

# بررسی عددی کمانش خطوط لوله‌ی فولادی تحت اثر بار فشاری محوری خروج از مرکز و فشار خارجی

کیا بادامچی\* (دانشجوی دکتری)

حسین شوکتی (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه ارومیه

مهندسی عمران شریف، (بهار ۱۴۰۱)  
دوره ۲ - شماره ۱/۱، شماره ۱۳۵-۱۳۳، ص. ۱/۱، پژوهشی

خطوط لوله هنگام عبور از نقاط مختلف جغرافیایی، معمولاً در معرض بارهای ترکیبی مختلفی (شامل: بارهای عرضی، طولی، عمودی و فشار هیدرواستاتیک علاوه بر فشار داخلی) قرار می‌گیرند. در نوشتار حاضر، دو نوع از بارهایی که می‌توانند تأثیرگذار باشند (فشارهای خارجی و محوری)، با استفاده از نرم‌افزار آباکوس ارزیابی شده‌اند. برای ارزیابی دقیق رفتار خطوط لوله‌ی فولادی و مشاهده‌ی نوع گسیختگی ایجاد شده در اثر بارهای معرفی شده، اتخاذ ناکاملی‌ها در تحلیل به روش عددی لازم و ضروری است. جهت صحت‌سنجی پاسخ‌های نرم‌افزار، نتایج تحلیل یک نمونه‌ی آزمایشگاهی با عددی مقایسه و مشاهده شد که همخوانی قابل قبولی بین آن‌ها برقرار است. آثار فشار محوری و نسبت قطر به ضخامت ( $D/t$ ) در ظرفیت کمانشی فشار خارجی تحلیل و بررسی و سپس مشاهده شد که با افزایش فشار محوری و نسبت قطر به ضخامت، ظرفیت کمانشی فشار خارجی کاهش می‌یابد.

واژگان کلیدی: خطوط لوله‌ی فولادی، نرم افزار آباکوس، فشار خارجی، فشار محوری، ناکاملی، نمونه‌ی آزمایشگاهی.

k.badamchi@urmia.ac.ir  
h.showkati@urmia.ac.ir

## ۱. مقدمه

خطوط لوله، ابزار اصلی صنعت نفت و گاز هستند و اغلب برای تولید و انتقال سیالات استفاده می‌شوند. محتوای داخل لوله و حرکت‌های بستر لوله ناشی از حرکت‌های گسل، زلزله، نشست و روان‌گرایی خاک می‌توانند بارهای محوری فشاری را به جداره‌ی لوله وارد کنند،<sup>[۱]</sup> و همچنین فشار هیدرواستاتیک در خط لوله‌های زیردریایی، آثار جریان گذرای هیدرولیکی به دلیل تغییرات شرایط انتهایی، همچون بستن شیر به صورت ناگهانی، خرابی پمپ و غیره می‌توانند از عوامل ایجادکننده‌ی بار فشار خارجی باشند.<sup>[۲]</sup> استفاده از خطوط لوله عمدتاً به صورت مدفون، سطحی، و در ارتفاع متداول هستند. خطوط لوله‌ی به کار رفته در ارتفاع به صورت دهانه‌ی آزاد بین تکیه‌گاه‌ها قرار می‌گیرند که علاوه بر تحمل فشار داخلی ناشی از مایع درون خود، در معرض سایر ترکیب‌های پیچیده‌ی نیرویی، همچون بارهای عمودی و عرضی و نیروی محوری ناشی از بارهای حرارتی و نیروهای مهاری و غیره قرار می‌گیرند. در نوشتار حاضر، دو نوع از بارهایی که می‌توانند تأثیرگذار باشند (بارمحوری و فشار خارجی)، بررسی شده‌اند.

## ۱.۱. بررسی خطوط لوله‌ی تحت بار محوری

تنش محوری بحرانی لوله‌ها نخستین بار توسط تیموشنکو و سوتول<sup>[۳]</sup> (۱۹۱۰)، ارائه شده است (معادله‌ی ۱):

$$\sigma_{cr} = \frac{Et}{\sqrt{3(1-\nu^2)}R} \quad (1)$$

مطابق با بررسی‌های انجام شده‌ی اخیر،<sup>[۴]</sup> متأسفانه رابطه‌ی ۱ تطابق چندانی با نتایج آزمایشگاهی نداشته است. رابطه‌ی ۱، برای نسبت شعاع به ضخامت بزرگ‌تر از ۳۰۳ مناسب بوده و کمانش ripple و bellows که توسط تیموشنکو تخمین زده شده بود، مشاهده نشده است. رابطه‌ی ۱ نباید به عنوان اهداف طراحی استفاده شود و فقط باید به نتایج آزمون آزمایشگاهی و عددی تا ارائه‌ی رابطه‌ی مناسب‌تر متکی بود؛ اگرچه بسیاری از طراحان از رابطه‌ی اخیر با ضرایب ایمنی خیلی بالایی استفاده کرده‌اند.<sup>[۴-۶]</sup>

آلان<sup>[۷]</sup> (۱۹۶۸)، رفتار لوله‌های فولادی با هندسه‌ی مختلف را تحت بار محوری فشاری بررسی آزمایشگاهی و تحلیل کرد و دریافت زمانی که بار محوری فشاری به لوله اعمال می‌شود، جدار لوله به دلیل آثار ضریب پواسون به بیرون حرکت می‌کند (مانند حالتی که لوله تحت فشار داخلی قرار گرفته است)؛ با افزایش

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۷/۲۴، اصلاحیه ۱۴۰۰/۹/۶، پذیرش ۱۴۰۰/۹/۱۵

DOI:10.24200/J30.2021.58963.3014

بار محوری، حرکت به سمت بیرون متوقف می‌شود و جدار لوله به سمت داخل حرکت می‌کند (مانند حالتی که لوله تحت فشار خارجی قرار گرفته است). قانی<sup>۲</sup> (۱۹۸۲)،<sup>[۸]</sup> رفتار لوله‌های آلیاژ آلومینیوم تحت بار محوری را بررسی کرد و لوله‌های با نسبت قطر به ضخامت بیشتر از ۶۲/۵ را به عنوان لوله‌های جدارنازک در نظر گرفت و کماتش الماسی را تحت بار محوری مشاهده کرد. همچنین با استفاده از آزمون‌های مختلف، نمودار جذب انرژی - ضخامت/قطر را استخراج کرد که می‌تواند برای استخراج ظرفیت لوله‌ها با نسبت‌های هندسی مختلف استفاده شود. اندروز<sup>۳</sup> و همکاران (۱۹۸۳)،<sup>[۹]</sup> مودهای خرابی ایجاد شده تحت بار محوری فشاری برای نسبت‌های هندسی مختلف ضخامت به قطر ( $t/D$ ) و طول به قطر ( $L/D$ ) را بررسی کردند و دریافته‌اند که چین‌های متقارن و پی در پی<sup>۵</sup>، مودهای الماسی و اولر می‌توانند برای مقادیر مختلف نسبت‌های هندسی ذکر شده ایجاد شوند.

## ۲.۱. بررسی خطوط لوله تحت بار فشار خارجی

رفتار کماتشی لوله‌ها تحت بار فشار خارجی به طور متونوعی مطالعه و روابطی برای پیش‌بینی ظرفیت کماتشی آن‌ها ارائه شده است.<sup>[۱۱]، [۱۰]، [۱۲]</sup> اندرو (۲۰۰۸)،<sup>[۱۱]</sup> با انجام آزمایش لوله‌ها تحت بار فشار خارجی با ابعاد هندسی مختلف، نموداری را استخراج کرد که با استفاده از برخی روابط تئوری ارائه شده،<sup>[۱۱]، [۱۰]</sup> می‌توان ظرفیت کماتشی واقعی لوله‌های با هندسه‌ی مختلف را که ناکاملی  $t/D$  تا  $0.134$  (ضخامت دیواره‌ی لوله) دارند، به صورت دقیق‌تری از منحنی داده شده تخمین زد (ظرفیت‌ها ضریبی از روابط تئوری است). ژیزین<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۱۱)،<sup>[۱۳]</sup> به روش تحلیل تئوری نشان دادند با افزایش ناکاملی‌ها، ظرفیت خطوط لوله تحت فشار خارجی کاهش پیدا می‌کند؛ در حالی که تغییر مکان شعاعی مربوط به فشار خارجی کماتشی، افزایش پیدا می‌کند.

## ۳.۱. بررسی خطوط لوله تحت بارهای ترکیبی

میستری<sup>۷</sup> و همکاران (۱۹۹۲)،<sup>[۱۴]</sup> رفتار کماتشی لوله‌های کامپوزیت را با روش آزمایشگاهی تحت بار فشاری محوری و خارجی یکنواخت بررسی کردند و دریافته‌اند که تأثیر مقادیر بارهای فشاری محوری سرویس و شرایط مرزی در ظرفیت کماتشی فشار خارجی لوله‌ها برای لوله‌های با نسبت طول به قطر بالا ( $L/D$ ) در مقایسه با لوله‌های با نسبت طول به قطر پایین کمتر است. کرمانوس<sup>۸</sup> و همکارش (۲۰۰۴)،<sup>[۱۵]</sup> لوله‌های فولادی در معرض فشار داخلی و خارجی را تحت بار جانبی به روش المان محدود بررسی و مشاهده کردند که فشار خارجی به‌طور قابل توجهی باعث کاهش ظرفیت بار کماتشی جانبی می‌شود. قنبری و شوکتی (۲۰۱۳)،<sup>[۱۶]</sup> نیز خطوط لوله‌ی فولادی تحت بار ترکیبی خمشی و فشار خارجی را با استفاده از تحلیل آزمایشگاهی بررسی کردند و دریافته‌اند که بار سرویس خمشی علاوه بر کاهش بار کماتشی فشار خارجی یکنواخت، باعث تغییر کرنش کششی محیطی به کرنش فشاری محیطی در نقطه‌ی میانی نمونه (محل اعمال بار خمشی) می‌شود. گنگ<sup>۹</sup> و همکاران (۲۰۱۵)،<sup>[۱۷]</sup> رفتار خطوط لوله‌ی فولادی تحت بار ترکیبی محوری کششی، ممان خمشی و فشار خارجی را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که با کاهش نسبت قطر به ضخامت ( $D/t$ )، ظرفیت کماتشی بار فشار یکنواخت خارجی و خمشی افزایش می‌یابد. تو و ژین<sup>۱۰</sup> (۲۰۲۰)،<sup>[۱۸]</sup> خطوط لوله‌ی فولادی فشاری (فشار داخلی) را تحت بار محوری فشاری خروج از مرکزیت به روش عددی بررسی کردند و نشان دادند که با افزایش فشار داخلی، ظرفیت فشاری محوری کاهش پیدا می‌کند و باعث ایجاد مود کماتشی شکمی نامتقارن<sup>۱۱</sup> می‌شود.

عیوضی نژاد فیروزسالاری<sup>۱۲</sup> و همکاران (۲۰۱۹)،<sup>[۱۹]</sup> رفتار خطوط لوله‌ی فولادی تحت بار محوری فشاری و جانبی را به صورت دهانه‌ی آزاد و بستر نگهدارنده با روش آزمایشگاهی تحلیل و بررسی کردند و نشان دادند که افزایش فشار محوری (سرویس)، مقدار بار جانبی کماتشی را به صورت چشمگیری کاهش نمی‌دهد؛ در حالی که برای حالت دهانه‌ی آزاد، باعث کاهش بار جانبی کماتش می‌شود.

با مرور منابع مختلف مشاهده می‌شود که رفتار خطوط لوله‌ی جدارنازک فولادی تحت بار محوری فشاری و فشار خارجی بررسی نشده و اطلاعات اندکی در زمینه‌ی رفتار کماتشی آن‌ها تحت بارگذاری ذکر شده در آیین‌نامه در دسترس است.<sup>[۲۰]</sup> تحلیل خطوط لوله با ضرایب ایمنی آیین‌نامه و ناکاملی‌های جزئی در نظر گرفته شده به روش تئوری، پاسخ‌های قابل اعتمادی را در اختیار قرار نمی‌دهد. در نوشتار حاضر، تغییر مکان‌ها، ظرفیت‌های کماتشی و مکانیسم گسیختگی لوله‌ها بررسی شده است.

## ۲. مشخصات هندسی نمونه‌ها و نام‌گذاری

قطر نمونه‌ها جهت بررسی پارامتریک  $120$  میلی‌متر به ضخامت‌های  $8.5/0$ ،  $1/3$ ،  $1/2$  و  $1/5$  انتخاب شده است که نسبت‌های قطر به ضخامت‌های  $140$ ،  $120$ ،  $100$  و  $92$  را به وجود می‌آورند. عملاً نسبت‌های قطر به ضخامت‌های مذکور به‌طور متداول استفاده شده‌اند.<sup>[۲۱-۲۳]</sup> مطالعات گسترده‌ی برای تعیین فشار خارجی کماتشی لوله‌ها با طول محدود انجام شده است (کمتر از طول بحرانی)<sup>[۲۴-۲۶]</sup> طول بحرانی (معادله‌ی ۲)، کمیته طولی از لوله است که آثار شرایط مرزی و افزایش طول در فشار خارجی کماتشی را بی‌اثر می‌کند.<sup>[۲۵]</sup>

$$L_{cr} = kD \times \sqrt{\frac{D}{t}} \quad (2)$$

که در آن،  $D$  و  $t$  به ترتیب قطر و ضخامت لوله هستند و  $K$  پارامتر تجربی است که مطابق رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌شود.

$$K = 0.37\pi \sqrt{1 - \nu^2} \quad (3)$$

در نوشتار حاضر، طول موردنظر برای مطالعه‌ی پارامتریک با در نظر گرفتن نسبت قطر به ضخامت پیشینه‌ی ( $D/t = 140$ )،  $1500$  میلی‌متر از طریق معادله‌ی ۲ محاسبه و برای سایر نمونه‌ها نیز همان مقدار در نظر گرفته شده است. برای سهولت بررسی، نمونه‌ها نام‌گذاری شدند؛ به عنوان مثال، نمونه با نسبت قطر به ضخامت  $80$  که تحت بارگذاری فشار خارجی که در معرض پیش فشار محوری و فشار خارجی خالص و فشار محوری خالص قرار گرفته است، با  $DTA80$  نشان داده شده است.

## ۳. مدل‌سازی عددی

رفتار کماتشی نمونه‌ها به صورت عددی بررسی شده است. در بخش حاضر، مشخصات مکانیکی مصالح و روش المان محدود معرفی شده است.

### ۱.۳. مشخصات مکانیکی مصالح

دو نمونه مطابق با استاندارد  $ASTM E8m-09/9$  جهت انجام آزمون کشش آماده شدند.<sup>[۲۶]</sup> نمودار تنش - کرنش حاصل از میانگین نتایج دو آزمون کشش در شکل ۱ مشاهده می‌شود. نمودار حاصل از شکل ۱، مطابقاً به نرم‌افزار معرفی شده است.

در یک جهت در مرکز مقطع<sup>۱۷</sup> مهار شده است ( $U_1, U_2, U_3, UR_3 = 0$ ). با انجام تحلیل‌های مختلف مشخص شد شرایط بارگذاری اخیر، مناسب‌ترین پاسخ‌ها و مودهای خرابی را با توجه به تحلیل آزمایشگاهی ارائه می‌دهد. از آلمان چهارگانه<sup>۱۸</sup> با اندازه‌ی ۱۰ میلی‌متر جهت مش‌بندی استفاده شده است. بررسی‌های عددی قبلی نشان می‌دهند که اندازه‌ی مش ذکر شده، پاسخ‌های قابل قبولی را ضمانت می‌کند.<sup>[۳۰]</sup>

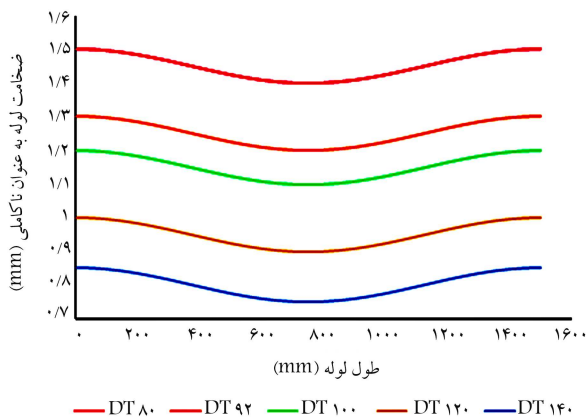
### ۳.۳. روش اعمال ناکاملی‌ها

جهت مطالعه‌ی عددی رفتار کمانشی سازه‌های جدارنازک، ناکاملی‌های هندسی به‌طور متداولی برای گسترش تغییرمکان‌ها به نرم‌افزار معرفی شدند.<sup>[۳۱-۳۹]</sup> معمولاً ناکاملی‌های هندسی بیشتر از طریق فرایند جوش‌کاری و حمل و نقل ایجاد می‌شوند. مشاهده شده است که فرم ناکاملی‌های هندسی، به عوامل مختلفی، همچون گسترش کمانش محلی<sup>۱۹</sup>، بیشینه‌ی بار کمانشی و رفتار پس‌کمانشی تأثیر می‌گذارد.<sup>[۳۳-۳۹]</sup> در نتیجه، به‌طور قابل ملاحظه‌ی الزام و ضروری است تا ناکاملی مناسبی جهت شبیه‌سازی نتایج آزمایشگاهی لحاظ شود. ناکاملی‌های استفاده شده در نوشتار حاضر، به این صورت تعریف می‌شوند:

۱. کانتیا<sup>۲۰</sup> و همکارانش مشاهده کردند ضخامت دیواره‌ی لوله می‌تواند در جهت طولی و محیطی تغییر کند.<sup>[۳۶-۳۴]</sup> با استفاده از قسمت analytical field distribution در نرم‌افزار آباکوس، معادله‌ی ۴ به نرم‌افزار آباکوس جهت تغییرات جزئی ضخامت لوله در طول آن به عنوان ناکاملی معرفی شد.

$$t_z = \alpha \cdot t + \frac{1-\alpha}{\beta} \times \cos \frac{\beta \pi z}{L} + C \quad (4)$$

که در آن،  $t_z$  ضخامت لوله را در طول آن نشان می‌دهد،  $z$  فاصله‌ی طولی از قسمت محور مختصات تعریف شده در یک انتها تا نقطه‌ی موردنظر و  $\alpha$  و  $\beta$  پارامترهای ثابتی هستند که به ترتیب برابر با  $0/9$  و  $2$  در نظر گرفته شده‌اند.  $C$  یک مقدار عددی است که اگر در زمانی که  $z = 0$  (بیشینه‌ی مقدار) است، ضخامت موردنظر لوله به دست نیاید، به معادله اضافه می‌شود تا ضخامت اولیه به دست آید؛ در غیر این صورت برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود. ضخامت متغیری که در طول نمونه تغییر می‌کند، در شکل ۳ نشان داده شده است. در این حالت، ضخامت اولیه‌ی لوله‌ها که نسبت قطر به ضخامت‌شان از  $80$  تا  $140$  تغییر می‌کند، از محل تعریف مختصات در یک انتها شروع به کاهش می‌کند و به کمترین مقدار خود در میانه‌ی لوله می‌رسد و سپس دوباره از

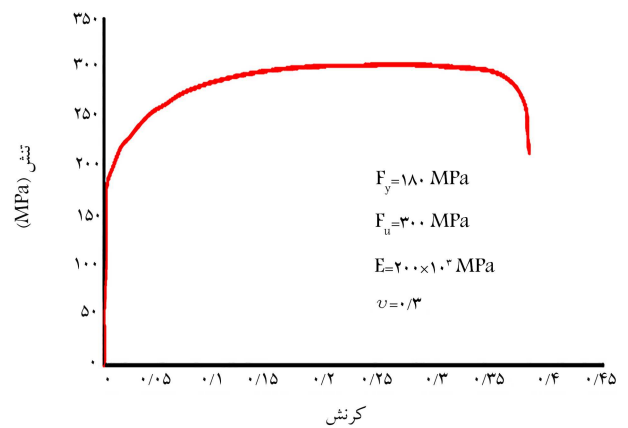


شکل ۳. تغییرات ضخامت در طول لوله‌ها.

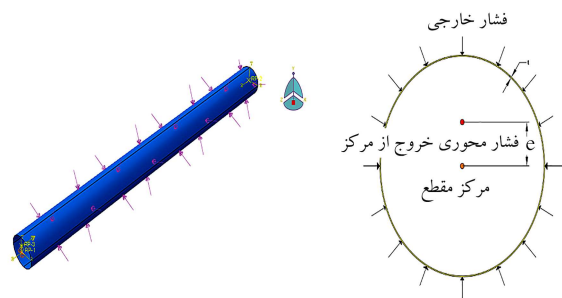
مقادیر تنش تسلیم ( $F_y$ ) و نهایی ( $F_u$ )، مدول کشسانی  $E$  و ضریب پواسون ( $\nu$ ) در شکل ۱ ارائه شده‌اند.

### ۲.۳. مدل آلمان محدود

رفتار کمانشی سازه‌های جدارنازک، مثل لوله‌ها، مقطع‌های توخالی دایروی<sup>۱۳</sup>، معمولاً با آلمان‌های shell مدل‌سازی می‌شوند.<sup>[۲۷-۲۹]</sup> مدل‌سازی عددی لوله‌ها به‌صورت سه‌بعدی صورت گرفته است، که در آن قطر با علامت  $D$ ، ضخامت با علامت  $t$  و طول با علامت  $L$  نشان داده شده‌اند. عملاً پدیده‌هایی مانند نشست فونداسیون که باعث ایجاد نیروی محوری فشاری در لوله می‌شوند، نیروی‌های خمشی را نیز می‌توانند در لوله به‌وجود آورند؛ لذا بار محوری فشاری با فاصله‌ی  $e$  از مرکز لوله، مطابق شکل ۲ اعمال شده است. در شکل مذکور، یک نمونه از لوله‌ی که تحت بار محوری فشاری و فشار خارجی تحلیل شده است، مشاهده می‌شود. جهت استخراج نمودار اندرکش بار محوری فشاری و فشار خارجی، نمونه‌ها تحت بار محوری خالص، فشار خارجی خالص و بار محوری و فشار خارجی (مرکب) تحلیل شده‌اند. در نمونه‌هایی که تحت یک نوع از بارگذاری (بار محوری فشاری یا خارجی) قرار گرفته‌اند، از یک نوع استپ بارگذاری استاتیکی ریکس<sup>۱۴</sup> با درنظر گرفتن آثار غیرخطی هندسی، استفاده شده است؛ در حالی که برای نمونه‌های تحت بار مرکب، نخست بار محوری فشاری کمتر از مقدار کمانشی آن با استفاده از روش استاتیکی<sup>۱۵</sup> با فعال کردن آثار غیرخطی هندسی به نمونه وارد شده و سپس با اتخاذ روش استاتیک ریکس، بار فشار خارجی تا لحظه‌ی کمانش لوله توسط نرم‌افزار آباکوس افزایش یافته و فشارخارجی کمانشی نمونه توسط نمودار LPF<sup>۱۶</sup> استخراج شده است. شرایط مرزی یک انتهای لوله به‌صورت مفصلی که جهت طولی برای اعمال بار محوری آزاد شده است ( $U_1, U_2 = 0$ ) و انتهای دیگر آن به‌صورت مفصلی در سه جهت دورانی



شکل ۱. نمودار تنش - کرنش مصالح لوله.



شکل ۲. مدل‌سازی عددی لوله تحت بار محوری فشاری و فشار خارجی.

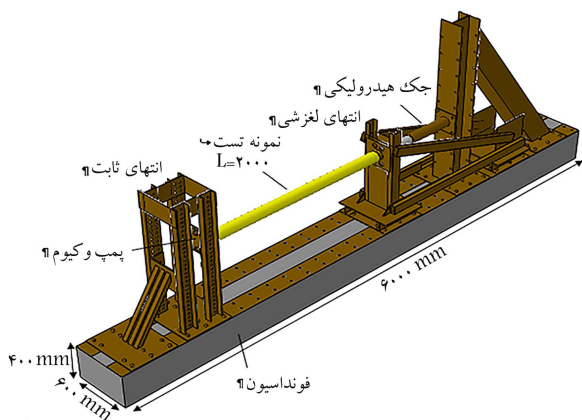
### ۲.۴.۳. معرفی دستگاه آزمایشگاه و بارگذاری

شکل شماتیک از دستگاه آزمایش در شکل ۶ مشاهده می‌شود. یک انتهای نمونه به ستونی که در جهت جانبی مهار شده، متصل است و انتهای دیگر به خربایی وصل است که می‌تواند در جهت محوری حرکت کند و نیروی محوری فشاری را از طریق جک هیدرولیکی که به لودسل برای ثبت مقادیر نیرو متصل است، به نمونه وارد کند. دو انتهای نمونهی موردنظر، داخل شیار استوانه‌یی به عمق ۴۰ میلی‌متر قرار گرفته‌اند. شیارهای استوانه‌یی مذکور از تغییرمکان شعاعی جلوگیری و نیروی محوری فشاری موردنظر را به‌صورت یکنواخت در انتهای محیط جداره توزیع می‌کند. چسب آکوارپوم در قسمت‌های جوش طولی و محیطی و انتهای نمونه و شیارها برای جلوگیری از نشت هنگام تخلیه‌ی فشار هوای لوله توسط پمپ وکیوم برای اعمال فشار خارجی استفاده شده است. یک شیر تخلیه‌ی هوا نیز به نمونه جهت جلوگیری از حبس هوا هنگام اعمال نیروی محوری فشاری به انتهای نمونه متصل شده است. روند اعمال بارگذاری برای نمونه تحت بار مرکب بدین گونه است که ابتدا بار محوری فشاری توسط جک هیدرولیکی متصل به خرپا تا مقدار موردنظر (کمتر از بار کماتشی) افزایش داده می‌شود (ظرفیت نمونه‌ها با استفاده از تحلیل عددی مشخص شده است)، و سپس هوای داخل لوله توسط پمپ وکیوم متصل به انتهای ثابت جهت اعمال فشار خارجی، در حالی که نیروی محوری فشاری ثابت نگه داشته شده است، تخلیه می‌شود.

### ۳.۴.۳. تکیه‌گاه ثابت و لغزنده

همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، ۴ ستون ناودانی تیر ورق با فاصله‌ی مشخصی با استفاده از صفحه‌ی ستون با ۴ عدد پیچ به زمین متصل شده‌اند. فضای خالی بین دو ستون توسط ناودانی به ارتفاع مقطع ۲۲/۷ و طول ۲۷ سانتی‌متر و ضخامت ۱۲ میلی‌متر که با استفاده از ۸ لچکی (۱ × ۱۰ × ۱۰) سانتی‌متر تقویت شده است، از قسمت بال‌های ناودانی به‌واسطه‌ی پیچ به ستون متصل شده است. صفحه‌یی که روی آن شیار جهت جایگذاری لوله قرار گرفته است، به ناودانی مذکور به‌وسیله‌ی ۴ پیچ متصل است.

طراحی و اجرای تکیه‌گاه لغزنده‌ی غلطکی با توجه به نیروها و عکس‌العمل‌های اعمالی و همچنین رفتار مورد انتظار آن، پیچیدگی و مشکلات خاصی دارد. تکیه‌گاه مذکور باید در راستای محوری لوله آزاد باشد تا بتواند با کمترین تأثیر در راستای محوری حرکت کند و هیچ پیچش و دورانی در آن به‌وجود نیاید (شکل ۶). با در نظر گرفتن شرایط و قابلیت‌های موردانتظار، تکیه‌گاه مذکور به‌صورت ترکیبی از اعضای خربایی ساخته شده از نیمرخ نمره ۱۴، صفحه‌ی زیرستون، ریل، صفحات زیر



شکل ۶. دستگاه آزمون آزمایشگاهی.

میان‌ه‌ی لوله شروع به افزایش می‌کند و به مقدار بیشینه‌ی خود در انتهای دیگر می‌رسد. [۱۸]

۲. تحلیل کشسان مقادیر ویژه‌ی کماتش ۲۱ انجام و دامنه‌های اولین مود کماتشی در ضریب کاهنده‌ی ۶/۰ با استفاده از این دستور ضرب شده است.

نام فایل ورودی تحلیل \*IMPERFECTION, FILE = Buckle

STEP = ۱

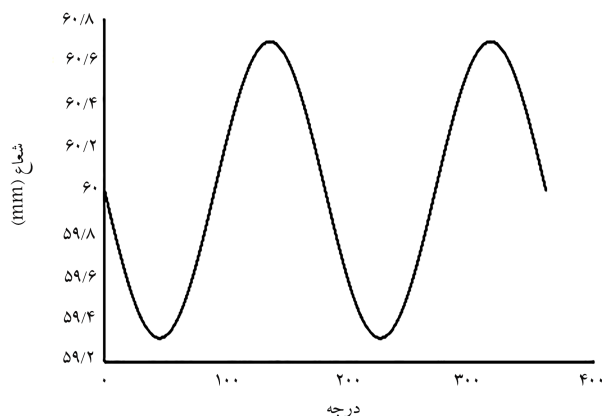
۱,۰/۶

ناکاملی‌های هندسی که توسط تحلیل کماتش تعریف می‌شوند، به‌آرامی قطر لوله را در طول آن تغییر می‌دهند. یک نمونه از تغییرات مذکور در میان‌ه‌ی لوله در شکل ۴ مشاهده می‌شود.

### ۴.۳. صحت‌سنجی نرم‌افزار

#### ۱.۴.۳. نحوه‌ی ساخت نمونه‌ی آزمایشگاهی

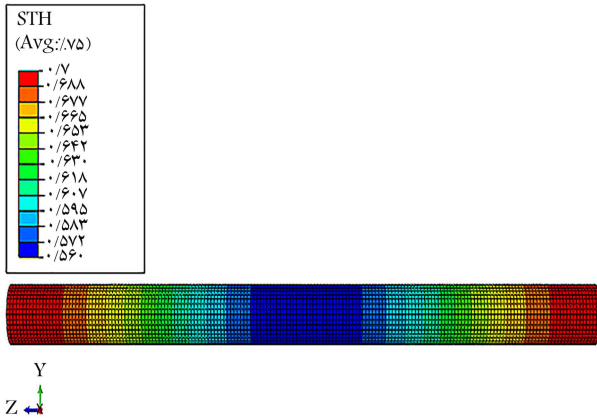
قطر و ضخامت و طول بحرانی (معادله‌ی ۲) نمونه‌ی آزمایشگاهی به ترتیب ۱۲۰، ۷/۰ و ۱۸۰۰ میلی‌متر است که تحت بارگذاری فشاری خارجی در معرض فشار محوری ۲۵۰kN قرار گرفته و به صورت  $DT171 - PF25$  نامگذاری شده است. به دلیل محدودیت طولی دستگاه نورد، دو نمونه با شرایط هندسی یکسان به طول ۹۰۰ میلی‌متر ساخته و از میان دهانه با استفاده از جوش آرگون به یکدیگر متصل شدند. در نتیجه، نمونه‌های موردنظر دارای جوش طولی و محیطی هستند (شکل ۵).



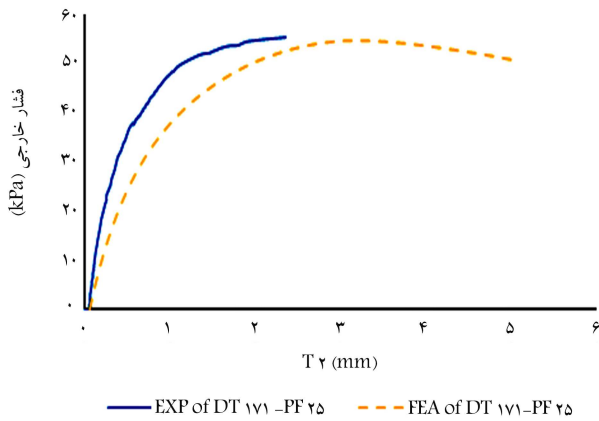
شکل ۴. تغییرات شعاع لوله در میان‌ه‌ی دهانه.



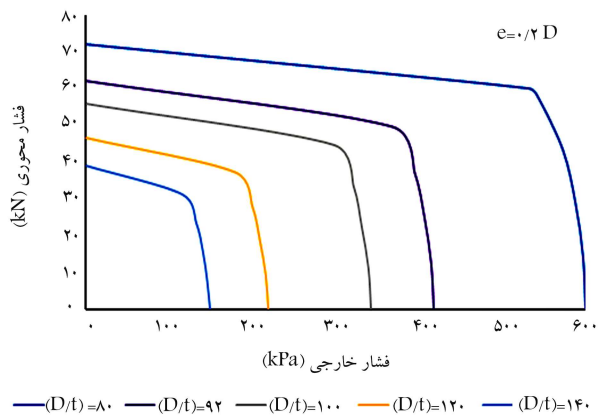
شکل ۵. دستگاه نورد و نمایی از نمونه‌ی ساخته شده با جوش آرگون.



شکل ۹. توزیع ضخامت در طول خط لوله قبل از بارگذاری.



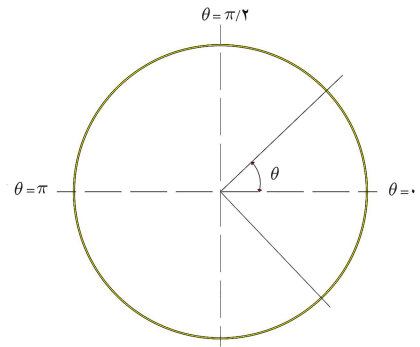
شکل ۱۰. نمودار فشار خارجی تغییر مکان T<sub>۲</sub> نمونه DT171-PF25 به روش‌های عددی و آزمایشگاهی.



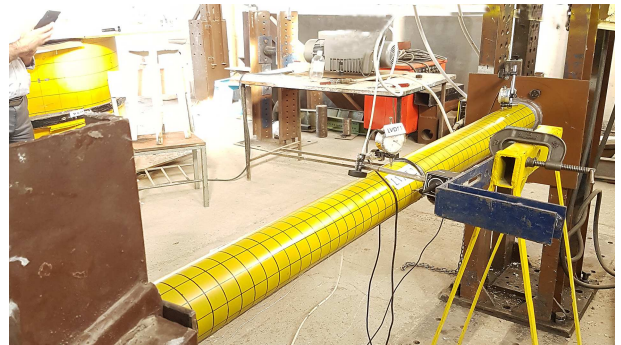
شکل ۱۱. اندرکنش بار محوری فشاری با خروج از مرکزیت ( $e = 0/2D$ ) و فشار خارجی.

#### ۱.۴. نمودار اندرکنش بار محوری فشاری و فشار خارجی

نمودار اندرکنش بار محوری فشاری و فشار خارجی برای نسبت‌های قطر به ضخامت  $8^\circ$  تا  $14^\circ$  در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که مطابق آن، رابطه‌ی غیرخطی بین بار محوری فشاری با خروج از مرکزیت ( $e = 0/2D$ ) و فشار خارجی برقرار است. با افزایش بار محوری فشاری، فشار خارجی کمانشی به تدریج شروع به کاهش می‌کند و بعد از مقدار مشخصی، به طور ناگهانی کاهش می‌یابد. با کاهش نسبت قطر به



شکل ۷. زاویه‌ی نصب تغییر مکان سنسورها.



شکل ۸. موقعیت تغییر مکان سنسورها قبل از شروع آزمون.

جدول ۱. موقعیت تغییر مکان سنسورها.

| اسم نمونه  | T.۱           | T.۲           | T.۳           |
|------------|---------------|---------------|---------------|
| DT171-PF25 | $1m, 9^\circ$ | $1m, 9^\circ$ | $2m, 9^\circ$ |

ریل و موقعیت تقویت شده‌ی اعمال نیرو طراحی و اجرا شده است.

#### ۴.۴.۳. محل تغییر مکان سنسورهای (LVDT's) جایگذاری شده

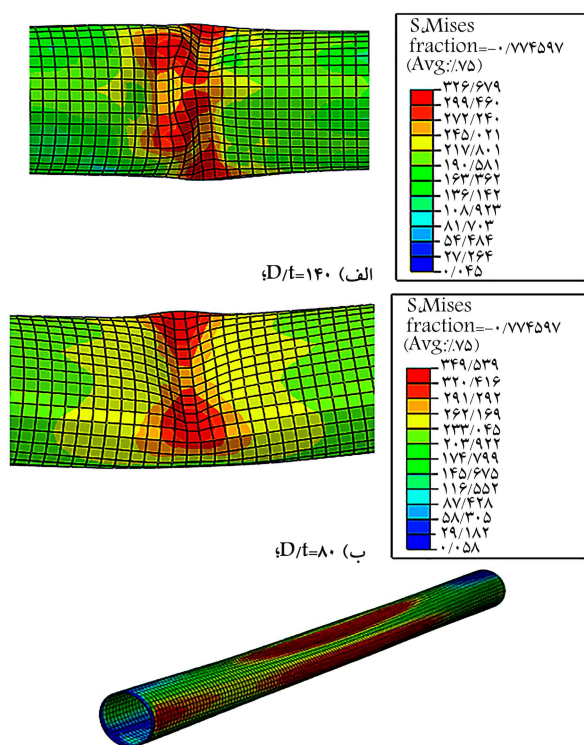
برای ثبت تغییر مکان‌های نمونه، تغییر مکان سنسورها (LVDT's) به صورت عمود بر محور لوله با زاویه‌ی  $0^\circ$  و  $90^\circ$  درجه (شکل‌های ۷ و ۸) در قسمت‌های مختلف جای‌گذاری شدند (جدول ۱).

#### ۴.۴.۳. مقایسه‌ی نتایج نمونه‌ی آزمایشگاهی و نرم‌افزار

مطابق بخش‌های ۱.۳ الی ۳.۳، مدل‌سازی عددی برای نمونه‌ی آزمایشگاهی صورت گرفته و ناکاملی‌ها به نرم‌افزار معرفی شده‌اند. در شکل ۹، توزیع ضخامت در طول لوله قبل از بارگذاری مشاهده می‌شود. ضخامت لوله از هر دو انتها شروع به کاهش کرده و در میان دهانه به مقدار کمینه‌ی خود رسیده است. رفتار کمانشی نمونه‌ی DT171-PF25 در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود و اختلاف ظرفیت کمانشی نتایج عددی<sup>۲۲</sup> و آزمایشگاهی<sup>۲۳</sup>  $1/41\%$  است. نتایج حاصل نشان می‌دهند تطابق مناسبی بین نتایج عددی و آزمایشگاه برقرار است.

#### ۴. بحث و نتایج

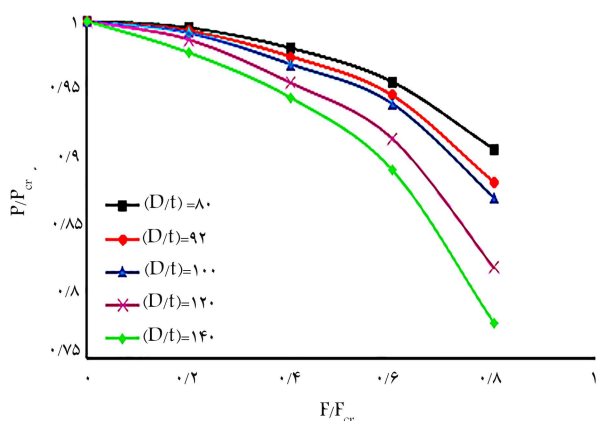
در بخش حاضر، ابتدا نمودار اندرکنش بار محوری فشاری و فشار خارجی نسبت‌های قطر به ضخامت مورد نظر در نوشتار حاضر بررسی شده و در ادامه، آثار فشار محوری، نسبت قطر به ضخامت و خروج از مرکزیت بار محوری فشاری در ظرفیت کمانشی فشار خارجی مطالعه شده است.



الف)  $D/t=140$

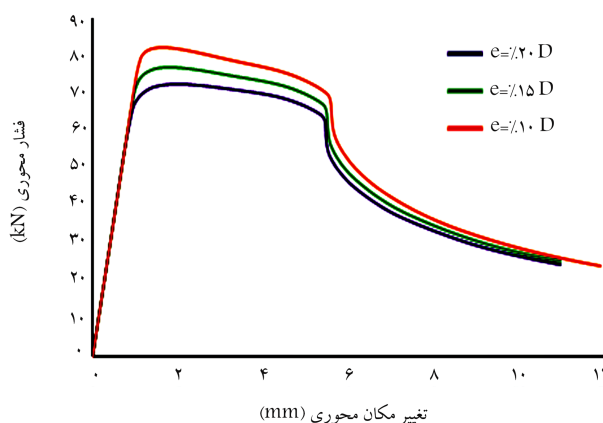
ب)  $D/t=80$

ج) تحت بار محوری فشاری و فشار خارجی و فشار خارجی خالص. شکل ۱۳. مود کمانشی خط لوله در حالت‌های مختلف.



شکل ۱۴. تأثیر بار محوری فشاری در فشار خارجی.

با  $F/F_{cr}$  از صفر تا  $0/8$ ، نسبت  $P/P_{cr}$  کاهش یافته است. مقادیر  $P/P_{cr}$  با افزایش  $F/F_{cr}$  با شدت بیشتری در مقایسه با لوله‌های با نسبت قطر به ضخامت پایین (کمتر از  $10^\circ$ ) با توجه به شیب نمودار کاهش یافته است. در نتیجه، تأثیر بار محوری در ظرفیت کمانشی فشار خارجی برای نسبت‌های قطر به ضخامت بالا در مقایسه با نسبت‌های قطر به ضخامت پایین بیشتر است. با توجه به شکل ۱۴، به ازاء  $F/F_{cr}$  معادل با  $0/8$  از  $P/P_{cr}$   $77$  ( $D/t = 140$ ) تا  $90$  ( $D/t = 80$ ) درصد فشار خارجی خالص تغییر می‌کند، یعنی با توجه به نسبت‌های قطر به ضخامت، در صورتی که بار محوری بالایی به لوله اثر کند، باید آثار آن را در طراحی لوله برای فشار خارجی جدی گرفت. در شکل ۱۵، برای نسبت‌های  $F/F_{cr}$  صفر تا  $0/6$ ، برخلاف  $F/F_{cr}$  معادل با  $0/8$ ، با افزایش نسبت قطر به ضخامت، فشار خارجی کمانشی با مقادیر نزدیک به هم کاهش



شکل ۱۲. منحنی‌های نیرو - تغییر مکان در جهت طولی نمونه با درصد خروج از مرکزیت مختلف.

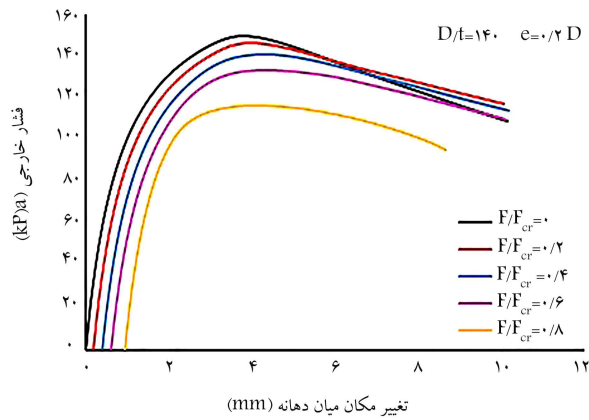
ضخامت از  $14^\circ$  به  $80^\circ$  ظرفیت کمانشی لوله‌ی جدارنازک فولادی به‌طور محسوسی افزایش یافته است.

### ۲.۴. تأثیر خروج از مرکزیت بار محوری فشاری

نمودار نیرو - تغییر مکان برای نمونه‌ی دارای نسبت قطر به ضخامت معادل  $80^\circ$  که تحت بار محوری فشاری خالص با خروج از مرکزیت مختلف قرار گرفته است، با استفاده از تحلیل عددی در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، که مطابق آن با کاهش میزان خروج از مرکزیت ظرفیت کمانشی در حدود  $13\%$  افزایش یافته است که به دلیل ممان خمشی که از این طریق به نمونه وارد می‌شود، است. در واقع کمانش خطوط لوله که در معرض بار محوری فشاری هستند، می‌تواند بار خمشی را نیز به آن وارد کند.

### ۳.۴. تأثیر بار محوری فشاری و نسبت قطر به ضخامت در ظرفیت کمانشی فشار خارجی

در بخش حاضر، اثر فشار محوری دارای خروج از مرکزیت ( $e = 0/2D$ ) در ظرفیت کمانشی فشار خارجی بررسی شده است. مقادیر نیروی محوری فشاری و فشار خارجی به ترتیب توسط نسبت  $F/F_{cr}$  و  $P/P_{cr}$  طبقه‌بندی شده‌اند.  $F_{cr}$  و  $F$  به ترتیب نیروی محوری فشاری کمانشی در معرض فشار خارجی و نیروی محوری فشاری خالص کمانشی لوله را نشان می‌دهند. در نوشتار حاضر، این نسبت بین  $0$  تا  $0/8$  تغییر می‌کند. از طرفی  $P$  و  $P_{cr}$ ، فشار خارجی کمانشی تحت اثر بار محوری و فشار خارجی کمانشی لوله‌ی خالص را نشان می‌دهند. در شکل (۱۳ الف و ب)، مود کمانشی خرابی نمونه برای نسبت  $P/P_{cr}$  معادل با صفر (نیروی محوری فشاری خالص) مشاهده می‌شود. برای لوله با نسبت قطر به ضخامت  $140^\circ$ ، چین خوردگی متعددی در محل کمانش مشاهده می‌شود (شکل ۱۳ الف). این حالت از مود کمانشی، مود الماسی نامیده می‌شود.<sup>[۲۷]</sup> برای لوله با نسبت قطر به ضخامت  $80^\circ$ ، یک نوع از فرورفتگی ایجاد می‌شود و دیواره‌ی لوله به سمت داخل حرکت می‌کند (شکل ۱۳ ب).<sup>[۲۷]</sup> در حالی که لوله‌های قرار گرفته تحت فشار خارجی در معرض بار محوری فشاری ( $P/P_{cr} \leq 1$ ) و فشار خارجی خالص مطابق (شکل ۱۳ ج)، دو موج محیطی را مستقل از مقادیر نسبت‌های قطر به ضخامت ایجاد می‌کنند. در شکل ۱۴، تغییرات نیروی محوری فشاری - فشار خارجی با خروج از مرکزیت ( $e = 0/2D$ ) با کمیت بدون بعد مشاهده می‌شود که مطابق آن با افزایش نسبت



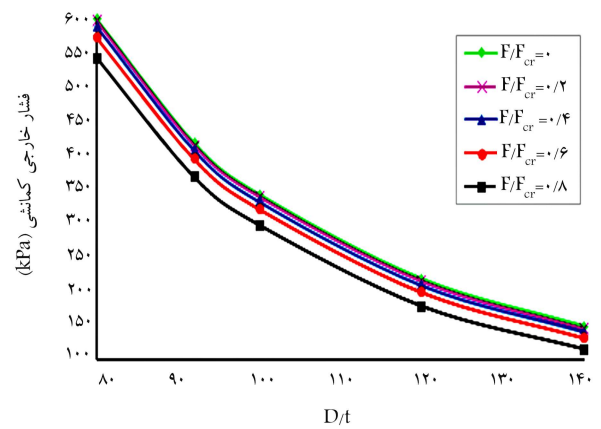
شکل ۱۷. منحنی‌های فشار خارجی - تغییر مکان میان دهانه  $D/t=140$  - نسبت قطر به ضخامت ۱۴۰.

منحنی‌ها تقریباً ثابت است. می‌توان بیان کرد با افزایش بار محوری، میزان جذب انرژی کاهش می‌یابد.

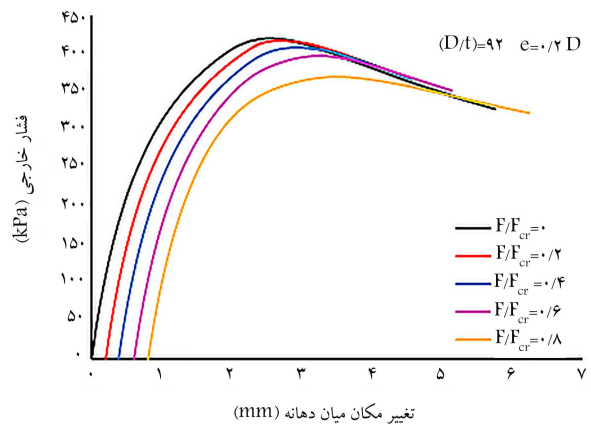
## ۵. نتیجه‌گیری

رفتار کمانشی خطوط لوله‌ی جدارنازک فولادی با نسبت قطر به ضخامت بین  $80^\circ$  تا  $140^\circ$  تحت بار محوری فشاری با خروج از مرکزیت ۲۰٪ قطر لوله و فشار خارجی به روش عددی با استفاده از تحلیل المان محدود بررسی شده و این نتایج به دست آمده است:

- در خطوط لوله‌ی جدارنازک فولادی تحت بار ترکیبی فشار محوری و خارجی با افزایش فشار محوری، ظرفیت کمانشی فشار خارجی کاهش می‌یابد.
- با توجه به نمودار شکل ۱۴ در بخش ۴، در خطوط لوله‌ی جدارنازک فولادی، برای محاسبه‌ی فشار خارجی کمانشی در صورتی که نسبت بار محوری  $F/F_{cr}$  تا  $80^\circ$  افزایش یابد، باید به ترتیب ۷۷ و ۹۰ درصد فشار خارجی کمانشی برای نسبت قطر به ضخامت  $140^\circ$  و  $80^\circ$  در نظر گرفته شود.
- با بررسی آثار قطر به ضخامت مختلف در بخش ۴ تحت بارگذاری مذکور رفتار کمانشی خطوط لوله بعد از نسبت قطر به ضخامت  $100^\circ$  تغییر یافته است که می‌توان در طراحی خطوط لوله نسبت‌های قطر به ضخامت  $100^\circ$  به بالا را مستقل از نسبت‌های قطر به ضخامت پایین دانست.
- با توجه به مودهای کمانشی ایجاد شده در بخش ۴ مشاهده شد با افزایش قطر به ضخامت از  $80^\circ$  به  $140^\circ$ ، مودهای کمانشی تحت بار محوری به مود کمانشی الماسی تغییر یافته‌اند.



شکل ۱۵. تأثیر قطر به ضخامت در فشار خارجی.



شکل ۱۶. منحنی‌های فشار خارجی - تغییر مکان میان دهانه (همانند T۲) در شکل‌های ۱۶ و ۱۷، برای خطوط لوله با نسبت قطر به ضخامت ۹۲ و  $140^\circ$  ارائه شده‌اند. نقاط بیشینه‌ی نیرو در همه‌ی منحنی‌ها، نقاط کمانش نمونه را نشان می‌دهند که با افزایش نسبت بار محوری کاهش یافته است. تغییر مکان اولیه‌ی ایجاد شده قبل از افزایش فشار خارجی در اثر نیروی محوری فشاری ایجاد شده است. در شکل ۱۶، با افزایش نسبت بار محوری فشاری، تغییر مکان مربوط به بار بیشینه افزایش یافته است؛ در حالی که در شکل ۱۷، تغییر مکانی که در بار کمانش رخ داده است، در همه‌ی

## پانویس‌ها

1. Timoshenko & Southwell
2. Allan
3. Ghani

4. Andrews
5. concertina
6. Zhijin
7. Mistry
8. Kramanos
9. Gong

10. Tu & Jian
11. bulging
12. Eyvazinejad Firouzsalar
13. circular hollow sections
14. static riks
15. static general
16. load pressure factor
17. center point
18. S4R
19. local buckling
20. Kaniat
21. buckle
22. FEA
23. experimental

## (References) منابع

1. Kyriakides, S. and Corona, E. "Mechanics of offshore pipelines: volume 1: Buckling and collapse", Elsevier, 1st Edition (2007).
2. Autrique, R. and Rodal, E. "Experimental verification of steel pipe collapse under vacuum pressure conditions", *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **49**(5), pp.1-10 (2016).
3. Timoshenko, S.P. and Gere, J.M. "Theory of elastic stability", McGraw-Hill Publishing Co., New York (1961).
4. Von Karman, Th. and Tsien, H.-Sh. "The buckling of thin cylindrical shells under axial compression", *Journal of the Aeronautical Sciences*, **8**(8), pp. 303-312 (1941).
5. Donnell, L.H. "A new theory for the buckling of thin cylinders under axial compression and bending", Guggenheim Aeronautical Laboratory (1934).
6. Von Karman, Th., Dunn, L.G. and et al. "The influence of curvature on the buckling characteristics of structures", *Journal of the Aeronautical Sciences*, **7**(7), pp. 276-289 (1940).
7. Allan, T. "Experimental and analytical investigation of the behaviour of cylindrical tubes subject to axial compressive forces", *Journal of Mechanical Engineering Science*, **10**(2), pp. 182-197 (1968).
8. Ghani, E. "Static and dynamic collapse behaviour of cylindrical tubes and tube assemblies", PhD Dissertation, University of London (1982).
9. Andrews, K.R.F., England, G.L. and Ghani, E. "Classification of the axial collapse of cylindrical tubes under quasi-static loading", *International Journal of Mechanical Sciences*, **25**(9-10), pp. 687-696 (1983).
10. Von Mises, R. and Windenburg, D.F. "The critical external pressure of cylindrical tubes under uniform radial and axial load", *David Taylor Model Basin*, Washington D.C. (1933).
11. Windenburg, D.F. and Trilling, Ch. "Collapse by instability of thin cylindrical shells under external pressure", *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, **11**, pp. 819-825 (1934).
12. Ross, C., Little, A., Short, D. and Brown, G. "Inelastic buckling of geometrically imperfect tubes under external hydrostatic pressure", *Journal of Ocean Technology*, **3**(1), pp. 75-90 (2008).
13. Zhou, Zh.J., Wang, Zh. and Xia, Y.M. "Lifting pipeline buckling under external pressure Base on imperfect reason", *Advanced Materials Research*, **337**, pp. 789-794 (2011).
14. Mistry, J., Gibson, A.G. and Wu, Y.-S. "Failure of composite cylinders under combined external pressure and axial loadin", *Composite Structures*, **22**(4), pp. 193-200 (1992).
15. Karamanos, S.A. and Eleftheriadis, Ch. "Collapse of pressurized elastoplastic tubular members under lateral loads", *International Journal of Mechanical Sciences*, **46**(1), pp. 35-56 (2004).
16. Ghanbari Ghazijahani, T. and Showkati, H. "Experiments on cylindrical shells under pure bending and external pressure", *Journal of Constructional Steel Research*, **88**, pp. 109-122 (2013).
17. Gong, Sh., Hu, Q., Bao, Sh. and et al. "Asymmetric buckling of offshore pipelines under combined tension, bending and external pressure", *Ships and Offshore Structures*, **10**(2), pp. 162-175 (2015).
18. Tu, Sh. and Shuai, J. "Numerical study on the buckling of pressurized pipe under eccentric axial compression", *Thin-Walled Structures*, **147**, pp.1-10 (2020).
19. Eyvazinejad Firouzsalar, S., Showkati, H. and Ingham, J.M. "Free-spanning and base-supported tubes subjected to combined axial compression and indentation loads", *Journal of Constructional Steel Research*, **161**, pp. 341-354 (2019).
20. Standard, DNV Offshore, "DNV-OS-F101", Submarine Pipeline Systems, Det Norske Veritas (2000).
21. Murray, D.W. "Local buckling, strain localization, wrinkling and postbuckling response of line pipe", *Engineering Structures*, **19**(5), pp. 360-371 (1997).
22. Mohareb, M., Kulak, G.L., Elwi, A. and et al. "Testing and analysis of steel pipe segments", *Journal of Transportation Engineering*, **127**(5), pp. 408-417 (2001).
23. Strum, R.G. and O'Brien, H.I. "Computing strength of vessels subjected to external pressure", *Transactions*, **69**, pp. 353-358 (1947).
24. Pinna, R. and Ronalds, B.F. "Hydrostatic buckling of shells with various boundary conditions", *J. Constr. Steel Res*, **56**, pp. 1-16 (2000).
25. Salahshour, S. and Fallah, F. "Elastic collapse of thin long cylindrical shells under external pressure", *Thin-Walled Structures*, **124**, pp. 81-87 (2018).
26. ASTM, I. "Standard test methods For tension testing of metallic materials Designation: E8/E8m-09", Universidad Del Valle, Pennsylvania (2010).
27. Zhou, Z. and Murray, D. "Analysis of postbuckling behavior of line pipe subjected to combined loads", *Int. J. Solids Struct*, **32**(20), pp. 3015-3036 (1995).
28. Zimmerman, T., Timms, C., Xie, J. and et al. "Buckling resistance of large diameter spiral welded linepipe", *in 2004 International Pipeline Conference, American Society of Mechanical Engineers*, pp. 365-373 (2004).
29. Zhao, O., Gardner, L. and Young, B. "Buckling of ferritic stainless steel members under combined axial compression and bending", *J. Constr. Steel Res*, **117**, pp. 35-48 (2016).



30. Zhao, O., Gardner, L. and Young, B. "Structural performance of stainless steel circular hollow sections under combined axial load and bending-part 1: experiments and numerical modelling", *Thin-Walled Struct*, **101**, pp. 231-239 (2016).
31. Bardi, F., Kyriakides, S. and Yun, H. "Plastic buckling of circular tubes under axial compression. part ii: Analysis", *Int. J. Mech. Sci*, **48**(8), pp. 842-854 (2006).
32. Zhao, O., Gardner, L. and Young, B. "Structural performance of stainless steel circular hollow sections under combined axial load and bending-part 2: Parametric studies and design", *Thin-Walled Struct*, **101**, pp. 240-248 (2016).
33. Zhao, O., Gardner, L. and Young, B. "Behaviour of structural stainless steel cross-sections under combined loading-part ii: Numerical modelling and design approach", *Eng. Struct*, **89**, pp. 247-259 (2015).
34. Kainat, M., Lin, M., Cheng, J.R. and et al. "Effects of the initial geometric imperfections on the buckling behavior of high-strength uoe manufactured steel pipes", *Press. Vessel Technol*, **138**(5), pp.1-15 (2016).
35. Kainat, M., Adeeb, S., Cheng, J.R. and et al. "Identifying initial imperfection patterns of energy pipes using a 3d laser scanner", in *9th International Pipeline Conference, American Society of Mechanical Engineers*, pp. 57-63 (2012).
36. Kainat, M., Cheng, J.R., Martens, M. and et al. "Measurement and characterization of the initial geometric imperfections in high strength u-ing, o-ing and expanding manufactured steel pipes", *J. Press. Vessel Technol*, **138**(2), pp.1-11 (2016).
37. Timoshenko, S.P. and Gere, J.M. "Theory of elastic stability", Mineola (2009).