

مطالعه‌ی آزمایشگاهی و تئوری رفتار کمانشی پوسته‌های استوانه‌یی فولادی با ضخامت متغیر تحت بارگذاری مرکب فشارهای محوری و خارجی

ندا فضاعلی‌پور* (دانشجوی دکتری)

حسین شوکتی (استاد)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی عمران، دانشگاه ارومیه

مهندسی عمران شریف، بهار ۱۴۰۱ (دانشکده فنی)
دوری ۲ - ۳۸، شماره ۱/۲، ص. ۱۶۹-۱۷۷، (پادداست فنی)

به دلایل اقتصادی، پوسته‌های استوانه‌یی فولادی بزرگ ذخیره‌ی مایع با ضخامت متغیر در ارتفاع ساخته می‌شوند. پوسته‌های مذکور در طول عمر خود تحت انواع بارگذاری‌ها قرار می‌گیرند. در نوشتار حاضر، دو مطالعه‌ی آزمایشگاهی برای بررسی آثار شروع کمانش در مرحله‌ی اعمال بار فشاری محوری و همچنین در مرحله‌ی اعمال فشار خارجی در رفتار کمانشی پوسته‌های استوانه‌یی که تحت بارگذاری ترکیبی (بار فشارهای محوری و خارجی) قرار گرفته‌اند، انجام شده است. بر اساس نتایج حاصله زمانی که شروع کمانش در مرحله‌ی اعمال بار فشاری محوری رخ می‌دهد، ظرفیت کمانشی پوسته‌های استوانه‌یی کاهش می‌یابد. روابط تئوری برای پیش‌بینی بار کمانشی پوسته‌ی استوانه‌یی با ضخامت متغیر گام به گام تحت بارگذاری مرکب فشارهای محوری و خارجی و با در نظر گرفتن ناکاملی هندسی بررسی شده‌اند که یکی از روابط تئوری به کار رفته، همبستگی نزدیکی با نتایج آزمایشگاهی داشت.

واژگان کلیدی: پوسته‌های استوانه‌یی فولادی، جدارنازک، ضخامت متغیر،

بارگذاری مرکب، کمانش.

n.fazlalipour@gmail.com
h.showkati@urmia.ac.ir

۱. مقدمه

آغاچری و همکاران (۲۰۰۶)، در مطالعه‌ی عددی و آزمایشگاهی روی رفتار کمانشی و پس‌کمانشی پوسته‌های استوانه‌یی جدارنازک با ضخامت متغیر تحت فشار خارجی یکنواخت مشاهده کردند که موج‌های کمانش در پوسته‌های با تغییر ضخامت کم، در تمامی سطح پوسته و در پوسته‌های با تغییر ضخامت زیاد در سطحی از پوسته با ضخامت کمتر تشکیل می‌شوند.^[۱]

مطالعات بسیار کمی در زمینه‌ی پوسته‌های جدارنازک با ضخامت متغیر تحت بار ترکیبی فشار خارجی و نیروی محوری انجام شده است، به طوری که بیشتر مطالعات صورت گرفته تحت اثر بار مرکب برای پوسته‌ها با ضخامت ثابت بوده است. هاجینسون^۱ (۱۹۶۵)، اثر ناکاملی‌های محوری اولیه را روی کمانش پوسته‌های استوانه‌یی با مقطع دایروی با ضخامت ثابت تحت ترکیب بارهای محوری و شعاعی با استفاده از تئوری کلاسیک پوسته ارائه کرده است.^[۱] گالتلی^۲ و همکاران (۱۹۸۷)، آزمون‌های آزمایشگاهی برای تعیین اندرکنش بارهای کمانش برای استوانه‌های با ضخامت ثابت که در معرض بارهای محوری و خارجی قرار داشتند، انجام دادند.^[۱۱] شن و چن^۳ (۱۹۹۱)، در بررسی رفتار کمانش و پس‌کمانش پوسته‌های استوانه‌یی با ضخامت ثابت تحت ترکیب فشارهای خارجی و محوری، یک رابطه‌ی تئوری برای کمانش و پس‌کمانش پوسته‌های استوانه‌یی تحت بارگذاری ترکیبی معرفی کردند.^[۱۲] وینترستر^۴ و همکاران (۲۰۰۲)، به بررسی جامع و عددی در ارتباط

مخازن فولادی استوانه‌یی، از جمله سازه‌ها و تجهیزات صنعتی هستند که نقش حساسی را در ذخیره‌ی مواد نفتی و پالایشگاهی، تأمین آب آشامیدنی و سیستم‌های اطفاء حریق دارند. سازه‌های مذکور جزء تأسیسات حساس و راهبردی هستند و به علت کاربرد گسترده‌ی آن‌ها در صنایع مختلف، خصوصاً نفت و پتروشیمی، اهمیت به خصوصی دارند.^[۱] از دیدگاه هندسی، مخازن فولادی استوانه‌یی، ضخامت بسیار اندکی در مقایسه با دو بُعد دیگر دارند و به این ترتیب در زمره‌ی سازه‌های جدارنازک قرار می‌گیرند. به دلیل افزایش تدریجی تنش روی دیواره‌ی پوسته‌ی استوانه‌یی به سمت تکیه‌گاه، سیلوها و مخازن فولادی، همواره از تعدادی بخش‌های منحصر به فرد با ضخامت ثابت ساخته می‌شوند که ضخامت دیواره از بالا به پایین به تدریج افزایش می‌یابد. پوسته‌های ذکر شده با سقف ثابت به دلیل بار ناشی از وزن سقف، برف، و باران که روی سقف انباشته می‌شوند، تحت اثر فشار محوری قرار می‌گیرند. همچنین در اثر بار باد و یا زمانی که یک مخزن بزرگ مایع تخلیه می‌شود، مکش داخلی روی دیوار و سقف آن اعمال می‌شود که باعث اعمال فشار خارجی روی دیواره و فشار محوری روی سقف آن می‌شود.^[۸-۳]

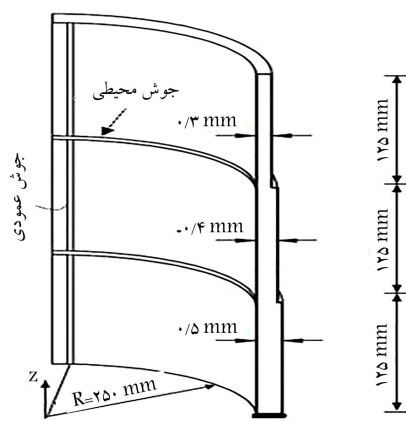
* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۷/۲۴، اصلاحیه ۱۴۰۰/۹/۲۸، پذیرش ۱۴۰۰/۱۰/۱۳

DOI:10.24200/J30.2022.59142.3031



ب) پوسته استوانه‌ی ساخته شده.



الف) جزئیات ابعادی پوسته استوانه‌ی بی؛

شکل ۱. جزئیات پوسته‌ی استوانه‌ی بی.

جدول ۱. مقادیر نیروی فشاری محوری.

نمونه	نیروی فشاری محوری (kN)
S-N۸	۸/۶۵
S-N۱۰	۱۰/۴۸

۲. مطالعه‌ی آزمایشگاهی

۱.۲. ساخت نمونه

برای ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی، ابتدا ورق‌های فولادی به طول ۱۵۷۱ میلی‌متر، عرض ۱۲۵ میلی‌متر و با ضخامت‌های ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ میلی‌متر تهیه و ورق‌ها در امتداد طولشان رول شدند. سپس عرض ورق‌ها با استفاده از نقطه‌ی جوش و با کمک تسمه‌هایی به عرض ۱۰° و ضخامت ۰/۳ میلی‌متر (به دلیل ضخامت کم ورق‌ها) به یکدیگر جوش داده شدند و بدین صورت پوسته‌های استوانه‌ی بی ساخته شدند. در مرحله‌ی بعد، پوسته‌های استوانه‌ی بی در جهت محوری تراز شدند. همچنین در حالتی که ضخامت‌ها به سمت پایین در حال افزایش بودند، به یکدیگر توسط نقطه‌ی جوش و با کمک تسمه‌ها جوش شدند. بدین ترتیب، پوسته‌ی استوانه‌ی بی با ضخامت‌های متغیر ساخته شد. چسب سیلیکون به نواحی جوش زده شد و سپس نمونه، رنگ آمیزی و مش‌بندی شد. پوسته‌ی استوانه‌ی بی ساخته شده، در شکل ۱ مشاهده می‌شود. نمونه‌ی پوسته‌ی استوانه‌ی بی با کد S-NY مشخص شده است که S نشان‌دهنده‌ی نمونه و NY مقدار بار فشاری محوری وارده بر حسب کیلونیوتن را نشان می‌دهد. مقادیر نیروی فشار محوری وارد شده به نمونه‌ها در جدول ۱ ارائه شده‌اند. سه نمونه کوبن آزمون کششی از ورق‌های فولادی با ضخامت‌های متفاوت دیواره انجام و خواص کششی فولاد استفاده شده با انجام آزمایش‌های کششی بر روی نمونه‌ها، مطابق استاندارد ASTM-E۸m^[۱۹] مشخص شد. روابط تنش - کرنش به دست آمده از آزمایش‌های کششی در شکل ۲ مشاهده می‌شود.

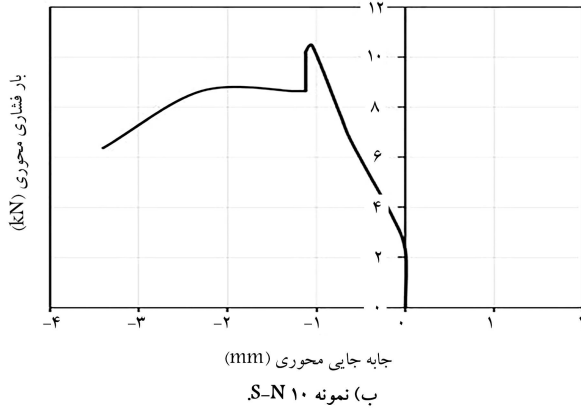
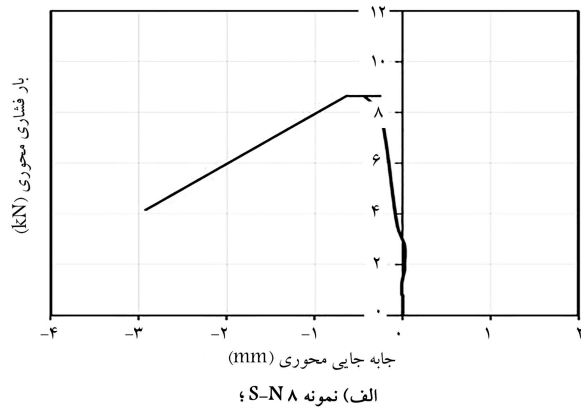
۲.۲. نصب نمونه و انجام آزمایش

پوسته‌های استوانه‌ی بی بین دو صفحه‌ی صلب قرار گرفته‌اند که روی آن‌ها با استفاده از دستگاه‌های دقیق تراش و برش، شیارهای v شکل به صورت دایره‌های متحدالمرکز با شعاع ۱۰۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر تعبیه شده است. لبه‌های پوسته‌ی استوانه‌ی بی داخل

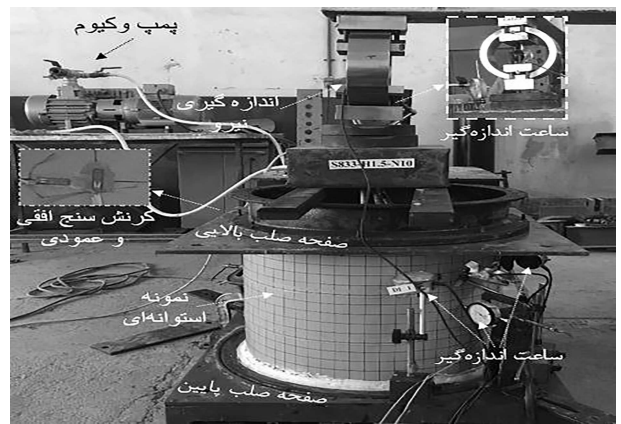
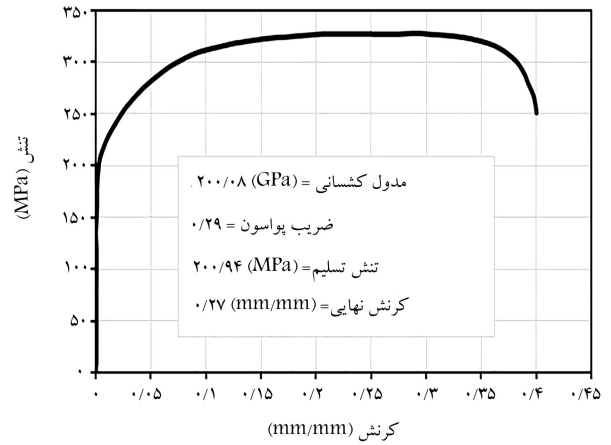
با پایداری پوسته‌های استوانه‌ی بی فولادی با ضخامت ثابت تحت بارگذاری مرکب پرداختند و در نهایت، پیشنهاد جدیدی را برای طراحی تنش کمانشی پوسته‌های استوانه‌ی بی فولادی ارائه کردند.^[۱۳] ونگ و همکاران (۲۰۲۱)، اثر بارگذاری ترکیبی فشارهای محوری و خارجی را در رفتار کمانشی پوسته‌های استوانه‌ی بی دارای سخت‌کننده بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که افزایش نسبت فشرده‌سازی محوری، حساسیت ناکاملی به نقص هندسی اولیه را افزایش می‌دهد. همچنین دریافتند که ظرفیت کمانشی به دست آمده تحت فشار خارجی غیریکنواخت، بسیار بیشتر از فشار خارجی یکنواخت بوده و روش سنتی ارزیابی ظرفیت کمانشی پوسته‌ی استوانه‌ی بی در اثر فشار خارجی یکنواخت، بیش از حد محافظه‌کارانه است.^[۱۴]

پورخورشیدی و عابدی (۲۰۱۷)، آثار فرورفتگی افقی و عمودی در رفتار کمانش و پس‌کمانش پوسته‌های فولادی استوانه‌ی بی با ضخامت متغیر و تحت اثر بار ترکیبی فشار پیرامونی و فشار محوری را به صورت عددی بررسی کردند و دریافتند که فرورفتگی‌های مذکور، تغییرات چشمگیری در رفتار پس‌کمانش سازه‌ها ایجاد می‌کنند.^[۱۵] محبوبی ناصرخوانی و ایکچچی (۲۰۱۹)، یک رابطه‌ی تئوری برای پیش‌بینی بار کمانش پوسته‌های استوانه‌ی بی کشسان با ضخامت متغیر تحت ترکیب بارهای فشارهای محوری و خارجی پیشنهاد داده‌اند.^[۱۶]

مروری بر مطالعات پیشین در ارتباط با کمانش پوسته‌های استوانه‌ی بی نشان می‌دهد که ارزیابی آثار شروع کمانش در مرحله‌های اعمال بارهای فشارهای محوری و نیز خارجی، در رفتار کمانش پوسته‌های استوانه‌ی بی با ضخامت متغیر گام به گام که تحت بارگذاری ترکیبی فشارهای محوری و خارجی قرار گرفته‌اند، بررسی نشده است. در این مطالعه فرض بر این بوده است که پوسته‌های استوانه‌ی بی همچنان که بار فشاری محوری را تحمل می‌کنند، تحت فشار خارجی نیز قرار می‌گیرند. در مطالعه‌ی حاضر، پوسته‌ی استوانه‌ی بی با ضخامت متغیر ساخته شده و تحت بارگذاری ترکیبی فشارهای محوری و خارجی قرار گرفته است. آثار شروع کمانش در مرحله‌ی اعمال بار فشار محوری و همچنین در مرحله‌ی اعمال فشار خارجی، درخصوص مقدار ظرفیت کمانشی و همچنین چگونگی تغییر شکل‌های ایجاد شده در پوسته‌ی استوانه‌ی بی ارزیابی شده است. سپس نتایج حاصل از آزمایش‌ها با نتایج تئوری اندرکنش غیرخطی حاصل از دو روش آدلند (۱۹۷۸)^[۱۷] و استاندارد EN-۱۹۹۳-۱-۶^[۱۸] مقایسه شده‌اند.



شکل ۴. نمودار بار فشاری محوری - جابه‌جایی محوری.



شکل ۳. نمای کلی نصب نمونه.

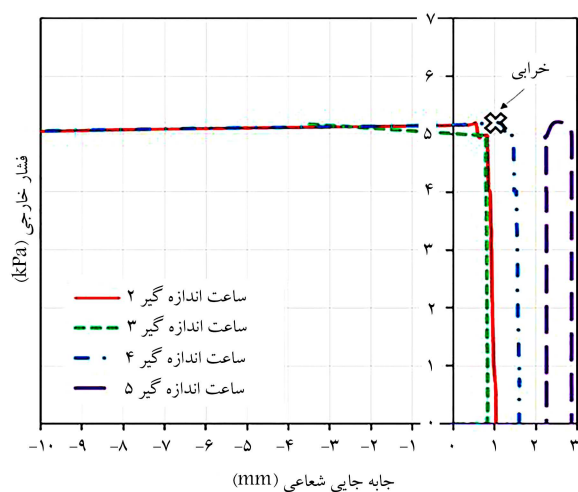
۳. نتایج آزمایشگاهی

در شکل ۴، نمودار نیروی محوری - جابه‌جایی محوری پوسته‌های استوانه‌یی برای دو نمونه S-N8 و S-N10 مشاهده می‌شوند. نتایج نشان می‌دهند که در نمونه S-N8، در مرحله‌ی اعمال بار فشار محوری، کماتشی در نمونه رخ نداده است. بار فشار محوری بعد از رسیدن به مقدار ۸/۶۵ کیلونیوتن، ثابت مانده و فشار خارجی به نمونه اعمال شده است. اما در نمونه S-N10، در مرحله‌ی اعمال بار فشار محوری، زمانی که نیروی محوری به مقدار ۱۰/۴۸ کیلونیوتن رسیده است، کماتش اولیه در پوسته‌ی استوانه‌یی تحت بار فشار محوری رخ داده است که منجر به افت در مقدار بار فشار محوری شده است؛ به طوری که بار فشار محوری به مقدار ۸/۶۵ کیلونیوتن رسیده و سپس ثابت مانده است. در مرحله‌ی بعد، فشار خارجی یکنواخت اعمال شده است.

در شکل ۵ الف، نمودار فشار خارجی - جابه‌جایی شعاعی برای پوسته‌های استوانه‌یی در محل قرارگیری ساعت‌های اندازه‌گیری برای نمونه S-N8 مشاهده می‌شود که مطابق آن در نمونه‌ی مذکور در مرحله‌ی دوم که بار فشار محوری ثابت بوده و فشار خارجی اعمال شده است، شروع کماتش در فشار خارجی $P = 1/86 (kPa)$ رخ داده است که در آزمایشگاه، لحظه‌ی شروع کماتش از طریق صدای ایجادشده قابل تشخیص بود. مقدار اخیر در نمودار فشار خارجی - جابه‌جایی شعاعی با تغییر شیب به دلیل کاهش در سختی پوسته‌ی استوانه‌یی در اثر تغییر شکل ایجاد شده، قابل تشخیص بوده است. نهایتاً پوسته‌ی استوانه‌یی در فشار خارجی $P = 6/02 (kPa)$ دچار خرابی و ناپایداری شده است. مرحله‌ی خرابی در نمودار فشار خارجی - جابه‌جایی شعاعی با افت ظرفیت همراه

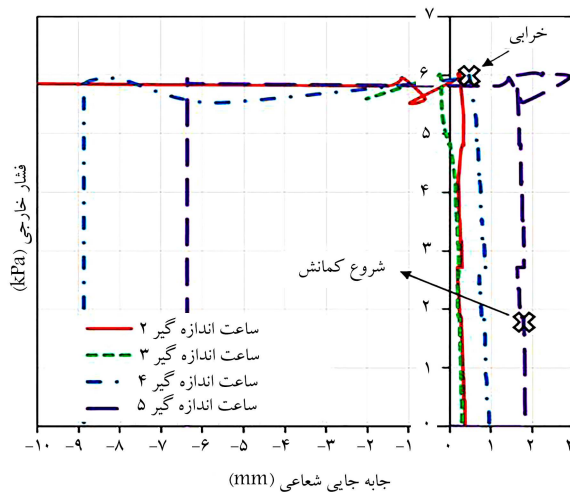
شیارهای مذکور قرار گرفتند. از شیارهای اخیر، برای مدل‌سازی شرایط تکیه‌گاهی و امکان کنترل تغییر مکان‌های شعاعی در انتهای نمونه‌ها استفاده شده است. برای جلوگیری از نشست، لبه‌ها با چسب دارای خاصیت چسبانندگی قوی پوشانیده شدند، به طوری که لبه‌های پایینی در جهت‌های شعاعی و عمودی مقید شدند، ولی لبه‌های بالایی فقط در جهت شعاعی امکان حرکت نداشتند. ناکاملی هندسی به صورت دستی و با استفاده از نخ و کولیس اندازه‌گیری شد. به طوری که بعد از نصب نمونه در دستگاه، نخ به صورت شاغول در فاصله‌ی مشخصی از نمونه آویزان شد. سپس با استفاده از کولیس، مقدار فرورفتگی و برآمدگی‌هایی که در اثر جوش در پیرامون نمونه‌ها ایجاد شده بودند، اندازه‌گیری شدند. بیشینه‌ی مقدار به دست آمده از اندازه‌گیری‌ها، به عنوان مقدار ناکاملی انتخاب شد، که معادل ۰/۵ میلی‌متر بود.

روند آزمایش بدین صورت بود که ابتدا فشار محوری با استفاده از جک عمودی به اندازه‌ی مقادیر مورد نظر (مقادیر ذکر شده در جدول ۱) به لبه‌های پوسته‌ی استوانه‌یی وارد شد. سپس با ثابت نگه داشتن مقدار نیروی محوری، فشار خارجی توسط پمپ و کیوم به صورت یکنواخت بر جداره‌ی پیرامونی پوسته‌ی استوانه‌یی اعمال شد. در آزمایش حاضر، ۵ عدد ساعت اندازه‌گیری^۵ و دو عدد کرنش‌سنج^۶ برای اندازه‌گیری جابه‌جایی و تغییر شکل نمونه‌ها استفاده شده است. در شکل ۳، پوسته‌ی استوانه‌یی نصب شده به همراه موقعیت ساعت‌های اندازه‌گیر و کرنش‌سنج‌های استفاده شده مشاهده می‌شود.



شکل ۵. نمودار فشار خارجی - جابه‌جایی شعاعی.

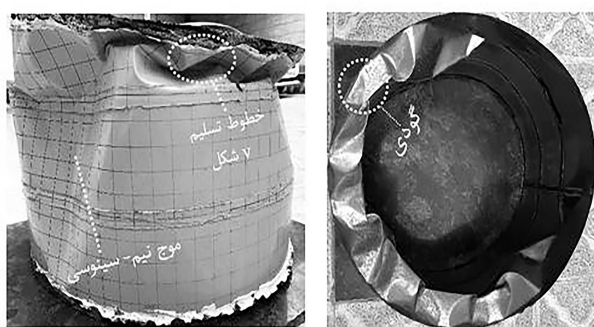
(ب) نمونه S-N10.



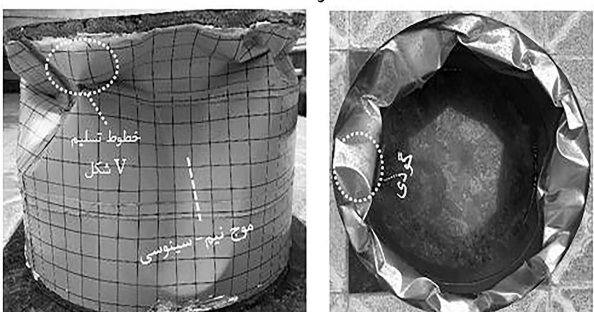
شکل ۵. نمودار فشار خارجی - جابه‌جایی شعاعی.

(الف) نمونه S-N8.

شکل ۵. نمودار فشار خارجی - جابه‌جایی شعاعی.



شکل ۶. مود خرابی نمونه‌های پوسته‌ی استوانه‌یی.



شکل ۶. مود خرابی نمونه‌های پوسته‌ی استوانه‌یی.

شکل ۶. مود خرابی نمونه‌های پوسته‌ی استوانه‌یی.

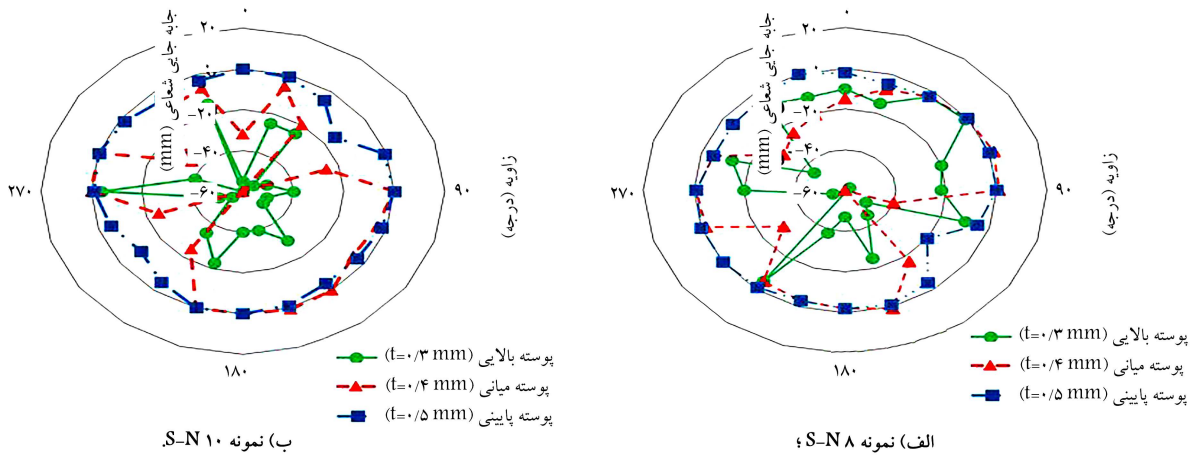
بخش‌های جداگانه‌ی پوسته‌ی استوانه‌یی مشاهده می‌شود که مطابق آن زمانی که اولین موج کمانشی در اثر نیروی محوری ایجاد شده است، در پوسته‌ی نازک‌تر، تغییرشکل‌های بیشتری ایجاد و تعداد موج بیشتری نیز در وسط ارتفاع پوسته‌ی استوانه‌یی تشکیل شده است. در پوسته با ضخامت 0.4 میلی‌متر نیز در نمونه‌ی S-N10 به دلیل اعمال نیروی محوری بیشتر، مقادیر تغییرشکل بزرگ‌تری ایجاد شده است.

در شکل‌های (الف و ب)، نمودار بار فشار محوری در برابر کرنش‌های محیطی و عمودی به ترتیب مشاهده می‌شود که مطابق آن‌ها، مقادیر مثبت کرنش، نشان‌دهنده‌ی کرنش کششی و مقادیر منفی کرنش، نشان‌دهنده‌ی کرنش فشاری است. بار فشار

بوده و تغییرشکل‌های بزرگ در این مرحله رخ داده و سازه دچار ناپایداری شده است. در شکل ۵، نمودار فشار خارجی - جابه‌جایی شعاعی برای پوسته‌های استوانه‌یی در محل قرارگیری ساعت‌های اندازه‌گیری برای نمونه‌ی S-N10 مشاهده می‌شود که مطابق آن شروع کمانش در مرحله‌ی اول و در زمان اعمال فشار محوری شده و مقدار فشار محوری به $8/65$ کیلو نیوتن رسیده است. در مرحله‌ی دوم، مقدار فشار محوری $N = 8/65 (kN)$ ثابت نگه داشته شده و فشار خارجی به نمونه اعمال شده است. براساس شکل ۵ مشاهده می‌شود که تا لحظه‌ی خرابی، تغییر در شیب نمودارها ایجاد نشده و نمونه‌ی مذکور نهایتاً در فشار خارجی $P = 5/18 (kPa)$ دچار خرابی و ناپایداری شده است. خرابی پوسته‌های استوانه‌یی با ایجاد خطوط تسلیم شکل ۷ و تغییرشکل‌های بسیار بزرگ که باعث از بین رفتن پایداری پوسته‌ی استوانه‌یی می‌شود، همراه بوده است. طی انجام آزمایش، مشاهده شد که در نمونه‌ی S-N10 به دلیل اینکه شروع کمانش در مرحله‌ی اعمال بار فشار محوری رخ داده است، خرابی نسبت به نمونه‌ی S-N8 سریع‌تر اتفاق افتاده است. نتایج نشان می‌دهند که در نمونه‌ی S-N10، زیاد بودن نیروی فشار محوری به اندازه‌ی $17/4\%$ نسبت به نمونه‌ی S-N8، علی‌رغم اینکه در مرحله‌ی دوم و موقع اعمال فشار خارجی، بار فشاری محوری برای هر دو نمونه یکسان بوده است، باعث کاهش حدود ۱۴ درصدی ظرفیت کمانش پوسته‌ی استوانه‌یی شده است.

در شکل ۶، تغییرشکل نهایی نمونه‌ها مشاهده می‌شود. موج‌های کمانشی ایجاد شده در نمونه‌ها ترکیبی از موج‌های ناشی از بار محوری (گودی‌های ۷ ایجاد شده در ضخامت نازک‌تر)، [۲۴-۲۱] و موج‌های محیطی نیم‌سینوسی^۸ ناشی از فشار خارجی بوده است [۲۶، ۲۵] به طوری که در نمونه‌ی S-N8، ۱۲ موج کمانشی تشکیل شده است که ۴ موج در کل ارتفاع پوسته‌ی استوانه‌یی پیش رفته است. در نمونه‌ی S-N10، نیز ۱۳ موج کمانشی تشکیل شده است که ۴ موج در کل ارتفاع پوسته‌ی استوانه‌یی پیش رفته است. در نتیجه، شروع کمانش در مرحله‌ی اعمال بار فشار محوری باعث تشکیل تعداد بیشتری از موج کمانشی ناشی از بار محوری شده است.

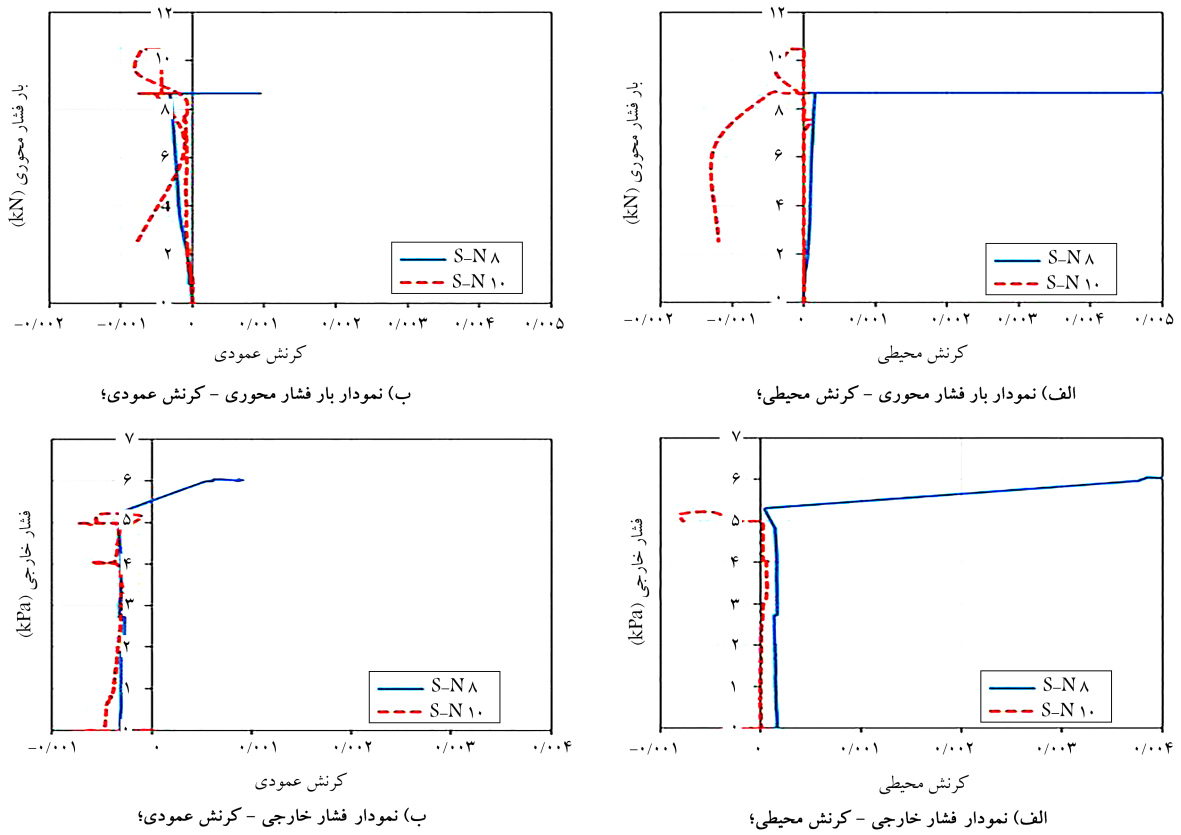
در شکل ۷، تغییرشکل نهایی مقطع نمونه‌ها در وسط ارتفاع هر کدام از



ب) نمونه S-N ۱۰

الف) نمونه S-N ۸

شکل ۷. تغییر شکل نهایی مقطع نمونه‌ها در وسط ارتفاع هر کدام از بخش‌های جداگانه‌ی پوسته‌ی استوانه‌یی.



ب) نمودار بار فشار محوری - کرنش عمودی؛

الف) نمودار بار فشار محوری - کرنش محیطی؛

ب) نمودار فشار خارجی - کرنش عمودی؛

الف) نمودار فشار خارجی - کرنش محیطی؛

شکل ۸. منحنی‌های آزمایشگاهی کرنش پوسته‌های استوانه‌یی.

محوری باعث ایجاد کرنش فشاری در جهت عمودی پوسته‌ی استوانه‌یی شده و به دلیل ضریب پواسون، کرنش کششی در جهت محیطی صورت گرفته است.^[۲۰]

در شکل‌های (۸ پ و ت)، نمودار فشار خارجی در برابر کرنش‌های محیطی و عمودی به ترتیب مشاهده می‌شود که مطابق آن‌ها، اعمال فشار خارجی باعث گسترش کرنش فشاری در جهت عمودی و کرنش کششی و فشاری در جهت محیطی شده است، به طوری که کرنش‌های ایجاد شده‌ی به محل قرارگیری کرنش‌سنج‌ها و نیز به موقعیت موج‌های کمانش بستگی دارند. اگر در اثر ایجاد موج کمانشی، تغییر شکل به سمت داخل باشد، کرنش مثبت شده به صورت فشاری (منفی) است. در صورت

۴. مقایسه با نتایج تئوری

طبق استاندارد EN-۱۹۹۳-۱-۶^[۱۸] بارکمانشی پوسته‌های استوانه‌یی با ضخامت متغیر گام به گام به طوری که هر بخش از پوسته‌ی استوانه‌یی دارای ضخامت t

جدول ۲. طول و ضخامت مؤثر برای نمونه‌ی پوسته‌ی استوانه‌یی.

نمونه	قطر (mm)	نوشتار چن و همکاران ^[۳]		استاندارد EN-۱۹۹۳-۱-۶ ^[۱۸]	
		طول مؤثر (mm)	ضخامت مؤثر (mm)	طول مؤثر (mm)	ضخامت مؤثر (mm)
۵°	۲۵°	۰/۳۵۷	۲۷۷/۷	۰/۳	

موج کمانش در قسمت‌های نازک جداره و در محل تغییر ضخامت صفحه قرار می‌گیرد، هر چند طول کمانش ممکن است اندکی بلندتر نیز باشد. برای به دست آوردن ضخامت معادل و طول مؤثر، یکسری محاسبات انجام می‌شود. به طوری که ابتدا $l'_{eff} = h_1$ در نظر گرفته می‌شود و ضخامت معادل از طریق رابطه‌ی ۳ و فشار خارجی منجر به کمانش با توجه به طول مؤثر ($l'_{eff} = h_1$) و قرار گرفتن پوسته‌ی استوانه‌یی در گروه استوانه با ارتفاع کوتاه، متوسط، یا بلند محاسبه می‌شود. این روند برای $l'_{eff} = h_2, \dots, l'_{eff} = h_n$ تکرار و فشار خارجی منجر به کمانش برای هر کدام از طول‌های مؤثر محاسبه می‌شود. کمترین مقدار فشار خارجی منجر به کمانش، به عنوان بار بحرانی انتخاب و ضخامت و طول مربوط به آن بار بحرانی به عنوان ضخامت معادل و طول مؤثر انتخاب می‌شود. برای پوسته‌ی استوانه‌یی آزمون شده، طول و ضخامت معادل مطابق روابط ۱ الی ۳، در جدول ۲ ارائه شده است.

معادله‌ی اندرکنش غیرخطی برای کمانش پوسته‌های استوانه‌یی زمانی که تحت بار فشار محوری و فشار خارجی قرار می‌گیرند، توسط آدلند و میلر^[۱۷] (۱۹۷۸) پیشنهاد شده است. معادله‌ی نیمه‌تجربی آدلند، زمانی که پوسته‌ی استوانه‌یی تحت ترکیب بار فشارهای محوری و خارجی قرار می‌گیرد، به صورت رابطه‌های ۵ و ۶ است.^[۱۷]

$$\left(\frac{\sigma_x}{\sigma_{E,x}} + \frac{\sigma_\theta}{\sigma_{E,\theta}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{yp}^*}{\sigma_{yp}} \right) < 1 \quad (5)$$

$$(\sigma^*)^2 = \sigma_x^2 + \sigma_\theta^2 - \sigma_x \sigma_\theta \quad (6)$$

که در آن، $\sigma_{E,x}$ و $\sigma_{E,\theta}$ مطابق روابط ۷ و ۸ به دست می‌آیند:

$$\sigma_{E,x} = \alpha_x \sigma_{cr,x} \quad (7)$$

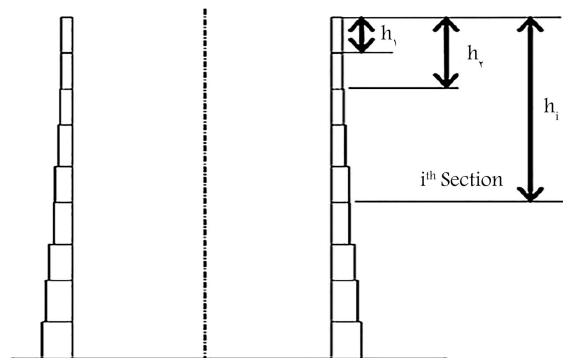
$$\sigma_{E,\theta} = \alpha_\theta \sigma_{cr,\theta} \quad (8)$$

σ_x تنش فشار محوری است که در آن، کمانش تحت بارگذاری ترکیبی رخ می‌دهد. σ_θ تنش محیطی ایجاد شده، تحت فشار خارجی یکنواخت P و برابر با $(\frac{PR}{t})$ و σ_{yp} تنش تسلیم مصالح فولاد مصرفی است. در بررسی حاضر، مقدار تنش محیطی از طریق رابطه‌ی ۹ محاسبه می‌شود:

$$\sigma_\theta = \left(\frac{PR}{t_{eq}} \right) \quad (9)$$

که در آن، P فشار خارجی یکنواخت، R شعاع پوسته‌ی استوانه‌یی و t_{eq} ضخامت معادل به دست آمده برای پوسته‌ی استوانه‌یی است. در روابط ۷ و ۸، $\sigma_{cr,\theta}$ و $\sigma_{cr,x}$ تنش‌های بحرانی برای پوسته‌ی استوانه‌یی با ضخامت ثابت تحت بار فشار محوری خالص و یا فشار خارجی خالص هستند. همچنین α_θ و α_x به ترتیب عامل کاهش برای فشار محوری خالص و فشار یکنواخت خارجی خالص است. مقادیر و روابط مربوط به پارامترهای مذکور در استاندارد EN-۱۹۹۳-۱-۶^[۱۸] ذکر شده است.

با توجه به اینکه مقدار ناکاملی هندسی ایجاد شده در نمونه‌ی آزمایش، بعد از ساخت و نصب برابر ۵/۰ میلی‌متر به دست آمده است؛ بنابراین، نمونه‌ی ساخته شده طبق بررسی‌های صورت‌گرفته براساس استاندارد EN-۱۹۹۳-۱-۶^[۱۸] در



شکل ۹. تعریف پارامتر h_i .

و طول l_i بوده و تحت بار فشار محوری قرار گرفته باشد، با بار کمانشی پوسته‌ی استوانه‌یی که دارای طول کلی L (طول کلی پوسته‌ی استوانه‌یی) و ضخامتی برابر با کوچک‌ترین ضخامت بخش پوسته‌ی استوانه‌یی است، یکسان است. در استاندارد مذکور، بار کمانش پوسته‌های استوانه‌یی با ضخامت دیواره‌ی گام به گام که تحت فشار خارجی قرار می‌گیرند، ابتدا با تقسیم ارتفاع پوسته به سه بخش مجازی با طول و ضخامت‌های جداگانه محاسبه می‌شود. در مرحله‌ی بعد، پوسته‌ی استوانه‌یی که سه پوسته‌ی استوانه‌یی ساختگی مجزا دارد، با پوسته‌ی استوانه‌یی معادل با ضخامت دیواره‌ی یکنواخت برابر t_a (رابطه‌ی ۱) و طول مؤثر مطابق رابطه‌ی ۲ جایگزین می‌شود.^[۲۷]

$$t_a = \frac{1}{l_a} \sum_a l_j t_j \quad (1)$$

$$l_{eff} = \frac{l_a}{\kappa} \quad (2)$$

که در آن‌ها، l_a ارتفاع قسمت بالایی پوسته‌ی استوانه‌یی و κ ضریب بدون بُعد، نشان‌دهنده‌ی اثر سختی قسمت‌های پایینی پوسته‌ی استوانه‌یی است که از طریق نمودارهای موجود در استاندارد EN-۱۹۹۳-۱-۶^[۱۸] قابل محاسبه است. چن^۹ و همکاران^[۲۱] (۲۰۱۱)، یک رابطه‌ی تئوری مطابق روابط ۳ و ۴ را برای تعیین ضخامت دیواره‌ی معادل به صورت ضخامت ثابت برای پوسته‌های استوانه‌یی با ضخامت متغیر گام به گام در زمانی که تحت فشار خارجی یکنواخت قرار می‌گیرند، پیشنهاد دادند.

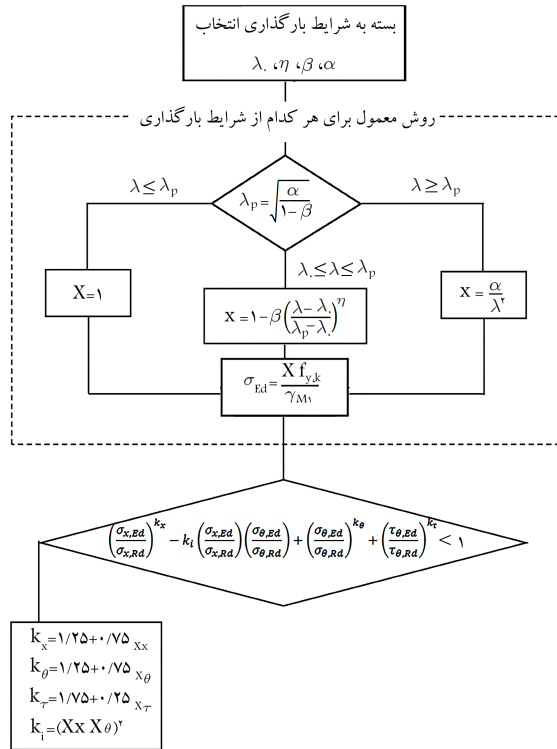
$$t_{eq}^2 = \left(\frac{1}{l'_{eff}} \right) \sum_{i=1}^n \left[t_i^2 (\chi_i - \chi_{i-1}) \right], \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

$$\chi_i = \left(h_i - \frac{l'_{eff}}{2\pi} \sin \frac{2\pi h_i}{l'_{eff}} \right) \quad (4)$$

که در آن، l'_{eff} طول مؤثر پوسته‌ی استوانه‌یی و h_i فاصله از بالای پوسته تا پایین قسمت i ام مطابق شکل ۹ است. توجه شود که در روابط ۳ و ۴ زمانی که $i = 1$ باشد، $h_0 = 0$ و $\chi_0 = 0$ است. در روش ذکر شده، فرض بر این است که ارتفاع

جدول ۳. طول و ضخامت مؤثر برای نمونه‌ی پوسته‌ی استوانه‌یی ذکر شده در نوشتار فضلعی پور و همکاران (۲۰۲۱) [۲۰]

قطر (mm)	نوشتار چن و همکاران [۳]		استاندارد EN-۱۹۹۳-۱-۶ [۱۸]	
	طول مؤثر (mm)	ضخامت مؤثر (mm)	طول مؤثر (mm)	ضخامت مؤثر (mm)
۶۰۰	۳۰۷/۵	۰/۳۶	۳۰۰	۰/۳۳



شکل ۱۰. نمودار محاسبه‌ی رابطه‌ی اندرکنش موجود در استاندارد EN-۱۹۹۳-۱-۶ [۱۸]

و همکاران (۲۰۲۱) [۲۰] (نمونه‌های S-N۲۰، S-N۱۰، S-N۲) نیز در جدول ۴ ارائه شده است. نمونه‌های اخیر، مشخصات هندسی متفاوتی در مقایسه با نمونه‌های ذکر شده در نوشتار حاضر داشتند که تحت بار فشار محوری متفاوت قرار گرفته بودند، اما در تمامی نمونه‌ها شروع کمانش در مرحله‌ی دوم و در زمان اعمال فشار خارجی رخ داده است. طول و ضخامت معادل به‌دست آمده از روابط ۱ الی ۳ برای نمونه‌های ذکر شده در مرجع اخیر [۲۰] در جدول ۳ ارائه شده است.

با توجه به اینکه مقدار ناکاملی هندسی ایجاد شده در نمونه‌های آزمایش موجود در نوشتار فضلعی پور و همکاران (۲۰۲۱) [۲۰]، بعد از ساخت و نصب، برابر ۰/۲۵ و ۰/۵ میلی‌متر بوده است، لذا نمونه‌های ساخته شده طبق بررسی‌های صورت گرفته براساس استاندارد EN-۱۹۹۳-۱-۶ [۱۸] در کلاس A و کیفیت عالی قرار گرفتند. مابقی محاسبات مانند نمونه‌ی S-N۸ صورت گرفته است. نتایج بررسی‌ها در جدول ۴ به طور خلاصه ارائه شده است.

نتایج مربوط به نمونه‌های نوشتار فضلعی پور و همکاران (۲۰۲۱) [۲۰] نشان می‌دهد که با افزایش مقدار بار فشار محوری، روابط تئوری ۵ و ۱۰ به صورت محافظه‌کارانه عمل کرده‌اند؛ به طوری که فشار خارجی به‌دست آمده از طریق روابط تئوری برای نمونه‌ی S-N۲۰، حدود ۵۰ الی ۸۰ درصد کمتر از نتایج آزمایشگاهی بوده است.

کلاس A و کیفیت عالی قرار می‌گیرد. لذا بر این اساس می‌توان مقادیر عامل کاهش برای فشار محوری خالص و فشار یک‌نواخت خارجی خالص را از استاندارد EN-۱۹۹۳-۱-۶ [۱۸] محاسبه کرد. رابطه‌ی دیگر برای اندرکنش پوسته‌ی استوانه‌یی زمانی که تحت بارگذاری ترکیبی فشار محوری، فشار خارجی و نیروی برشی قرار گرفته باشد، مطابق رابطه‌ی ۱۰ است که در استاندارد EN-۱۹۹۳-۱-۶ [۱۸] معرفی شده است.

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}}\right)^{k_x} - k_i \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}}\right) \left(\frac{\sigma_{\theta,Ed}}{\sigma_{\theta,Rd}}\right) + \left(\frac{\sigma_{\theta,Ed}}{\sigma_{\theta,Rd}}\right)^{k_{\theta}} + \left(\frac{\tau_{\theta,Ed}}{\tau_{\theta,Rd}}\right)^{k_{\tau}} < 1 \quad (10)$$

که در آن، مقادیر مربوط به گروه اندرکنش تنش‌های فشاری، غشایی و برشی پوسته‌ی استوانه‌یی هستند. مقادیر k_x ، k_{θ} و k_{τ} پارامترهای اندرکنش کمانش و $\sigma_{x,Rd}$ ، $\sigma_{\theta,Rd}$ و $\tau_{\theta,Rd}$ به ترتیب مقادیر مربوط به تنش‌های کمانش طراحی تحت فشار محوری خالص، فشار خارجی خالص، و نیروی برشی هستند. نحوه‌ی محاسبه پارامترهای مذکور در استاندارد EN-۱۹۹۳-۱-۶ [۱۸] ذکر شده و لازم به ذکر است مقدار تنش برشی در مطالعه‌ی حاضر صفر است. نحوه‌ی محاسبه به‌طور خلاصه در نمودار شکل ۱۰ مشاهده می‌شود. در بررسی حاضر، مقدار $\sigma_{\theta,Ed}$ از طریق رابطه‌ی ۱۱ محاسبه شده است:

$$\sigma_{\theta,Ed} = \left(\frac{PR}{t_{eq}}\right) \quad (11)$$

که در آن، P فشار خارجی یک‌نواخت، R شعاع پوسته‌ی استوانه‌یی و t_{eq} ضخامت معادل به‌دست آمده برای پوسته‌ی استوانه‌یی هستند. در روابط ۵، ۶ و ۱۰، مقادیر $\sigma_{x,Ed}$ و σ_x برابر با تنش محوری حاصل از اعمال بار فشار محوری معادل ۸/۶۵ کیلو نیوتن به اضافه‌ی تنش محوری ایجاد شده توسط مکش به دلیل وجود سقف بوده است که مطابق رابطه‌ی ۱۲، محاسبه شده است:

$$\sigma_x = \sigma_{x,Ed} = \frac{N}{\sqrt{\pi} R t_{eq}} + P \left(\frac{R}{\sqrt{\pi} t_{eq}}\right) \quad (12)$$

که در آن، N مقدار بار فشار محوری است. فشار خارجی منجر به کمانش (P) با استفاده از روابط ۵ و ۹، برای پوسته‌ی استوانه‌یی با ضخامت و ارتفاع معادل ذکر شده در جدول ۲ محاسبه و با نتیجه‌ی حاصل از آزمایش مقایسه شده‌اند. نتایج محاسبات در جدول ۳ ارائه شده‌اند.

لازم به ذکر است در نمونه‌ی S-N۱۰ به دلیل اینکه در هنگام خرابی، نیروی محوری ۸/۶۵ کیلو نیوتن وارد شده و در لحظه‌ی خرابی تنش محوری مربوط به نیروی ۸/۶۵ کیلو نیوتن محاسبه شده است؛ مقادیر فشار خارجی به‌دست آمده از روابط نیمه‌تجربی ۵ و ۱۰، برای هر دو نمونه‌ی S-N۸ و S-N۱۰ یکسان بوده است. اما به دلیل شروع کمانش در مرحله‌ی اعمال فشار محوری در نمونه‌ی S-N۱۰، نمونه‌ی اخیر در فشار خارجی کمتری نسبت به نمونه‌ی S-N۸ دچار خرابی شده است. برای بررسی بیشتر روابط تئوری، نتایج مربوط به مدل‌های نوشتار فضلعی پور

جدول ۴. مقایسه‌ی ظرفیت کمانشی حاصل از نتایج آزمایشگاهی با نتایج تئوری.

نمونه	بار فشاری محوری (kN)	فشار خارجی (kPa)	رابطه‌ی ۵		رابطه‌ی ۱۰	
			طول و ضخامت موثر ^[۱۸]	ضخامت موثر ^[۳]	طول و ضخامت موثر ^[۱۸]	ضخامت موثر ^[۳]
S-N۸	۸/۶۵	۶/۰۲	درصد فشار خارجی خطا	درصد فشار خارجی خطا	درصد فشار خارجی خطا	درصد فشار خارجی خطا
S-N۱۰	۸/۶۵	۵/۱۸	۳/۰۱	۳/۰۱	۴۱/۸۹	۷/۰۳
S-N۲	۱/۷۸	۴/۷۳	۲	۴/۸۳	۲۱	۵/۹۶
S-N۱۰	۱۰/۲۳	۵/۸۷	۳/۰۱۵	۴۸/۶	۱۸/۴۰	۴/۷۹
S-N۲۰	۲۰/۰۷	۵/۲۰	۰/۹۸	۸۱/۱۵	۶۵/۱۹	۱/۸۱

- افزایش ۱۷/۴ درصدی نیروی فشار محوری در مدل S-N۱۰ نسبت به مدل S-N۸ علی‌رغم اینکه در مرحله‌ی دوم و موقع اعمال فشار خارجی، بار فشار محوری برای هر دو نمونه یکسان بوده است، باعث کاهش حدود ۱۴ درصدی ظرفیت کمانش پوسته‌ی استوانه‌ی شده است.
- زمانی که اولین موج کمانشی در اثر نیروی محوری ایجاد شده است، در پوسته‌ی نازک‌تر تغییرشکل‌های بیشتری ایجاد شده و تعداد موج بیشتری نیز در این بخش از پوسته‌ی استوانه‌ی به‌وجود آمده است. همچنین خرابی سریع‌تر اتفاق افتاده و سازه سریع‌تر دچار ناپایداری شده است.
- موج‌های کمانشی ایجادشده تحت اثر بارگذاری ترکیبی بار فشارهای محوری و خارجی، ترکیبی از موج‌های ناشی از بار محوری (گودی‌های ایجاد شده در ضخامت نازک‌تر) و موج‌های محیطی نیم‌سینوسی ناشی از فشار خارجی بوده‌اند.
- با افزایش مقدار فشار محوری، روابط تئوری ۵ و ۱۰ بسیار محافظه‌کارانه عمل می‌کنند، به طوری که اختلاف فشار خارجی به‌دست آمده از طریق روابط تئوری برای نمونه‌ی S-N۲۰ با نتایج آزمایشگاهی بیشینه‌ی ۸۰٪ بوده است.
- مدل اصلاح شده‌ی پیشنهادی چن و همکاران (۲۰۱۱)^[۳]، همبستگی نزدیکی با نتایج آزمایشگاهی داشته است. به طوری که فشار کمانشی به‌دست آمده برای سه نمونه‌ی S-N۲ و S-N۱۰ از نوشتار فضلع‌لی‌پور^{۱۱} و همکاران (۲۰۲۱)^[۲۰] و نمونه‌ی S-N۸ از روابط آدلند (۱۹۷۸)^[۱۷] و استاندارد EN-۱۹۹۳-۱-۶^[۱۸] به ترتیب و به طور میانگین، حدود ۱۸ و ۱۹ درصد با نتایج آزمایشگاهی اختلاف نشان داده‌اند.

رفتار کمانشی پوسته‌های استوانه‌ی به نیروی محوری اعمال شده، بسیار حساس است. از این رو با کاهش مقدار فشار محوری، اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و روابط تئوری کمتر شده است. به طوری که فشار خارجی منجر به کمانش به‌دست آمده از طریق روابط ۵ و ۱۰ برای نمونه‌ی S-N۲ با در نظر گرفتن مدل اصلاح شده توسط استاندارد EN-۱۹۹۳-۱-۶ همبستگی خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشته است (اختلاف حدود ۲٪).

با مقایسه‌ی کلی نتایج مشاهده می‌شود که فشار خارجی منجر به کمانش با در نظر گرفتن مدل اصلاح شده توسط چن و همکاران (۲۰۱۱)^[۳]، همبستگی خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشته است. به طوری که اختلاف فشار خارجی منجر به کمانش به‌دست آمده از طریق رابطه‌ی ۵ با نتایج آزمایشگاهی برای سه نمونه‌ی S-N۲ و S-N۱۰ از نوشتار فضلع‌لی‌پور و همکاران (۲۰۲۱)^[۲۰] و نمونه‌ی S-N۸ از روابط آدلند (۱۹۷۸)^[۱۷] بین ۱۴ تا ۲۱ درصد و این اختلاف برای رابطه‌ی ۱۰، حدود ۱۹ تا ۲۰ درصد بوده است.

۵. نتیجه‌گیری

در نوشتار حاضر، رفتار پوسته‌های استوانه‌ی با ضخامت‌های مختلف تحت بارگذاری ترکیبی فشار محوری و فشار خارجی به‌صورت آزمایشگاهی و تئوری بررسی شده است. تغییرات ظرفیت کمانشی پوسته‌ی استوانه‌ی تحت بارهای فشاری محوری مختلف و همچنین مودهای کمانشی ایجادشده ارزیابی شده و این نتایج به‌دست آمده است:

11. Fazlalipour

پانوشتها

1. Hutchinson
2. Galletly
3. Shen and Chen
4. Winterstetter
5. dial indicator
6. strain gauge
7. dimple wave
8. half-sine circumferential waves
9. Chen
10. Odland & Miller

منابع (References)

1. de WIT, J. "Steel vertical cylindrical storage Tanks", Butterworth & Co. Ltd. (1973).
2. Azzuni, E. and Guzey, S. "Comparison of the shell design methods for cylindrical liquid storage tanks", *Eng. Struct.*, **101**, pp. 621-630 (2015).

3. Chen, L., Michael Rotter, J. and Doerich, C. "Buckling of cylindrical shells with stepwise variable wall thickness under uniform external pressure", *Eng. Struct.*, **33**(12), pp. 3570-3578 (2011).
4. Godoy, L.A. "Buckling of vertical oil storage steel tanks: Review of static buckling studies", *Thin-Walled Struct.*, **103**, pp. 1-21 (2016).
5. Chen, Z., Yang, L., Cao, G. and et al. "Buckling of the axially compressed cylindrical shells with arbitrary axisymmetric thickness variation", *Thin-Walled Struct.*, **60**, pp. 38-45 (2012).
6. Fazlalipour, N., Showkati, H. and Eyvazinejad Firouzsalar, S. "Buckling of cylindrical shells with stepwise wall thickness subjected to combined loading", International Congress on the Phenomenological Aspects of Civil Engineering (2021).
7. Firouzsalar, S.E. and Showkati, H. "Thorough investigation of continuously supported pipelines under combined pre-compression and denting loads", *Int. J. Press Vessel Piping*, **104**, pp. 83-95 (2013).
8. Eyvazinejad Firouzsalar, S., Showkati, H. and et al. "Free-spanning and base-supported tubes subjected to combined axial compression and indentation loads", *J. Constr. Steel Res.*, **161**, pp. 341-354 (2019).
9. Aghajari, S., Abedi, K. and Showkati, H. "Buckling and post-buckling behavior of thin-walled cylindrical steel shells with varying thickness subjected to uniform external pressure", *Thin-Walled Struct.*, **44**(8), pp. 904-909 (2006).
10. Hutchinson, J. "Buckling of imperfect cylindrical shells under axial compression and external pressure", *AIAA J.*, **3**, pp. 1968-1970 (1965).
11. Galletly, G.D., James, S., Kruzelecki, J. and et al. "Interactive buckling tests on cylinders subjected to external pressure and axial compression", *J. Press Vessel Technol.*, **109**(1), pp. 10-18 (1987).
12. Shen, H. and Chen, T. "Buckling and postbuckling behaviour of cylindrical shells under combined external pressure and axial compression", *Thin-Walled Struct.*, **12**(4), pp. 321-334 (1991).
13. Winterstetter, T.A. and Schmidt, H. "Stability of circular cylindrical steel shells under combined loading", *Thin-Walled Struct.*, **40**(10), pp. 893-910 (2002).
14. Wang, B., Yang, M., Zeng, D. and et al. "Post-buckling behavior of stiffened cylindrical shell and experimental validation under non-uniform external pressure and axial compression", *Thin-Walled Struct.*, **161**, p. 107481 (2021).
15. Pourkhorshidi, S. and Abedi, K. "05.16: Stability behavior of graded dented cylindrical steel shells under the action of combined external and axial pressure", *Special Issue: Proceedings of Eurosteel*, **1**(2-3), pp. 1162-1171 (2017).
16. Mahboubi Nasrekani, F. and Eipakchi, H. "Analytical solution for buckling analysis of cylinders with varying thickness subjected to combined axial and radial loads", *Int. J. Press Vessel Pip.*, **172**, pp. 220-226 (2019).
17. Odland, J. "Buckling resistance of unstiffened and stiffened Circular Cylindrical Shell structures", *Royal Norwegian Council for Scientific & Indus Res.*, **6**(3), pp. 2-22 (1978).
18. EN 1993-1-6: Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-6: Strength and stability of shell structures (1993).
19. ASTM Standard E8/E8M-13a, "Standard test methods for tension testing of metallic materials", (2013).
20. Fazlalipour, N., Showkati, H. and Eyvazinejad Firouzsalar, S. "Buckling behaviour of cylindrical shells with stepwise wall thickness subjected to combined axial compression and external pressure", *Thin-Walled Struct.*, **167**, pp. 108195 (2021).
21. Showkati, H., Pourmirza, M. and Yousefieh, A. "Tests on the buckling capacity of cylindrical shells under circumferential imperfection", *Shell Struct. Theory Appl. - Proc. 9th SSTA Conf.*, pp. 145-148 (2010).
22. Lancaster, E.R., Calladine, C.R. and Palmer, S.C. "Paradoxical buckling behaviour of a thin cylindrical shell under axial compression", *Int. J. Mech. Sci.*, **42**(2000), pp. 843-865 (2000).
23. Wang, B.; Zhu, S.; Hao, P. and et al. "Buckling of quasi-perfect cylindrical shell under axial compression: A combined experimental and numerical investigation", *Int. J. Solids Struct.*, **130-131**, pp. 232-247 (2018).
24. Ifayefunmi, O. "Buckling behavior of axially compressed cylindrical shells: Comparison of theoretical and experimental data", *Thin-Walled Struct.*, **98**, pp. 558-564 (2016).
25. Maali, M., Cuneyt Aydın, A., Showkati, H. and et al. "Longitudinal imperfections on thin walled cylindrical shells", *J. Civ. Environ. Eng.*, **08**, pp. 2-11 (2018).
26. Yang, L., Chen, Z., Chen, F. and et al. "Buckling of cylindrical shells with general axisymmetric thickness imperfections under external pressure", *Eur. J. Mech.*, **38**, pp. 90-99 (2013).
27. Taraghi, P., Showkati, H. and Firouzsalar, S.E. "The performance of steel conical shells reinforced with CFRP laminates subjected to uniform external pressure", *Constr. Build. Mater.*, **214**, pp. 484-496 (2019).