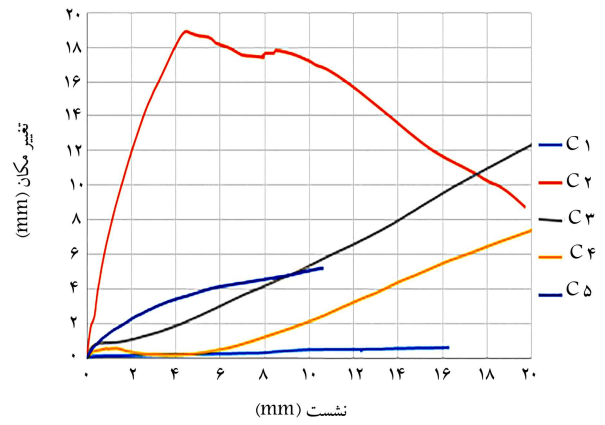
شکل ۱۰. منحنی بار قائم معادل - نشست جداره‌ی مخزن نمونه‌های با ضخامت متغیر.

تجاوز از مقدار نشست مذکور، نمونه‌های اخیر گسیخته می‌شوند. مطلب قابل توجه دیگر، عملکرد مناسب‌تر نمونه‌ی V4 در مقایسه با نمونه‌ی V6 بوده است، که بهبود عملکرد نمونه با ۲ ضخامت نزدیک به هم در ارتفاع را نسبت به نمونه با تفاوت فاحش ضخامت نشان می‌دهد. در صورتی که از جهت وزنی، دو مخزن ذکر شده در شرایط مشابه قرار داشتند. بنابراین ضخامتی متناسب با قطر مخزن (نسبت R/t) در محدوده‌ی مابین ۸۰۰ الی ۱۰۰۰ مناسب ارزیابی می‌شود. البته این مورد برای نمونه‌های با حلقه‌ی تقویتی صادق بوده و در صورت وجود مخزن فاقد حلقه‌ی تقویتی شرایط تغییر یافته و وجود ضخامت بالاتر در قسمت پایین مخزن سبب رفتار مناسب شده است. نکته‌ی قابل توجه دیگر نتایج مشابه نمونه‌های C3، V4 و V10 است. نمونه‌ی C3، حدود ۱۵٪ بار معادل نشست بیشتر نسبت به ۲ نمونه‌ی دیگر

نمونه‌های مدل‌سازی شده، رابطه‌ی مستقیم با ضخامت پوسته دارند، به نحوی که نمونه با ضخامت ۰/۳ میلی‌متر، کمترین و نمونه با ضخامت ۰/۸، بیشترین بار معادل متناظر و نمونه با ضخامت ۰/۶، بار معادل مابین دو مقدار قبلی را داشته‌اند. همچنین وجود حلقه‌ی تقویتی در نمونه‌ی C3 نسبت به نمونه‌ی C2 سبب افزایش حدود ۳ برابری بار معادل شده و از این نظر نقش غیرقابل انکاری در بهبود عملکرد پوسته داشته است. همچنین افزایش ارتفاع پوسته، تأثیر چندانی در بار معادل نداشته و بار معادل نمونه‌های C3 و C5، مقادیر نزدیک به هم داشته است. در نمونه‌های V1، V2، V7 و V9 با توجه به نسبت ابعادی مشخص و شعاع به قطر (R/t) ، در مقادیر نشست پایین‌تر، مصالح فولادی در نمونه‌ها به حد نهایی خود رسیده و از این جهت تحلیل متوقف شده است، لذا نتیجه گرفته می‌شود که در صورت



شکل ۱۴. منحنی تغییر مکان شعاعی - نشست در قسمت بالایی پوسته‌های نمونه‌های با ضخامت متغیر.



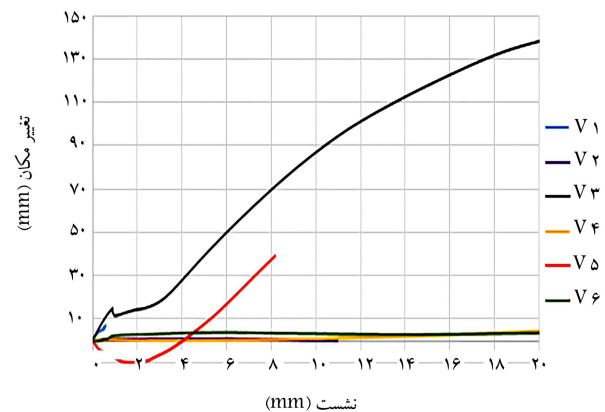
شکل ۱۲. منحنی تغییر مکان شعاعی - نشست در قسمت بالایی پوسته‌های نمونه‌های با ضخامت ثابت.

متغیر نسبت به نمونه‌های با ضخامت ثابت مناسب‌تر ارزیابی می‌شود. دلیل این امر را می‌توان رفتار نرم‌تر کماتشی در نمونه‌های با ضخامت متغیر به سبب انعطاف محل اتصال و کاهش انتقال موج کماتشی لایه‌ی پایین به لایه‌ی بالاتر دانست. لازم به ذکر است که نمونه‌های V1، V2، V9 و V11 علی‌رغم مقادیر بیشینه‌ی نشست پایین، تغییر شکل‌های شعاعی قابل توجهی را از خود نشان دادند، که این مطلب را می‌توان به رخداد کماتش در مقادیر نشست پایین‌تر (بار معادل کمتر) مرتبط دانست. لازم به ذکر است که نمونه‌ی V3 فاقد حلقه‌ی تقویتی است و با توجه به این‌که توانسته است تا قبل از رسیدن به حد نهایی (F_{tu}) به میزان ۲۰ میلی‌متر نشست برسد؛ متناسب با آن، تغییر شکل شعاعی بالایی حاصل شده است. نمونه‌ی V1۰ با حلقه‌ی تقویتی بوده و وجود آن سبب محدود ساختن تغییر شکل شعاعی شده است. همان‌گونه که در متن نوشتار حاضر نیز ذکر شده است، وجود حلقه‌ی سخت‌کننده‌ی شعاعی، آثار بسیار مثبتی در رفتار آن داشته و نتایج به دست آمده نیز گواه بر این مطلب بوده است. در میان نمونه‌های مدل‌سازی شده، مناسب‌ترین عملکرد در این خصوص را می‌توان به نمونه‌های C1، V2، V4، V1۰ و V1۱ مرتبط دانست، که همگی حلقه‌ی تقویتی داشته و البته عملکرد نمونه‌های با ضخامت متغیر مناسب‌تر نیز ارزیابی شده است.

۶.۴. نمودارهای نشست - تغییر مکان شعاعی در زاویه‌ی ۴۵ درجه‌ی پوسته

در شکل ۱۵، نمودار تغییر مکان شعاعی در زاویه‌ی ۴۵ درجه، محل اعمال نشست در وسط ارتفاع پوسته - نشست برای نمونه‌های با ضخامت ثابت و در شکل‌های ۱۶ و ۱۷، تغییرات برای نمونه‌های با ضخامت متغیر مشاهده می‌شوند. دلیل اندازه‌گیری تغییر مکان شعاعی در زاویه‌ی ۴۵ درجه این است که پس از اعمال نشست، مسیرهای کماتش پوسته به صورت V شکل رخ داده و مسیرهای کماتش مذکور نسبت به محل اعمال نشست، زاویه‌ی ۴۵ درجه داشته‌اند؛ لذا انتظار تغییر شکل شعاعی بیشتری در ناحیه‌ی اشاره‌شده وجود دارد (مطابق شکل ۶).

نمودارهای تغییر شکل شعاعی در زاویه‌ی ۴۵ درجه - نشست نمونه‌ها نشان می‌دهند که تأثیر وجود حلقه‌ی تقویتی در کاهش تغییر شکل‌های مذکور امری انکارناپذیر است و بیش از پیش آثار مثبت این عضو سازه‌ی را به اثبات می‌رساند. همچنین نمونه‌های با ارتفاع کمتر، رفتار مناسب‌تری را نسبت به نمونه‌های با ارتفاع بالاتر نشان داده‌اند (مقایسه‌ی نمونه‌های C3 و C5 و مقایسه‌ی نمونه‌های V4 و V8). نمونه‌های



شکل ۱۳. منحنی تغییر مکان شعاعی - نشست در قسمت بالایی پوسته‌های نمونه‌های با ضخامت متغیر.

دارد، اما از بابت وزنی و ملاحظات اقتصادی، سنگین‌تر و گران‌تر از دو نمونه‌ی دیگر بوده است، که بیان‌گر رفتار مناسب و قابل قبول نمونه‌های با ضخامت متغیر است. همچنین نمونه با ۳ ضخامت متغیر در ارتفاع (V1۰) نیز با کاهش وزن نسبت به نمونه با ۲ ضخامت متغیر (V4)، رفتار کاملاً مشابهی را نشان داد و عملکرد مثبت خود را در این بخش به اثبات رسانید. نمونه‌های فاقد حلقه‌ی تقویتی، رفتار ضعیفی در بخش اخیر داشتند و از این رو استفاده از آنها توصیه نمی‌شود. همچنین استفاده از ضخامت‌های پایین نسبت‌های R/t بالای ۱۰۰۰ در قسمت پایینی پوسته توصیه نمی‌شود.

۵.۴. نمودارهای تغییر شکل شعاعی بالایی پوسته - نشست

در شکل ۱۲، نمودار تغییر مکان شعاعی در قسمت بالایی پوسته - نشست برای نمونه‌های با ضخامت ثابت و در شکل‌های ۱۳ و ۱۴، تغییرات مذکور برای نمونه‌های با ضخامت متغیر مشاهده می‌شوند. لازم به ذکر است که قسمت بالایی پوسته‌ی استوانه‌ی از نقاط بحرانی در تغییر شکل شعاعی محسوب می‌شود.

نمودارهای تغییر شکل شعاعی بالایی پوسته - نشست نمونه‌ها، حاکی از رفتار مناسب‌تر نمونه‌های با حلقه‌ی تقویتی در مقایسه با نمونه‌های فاقد حلقه‌ی تقویتی است (رفتار نمونه‌ی C3 در مقایسه با نمونه‌ی C2). افزایش ضخامت نیز تأثیر بالایی در تغییر شکل شعاعی قسمت بالایی پوسته ندارد. رفتار در نمونه‌های با ضخامت

۵. نتیجه‌گیری

مخازن فولادی استوانه‌یی از گذشته تاکنون جهت نگهداری مصالح و سیال‌های مختلف استفاده شده است. ایده‌ی تغییر ضخامت در ارتفاع مخزن در جهت کاهش وزن آن و الزامات اقتصادی مدنظر بوده است. پدیده‌ی نشست از جمله موارد مهمی است که باید آثار آن در حفظ پایداری این‌گونه مخازن مورد نظر قرار گیرد. حساس‌ترین نوع نشست، نشست موضعی است که در پژوهش حاضر نیز آثار آن طبق آنالیز عددی بررسی شده است. در نوشتار حاضر، ۱۷ مخزن استوانه‌یی فولادی با ارتفاع کوتاه و بلند با و بدون حلقه‌ی تقویت‌کننده در قسمت فوقانی آن و در حالت‌های ضخامت متغیر و ثابت تحت اثر نشست موضعی بررسی شده و این نتایج به دست آمده است:

۱) بار معادل متناسب با نشست در نمونه‌های مدل‌سازی شده، رابطه‌ی مستقیم با ضخامت پوسته داشته و با بالاتر رفتن ضخامت پوسته، مقادیر بار معادل افزایش یافته است.

۲) افزایش ارتفاع پوسته، تأثیر زیادی در افزایش بار معادل نداشته و بار معادل نمونه‌های با ضخامت یکسان و ارتفاع متفاوت، مقادیری نزدیک را به هم نشان داده‌اند.

۳) در نمونه‌های با حلقه‌ی تقویتی و ضخامت متغیر، بهبود عملکرد نمونه با دو ضخامت نزدیک به هم در ارتفاع نسبت به نمونه‌ی با تفاوت فاحش ضخامت، رفتار مناسب‌تری را نشان داده است. در صورتی که از جهت وزنی و استفاده‌ی مصالح، دو مخزن مذکور در شرایط کاملاً مشابه قرار داشتند.

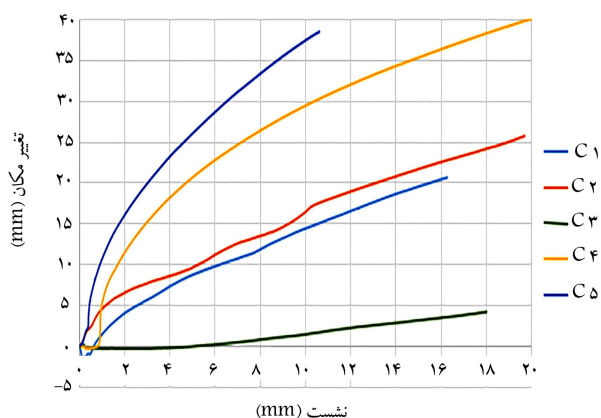
۴) ضخامت متناسب با قطر مخزن (نسبت R/t) در محدوده‌ی ۸۰۰ الی ۱۰۰۰، مناسب ارزیابی شده است. مقادیر بالاتر از ۱۰۰۰، سبب ضعف عملکرد پوسته در برابر نشست موضعی و رفتار کماتشی شده است، که البته مورد اخیر برای نمونه‌های با حلقه‌ی تقویتی صادق بوده و در صورت وجود مخزن فاقد حلقه‌ی تقویتی، شرایط کاملاً تغییر کرده است.

۵) نتایج نمونه‌های C۳، V۴ و V۱۰ تقریباً یکسان بوده است. نمونه‌ی C۳ در حدود ۱۵٪، بار معادل نشست بیشتری نسبت به دو نمونه‌ی دیگر داشته است، اما نباید این واقعیت را فراموش کرد که از بابت وزنی و ملاحظات اقتصادی، بسیار سنگین‌تر و گران‌تر از دو نمونه‌ی دیگر بوده است. لذا نمونه‌های با ضخامت متغیر، رفتاری مناسب و قابل قبول دارند.

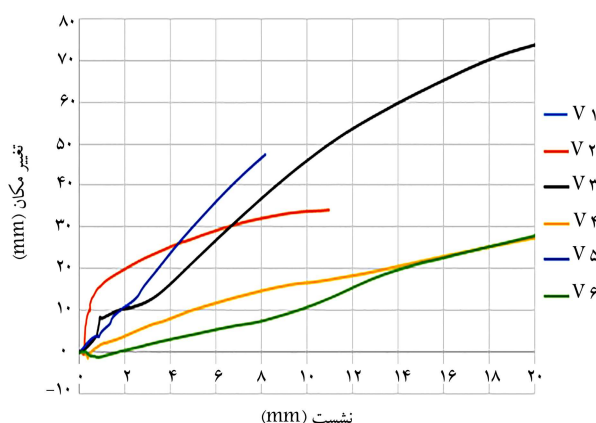
۶) نمونه با ۳ ضخامت متغیر در ارتفاع (V۱۰) با کاهش وزن نسبت به نمونه با ۲ ضخامت متغیر (V۴)، رفتار مشابهی را از بابت مقادیر بار معادل متناظر با نشست یکسان نشان داده و عملکرد مثبت خود را در بخش اخیر به اثبات رسانیده است.

۷) نمونه‌های فاقد حلقه‌ی تقویتی، رفتار نامطلوبی در بحث تغییرمکان شعاعی داشته‌اند و از این رو استفاده از آنها توصیه نمی‌شود. همچنین استفاده از ضخامت‌های پایین (نسبت‌های R/t بالای ۱۰۰۰) در قسمت پایینی پوسته و محل رخداد پدیده‌ی نشست توصیه نمی‌شود.

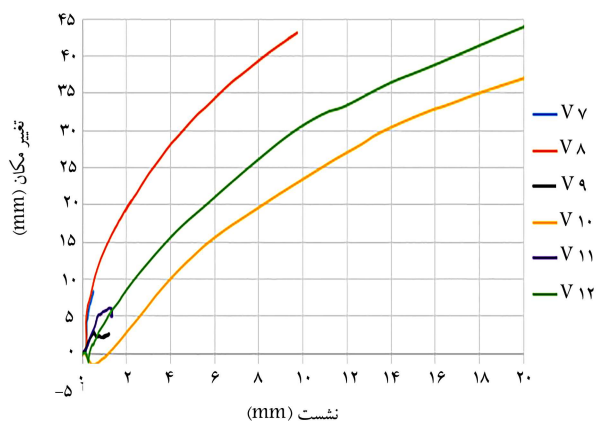
۸) رفتار کماتشی و مقادیر تغییرشکل شعاعی قسمت بالایی پوسته در نمونه‌های با ضخامت متغیر نسبت به نمونه‌های با ضخامت ثابت، پایین‌تر و مناسب‌تر ارزیابی شده است. دلیل این امر را می‌توان رفتار نرم‌تر کماتشی در نمونه‌های با ضخامت



شکل ۱۵. منحنی تغییرمکان شعاعی در زاویه‌ی ۴۵ درجه - نشست پوسته‌ی نمونه‌های با ضخامت ثابت.



شکل ۱۶. منحنی تغییرمکان شعاعی در زاویه‌ی ۴۵ درجه - نشست پوسته‌ی نمونه‌های با ضخامت متغیر.



شکل ۱۷. منحنی تغییرمکان شعاعی در زاویه‌ی ۴۵ درجه - نشست پوسته‌ی نمونه‌های با ضخامت متغیر.

با ضخامت متغیر در مقایسه با نمونه‌های با ضخامت ثابت، بهبود رفتار کماتشی را در بخش حاضر از خود نشان ندادند. حتی در برخی موارد سبب افزایش اندکی در مقادیر تغییرشکل شده‌اند. البته این افزایش به اندازه‌ی نبوده است که بتوان آن را به عنوان یک پارامتر منفی لحاظ کرد و دلیل آن، کاهش ارتفاع لایه‌ها در نمونه‌های با ضخامت متغیر بوده است.

اثبات می‌رساند.

۱۰) نمونه‌های با ضخامت متغیر در مقایسه با نمونه‌های با ضخامت ثابت، بهبود رفتار کمانشی را در بحث تغییرشکل شعاعی در زاویه‌ی ۴۵ درجه از خود نشان نمی‌دهند. حتی در برخی موارد، سبب افزایش اندکی در مقادیر تغییرشکل شده‌اند. البته این افزایش به اندازه‌ی نبوده است که بتوان آن را به عنوان یک پارامتر منفی لحاظ کرد.

متغیر به سبب انعطاف محل اتصال و کاهش انتقال موج کمانشی لایه‌ی پایین به لایه‌ی بالاتر دانست.

۹) تأثیر وجود حلقه‌ی تقویتی در کاهش تغییرشکل‌های شعاعی در بالای پوسته و همچنین وسط ارتفاع پوسته در زاویه‌ی ۴۵ درجه نسبت به محل اعمال نشست، امری غیرقابل انکار است و بیش از پیش آثار مثبت عضو سازه‌ی مذکور را به

پانویس‌ها

1. Timothy
2. Donnel
3. Holst & Rotter
4. Zhao
5. Cao
6. Gong
7. curve fitting method
8. Shamel
9. Fan
10. Tarasenko
11. Grget
12. Wang
13. Ignatowicz & Hotala
14. ABAQUS

منابع (References)

1. Almroth, B. and Brush, D. "Bending of bars, plates and shells", *Translated by Mojtaba Qamarizadeh and Gholamhosein Rahimi*, Imam Hussein University Press (2005).
2. D'Orazio, T.B., Duncan, J.M. and Bell, R.A. "Distortion of steel tanks due to settlement of their walls", *J. Geotech. Engrg.*, **115**(6), pp. 871-890 (1989).
3. Kamyab, H. and Palmer, S.C. "Analysis of displacements and stresses in oil storage tanks caused by differential settlement", *Proc. Inst. Mech. Eng., Part C: Mech. Eng. Sci.*, **203**(1), pp. 61-70 (1989).
4. Kamyab, H. and Palmer, S.C. "Displacements in oil storage tanks caused by localized differential settlement", *J. Pressure Vessel Technol., Trans.*, **113**(1), pp. 71-80 (1991).
5. Palmer, S.C. "Structural effects of foundation tilt on storage tanks", *Proc. Inst. Mech. Eng., Part E: J. Process Mech. Eng.*, **206**(E2), pp. 83-92 (1992).
6. Palmer, S.C. "Stress in storage tanks caused by differential settlement", *Proc. Inst. Mech. Eng., Part E: J. Process Mech. Eng.*, **208**(E1), pp. 5-16 (1994).
7. Jonaidi, M. and Ansourian, P. "Buckling of cylindrical shells subjected to edge vertical deformation, in: Advances in Steel Structures", *Elsevier, Oxford*, **56**, pp. 679-686 (1999).
8. Holst, J.M.F.G. and Rotter, J.M. "Axially compressed cylindrical shells with local settlement", *Thin Wall Struct.*, **43**(5), pp. 811-825 (2005).
9. Cao, Q. and Zhao, Y. "Buckling strength of cylindrical steel tanks under harmonic settlement", *Thin Wall Struct.*, **48**(6), pp. 391-400 (2010).
10. Zhao, Y., Lei, X. and Zhang, X. "Stability analysis of floating-roof tanks under differential settlement", *Adv. Mater. Res.*, **163-167**, pp. 55-60 (2011).
11. Zhao, Y., Lei, X., Wang, Zh. and et al. "Buckling behavior of floating-roof steel tanks under measured differential settlement", *Thin-Walled Structures*, **70**, pp. 70-80 (2013).
12. Gong, J., Tao, J., Zhao, J. and et al. "Effect of top stiffening rings of open top tanks on critical harmonic settlement", *Institute of Process Equipment, Zhej Iang University, Hangzhou 310027, China- Thin-Walled Structures*, **65**, pp. 62-71 (2013).
13. Chen, D.Y., Fan, H.G., Shen, J.M. and et al. "Research of curve fitting method on the measured settlement of tanks", *Procedia Engineering*, **130**, pp. 400-407 (2015).
14. Shamel Fahmy, A. and Mohamed Khalil, A. "Wall thickness variation effect on tank's shape behaviour under critical harmonic settlement", *Alexandria Engineering Journal*, **55**(4), pp. 3205-3209 (2016).
15. Fan, H., Chen, Zh., Shen, J. and et al. "Buckling of steel tanks under measured settlement based on poisson curve prediction model", *Thin-Walled Structures*, **106**, pp. 284-293 (2016).
16. Tarasenko, A., Gruchenkova, A. and Chepur, P. "Joint deformation of metal structures in the tank and gas equalizing system while base settlement progressing", *Procedia Engineering*, **165**, pp. 1125-1131 (2016).
17. Gong, J.-G., Zhou, Zh.-Q. and Xuan, F.-Zh. "Buckling strength of cylindrical steel tanks under measured differential settlement: harmonic components needed for consideration and its effect", *Thin-Walled Structures*, **119**, pp. 345-355 (2017).
18. Grget, G., Ravnjak, K. and Szavits-Nossan, A. "Analysis of results of molasses tanks settlement testing", *Soils and Foundations*, **58**(5), pp. 1260-1271 (2018).
19. Wang, X., Lin, H., Zhu, Y. and et al. "Vibro-acoustic modelling of immersed cylindrical shells with variable

thickness”, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, **12**(1), pp. 343-353 (2020).

20. Ignatowicz, R. and Hotala, E. “Failure of cylindrical steel storage tank due to foundation settlements”, *Engineering Failure Analysis*, **115**, 104628 (2020).

21. Bohra, H. and Guzey, S. “Fitness-for-service of open-top storage tanks subjected to differential settlement”, *Engineering Structures*, **225**, pp.5, 111277 (2020).

22. Naseri, H. “Investigation on the geometrical and physical behavior of steel thin walled tanks under the effects of deformations from constructional local settlement”, *Ph.D thesis, Urmia, Urmia* (2021).