

مدل‌سازی عناصر محدود انتشار خرابی در خطوط لوله دریایی

رضا طالب پور^۱، کریم عابدی^۲، احمد رضا مصطفی قره‌باغی^۳

۱- کارشناس ارشد سازه‌های دریایی، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

۲- دانشیار سازه، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

۳- استادیار سازه‌های دریایی، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

چکیده

در طراحی خطوط لوله دریایی، مانند هر سازه جدار نازک دیگر، موضوع پایداری نقش عمده‌ای ایفا می‌کند. به طور کلی در خطوط لوله دریایی دو نوع ناپایداری سازه‌ای، به صورت کمانش کلی و کمانش موضعی (خرابی) ممکن است اتفاق بیفتد. اما موضوع ناپایداری موضعی در لوله‌ای که در آب عمیق کار گذارده می‌شود، با دیگر خطوط لوله تفاوت دارد. این تفاوت از آنجا ناشی می‌شود که بواسطه قرار گرفتن لوله تحت فشار بسیار زیاد (فشار هیدرواستاتیکی آب)، ناپایداری موضعی قابلیت انتشار در طول لوله پیدا می‌کند.

در پژوهش حاضر نخست مختصری به پدیده مزبور، که به نام انتشار خرابی شناخته می‌شود، و دلایل وقوع آن در خطوط لوله دریایی پرداخته می‌شود. سپس مدل‌سازی عناصر محدود دوبعدی و سه‌بعدی آن شرح داده شده و برای چند نمونه مدل، نتایج به دست آمده با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می‌شود. روش‌های مدل‌سازی ارائه شده به سهولت قابل کاربرد بوده و نتایج به دست آمده برای هر دو حالت دو بعدی و سه بعدی، تطابق مطلوبی با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهند. یافتن حداقل ناکاملی مورد نیاز برای گذر از نقاط دوشاخگی، به کارگیری مشخصات هندسی اسمی لوله و استفاده از رابطه تنش-کرنش Ramberg-Osgood اصلاح شده جهت توصیف رفتار مصالح، خصوصیات اصلی روش سه‌بعدی پیشنهاد شده در تحقیق حاضر می‌باشند. روش مذکور در مقایسه با تحلیل عددی قبلی که در سال ۲۰۰۲ توسط Toscano و همکارانش انجام شده است، نتایج بهتری به دست می‌دهد.

کلمات کلیدی: سازه‌های دریایی، خطوط لوله دریایی، کمانش موضعی، خرابی، انتشار خرابی، مدل‌سازی عناصر محدود

Finite Element Modeling of Collapse Propagation In Offshore Pipeline

Abstract

In the design of marine pipelines, like other thin-walled structures, structural stability plays major role. Generally, two kinds of instabilities, namely global buckling and local buckling (collapse) may occur in marine pipelines. However, for deep water pipelines in addition to occurrence of collapse, another concern is the potential occurrence of propagating of this collapse along the pipe due to high external pressure.

In the present study, details of 2-D and 3-D finite element modeling for collapse propagation simulation are outlined. In order to verify the accuracy and validity of the finite element modeling, the numerical results, obtained from nonlinear finite element analyses for several pipe samples have been compared with the experimental results. These proposed 2-D and 3-D modeling methods are easily applicable. Also, the comparison shows that the results of these methods have very close agreement with the experimental behaviour. Using nominal geometric properties, finding minimum required imperfections to eliminate bifurcation points and using corrected Ramberg-Osgood material behaviour for steel pipe are the main characteristics of the

present 3-D method. The study shows that this method gives more appropriate results than the previous proposed method by Toscano et al. (2002).

Keyword: Marine structures, Offshore pipelines, Local buckling, Collapse, Collapse propagation, Finite element modeling

مقدمه

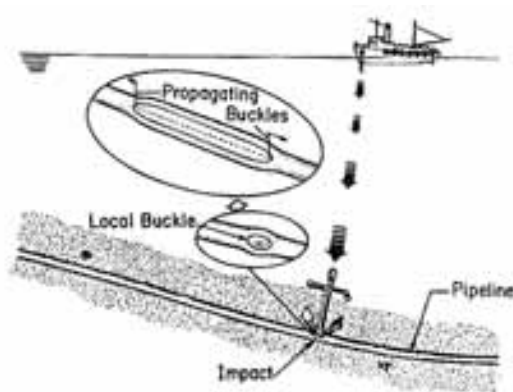
در یک خط لوله دریایی عواملی همچون خمش زیاد هنگام نصب (شکل ۲-الف)، برخورد عوامل خارجی (همچون لنگر کشتی (شکل ۲-ب)، ابزار ماهیگیری، وسایل فرو افتاده از سکوها و...)، تنش اضافی ناشی از ناهمواری بستر دریا، ناپایداری بستر و کاهش ضخامت جدار لوله (خوردگی، سائیدگی و فرسایش) می‌توانند باعث به وجود آمدن کمناش موضعی گردند [۲، ۳، ۴، ۵].

بر اساس احتمال به وقوع پیوستن انتشار خرابی، جهت طراحی خطوط لوله آب عمیق علاوه بر فشار خرابی^۱، باید فشار مشخصه دیگری به نام فشار انتشار خرابی^۲ مشخص باشد. فشار انتشار خرابی در واقع حداقل فشار خارجی است که می‌تواند یک خرابی منتشرشده را، در حالت انتشار نگه دارد. بر اساس پژوهش‌های انجام شده [۲، ۳ و ۶]، میزان این فشار معمولاً ۱۵ تا ۲۰ درصد فشار خرابی می‌باشد. بنابراین برای لوله‌ای که بر اساس فشار خرابی طراحی شده است، به دنبال وقوع خرابی انتشار سریع آن بسیار محتمل است. خرابی در حالت انتشار در لوله، فقط

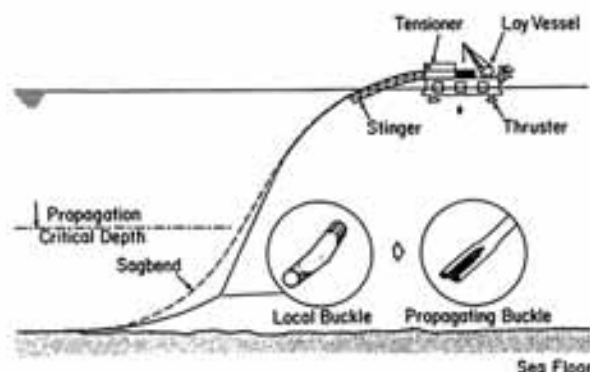
خط لوله دریایی یک پوسته استوانه‌ای می‌باشد که طراحی آن بر مبنای معیارهای تنش، کمناش کلی، کمناش موضعی (خرابی)، انتشار خرابی، خستگی و خروج از گردی انجام می‌شود [۱]. وقتی لوله برای نصب در آبهای عمیق طراحی می‌گردد، از بین معیارهای مذکور معیار انتشار خرابی بیشترین اهمیت را پیدا می‌کند. اصطلاح انتشار خرابی، توصیف پدیده‌ای است که در آن کمناش موضعی ایجاد شده در لوله، تحت فشار خارجی به اندازه کافی زیاد در طول لوله پیشروی می‌کند. انتشار خرابی باعث می‌شود که جداره‌های داخلی بالا و پائین لوله به هم برسند. در نتیجه لوله کاملاً خراب شده، غیر قابل بهره‌برداری گردد. در اکثر موارد پس از انتشار خرابی مقطع لوله به شکل Dog-bone (شکل ۱) در می‌آید [۲].



شکل ۱- مقطع لوله پس از انتشار خرابی



(ب)



(الف)

شکل ۲- اشکال شماتیکی از وقوع خرابی در خطوط لوله دریایی (الف) هنگام نصب (ب) در اثر برخورد لنگر کشتی

¹ Collapse Pressure

² Collapse Propagation Pressure

فشارهای مشخصه لوله دریایی

پیش از طراحی خط لوله دریایی باید دو فشار مشخصه خرابی و انتشار خرابی تعیین گردند، که در ادامه بدانها پرداخته می‌شود.

فشار خرابی

فشار خرابی حداکثر تنش فشاری قابل تحمل برای لوله استاندارد می‌باشد. هرگاه تنش‌های وارد بر لوله از فشار خرابی فراتر رود، لوله از ضعیف‌ترین نقطه اش دچار یک ناپایداری عرضی و یا به عبارت دیگر، خرابی می‌گردد که به صورت یک فرورفتگی در قسمتی از آن نمایان می‌گردد. برای تعیین این فشار روابط مختلفی پیشنهاد شده است. از جمله آئین‌نامه‌های BSI⁴ و ABS⁵ و DNV⁶ رابطه^۱ (۱) را پیشنهاد می‌کنند:

$$P_c^3 - P_{el} \cdot P_c^2 - \left[P_{pp}^2 + P_{el} \cdot P_{pp} \cdot f_0 \cdot \frac{D}{t} \right] \cdot P_c + P_{el} \cdot P_{pp}^2 = 0 \quad (1)$$

که در آن P_{pp} ، P_{el} و f_0 به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$P_{el} = \frac{2 \cdot E}{(1 - \nu^2)} \cdot \left(\frac{t}{D} \right)^3 \quad (2)$$

$$P_{pp} = \eta_{fab} \cdot SMYS(T) \cdot \frac{2 \cdot t}{D} \quad (3)$$

$$f_0 = \text{خروج از گردی اولیه} = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{D} \quad (4)$$

در این روابط D قطر متوسط لوله، t ضخامت اسمی لوله، E مدول الاستیسیته، ν نسبت پواسون، η_{fab} فاکتور derating ساخت، $SMYS(T)$ حداقل مقاومت تسلیم مشخصه در جهت محیطی و D_{\min} و D_{\max}

هنگام برخورد به یک مانع فیزیکی مقاوم متوقف می‌شود، مگر اینکه فشار خارجی وارده از فشار انتشار خرابی لوله کمتر شود [۷]. از آنجا که فشار انتشار خرابی لوله بسیار کم است طراحی لوله بر اساس آن، یعنی طوری که فشار خارجی روی لوله در طول عمر مفیدش همواره از فشار انتشار کمتر باشد، توجیه فنی و اقتصادی ندارد. راه‌حلی که برای حل این مشکل و مواجهه با پدیده انتشار خرابی اندیشیده شده است به این ترتیب است که لوله همچنان بر مبنای فشار خرابی طراحی خواهد شد، اما در فواصل مشخصی از آن موانع فیزیکی تعبیه می‌شود که در صورت وقوع انتشار خرابی، بتوانند از پیشروی آن جلوگیری کنند. با کاربرد این موانع که کمانشگیر^۳ نامیده می‌شوند، خرابی در فاصله بین دو کمانشگیر محدود شده و ادامه بهره‌برداری از خط لوله با تعویض قسمت آسیب دیده امکان‌پذیر می‌شود [۸، ۹، ۱۰].

طراحی یک کمانشگیر کارآ، وابسته به میزان فشار انتشار خرابی لوله است، از اینرو در برخورد با مساله انتشار خرابی مهمترین موضوع برآورد مناسب فشار انتشار خرابی می‌باشد.

علاوه بر تحقیقات آزمایشگاهی، مانند [۳، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴]، تاکنون تلاش‌های زیادی جهت مدل‌سازی عددی انتشار خرابی و بررسی پارامترهای موثر بر آن انجام شده است. یکی از آخرین پژوهش‌ها، تحقیق Toscana و همکارانش می‌باشد که در آن برای اولین بار مساله انتشار خرابی برای سه مدل با اندازه واقعی، به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفت [۱۵، ۱۶].

در تحقیق حاضر، روشی جدید برای مدل‌سازی عناصر محدود سه‌بعدی ارائه شده، نتایج حاصله با نتایج آزمایشگاهی و نتایج مدل عناصر محدود Toscana و همکارانش مقایسه می‌شوند. همچنین روش عناصر محدود دو بعدی شرح داده شده، نتایج مدل‌سازی انجام شده با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می‌گردد.

⁴ British Standards Institution

⁵ American Bureau of Shipping

⁶ Det Norske Veritas

³ Buckle Arrestor

کار حاصل از کشش غشایی (مانند تحلیل Hoofatt [۲۲]) سعی در بهبود این رابطه داشتند. گرچه تحلیل‌های نظری انجام شده کمک شایانی در فهم مکانیزم انتشار خرابی می‌کنند و لیکن برآوردهای آنها از فشار انتشار ضعیف‌تر از روابط تجربی می‌باشند. بر همین اساس روابط کاربردی طراحی که توسط آئین نامه‌ها پیشنهاد شده است، همگی روابط تجربی هستند. به عنوان مثال آئین‌نامه ABS [۱] رابطه زیر را توصیه می‌کند:

$$P_p = 6 \cdot \sigma_y \cdot \left[\frac{2 \cdot t}{D} \right]^{2.5} \quad (۵)$$

که در آن P_p فشار انتشار خرابی و σ_y تنش تسلیم می‌باشند. طبق تحقیقات صورت گرفته تا به حال، فشار انتشار خرابی یک لوله طولانی به نسبت قطر به ضخامت آن، تنش تسلیم، سخت شدگی مصالح و میزان نیروی محوری در لوله وابسته است [۶].

مدل‌سازی عناصر محدود دوبعدی انتشار خرابی

اساس این روش، روش نظری Chater و Hutchinson [۲۳] می‌باشد که در آن فشار انتشار خرابی لوله بر اساس مسیر تعادل حاصله از خرابی الاستو-پلاستیک در حالت کرنش دوبعدی حلقه‌ای به طول واحد از آن لوله، هنگامی که تحت فشار خارجی یکنواخت قرار دارد، به دست می‌آید. تحلیل عناصر محدود کمک می‌کند تا مسیر تعادل مزبور که در واقع منحنی فشار-تغییرحجم حلقه است، به دست آید. از روی این منحنی و براساس روش ترسیمی خط ماکسول (خطی که سطح محصور بین آن و منحنی، در بالا و پائینش برابر هستند)، فشار انتشار لوله به دست می‌آید.

به ترتیب قطر حداکثر و قطر حداقل لوله بیضی شده می‌باشند [۱، ۱۷، ۱۸].

رابطه (۱) رابطه‌ای تجربی بوده و از برازش نتایج آزمایشگاهی به دست آمده است. تحقیقات مجزای صورت گرفته نشان داد که این رابطه تخمین‌های بسیار خوبی از ظرفیت مقاومت خرابی لوله می‌دهد. همچنین جهت تعیین فشار خرابی و عوامل موثر بر آن، پژوهش‌های نظری نسبتاً زیادی توسط محققین مختلف انجام و روابطی جهت ارزیابی ظرفیت خرابی لوله‌ها تحت فشار خارجی، خمش خالص و ترکیب آنها ارائه شده است [۱۹].

فشار انتشار خرابی

همانطور که ذکر شد، فشار انتشار خرابی حداقل فشاری است که برای انتشار کمانش موضعی (خرابی) در لوله لازم است. برای برآورد این فشار، تا حال روابط متعددی ارائه شده است. این روابط یا بر مبنای تحلیل‌های نظری یا به صورت تجربی و با برازش نتایج آزمایشات تعیین فشار انتشار، حاصل شده‌اند. اساس همه تحلیل‌های نظری انجام شده، اعمال اصل کار مجازی با در نظر گرفتن خرابی پلاستیک (به واسطه ایجاد مفاصل پلاستیک) حلقه‌ای به طول واحد از آن لوله بوده است. در حین فرآیند انتشار، کار ناشی از فشار خارجی با کار داخلی ناشی از خمش محیطی و نیروی غشایی مستهلک می‌شود. همچنین طی تحقیقات صورت گرفته تا حال مشخص شده است که سخت شدگی کرنشی مصالح لوله روی میزان فشار انتشار بسیار موثر است. چگونگی لحاظ کردن این دو موضوع در تحلیل‌ها، عامل اصلی اختلاف بین روابط نظری ارائه شده، می‌باشد. به عنوان مثال در تحلیل Palmer و Martin [۲۰]، که اولین تحلیل از این نوع است، کار حاصل از نیروی غشایی و اثر سخت شدگی کرنشی در نظر گرفته نشده است. بنابراین رابطه حاصله، فشار انتشار را به طور قابل توجهی کمتر پیش‌بینی می‌کند. بیشتر تحلیل‌های بعدی با اضافه کردن اثر سخت شدگی کرنشی (مانند تحلیل‌های Steel و Croll, Spence و [۲۱]) و یا با در نظر گرفتن

مشخصات مدل‌سازی

برای انجام مطالعه موردی از یکی از مدل‌های مرجع [۲۳] استفاده شد. این مدل از جنس آلومینیوم Al-6061-T6 بوده و فشار انتشار آن قبلاً توسط Kyriakides به صورت آزمایشگاهی و توسط Hutchinson و Chater به صورت تحلیلی به دست آمده است. مدل‌سازی به کمک نرم‌افزار عناصر محدود ANSYS انجام شده و دارای مشخصات زیر می‌باشد:

❖ جهت مدل‌سازی حلقه از المان پوسته چهار گرهی با قابلیت تغییر شکل‌ها و کرنش‌های بزرگ استفاده می‌شود.

❖ رفتار مکانیکی مصالح بر اساس رابطه تنش-کرنش Ramberg-Osgood (رابطه ۶)، توصیف می‌گردد.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \left[1 + \frac{3}{7} \left(\frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^{n-1} \right] \quad (6)$$

با استفاده از این رابطه می‌توان خصوصیات سخت‌شدگی کرنشی مصالح را به خوبی در نظر گرفت. ❖ شرایط مرزی این مدل به صورت آزاد بوده و قیدی به آن وارد نمی‌شود. در واقع پایداری این مدل بر مبنای حالت بارگذاری آن (فشار یکنواخت) و باتوجه به عملکرد آن در حالت کرنش صفحه‌ای (به دلیل کوچک بودن طولها)، تامین می‌شود.

❖ بارگذاری مدل به صورت فشار یکنواخت بیرونی و تحلیل انجام شده تحلیل استاتیکی غیرخطی (هندسی و مصالح) می‌باشد که در آن برای حل مسائل غیرخطی و جهت تعقیب مسیر تعادل پس از نقطه حدی، از الگوریتم حل طول کمان استفاده می‌شود.

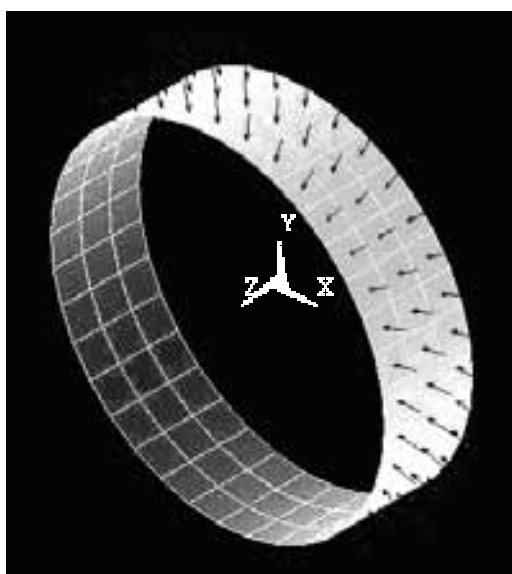
❖ بر اساس روش Hutchinson و Chater جهت حذف نقاط دوشاخگی، بر اساس رابطه (۷) به مدل به اندازه ۰/۰۰۵ ضخامتش ناکاملی (به صورت بیضی‌شدگی) وارد می‌شود:

$$\Delta_0 = \frac{D_{max} - D_{min}}{D_{max} + D_{min}} \quad (7)$$

جدول (۱) مشخصات هندسی و مکانیکی مدل مزبور و شکل (۳) مدل عناصر محدود ایجاد شده و بارگذاری آنرا نشان می‌دهد:

جدول ۱- مشخصات مدل مورد استفاده جهت مطالعه موردی

پارامتر سخت-شدگی Ramberg-	مدول یانگ (MPa)	تنش تسلیم (MPa)	ضخامت (mm)	قطر لوله (mm)
۳۰	۶۹۰۰۰	۲۹۰	۰/۷۳۷	۳۸/۲



شکل ۳- مدل عناصر محدود دوبعدی ایجاد شده و بارگذاری آن

نتایج تحلیل عناصر محدود دوبعدی

پس از انجام تحلیل، منحنی فشار- تغییرحجم به دست می‌آید شکل (۴). که در آن Y تنش تسلیم مصالح لوله و A سطح محصور می‌باشند. با استفاده از این منحنی و با استفاده از نرم‌افزار AutoCAD یا با استفاده از برنامه نوشته شده توسط مولفین [۲۱]، محل خط ماکسول و به تبع آن مقدار فشار انتشار به دست می‌آید.

شایان ذکر است که در این روش پس از برخورد دو جدار بالا و پائین لوله به هم، نیازی به ادامه تحلیل نیست و از آن نقطه به بعد منحنی به صورت خطی به موازات محور عمودی رسم می‌گردد.

Kyriakides و همکارانش [۲۴] و Nogueira [۲۵] تخمین‌های این روش را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند. بر مبنای این مقایسه مشخص شد که برای لوله‌های با نسبت قطر به ضخامت بیش از ۶۰، اختلاف نتایج نوعاً کمتر از ۵ درصد است، در حالی که برای لوله‌های با نسبت قطر به ضخامت کمتر از ۳۰، این اختلاف به بیش از ۲۵ درصد خواهد رسید.

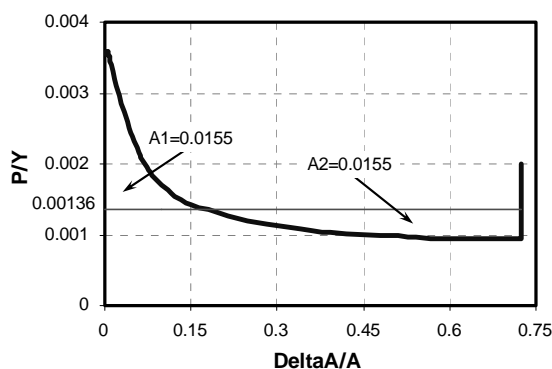
مدل‌سازی عناصر محدود سه‌بعدی انتشار خرابی

این روش در اوایل دهه ۱۹۹۰ جهت مدل‌سازی شروع خرابی و انتشار شبه‌استاتیکی و دینامیکی آن، توسط Tassoulas و همکارانش در دانشگاه Texas، ارائه گردید [۲۶]. در طول سالیان گذشته همراه با افزایش کاربرد، این روش کاملتر و استفاده از آن ساده‌تر گشته است. از جمله با فهم پایدار بودن فرآیند انتشار خرابی [۲۵] بخش آغاز خرابی، که در مدل اولیه وجود داشت، از تحلیل عناصر محدود حذف گردید.

هرچند مدل‌سازی عناصر محدود خرابی به این روش، نسبت به روش دوبعدی دشوارتر بوده و زمان تحلیل به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد، لیکن با توجه به در نظر گرفتن اثر نیروی کشش غشایی (که بر اساس تحقیق Hoo Fatt، ۱۵ درصد انرژی ناشی از فشار خارجی را هنگام انتشار خرابی مستهلک می‌کند [۲۲])،

روش سه‌بعدی همیشه نتایج بهتری به دست می‌دهد. در این تحقیق جزئیات یک نوع مدل‌سازی عناصر محدود سه‌بعدی شرح داده می‌شود که علاوه بر اینکه استفاده از آن نسبت به روش‌های قبلی آسانتر می‌باشد، نتایج بسیار مطلوبی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی به دست می‌دهد. جهت ارزیابی نتایج، مدل‌سازی بر اساس مشخصات نمونه‌هایی با اندازه واقعی مورد آزمایش در موسسه C-FER Technologies کانادا (که نتایج آن در یک سری مقالات منتشره توسط Toscano و همکارانش ارائه شده است [۱۵]) انجام می‌شود. مدل‌سازی توسط نرم افزار ANSYS انجام شده و مشخصات آن به صورت زیر می‌باشد:

جدول (۲) نتیجه به دست آمده را بر حسب (MPa)

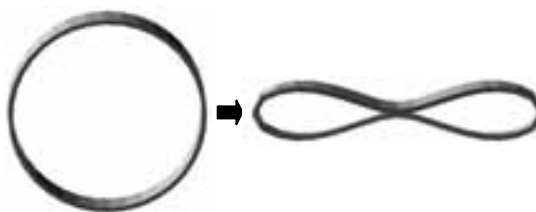


شکل ۴- منحنی تعادل و به دست آوردن فشار انتشار با کاربرد روش خط ماکسول در روش عناصر محدود دو بعدی در مقایسه با نتیجه آزمایشگاهی و تحلیل Chater و Hutchinson نشان می‌دهد.

جدول ۲- فشار انتشار خرابی به دست آمده در مقایسه با مقادیر آزمایشگاهی و تحلیلی مرجع [۲۴] (MPa)

روش محاسبه	تحلیل عناصر محدود تحقیق حاضر	تحلیلی و Chater Hutchinson	آزمایشگاهی
	۰/۳۹۴	۰/۳۹۴	۰/۳۹۵

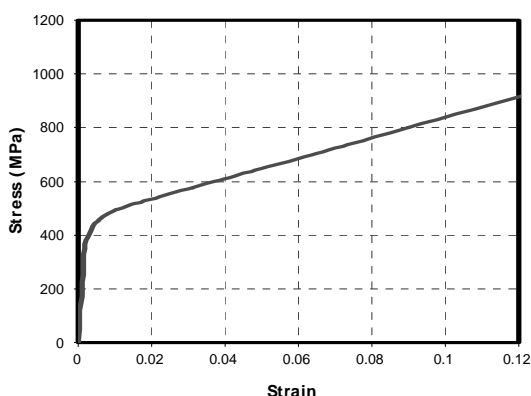
همانطور که اعداد جدول (۲) نشان می‌دهند، فشار انتشار حاصله به مقدار آزمایشگاهی بسیار نزدیک می‌باشد، بنابراین مدل‌سازی عناصر محدود دوبعدی انجام شده در این تحقیق، معتبر و کاربردی است. شکل (۵) مدل دوبعدی را پیش و پس از تحلیل نشان می‌دهد.



شکل ۵- حلقه مورد تحلیل انتشار خرابی از روش عناصر محدود دوبعدی و شکل آن پس از برخورد جداره‌ها به هم

جدول ۴- مشخصات مکانیکی نمونه‌ها

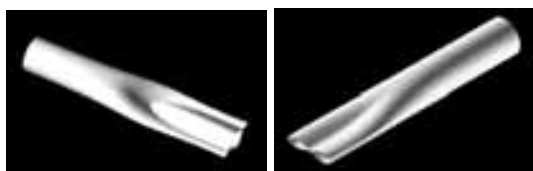
پارامتر تسلیم Ramberg-Osgood (MPa)	مدول الاستیسیته (MPa)	پارامتر سخت‌شدگی Ramberg-Osgood
۳۹۹/۷	210.6×10^5	۱۰/۷



شکل ۶- منحنی تنش-کرنش Ramberg-Osgood اصلاح شده برای فولاد X-65

مدل‌سازی برخورد بین جداره‌ها

برای مدل‌سازی برخورد جداره‌ها پس از خرابی مقطع لوله، از المان تماسی سه‌بعدی استفاده می‌شود. این المان با جلوگیری از در هم فروری جداره‌ها، امکان انتشار خرابی را در مدل عناصر محدود به وجود می‌آورد. شکل (۷) کاربرد این المان را نشان می‌دهد.



(ب)

(الف)

شکل ۷- شکل لوله پس از انتشار خرابی (الف) با کاربرد المان تماسی (ب) بدون کاربرد المان تماسی

❖ لوله‌ها از جنس فولاد X-65 هستند.
❖ جهت مدل‌سازی لوله، از المان پوسته چهار گرهی با قابلیت تغییرشکل‌ها و کرنش‌های بزرگ استفاده می‌شود.
❖ طول مدل دوازده برابر قطر آن در نظر گرفته می‌شود. شایان ذکر است که، بر اساس مطالعات صورت گرفته، جهت مدل‌سازی سه‌بعدی انتشار خرابی باید طول مدل حداقل ده برابر قطر آن باشد [۲۷].

❖ برای حذف نقاط دوشاخگی، بر اساس مود اول کمانش (که محتمل‌ترین مود کمانش بوده و از تحلیل کمانش خطی به دست می‌آید) و بر مبنای رابطه (۷)، به مدل یک ناکاملی بسیار کوچک (که از تحلیل دو شاخگی به دست می‌آید و حداقل ناکاملی مورد نیاز برای گذر از نقاط بحرانی است) وارد می‌شود [۲۸].
❖ رفتار مکانیکی مصالح بر اساس رابطه تنش-کرنش Ramberg-Osgood اصلاح شده توصیف می‌گردد که در آن برای کرنش‌های بیش از 0.15 رابطه مزبور (رابطه ۶) اصلاح می‌گردد. با استفاده از این رابطه می‌توان خصوصیات سخت‌شدگی کرنشی مصالح را به خوبی در نظر گرفت.
❖ تنش‌های پسماند لوله در نظر گرفته نمی‌شود.

جدول‌های (۳) و (۴) به ترتیب مشخصات هندسی و خصوصیات مکانیکی نمونه‌های مورد استفاده در این تحقیق جهت مطالعه موردی را نشان می‌دهند. شکل (۶) نیز منحنی Ramberg-Osgood اصلاح شده را برای فولاد X-65 نشان می‌دهد.

جدول ۳- مشخصات هندسی نمونه‌های آزمایش شده توسط C-FER Technologies

شماره نمونه	قطر لوله (mm)	ضخامت (mm)
۱	۳۲۳	۱۷/۶۵
۲	۳۲۳	۲۰/۳۰
۳	۳۵۲	۲۲/۰۰

شرایط مرزی

شرایط مرزی مدل به صورت گیردار از هر دو طرف می‌باشد. در انتخاب این نوع شرایط مرزی موارد زیر در نظر بوده است:

الف- گیردار بودن دو انتها مترادف با شرایطی است که لوله هنگام آزمایش در آزمایشگاه دارد. چرا که قبل از قرار گیری لوله درون محفظه فشار، دو انتهای آن توسط کلاهک‌هایی محکم بسته می‌شود و پس از قرارگیری نیز در محل‌های مورد نظر در دو انتها ثابت می‌گردد.

ب- جهت اطمینان از انتخاب این نوع شرایط مرزی، در این تحقیق مدل سه‌بعدی تحت شرایط مرزی مختلف مورد تحلیل قرار گرفت و مشخص شد که تنها شرایط مرزی گیردار جواب مناسب می‌دهد. به طوریکه نتایج حاصل از سایر شرایط مرزی قابل مقایسه با شرایط گیردار نمی‌باشند.

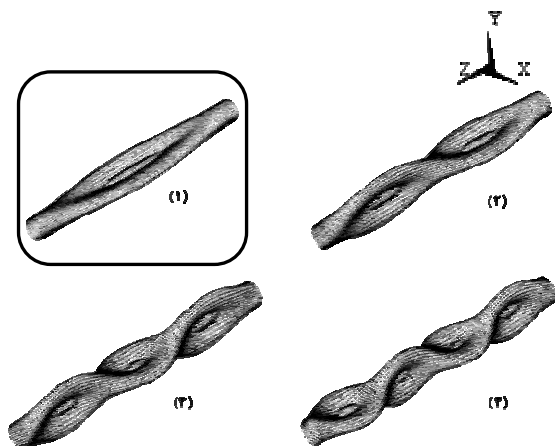
ج- در پژوهش‌های عددی قبلی که راجع به مسأله انتشار خرابی با بهره‌گیری از مدل‌سازی سه‌بعدی انجام شده است (از جمله مرجع [۶])، لوله در دو انتها گیردار در نظر گرفته شده است.

تحلیل نقطه دو شاخگی

هنگام تحلیل پایداری هر سازه کامل هندسی، احتمال وقوع ناپایداری نقطه دو شاخگی باید مدنظر قرار گیرد. ناپایداری نقطه دو شاخگی هنگامی اتفاق می‌افتد که قبل از رسیدن به مقاومت حدی یک یا چند مقدار ویژه ماتریس سختی، صفر یا منفی شود. با وقوع این نوع ناپایداری، نقطه حدی حاصله واقعی نبوده و همانطور که پیشتر ذکر شد، باید با اعمال تغییرشکل کوچکی بر مبنای مود اول کمانش، اولاً سازه را مجبور کرد که به طور واقعی کمانش کند، ثانیاً با از بین بردن نقطه دو شاخگی، مقدار واقعی فشار بحرانی به دست آید.

نتایج تحلیل‌های دو شاخگی انجام شده نشان داد که برای هر سه مدل مورد بررسی در این تحقیق با مشخصات هندسی اسمی، ناپایداری نقطه دو شاخگی به وجود می‌آید. برای به دست آوردن حداقل ناکاملی

مورد نیاز، بر اساس رابطه (۷) و مود بحرانی کمانش شکل (۸) برای هریک از نمونه‌ها دامنه‌ای از ناکاملی انتخاب می‌شود که در حد پائینی آن ناپایداری نقطه دو شاخگی به وجود می‌آید و در حد بالایی به وجود نمی‌آید.



شکل ۸- مودهای کمانش حاصل از تحلیل خطی روی نمونه‌ها و مود بحرانی کمانش (مود مشخص شده)

با نصف کردن این دامنه و تحلیل دوشاخگی در دو مرز جدید، ناکاملی هندسی که به ازای آن هنوز نقطه دو شاخگی وجود دارد به عنوان مرز پائین انتخاب شده و دامنه ناکاملی دوباره نصف می‌شود. اگر در مرز جدید (مرز بالایی) نقاط دوشاخگی وجود نداشت این مرز به عنوان مرز بالا انتخاب شده و اگر وجود داشت این مرز به عنوان مرز پائین انتخاب می‌شود و دوباره فاصله نصف می‌شود. این فرآیند آنقدر تکرار می‌شود تا ناکاملی‌ای به دست آید که در یک مقدار بسیار کوچکتر از آن نقاط دوشاخگی به وجود آید.

جدول (۵) حداقل ناکاملی‌های مورد نیاز برای گذر از نقاط دوشاخگی را برای سه نمونه مورد بررسی نشان می‌دهد.

همانطور که از اعداد جدول (۵) مشخص است، با افزایش نسبت قطر به ضخامت، میزان حداقل ناکاملی لازم برای عبور از نقاط دوشاخگی کاهش می‌یابد. مقادیر حداقل ناکاملی به دست آمده برای سه نمونه مورد بررسی، می‌تواند راهنمای خوبی برای به

در زیر بارهای مختلف حاصل می‌شود. فشارهای مشخصه لوله به کمک منحنی فشار - تغییر حجم لوله به دست می‌آید، که در آن تغییر حجم لوله در هر زیر بار بر اساس تغییر شکل‌های هر یک از عناصر مدل عناصر محدود حاصل می‌شود.

نتیجه تحلیل عناصر محدود خرابی برای

سه مدل با اندازه واقعی مورد بررسی

در این بخش نتایج تحلیل عددی خرابی برای سه مدل مورد بررسی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی، نتایج تحلیل عددی Toscano و همکارانش و همچنین روابط DNV ارائه می‌شود.

وارد کردن شکل تقریباً واقعی لوله (با در نظر گرفتن تغییرات ضخامت در طول و مقطع عرضی لوله)، در نظر گرفتن اثر تنش پسماند و در نظر گرفتن رفتار الاستیک-کاملاً پلاستیک برای مصالح لوله، خصوصیات اصلی مدل عددی Toscano و همکارانش هستند [۱۵]. جداول (۶) و (۷) نتایج را به ترتیب برای فشار خرابی و فشار انتشار خرابی نشان می‌دهند.

جدول ۶- نتایج فشار خرابی حاصله نسبت به مقادیر آزمایشگاهی برای سه نمونه در مقایسه با مقادیر نسبی دو روش دیگر

شماره نمونه	نتیجه تحلیل عناصر محدود تحقیق حاضر نسبت به نتیجه آزمایشگاهی	نتیجه تحلیل عناصر محدود Toscano و همکارانش نسبت به نتیجه آزمایشگاهی	تخمین روابط DNV نسبت به نتیجه آزمایشگاهی
۱	۰/۹۹	۰/۹۷	۱/۰۰
۲	۱/۰۴	۱/۱۱	۰/۹۶
۳	۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۸

جدول ۷- نتایج فشار انتشار خرابی حاصله نسبت به مقادیر آزمایشگاهی برای سه نمونه در مقایسه با مقادیر نسبی دو روش دیگر

شماره نمونه	نتیجه تحلیل عناصر محدود تحقیق حاضر نسبت به نتیجه آزمایشگاهی	نتیجه تحلیل عناصر محدود Toscano و همکارانش نسبت به نتیجه آزمایشگاهی	تخمین روابط DNV نسبت به نتیجه آزمایشگاهی
۱	۰/۹۸	۰/۸۹	۰/۹۸
۲	۱/۰۰	۰/۹۹	۱/۰۴
۳	۰/۹۷	۰/۸۷	۰/۹۸

دست آوردن حداقل ناکاملی مورد نیاز در لوله‌هایی با نسبت قطر به ضخامت نزدیک به این مقادیر باشد.

جدول ۵- حداقل ناکاملی مورد نیاز برای گذر از نقاط دوشاخگی در سه نمونه مورد بررسی

شماره نمونه	نسبت قطر به ضخامت	حداقل ناکاملی لازم
۱	۱۸/۳	۹/۲۹e-۵
۲	۱۵/۹	۳/۲۵e-۴
۳	۱۶	۳/۵۵e-۵

بارگذاری و تحلیل

همانند مدل‌سازی دوبعدی، بارگذاری نمونه‌ها به صورت فشار یکنواخت خارجی (فشار هیدرو استاتیک) و تحلیل خرابی، تحلیل استاتیکی غیرخطی با کاربرد الگوریتم طول کمان می‌باشد. با این تفاوت که در مدل‌سازی سه‌بعدی، لازمست که تحلیل پس از برخورد جداره‌های لوله به هم ادامه یابد. هنگامی که مشاهده شود که افزایش تغییر شکل لوله تحت یک فشار ثابت صورت می‌پذیرد، حالت پایدار انتشار محقق شده است، بنابراین به تحلیل خاتمه داده می‌شود.

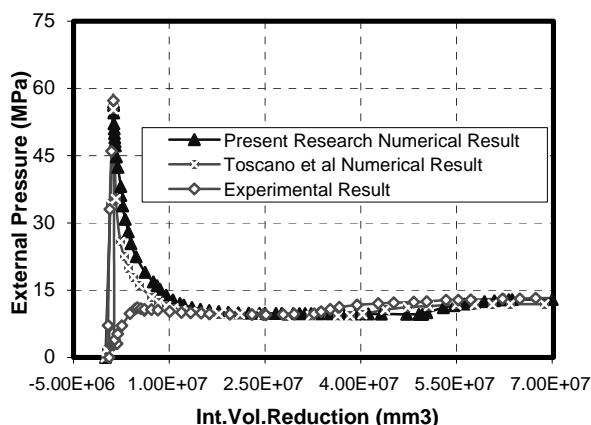
نتایج تحلیل عناصر محدود سه بعدی انتشار خرابی

در تحلیل عناصر محدود غیرخطی با استفاده از روش طول کمان، شعاع طول کمان مرجع^۷، که از تقسیم بار کلی به تعداد زیر بارها^۸ به دست می‌آید، عامل اصلی در حصول جواب‌های مطلوب می‌باشد. بر اساس تحلیل‌های انجام شده در این تحقیق، مشخص شد که برای حصول جواب‌های مطلوب، با افزایش نسبت قطر به ضخامت لازمست تعداد زیر بارها افزایش یابد (تعداد زیر بارهای در نظر گرفته شده در تحلیل نمونه‌های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب ۱۰۰۰، ۲۲۰، ۴۰۰ بوده است). پس از تحلیل خرابی، تغییر شکل‌های لوله در

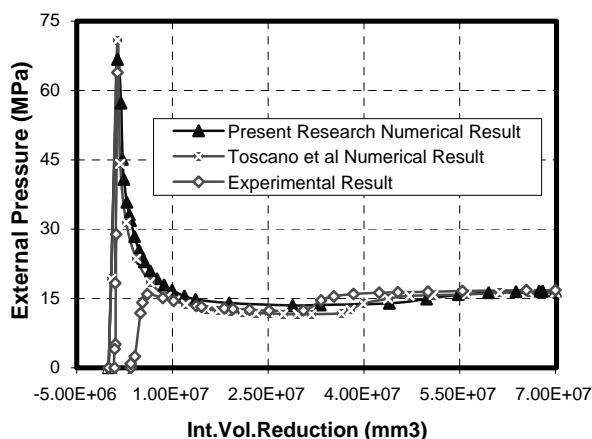
^۷ Reference Arc-Length

^۸ Substep

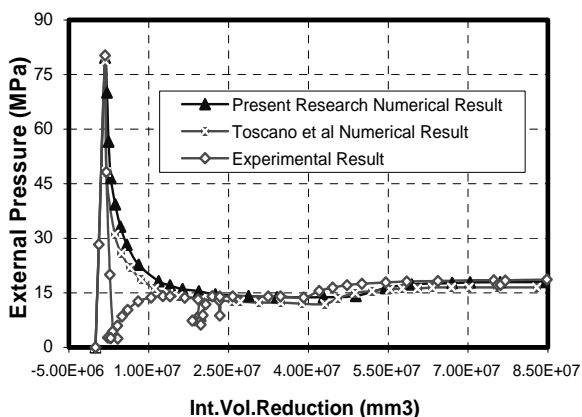
نیز، روند یکسانی نشان می‌دهند.



شکل ۹- منحنی تعادل حاصله از تحلیل عددی تحقیق حاضر برای نمونه شماره (۱) در مقایسه با نتیجه آزمایشگاهی و نتیجه تحلیل عددی Toscano و همکارانش



شکل ۱۰- منحنی تعادل حاصله از تحلیل عددی تحقیق حاضر برای نمونه شماره (۲) در مقایسه با نتیجه آزمایشگاهی و نتیجه تحلیل عددی Toscano و همکارانش



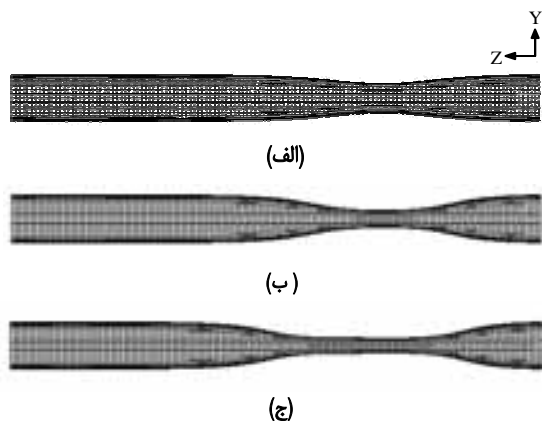
شکل ۱۱- منحنی تعادل حاصله از تحلیل عددی تحقیق حاضر برای نمونه شماره (۳) در مقایسه با نتیجه آزمایشگاهی و نتیجه تحلیل عددی Toscano و همکارانش

بر اساس نتایج حاصله مشخص می‌شود که، اولاً نتایج تحلیل عناصر محدود تحقیق حاضر با نتایج آزمایشگاهی توافق مطلوبی دارد. ثانیاً، روش به کار رفته در این تحقیق، علاوه بر سهولت استفاده نسبت به روش Toscano و همکارانش فشارهای مشخصه لوله را نزدیکتر به نتایج آزمایشگاهی تخمین می‌زند. ثالثاً، این تحقیق کارایی بالای مدل‌سازی سه‌بعدی در تخمین فشارهای مشخصه لوله‌های با نسبت قطر به ضخامت کمتر از ۳۰ (نقطه ضعف مدل‌سازی دوبعدی) را نشان می‌دهد. رابعاً، با استفاده از روابط DNV می‌توان فشارهای مشخصه (خصوصاً فشار انتشار خرابی) را به نحو مناسبی تخمین زد.

از اختلاف بیشتر نتایج مدل عناصر محدود Toscano و همکارانش با نتایج آزمایشگاهی نسبت به نتایج مدل عناصر محدود تحقیق حاضر، می‌توان اینگونه نتیجه‌گیری کرد که در بررسی مسأله انتشار خرابی در خط لوله، در نظر نگرفتن سطح واقعی لوله (ناکاملی‌های هندسی) و تنش‌های پسماند (ناکاملی مکانیکی)، تا حدی اختلاف بین نتایج عددی و آزمایشگاهی را جبران کرده، نتایج نزدیکتری به دست می‌دهد. نتایج حاصل از روابط DNV که بر اساس مشخصات هندسی اسمی و صرفنظر از تنش پسماند به دست آمده‌اند، این نتیجه را تأیید می‌کنند.

هر چند که این نتایج برای محدوده خاصی از نسبت‌های قطر به ضخامت (کمتر از ۳۰) به دست آمده است، لیکن با توجه با نتایج مناسب به دست آمده از مدل‌سازی دوبعدی برای نسبت‌های بالاتر از ۳۰ که در بخش‌های پیشین بدان اشاره شد، می‌توان از مدل‌سازی سه‌بعدی انتظار جواب‌های مناسبتر داشت. اشکال (۹) تا (۱۱) منحنی‌های تعادل حاصله را در مقایسه با منحنی‌های آزمایشگاهی و منحنی‌های حاصل از تحلیل عددی Toscano و همکارانش نشان می‌دهند.

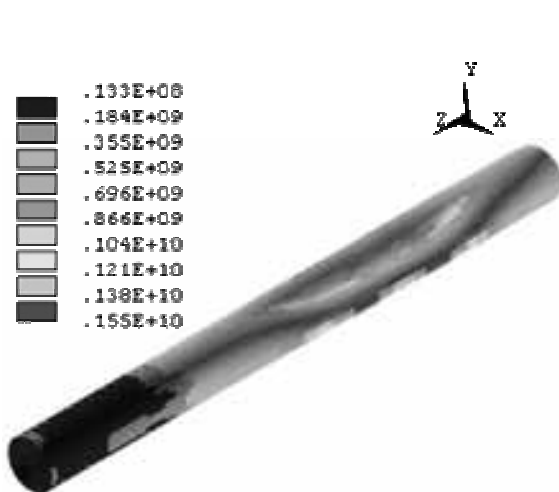
همانطور که از این شکل‌ها دیده می‌شود، منحنی‌های تعادل حاصله بجز در ناحیه بلافاصله پس از ایجاد خرابی، دارای تطابق نسبتاً خوبی با نتیجه آزمایشگاهی می‌باشند. همچنین این منحنی‌ها با منحنی‌های تعادل حاصل از تحلیل عددی Toscano و همکارانش



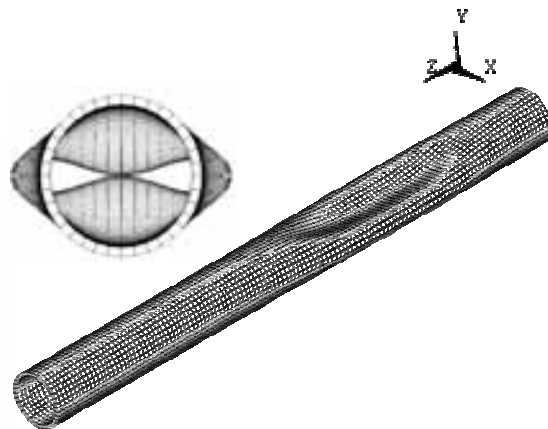
شکل ۱۳- تغییر شکل نمونه ۲ در مرحله پس از خرابی (الف) پیش از تماس (ب) هنگام تماس (ج) هنگام انتشار پایدار خرابی

اختلاف منحنی‌های حاصله با منحنی‌های آزمایشگاهی پس از وقوع کمانش، بدین دلیل است که در هنگام آزمایش، پس از ایجاد خرابی، به دلیل افزایش حجم داخل محفظه، آب تحت فشار (عامل اعمال فشار به لوله)، به یکباره بدون فشار گشته، مدت زمانی طول می‌کشد تا با پمپاژ به درون محفظه دوباره نمونه تحت فشار یکنواخت خارجی قرار گیرد. این مساله مربوط به محذورات آزمایشگاهی است و در واقعیت، برای لوله واقع در بستر دریا، چنین اتفاقی نمی‌افتد [۲۹].

شکل (۱۲) تغییر شکل لوله پس از رسیدن به حالت پایدار انتشار خرابی را به نمایش می‌گذارد.



شکل ۱۴- توزیع تنش معادل Von Mises در حالت پایدار انتشار خرابی در نمونه (۲) برحسب (Pa)



شکل ۱۵- توزیع کرنش در حالت پایدار انتشار خرابی و محل کرنش حداکثر در نمونه (۲)

شکل ۱۲- تغییر شکل منتهی از تحلیل عناصر محدود خرابی نمونه ۲ در حالت انتشار پایدار از دو نما

شکل (۱۳) نیز توالی تغییر شکل لوله در مرحله پس از کمانش و در حالات پیش از تماس، هنگام تماس و پس از تماس (رسیدن به حالت پایدار انتشار) حاصل از تحلیل عناصر محدود سه‌بعدی خرابی را برای یکی از نمونه‌ها (نمونه ۲) نشان می‌دهد.

اشکال (۱۴) و (۱۵) نیز به ترتیب توزیع تنش معادل Von Mises و کرنش را در حالت پایدار انتشار خرابی در نمونه مورد نظر نشان می‌دهند.

از بررسی شکل‌های (۱۴) و (۱۵) مشخص می‌شود که در حین انتشار خرابی، نقاط واقع در رئوس مقطع لوله بیشترین تنش‌ها و کرنش‌ها را تحمل می‌کنند.

همچنین این شکل‌ها نشان می‌دهند که فرض محققینی مانند Martin و Palmer [۲۰] در مورد وجود مفاصل پلاستیک در این نقاط هنگام تغییر شکل،

Engineering, Proceeding of the 9th International Symposium on Offshore Engineering Held at COPPE Federal University of Rio de Janeiro Brazil, pp. 459-466.

4-Xue, J., and Hoo Fatt, M. S., 2001, "Buckle Propagation in Pipelines with Non-uniform Thickness," Ocean Engineering, Vol. 28, pp. 1383-1392.

5-Bergen, P. G., and Mollestad, E., 1982, "Impact-Response Behavior of Offshore Pipelines," ASME Journal of Energy Resources Technology, Vol. 104, pp. 325-329.

6-Kyriakides, S., and Netto, T. A., 2000, "On the Dynamics of Propagating Buckle in Pipelines," International Journal of Solids and Structures, Vol. 37, pp. 6843-6867.

7-Nogueira, A. C., and Tassoulas, J. L., 1995, "Buckle Propagation in Tubular Structures," Offshore Technology Conference, Paper OTC 7803, Houston Tex., pp. 969-976.

8-Lee, L.-H., and Kyriakides, S., 2004, "On the Arresting Efficiency of Slip-on Buckle Arrestors for Offshore Pipelines," International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 46, pp. 1035-1055.

9-Netto, T. A., and Kyriakides, S., 2000, "Dynamic Performance of Integral Buckle Arrestors for Offshore Pipelines. Part I: Experiments," International Journal of Mechanical Science, Vol. 42, pp. 1406-1423.

10-Langner, C. G., 1984, "Design of Deepwater Pipelines," Proc. TNO-IWECO 30th Anniversary Symposium on Underwater Technology, Netherlands

11-Mesloh, R., Johns, T. G., and Sorenson, J. E., 1976, "The Propagating

نتیجه گیری

در این تحقیق روش‌های مدل‌سازی عناصر محدود دوبعدی و سه‌بعدی انتشار خرابی در خطوط لوله دریایی ارائه شد. این روش‌ها به سهولت قابل کاربرد بوده و نتایج به دست آمده برای هر دو حالت، تطابق مطلوبی با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهند. در پژوهش حاضر نشان داده شد که برای مدل‌سازی عناصر محدود سه‌بعدی انتشار خرابی نیازی به در نظر گرفتن تغییرات ضخامت لوله در طول و مقطع عرضی آن و همچنین در نظر گرفتن اثر تنش پسماند نمی‌باشد و با در نظر گرفتن مشخصات اسمی لوله، یافتن حداقل ناکاملی مورد نیاز برای گذر از نقاط دوشاخگی و در نظر گرفتن رابطه تنش-کرنش Ramberg-Osgood اصلاح شده برای توصیف رفتار مکانیکی مصالح، می‌توان فشارهای مشخصه را به طور مناسبتری تخمین زد. همچنین مشخص شد که برای نسبت‌های قطر به ضخامت کمتر از ۳۰، روش سه‌بعدی برخلاف روش دوبعدی جواب‌های مطلوب می‌دهد. این تحقیق بار دیگر نشان داد که روابط ارائه شده توسط DNV، فشارهای مشخصه (خصوصاً فشار انتشار خرابی) را به نحو مطلوبی تخمین می‌زنند.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از شرکت ملی نفت فلات قاره به خاطر حمایت از این پژوهش تشکر و قدردانی می‌نمایند.

مراجع

1-ABS, 2005, Guide for Building and Classing Subsea Pipeline Systems and Risers, American Bureau of Shipping, Houston.

2-Kyriakides, S., 1994, "Propagating Instabilities in Structures," Advances in Applied Mechanics, Vol. 30, pp. 67-189.

3-Estefen, S. F., Netto, T. A., and Alves, T. M. J., 1995, "Initiation and Propagation Buckling in Deepwater Pipelines," International Offshore

20-Palmer, A. C., and Martin J. H., 1975, "Buckle Propagation in Submarine Pipelines," *Nature*, Vol. 254, pp. 46-48.

۲۱- طالب‌پور، ر.، بررسی مسأله انتشار کمانش در خطوط لوله دریایی با توجه به اثر سیال داخلی، ۱۳۸۴، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش سازه‌های دریایی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند تبریز.

22-Hoo Fatt, M. S., 1998, Plastic Failure of Pipelines, Proceeding of the 8th International Offshore and Polar Engineering Conference, Montreal, Canada, Vol. 2, pp.119-126.

23-Chater, E., and Hutchinson, J. W., 1984, "On the Propagation of Bulges and Buckles," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 51, pp. 269-277.

24-Kyriakides, S., Yeh, M. K., and Roach, D., 1984, "On the Determination of the Propagation Pressure of Long Circular Tubes," *ASME Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 106, pp. 150-159.

25-Nogueira, A. C., 1993, "Steady-State Finite Element Analysis of Buckle Propagation in Pipeline," Ph.D Dissertation, The University of Texas at Austin, Austin, Texas.

26-Tassoulas, J. L., Katsounas, A. T., and Song, H. W., 1990, "Finite Element Analysis Propagating Buckles in Deep-Water Pipelines," *Offshore Technology Conference*, Paper OTC 6413, Houston, Texas.

27-Assanelli, A. P., Toscano, R. G., Johnson D. H., and Dvorkin E. N., 2000, Experimental / numerical analysis of the collapse behavior of steel pipes, *Engng. Computations*, Vol.17, pp.459-486.

Buckle," *BOSS '76*, Vol. 1, pp. 787-797.

12-Kyriakides, S., and Babcock, C. D., 1981, "Experimental Determination of the Propagation Pressure of Circular Pipes," *ASME Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 103, pp. 328-336.

13-Kyriakides, S., Yeh, M. K., 1985, "Factors Affecting Pipe Collapse," The University of Texas EMRL Report No.85/1, prepared for the American Gas Association, Catalogue No.L51479.

14-Dyau, J. Y., and Kyriakides, S., 1993, "On the Propagation Pressure of Long Cylindrical Shells under External Pressure," *International Journal of Mechanical Science*, Vol. 35, pp. 675-687.

15-Toscano, R.G., and Dvorkin, E.N., 2002, "Collapse and Post-Collapse Behavior of Steel Pipes," *Fifth World Congress on Computational Mechanics*, Vienna, Austria.

16-Toscano, R. G., Gonzalez, M., and Dvorkin, E. N., 2004, "Validation of a Finite Element Model that Simulates the Behaviour of Steel Pipes under External Pressure," www.fudetec.co.ar.

17-DNV, 2000, *Submarine Pipeline System*, OS-F101, Det Norske Veritas, Norway.

18-BS 8010, 2002, *Code of Practice for Pipelines – Part 3 Pipelines Subsea: Design, Construction and Installation*, British Standards Institution, UK.

19-Bai, Y., 2001, "Pipelines and Risers," *Elsevier Ocean Engineering Book Series*, Vol .3, Netherlands.

29-Toscano, R.G., Timms, C., Dvorkin, E. N., and DeGeer, D., 2003, "Determination of the Collapse and Collapse Propagation Pressure of Ultra-Deepwater Pipelines," Proc. 22nd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE 2003-37339.

30-SAS. IP, Inc., 2002, ANSYS Structural Analysis Guide, Release 7.0, Canonsburg, PA.

28-Talebpour, R., Abedi, K., and Gharabaghi, A. R. M., 2006, "Buckle Propagation in Pipelines under Non-Uniform Pressure," Proc. 25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE 2006-92419.