

تأثیر ناکاملی‌های حلقوی بر ظرفیت باربری محوری پوسته‌های استوانه‌ای جدار نازک*

محمد پورمیرزا^(۱) محمدعلی لطف‌اللهی‌یقین^(۲) علی یوسفیه^(۳) حسین شوکتی^(۴)

چکیده ظرفیت باربری محوری، رفتار کمانشی و فراکمانشی سازه‌های پوسته‌ای جدار نازک، به وجود ناکاملی‌های هندسی بسیار حساس می‌باشد. این ناکاملی‌ها ممکن است در فرآیند نورد، جابه‌جایی، نصب و یا جوشکاری حاصل گردند. یکی از انواع ناکاملی‌ها که در اثر عمل جوشکاری به وجود می‌آید و گزارش‌های زیادی از تأثیر کاهنده‌ی آن بر ظرفیت باربری محوری در دست است، ناکاملی‌های حلقوی است. علی‌رغم بررسی‌های نسبتاً وسیع بر روی اثر ناکاملی‌ها بر ظرفیت کمانشی محوری سازه‌های پوسته‌ای جدار نازک، مشاهده شده است که اکثر این تحقیقات بر وجود ناکاملی‌های اعوجاجی بر روی پوسته متمرکز شده‌اند و تحقیقات جامع و کاملی بر روی ناکاملی‌های حلقوی و خصوصاً تا تأثیر گسترده‌ی این نوع ناکاملی بر ظرفیت محوری صورت نگرفته که مورد توجه تحقیق حاضر است. هم‌چنین در این مقاله سعی شده است که با استفاده از برنامه‌ی ABAQUS، اثر متقابل دو ناکاملی بر روی هم و بر روی ظرفیت محوری سازه‌های جدار نازک در حالات مختلف تحلیل و تعیین گردد.

واژه‌های کلیدی کمانش، فراکمانش، ناکاملی حلقوی، تحلیل غیرخطی، نمونه کامل

The Effect of Circumferential Imperfections on Axial Load Carrying Capacity of Thin-Walled Cylindrical Shells

M. Pourmirza M.A. Lotfollahi Yaghin A. Yousefieh H. Showkati

Abstract The load carrying capacity, buckling and post-buckling behavior of cylindrical thin-walled shells exposed to axial loads are very sensitive to imperfections in the initial geometry. These imperfections are invariably caused by an assortment of manufacturing processes like displacing, installing or welding; one of the most important imperfections caused by welding that has been reported to have an essential detrimental effect on the buckling resistance of these shells under axial load is circumferential imperfections. Despite many determinations of the effect of imperfections on axial load carrying capacity of cylindrical thin-walled shells, the major part of these studies are concentrated on the existence of imperfections on the shell wall, and a comprehensive research on circumferential imperfections and their effects on axial load carrying capacity has not been performed. This is the main subject of this research. Also in this paper, the interaction of two imperfections on each other and on the load carrying capacity of cylindrical shells in various cases are analyzed and determined using a finite element program (ABAQUS).

Key Words Buckling, Post-Buckling, Circumferential Imperfection, Non-Linear Analysis, Perfect Specimen.

* نسخه‌ی اول مقاله در تاریخ ۸۹/۳/۲ و نسخه‌ی نهایی آن در تاریخ ۸۹/۸/۲۳ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) کارشناس ارشد سازه، عضو باشگاه پژوهشگران جوان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مراغه

(۲) نویسنده‌ی مسئول، دانشیار، دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

(۳) کارشناس ارشد سازه، عضو باشگاه پژوهشگران جوان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان

(۴) دانشیار، گروه عمران، دانشکده‌ی فنی، دانشگاه ارومیه

مقدمه

وجود ناکاملی‌های اولیه‌ی هندسی، فارغ از هر نوع روش ساخت، در سازه‌های فولادی اجتناب ناپذیر است. یکی از مهم‌ترین این ناکاملی‌ها در اثر عملیات جوشکاری حاصل می‌شود. سیلوهای فلزی، مخازن بزرگ ذخیره‌ی نفت و مایعات و اکثر سازه‌های فولادی جدار نازک عظیم، از قرارگیری چندین پانل دارای انحناء در کنار یکدیگر تشکیل شده و معمولاً به منظور اتصال صفحات به یکدیگر، از عملیات جوشکاری استفاده می‌شود [1].

یک نوع از ناکاملی‌هایی که در اثر عملیات جوشکاری بر روی پوسته‌ی انواع سازه‌های جدار نازک فولادی به وجود می‌آید، ناکاملی حلقوی است که در اثر جوشکاری لبه‌ی صفحات پایین به صفحات بالا و به صورت یک حلقه‌ی پیوسته در پیرامون پوسته‌ی سازه رخ می‌دهد. بر طبق گزارشات و بررسی‌های گذشته، این نوع ناکاملی می‌تواند تأثیر زیادی بر میزان افت ظرفیت باربری این نوع سازه‌ها داشته باشد [2].

در هنگام تحقیق بر روی تأثیر ناکاملی‌های حلقوی بر میزان افت ظرفیت محوری، چند نکته حائز اهمیت است: اول این که اگر در سازه‌ای یک ناکاملی حلقوی کامل وجود داشته باشد، رابطه‌ی میزان عمق هندسه ناکاملی با افت ظرفیت و شکل کمانش آن چگونه خواهد بود. دوم آن که اگر هندسه و عمق ناکاملی ثابت فرض شود، طول ناکاملی (بر حسب درجه) چه رابطه‌ای با میزان افت ظرفیت باربری محوری سازه خواهد داشت. در این تحقیق، سعی شده است تمرکز بر روی تأثیر گستردگی ناکاملی (طول ناکاملی) بر میزان افت ظرفیت باربری محوری سازه‌های جدار نازک استوانه‌ای معطوف گردد. در پایان نیز اثر متقابل دو ناکاملی ۱۰° در دو وضعیت متفاوت بررسی شده و نتایج حاصل از آن در مقاله‌ی حاضر گزارش می‌گردد.

تحقیقات گذشته

نخستین پیشگویی‌ها برای به دست آوردن مقاومت کمانشی استوانه‌ها تحت بار محوری فشاری توسط لورنز (۱۹۰۸-۱۹۱۱) و تیموشنکو (۱۹۱۰-۱۹۱۴) و ساتول

(۱۹۱۴) انجام گرفت. نتایج این بررسی‌ها همگی منحصر به پوسته‌های استوانه‌ای بدون ناکاملی بود که در آن‌ها فرض بر پوسته‌ای با طولی متعارف و بارگذاری متقارن و خطی در لبه بود. هم‌چنین فرض شده بود که رفتار مصالح پوسته، کاملاً خطی باشد [3].

با توجه به روابط کلاسیک، تنش کمانشی بحرانی δ_{cl} از فرمول زیر به دست می‌آید که در آن ضریب پواسون پوسته برابر ۰/۳ در نظر گرفته شده است:

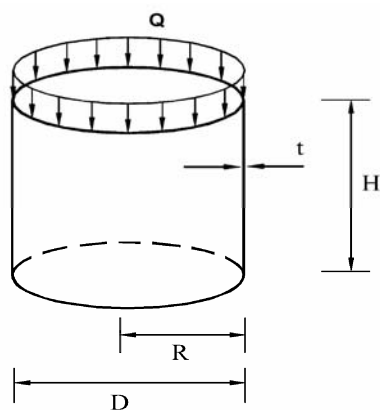
$$\delta_{cl} = \frac{E}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \frac{t}{R} \approx 0.605 \frac{Et}{R} \quad (1)$$

که در این رابطه، R ؛ شعاع استوانه، t ؛ ضخامت پوسته و E ؛ مدول الاستیسیته یانگ می‌باشد. معمولاً از این فرمول برای نرمال کردن نتایج پوسته بدون ناکاملی استفاده می‌شود.

یکی از مقالاتی که بر روی تأثیر ناکاملی‌های حلقوی در اثر عملیات جوشکاری بر روی سازه‌های پوسته‌ای استوانه‌ای جدار نازک نوشته شده است، مربوط به بری و هم‌کاران می‌باشد [3]. در این تحقیق، یک ناکاملی متقارن محوری بر روی پوسته نمونه‌ای به شعاع ۵۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۵۰۰ میلی‌متر، تحت بار محوری در نظر گرفته شده است. چندین نمونه در آزمایشگاه تست شده و سپس در رایانه مدل‌سازی و آنالیز گشته‌اند. هم‌چنین در مقاله‌ی دیگری پیچر و هم‌کاران، بر روی اشکال مختلف ناکاملی که ممکن است در اثر عملیات جوشکاری بر روی پوسته این قبیل سازه‌ها حادث شود، تحقیق نموده‌اند [2]. در نهایت چند شکل مختلف ناکاملی حلقوی متناسب با شرایط عملی و واقعی معرفی گردیده است. شکل ناکاملی حلقوی که در تحقیق حاضر استفاده گردیده، از همین مقاله اقتباس شده است.

مقاومت کمانشی پوسته‌های استوانه‌ای و مخازن تحت بار محوری فشاری، توسط کیم و هم‌کاران نوشته شده است [4]. در این مقاله، سعی شده است تا رابطه‌ی عملی‌تری برای طراحی این سازه‌ها به دست آید که در

برابر یک در نظر گرفته شود که در شکل (۱) آمده است. در ضمن اتخاذ این تصمیم به دلیل اثرگذاری ناچیز این پارامتر بر نتایج تحلیل قابل توجیح می باشد؛ اما در اکثر مقالات، ضریب لاغری های (R/t) مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در تحقیق حاضر به جای بررسی یک ناکاملی با هندسه ی ثابت و طول های مختلف بر روی چند نوع (R/t) متفاوت، اثر سه ناکاملی حلقوی با اعماق متفاوت بر روی یک نمونه با (R/t) ثابت، مطالعه شده است. علت این تصمیم، وابستگی پارامتر عمق ناکاملی به ضخامت پوسته (t) می باشد (چون این نوع ناکاملی معمولاً در اثر عمل جوشکاری به وجود آمده و متناسب با ضخامت پوسته تولید می شود) و در صورتی که (R/t) عوض شود، عمق ناکاملی نیز تغییر خواهد کرد. چنانچه علاوه بر مقدار (R/t)، عمق ناکاملی نیز تغییر پیدا کند، دو گروه، وجه اشتراکی جهت مقایسه نخواهند داشت و استخراج نتیجه ای واحد و نهایی که عمومیت داشته باشد، ممکن نخواهد بود. بر این اساس، یک نمونه ی استوانه ای ثابت با مشخصاتی مطابق جدول (۱) مورد تحلیل قرار گرفت که در آن، ارتفاع و شعاع نمونه برابر ۲۲/۵ سانتی متر و ضخامت پوسته ی نمونه، ۴ میلی متر در نظر گرفته شده است.



شکل ۱ جزئیات پوسته ی استوانه ای کامل، تحت بار محوری

آن بر روی هندسه با ناکاملی و بدون ناکاملی پوسته بحث شده است. به منظور به دست آوردن ظرفیت کمانشی، از تحلیل عددی استفاده شده است. هم چنین تاثیر مخازن ساخته شده بر روی پی های کاملاً نرم و سخت، بررسی و با یکدیگر مقایسه شده است. در این مقاله ملاحظه می گردد که با افزایش میزان عمق ناکاملی اولیه ی هندسی، مقاومت کمانشی مخزن به صورت چشم گیری کاهش می یابد.

یوسفیه، تأثیر ناکاملی های حلقوی کامل و متقارن محوری را بر ظرفیت کمانشی و فراکمانشی پوسته های استوانه ای جدار نازک، به روش المان های محدود مورد مطالعه قرار داده است [۵]. این تحقیق نشان می دهد که این نوع سازه ها بسیار حساس به عمق ناکاملی می باشند. در ادامه ی این تحقیق، اثر اندرکنش دو ناکاملی حلقوی کامل بر روی ظرفیت کمانشی پوسته بررسی شده است. البته در این پژوهش، تمامی ناکاملی هایی که مورد مطالعه قرار گرفته اند، به صورت ایده آل فرض شده و ناکاملی، کل محیط پیرامونی پوسته را به صورت کاملاً تئوریک و ثابت اشغال کرده است.

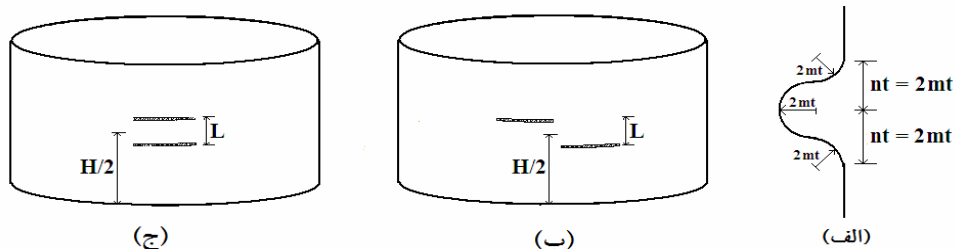
هم چنین پورمیرزا به بررسی آزمایشگاهی این نوع ناکاملی و تأثیرات آن بر ظرفیت و شکل کمانشی پوسته های جدار نازک پرداخته است [۶]. در این تحقیق از ۱۲ نمونه با ۲ (R/t) مختلف که هر کدام دارای ناکاملی ای با طول و عمق خاص بود، استفاده شده است. در این بررسی آزمایشگاهی، اثر ناکاملی های حلقوی بر دو نوع جنس پوسته از فولاد سخت و نرم بررسی شده است.

مدل سازی نمونه استوانه ای با ناکاملی

هندسه استوانه. با توجه به تحقیقات گذشته بر روی سازه های استوانه ای جدار نازک و هم چنین با توجه به محدودیت های آیین نامه های مربوطه [7,8]، تصمیم بر آن شد تا در همه ی مدل ها نسبت ارتفاع به شعاع ثابت و

جدول ۱ مشخصات مکانیکی و هندسی نمونه‌ها

ν	E (پاسکال)	ضخامت (میلی متر)	شعاع و ارتفاع (میلی متر)	تنش گسیختگی (MPa)	کرنش نظیر نقطه گسیختگی (%)
۰/۳	۲/۱*۱۰ ^{۱۱}	۰/۴	۲۲۵	۳۲۰	۳۱



شکل ۲ شکل ناکاملی و موقعیت قرارگیری آن بر روی پوست (الف) هندسه‌ی ناکاملی حلقوی (ب) نحوه‌ی قرارگیری دو ناکاملی در حالت E (ج) نحوه‌ی قرارگیری دو ناکاملی در حالت P

که یکی از آن‌ها کامل و بدون نقص هندسی می‌باشد و بقیه هر کدام دارای یک و یا دو ناکاملی حلقوی متفاوت می‌باشند که براساس جدول (۲) نام گذاری می‌شوند.

جدول ۲ نحوه‌ی نام گذاری نمونه‌ها

حالت دو ناکاملی	طول ناکاملی (درجه)	فاصله‌ی دو ناکاملی (میلی متر)	عمق ناکاملی (t)	
			L	D
۱	A	۱۰	D01	L0
۱/۵	B	۱۵	D02	L1
۲	C	۲۰	D03	L2
		۲۵	D04	L3
		۳۰	D05	L4
		۴۵	D06	L5
		۶۰	D07	
		۷۵	D08	
		۹۰	D09	
		۱۸۰	D10	

به طور مثال، BD01L3E نشان دهنده‌ی نمونه‌ای است که در آن، عمق ناکاملی 1.5t و طول ناکاملی آن ۱۰° انتخاب شده است. هم چنین این نمونه دارای دو ناکاملی

حالات ناکاملی. با توجه به تحقیقات گذشتگان و مقالات نگارش شده در این راستا [9,10] مناسب ترین هندسه‌ی ناکاملی که با واقعیت هم خوانی بیشتری دارد، در مقاله‌ی حاضر انتخاب گردیده است که در شکل (۲-الف) نمایش داده می‌شود. این شکل ناکاملی، از ترکیب چهار ربع دایره با شعاع mt (برابر ضخامت پوسته) تشکیل شده است. هم چنین به منظور بررسی اندرکنش دو ناکاملی بر روی ظرفیت و شکل کمانشی پوسته، دو ناکاملی مشابه و موازی با فواصل مختلف و به دو صورت متفاوت مدل گردیدند. در حالت اول، دو ناکاملی موازی، در امتداد یکدیگر ولی در ترازهای متفاوت، قرار گرفته‌اند که از این به بعد به اختصار حالت E نامیده می‌شود، شکل (۲-ب). در حالت دوم، دو ناکاملی موازی، کاملاً بر روی هم قرار دارند که این حالت به اختصار حالت P نام گذاری می‌شود، شکل (۲-ج). فاصله‌ی قائم مرکز به مرکز دو ناکاملی با (L) نمایش داده می‌شود.

جزئیات نمونه‌ها و نحوه‌ی نام گذاری. به منظور بررسی صحیح و دقیق رفتار کمانشی و فراکمانشی پوسته‌های استوانه‌ای جدار نازک دارای ناکاملی حلقوی تحت بار محوری، از ۶۴ مدل تحلیلی استفاده شده است

المان S4R استفاده شده است که مخصوص پوسته‌ها بوده و ۶ درجه آزادی برای هر گره در نظر می‌گیرد. این المان جهت استفاده در تحلیل‌های خطی و غیرخطی (مصالح و هندسه) طراحی شده است و در مواردی که تغییر شکل‌های بزرگ رخ می‌دهد کاربرد دارد. در ضمن به منظور بالا بردن دقت تحلیل، در قطایی از استوانه که در آن ناحیه، ناکاملی حلقوی وجود دارد، فاصله شعاعی مش‌بندی پوسته نصف سایر نقاط در نظر گرفته شده است.

جهت بارگذاری، از بار گسترده بر روی لبه پوسته‌ای استفاده شده است. شرایط تکیه‌گاهی در لبه پایینی به صورت کاملاً مفصلی است؛ یعنی هر ۳ مؤلفه جابه‌جایی بسته فرض شده و ۳ مؤلفه چرخش باز هستند. در لبه‌ی بالایی، تنها مؤلفه‌ی شعاعی بسته شده است. در شکل (۳) نمونه‌ای از نوع بارگذاری، شرایط مرزی لبه‌ها و نوع مش‌بندی ارائه شده است.

هم‌چنین بر روی نمونه‌ی بدون نقص هندسی و نمونه‌هایی که دارای ناکاملی حلقوی ۳۶۰ درجه بوده‌اند، مدهای کمانشی اول و سوم حاصل از تحلیل خطی Buckling با ضرایب کاهنده، به نمونه‌ی تحلیلی غیرخطی اعمال گردیده است تا این نمونه‌ها از حالت کاملاً متقارن خارج شده و با واقعیت تطبیق، بیشتری پیدا کنند.

بررسی نتایج تحلیل

مقایسه‌ی بین نتایج تئوریک و عددی. همان‌طور که ذکر گردید در اکثر مقالاتی که در مورد پوسته‌های استوانه‌ای جدار نازک تحت بار محوری تحقیق شده است، به منظور نرمال کردن نتایج نمونه‌های بدون نقص هندسی از فرمول (۱) استفاده می‌گردد. اما این فرمول تئوریک، تنها در مواردی صادق است که تکیه‌گاه‌ها به صورت کلاسیک مفروض گردد (فقط مؤلفه شعاعی بسته

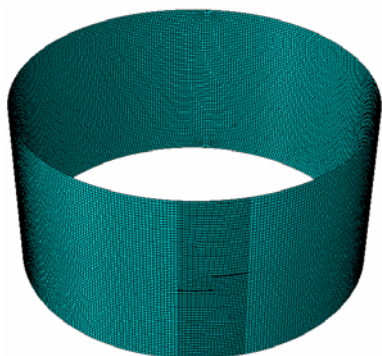
به حالت E با فاصله‌ی ۳۰ میلی‌متر از یکدیگر می‌باشد. در ضمن، یک نمونه بدون ناکاملی حلقوی با نام Perfect نیز در نظر گرفته شده است.

نکات مدل‌سازی و تحلیل. برای به دست آوردن بار کمانشی مدل‌های اجزاء محدود در برنامه‌ی ABAQUS، می‌توان از دو روش خطی (مقادیر ویژه) و روش غیرخطی استفاده نمود. در روش اول با توجه به نتیجه‌ی آنالیز استاتیکی خطی و نیروهای داخلی، ماتریس سختی هندسی کل سازه محاسبه شده و سپس با استفاده از معادلات تعادل، مقادیر ویژه به دست می‌آیند. در روش خطی، مود شکل‌های کمانشی و ضرایب بار برای هر مود ارائه می‌گردد، اما این نوع آنالیز تنها توزیع کلی تنش و جابه‌جایی‌های نسبی را محاسبه می‌کند [11].

به منظور محاسبه‌ی مقادیر واقعی جابه‌جایی و تنش‌ها می‌بایست از روش‌های غیرخطی بهره برد. به همین منظور در این تحقیق از روش طول قوس (Riks) استفاده گردیده است. این روش، روشی مناسب برای حل مسائل کمانشی غیرخطی محسوب می‌شود. با استفاده از این شیوه، می‌توان مسیرهای تعادلی بار-جابه‌جایی را دنبال نمود. در این متد، برخلاف روش‌های حل مقادیر ویژه، رفتار مصالح و هندسه غیرخطی در نظر گرفته می‌شود و این امر باعث نزدیکی نتایج متد (Riks) (که در واقع روشی غیرخطی است) با واقعیت خواهد شد. تنها نکته‌ای که در هنگام به کارگیری این روش تحلیلی باید در نظر داشت، این است که ممکن است برنامه پس از رسیدن به نقطه‌ی دو شاخگی، مسیر ناپایدار را دنبال کند که باعث منفی شدن مقادیر بار می‌گردد که با کوتاه اختیار کردن طول حداکثر کمان، می‌توان از این امر جلوگیری نمود. برای انتخاب نوع المان نیز با توجه به تحقیقات گذشته [1] و راهنمای کتابخانه المان‌های نرم‌افزار [12] از

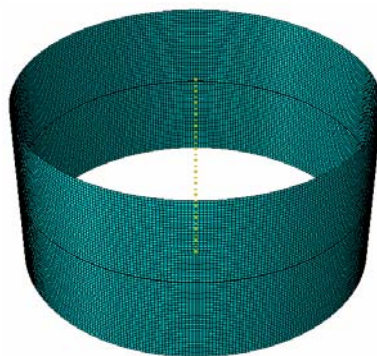
کمانشی ۱۳۰۱۸ کیلوگرم به دست آمد که تصویر این نمونه پس از کمانش در شکل (۴-الف) آمده است. از طرف دیگر و بر اساس فرمول (۱) و مشخصات هندسی و مکانیکی نمونه، بار کمانشی ۱۳۰۲۰ کیلوگرم به دست می‌آید که تقریباً با مقدار به دست آمده از تحلیل خطی برنامه ABAQUS برابری می‌کند. این تساوی، نشان می‌دهد که روند مدل‌سازی، معرفی مشخصات مکانیکی و شرایط مرزی و بارگذاری نمونه صحیح می‌باشد.

باشد). به همین دلیل، این فرمول در مورد نمونه‌های مورد بحث در این مقاله صادق نبوده و به علت عدم وجود فرمولی مشابه برای این حالت تکیه‌گاهی و یا انجام تحقیقی مشابه، امکان مقایسه‌ی مستقیم نمونه‌های کامل و یا دارای نقص هندسی وجود ندارد؛ لذا جهت کالیبره نمودن نمونه‌ها و اطمینان از صحت نتایج تحلیل‌ها، تکیه‌گاه‌های نمونه بدون ناکاملی حلقوی به صورت پیش فرض فرمول فوق و به صورت متقارن تبدیل گشت و تحلیل خطی انجام گردید. براساس این تحلیل خطی، بار



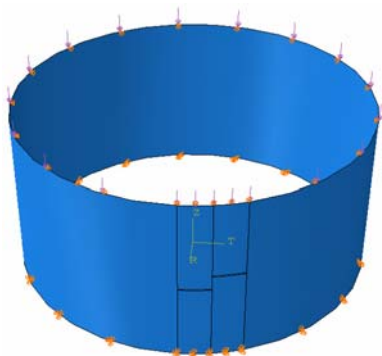
(CD1L3E)

(ب)



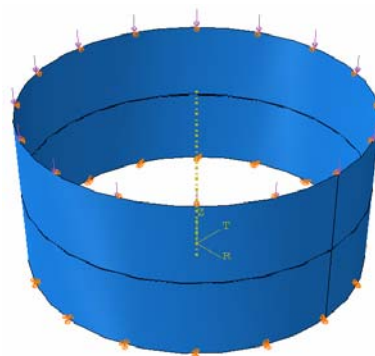
(BD11)

(الف)



(CD1L3E)

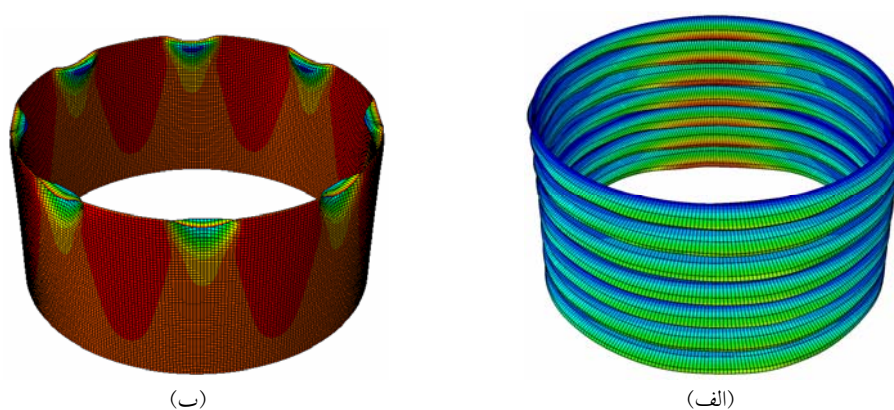
(د)



(BD11)

(ج)

شکل ۳ نحوه‌ی مش بندی، بارگذاری و شرایط مرزی نمونه‌ها: الف) مش بندی مدل با یک ناکاملی، ب) مش بندی مدل با دو ناکاملی، ج) شرایط مرزی و بارگذاری نمونه با یک ناکاملی، د) شرایط مرزی و بارگذاری نمونه با دو ناکاملی



شکل ۴ الف) نمونه‌ی بدون نقص هندسی با تکیه‌گاه متقارن تحت تحلیل خطی، ب) نمونه‌ی بدون نقص هندسی با تکیه‌گاه نامتقارن، تحت تحلیل غیر خطی

تقسیم شده است، شکل (۵). نمودار دوم براساس بارهای کمانشی تنظیم گردیده که از روی این نمودار به راحتی تأثیر طول‌های مختلف ناکاملی بر ظرفیت کمانشی پوسته‌ها قابل مشاهده است، شکل (۶). شایان ذکر است که در این اشکال (P_p) معرف بار کمانشی نمونه‌ی بدون ناکاملی حلقوی (Perfect)، (P_U) نشان دهنده‌ی بار کمانشی نمونه‌ها و (δ_r) تغییر مکان شعاعی نمونه است.

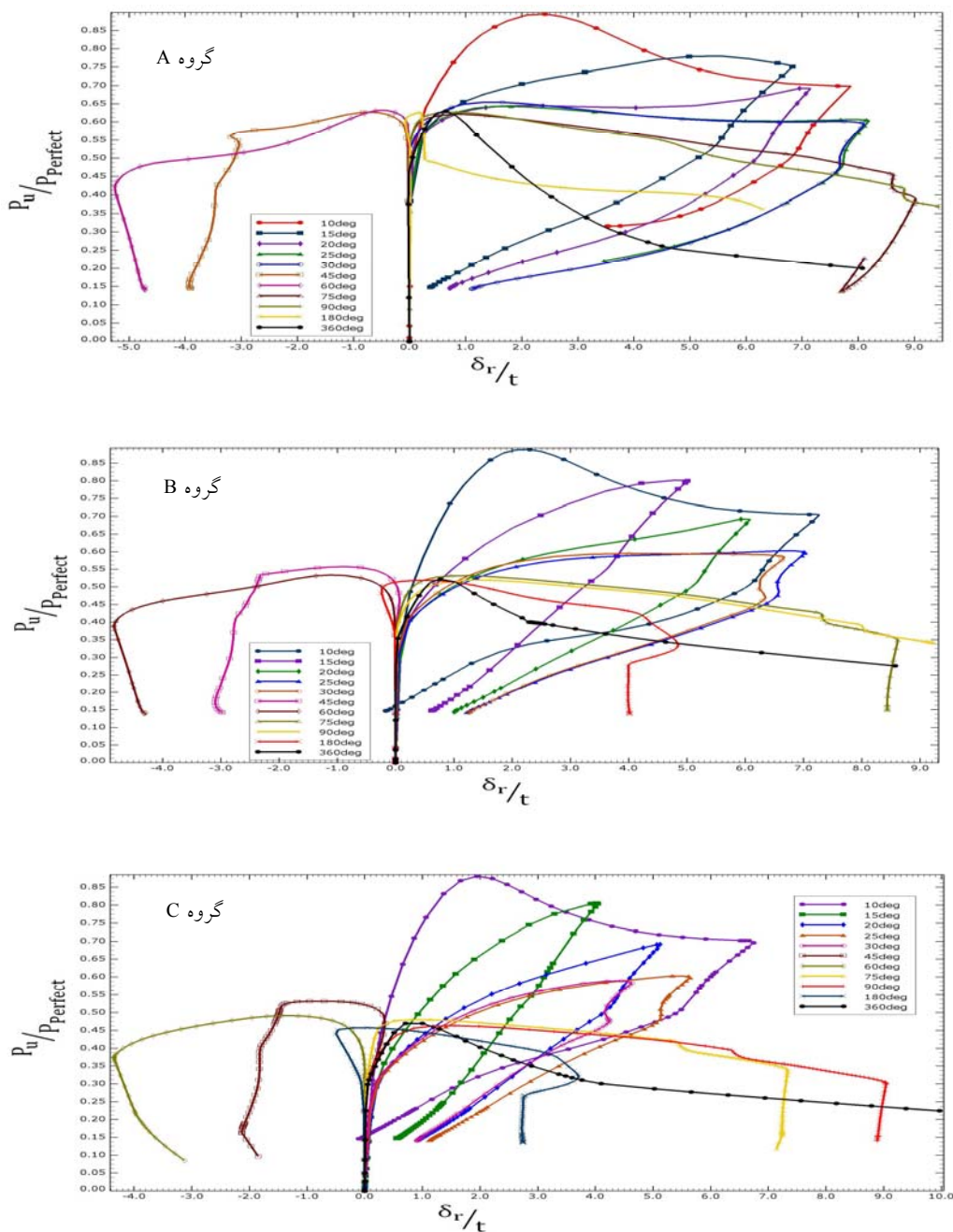
در شکل (۵) نمودار بار - تغییر مکان مربوط به سه گروه مختلف A تا C آمده است. اولین مطلبی که از این نمودارها دریافت می‌شود، کاهش میزان افت ظرفیت باربری محوری با آهنگ کاهش طول ناکاملی است که البته روند آن خطی و ثابت نیست. با دقت در نمودارها، مشاهده می‌گردد در نمونه‌هایی که در آن‌ها میزان افت ظرفیت کم تر از حالت 360° بوده، حالت فراکمانش همراه با تغییر مکان نسبتاً زیاد پدید آمده است. هر چه میزان افت ظرفیت کم تر شود، این حالت فراکمانشی مشهودتر خواهد شد. در چند نمونه حتی ظرفیت فراکمانشی از ظرفیت کمانشی نمونه نیز بیشتر شده و برخلاف نمونه‌های با طول ناکاملی زیاد، خرابی به صورت ناگهانی و با شیب تند رخ نمی‌دهد. برای بررسی تأثیر طول‌های مختلف ناکاملی بر ظرفیت کمانشی پوسته‌ها ابتدا در جدول (۳)، درصد افت ظرفیت باربری محوری هر یک از نمونه‌ها نسبت به حالت کامل، آمده است. بر

پس از اطمینان از صحت نتایج، این بار همان نمونه با شرایط مرزی اولیه (قید مماسی تکیه‌گاه پایینی نمونه بسته فرض شده است) تحت آنالیز غیرخطی گرفت و بار کمانشی این نمونه (که مقدار آن تقریباً 7075 کیلوگرم می‌باشد) به عنوان شاخص و معیاری برای مقایسه نمونه‌ها با ناکاملی‌های متفاوت مورد استفاده قرار گرفت. در شکل (۴-ب) تصویر نمونه‌ی بدون نقص هندسی پس از تحلیل غیرخطی نشان داده می‌شود.

تأثیر طول ناکاملی. همان طور که در جدول (۱) مشاهده گردید، از 33 مدل ناکاملی با زاویه‌های مرکزی (طول‌های) مختلف از 10° تا 360° استفاده شده است که شامل 3 عمق مختلف و 11 طول متفاوت ناکاملی می‌باشد که در همه‌ی نمونه‌ها، ناکاملی در وسط ارتفاع پوسته ایجاد شده است. برای مقایسه‌ی نتایج، یک مدل نیز به صورت بدون نقص هندسی تحلیل شده است که مبنایی برای سایر حالات محسوب می‌شود. هم چنین به منظور بررسی نتایج، از دو نوع نمودار استفاده شده است؛ یک نمودار بار - تغییر مکان برای نقطه‌ای که در وسط طول ناکاملی و در حداکثر عمق آن واقع شده، رسم گردیده است. برای بی بعدسازی پارامترهای این نمودار، مقادیر محور افقی بر ضخامت پوسته (t) و مقادیر محور قائم بر مقدار بار کمانشی نمونه بدون نقص هندسی (P_p)

اساس زاویه‌ی مرکزی و برحسب درجه می‌باشد. محور قائم این نمودار نیز درصد افت ظرفیت را نسبت به حالت پوسته‌ی کامل نشان می‌دهد.

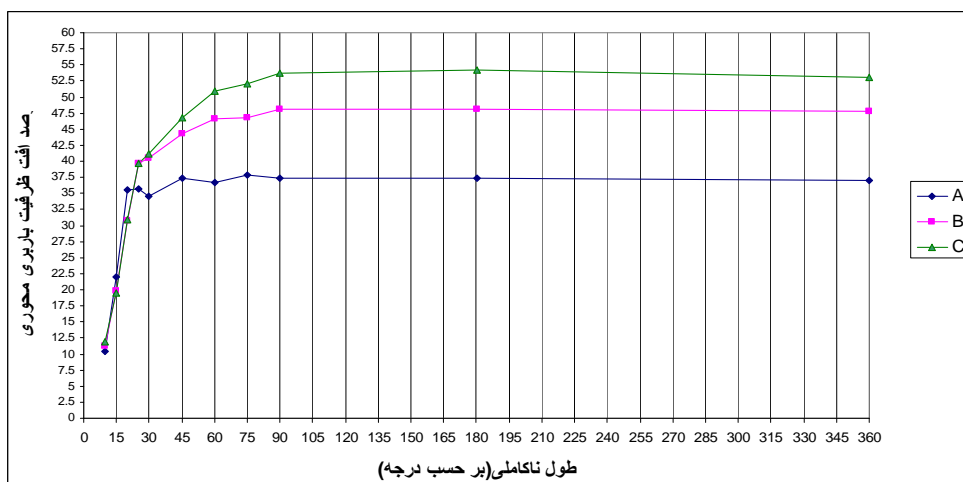
اساس اطلاعات این جدول، می‌توان نمودار (۶) را رسم نمود که در آن آهنگ تغییر ظرفیت کمانشی نمونه‌ها، نسبت به طول ناکاملی‌های حلقوی نشان داده می‌شود. در این نمودار، محور افقی، نشان دهنده‌ی طول ناکاملی، بر



شکل ۵ نمودارهای بار- تغییر مکان برای گروه‌های A تا C با طول‌های متفاوت ناکاملی

جدول ۳ درصد افت ظرفیت باربری نمونه ها با طول های متفاوت ناکاملی

گروه	$(1 - \frac{P_u}{P_p})\%$										
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11
A	۱۰/۴۸	۲۱/۹۹	۳۵/۴۹	۳۵/۷۰	۳۴/۵۷	۳۷/۳۲	۳۶/۷۷	۳۷/۸۹	۳۷/۳۱	۳۷/۴۱	۳۷/۰۹
B	۱۱/۱۷	۱۹/۸۹	۳۰/۷۸	۳۹/۷۲	۴۰/۴۸	۴۴/۲۵	۴۶/۶۳	۴۶/۸۳	۴۸/۰۹	۴۸/۱۳	۴۷/۸۳
C	۱۱/۹۲	۱۹/۵۰	۳۰/۸۴	۳۹/۶۸	۴۱/۱۰	۴۶/۸۲	۵۰/۸۷	۵۲/۰۰	۵۳/۶۸	۵۴/۲۶	۵۳/۰۳



شکل ۶ نحوه تغییرات درصد افت ظرفیت باربری محوری، به ازای میزان کاهش طول ناکاملی، مربوط به هر ۳ گروه

نزولی شدیدتری را دنبال می کنند. به عنوان مثال در گروه A، میزان افت ظرفیت باربری محوری نمونه ای با طول ناکاملی ۲۰° تقریباً برابر با حالت ۳۶۰° می باشد و در طول های کم تر از آن به شدت از میزان افت ظرفیت باربری محوری کاسته می شود؛ در حالی که همین امر در گروه C، که در آن عمق ناکاملی نسبت به حالت قبل دو برابر انتخاب شده است، در مورد نمونه هایی صادق است که طول زاویه ای ناکاملی ای کم تر از ۶۰° دارند.

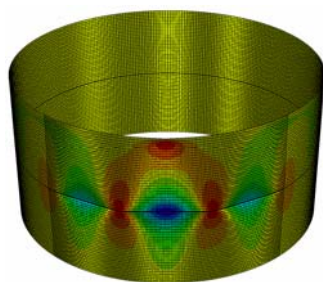
۴. هر ۳ گروه در طول ناکاملی با زاویه ای مرکزی در حدود ۱۵۰° درصد افت ظرفیت باربری محوری تقریباً برابری خواهند داشت و در ناکاملی ها با طول های زاویه ای کوتاه تر از این حد، دیگر عمق ناکاملی تعیین کننده میزان افت ظرفیت نبوده و همگی تقریباً یک میزان افت ظرفیت باربری محوری را تولید می کنند. در حقیقت می توان ناکاملی های کوتاه تر از این حد را، فرورفتگی (Dent) محسوب کرد.

از جدول (۳) و شکل (۶) چندین نتیجه حاصل می شود که مهم ترین آن ها به شرح زیر می باشند:

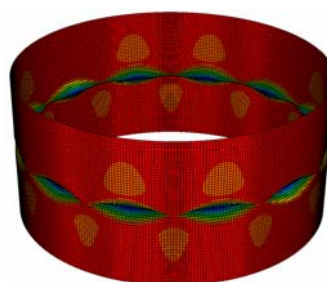
۱. با افزایش عمق ناکاملی و ثابت ماندن طول آن، میزان افت ظرفیت باربری محوری به طور چشم گیری افزایش می یابد (از حدود ۳۷٪ در حالت ۱t به ۵۳٪ در حالت ۲t).
۲. نرخ تغییر میزان افت ظرفیت باربری محوری در هر ۳ گروه، شامل دو قسمت می باشد: یک ناحیه که در آن کوتاه شدن طول ناکاملی تأثیری بر ظرفیت باربری محوری نمونه ها نداشته و مقدار آن تقریباً با حالت ۳۶۰° برابری می کند و ناحیه ای دیگر (بعد از مقدار خاصی) که با کم تر شدن طول ناکاملی، کاهش میزان افت ظرفیت باربری محوری مشاهده می شود.
۳. در هر ۳ گروه، میزان افت ظرفیت باربری محوری نمونه هایی که در آن ها طول ناکاملی از ۹۰° کم تر می باشد، تغییراتی نسبت به حالت ۳۶۰° مشاهده می گردد، اما مشهود است که این تغییرات در گروه هایی که عمق ناکاملی در آن ها بیشتر است، روند

از کمانش، کاملاً واضح به چشم می‌خورد. دلیل تولید موج‌های کمانشی در نزدیک لبه ی بالایی و در ناحیه‌ای که ناکاملی شروع و یا تمام می‌شود را می‌توان به این صورت بیان کرد که در ابتدا با اضافه شدن نیرو بر روی استوانه‌ی جدار نازک، در ناحیه‌ای که ناکاملی حضور دارد، یک کمانش اولیه (Initial Buckling) تولید می‌گردد. این ناحیه به علت کمانش اولیه، دیگر قادر به تحمل بار نخواهد بود، لذا بار بر روی سایر قسمت‌های لبه که ناکاملی ندارند، باز توزیع می‌شود و با ادامه‌ی بارگذاری نمونه از یک و یا هر دو سمت ناکاملی و در نزدیکی لبه‌ی بالایی که قید کم‌تری نسبت به تکیه‌گاه پایینی دارد و در آن تمرکز تنش به وجود آمده است، مجدداً دچار کمانش می‌گردد. بر روی نمودارهای بار-تغییر مکان (شکل (۵)) از لحظه‌ی کمانش اولیه تا کمانش ثانویه را می‌توان به صورت یک خط با شیب منفی کم مشاهده نمود. حتی در بعضی از نمونه‌ها که طول ناکاملی در آن‌ها خیلی کوتاه است، شیب این ناحیه، کمی مثبت شده و نمودار حالت فراکمانشی پیدا می‌کند (به‌طور مثال در نمودار نمونه AD03L0 در شکل (۵) که در آن حالت، فراکمانشی به وضوح مشاهده می‌گردد).

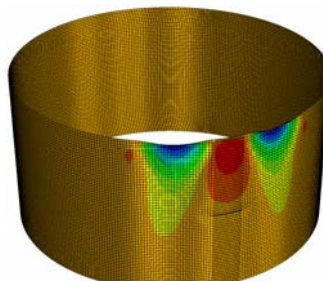
جهت بررسی چگونگی کمانش و تغییر شکل پوسته‌های استوانه‌ای جدار نازک تحت بار محوری، در شکل (۷) چند نمونه متفاوت از گروه B پس از کمانش ارائه شده است. مشاهده می‌گردد که در کلیه‌ی نمونه‌ها به جز نمونه‌ی BD11L0 که در آن طول ناکاملی 360° می‌باشد، علاوه بر ایجاد موج‌های کمانش بر روی ناحیه‌ی ناکاملی، در لبه‌ی بالایی نمونه‌ها و در محلی که ناکاملی شروع و یا پایان می‌پذیرد، یک و یا دو حفره‌ی کمانشی بزرگ تولید می‌گردد. هر چه طول ناکاملی‌ها کوتاه‌تر می‌شود، کمانش اولیه‌ای که بر روی ناحیه‌ی ناکاملی به وجود می‌آید، محدودتر گشته و حفره‌های کمانشی نزدیک به تکیه‌گاه تقویت می‌شوند. در برخی از نمونه‌ها که طول ناکاملی در آن‌ها خیلی کوتاه انتخاب شده است، (مانند نمونه BD01L0 در شکل (۷))، موج‌های کمانشی ثانویه که در نزدیکی تکیه‌گاه ایجاد می‌گردند، بر روی جهت حرکت موج‌های کمانشی اولیه که روی خود ناحیه ناکاملی به وجود آمده‌اند، تأثیر می‌گذارند و موجب حرکت معکوس آن‌ها به سمت خارج پوسته می‌شوند. این امر در نمودارهای بار-تغییر مکان شکل (۵) به صورت تغییر جهت تغییر مکان‌های اغلب نمونه‌ها پس



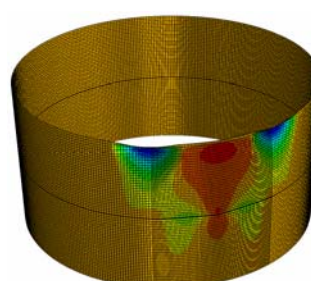
BD09L0



BD11L0



BD09L0



BD11L0

شکل ۷ تصاویر چند نمونه از گروه B پس از کمانش

اندركنش بين دو ناكاملی. همان‌طور كه در شكل (۷)

مشاهده می‌گردد، در اطراف هر ناكاملی، چندین موج تشكيل می‌شود. در حقیقت می‌توان گفت كه هر خط ناكاملی محدوده‌ای از پوسته را متأثر می‌كند. حال بررسی می‌گردد كه اگر بر روی پوسته یک نمونه بیش از یک ناكاملی وجود داشته باشد (كه در مخازن و نمونه های واقعی بدین صورت است) چه تأثیری می‌تواند بر روی هم و بر روی ظرفیت باربری محوری این سازه‌ها ایجاد نمایند. به منظور بررسی این اندركنش، می‌توان حالات بسیار زیاد و متنوعی را تصور كرد. در این راستا می‌توان به اندركنش بین چند ناكاملی با طول‌های متفاوت، اعماق مختلف و یا با حالات قرارگیری گوناگون تا اندركنش بین چند ناكاملی اشاره نمود. در این تحقیق، به‌علت محدودیت، سعی شده است دو حالت معمول كه در بخش (۲-۳) به طور كامل تشریح شده و به اختصار حالات P و E نام‌گذاری گردیدند، مورد بررسی قرار گیرد.

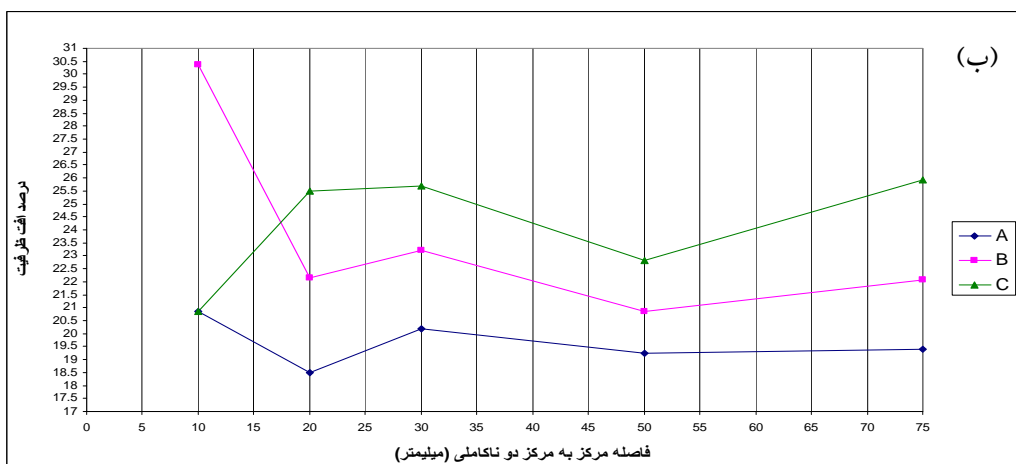
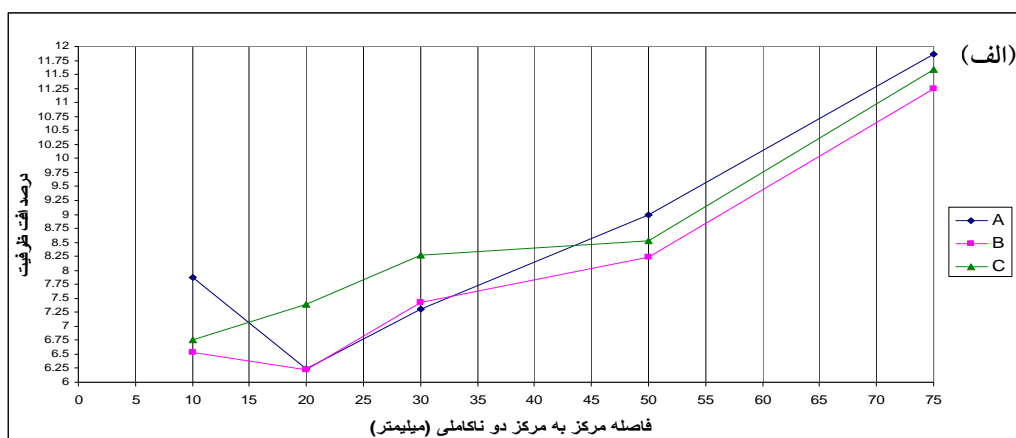
پس از آنالیز این نمونه‌ها توسط المان محدود و بررسی مقادیر مربوط به بار كمانشی حداكثر و تغییر شكل‌های حاصله و تغییرات بار- تغییرمکان (به‌علت محدودیت حجم مقاله، ارائه نشده است)، نتایج زیر قابل

ارائه می‌باشد:

۱. با توجه به درصد افت ظرفیت باربری محوری هر یک از نمونه‌ها نسبت به حالت كامل ارائه شده در جدول (۴) و شكل (۸-الف)، مشاهده می‌گردد كه در هر ۳ گروه، وجود دو ناكاملی در حالت P، اثر كاهنده‌ای بر ظرفیت كمانشی نمونه‌ها ندارد؛ بلکه تقریباً در اكثر موارد با نزدیک‌تر شدن دو ناكاملی موازی به یکدیگر درصد افت ظرفیت باربری محوری کاهش می‌یابد. به‌طور مثال، میزان افت ظرفیت باربری محور در نمونه‌ی CD01L5P كه فاصله‌ی دو ناكاملی آن ۷۵ میلی‌متر است، ۱۱/۵۸٪ و در نمونه CD01L1P كه فاصله‌ی دو ناكاملی به ۱۰ میلی‌متر تقلیل می‌یابد، درصد افت ظرفیت باربری محوری نیز به ۶/۷۶٪ نزول می‌كند. البته این روند، كاملاً خطی نبوده و ممكن است مانند نمونه AD01L1P به‌جای کاهش، افزایش افت در ظرفیت باربری محوری مشاهده گردد؛ ولی در هیچ یک از حالات، افت ظرفیت باربری محوری محسوسی، نسبت به حالتی كه تنها یک ناكاملی بر روی پوسته وجود داشته باشد، مشاهده نمی‌گردد.

جدول ۴ درصد افت ظرفیت باربری محوری نمونه‌های با دو ناكاملی، نسبت به حالت كامل

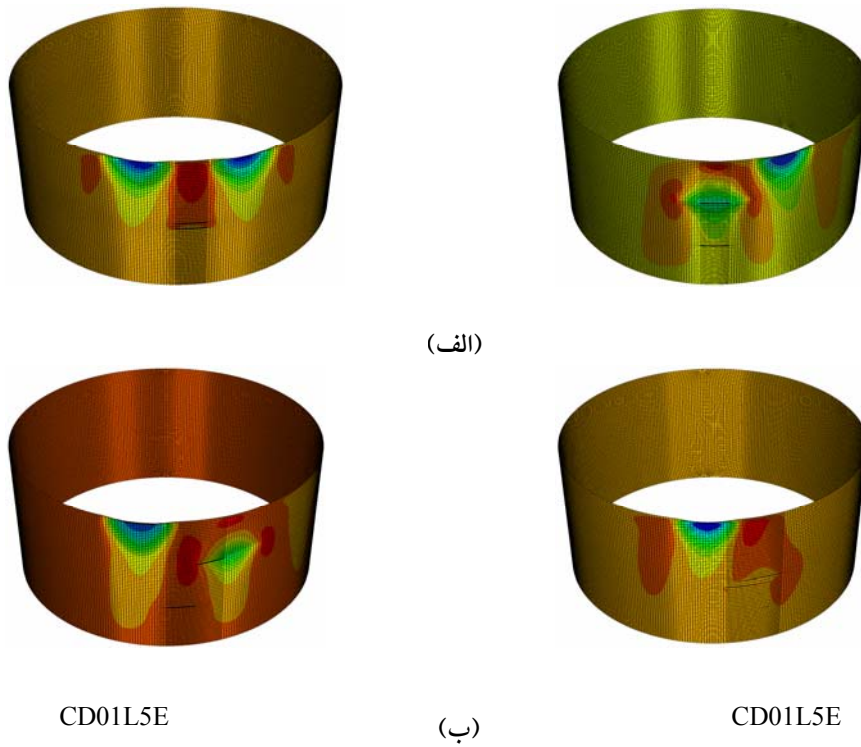
$(1 - P_u/P_p)\%$										
گروه	D01L1		D01L2		D01L3		D01L4		D01L5	
	P	E	P	E	P	E	P	E	P	E
A	۷/۸۸	۲۰/۸۵	۶/۲۴	۱۸/۴۹	۷/۳۰	۲۰/۱۹	۸/۹۹	۱۹/۲۵	۱۱/۸۶	۱۹/۴۱
B	۶/۵۳	۳۰/۳۸	۶/۲۳	۲۲/۱۶	۷/۴۳	۲۳/۲۲	۸/۲۳	۲۰/۸۶	۱۱/۲۵	۲۲/۰۸
C	۶/۷۶	۲۰/۸۵	۷/۳۹	۲۵/۵۱	۸/۲۷	۲۵/۶۸	۸/۵۲	۲۲/۸۳	۱۱/۵۸	۲۵/۹۲



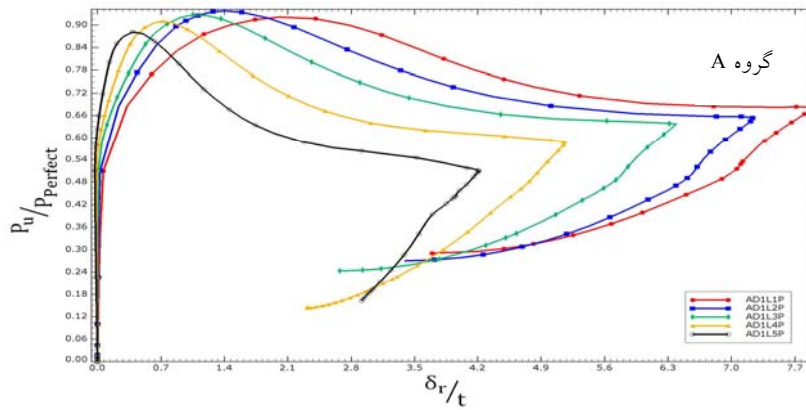
شکل ۸ نمودار درصد افت ظرفیت باربری محوری نمونه‌ها برحسب فاصله‌ی دو ناکاملی: (الف) در حالت P، (ب) در حالت E

۲. وجود دو ناکاملی در حالت E بر روی پوسته‌ی استوانه‌ای جدار نازک، می‌تواند باعث افت ظرفیت باربری محوری بیشتری نسبت به یک ناکاملی تنها تولید گردد (جدول (۴) و شکل (۸-ب)). این افزایش افت در بعضی از نمونه‌ها حتی برابر حالتی است که طول ناکاملی تک، ۲ برابر یعنی ۲۰° باشد (بطور مثال در نمونه BD01L1E). روند تغییرات نمودار شکل (۸-ب) نیز خطی نمی‌باشند؛ ولی می‌توان گفت که با کم شدن مقدار فاصله L روندی

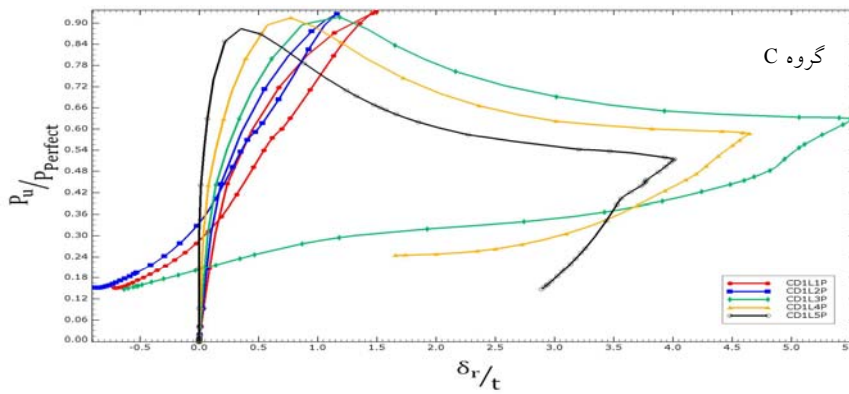
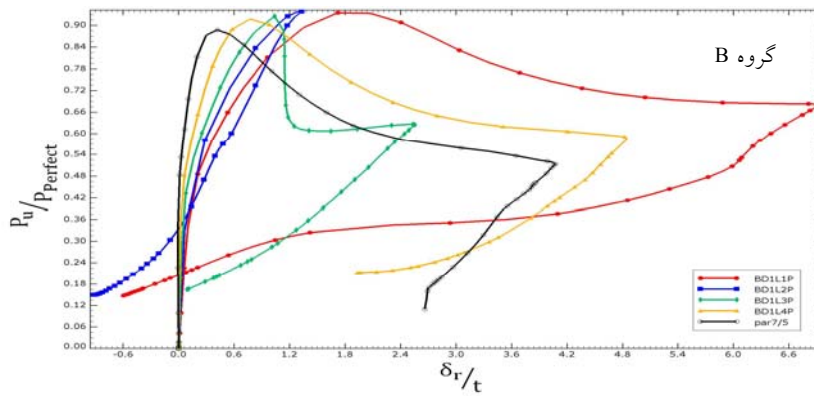
صعودی را طی می‌کند. ۳. در مدل‌های با دو ناکاملی نیز مانند نمونه‌های با یک ناکاملی، پس از وقوع یک کمانش اولیه، حفره‌های کمانشی در نزدیکی تکیه‌گاه بالایی مشاهده می‌گردد (شکل (۹)). در اکثر نمونه‌ها با تشکیل این حفره‌های کمانشی ثانویه، موج‌های کمانشی اولیه بر روی ناکاملی‌ها حرکت معکوس خود را شروع می‌کند که این امر در نمودار بار-تغییر مکان شکل‌های (۱۰) و (۱۱) کاملاً به چشم می‌خورد.



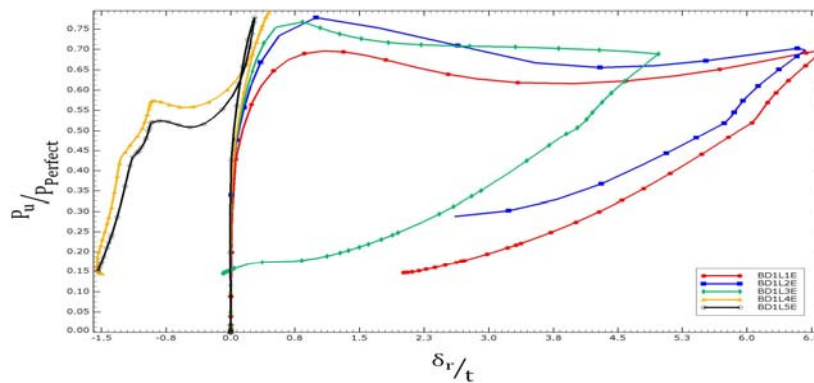
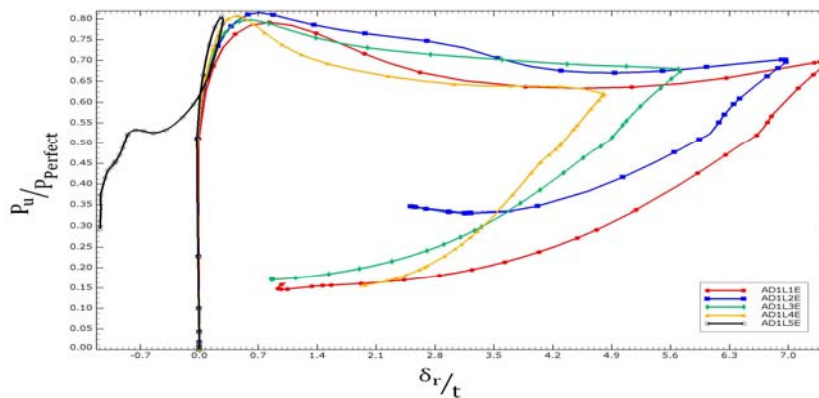
شکل ۹ تصویر چند نمونه از گروه C با دو ناکاملی مختلف حلقوی، الف) در حالت P (ب) در حالت E



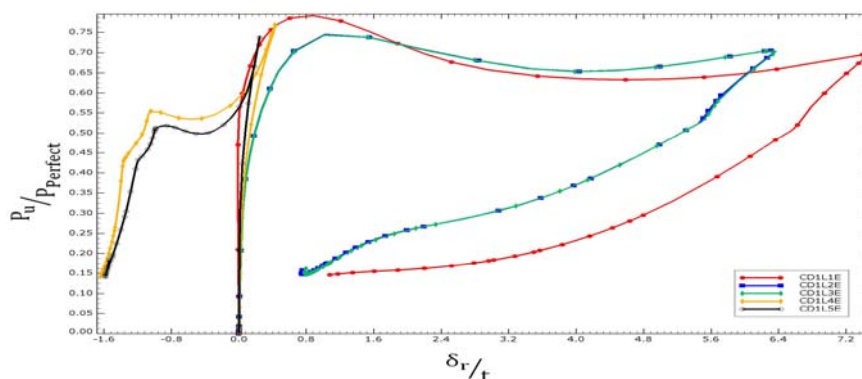
شکل ۱۰ نمودار های بار- تغییر مکان ۳ گروه برای نمونه ها با دو ناکاملی در حالت P (ادامه دارد)



ادامه‌ی شکل ۱۰ نمودارهای بار-تغییر مکان ۳ گروه برای نمونه‌ها با دو ناکاملی در حالت P



شکل ۱۱ نمودارهای بار-تغییر مکان ۳ گروه برای نمونه‌ها با دو ناکاملی در حالت E (ادامه دارد)



ادامه‌ی شکل ۱۱ نمودارهای بار-تغییر مکان ۳ گروه برای نمونه‌ها با دو ناکاملی در حالت E

که هر چه به یکدیگر نزدیک‌تر شوند، میزان افت از این حالت نیز کم‌تر خواهد شد.

۶. دو ناکاملی با طول و عمق برابر و در امتداد هم ولی در ترازهای مختلف (حالت E)، افت ظرفیت باربری محوری را ایجاد می‌کنند که از یک ناکاملی تک با همان مشخصات بیشتر بوده و در بدترین حالت، افت ظرفیتی معادل یک ناکاملی حلقوی تک با طول ۲ برابر را موجب می‌گردد. هر چه دو ناکاملی به یکدیگر نزدیک‌تر می‌شوند، این مقدار افزایش می‌یابد تا به حداکثر ذکر شده بیانجامد.

۷. نتیجه‌ی کلی حاصل از دو مورد فوق، این است که دو ناکاملی موازی و هم‌امتداد که هر یک در تراز متفاوت ایجاد شده‌اند، به مراتب اثر کاهنده و مخرب‌تری، نسبت به حالتی که دو ناکاملی موازی بر روی هم ایجاد گردیده‌اند، دارند و باعث کاهش هر چه بیشتر ظرفیت باربری پوسته می‌گردند.

۸. در طول زاویه‌ای ۱۵°، افت ظرفیتی ناکاملی‌ها با اعماق مختلف تقریباً با هم برابر می‌شود و می‌توان این طول را حد تبدیل شدن ناکاملی به فرورفتگی (Dent) دانست که دیگر عمق ناکاملی تأثیر بسزایی در میزان افت ظرفیت باربری نخواهد داشت.

سپاسگزاری. از شرکت ملی مهندسی و ساختمان نفت ایران که انجام این تحقیق را از نظر مالی و علمی مورد حمایت قرار داده است، سپاسگزاری و قدردانی می‌گردد.

نتیجه‌گیری

- وجود ناکاملی‌های حلقوی می‌توانند به میزان چشم‌گیری افت ظرفیت در باربری محوری پوسته‌های استوانه‌ای جدار نازک ایجاد نمایند (در نمونه‌ی CD10L0 تا ۵۴٪ افت مشاهده شده است).
- افت ظرفیت باربری محوری به طول ناکاملی وابسته است؛ هر چه طول ناکاملی بیشتر شود، میزان افت ظرفیت باربری محوری نیز افزایش می‌یابد. اما این امر تا رسیدن به یک طول (زاویه‌ای مرکزی) معین ادامه می‌یابد. برای هر ناکاملی حلقوی، با توجه به عمق آن، یک طول (زاویه‌ای مرکزی) مشخص وجود دارد که افزایش ناکاملی بیش از آن، دیگر موجب افزایش در افت ظرفیت باربری محوری نمی‌شود (طول زاویه‌ای ۲۰° برای ناکاملی با عمق ۱t در تحقیق حاضر).
- هر چه عمق ناکاملی کم‌تر باشد، طول حداقل ناکاملی که می‌تواند باعث افت ظرفیتی معادل یک ناکاملی ۳۶۰° را بنماید کم‌تر است.
- به‌علت ایجاد کماتش اولیه بر روی ناحیه‌ی ناکاملی و به اصطلاح، فرار این قسمت از زیر بار و باز توزیع بار، کماتش اصلی بر روی خود ناحیه‌ی ناکاملی ایجاد نمی‌گردد؛ بلکه در ناحیه‌ی تکیه‌گاهی و محلی که ناکاملی شروع و یا پایان می‌پذیرد، تشکیل می‌گردد.
- دو ناکاملی با طول و عمق برابر و به صورت موازی و بر روی هم (حالت P)، افت ظرفیت باربری محوری معادل یک ناکاملی تک با همان مشخصات را می‌کند

مراجع

1. Hübner A., Teng J.G., Saal H., "Buckling behavior of large steel cylinders with patterned welds", *International J Pressure Vessels and Piping*, 83:13-26, (2006).
2. Pircher M., Berry P., Ding X., Bridge R., "The shape of circumferential weld-induced imperfections in thin-walled steel silos and tanks", *J Thin-Walled Structures*, 39:999-1014, (2001).
3. Berry P., Rotter J., Bridge R., "Compression tests on cylinders with circumferential weld depressions", *J. Eng. Mech. ASCE*, 126(4), pp 405-413, (2000).
4. Kim S.E., Kim C.S., "Buckling strength of the cylindrical shell and tank; subjected to axially compressive loads", *J Thin-Walled Structures*, 40:329-353, (2002).
۵. یوسفیه ع. "بررسی اثر ناکاملی‌های هندسی بر رفتار کمانشی و فراکمانشی پوسته‌های استوانه‌ای جدار نازک، تحت بارگذاری محوری با استفاده از روش اجزاء محدود"، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مراغه، ایران، (۱۳۷۸).
۶. پورمیرزا م. "بررسی رفتار کمانشی و فراکمانشی مخازن دارای ناکاملی‌های هندسی، تحت بار محوری؛ به روش آزمایشگاهی"، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مراغه، ایران، (۱۳۸۸).
7. API 620 "Design and Construction of Large, Welded, Low-Pressure Storage Tanks" API 620, 10th Ed., American Petroleum Institute, Washington, D.C., (2002).
8. API 650 "Welded Tanks for Oil Storage." API 650, 11th Ed., American Petroleum Institute, Washington, D.C., (2009).
9. Pircher M., Bridge R., "The influence of circumferential weld-induced imperfections on the buckling of silos and tanks", *J Constructional Steel Research*, 57:569-580, (2001).
10. Teng J., Lin X., Rotter J.M., Ding X.I., "Analysis of geometric imperfections in full-scale welded steel silos" *J Engineering Structures*, 27: 938–950, (2005).
11. Koiter W.t., A translation of "The stability of elastic equilibrium", PhD thesis, Technische Hooige school, Delft, The Netherland, (1945).
12. ABAQUS. "Theory and user's manual", version 6.8-1, (2008).