



Effect of Construction Defects on the Casing Collapse Strength

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Ghodusi Borujeni F.¹ PhD,
Jalalifar H.^{*2} PhD,
Jafari S.² PhD,
Rafati A.³ PhD

How to cite this article

Ghodusi Borujeni F, Jalalifar H, Jafari S, Rafati A. Effect of Construction Defects on the Casing Collapse Strength. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(12):3031-3038.

ABSTRACT

Casings collapse causes the increase of costs to oil and gas production companies, every year. This problem can be seen not only at drilling time in some formations but also it can cause problems after the completion and exploitation. Accurate predict of collapse pressure is a very important factor in the design of the casing. Casing collapse generally is a function of the geomechanical properties of the formation and the properties of the solid mechanics of the casings. Some of the properties of solid mechanics that are effective on the casings collapse are the ovality of the casing, the difference in the thickness of the casing and the existence of residual stress during the construction of the casing. In this research, the effects of formation creep and the pipe construction defects on the collapse of the casing through numerical methods have been investigated. The results of this study indicate that the pipe construction defects, such as casing ovality and eccentricity reduce the strength of the casing.

Keywords Casing Collapse; Pipe Construction Defects; Rock Salt Creep; Numerical Modeling

¹Petroleum Engineering Department, ACECR Institute of Higher Education, Isfahan, Iran

²Petroleum & Gas Engineering Department, Engineering Faculty, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

³Iranian Central Oil Fields Company (ICOFC), Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Petroleum & Gas Engineering Department, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran
Phone: -
Fax: -
jalalifar@uk.ac.ir

Article History

Received: August 15, 2018

Accepted: May 26, 2019

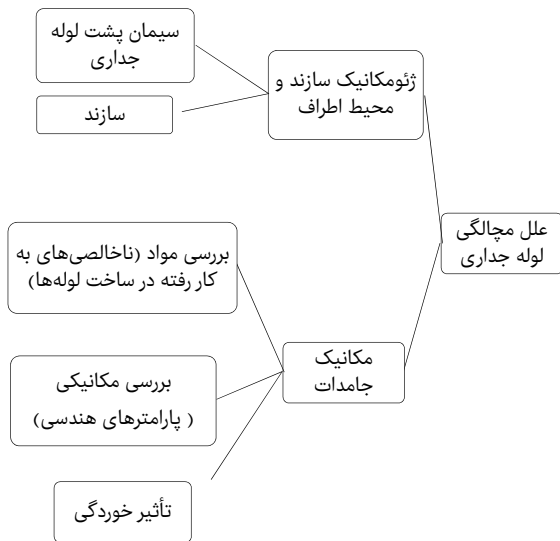
ePublished: December 21, 2019

CITATION LINKS

[1] The influence of shape and residual stress of pipe on collapse property, and the collapse formulae experimentally derived [2] Collapse capacity for a pipeline with thick coating [3] Empirical formula given for collapse resistance of worn casing under nonuniform loading [4] A new empirical formula for collapse resistance of commercial casing [5] An improved design equation for tubular collapse [6] FEM analysis of the collapse strength of a tube [7] Analysis of stress in casings covered with cement in oil and gas wells using the finite element method [8] Designing the tubes in the oil well and its connections [9] Casing design-theory and practice [10] A rational expression for the critical collapsing pressure of pipe under external pressure [11] A theoretical approach to the problem of collapse of deep well casing

از دو دیدگاه ژئومکانیکی (مباحث مربوط به سازند) و مکانیک جامدات، صورت پذیرد.

تأثیر عیوب ساخت بر مقاومت مچالگی لوله‌های جداری



شکل ۱) تقسیم‌بندی علل مچالگی لوله جداری

بررسی لوله جداری از لحاظ مکانیکی به سه دسته کلی تقسیم‌بندی می‌شود. اول بررسی‌های مواد است که در این مورد ناخالصی‌های موجود در لوله‌های جداری بررسی می‌گردد و دوم بررسی مکانیکی بر مبنای پارامترهای هندسی لوله‌های جداری می‌باشد و سومین مورد بررسی تأثیر خوردگی بر مچالگی لوله جداری می‌باشد. در استانداردهایی که توسط انجمن نفت آمریکا ارائه گردیده بیشتر به پارامترهای هندسی پرداخته شده است.

۲- بررسی مچالگی لوله

در بررسی تأثیر عیوب ساخت بر مقاومت مچالگی لوله‌های جداری در زمان مدل‌سازی فاکتورهایی باید بررسی و لحاظ گردند. این پارامترها که در ادامه شرح داده می‌شوند عبارتند از: بیضی‌بودن لوله، خارج از مرکزی (Eccentricity) لوله تنش‌های پسماند، فشار مچالگی و روش طول کمان.

۲-۱- بیضی‌بودن لوله

هنگام ساخت لوله ایده‌آل‌ترین حالت که مد نظر تولیدکنندگان می‌باشد، ساخت لوله‌هایی با سطح مقطع کاملاً دایروی می‌باشد؛ اما به دلیل خطاهای دستگاه‌ها و پیچیدگی روند ساخت لوله این امر همیشه مقدور نمی‌باشد. لذا لوله جداری پس از ساخت اندکی از حالت دایروی کامل انحراف داشته و به حالت بیضی‌شکل (شکل ۲) متمایل می‌شود [1].

بیضی‌بودن لوله (Ovality) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Ov = \frac{OD_{max} - OD_{min}}{OD_{average}} \quad (1)$$

که OD_{max} قطر بیشینه لوله و OD_{min} قطر کمینه لوله و OD_{ave} میانگین لوله می‌باشد.

۲-۲- خارج از مرکزی لوله

در هنگام ساخت لوله‌های جداری احتمال دارد به دلیل خطاهای دستگاهی و ساخت در برخی مواقع ضخامت لوله تولیدشده در تمامی جوانب یکسان نباشد این عیب که در شکل ۳ نشان داده شده است را خارج از مرکزی لوله (Eccentricity) می‌نامند. چنانچه لوله تولیدشده دچار خارج از مرکزی باشد، مقدار فشارهای خارجی و

فرید قدوسی بروجنی PhD

گروه مهندسی نفت، مؤسسه آموزش عالی جهاد دانشگاهی استان اصفهان، اصفهان، ایران

حسین جلالی‌فر PhD

گروه مهندسی نفت و گاز، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

سعید جعفری PhD

گروه مهندسی نفت و گاز، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

امیر رفعتی MSc

شرکت نفت مناطق مرکزی ایران، تهران، ایران

چکیده

مچالگی لوله‌های جداری همه ساله هزینه‌های زیادی را بر شرکت‌های تولیدکننده نفت و گاز تحمیل می‌کند. این مشکل نه تنها در زمان حفاری در برخی سازندها مشاهده می‌شود بلکه مدت‌ها بعد از تکمیل و بهره‌برداری نیز می‌تواند باعث بروز مشکلاتی شود. پیش‌بینی دقیق میزان فشار مچالگی فاکتور بسیار مهمی در طراحی لوله‌های جداری است. مچالگی لوله‌های جداری به طور کلی تابعی از خواص ژئومکانیکی سازند و خواص مکانیک جامداتی لوله‌های جداری است. از جمله خواص مکانیک جامداتی تأثیرگذار بر مچالگی لوله جداری می‌توان به بیضی‌بودن لوله جداری و تفاوت در ضخامت لوله جداری و وجود تنش پسماند در هنگام ساخت لوله جداری اشاره کرد. در این تحقیق به بررسی رفتار مچالگی لوله‌های جداری با در نظر گرفتن خزش سازند و عیوب ساخت لوله با استفاده از روش‌های عددی پرداخته شده است نتایج حاصل نشان می‌دهند که عیوب ساخت لوله از قبیل بیضی‌بودن و خارج از مرکزی لوله تا حد زیادی می‌تواند باعث کاهش مقاومت مچالگی لوله جداری گردد این کاهش مقاومت به حدی است که لوله جداری در زمان‌های ابتدایی قرارگرفتن در چاه دچار کرنش پلاستیک زیادی شده و مچاله می‌شود و عیوب ساخت، نسبت به پدیده خزش سنگ نمک تأثیر بیشتری بر مچالگی لوله جداری دارد.

کلیدواژه‌ها: مچالگی لوله جداری، عیوب ساخت لوله، خزش سنگ نمک، مدل‌سازی عددی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۵/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۳/۰۵

*نویسنده مسئول: jalalifar@uk.ac.ir

۱- مقدمه

مچالگی لوله‌های جداری یکی از بزرگ‌ترین مشکلات موجود در صنایع بالادستی نفت به شمار می‌آید. سالانه میلیون‌ها دلار به دلیل مچالگی لوله‌های جداری در چاه‌های نفت در مناطق مختلف دنیا صرف تعمیرات و بازسازی یا حفاری مجدد چاه می‌شود. مچالگی لوله‌های جداری دارای علل متعددی نظیر حرکت خزشی سنگ‌های نرم همچون نمک و شیل و ایجاد بار نقطه‌ای روی لوله جداری به دلیل عدم سیمان‌کاری خوب در پشت لوله جداری، حرکت لغزشی لایه‌ای نرم که میان دو لایه سخت‌تر از لحاظ مکانیکی قرار گرفته باشد، نشست مخزن به علت برداشت بیش از حد یا عللی مربوط به ساخت لوله‌ها و غیره می‌باشد. کشور ما نیز از این مشکل بزرگ مستثنی نیست و در چندین میدان نفتی جنوب غرب کشور این پدیده مشاهده شده است.

مقاومت مچالگی به عنوان حداکثر فشار خارجی مورد نیاز برای مچاله‌کردن یک قطعه از لوله جداری تعریف می‌گردد. فشار مچالگی یا فروپاشی هنگامی رخ می‌دهد که در شاخه‌ای از رشته جداری، فشار خارج رشته (لوله جداری) از داخل بیشتر باشد.

در شکل ۱ تقسیم‌بندی علل مچالگی لوله جداری، مشاهده می‌شود. بررسی مباحث مربوط به مچالگی (مچالیدگی) لوله جداری می‌تواند

۳-۲- تنش پسماند

به طور کلی اغلب فرآیندهای ساخت و تولید در قطعه عامل ایجاد تنش پسماند (Residual Stress) می‌باشند. جوشکاری، آهنگری، ماشینکاری، ریخته‌گری، شکل‌دهی، پوشش‌دهی و عملیات حرارتی از روش‌های عمده و پر استفاده در ساخت تجهیزات صنعتی از منابع ایجاد این تنش‌ها در محصولات صنعتی می‌باشند. علاوه بر فرآیندهای ساخت تنش‌های پسماند به دلیل اختلاف جنس و نیز اختلاف ابعادی در مونتاژ نیز در قطعات به وجود می‌آید.

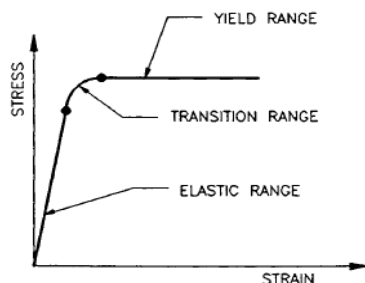
امروزه موضوع اثر تنش‌های پسماند بر رفتار مکانیکی و کارکرد قطعات مهندسی مورد توجه می‌باشد. عدم توجه به این موضوع و نداشتن اطلاعات مناسب از وجود و توزیع و بزرگی تنش‌های پسماند اغلب باعث بروز خسارت و افزایش هزینه‌های مربوط به استفاده از قطعات مکانیکی شده است.

۳-۴- فشار مچالگی

در عملیات حفاری عمدتاً نیروهای مچالیدگی (مچالگی) به وسیله فشار هیدرواستاتیک ستون سیال خارج از رشته لوله جداری ایجاد می‌شود. این سیالات معمولاً سیال حفاری و گاهی دوغاب سیمان می‌باشند. همچنین لوله‌های جداری ممکن است در حین حفاری سازندهایی نظیر خاک رس و سازندهای نمکی با فشار مچالگی (Collapse Pressure) شدید مواجه شود.

به طور کلی استحکام لوله‌های جداری تحت فشار خارجی به عوامل مختلفی وابسته است. مهم‌ترین فاکتورها از نظر مکانیک جامدات برای تعیین استحکام بحرانی مچالگی عبارتند از: طول، قطر، ضخامت جداره لوله جداری و مشخصه‌های فیزیکی متریال مانند نقطه تسلیم، حد الاستیک و نسبت پواسون [8].

ناتوانی لوله‌ها با رفتار الاستیک-پلاستیک ایده‌آل، تحت فشار خارجی مچالگی می‌تواند به سه طریق الاستیک، پلاستیک و تجاوز از حد استحکام کششی نهایی متریال رخ دهد (شکل ۴).



شکل ۴ رفتار الاستوپلاستیک متریال لوله‌های جداری تحت فشار مچالیدگی [8]

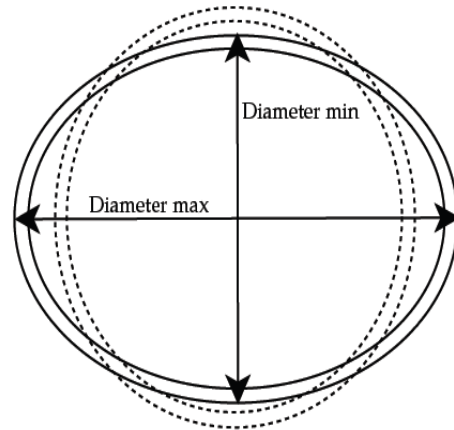
لوله‌های جداری که نرخ D/t و استحکام پایینی دارند به محض این که به مقدار بحرانی مچالگی می‌رسند متریال آن‌ها تحت فشار خارجی شروع به تسلیم شدن می‌کند. در این شرایط نمونه‌هایی که رفتار مچالیدگی پلاستیک ایده‌آل از خود نشان می‌دهند، به سبب فشار خارجی دچار ناتوانی می‌شوند که به این حالت، محدوده تسلیم (Yield Range) می‌گویند [9].

در نقطه مقابل، لوله‌هایی که دارای نرخ بالایی از D/t و استحکام هستند مچالیدگی آن‌ها در پایین نقطه تسلیم رخ می‌دهد. توانایی این لوله‌ها در مقابل فشار خارجی به وسیله استحکام مچالیدگی محدود می‌شود در حالی که در لوله‌های با نرخ پایینی D/t و استحکام، بر اثر طول زیاد و ضخامت کم، تحت فشار خارجی، ناتوانی کمانش (Buckling) ایجاد می‌شود. در این مورد ناتوانی به دلیل تغییر شکل الاستیک خالص (که ناشی از خارج از گردی بودن لوله

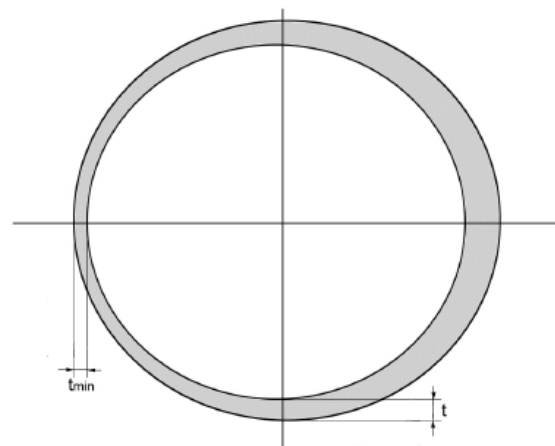
داخلی که می‌تواند تحمل کند با حالت نرمال کاملاً متفاوت است. میزان خارج از مرکزی لوله براساس تعریف زیر قابل محاسبه می‌باشد [2]:

$$ec = \frac{t_{max} - t_{min}}{t_{average}} \quad (2)$$

که t_{max} ضخامت بیشینه لوله و t_{min} ضخامت کمینه لوله و t_{ave} ضخامت متوسط لوله می‌باشد.



شکل ۲ بیضی بودن لوله [2]



شکل ۳ خارج از مرکزی لوله [3]

تامانو و میمکی، توکیماسا و تاناکا، عیسی و کروفراد اثرات عیوب هندسی در مقاومت مچالگی لوله جداری را بررسی کردند و معادلاتی تجربی با استفاده از آنالیزهای عددی ارائه نمودند. تامانو و میمکی و توکیماسا و تاناکا ادعا کردند که تنش‌های پسماند جانبی به مقدار زیادی فشار مچالگی را کاهش می‌دهد، در حالی که عیسی و کروفراد عقیده داشتند اثر آن بسیار کم است و اثر تنش باقیمانده (پسماند) در معادله آن‌ها صرف نظر شد [4-6].

ناصی و همکاران لوله‌های جداری با طول زیاد که در معرض فشار خارجی یکنواخت (با در نظر گرفتن بار اغتشاش) قرار دارند را به روش اجزای محدود و با استفاده از نرم‌افزار انسیس ۱۲ مدل‌سازی و تحلیل کرده‌اند و در نهایت نتایج حاصل از تحلیل با نتایج تجربی و آزمایشگاهی مقایسه کرده‌اند و به این نتیجه رسیدند که بار کمانشی با افزایش نسبت D/t کاهش می‌یابد و با افزایش بار اغتشاش مقدار بار بحرانی کمانش کاهش می‌یابد. هرچه بار اغتشاش بیشتر می‌شود تأثیر آن بر مقدار بار بحرانی کمانش کاهش می‌یابد [7].

چاه مورد مطالعه در یکی از میادین جنوب غرب ایران قرار دارد. هدف این پژوهش، بررسی رفتار مچالگی لوله جداري در مجاورت قسمت دوم سازند گچساران که از جنس نمک می باشد و در عمق ۲۸۲۶ متری واقع شده است می باشد. در این مطالعه برای بررسی رفتار سنگ نمک از مدل نمایی (Power Law) و حالت سخت شونده با زمان (Time Hardening) استفاده شده است.

$$\varepsilon^c = A \sigma^n t^b \quad (9)$$

A ضریب نرخ خزش، n توان تنش و b توان سخت شدن می باشد. پارامترهای رفتاری سنگ نمک در جدول ۲ قابل مشاهده می باشند.

جدول (۱) پارامترهای ژئومکانیکی در عمق ۲۸۲۶/۴ متری

| مقدار | علامت اختصاری | نام پارامتر |
|-------|---------------|-----------------------------------|
| ۲۲۱۴ | ρ | دانسیتة سنگ (Kg/m ³) |
| ۰/۲۹ | ν | ضریب پواسون استاتیک |
| ۴۵ | φ | زاویه اصطکاک داخلی (degree) |
| ۴۸ | σ_h | تنش افقی حداقل (MPa) |
| ۵۶ | σ_H | تنش افقی حداکثر (MPa) |
| ۸/۸۹۷ | E_{sta} | مدول یانگ استاتیک (GPa) |
| ۳۷ | p.p | فشار منفذی (MPa) |
| ۷/۰۹۶ | K_{sta} | مدول بالک (GPa) |
| ۳۸ | UCS | مقاومت فشاری تک محوره (MPa) |
| ۱۴۸ | M.W | وزن گل (pcf) |
| ۰/۲۲۱ | C | گرمای ویژه (BTU/lb-F) |
| ۲/۳۱۱ | Kh | قابلیت هدایت گرمایی (BTU/hr-ft-F) |

جدول (۲) پارامترهای سنگ نمک استفاده شده در مدل سازی

| مقدار | علامت اختصاری | پارامتر |
|---------------------------|---------------|----------------------|
| $۳/۲۸۷۹۶ \times 10^{-33}$ | A | Power law multiplier |
| ۴/۴۲ | N | Stress power |
| ۰/۵ | B | Time power |

مشخصات سیمان استفاده شده در شبیه سازی در جدول ۳ آورده شده است. همچنین لوله جداري مورد استفاده در چاه ۹/۶۲۵ اینچ و دارای گرید N-80 می باشد و دارای خواص مندرج در جدول ۴ می باشد. به دلیل این که در مدل سازی عیوب لوله (خارج از مرکزی و بیضی بودن لوله) بررسی خواهد شد و چون تقارن وجود ندارد لذا مدل به صورت دوبعدی و کامل ساخته شده است. در سناریوی اول لوله جداري بدون عیب در چاه قرار گرفته و بین لوله جداري و سازند سیمان در نظر گرفته شده و در سناریوی دوم لوله با خارج از مرکزی ۲٪ در مدل سازی لحاظ گردیده و در سناریوی سوم لوله با بیضی بودن ۲٪ درون چاه مدل سازی شده است.

چنانچه میزان کرنش بحرانی در لوله از مقداری که توسط رابطه زیر که توسط برونو ارائه شده، بیشتر باشد لوله دچار مچالگی حاد شده و دیگر نمی توان از آن استفاده کرد.

$$\varepsilon_{Critical} > \left(\frac{2}{A_c}\right) \left(\frac{2E_f l}{E_c}\right) \quad (10)$$

که در آن A_c سطح مقطع، E_f مدول یانگ سازند، I ممان اینرسی و E_c مدول یانگ لوله جداري می باشد.

جدول (۳) پارامترهای سیمان

| مقدار | پارامتر |
|-------|------------------------------|
| ۲ | مدول یانگ (GPa) |
| ۰/۱ | ضریب پواسون |
| ۱۸۴۲ | دانسیتة (Kg/m ³) |
| ۰/۴۲۲ | گرمای ویژه (BTU/lb-F) |
| ۰/۸ | هدایت (BTU/hr-ft-F) |

است) اتفاق می افتد. از این رفتار مچالیدگی به نام ناتوانی در محدوده الاستیک (Elastic Range) نام برده می شود [9]. کلایندینست فرمولی تئوری ارائه کرد که توسط API به عنوان فشار مچالگی الاستیک پذیرفته شده است [10]:

$$P_{E0} = 2 \frac{E}{1-\nu^2} \frac{1}{\frac{D}{t} \left(\frac{D}{t}-1\right)^2} \quad (3)$$

در رابطه بالا P_{E0} فشار مچالگی الاستیک بدون بارگذاری محوری، E مدول یانگ، ν ضریب پواسون، D قطر خارجی و t ضخامت دیواره می باشد. فشار مچالگی الاستیک تحت بارگذاری محوری نیز به صورت زیر تعریف می شود [11]:

$$P_{EA} = P_{E0} = 2 \frac{E}{1-\nu^2} \frac{1}{\frac{D}{t} \left(\frac{D}{t}-1\right)^2} \quad (4)$$

همان طور که پیش تر ذکر شد رفتار مچالگی لوله جداري تنها به صورت الاستیک نبوده بلکه به مچالگی پلاستیک تمایل دارد. معادله مچالگی پلاستیک بر مبنای معیار تسلیم Von Mises بیان می شود:

$$P_{y0} = 2\sigma_y \frac{\frac{D}{t}-1}{\left(\frac{D}{t}\right)} \quad (5)$$

که در این رابطه P_{y0} فشار تسلیم بدون بارگذاری محوری می باشد. هولم کوئیست برای لوله های جدار نازک فشار تسلیم تصحیح شده را تحت بارگذاری محوری به صورت زیر ارائه کرد [11]:

$$P_{yA} = P_{y0} \left[\sqrt{1 - 0.75 \left(\frac{\sigma_A}{\sigma_y}\right)^2} - 0.5 \left(\frac{\sigma_A}{\sigma_y}\right) \right] \quad (6)$$

که در رابطه بالا P_{yA} فشار تسلیم تحت بارگذاری محوری و σ_A تنش محوری است.

تامانو و میمکی یک معادله فشار تسلیم عمومی برای یک لوله جداري تحت فشار خارجی به صورت زیر ارائه کردند:

$$P_{G0} = 2\sigma_y \frac{\frac{D}{t}-1}{\left(\frac{D}{t}\right)} \left(1 + \frac{1.47}{\frac{D}{t}-1}\right) \quad (7)$$

در حالی که تحت بارگذاری محوری و فشار خارجی، فشار تسلیم عبارت است از:

$$P_{GA} = P_{G0} \left[\sqrt{1 - 0.75 \left(\frac{\sigma_A}{\sigma_y}\right)^2} - 0.5 \left(\frac{\sigma_A}{\sigma_y}\right) \right] \quad (8)$$

۳- روش و مراحل تحقیق

۳-۱- مدل سازی المان محدود ژئومکانیک

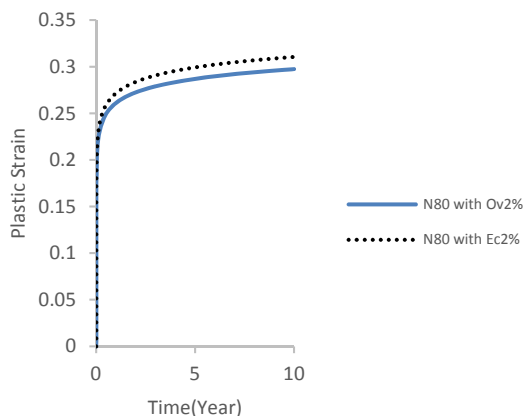
ساخت مدل که از چند مرحله تشکیل شده در نرم افزار ABAQUS انجام گردیده است. ابتدا اجزاء مختلف مدل از قبیل سازند، سیمان و لوله جداري برای حالات مختلف مد نظر ساخته می شود و پس از آن خصوصیات مختلف هر جزء به مدل تخصیص داده می شود. در این پژوهش سنگ نمک به عنوان ماده ویسکوالاستیک در نظر گرفته شده است که این امر با توجه به رفتار خزش در مرحله اول و دوم مطابق با قانون نمایی می باشد. لوله جداري نیز به عنوان یک ماده الاستیک-پلاستیک و سیمان پشت لوله جداري یک ماده الاستیک در نظر گرفته شده است. آنالیز XRD از نمونه های نمک به دست آمده در حین حفاری، ترکیب شیمیایی نمک در میدان مورد بررسی را بیش از ۹۰٪ هالیت نشان می دهد و مابقی اجزا انیدریت و دولومیت هستند که با توجه به غیرسیال بودن آن ها، در مدل سازی ها ترکیب شیمیایی نمک هالیت در نظر گرفته شد. پارامترهای رفتاری این سنگ در جدول ۱ آورده شده است.

۳-۳-۱- بررسی مچالگی لوله جداری با در نظر گرفتن بیضی بودن و خارج از مرکزی

در این قسمت از تحقیق پس از مدل‌سازی مسئله برای دو حالت کاملاً مجزا با در نظر گرفتن این نکته که لوله جداری سابق با گرید N-80 دارای میزان ۲٪ بیضی بودن و در مرحله دوم لوله جداری مذکور دارای ۲٪ خارج از مرکزی باشد، نتایج حاصل از شبیه‌سازی به صورت زیر حاصل شد:

نمودار ۳ تغییرات کرنش پلاستیک لوله جداری را برای دو حالت مورد بررسی نشان می‌دهد همان‌طور که در این نمودار مشاهده می‌شود، در صورتی که لوله جداری فقط دارای ۲٪ بیضی بودن باشد میزان کرنش پلاستیک لوله جداری که به واسطه خزش سنگ نمک سازند گچساران در آن ایجاد شده است به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد و در انتهای ۱۰ سال شبیه‌سازی شرایط چاه به مقداری حدود ۰/۳ می‌رسد.

همچنین کاملاً مشخص است که میزان کرنش پلاستیک ناشی از خزش سنگ نمک سازند گچساران برای حالتی که لوله دارای خارج از مرکزی ۲٪ است از حالتی است که لوله نرمال باشد به مراتب بیشتر است و این در صورتی است که چنانچه لوله‌ای بدون عیب در چاه استفاده شود میزان کرنش پلاستیک ۰/۰۷۸ خواهد بود (همان‌طور که در نمودار ۱ مشاهده شد).



نمودار ۳) کرنش پلاستیک ایجاد شده در لوله جداری چاه مورد نظر با در نظر گرفتن میزان ۲٪ بیضی بودن اولیه و خارج از مرکزی

در نمودار ۴ میزان تغییرات قطر لوله جداری برای دو حالت مورد بررسی بیضی بودن و خارج از مرکزی ۲٪ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود وجود ۲٪ بیضی بودن سبب می‌شود لوله مذکور در ابتدای حضور در چاه به اندازه ۰/۳۳۵ اینچ تغییر قطر داده و نهایتاً پس از ۱۰ سال قطر آن به ۷/۸۵ اینچ می‌رسد که در کل میزان تغییر قطر داخلی آن ۰/۶۸۵ اینچ می‌باشد. این در حالی است که میزان کاهش قطر لوله جداری در صورتی که لوله دارای خارج از مرکزی ۲٪ است نسبت به حالتی که لوله بدون عیب ساخته شده باشد (نمودار ۱)، به مراتب بیشتر بوده است. میزان تغییر قطر داخلی لوله جداری برای حالتی که لوله فقط دارای ۲٪ تغییر ضخامت باشد، ۰/۵۳۵ اینچ می‌باشد. این در حالی است در حالت اول و بدون در نظر گرفتن عیوب ساخت، تغییر قطر لوله ۰/۴۴ اینچ بود. در هر دو حالت مورد بررسی عیوب لوله باعث شده است که بیش از ۹۰٪ تغییر قطر لوله در چند روز اول قرارگیری در چاه اتفاق بیفتد و لوله در زمان بسیار کوتاهی پس از نصب مچاله شود.

جدول ۴) مشخصات لوله جداری

| پارامتر | مقدار |
|------------------------------|----------------------|
| قطر بیرونی (inch) | ۹/۶۲۵ |
| قطر داخلی (inch) | ۸/۵۳۵ |
| وزن (lb/ft) | ۵۸/۴ |
| گرید | N-80 |
| مدول الاستیسیته (Pa) | ۲۱۰×۱۰ ^{۱۰} |
| ضخامت دیواره (inch) | ۰/۵۴۵ |
| ضریب پواسون | ۰/۳ |
| دانسیته (Kg/m ^۳) | ۷۸۵۰ |

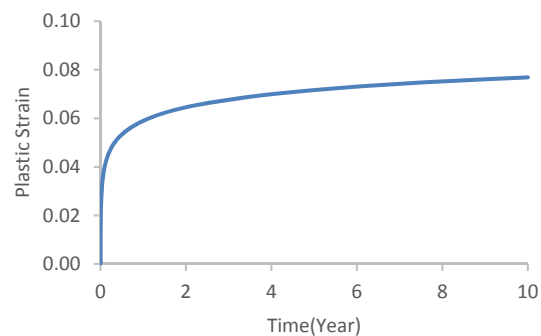
۳-۲- اعتبارسنجی مدل‌سازی

اعتبارسنجی این مدل‌سازی با استفاده از داده‌های یکی از چاه‌های میدان چشمه‌خوش بررسی گردیده و نتایج حاصل از مدل‌سازی صحت و دقت پژوهش را تأیید کرده است.

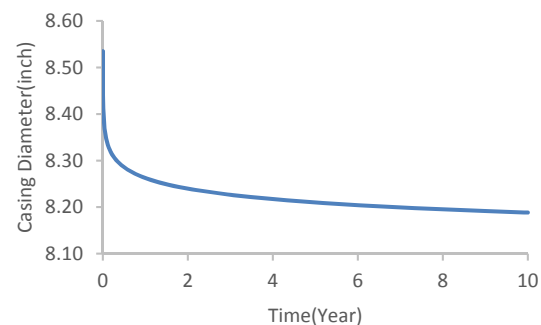
۳-۳- ارائه و تحلیل نتایج مدل‌سازی ژئومکانیک

در نمودار ۱ میزان کرنش لوله جداری برای حالتی که یک لوله بدون عیب درون چاه قرار گرفته باشد را برای مدت ۱۰ سال نشان می‌دهد. این نمودار نشان‌دهنده نقطه دارای بیشترین تغییرات می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود کرنش لوله جداری، نشان‌دهنده رفتار الاستوپلاستیک می‌باشد و میزان تغییرات آن پس از مدت ۱۰ سال حدود ۱/۸٪ می‌باشد که این مقدار از کرنش بحرانی محاسبه شده از رابطه برونو (۷٪) بیشتر بوده و باعث بروز مشکلات جدی در لوله جداری می‌گردد.

نمودار ۲ نشان‌دهنده تغییرات قطر لوله جداری در مدت ۱۰ سال نشان می‌دهد. همان‌گونه که در نمودار مشاهده می‌گردد، قطر داخلی لوله جداری پس از مدت ۱۰ سال به ۸/۱۹ اینچ می‌رسد که نشان‌گر کاهش ۰/۳۴۵ اینچی قطر لوله می‌باشد که می‌تواند مشکلات جدی را در هنگام عملیات مختلف تعمیرات چاه ایجاد کند.



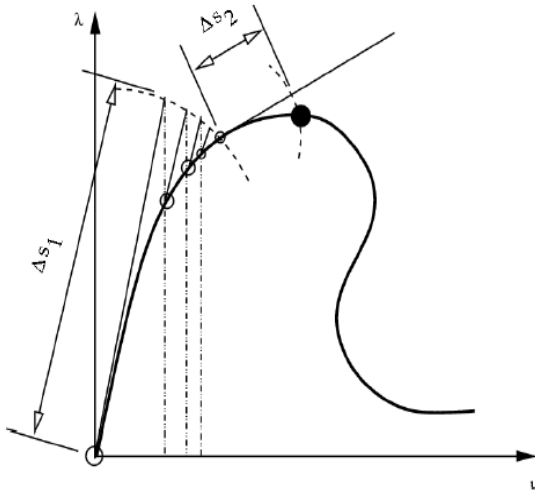
نمودار ۱) تغییرات کرنش لوله جداری در مدت ۱۰ سال بر اثر خزش سازند گچساران در چاه مورد نظر



نمودار ۲) تغییرات قطر لوله جداری در چاه مورد نظر ناشی از خزش سازند گچساران در طول مدت ۱۰ سال

۳- تعداد ۱۰ مدل که در آن‌ها فقط وجود تنش پسماند در لوله لحاظ گردیده است.

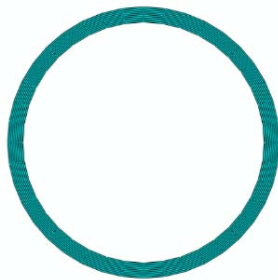
تمامی مدل‌های دسته بیضی‌بودن و خارج از مرکزی لوله با توجه به محاسبات تلورانس مجاز تغییر قطر و تغییر ضخامت موجود در گزارش‌های API ترسیم شده است.



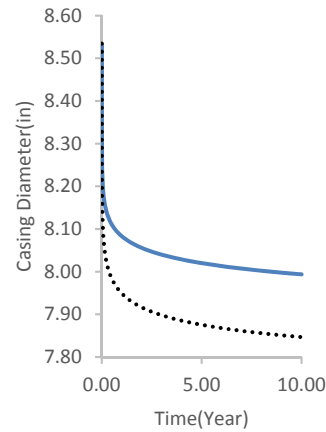
شکل ۵) منحنی بار جابجایی برای آنالیز ریسک [11]

در این تحقیق برای تمام مدل‌ها (شامل حالات نرمال و دارای عیوب ساختاری) ابتدا یک تحلیل خطی مقدار ویژه (Linear Eigenvalue Analysis) انجام شد. جابجایی‌های مربوط به این شکل مدها در فایلی به عنوان نقص اولیه (fil) ذخیره شده و در تحلیل بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرند تا تأثیر شکل مدها در تحلیل کمناش اعمال شود. در غیر این صورت نرم‌افزار به طور اختیاری مد کمناش را انتخاب می‌کند که معمولاً به نتایج غیرواقعی منجر می‌شود. بعد از انجام تحلیل Buckle یک تحلیل غیرخطی که می‌تواند ریسک یا دینامیکی باشد، انجام می‌شود تا منحنی بار-جابجایی به دست آید. مقدار حداکثر این منحنی بار کمناش است. در تحلیل Static Riks از روش Arc-Length برای تحلیل پس‌کمناش استفاده می‌گردد.

شکل ۶ مدل ساخته شده برای حالت لوله نرمال را نشان می‌دهد از آنجایی که این لوله نرمال است دارای هیچ‌گونه عیب ساختاری (خارج از مرکزی، تنش پسماند و بیضی‌بودن) نمی‌باشد. تعداد مش این مدل به دلیل اینکه بررسی حالت پلاستیک مدل مد نظر می‌باشد با توجه به اصل استقلال خطی، ۴۰۰ مش تعیین گردیده است. شکل المان‌ها نیز Quad Dominated و تکنیک مش‌زنی هم آزاد (Free) تعیین گردید.



شکل ۶) مدل‌سازی لوله



نمودار ۴) تغییرات قطر لوله جداری ایجاد شده در لوله جداری چاه مورد نظر با در نظر گرفتن ۲٪ خارج از مرکزی و بیضی‌بودن بر اثر خزش سنگ نمک سازند گچساران

۳-۴- مدل‌سازی مکانیک جامدات

فشار مچالگی لوله جداری یک سیستم پیچیده است که توسط معادلات غیرخطی تحلیل می‌شود. یک روش مؤثر برای به دست آوردن مقاومت نهایی لوله جداری استفاده از تحلیل عددی است. آنالیز المان محدود به وسیله نرم‌افزار ABAQUS انجام شده است. برای مدل‌سازی دقیق پلاستیسیته و تغییر شکل تکنیک حل کوشی نیوتن اصلاح شده برای حل معادلات غیرخطی استفاده شده است.

در بررسی تأثیر عیوب ساخت لوله از مدل هندسی استاتیکی استفاده می‌شود. تجزیه و تحلیل مدل هندسی استاتیکی غیرخطی شامل رفتار پلاستیک و تغییر شکل‌های بزرگ برای مچالگی و مسائل کمناش شناخته شده است. بار جابجایی تسلیم یک سختی منفی را همان‌طور که در نمودار ۱ نشان داده شده است پاسخ می‌دهد. بنابراین قسمت رهایی انرژی کرنشی در تعادل باقی می‌ماند. روش طول کمان (Length Method Arc) اصلاح شده یا ریسک اصلاح شده یک روش خوب برای حل این نوع مسائل می‌باشد و در این پژوهش انجام شده است. این روش شامل یک مقدار بار، در آباکوس فاکتور تناسب بار (Load Proportionality Factor; LPF) به عنوان یک مجهول اضافی است که به صورت هم‌زمان بار و جابجایی را حل می‌کند [11].

$$r(U, \lambda) = K(U)U - \lambda F \quad (11)$$

که r مسیر حل مجموعه پیوسته‌ای از نقاط تعادل، K ماتریس سختی، λ مقدار LPF و F بار در این فشار می‌باشد. افزایش بار با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\lambda = \pm \sqrt{\Delta S^2 - \Delta U_n^2} \quad (12)$$

که طول کمان برابر زیر است:

$$\Delta S^2 = \frac{F}{n_{loadsteps}} \quad (13)$$

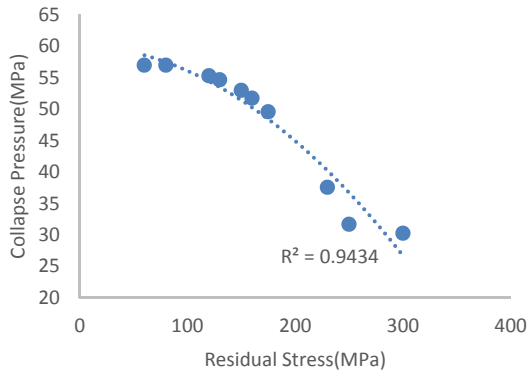
همان‌طور که در شکل ۵ دیده می‌شود این روش صرف نظر از این که پاسخ پایدار یا ناپایدار است، یک راه حل ارائه می‌کند [11].

برای بررسی و تحلیل عیوب ساخت لوله جداری چندین دسته مدل‌سازی به شرح ذیل در نرم‌افزار آباکوس ۶/۱۴ صورت گرفت:

۱- تعداد ۱۶ مدل که در آن‌ها فقط بیضی‌بودن لوله لحاظ گردیده است.
۲- تعداد ۱۱ مدل که در آن‌ها فقط خارج از مرکزی لوله لحاظ گردیده است.

۳-۴-۱-۳- تأثیر تنش پسماند بر مقاومت مچالگی لوله جدار ۳

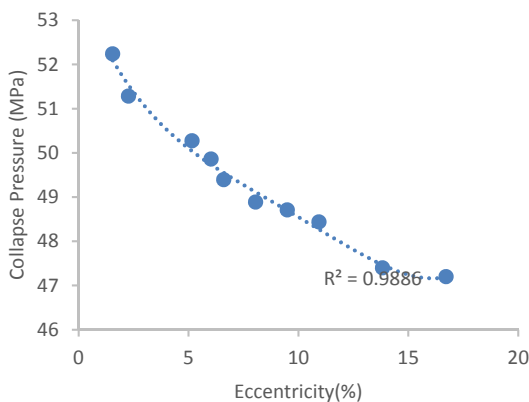
همان‌طور که پیش‌تر ذکر گردید فرآیندهای تولید، نقش بسزایی در وجود تنش‌های پسماند در لوله‌ها دارند که میزان و توزیع این تنش‌ها وابسته به فرآیند تولید متفاوت است. پس از شبیه‌سازی صورت‌گرفته و اعمال تنش‌های پسماند متفاوت از ۶۰ تا ۳۰۰ مگاپاسکال چنانچه در نمودار ۷ هم مشخص است با افزایش تنش پسماند فشار مچالگی کاهش می‌یابد. لذا این که اغلب در طراحی‌های لوله‌های جدار ۳ تنش پسماند نادیده گرفته می‌شود سبب بروز خطاهایی در طراحی‌ها می‌گردد. درصد کاهش فشار مچالگی برحسب تغییر تنش پسماند پس از انجام شبیه‌سازی برابر ۴۶/۸۷٪ به دست آمد.



نمودار ۷) تغییرات فشار مچالگی برحسب تغییر تنش پسماند

۳-۴-۱-۴- تأثیر خارج از مرکزی لوله بر مقاومت مچالگی لوله جدار ۳

عیب دیگری که در هنگام ساخت در برخی مواقع در لوله ایجاد می‌شود خارج از مرکزی لوله است. پس از مدل‌سازی‌های صورت‌گرفته برای خارج از مرکزی‌های مختلف در بازه ۱ تا ۱۷٪ و انجام تحلیل‌های عددی مورد نیاز، نمودار تغییرات مقاومت مچالگی لوله جدار ۳ برحسب تغییر ایسنتریسیته رسم گردید. همان‌طور که در نمودار ۸ مشاهده می‌گردد با افزایش خارج از مرکزی مقاومت مچالگی لوله جدار ۳ کاهش می‌یابد. میزان کاهش فشار مچالگی برحسب تغییر ایسنتریسیته پس از انجام شبیه‌سازی‌ها برابر ۹/۶۵٪ می‌باشد. در جدول ۵ به طور خلاصه میزان کاهش فشار مچالگی برای هر کدام از عیوب ساختاری لوله (اوالیته، خارج از مرکزی و تنش پسماند) مشاهده می‌شود.



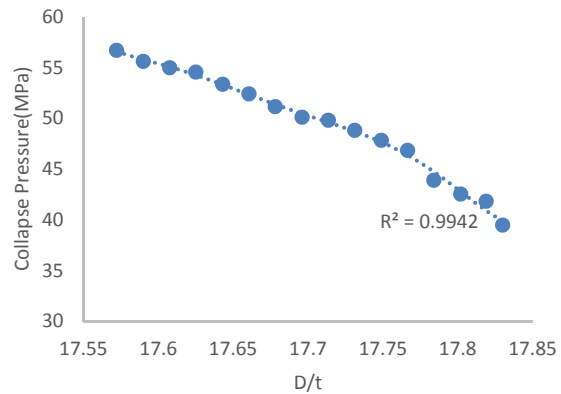
نمودار ۸) تغییرات فشار مچالگی برحسب تغییر ایسنتریسیته

۳-۴-۱-۴- اراهه و تحلیل نتایج مدل‌سازی مکانیک جامدات

بیشترین تغییر قطر لوله جدار ۳ در چاه مورد بررسی مربوط به زمانی است که مدت زیادی از حضور لوله در چاه نگذشته است و این نکته ضرورت مدل‌سازی مکانیک جامدات لوله جدار ۳ را نشان می‌دهد. پس از انجام مدل‌سازی‌های صورت‌گرفته از نظر مکانیک جامداتی یعنی با توجه به این نکته که مچالگی لوله جدار ۳ در مرحله سیمان‌کاری رخ داده است نتایج حاصل در چند دسته گزارش گردید.

۳-۴-۱-۱- تأثیر نسبت قطر خارجی به ضخامت لوله، D/t

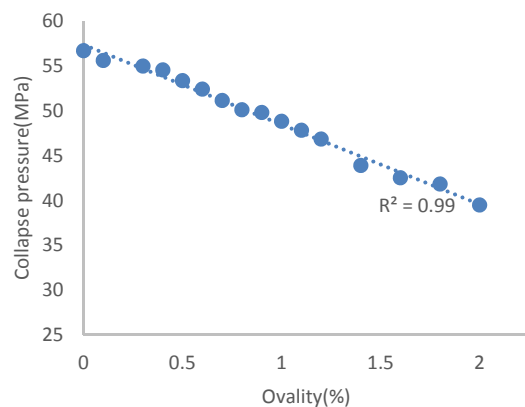
نسبت قطر خارجی لوله به ضخامت آن، D/t برای لوله جدار ۳ توسط آنالیز عددی و برای یک گستره محدود تقریباً بین ۱۷ تا ۱۸ بررسی گردید. شبیه‌سازی‌های این قسمت همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد با عیوب کوچک انجام شده است. از نتایج نشان‌داده‌شده در نمودار ۵ مشخص است که برای لوله جدار ۳ که نسبت D/t بین ۱۷ و ۱۸ دارد، چنانچه نسبت قطر لوله به ضخامت آن افزایش یابد، فشار مچالگی کاهش می‌یابد. لذا همواره با توجه به نسبت مذکور می‌توان فشار مچالگی را تا حد زیادی کنترل کرد.



نمودار ۵) تغییر فشار مچالگی برحسب تغییر D/t

۳-۴-۱-۲- تأثیر بیضی‌بودن لوله بر مچالگی لوله جدار ۳

نمودار ۶ نشان‌دهنده تأثیر اوالیته لوله بر فشار مچالگی می‌باشد. چنانچه ملاحظه می‌گردد با افزایش میزان اوالیته لوله، فشار مچالگی لوله کاهش می‌یابد که این کاهش مقاومت مچالگی بسیار مشهود است. میزان کاهش فشار مچالگی برحسب تغییر اوالیته پس از شبیه‌سازی برابر ۳۰/۳۷٪ به دست آمد.



نمودار ۶) تغییرات فشار مچالگی برحسب تغییر اوالیته

جعفری (نویسنده سوم)، نگارنده بحث (۲۰٪)؛ امیررفعتی (نویسنده چهارم)، نگارنده بحث (۱۰٪)
منابع مالی: این پژوهش توسط شرکت نفت مناطق مرکزی حمایت مالی شده است.

جدول ۵) درصد کاهش فشار مچالگی برحسب تغییرات عیوب ساختاری لوله

| شرح | نماد | درصد کاهش فشار مچالگی |
|---------------|------|-----------------------|
| اولیته | Ov | ۳۰/۳۷ |
| تنش پسماند | R.S | ۴۶/۸۷ |
| خارج از مرکزی | Ec | ۹/۶۵ |

همان‌طور که از جدول بالا مشاهده می‌شود نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های انجام‌شده با شرایطی که پیش‌تر ذکر گردیده حاکم از آن است که هر کدام از عیوب ساخت لوله به نحوی باعث کاهش فشار مچالگی لوله می‌شوند که تنش پسماند بیش از ۲ پارامتر دیگر بر کاهش فشار مچالگی تأثیر می‌گذارد.

۵- نتیجه‌گیری

در اکثر مواقع در هنگام ساخت لوله جداری، عیوبی همچون بیضی‌بودن، خارج از مرکزی، تنش پسماند به دلیل فرآیندهای ساخت و خطاهای دستگاهی و انسانی وجود دارد که بر مقاومت مچالگی تأثیر بسزایی دارد.

نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد در صورتی که لوله جداری بدون عیب ساخت اولیه در چاه قرار بگیرد، پس از مدت زمان طولانی فقط تحت تأثیر خزش سنگ نمک مچاله می‌شود ولی چنانچه لوله با عیب ساخت اولیه از قبیل بیضی‌بودن و خارج از مرکزی در چاه استفاده شود میزان کرنش پلاستیک آن نسبت به حالت اول بیشتر شده و خیلی زودتر در زمان حفاری دچار مچالگی می‌شود که این عیوب، تأثیر بیشتری نسبت به خزش سنگ نمک بر مچالگی لوله جداری دارند. با افزایش میزان اولیته و تنش پسماند، تغییر ضخامت و نسبت D/t لوله جداری، مقدار مقاومت مچالگی لوله کاهش می‌یابد.

تشکر و قدردانی: نویسندگان مقاله از شرکت نفت مناطق مرکزی برای همکاری در انجام این پژوهش کمال تشکر و قدردانی را دارند.

تأییدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری (به طور کامل یا بخشی از آن) به چاپ نرسیده است. همچنین برای بررسی یا چاپ به نشریه دیگری ارسال نشده است. ضمناً محتویات علمی حاصل فعالیت علمی نویسندگان بوده و صحت و اعتبار نتایج بر عهده نویسندگان است.

تعارض منافع: مقاله حاضر هیچ‌گونه تعارض منافی با سازمان‌ها و اشخاص دیگر ندارد.

سهم نویسندگان: فرید قدوسی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۴۰٪)؛ حسین جلالی‌فر (نویسنده دوم)، پژوهشگر کمکی/نگارنده بحث (۳۰٪)؛ سعید

منابع

- 1- Maruyama K, Yazaki Y, Ozaki T. The influence of shape and residual stress of pipe on collapse property, and the collapse formulae experimentally derived. Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology. 1996;61(4):292-299.
- 2- Jamedari R. Collapse capacity for a pipeline with thick coating [Dissertation]. Akershus, Ås, Norway: Norwegian University of Life Sciences; 2015.
- 3- Unknown Author. Empirical formula given for collapse resistance of worn casing under nonuniform loading [Internet]. Unknown city: Oil & Gaz Journal; 2013 [Cited 15 Aug 2016]. Available from: <https://bit.ly/2Nlmw6N>
- 4- Tamano T, Mimaki T, Yanagimoto S. A new empirical formula for collapse resistance of commercial casing. Foreign Technology-Nippon Steel Corporation. 1984;(316):19-25.
- 5- Issa JA, Crawford DS. An improved design equation for tubular collapse. SPE Annual Technical Conference and Exhibition; 1993 Jan 1; Houston, Texas. London: Society of Petroleum Engineers; 1993.
- 6- Tokimasa K, Tanaka K. FEM analysis of the collapse strength of a tube. Journal of Pressure Vessel Technology. 1986;108(2):158-164.
- 7- Nasehi M, Kamali MT, Nasehi S. Analysis of stress in casings covered with cement in oil and gas wells using the finite element method. 3rd National Congress of Petroleum Engineering; 2011 Oct 18; Institute of Petroleum Engineering, Tehran, Iran. [Persian]
- 8- Rahman M, Nourizadegan H. Designing the tubes in the oil well and its connections. 1st Edition. Tehran: Idehnegar; 2014. [Persian]
- 9- Rahman SS, Chilingarian GV. Casing design-theory and practice. Amsterdam: Elsevier; 1995.
- 10- Clinedinst WO. A rational expression for the critical collapsing pressure of pipe under external pressure. In: American Petroleum Institute. Drilling and production practice. New York: American Petroleum Institute; 1939.
- 11- Holmquist JL, Nadai A. A theoretical approach to the problem of collapse of deep well casing. In: American Petroleum Institute. Drilling and production practice. New York: American Petroleum Institute; 1939.