

## Strength of thick-walled circular steel tubes with pitting corrosion under axial compression and bending moment

Alireza Moazezi Mehretehran<sup>1\*</sup>

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

### ABSTRACT

*In this research the behavior of thick-walled Circular Steel Tubes (CSTs) with corrosion under axial compression and bending moment have been studied. There are several factors leading to corrosion in steel structures, especially in marine structures that results in strength reduction of whole structure. Steel tubes are widely used in construction of on-shore and off-shore structures such as, oil rigs and platforms, oil and gas transmission lines. Current study focuses on strength reduction of steel tubes with "pitting corrosion". To this end numerical analyses using finite element software, Abaqus, have been performed. Therefore, utilizing verified models, the simultaneous effects of bending, axial load and corrosion on CSTs have been evaluated. Accordingly, by considering the dimensional characteristics of typical tubular legs of off-shore jackets, a set of parametric study has been undertaken. Pitting corrosion has been characterized in the analyses by relative mass loss ratio index, in companion with morphological indexes of the corrosion, i.e. density and depth of the pits. In accordance with the results obtained and based on the AISC360-22 formula for calculating the load bearing capacity of uncorroded CSTs under combined axial compression and bending moment, two adjustment factors were introduced to scaled down the AISC360-22 formula for accounting the degradation due to the pits. The obtained factors for the relative mass loss ratios vary between 10 to 30 percent showed an average lost bearing capacity of 20 to 50 percent as compared with intact CSTs, with a more profound detrimental effect for deeper pits. The comparison of the proposed method for estimating the lost capacity of the corroded CSTs under combined aforementioned actions in two distinct scenarios, revealed the maximum difference of 11 percent with those obtained from finite element analyses. This showed the applicability of the proposed method.*

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 31 August 2023

**Revise Date:** 14 October 2023

**Accept Date:** 17 November 2023

### Keywords:

*Circular Steel Tubes (CSTs)*

*Axial compression*

*Bending moment*

*Pitting corrosion*

*Finite element analysis*

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.414205.3210>

\*Corresponding author: Alireza Moazezi Mehretehran

Email address: a.moazezi@sharif.edu

## مقاومت لوله‌های جداره ضخیم فولادی دارای خوردگی حفره‌ای تحت فشار محوری و لنگر خمشی

علیرضا معززی مهر طهران<sup>\*۱</sup>

۱- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

### چکیده

در این پژوهش رفتار لوله‌های فولادی دارای خوردگی تحت اثر نیروی محوری و خمش مورد مطالعه قرار گرفته است. لوله‌های فولادی به طور گسترده در ساخت سازه‌های ساحلی و فراساحلی همچون دکل‌ها و سکوه‌های نفتی و همچنین خطوط انتقال نفت و گاز به کار گرفته می‌شوند. هدف از این مطالعه بررسی تأثیر نوع خاصی از خوردگی تحت عنوان «خوردگی حفره‌ای» بر مقاومت لوله‌های فولادی است. رویکرد اصلی در پژوهش حاضر روش تحلیل عددی با استفاده از نرم‌افزار اجزا محدود ABAQUS است. بدین ترتیب با استفاده از مدل‌های صحت‌سنجی شده، اثر همزمان سه عامل خمش، بار محوری و خوردگی بر مقاومت لوله‌های فولادی ارزیابی شده است. در این خصوص با در نظرگیری مشخصات ابعادی متداول در پایه‌های لوله‌ای شکل سکوه‌های فراساحلی، اقدام به انجام تحلیل‌های پارامتری شده است. اثرات خوردگی حفره‌ای نیز بر اساس شاخص کاهش جرم نسبی لوله‌ها و در ارتباط با شاخص‌های ریخت‌شناسی خوردگی حفره‌ای، شامل چگالی و عمق خوردگی در تحلیل‌ها لحاظ شده است. مبتنی بر نتایج و با استناد به معادله آیین‌نامه آمریکا در تخمین ظرفیت لوله‌های فولادی فاقد خوردگی تحت فشار محوری و لنگر خمشی، دو ضریب اصلاح تراز باربری محوری و خمشی لوله‌های خورده شده پیشنهاد گردید تا با مقیاس کردن معادله آیین‌نامه آمریکا، اثر زوال مقاومت برآورد شود. ضرایب اصلاح حاصل به ازای شاخص کاهش جرم نسبی ۱۰ الی ۳۰ درصد، متوسط کاهش ظرفیت باربری ۲۰ الی ۵۰ درصد را نسبت به نمونه فاقد خوردگی نشان دادند. همچنین لازم به توضیح است که در یک شاخص یکسان از کاهش جرم نسبی، خوردگی عمیق‌تر اثرات زوال مقاومت بیشتری را حاصل داد. آزمون روش پیشنهادی طی دو سناریو خوردگی مختلف، بیشینه اختلاف تا ۱۱ درصد را در مقایسه با نتایج تحلیل اجزا محدود حاصل داد. بدین ترتیب قابلیت کاربرد روش پیشنهادی نشان داده شد.

کلمات کلیدی: لوله‌های فولادی، فشار محوری، لنگر خمشی، خوردگی حفره‌ای، تحلیل اجزا محدود

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2023.414205.3210">https://doi.org/10.22065/jsce.2023.414205.3210</a>	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2023.414205.3210">10.22065/jsce.2023.414205.3210</a>	۱۴۰۳/۰۴/۳۱	۱۴۰۲/۰۸/۲۶	۱۴۰۲/۰۸/۲۶	۱۴۰۲/۰۷/۲۲	۱۴۰۲/۰۶/۰۹
علیرضا معززی مهر طهران a.moazezi@sharif.edu				*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:		

## ۱- مقدمه

لوله‌های فولادی در ساخت سازه‌های متنوعی از جمله توربین‌های ساحلی<sup>۱</sup> و فراساحلی<sup>۲</sup>، سکوه‌های نفتی و خطوط لوله انتقال نفت و گاز استفاده می‌شوند. لوله‌های فولادی در معرض بارهای گوناگونی قرار می‌گیرند. یکی از مهمترین این بارها، بار محوری است. از طرفی بارهای جانبی که می‌توانند ایجاد خمش در لوله‌ها نمایند نیز موضوعیت دارند. برای مثال لوله‌های به کار رفته در ساخت پایه‌های یک سکوی فراساحلی علاوه بر بار محوری ناشی از وزن سکو، تحت بارهای جانبی ناشی از امواج، بار باد یا حرکات قوی زمین که ایجاد خمش در آن می‌کنند، قرار می‌گیرد.

خوردگی یکی از دلایل غالب تخریب زودرس سازه‌های فولادی در معرض محیط خوردنده، به ویژه برای سازه‌های دریایی<sup>۳</sup> است. طبق استاندارد سازمان بین المللی استاندارد<sup>۴</sup> [۱]، محیط‌های خوردنده به پنج درجه طبقه‌بندی می‌شوند. در میان آن‌ها، محیط خوردنده دریایی بدترین حالت را دارا است و تلفات خوردگی مربوط به این حالت حدود یک سوم از کل تلفات خوردگی در سطح جهان را تشکیل می‌دهد [۲]. سکوه‌های فراساحلی در معرض اثرات نامطلوب طولانی مدت مانند قرار گرفتن در معرض نور خورشید، املاح نمکی موجود در دریا، ضربه امواج، دما و رطوبت محیطی متغیر با زمان و فرسایش میکروبی دریایی<sup>۵</sup> است. ستون‌های سکوه‌های دریایی به طور تناوبی در معرض محیط مرطوب و خشک قرار می‌گیرند، که فرآیند خوردگی را تسریع می‌کند و این نوع خوردگی به خوردگی حفره‌ای<sup>۶</sup> متمایل است [۳].

علیرغم آن که انواع خوردگی سکوه‌های فراساحلی فولادی متنوع هستند، آن‌ها را به دو دسته کلی خوردگی‌های یکنواخت<sup>۷</sup> و محلی<sup>۸</sup> تقسیم می‌کنند. اگرچه اتلاف فولاد ناشی از خوردگی یکنواخت به طور قابل توجهی بیشتر از خوردگی موضعی است [۴]؛ اما به دلیل تأثیر عیوب موضعی و تمرکز تنش، ظرفیت باربری قسمت آسیب دیده حفره‌ای اغلب کمتر از قسمت یکنواخت خورده شده با کاهش جرم برابر است. همچنین به طور همزمان، شکل‌پذیری اجزای حفره‌ای به دلیل تأثیر تمرکز تنش موضعی به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. بنابراین، اثر خوردگی حفره‌ای بر ایمنی سازه معمولاً بیشتر از خوردگی یکنواخت است [۵].

لازم به توضیح است که خوردگی حفره‌ای ذیل خوردگی موضعی یا محلی قرار دارد که شکل ظاهری آن مطابق با نام‌گذاری صورت گرفته به صورت حفراتی با توزیع تصادفی در سطح عضو دیده می‌شود. با افزایش زمان خوردگی، شعاع حفره‌ها به تدریج گسترش می‌یابد و عمق حفره‌ها عمیق‌تر می‌شوند؛ به صورتی که حتی خوردگی‌ها می‌توانند باعث ایجاد سوراخ در لوله شوند [۶]. پارامترهای مشخصه اصلی خوردگی حفره‌ای عبارتند از: قطر، عمق، شکل و توزیع خوردگی [۷]. با توجه به داده‌های موجود در مطالعات پیشین، قطر حفره‌های خوردگی سازه‌های دریایی به طور کلی ۲۰ تا ۸۰ میلی‌متر است و نسبت قطر به عمق حفره‌ها یک دهم تا یک ششم است [۸]. شکل خوردگی حفره‌ای را می‌توان با شبیه‌سازی‌های استوانه‌ای، مخروطی و نیمه‌بیضی‌گون تقریب زد. هنگامی که حجم خوردگی یکسان است، شکل دهانه خوردگی حفره‌ای تأثیر کمی بر خواص مکانیکی قسمت دارای خوردگی دارد [۹].

لوله‌ها و پوسته‌های استوانه‌ای را می‌توان در دو گروه جداره نازک و جداره ضخیم طبقه بندی نمود. اگر چه مرز واحد و مشترک پذیرفته‌شده‌ای بین این دو دسته مطرح نیست؛ لیکن به لحاظ رفتاری این دو گروه قابل تمیز هستند. به نحوی که در پوسته‌های جداره نازک، معمولاً ظرفیت باربری بوسیله کماتش موضعی مقطع بیشتر کنترل می‌شود؛ در حالی که در نوع جداره ضخیم خرابی موضعی کمتر مطرح است و اغلب حد پلاستیک مقطع، ظرفیت را کنترل می‌کند. البته بسته به طول عضو امکان کماتش کلی (اویلری) نیز وجود دارد. با این حال برخی منابع مرزهایی را مشخص می‌کنند. برای مثال در صورتی که ضخامت پوسته استوانه‌ای کمتر از یک بیستم قطر استوانه

<sup>1</sup> on-shore turbines

<sup>2</sup> off-shore turbines

<sup>3</sup> marine structures

<sup>4</sup> ISO

<sup>5</sup> marine microbial erosion

<sup>6</sup> pitting corrosion

<sup>7</sup> uniform corrosion

<sup>8</sup> local corrosion

باشد ( $t \leq d/20$ )، آن پوسته را جداره نازک و در غیر این صورت ( $t > d/20$ )، جداره ضخیم می‌نامند [۱۰]. یا در جایی دیگر مانند آیین‌نامه اروپا<sup>۹</sup> [۱۱] و آیین‌نامه آمریکا<sup>۱۰</sup> [۱۲] این دسته‌بندی براساس تنش تسلیم و نسبت  $d/t$  مشخص می‌شود. اشاره به این مطالب از این بابت مورد توجه قرار گرفت که پژوهش حاضر معطوف به بررسی لوله‌های جداره ضخیم است.

مطالعات اخیر در حوزه مقاومت لوله‌های جداره ضخیم دارای خوردگی موضعی و خوردگی حفره‌ای در ادامه تشریح می‌شود.

کیم و همکاران<sup>۱۱</sup> [۱۳] جهت تخمین مقاومت خطوط لوله‌های دارای خوردگی تحت خمش خالص، روابط مبتنی بر روش بارحدی مقطع خالص را مورد ارزیابی قرار دادند. بدین منظور چهار رابطه متناظر ارائه شده در ادبیات موضوع را انتخاب و در مقابل نتایج آزمایشگاهی پیشین و اجزا محدود خود بررسی کردند. یکی از موارد مورد توجه آن‌ها، مقایسه استفاده از تنش نهایی مصالح و تنش حد جاری شدن برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر از روش بارحدی مقطع خالص بود. بر این اساس آن‌ها انتخاب هر یک از دو تنش فوق جهت نیل به نتایج دقیق‌تر (ضمن حفظ محافظه‌کاری) را وابسته به نوع رابطه، متفاوت دانستند. شوآی و همکاران<sup>۱۲</sup> [۱۴] مقاومت خمشی نمونه لوله‌های فولادی رده X80 را که در خطوط انتقال گاز استفاده می‌شوند را بوسیله مدل‌سازی اجزا محدود ارزیابی کردند. در این مطالعه اثر وجود خوردگی موضعی به شکل استوانه‌ای، نیم‌کروی و مکعب مستطیل در جداره لوله‌ها بر مقاومت باربری خمشی تحلیل شد. مطالعه پارامتری انجام شده، اثرات هندسه خوردگی و هندسه لوله را بر نتایج کمی‌سازی نمود. بر آن اساس، عمق و عرض خوردگی بیشترین تأثیر را بر کاهش ظرفیت خمشی نهایی لوله‌ها داشتند.

وی و همکاران<sup>۱۳</sup> [۱۵] به بررسی مقاومت تحت فشار محوری نمونه لوله‌های فولادی دارای خوردگی موضعی پرداختند. در این راستا ضمن انجام ۱۰ آزمایش، اثرات عمق خوردگی، گسترده پیرامونی و ارتفاعی ناحیه خورده شده بر ظرفیت باربری نمونه‌ها ارزیابی شد. بر آن اساس رابطه‌ای برای در نظرگیری مقاومت نمونه با خوردگی موضعی تحت فشار محوری ارائه گردید. کانگ و همکاران<sup>۱۴</sup> [۱۶] اثر مقاوم‌سازی نمونه لوله‌های فولادی دارای خوردگی موضعی بوسیله روکش‌دهی لیزری ناحیه خورده شده به روش تولید افزایشی را مورد مطالعه قرار دادند. در مقایسه نتایج مقاومت فشار محوری نمونه‌های ترمیم‌شده با این روش (۴ نمونه) با نمونه بدون خوردگی و نمونه خورده شده (بدون ترمیم)، روش پیشنهادی در ارزیابی مقاومت و سختی از دست رفته لوله‌ها کارآمدی خود را نشان داد. ونگ و شینوآ<sup>۱۵</sup> [۱۷] به‌طور آزمایشگاهی و عددی مقاومت نهایی نمونه لوله‌های فولادی با خوردگی حفره‌ای را تحت فشار محوری مطالعه کردند. براساس نتایج ۱۴ آزمایش انجام شده و تحلیل‌های اجزا محدود، اثر حجم خوردگی و سپس عمق خوردگی در زوال مقاومت محوری لوله‌ها مهم‌تر دانسته شد.

نقی‌پور و همکاران [۱۸] به مطالعه کاهش مقاومت محوری در لوله‌های خطوط انتقال جنس X80، ناشی از نازک‌شدگی و قرشدگی پرداختند. در پژوهش آزمایشگاهی آن‌ها بر روی ۱۵ نمونه لوله، اثر فشار داخلی، میزان قرشدگی و نازک‌شدگی بر مقاومت باربری لوله‌ها ارزیابی شد. بر این اساس اثر نازک‌شدگی در کاهش مقدار کرنش لوله در بار نهایی مشاهده گردید. بارداژ و همکاران<sup>۱۶</sup> [۱۹] اثر کشش محوری در لوله‌های خورده‌شده فولادی با مقاومت بسیار بالا را بر ظرفیت فشار داخلی آن‌ها بررسی کردند. در این مطالعه عددی با انجام ۸۰۰ تحلیل اجزا محدود بر روی نمونه فولادهای X100 و X120، رابطه رگرسیونی مقاومت باربری فشار داخلی ارائه شد. مشخصات مصالح، هندسه لوله و هندسه خوردگی در رابطه پیشنهادی لحاظ گردید. شوآی و همکاران<sup>۱۷</sup> [۲۰] به ارائه رابطه جهت تخمین مقاومت در برابر فشار داخلی لوله‌های فولادی دارای خوردگی پرداختند. در مطالعه اجزا محدود آن‌ها اثرات فشار محوری و لنگر خمشی بر نتایج

<sup>9</sup> EN1993-1-1

<sup>10</sup> ANSI/AISC 360-22

<sup>11</sup> Kim et al.

<sup>12</sup> Shuai et al.

<sup>13</sup> Wei et al.

<sup>14</sup> Kang et al.

<sup>15</sup> Wang and Shenoi

<sup>16</sup> Bhardwaj et al.

<sup>17</sup> Shuai et al.

مقاومت لوله‌ها در نظر گرفته شد. خطای نسبی کمتر از ۱۰ درصد در رابطه پیشنهادی در قیاس با نتایج مدل‌سازی‌ها (۲۲۲ نمونه) بدست آمد. رابطه پیشنهادی در مقایسه با روابط آیین‌نامه‌ای نیز عملکرد دقیق‌تری داشت.

ونگ و همکاران<sup>۱۸</sup> [۲۱] تأثیر عیوب حفره‌ای با توزیع یکنواخت و تصادفی بر مقاومت باربری پوسته استوانه‌ای جداره ضخیم تحت فشار محوری را با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی و عددی بررسی کردند. در این راستا با انجام آزمایش فشار محوری بر روی ۹ نمونه لوله بدون درز از فولاد ضد زنگ اثر خوردگی ایجاد شده مورد بررسی قرار گرفت. از مهمترین نتایج این پژوهش تأکید بر ارتباط بار نهایی لوله‌های دارای خوردگی به شاخص کاهش سطح مقطع ناشی از خوردگی از نتایج مهم این پژوهش بشمار می‌رود. یانگ و همکاران<sup>۱۹</sup> [۲۲] به بررسی آزمایشگاهی و عددی رفتار فشاری لوله‌های دارای خوردگی حفره‌ای پرداختند. آن‌ها در مطالعه خود ۹ نمونه آزمایشگاهی با توزیع خوردگی در ارتفاع میانی و توزیع در دو انتهای عضو را آزمون کردند. تغییر در عمق و قطر حفرات، در کنار تعداد آن‌ها، متغیرهای مورد بررسی در کار آزمایشگاهی آن‌ها بوده است. از بین شاخص‌های خوردگی (جهت کمی‌سازی اثر خوردگی) مانند درجه خوردگی سطحی (میزان مساحت نسبی خورده شده در لوله)، حجم خوردگی و کاهش سطح مقطع خورده شده، همبستگی بیشتری بین میزان تغییر در بار نهایی و کاهش سطح مقطع مشاهده گردید. بعلاوه در بین اثر عمق خوردگی و قطر حفرات خوردگی بر ظرفیت باربری، اثر عمق خوردگی بیشتر ارزیابی شد.

سانگ و همکاران<sup>۲۰</sup> [۲۳] نیز به مطالعه آزمایشگاهی و عددی ستون‌های کوتاه فولادی خورده شده تحت فشار محوری پرداختند. بر اساس نتایج آزمایشگاهی ۷ نمونه لوله خورده شده و تعمیر آن‌ها با استفاده از مدلسازی اجزا محدود، رابطه‌ای مبتنی بر آیین‌نامه فولاد آمریکا برای تخمین ظرفیت فشاری کاهش یافته ارائه گردید. ژائو و همکاران<sup>۲۱</sup> [۲۴] تأثیر خوردگی حفره‌ای با توزیع تصادفی بر ظرفیت خمشی لوله‌های فولادی تحت نیروی فشاری و لنگر خمشی را بررسی کردند. پژوهش آن‌ها در عمل معطوف به تحلیل عددی و ارائه روابط پیشنهادی برای تخمین مقاومت خمشی باقیمانده لوله‌ها بوده است. بر آن اساس روابطی نیمه تحلیلی برای توصیف زوال ناشی از خوردگی بر پایه شاخص کاهش جرم لوله و عمق خوردگی ارائه شد. اما این روابط وابسته به پارامتری به نام  $k$  است که تنها برای چند حالت خاص و با بیانی غیرشفاف و با فرضیاتی نامشخص تعیین شده است.

نظر به مطالعات پیشین، تنها مطالعه انجام شده در حوزه ظرفیت لوله‌های فولادی جداره ضخیم تحت ترکیب فشار محوری و لنگر خمشی که اثرات خوردگی حفره‌ای را لحاظ می‌کند، فاقد رابطه‌ای مشخص و قابل تکرار برای تخمین ظرفیت لوله است. از این رو مطالعه حاضر موارد زیر را جهت توسعه مطالعه یادشده در نظر گرفته است:

- در نظر گیری اثر مشخصات ابعادی در تخمین دقیق‌تر ظرفیت باقیمانده لوله‌های دارای خوردگی؛
- استفاده از نمودار اندرکنشی نیروی محوری در مقابل لنگر خمشی آیین‌نامه‌های معتبر جهت معرفی مبنایی جهت لحاظ کردن اثر خوردگی بر ظرفیت لوله‌ها؛
- ارائه روشی کاربردی جهت تخمین اثر کاهش مقاومت ناشی از خوردگی بر مبنای معرفی ضرایب تصحیح رابطه آیین‌نامه فولاد آمریکا برای لوله‌های بدون خوردگی؛

## ۲- مدلسازی عددی

جهت ارزیابی مقاومت زوال یافته خمشی نمونه لوله‌های فولادی جداره ضخیم تحت فشار محوری که درجات مختلفی از خوردگی حفره‌ای را تجربه می‌کنند، از رویکرد تحلیل اجزا محدود در نرم‌افزار ABAQUS/Standard [۲۵] استفاده شده است. هندسه لوله‌ها با استفاده از اجزای پوسته‌ای S4R (چهارگره‌ای دوبل انحنا با روش انتگرال‌گیری کاهش یافته) که برای مدلسازی پوسته‌های جداره نازک و

<sup>18</sup> Wang et al.

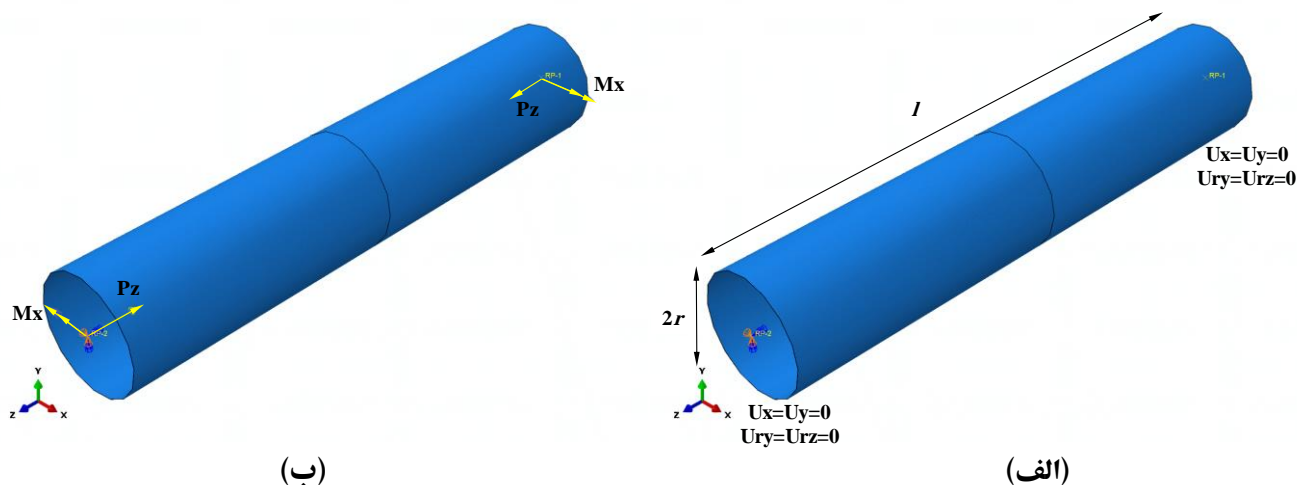
<sup>19</sup> Yang et al.

<sup>20</sup> Song et al.

<sup>21</sup> Zhao et al.

ضخیم تحت تغییر شکل‌های بزرگ کارایی دارد، ساخته شده است [۲۶]. اندازه‌ها در طول تمام پژوهش بر اساس مطالعه حساسیت به مش انجام شده است. از طرفی معمولاً زمانی که ظرفیت پلاستیک مقطع کنترل کننده طرح است، حساسیت به مش‌بندی کمتر خواهد بود. موضوع اخیر در قیاس با حالتی که بحث کمانشی (بویژه کمانش موضعی) کنترل کننده باشد، مطرح شد.

در رابطه با شرایط مرزی، حالت دو سر مفصل با امکان جابجایی در راستای طولی لوله در نظر گرفته شده است. در این خصوص، دو لبه لوله به دو نقطه مرجع از طریق قید جسم صلب مقید و شرایط مرزی و همچنین بارگذاری‌ها به همین نقاط مرجع اعمال شده‌اند. قیود بکار رفته در نمونه لوله‌ها در شکل ۱-الف) نمایش داده شده است.



شکل ۱: تصویر الف) شرایط مرزی و ب) بارگذاری اعمال شده به نمونه لوله‌ها.

بارگذاری لوله‌ها نیز با اعمال بار محوری و لنگر خمشی به نقاط مرجع انجام شده است (شکل ۱-ب)). در مواردی که تحت فشار محوری یا لنگر خمشی خالص تعیین ظرفیت لازم بوده است، از گام تحلیلی استاتیکی ریکس<sup>۲۲</sup> استفاده شده است. اگر تعیین ظرفیت خمشی لوله‌ای که پیشتر تحت بار محوری قرار گرفته است، لازم بوده است؛ ابتدا در گام تحلیلی استاتیکی جنرال<sup>۲۳</sup>، فشار محوری اعمال شده و سپس لنگر خمشی در گام ریکس که متعاقب آن است، به لوله وارد شده است.

بدلیل امکان مقایسه نتایج با روابط آیین‌نامه‌ای، مدل فولاد مورد استفاده در تحلیل‌ها به صورت رفتار دوخطی ایده آل در نظر گرفته شده است. قسمت الاستیک مبتنی بر آیین‌نامه اروپا [۱۱] به صورت مدول الاستیسیته ( $E$ ) برابر با ۲۱۰ گیگاپاسکال و نسبت پواسون  $\nu=0.3$  لحاظ شده است. برای قسمت پلاستیک نیز تنش تسلیم متناظر با فولاد مصرفی (برای مثال فولاد S235 معادل ۲۳۵ مگاپاسکال یا فولاد S355 برابر ۳۵۵ مگاپاسکال) با کرنش پلاستیک صفر در نظر گرفته شده است. در ارتباط با طول گام حل در تحلیل ریکس نیز حالت گام خودکار با محدود کردن بیشینه گام به نحوی که حداقل چندین گام محاسباتی پیش رسیدن به بار حدی وجود داشته باشد، متناسب با هر تحلیل تنظیم شده است.

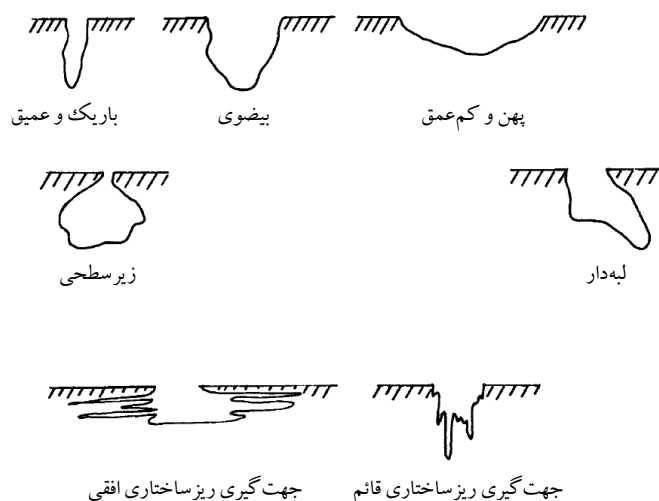
جهت مدل‌سازی خوردگی حفره‌ای، برخی مطالعات پیشین [۲۱، ۲۲] حفرات را به صورت ترسیم هندسی (دستی) و به تعدادی محدود در لوله‌ها و پوسته‌های استوانه‌ای ایجاد کرده‌اند؛ و برخی دیگر [۲۴، ۲۷] با در نظرگیری حالت تصادفی توزیع این نوع خوردگی [۲۸]، شبیه‌سازی را با استفاده از توابع تصادفی و به صورت خودکار در مدل‌ها لحاظ نموده‌اند. پس از بررسی‌های اولیه و چندین مدل‌سازی با استفاده از دو رویکرد فوق، در نظرگیری حالت تصادفی خوردگی به صورت خودکار در تحلیل‌های پژوهش حاضر انتخاب شد.

در مدل‌سازی‌های اجزا محدود مقاله، مقطع خوردگی حفره‌ای تماماً به صورت مربع-مستطیل است. در واقع برای مدل‌سازی خوردگی پس از مش‌بندی لوله با اجزای چهار گره‌ای S4R، بسته به میزان خوردگی مورد نظر در هر مدل، تعدادی از مش‌ها به صورت

<sup>22</sup> static-Riks

<sup>23</sup> static-general

تصادفی انتخاب شده و ضخامتی کمتر از لوله بدون خوردگی و بسته به عمق خوردگی مورد نظر به آن‌ها تخصیص داده شده است. بدین منظور از چند خط کد در زبان پایتون<sup>۲۴</sup> که در خط دستور<sup>۲۵</sup> محیط نرم ABAQUS/Standard [۲۵] وارد می‌شود، در مدل‌های خورده شده استفاده شده است. لازم به اشاره است که مطابق با استاندارد ASTM G46-94 [۲۸] که به آزمایش و ارزیابی خوردگی حفره‌ای اختصاص دارد، خوردگی حفره‌ای می‌تواند اشکال هندسی مختلفی مانند آنچه در شکل ۲ آمده است را داشته باشد.



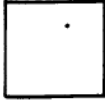


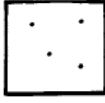





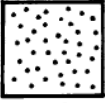

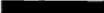
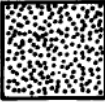

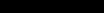
شکل ۲: شکل‌های مختلف مقطع عرضی خوردگی حفره‌ای [۲۸].

همچنین استاندارد ASTM G46-94 [۲۸] جهت ارزیابی خوردگی حفره‌ای جدول استاندارد را پیشنهاد می‌دهد که در آن این نوع خوردگی بر حسب تراکم، اندازه و عمق خوردگی دسته‌بندی می‌شود (جدول ۱). بر اساس این جدول، ارزیابی انجام شده از یک عضو خورده شده می‌تواند به عنوان مثال به صورت A-2، B-3، C-4 مطرح شود که به معنای تراکم خوردگی  $1 \times 10^4$  خوردگی در هر متر مربع، با متوسط بازشدگی (اندازه خوردگی) ۲ میلیمتر مربع و عمق متوسط  $3/2$  میلیمتر است.

<sup>24</sup> # Select X% of the elements randomly  
 random\_elements = random.sample(range(1, num\_elements), int(num\_elements \* X))  
 # Create a set from the list of random elements  
 my\_set = mdb.models['model name'].parts['part name'].SetFromElementLabels(elementLabels=random\_elements, name='desired name')

<sup>25</sup> kernel command

جدول ۱: جدول استاندارد پیشنهادی ASTM G46-94 [۲۸] جهت رتبه بندی خوردگی حفره‌ای.

No.	A (Density)	B (Size)	C (Depth)
1	 $2.5 \times 10^3 / m^2$	 $0.5 \text{ mm}^2$	 $0.4 \text{ mm}$
2	 $1 \times 10^4 / m^2$	 $2.0 \text{ mm}^2$	 $0.8 \text{ mm}$
3	 $5 \times 10^4 / m^2$	 $8.0 \text{ mm}^2$	 $1.6 \text{ mm}$
4	 $1 \times 10^5 / m^2$	 $12.5 \text{ mm}^2$	 $3.2 \text{ mm}$
5	 $5 \times 10^5 / m^2$	 $24.5 \text{ mm}^2$	 $6.4 \text{ mm}$

جهت کمی سازی میزان خوردگی چندین شاخص در ادبیات موضوع مطرح است. برای مثال میزان حداکثر کاهش در سطح مقطع<sup>۲۶</sup> در اثر خوردگی [۲۵] که اثر عمق خوردگی را بیشتر ملحوظ دارد، شاخص درجه خوردگی حفره‌ای<sup>۲۷</sup> که نسبت سطح خورده شده به سطح اولیه را ملاک قرار می‌دهد [۲۲] و عملاً شاخصی از گستره سطحی خوردگی است و شاخص نسبت کاهش جرم<sup>۲۸</sup> [۲۴، ۲۷] ( $\chi$ ) که میزان کاهش جرم ناشی از خوردگی نسبت به جرم اولیه نمونه را در نظر می‌گیرد؛ بدین ترتیب اثر همزمان عمق و گستره سطحی خوردگی را توأمأً به نحوی پوشش می‌دهد. مطابق توضیحات فوق و با استناد به استاندارد ASTM G46-94 [۲۸]، جدول ۲ جهت معرفی پارامترهایی که ریخت‌شناسی خوردگی حفره‌ای را در این پژوهش کنترل می‌کنند، ارائه می‌شود. این سه پارامتر در کنار شاخص نسبت کاهش جرم ( $\chi$ )، مشخصات ریخت‌شناسی خوردگی حفره‌ای و میزان آن را در هر لوله تعیین می‌کنند.

جدول ۲: معرفی شاخص‌های مؤثر در ریخت‌شناسی خوردگی حفره‌ای و عوامل کنترل‌کننده هر شاخص.

Index	Density ( $A_{\text{index}}$ )	Size ( $B_{\text{index}}$ )	Depth ( $C_{\text{index}}$ )
Controlling object	DOP ( $A_{\text{corroded}}/A_{\text{total}}$ )	Mesh size	Normalized pitting depth ( $t_p/t$ )

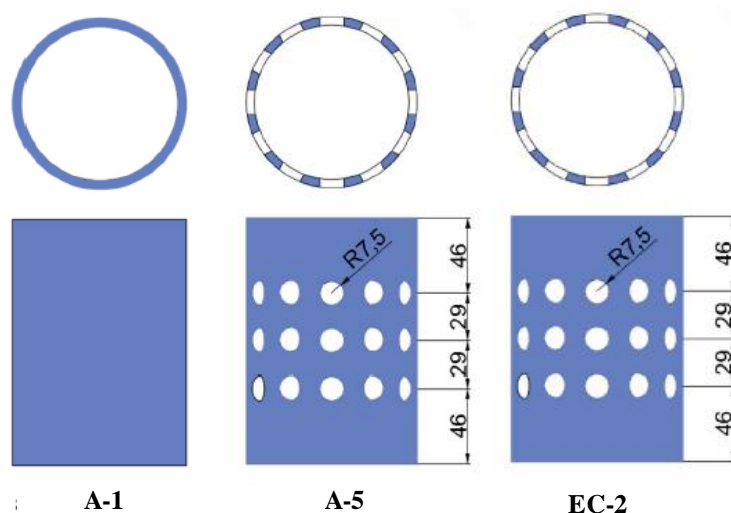
به منظور حصول اطمینان از نحوه مدل‌سازی‌های انجام شده در پژوهش، از قسمت آزمایشگاهی مطالعه ژائو و همکاران [۲۴] استفاده شده است. بر این اساس یک نمونه استوانه‌ای بدون خوردگی تحت فشار محوری (نمونه A-1)، یک نمونه دارای خوردگی تحت فشار محوری (نمونه A-5) و نمونه دیگری تحت فشار محوری و خمش (نمونه EC-2) جهت صحت‌سنجی انتخاب شده است (شکل ۳). قطر

<sup>26</sup> maximum cross-sectional loss

<sup>27</sup> degree of pitting

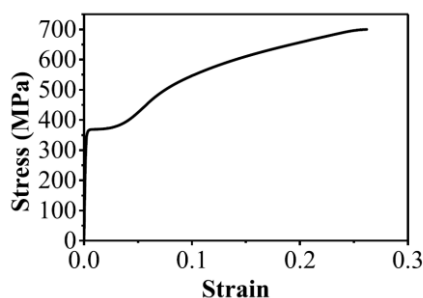
<sup>28</sup> mass loss

خارجی ۱۰۸ میلیمتر، طول ۱۵۰ میلیمتر و ضخامت ۴ میلیمتر برای استوانه‌ها اعلام شده است. تعداد حفرات در نمونه‌ها نیز به صورت ۳ سطر و ۱۲ ستون است.

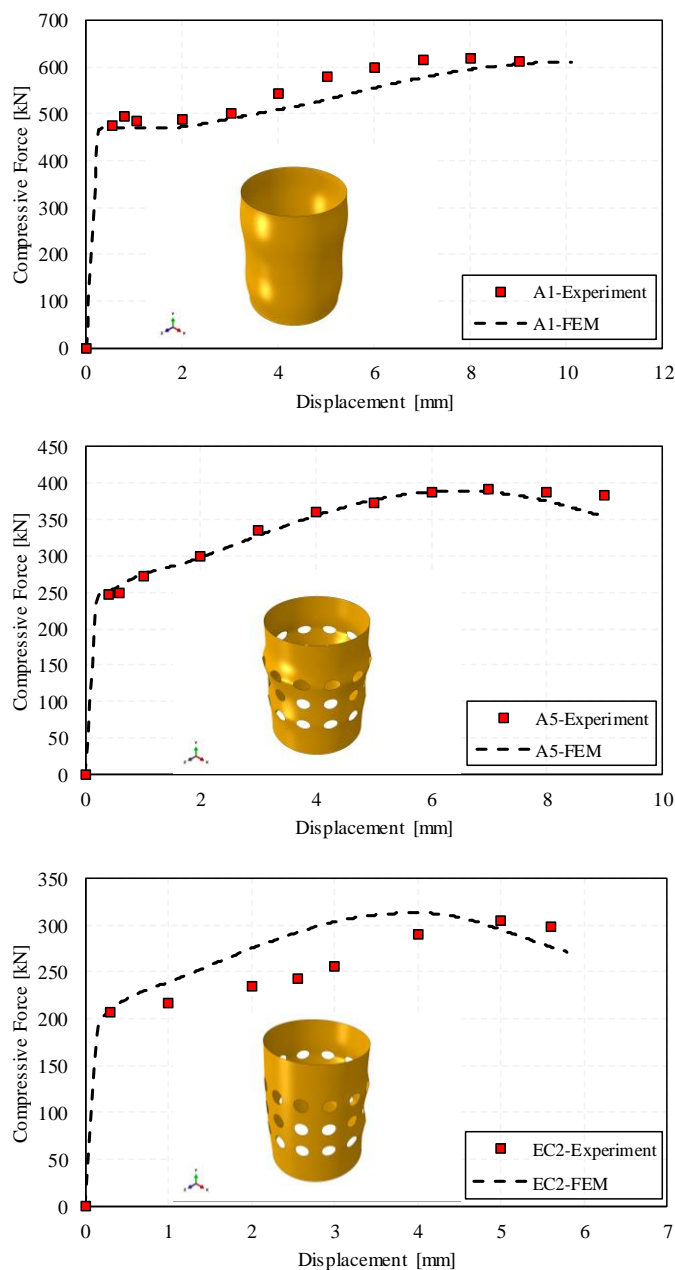


شکل ۳: تصویر شماتیک نمونه‌های انتخابی مطالعه ژائو و همکاران [۲۴] جهت صحت‌سنجی (ابعاد به میلیمتر).

نمودار تنش-کرنش حقیقی مصالح جهت مدلسازی در شکل ۴ آورده شده است. تحلیل‌ها با استفاده از مدلسازی پوسته‌ای نمونه‌ها با استفاده از جزء S4R و با روش ریکس جهت تعیین بار حدی صورت گرفته است. نتایج حاصل در شکل ۵ نشان داده شده است که تطابق مناسبی را نشان می‌دهد. بر این اساس میزان خطای نسبی در تخمین مقاومت نهایی نمونه‌ها در مقایسه با مقادیر آزمایشگاهی برای نمونه A-1، A-5 و EC-2 به ترتیب برابر با ۱/۵، ۰/۸ و ۲/۶ درصد است. لازم به توضیح است که با توجه به تفاوت شرایط آزمایشگاهی با مدل‌سازی ایده‌آل اجزا محدود، علیرغم در نظرگیری کلیات شرایط آزمایشگاهی، همواره درصدی اختلاف ناشی از شرایط مرزی و بارگذاری، نقایص هندسی و امثال آن مانع از تطابق کامل نتایج می‌شود.



شکل ۴: نمودار تنش-کرنش حقیقی نمونه‌های مطالعه ژائو و همکاران [۲۴].



شکل ۵: مقایسه نمودارهای بار-جابجایی محوری نمونه‌ها از آزمایش ژائو و همکاران [۲۴] و مدلسازی اجزا محدود پژوهش حاضر.

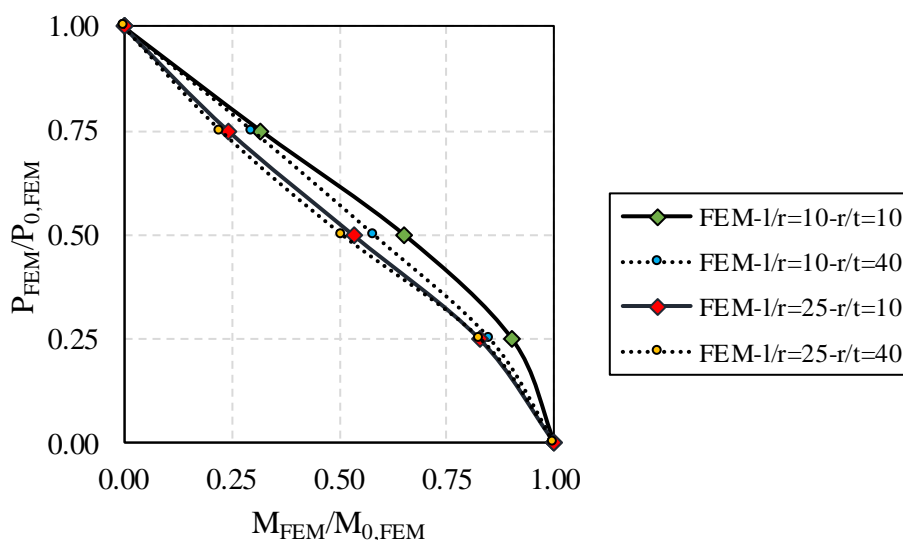
### ۳- تحلیل‌ها و تفسیر نتایج

#### ۳-۱- مطالعه مقدماتی و تعیین متغیرهای مطالعه پارامتری

مدلسازی‌های انجام شده و نتایج متناظر در این بخش ارائه می‌شود. با توجه به مطالعات پیشین [۲۹-۳۲] و نمونه سکوهایی فراساحلی مورد مطالعه در آنها، مقادیر ابعای نرمال شده طول لوله به شعاع ( $l/t$ ) و شعاع به ضخامت لوله ( $t/t$ ) به ترتیب حدود ۱۰ الی ۲۵ و ۴۰ الی ۱۰ در نظر گرفته شد. با در نظرگیری همین مطالعات، مقدار طول لوله بطور ثابت ۱۰ متر لحاظ گردید. بدین ترتیب سایر مشخصات ابعادی، یعنی شعاع و ضخامت لوله‌ها قابل تعیین خواهد بود. جهت بررسی اولیه اثر نسبت ابعادی لوله‌ها بر مقاومت خمشی مقطع تحت فشار محوری، با در نظرگیری کران بالا و پایین هر یک از نسبت‌های  $l/t$  و  $t/t$ ، نمونه لوله‌هایی (بدون خوردگی) مورد تحلیل قرار

گرفتند. فولاد S235 با ضخامت کمتر از ۴۰ میلیمتر با تنش تسلیم ۲۳۵ مگاپاسکال مفروض بوده است. بررسی‌های اولیه به منظور تعیین عوامل تأثیرگذار بر نتایج جهت در نظر گرفتن یا صرف نظر کردن از آن‌ها در مطالعات پارامتری آتی صورت گرفته است.

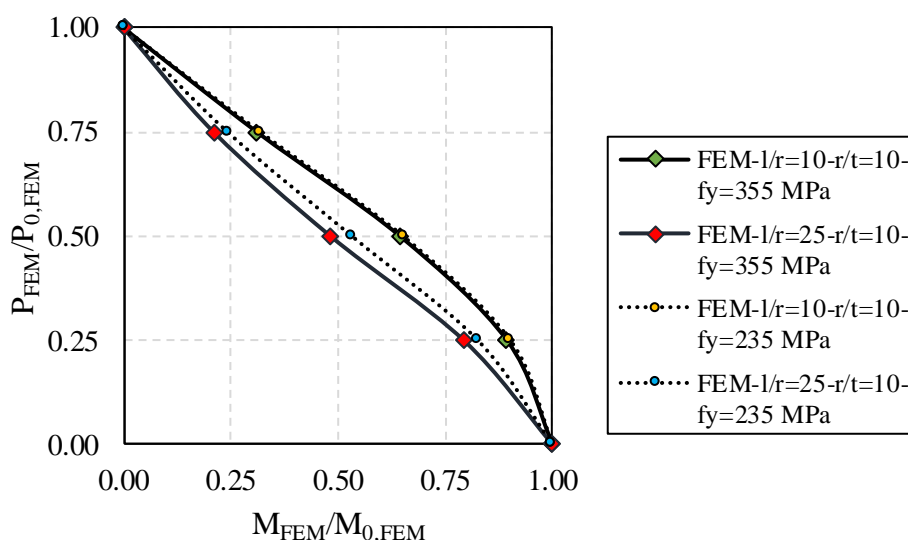
در راستای توضیحات فوق، ابتدا با انجام دو تحلیل مقادیر ظرفیت فشاری و خمشی خالص مقطع (به ترتیب  $P_{0,FEM}$  و  $M_{0,FEM}$ ) تعیین شده است. سپس با در نظرگیری نسبت‌های مختلف از فشار محوری به عنوان بارگذاری اولیه نمونه لوله، مقادیر ظرفیت خمشی کاهش یافته نسبت به حالت بدون وجود فشار محوری در هر حالت محاسبه شده است. لازم به توضیح است که در تمامی تحلیل‌ها، شاخص نیرو معیار خرابی را تعیین می‌کند که هم‌ارز با رسیدن نمودار بار-جابجایی نمونه (مانند شکل ۵) به تراز نهایی خود و پیش از شروع شاخه افتان نمودار است. در این حالت ابتدا بر اساس درصد بارگذاری اولیه فشار محوری در یک تحلیل استاتیکی-جنرال (مقادیر ۰، ۰/۲۵، ۰/۵۰ و ۰/۷۵ ظرفیت محوری مقطع در فشار خالص)، مقدار ظرفیت خمشی در گام بعدی از تحلیل ریکس استخراج شده است. نتایج حاصل در شکل ۶ نمایش داده شده است. در نمودار اندرکنشی زیر، محور افقی ظرفیت خمشی نرمال شده به ظرفیت خمشی خالص مقطع و محور قائم نسبت فشار محوری نرمال شده به ظرفیت فشاری خالص مقطع است. مطابق شکل اثر نسبت ابعادی بر نمودار ظرفیت اندرکنشی لوله‌ها تا حدود ۱۵ درصد بدست آمد. بنابراین مشخصات ابعادی بر نتایج اثرگذار تلقی شدند.



شکل ۶: بررسی اثر مشخصات ابعادی لوله در نمودار اندرکنشی ظرفیت تحت فشار محوری و خمشی.

عامل بعدی که مورد بررسی اولیه قرار گرفته است، اثرگذاری تنش تسلیم مصالح لوله بر نتایج است. همانطور که پیش‌تر اشاره شد، مدل مصالح انتخاب شده برای تحلیل‌های پژوهش حاضر به صورت رفتار دوخطی ایده‌آل بوده است که علاوه بر مشخصات قسمت الاستیک (مدول الاستیسیته (E) ۲۱۰ گیگاپاسکال و نسبت پواسون (ν) ۰/۳) با افزودن حد تسلیم مصالح، تعریف آن کامل می‌شود. جهت بررسی اولیه چگونگی تأثیر حد تسلیم فولاد بر ظرفیت تحت فشار محوری و لنگر خمشی نمونه لوله‌ها، تحلیل‌های قسمت گذشته که برای فولاد S235 با تنش تسلیم ۲۳۵ مگاپاسکال (برای ضخامت‌های کمتر از ۴ سانتی‌متر) انجام شد؛ برای فولاد S355 با تنش تسلیم ۳۵۵ مگاپاسکال (برای ضخامت کمتر از ۴ سانتی‌متر) تکرار می‌شود. یادآور می‌شود که جهت امکان مقایسه نتایج با مقادیر آیین‌نامه‌ای که حد تسلیم را در تحلیل پلاستیک لحاظ می‌کنند، اثر افزایش مقاومت احتمالی بواسطه در نظرگیری رفتار سخت‌شوندگی فولاد در مدل‌سازی‌ها دخیل نشده است.

نتایج متناظر در شکل ۷ ارائه شده است. حداکثر اختلاف نتایج، محدود به ۵ درصد بدست آمده است. این نتیجه با پژوهش ژائو و همکاران نیز سازگار است [۲۴]. بنابراین در تمامی تحلیل‌های پارامتری آتی با صرف نظر از این عامل، از تنش تسلیم ۲۳۵ مگاپاسکال استفاده شده است.



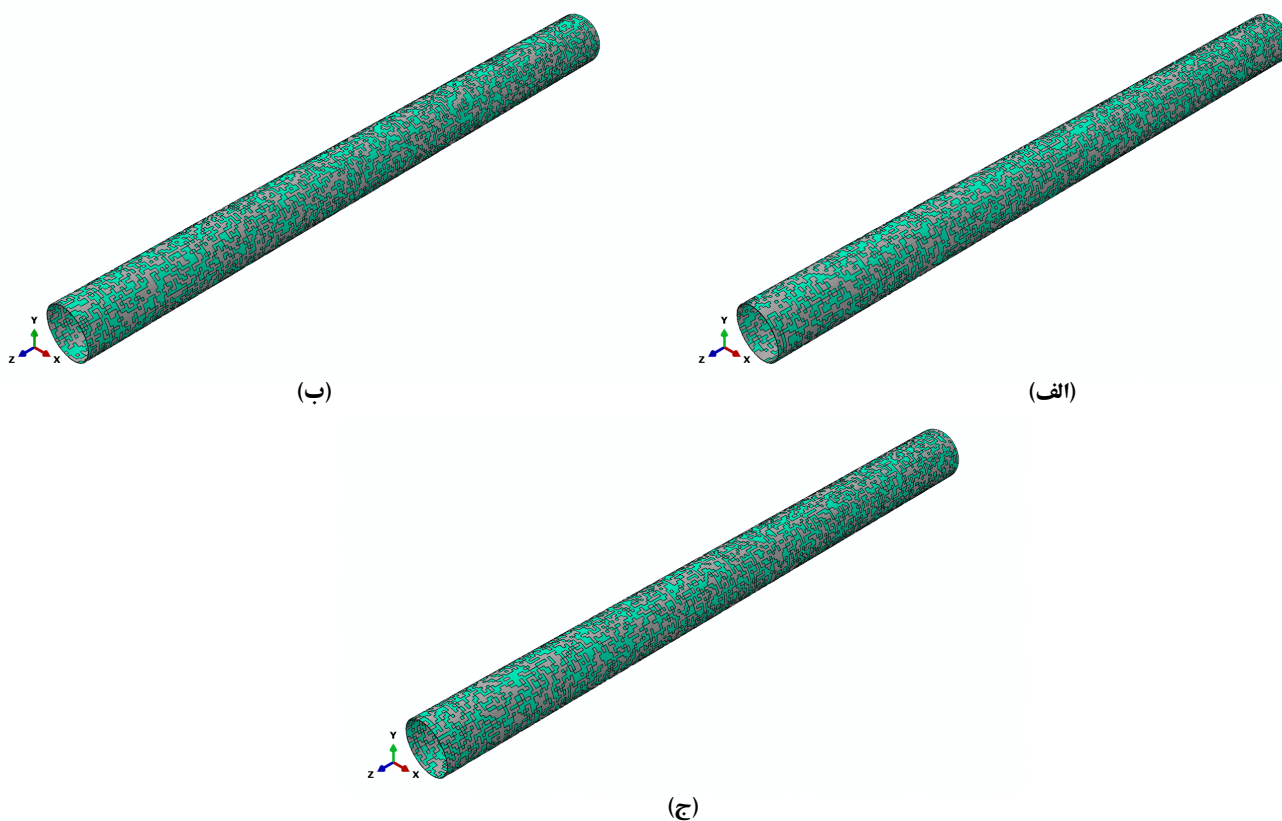
شکل ۷: بررسی اثر تنش تسلیم لوله‌ها بر نمودار ظرفیت اندرکنشی نمونه لوله‌ها.

پس از بررسی اولیه اثر مشخصات ابعادی و تنش تسلیم بر نمودار اندرکنشی ظرفیت تحت فشار محوری و لنگر خمشی لوله‌ها، منطبق بر عنوان پژوهش، موارد مرتبط با اثر شاخص‌های خوردگی بررسی گردید. اولین موضوع در ارتباط با توزیع تصادفی خوردگی در لوله‌ها است. با توجه به آنکه جهت شبیه‌سازی پراکندگی تصادفی حفرات خوردگی از تابع تصادفی استفاده شده است و در عمل تعداد انتخاب بیشماری از بین حدود چند ده هزار جزء وجود دارد؛ با در نظرگیری یک نمونه لوله (طول ۱۰ متر و نسبت ابعادی  $l/r$  برابر ۲۵ و  $r/t$  برابر ۴۰، با تنش تسلیم ۲۳۵ مگاپاسکال)، اثر انتخاب‌های مختلف اجزا بر نمودار ظرفیت اندرکنشی لوله ارزیابی شده است. در این راستا فرض شد که نسبت کاهش جرم لوله در اثر خوردگی ۲۰٪ درصد باشد. همچنین سه عامل ریخت‌شناسی خوردگی حفره‌ای (جدول ۲) به صورت ثابت و برابر با  $A_{index}=0.5$ ،  $B_{index}=0.04 \times 0.04 \text{ m}^2$  و  $C_{index}=0.4$  مفروض شده است.

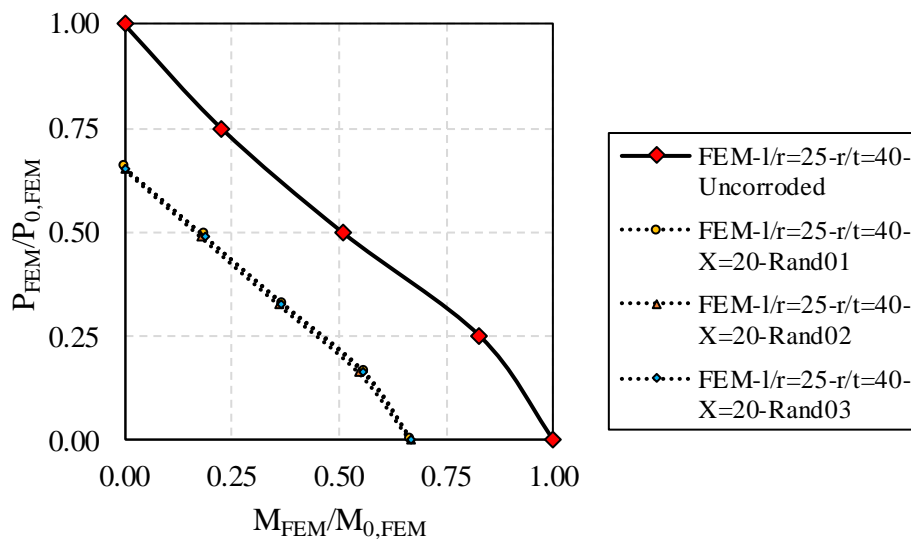
جهت آزمون موضوع فوق، سه انتخاب تصادفی اجزای سازنده لوله در نظر گرفته شد. مطابق شکل ۸، ۵۰ درصد از اجزای لوله انتخاب شده و ضخامت آن نواحی به ۶۰ درصد ضخامت اولیه کاهش داده شده است. با توجه به همگن بودن لوله، بدین طریق درصد کاهش جرم ۲۰ درصد حاصل شده است. مشابه تحلیل‌های پیشین، نمودار اندرکنشی ظرفیت بدین ترتیب محاسبه شده است. نتایج حاصل از این سه مجموعه تحلیل در شکل ۹ نمایش داده شده است. همانطور که در نمودارها منعکس است، منحنی اندرکنشی حاصل حدود ۶۶ درصد ظرفیت نمونه خورده نشده<sup>۲۹</sup> (یا دست‌نخورده<sup>۳۰</sup>) را نشان می‌دهد. اما نکته قابل توجه عدم تأثیر انتخاب تصادفی اجزا بر نتایج است. به نحوی که این پارامتر در لوله مورد مطالعه در عمل بدون اثر تلقی می‌شود. به نظر می‌رسد که با توجه به عدد نسبتاً بزرگ ۵۰ درصد برای انتخاب اجزا و پوشش گسترده سطح لوله از خوردگی، این عدم حساسیت انتخاب تصادفی مشاهده شده باشد. جهت آزمون این فرضیه، سه مجموعه تحلیل دیگر، این بار با در نظرگیری ۲۵ درصد اجزای سطح و تغییر شاخص عمق خوردگی به ۰/۸ تکرار شد.

<sup>29</sup> uncorroded

<sup>30</sup> intact



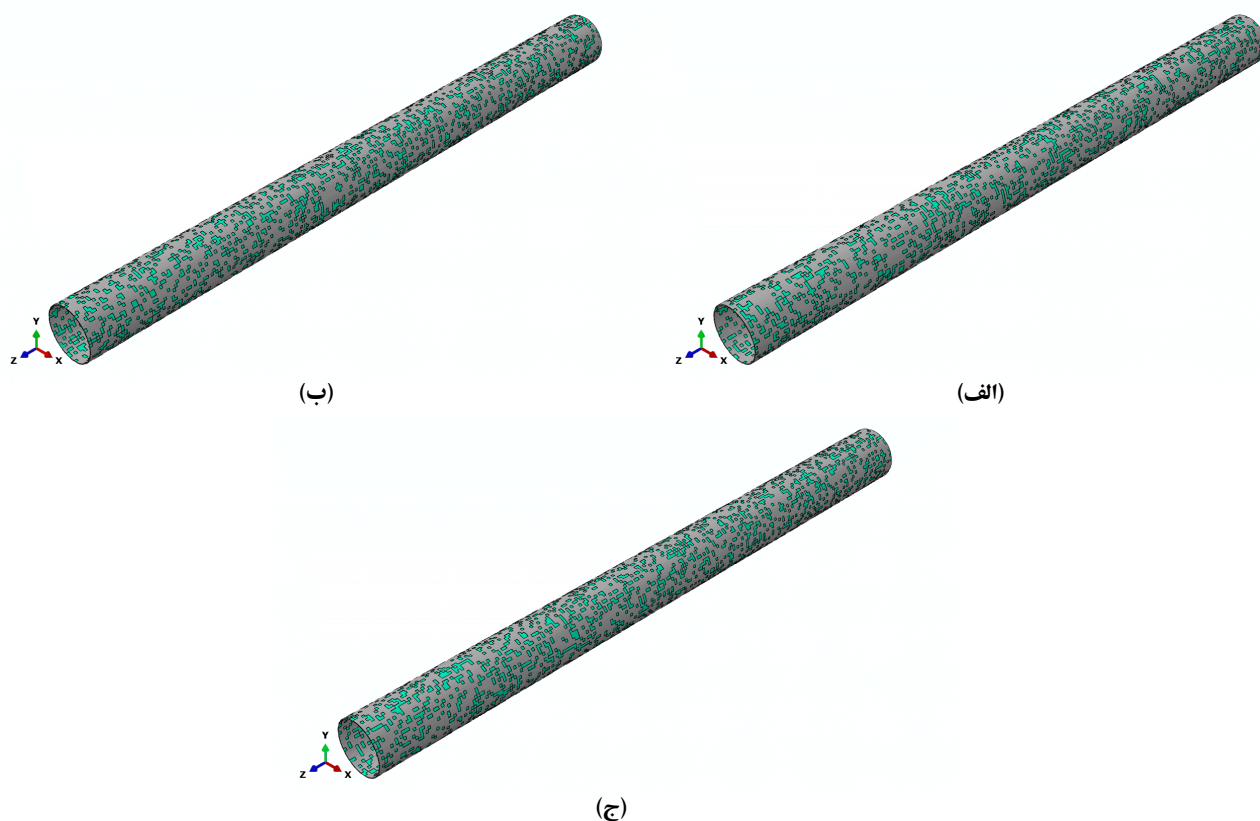
شکل ۸: انتخاب تصادفی ۵۰ درصد اجزای نمونه لوله فولادی (نواحی سبز رنگ): (الف) تصادفی ۱، (ب) تصادفی ۲ و (ج) تصادفی ۳.



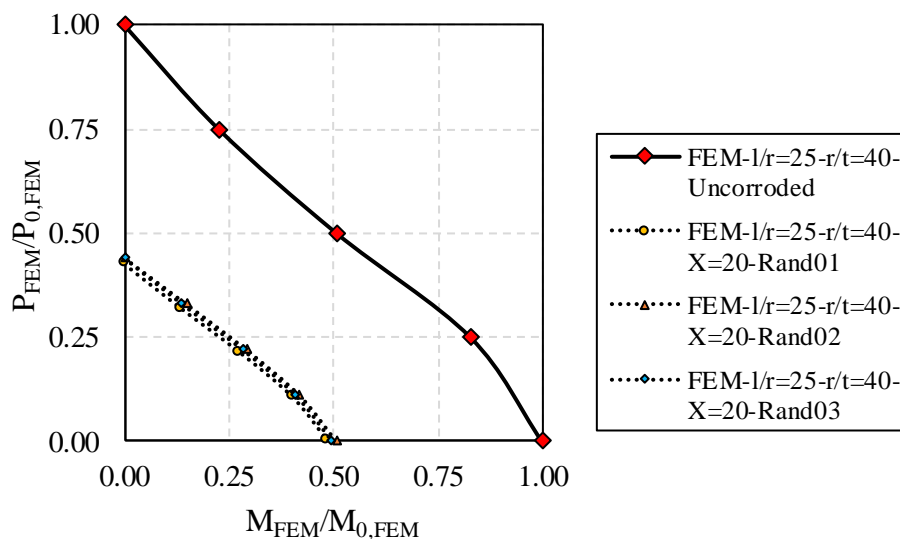
شکل ۹: بررسی اثر انتخاب تصادفی اجزا بر نمودار ظرفیت نمونه لوله با میزان کاهش جرم ۲۰ (انتخاب تصادفی ۵۰ درصد اجزا).

نتایج انتخاب سه مجموعه جدید تصادفی از اجزای لوله و تخصیص ضخامت کاهش یافته به آن‌ها با در نظرگیری ۲۵ درصد اجزا در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. مشابه سه انتخاب تصادفی با پوشش ۵۰ درصدی اجزا، در این سه حالت جدید نیز شاخص کاهش جرم ۲۰ ( $\chi$ ) درصد حفظ شده است تا امکان بررسی اثر تغییر در شاخص‌های عمق خوردگی و چگالی خوردگی هم بطور ضمنی بررسی شده باشد. مطابق منحنی‌های شکل ۱۱، برای سه حالت جدید نیز اثر انتخاب‌های مختلف تصادفی اجزا تأثیر بسیار کمی بر ظرفیت نمونه لوله

داشته است. بنابراین از اثر انتخاب‌های تصادفی اجزا برای شبیه‌سازی خوردگی حفره‌ای (به شرط حفظ شاخص کاهش جرم  $(\chi)$ ) در طول مطالعه صرف نظر شد.



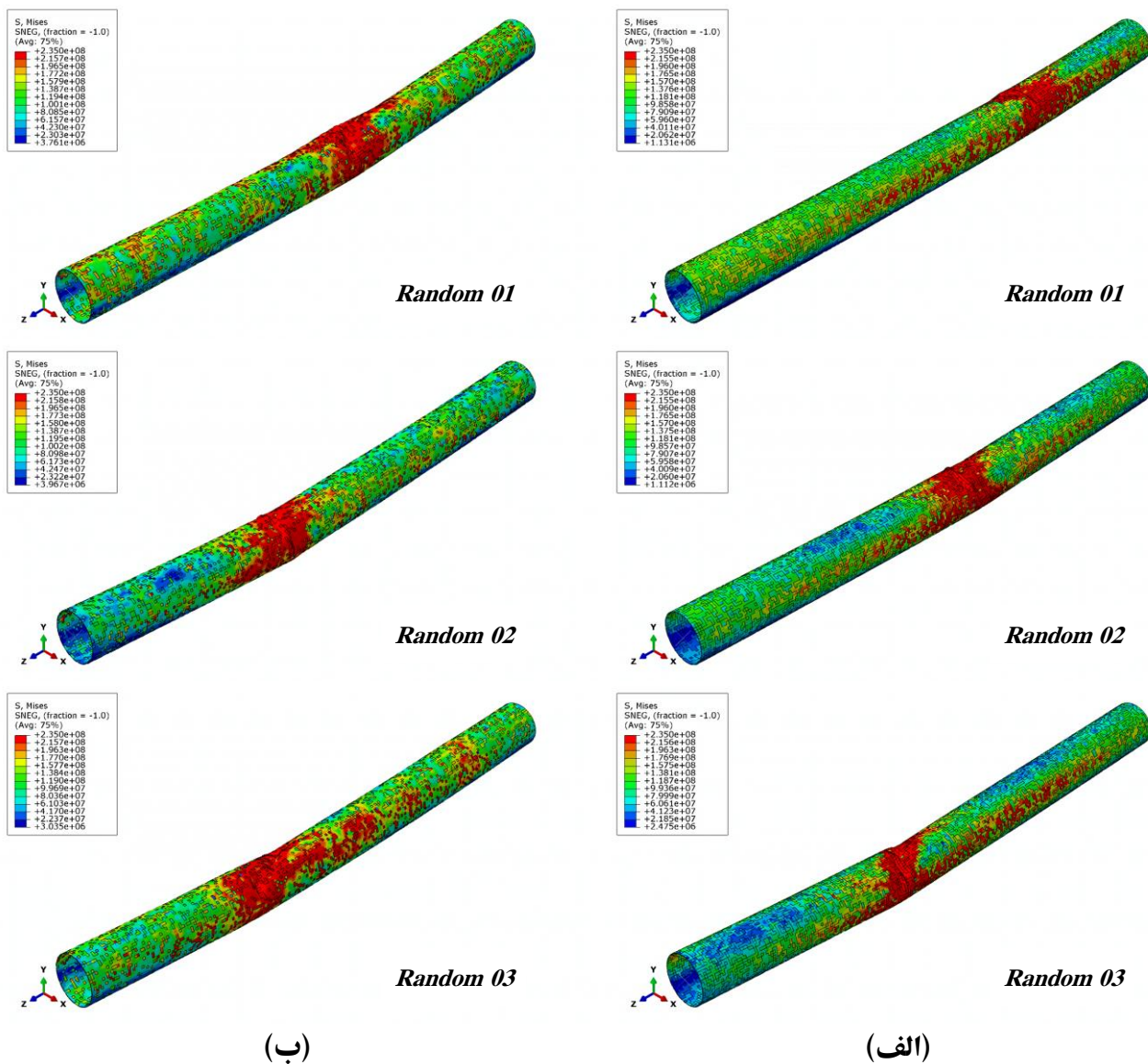
شکل ۱۰: انتخاب تصادفی ۲۵ درصد اجزای نمونه لوله فولادی (نواحی سبز رنگ): (الف) تصادفی ۱، (ب) تصادفی ۲ و (ج) تصادفی ۳.



شکل ۱۱: بررسی اثر انتخاب تصادفی اجزا بر نمودار ظرفیت نمونه لوله با میزان کاهش جرم ۲۰ (انتخاب تصادفی ۲۵ درصد اجزا).

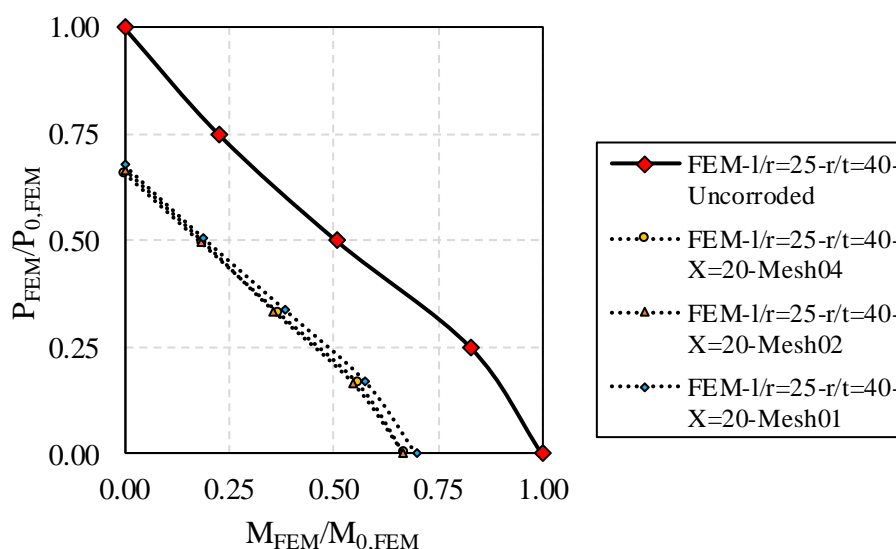
موضوع دیگر اثر شاخص عمق خوردگی و چگالی خوردگی است که بوضوح بر منحنی ظرفیت تأثیر داشته است. در مقایسه شاخص عمق خوردگی ۰/۲ و شاخص چگالی خوردگی ۵۰ درصد در شکل ۸ و شاخص عمق خوردگی ۰/۸ و شاخص چگالی خوردگی ۲۵

درصد شکل ۱۱، ظرفیت منحنی اندرکنشی از حدود ۶۶ درصد نمونه دست نخورده به حدود ۵۰-۴۵ درصد رسیده است. بنابراین می توان انتظار داشت که دو شاخص اخیر از عوامل تعیین کننده در ظرفیت نمونه لوله های خورده شده باشند. همچنین لازم به توضیح است که در هر دو حالت انتخاب ۵۰ درصدی اجزا و انتخاب ۲۵ درصدی، وضعیت خرابی نمونه ها پس از بار حدی و محل وقوع خرابی کاملاً تحت تأثیر انتخاب های تصادفی متفاوت بوده است (شکل ۱۲).



شکل ۱۲: اثر انتخاب تصادفی اجزا بر محل و شکل خرابی: فرم تغییر شکل یافته و کانتور تنش متناظر (به پاسکال) نمونه لوله های خورده شده پس از بار حدی خمشی در حالی که ۲۵ درصد ظرفیت فشاری مقطع پیش بارگذاری شده است: (الف) انتخاب ۵۰ درصدی و (ب) انتخاب ۲۵ درصدی اجزا (با میزان کاهش جرم ۲۰ درصد).

پس از بررسی اثر انتخاب تصادفی اجزا بر نتایج ظرفیت باربری نمونه لوله خورده شده، با ارجاع به جدول ۲، اثر شاخص اندازه حفره ( $B_{index}$ ) بررسی شده است. بدین منظور با در نظرگیری شاخص کاهش جرم برابر ۲۰ درصد و انتخاب ۵۰ درصد اجزای لوله که نسبت کاهش عمق ۰/۴ را به صورت ثابت تجربه می کنند؛ سه اندازه مش مربعی به طول ضلع ۰/۰۴ متر، ۰/۰۲ متر و ۰/۰۱ متر آزمون شد. مطابق شکل ۱۳ ظرفیت نمونه تحت ترکیب بار محوری و لنگر خمشی نسبت به اندازه حفرات خوردگی ( $B_{index}$ )، حساسیت بسیار ناچیزی دارد. بنابراین از شاخص اندازه حفره خوردگی در مطالعات پارامتری صرف نظر شد.



شکل ۱۳: بررسی اثر شاخص اندازه خوردگی حفره‌ای بر ظرفیت نمونه لوله با میزان کاهش جرم ۲۰ درصد با سه اندازه بُعد مش (اندازه خوردگی) ۰/۰۴ متر، ۰/۰۲ متر و ۰/۰۱ متر.

### ۳-۲- روابط آیین‌نامه‌ای

با توجه با اینکه فشار محوری و خمش همزمان مقاطع جزو موارد متداولی است که اجزای سازه‌ای ممکن است تجربه نمایند، آیین‌نامه‌های طراحی مانند آیین‌نامه اروپا [۱۱] و آمریکا [۱۲] نمودارهای اندرکنشی این حالت را پیشنهاد داده‌اند. همچنین نظر به آنکه در مقاله حاضر روشی پیشنهادی جهت تخمین زوال مقاومت ناشی از خوردگی حفره‌ای بر پایه نمودار اندرکنشی آیین‌نامه آمریکا [۱۲] در قسمت بعد ارائه می‌شود؛ مقایسه اولیه بین نتایج مدل‌سازی اجزا محدود لوله‌ها و روابط آیین‌نامه‌ای انجام شده است.

آیین‌نامه اروپا [۱۱] براساس رفتار متصور برای نمودار ممان-چرخش مقاطع، چهار کلاس مقطع تعریف می‌کند. کلاس یک و دو تحت فشار محوری و لنگر خمشی امکان رسیدن به حالت پایدار ظرفیت پلاستیک مقطع را دارا بوده و لذا امکان طرح پلاستیک دارند. کلاس سه تحت فشار محوری امکان رسیدن به ظرفیت پلاستیک را دارد، لیکن تحت لنگر خمشی وقوع کمانش موضعی متصور است. بنابراین ظرفیت پلاستیک خمشی مقطع ملاک قرار می‌گیرد. کلاس چهار مقاطع نیز با توجه به امکان کمانش در محدوده الاستیک، مبنای طراحی آن‌ها حد الاستیک خواهد بود.

برای مقاطع لوله‌ای مبنای قرار گرفتن در هر یک از کلاس‌های یادشده مقایسه نسبت  $d/t$  مقطع (قطر به ضخامت) با عبارتی بر پایه شاخص  $\varepsilon^2$  است  $\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$  و  $f_y$  تنش تسلیم بر حسب مگاپاسکال (یا  $N/mm^2$  است). با توجه به نسبت ابعادی انتخاب شده لوله‌ها در پژوهش حاضر و مقدار تنش تسلیم فولاد S235 (یعنی ۲۳۵ مگاپاسکال)، تمامی نمونه لوله‌ها در کلاس یک مقاطع آیین‌نامه اروپا [۱۱] قرار می‌گیرند (ظرفیت کامل پلاستیک مقطع در فشار محوری و خمش ملاک طراحی و محاسبه ظرفیت است).

در آیین‌نامه اروپا [۱۱] تحت ترکیب نیروی محوری و خمش رابطه (۱) جهت ترسیم نمودار اندرکنشی ارائه می‌شود.  $M_E$  و  $M_R$  مقادیر لنگر طراحی و ظرفیت خمشی مقطع و  $P_E$  و  $P_R$  نیز نیروی محوری طراحی و ظرفیت محوری مقطع هستند. برای مقاطع کلاس یک و دو، مقدار  $M_R = W_{pl} f_y$  که در آن  $W_{pl}$  اساس مقطع پلاستیک<sup>۳۱</sup> ( $W_{pl} = 4I^2 t$ ) و  $f_y$  تنش تسلیم آن است.  $P_R = Af_y$  نیز از حاصل ضرب سطح مقطع ( $A = 2\pi r t$ ) در تنش تسلیم محاسبه می‌شود.

$$\frac{M_E}{M_R} + \left( \frac{P_E}{P_R} \right)^{1.7} \leq 1.0 \quad (1)$$

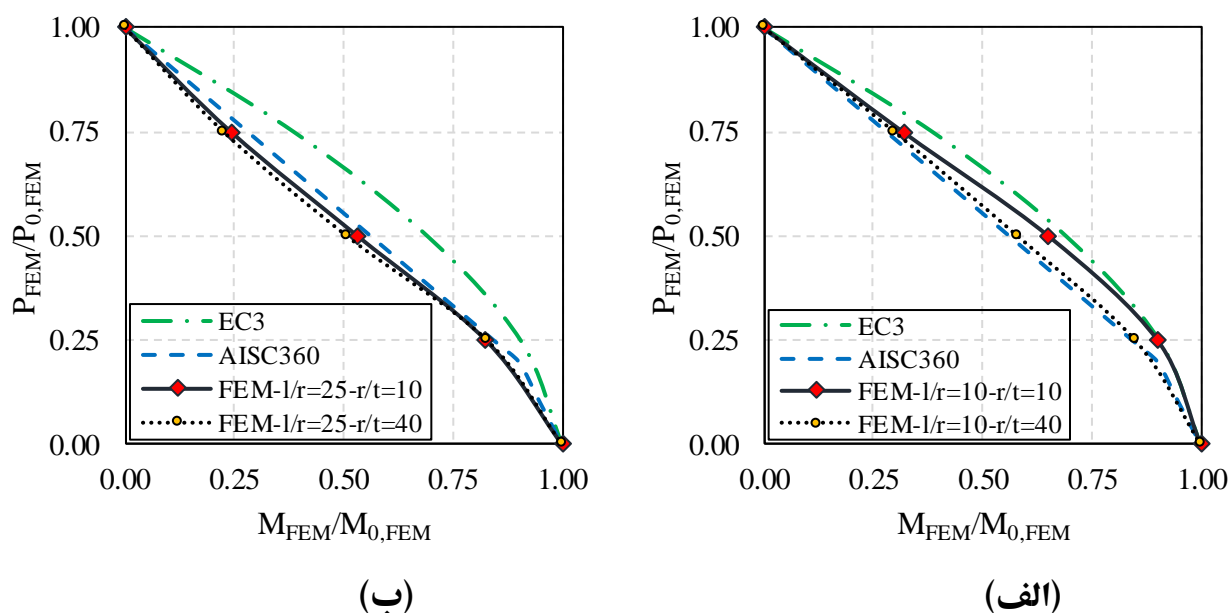
<sup>31</sup> plastic section modulus

مبتنی بر آیین‌نامه آمریکا [۱۲] نیز مقاطع بر حسب نوع بارگذاری به دسته‌هایی (تحت فشار محوری به لاغر و غیر لاغر، تحت لنگر خمشی به فشرده و غیر فشرده و لاغر) تقسیم‌بندی می‌شوند. برای مثال در مقاطع لوله‌ای مرز بین لاغر و غیر لاغر در فشار  $d/t=0.11E/f_y$  است (E مدول الاستیسیته و  $f_y$  تنش تسلیم مقطع است) که با توجه به ابعاد مقاطع مورد نظر پژوهش حاضر، همه غیر لاغر هستند. آیین‌نامه آمریکا [۱۲] تحت ترکیب نیروی محوری و خمشی طی رابطه (۲) ظرفیت را پیشنهاد می‌کند.

$$\begin{cases} \frac{P_r}{2P_c} + \left(\frac{M_r}{M_c}\right) \leq 1.0 & \text{when } \frac{P_r}{P_c} < 0.2 \\ \frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9}\left(\frac{M_r}{M_c}\right) \leq 1.0 & \text{when } \frac{P_r}{P_c} \geq 0.2 \end{cases} \quad (2)$$

در معادله فوق  $P_c$  و  $P_r$  به ترتیب مقادیر مقاومت محوری مورد نیاز و طراحی و  $M_c$  و  $M_r$  نیز لنگر مورد نیاز و لنگر طراحی است. با توجه به مقدار تنش کمانش الاستیک مقاطع مورد مطالعه در پژوهش که مقادیر بسیار بزرگتری نسبت به تنش تسلیم هستند، در عمل  $P_c = Af_y$  بدست می‌آید. بعلاوه  $M_c$  از حاصل ضرب تنش تسلیم در اساس مقطع پلاستیک (مشابه آیین‌نامه اروپا [۱۱]) محاسبه می‌شود.

با توجه به توضیحات فوق، ظرفیت اندرکنشی نمونه لوله‌های بدون خوردگی (همان نمودارهای شکل ۶)، این بار در مقایسه با ظرفیت پیشنهادی دو آیین‌نامه فوق در شکل ۱۴ ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود برای هر دو نسبت لاغری ۱۰ و ۲۵، رابطه پیشنهادی آیین‌نامه اروپا [۱۱] غیر محافظه کارانه است. در مقابل، رابطه پیشنهادی آیین‌نامه آمریکا [۱۲] پیش‌بینی بسیار نزدیک‌تری به نتایج تحلیل اجزا محدود (و در جهت ایمن‌تر نسبت به آیین‌نامه اروپا [۱۱]) نشان می‌دهد. بدین ترتیب رابطه آیین‌نامه آمریکا [۱۲] به‌عنوان مبنای تخمین اثر کاهش مقاومت ناشی از خوردگی، در قسمت بعد مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۱۴: نمودار ظرفیت نمونه‌ها لوله‌ها در مقایسه با موارد پیشنهادی دو آیین‌نامه اروپا [۱۱] و آمریکا [۱۲]: (الف) نسبت لاغری ۱۰ و (ب) نسبت لاغری ۲۵.

### ۳-۳- مطالعه پارامتری و ارائه روش پیشنهادی

عطف به مطالعات مقدماتی و بررسی اولیه اثر هر یک از عوامل دخیل در مدلسازی نمونه لوله‌های جداره ضخیم تحت ترکیب فشار محوری و لنگر خمشی، اثر مشخصات ابعادی لوله‌ها براساس کران‌های ۱۰ و ۲۵ برای  $l/r$  و ۱۰ و ۴۰ برای  $r/t$  در مطالعات پارامتری آتی

در نظر گرفته شد. مشخصات ریخت‌شناسی خوردگی حفره‌ای شامل چگالی خوردگی ( $A_{index}$ ) و عمق خوردگی ( $C_{index}$ ) نیز، با در نظر گرفتن سه مقدار ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد برای شاخص کاهش جرم ( $\chi$ ) مطابق جدول ۳ لحاظ گردید. با توجه به آنکه در ترسیم هر منحنی ظرفیت اندرکنشی، پنج تحلیل انجام شده است، در مجموع تعداد ۱۸۰ تحلیل در ذیل مطالعه پارامتری انجام شد.

جدول ۳: مشخصات در نظر گرفته شده از خوردگی حفره‌ای در مطالعات پارامتری.

No.	$\chi=A_{index} \times C_{index}$	$A_{index}$	$C_{index}$
1	0.10	0.50	0.20
2	0.10	0.25	0.40
3	0.10	0.125	0.80
4	0.20	0.50	0.40
5	0.20	0.33	0.60
6	0.20	0.25	0.80
7	0.30	0.90	0.33
8	0.30	0.50	0.60
9	0.30	0.40	0.75

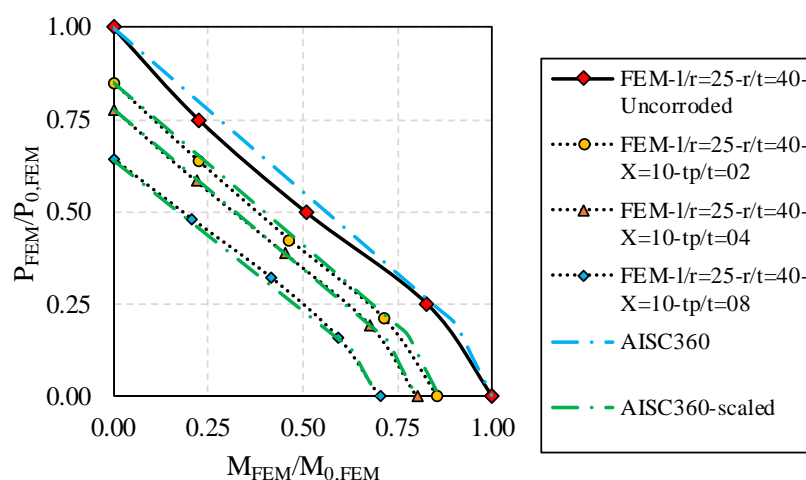
سه مقدار شاخص کاهش جرم انتخاب شده تا ۳۰ درصد به نحوی است که خوردگی باعث زوال کامل نشده باشد و بنابراین در ارزیابی سازه‌های خورده شده با قابلیت بهسازی و ترمیم امکان استفاده بیشتری داشته باشد. در انتخاب شاخص عمق خوردگی نیز به نحوی عمل شده است که طیف میانی بین صفر (حالت بدون خوردگی) و یک (خوردگی منجر به ایجاد سوراخ) را پوشش دهد. همچنین مقادیر چگالی خوردگی به گونه‌ای تعیین شده‌اند که با توجه به عمق خوردگی مفروض، شاخص کاهش جرم مورد نظر در هر حالت را نتیجه دهد. همچنین لازم به توضیح است که در تمامی تحلیل‌های این قسمت از اندازه مش با بُعد ۰/۰۲ متر استفاده شده است. این اندازه مش در مقایسه با بُعد مش ۰/۰۴ پراکندگی بهتری از حفرات را بدون تحمیل هزینه محاسباتی قابل توجه فراهم می‌آورد. هر چند پیشتر نشان داده شده که اثر اندازه مش (سایز حفرات خوردگی) بر ظرفیت نمونه لوله‌ها در عمل قابل صرف نظر است.

نمونه نتایج حاصل از تحلیل لوله با نسبت  $l/t$  برابر با ۲۵،  $t/t$  برابر ۴۰، با شاخص کاهش جرم‌های مختلف در شکل ۱۵ نمایش داده شده است. با افزایش شاخص کاهش جرم ( $\chi$ ) و نیز با افزایش شاخص عمق خوردگی ( $C_{index}=t_p/t$ ) منحنی ظرفیت لوله تراز کمتری از مقاومت را نشان می‌دهد. اما شکل کلی تمامی منحنی‌ها، چنانچه در تمامی تحلیل‌های پیشین نیز ملاحظه شد فرم تقریباً یکسانی به خود می‌گیرند. موضوع اخیر در کنار نتایج حاصل از شکل ۱۴ که پیش‌بینی معادله پیشنهادی آیین‌نامه آمریکا [۱۲] از ظرفیت خمشی لوله‌های تحت فشار محوری را بسیار نزدیک به نتایج تحلیل‌های اجزا محدود نشان می‌دهد؛ باعث شد که ایده استفاده از این قرابت برای تبیین اثر خوردگی بر ظرفیت اندرکنشی لوله‌ها به صورت زیر مطرح شود.

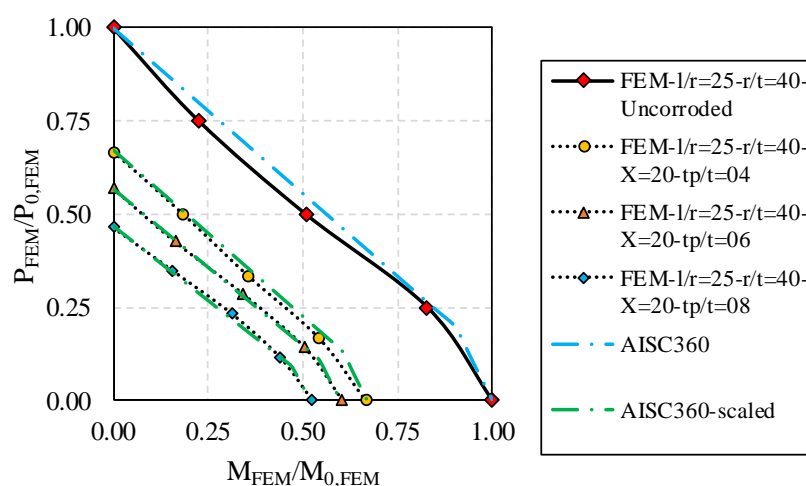
با در نظرگیری رابطه (۲) به عنوان پایه کار، دو ضریب تصحیح  $C_P$  (متناظر با مقدار فشار محوری خالص نمونه خورده شده نسبت به نمونه خورده نشده) و  $C_M$  (متناظر با مقدار لنگر خمشی خالص نمونه خورده شده نسبت به نمونه خورده نشده) جهت تخمین میزان کاهش ظرفیت منحنی اندرکنشی معرفی می‌شود. به عنوان مثال این دو ضریب برای نمودارهای شکل ۱۵ ذیل جدول ۴ ارائه شده است. ضرایب محاسبه شده با ضرب شدن در تراز نسبت نیروی محوری و نسبت لنگر خمشی، منحنی رابطه آیین‌نامه آمریکا [۱۲] را مقیاس می‌کنند. نمونه نتیجه این مقیاس کردن در همان شکل ۱۵ ذیل نمودارهای «AISC360-scaled» آورده شده است.

جدول ۴: نمونه مقادیر ضریب تصحیح  $C_P$  و  $C_M$  محاسبه شده متناظر شکل ۱۵.

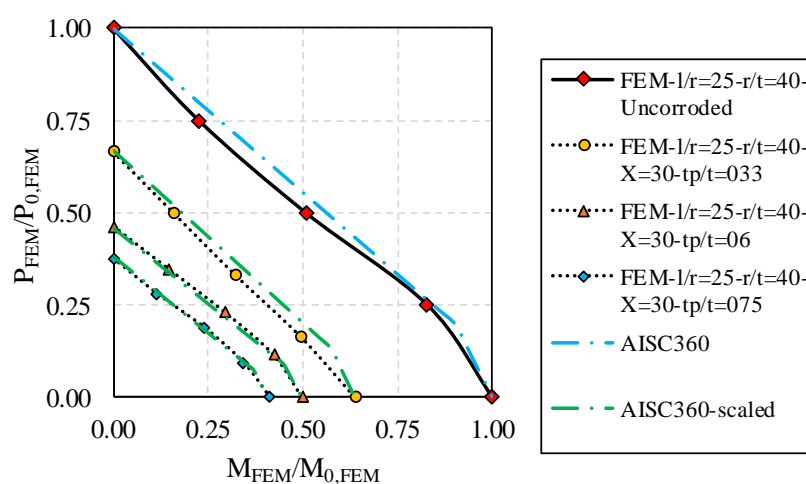
No.	$\chi=A_{index} \times C_{index}$	$A_{index}$	$C_{index}$	$C_P=P_{0,corroded}/P_{0,uncorroded}$	$C_M=M_{0,corroded}/M_{0,uncorroded}$
1	0.10	0.50	0.20	0.85	0.86
2	0.10	0.25	0.40	0.78	0.80
3	0.10	0.125	0.80	0.64	0.70
4	0.20	0.50	0.40	0.67	0.67
5	0.20	0.33	0.60	0.57	0.60
6	0.20	0.25	0.80	0.47	0.52
7	0.30	0.90	0.33	0.67	0.64
8	0.30	0.50	0.60	0.46	0.50
9	0.30	0.40	0.75	0.38	0.41



(الف)



(ب)



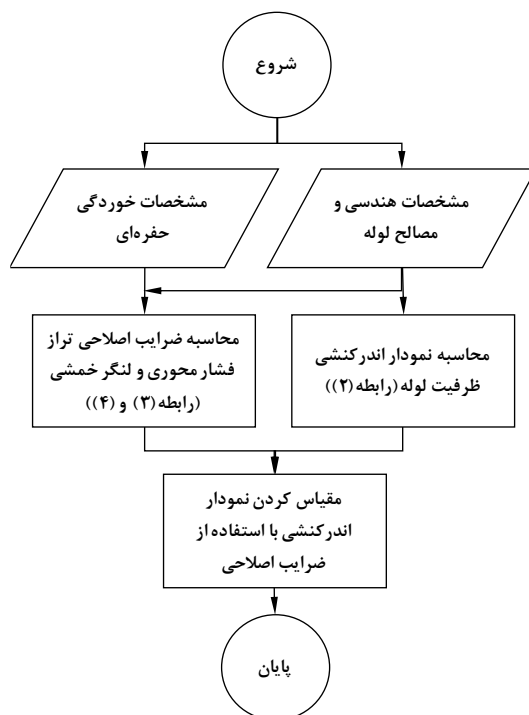
(ج)

شکل ۱۵: نمودار ظرفیت اندرکنشی نمونه لوله دست نخورده و نمونه لوله با میزان کاهش جرم: (الف) ۱۰، (ب) ۲۰ و (ج) ۳۰ درصد.

جهت تعمیم روش یاده شده، با در نظر گیری ضرایب محاسبه شده برای سایر لوله‌ها با نسبت ابعادی مختلف، رابطه رگرسیونی  $C_P$  و  $C_M$  به صورت رابطه (۳) و (۴) و براساس مشخصات ابعادی و شاخص‌های خوردگی حفره‌ای معرفی می‌شوند. همچنین روندنمای روش پیشنهادی پژوهش حاضر در شکل ۱۶ ارائه شده است.

$$C_P = 1.03 - 1.67\chi + 0.30A_{index} - 0.18C_{index} - 0.0038(l/r) - 0.00054(r/t) \quad (3)$$

$$C_M = 1.03 - 1.65\chi + 0.25A_{index} - 0.18C_{index} - 0.0008(l/r) - 0.00113(r/t) \quad (4)$$



شکل ۱۶: روندنمای روش پیشنهادی.

ارزیابی عملکرد روش ضرایب اصلاحی در تخمین ظرفیت باقیمانده لوله‌های جداره ضخیم با خوردگی حفره‌ای تحت فشار محوری و لنگر خمشی براساس معادله آیین‌نامه آمریکا [۱۲] ذیلاً صورت می‌پذیرد. در این راستا با تغییر تمامی مشخصات ابعادی و مصالح مورد استفاده در تحلیل‌های پیشین، تلاش می‌شود یک نمونه لوله بطور مستقل مورد بررسی قرار گیرد. مشخصات ابعادی بصورت  $l/r$  برابر ۱۵،  $r/t$  برابر ۲۰، با طول لوله ۵ متر مفروض است. تنش تسلیم فولاد نیز بر مبنای فولاد S275 [۱۱]، ۲۷۵ مگاپاسکال است. مطابق آیین‌نامه اروپا [۱۱] مقطع در کلاس یک قرار می‌گیرد. مطابق آیین‌نامه آمریکا [۱۲] نیز مقطع تحت نیروی محوری، غیرلاغر و تحت خمش، فشرده<sup>۳۲</sup> است. مشخصات خوردگی حفره‌ای با فرض شاخص کاهش جرم  $\chi$  ۷ درصد، طی دو سناریو، مطابق جدول ۵ در نظر گرفته شده است.

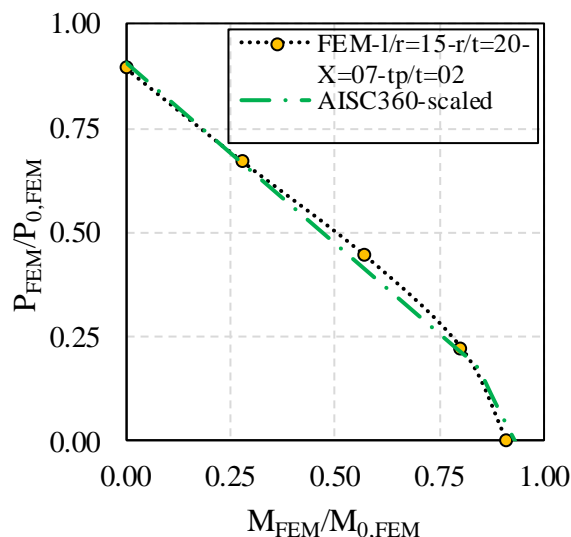
جدول ۵: شاخص‌های خوردگی حفره‌ای در دو سناریو مفروض.

No.	$\chi$	$A_{index}$	$C_{index}$
1	0.07	0.10	0.70
2	0.07	0.35	0.20

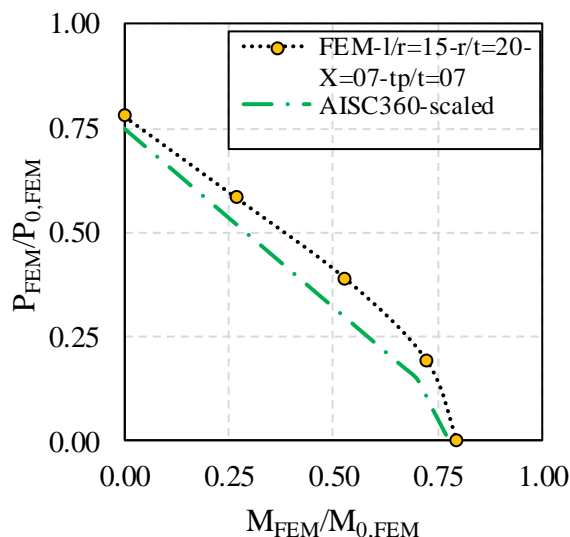
شکل ۱۷ نتایج تحلیل اجزا محدود نمونه لوله‌ها را تحت دو سناریو خوردگی فوق نشان می‌دهد. منحنی ظرفیت لوله‌ها با روش پیشنهادی نیز در همین شکل آورده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود در هر دو سناریو، فرم منحنی اندرکنشی بدست آمده از

<sup>32</sup> compact

تحلیل عددی و معادله آیین‌نامه‌ای تطابق بسیار مناسبی دارند. میزان اختلاف منحنی اصلاح‌شده با منحنی اندرکنشی اجزا محدود در سناریو یک (چگالی خوردگی کمتر و عمق خوردگی بیشتر) و سناریو دو (چگالی خوردگی بیشتر و عمق خوردگی کمتر) به ترتیب محدود به حداکثر ۱۱ و ۳ درصد است.



(ب)



(الف)

شکل ۱۷: آزمون روش پیشنهادی در مقایسه با نتایج تحلیل اجزا محدود: (الف) سناریو ۱ و (ب) سناریو ۲.

علاوه بر آزمون فوق، مقایسه روش پیشنهادی با نتایج اجزا محدود مطالعه ژائو و همکاران [۲۴] بر طبق جدول ۶ نیز مؤید کارایی روش پیشنهادی است. بطوری که منطبق بر رابطه‌های (۳) و (۴)، اثر شاخص کاهش جرم ( $\chi$ ) و شاخص عمق خوردگی ( $C_{index}$ ) بر ظرفیت خمشی لوله خورده شده منفی است. از طرفی افزایش میزان گستردگی خوردگی (حرکت به خوردگی یکنواخت) در یک شاخص کاهش جرم ثابت، اثر مثبت بر ظرفیت باقیمانده لوله می‌گذارد. لازم به یادآوری است که مطالعه ژائو و همکاران از اثر نسبت ابعادی بر نتایج صرف نظر کرده است. حال آنکه در پژوهش حاضر، اثر مؤلفه ابعادی لوله‌ها در روابط پیشنهادی لحاظ شده است.

جدول ۶: مقایسه نتایج کاهش ظرفیت خمشی لوله‌ها، مدل‌سازی اجزا محدود ژائو و همکاران [۲۴] و پژوهش حاضر.

No.	r/t	l/r	$\chi$	$A_{index}$	$C_{index}$	$C_M$		Absolute difference (%)
						Zhao et al. [24]	Present study	
1	8.33	1	0.1	0.33	0.3	0.86	0.88	2.77
2	8.33	1	0.1	0.20	0.5	0.83	0.81	1.85
3	8.33	1	0.1	0.14	0.7	0.81	0.76	5.78
4	8.33	1	0.2	0.67	0.3	0.74	0.80	8.10
5	8.33	1	0.2	0.40	0.5	0.68	0.70	2.87
6	8.33	1	0.2	0.29	0.7	0.64	0.64	0.75
7	8.33	1	0.3	1.00	0.3	0.71	0.72	1.51
8	8.33	1	0.3	0.60	0.5	0.58	0.58	0.82
9	8.33	1	0.3	0.43	0.7	0.53	0.51	4.65

نظر به موارد فوق و جهت پیشبرد پژوهش حاضر در نظر است اثر عمق متغیر در محل هر خوردگی حفره‌ای نیز در مطالعات آتی لحاظ شود. کاربرد عملی این نتایج در تحلیل سراسری سکوها و پایه‌های دریایی دچار خوردگی و استخراج منحنی‌های شکنندگی از جمله دیگر برنامه‌های پژوهشی است که جهت توسعه سیر تحقیقات جاری متصور است.

## ۴- نتیجه گیری

بررسی رفتار تحت فشار محوری و لنگر خمشی نمونه لوله‌های فولادی دارای خوردگی حفره‌ای در مطالعه حاضر صورت گرفت. مصداق بارز این موضوع در ارتباط با سکوها‌های دریایی که در معرض محیط خورنده دریایی قرار دارند، موضوعیت پیدا می‌کند. لوله‌های فولادی بکار رفته در پایه این سکوها ضمن تحمل بارهای ثقلی که موجب ایجاد فشار محوری می‌شود، می‌توانند در اثر بارهای جانبی چون بار باد و زمین لرزه، لنگر خمشی قابل توجهی را تجربه نمایند. بدین ترتیب در این مقاله با اتکا به رویکرد عددی مبتنی بر شبیه‌سازی اجزا محدود در نرم‌افزار ABAQUS/Standard [۲۵]، ضمن تشریح روش مدل‌سازی عددی اتخاذ شده در پژوهش، ابتدا روش مدل‌سازی تحت ترکیب فشار محوری و لنگر خمشی با در نظرگیری اعضای لوله‌ای دارای خوردگی حفره‌ای ایده‌آل‌سازی شده صحت‌سنجی شد. سپس با ارجاع به نمونه سازه‌های ساحلی و فراساحلی مانند سکوها‌های دریایی، حدود مشخصات ابعادی عملی مورد استفاده در این سازه‌های استخراج و طی چند مطالعه عددی اثر هریک از این پارامترها، بانضمام اثر مدل رفتاری فولاد (مدل الاستیک-پلاستیک ایده‌آل) بر نتایج ظرفیت کاهش یافته خمشی لوله‌های فولادی تحت فشار سنجیده شد. در این راستا موارد ذیل مبتنی بر پژوهش حاضر ارائه می‌شود:

۱- در بین شاخص‌های ریخت‌شناسی خوردگی حفره‌ای، اثر اندازه خوردگی ( $B_{index}$ ) بر ظرفیت نمونه لوله‌ها قابل صرف نظر ارزیابی شد. اما اثر شاخص چگالی خوردگی و عمق خوردگی در کنار شاخص اصلی کاهش جرم ( $X$ ) بر نتایج مؤثر ارزیابی شد و در مطالعه پارامتری لحاظ گردید.

۲- شبیه‌سازی خوردگی لوله‌ها به کمک انتخاب تصادفی اجزای سازنده مدل اجزا محدود و تخصیص ضخامت کاهش یافته به آن‌ها انجام شده است. اثر انتخاب‌های تصادفی مختلف بر نتایج مورد آزمون قرار گرفت و حساسیت ظرفیت نمونه لوله‌ها به این عامل قابل صرف نظر ارزیابی شد.

۳- دو آیین‌نامه اروپا [۱۱] و آمریکا [۱۲] که به ارائه معادله ظرفیت تحت فشار محوری و خمش مقاطع فولادی (فاقد خوردگی) می‌پردازند، بطور ضمنی مطرح و نمودار متناظر هر یک با نتایج عددی مقایسه گردید. بر این اساس فرم نمودار پیشنهادی آیین‌نامه آمریکا [۱۲] قرابت بسیار بیشتری با نتایج تحلیل اجزا محدود داشت. همچنین به محافظه‌کارانه بودن معادله پیشنهادی آیین‌نامه اروپا [۱۱] نیز اشاره شد.

۴- مطالعه پارامتری جهت استخراج میزان کاهش باربری نمونه لوله‌های جداره ضخیم با در نظرگیری مشخصات ابعادی لوله‌ها و شاخص‌های خوردگی حفره‌ای انجام شد. با مقایسه کاهش ظرفیت رخ داده نسبت به نمونه دست‌نخورده (بدون خوردگی)، اقدام به استخراج دو ضریب اصلاح، یکی برای فشار محوری و دیگری برای لنگر خمشی در هر حالت دارای خوردگی شد. این ضرایب با استفاده از روش رگرسیون خطی چند متغیره به صورت رابطه ارائه گردید. دو ضریب اصلاحی استخراج شده سپس تحت روش پیشنهادی اصلاح معادله اندرکنشی آیین‌نامه آمریکا [۱۲]، جهت ملحوظ داشتن اثرات خوردگی حفره‌ای مطرح شد. در واقع این دو ضریب اصلاحی برای مقیاس کردن نمودار اصلی آیین‌نامه بسته به مشخصات ابعادی لوله و شاخص‌های خوردگی، در نمودار اصلی ضرب می‌شوند.

۵- کارایی روش پیشنهادی با در نظرگیری یک نمونه لوله با مشخصات ابعادی و تنش تسلیم دلخواه، تحت دو سناریوی خوردگی، مورد ارزیابی قرار گرفت. بر این اساس نمودار پیشنهادی حاصل از روش اصلاح معادله آیین‌نامه آمریکا [۱۲] حداکثر اختلاف تا ۱۱ درصد را از خود نشان داد. بنابراین بنظر می‌رسد روش پیشنهادی امکان استفاده جهت تخمین مقاومت باقیمانده لوله‌های خورده شده تحت فشار محوری و لنگر خمشی را دارد.

## مراجع

- [1] ISO 12944-2. (2017). *Paints and varnishes — Corrosion protection of steel structures by protective paint systems, Part 2: Classification of environments*. Geneva: International Standard Organization, p. 4.
- [2] Zhang, J. and Shi, X.H. and Soares, C.G. (2017). Experimental analysis of residual ultimate strength of stiffened panels with pitting corrosion under compression. *Engineering Structures*, 152, pp. 70–86.

- [3] Talebi, M. and Zeinoddini, M. and Motamedi, M. and Zandi, A.P. (2018). Collapse of HSLA steel pipes under corrosion exposure and uniaxial inelastic cycling. *Journal of Constructional Steel Research*, 144, pp. 253–269.
- [4] Huang, Y. and Zhang, Y. and Liu, G. and Zhang, Q. (2010). Ultimate strength assessment of hull structural plate with pitting corrosion damage under biaxial compression. *Ocean Engineering*, 37, pp. 1503–1512.
- [5] Hebor, M.F. and Rickles, J.M. (2002). Local buckling strength of patch corrosion damaged steel tubular bracing, *Steel Structures*, 2, pp. 59–70.
- [6] Saad-Eldeen, S. and Garbatov, Y. and Soares, C.G. (2012). Effect of corrosion degradation on ultimate strength of steel box girders. *Corrosion engineering, science and technology*, 47, pp. 272–283.
- [7] Zhang, Y. and Huang, Y. and Zhang, Q. and Liu, G. (2016). Ultimate strength of hull structural plate with pitting corrosion damage under combined loading. *Ocean Engineering*, 116, pp. 273–285.
- [8] Zhang, Y. and Huang, Y. and Wei, Y. (2017). Ultimate strength experiment of hull structural plate with pitting corrosion damage under uniaxial compression. *Ocean Engineering*, 130, pp. 103–114.
- [9] Yao, Y. and Yang, Y. and He, Z. and Wang, Y. (2018). Experimental study on generalized constitutive model of hull structural plate with multi-parameter pitting corrosion. *Ocean Engineering*, 170, pp. 407–415.
- [10] Bansal, R.K. (2008). *A Textbook of Strength of Materials*. New Dehli: Laxmi Publications, p. 781.
- [11] EN 1993-1-1. (2005). *Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*. Brussels: CEN, pp. 44-55.
- [12] ANSI/AISC 360-22 (2022). *Specification for Structural Steel Buildings*. Chicago: American Institute of Steel Construction, pp. 21-82.
- [13] Kim, Y.J. and Oh, C.K. and Park, and Hasegawa, C.Y. K. (2006). Net-section limit load approach for failure strength estimates of pipes with local wall thinning. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 83, pp. 546–555.
- [14] Shuai, Y. and Wang, X.H. and Cheng, Y.F. (2021). Buckling resistance of an X80 steel pipeline at corrosion defect under bending moment. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 93, p. 104016.
- [15] Wei, Y. and Wu, Z. and Wang, X. and Jiang, S.F. (2012). Mechanical behavior of locally corroded circular steel tube under compression. *Structures*, 33, pp. 776–791.
- [16] Kang, L. and Zhang, C. and Bradford, M.A. and Liu, X. (2023). Axial compressive behaviour of corroded circular steel tube columns retrofitted by laser-cladding additive manufacturing, *Thin-Walled Structures*, 192 p. 111129.
- [17] Wang, R. and Sheno, R.A. (2019). Experimental and numerical study on ultimate strength of steel tubular members with pitting corrosion damage. *Marine Structures*, 64, pp. 124–137.
- [18] Naghipour, M. and Ezzati, M. and Elyasi, M. (2018). Experimental investigation of pressurized steel pipes with mechanical defect under axial compression. *Modares Mechanical Engineering*, 18, pp. 172–181.
- [19] Bhardwaj, U. and Teixeira, A.P. and Soares, C.G. (2022). Failure assessment of corroded ultra-high strength pipelines under combined axial tensile loads and internal pressure, *Ocean Engineering*, 257, p. 111438.
- [20] Shuai, Y. and Zhang, X. and Feng, C. and Han, J. and Cheng, Y.F. (2022). A novel model for prediction of burst capacity of corroded pipelines subjected to combined loads of bending moment and axial compression. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 196, p. 104621.
- [21] Wang, H. and Yu, Y. and Yu, J. and Xu, W. and Chen, H. and Wang, Z. and Han, M. (2019). Effect of pitting defects on the buckling strength of thick-wall cylinder under axial compression. *Construction and Building Materials*, 224, pp. 226–241.
- [22] Yang, Y. and Xu, T. and Qin, J. and He, Z. and Yu, Q. and Su, J. and Zhou, X. (2021). Experimental study on the compression mechanical behaviour of steel pipes with mechanically induced pitting corrosion. *Applied Ocean Research*, 116, p. 102880.
- [23] Song, S.S. and Liu, X. and Chen, J. and Ye, C. and Liu, J. and Liu, C. (2022). Compressive behaviour of corroded thin-walled circular section steel stub columns. *Thin-Walled Structures*, 180, p. 109794.
- [24] Zhao, Z. and Zheng, C. and Zhang, J. and Liang, B. and Zhang, H. (2021). Influence of random pitting corrosion on moment capacity of thin-walled circular tubes subjected to compression force. *International Journal of Pressure*

- Vessels and Piping*, 189, p. 104260.
- [25] Abaqus 6.12. (2012). *Abaqus CAE User's Manual*. Providence, Rhode Island: Dassault Systèmes Simulia Corporation.
- [26] Sadowski, A.J. and Rotter, J.M. (2013). Solid or shell finite elements to model thick cylindrical tubes and shells under global bending. *International Journal of Mechanical Sciences*, 74, pp. 143–153.
- [27] Yuan, Y. and Zhang, N. and Liu, H. and Zhao, Z. and Fan, X. and Zhang, H. (2020). Influence of random pit corrosion on axial stiffness of thin-walled circular tubes. *Structures*, 28, pp. 2596–2604.
- [28] ASTM G46-94. (2005). *Standard guide for examination and evaluation of pitting corrosion*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- [29] Jahanitabar, A.A. and Bargi, K. (2018). Time-dependent seismic fragility curves for aging jacket-type offshore platforms subjected to earthquake ground motions. *Structure and Infrastructure Engineering*, 14(2), pp. 192–202.
- [30] Yang, Y. and Wu, Q. and He, Z. and Jia, Z. and Zhang, X. (2019). Seismic collapse performance of jacket offshore platforms with time-variant zonal corrosion model. *Applied Ocean Research*, 84, pp. 268–278.
- [31] Yang, Y. and Xu, T. and Guo, J. and He, Z. and Ma, H. (2021). Strength reserve assessment on pitting-corroded jacket offshore platforms based on the modified generalized constitutive model. *Thin-Walled Structures*, 169, p.108494.
- [32] Elsayed, T. and El-Shaib, M. and Gbr, K. (2016). Reliability of fixed offshore jacket platform against earthquake collapse. *Ships and Offshore Structures*, 11(2), pp. 167–181.