

## بررسی استحکام ایستایی اتصالات لوله‌ای T متاثر از الگوهای متفاوت پراکندگی خوردگی حفره‌ای تحت بارگذاری خمشی برون صفحه‌ای

آرنو پطروسیان<sup>۱</sup>، محمدرضا خدمتی<sup>۲</sup>، مسعود نظری<sup>۳</sup>

khedmati@aut.ac.ir

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، واحد آموزشی بندرعباس، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- استاد دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۳- دانشجوی دوره دکتری دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

### چکیده

در این تحقیق، اثر الگوهای متفاوت پراکندگی خوردگی حفره‌ای بر استحکام ایستایی اتصالات لوله‌ای T تحت بارگذاری خمشی برون صفحه‌ای بررسی گردید. با استفاده از روش اجزای محدود شبیه سازی رفتار اتصال انجام شد. اعتبار نتایج تحلیل عددی توسط نتایج یک آزمایش بررسی گردید، سپس دو پارامتر الگو پراکندگی و عمق حفرات در ۹۰ مدل عددی در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که پراکندگی خوردگی در ناحیه تقاطع اتصال بخصوص بر عضو اصلی باعث کاهش استحکام نسبت به سایر الگوها می‌شود، همچنین با افزایش عمق حفرات محدوده توزیع تمرکز تنش و کاهش استحکام اتصال می‌گردد.

واژگان کلیدی: اتصال لوله‌ای، استحکام ایستایی، خوردگی حفره‌ای، سازه فراساحلی.

تاریخ دریافت مقاله : ۹۷/۰۸/۰۲

تاریخ پذیرش مقاله : ۹۸/۰۹/۱۲

## ۱ - مقدمه

لوله‌های فولادی از اجزای سازنده سازه‌های دریایی مانند: جکت‌ها و جک آپ‌ها و... هستند، که معمولاً برای بهره برداری از ذخایر میادین هیدروکربنی بستر دریا مورد استفاده قرار می‌گیرند. در چنین سازه‌هایی، لوله‌ها را با جوش دادن انتهای پروفیل بر روی محور عضو اصلی اتصال را تشکیل می‌دهند. اتصالات لوله‌ای از ساختارهای حیاتی و مهم هستند، که نقش انتقال بارها در یک سازه لوله‌ای را دارند. خوردگی حفره‌ای یکی از مخرب‌ترین خوردگی از انواع خوردگی است، که ضخامت قطعه را در نقاط مختلف به صورت حفره‌ای کاهش می‌دهد، که این امر سبب می‌شود که استحکام قطعه به طور قابل توجهی کاهش یابد، ولی در وزن قطعه تغییر محسوسی ایجاد نشود. در این تحقیق به ارزیابی تاثیر الگوی پراکندگی خوردگی و عمق حفرات خوردگی حفره‌ای در اتصال T پرداخته شده است.

در سال ۱۹۵۲، استیوارتز و لیودر اولین سازه مقطع توخالی را تولید کردند، که مورد توجه قرار گرفت و بیشتر تحقیقات بر روی اتصالات جوش شده به اتصالات لوله‌ای پرداخته شد [۲]. در سال ۱۹۷۶، رابرت و همکاران به توسعه معادله استحکام نهایی اتصالات پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که معادله استحکام نهایی به پارامترهای هندسی بستگی دارد [۳]. در سال ۱۹۸۳، استانکوچ و اسپارو اتصالات T شکل جوش شده با مقطع دایروی را مورد آزمایش قرار دادند و به نتیجه اندرکنش خطی میان بار محوری و ممان در صفحه رسیدند [۴].

در سال ۲۰۱۳، شوبین و همکاران استحکام ایستایی اتصال T تقویت شده مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها دریافتند که مقادیر کوچک بتا منجر به کماتش محلی می‌شود و در بهبود استحکام ایستایی موثر است [۵]. در سال ۲۰۱۴، نظری و همکاران روش اجزای محدود غیر خطی را برای اعضای با خوردگی تحت بارگذاری فشاری مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که ظرفیت لوله ی خورد شده یک رابطه ی خطی با پارامتر ابعاد لوله  $L/D$  دارد [۶].

در سال ۲۰۱۵، فاگ و همکاران به بررسی اتصال T در دماهای متفاوت تحت نیروی خمشی پرداختند آن‌ها دریافتند که با افزایش دما به میزان ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد مقاومت اتصال نسبت به اتصال متناظر در دمای محیط به میزان ۲۲٫۱ درصد کاهش می‌یابد، همچنین بر روی محل

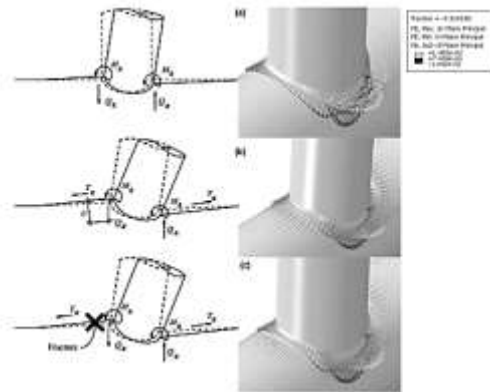
تشکیل ترک و سوبه‌های شکست مطالعاتی انجام دادند [۷]. در سال ۲۰۱۶، چن و همکاران با بررسی‌های رفتار ایستایی پوسته دو جداره اتصالات X پرداختند. آن‌ها دریافتند که استحکام نهایی، سختی اولیه و انعطاف پذیری پوسته دو جداره این اتصالات، با افزایش نسبت قطر عضو فرعی به عضو اصلی ضریب بتا بهبود می‌یابد [۸]. در سال ۲۰۱۶، نصیری و همکاران با تحلیل اجزای محدود بر روی صفحه ی بست تقویت شده اتصالات T/Y تحت بار محوری فشاری، اثر اندازه ی صفحه ی بست و هندسه ی اتصال را بر روی استحکام نهایی مورد بررسی قرار دادند [۹].

در سال ۲۰۱۶، آهن و همکاران استحکام فشاری باقی مانده اعضای مایل را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از آزمایش‌های بارگذاری فشاری نشان داد که آسیب خوردگی مایل اعضای به حالت شکست فشاری عضو بستگی دارد [۱۰]. در سال ۲۰۱۶، جیانگ و سواژس، اثر خوردگی حفره‌ای را بر روی استحکام باقی مانده ی صفحات مستطیل شکل، تحت نیروی فشاری محوری مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها یک فرمول کلی، با پارامتر منحصر به فرد درجه ایجاد حفره برای پیش بینی استحکام باقی مانده صفحات خورده شده حفره دار به وسیله اصلاح کردن مقاومت نهایی صفحات سالم پیشنهاد کردند [۱۱].

در سال ۲۰۱۸، توانا و همکاران به بررسی استحکام ایستایی اتصالات با احتساب خوردگی حفره‌ای تصادفی تحت نیروی محوری فشاری پرداختند، نتایج نشان داد که افزایش عمق خوردگی باعث کاهش استحکام ایستایی می‌شود و همچنین با افزایش درصد خوردگی، استحکام اتصال کاهش یافته است. نتایج بر روی نمودار نیرو- تغییر شکل مورد تحلیل قرار گرفت. مشاهده گردید که وجود خوردگی در اعضای اصلی کاهش بیشتری در استحکام اتصال نسبت به اعضای فرعی خورده شده دارد [۱۲].

## ۲- خوردگی حفره‌ای

خوردگی حفره‌ای نوعی از حمله‌های محلی و از مخرب‌ترین انواع خوردگی‌ها محسوب می‌شود، این حفره‌ها منجر به کاهش استحکام ایستایی از طریق افزایش تمرکز تنش در محل حفره می‌شوند. بنابراین، این موقعیت‌های بحرانی مستعد ترک هستند. شکست این لایه‌ها با حضور آنیون‌های بسیار تهاجمی مانند یون کلرید شروع می‌شود [۱۳ و ۱۴].

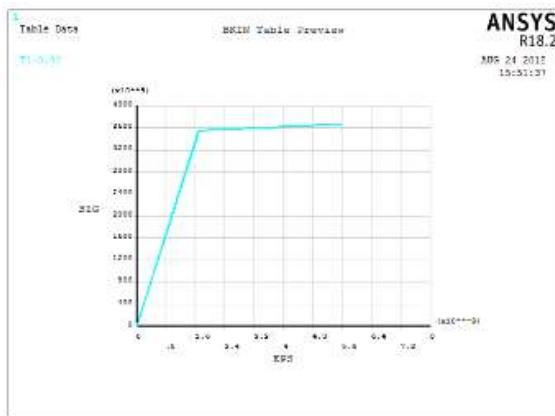


شکل (۲) مراحل شکست اتصال T تحت نیروی خمشی درون صفحه‌ای [۷].

شرایط مرزی این مدل به این صورت است که انتهای لبه‌های عضو اصلی کاملاً ثابت شده و عضو فرعی دارای نیروی خمشی درون صفحه‌ای می‌باشد. همچنین فولاد بکار رفته در عضو اصلی و فرعی دارای مشخصات یکسان است.

#### ۴- اعتبار سنجی

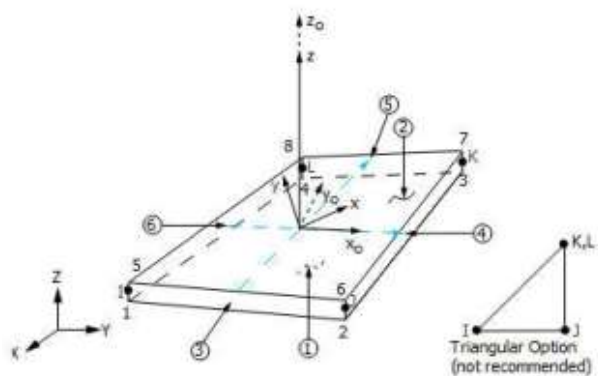
جهت اعتبار سنجی به دلیل در دسترس نبودن مدل اتصال T دارای خوردگی حفره‌ای، از مدل اتصال T سالم استفاده شده است. این مدل آزمایشگاهی در کشور سنگاپور برای پروژه ARC 2/07 به سفارش وزارت آموزش انجام گرفته است. مدل عددی با مشخصات هندسی و خواص مصالح نمونه آزمایشگاهی در انسیس مدل سازی شد و نمودار ممان - جابه جایی آن با نمودار مدل آزمایشگاهی مقایسه شد، شکل (۴). استحکام ایستایی مدل عددی ۲٫۹۹ درصد با مدل آزمایشگاهی تفاوت دارد. در اینجا نزدیک ترین شرایط تکیه گاهی به مدل واقعی و نحوه ی صحیح جزء بندی انتخاب شده است بنابراین درصد فوق قابل قبول است.



شکل (۳) منحنی تنش - کرنش دو خطی ایزوتروپیک [۱۸].

#### ۳- مدل سازی عددی

برای مدل سازی عددی از نرم افزار انسیس استفاده شده است. جهت مدل سازی دقیق خوردگی از مدل نود و المان استفاده می‌کنیم. ابتدا مختصات نود و المان اتصال را توسط نرم افزار متلب با استفاده از فرمول نویسی بدست می‌آوریم، سپس مدل ایجاد شده را به نرم افزار انسیس منتقل می‌کنیم. در این نرم افزار از المان پوسته ۱۸۱ استفاده شده است، که برای تحلیل سازه‌هایی با پوسته جدار نازک و ضخیم مناسب است. آن جزء چهار گره‌ای با شش درجه آزادی (سه درجه حرکت انتقالی و سه درجه حرکت دورانی) در هر گره است. همچنین این پوسته قابلیت تغییر ضخامت در تحلیل‌های غیر خطی را دارد. شکل (۱) هندسه، مختصات گره و سیستم مختصات جزءها را برای این نوع پوسته نشان داده است [۱۶]. مشخصات هندسی و مشخصات مصالح استفاده شده در مدل عددی که از همان مشخصات هندسی و مصالح مدل آزمایشگاهی جهت صحت سنجی استفاده شده، به ترتیب در جداول (۱) و (۲) نشان داده شده است. در شکل (۲) مراحل اعمال نیرو و عکس العمل اتصال تا زمان شکست تحت نیروی خمشی درون صفحه‌ای را نشان می‌دهد.



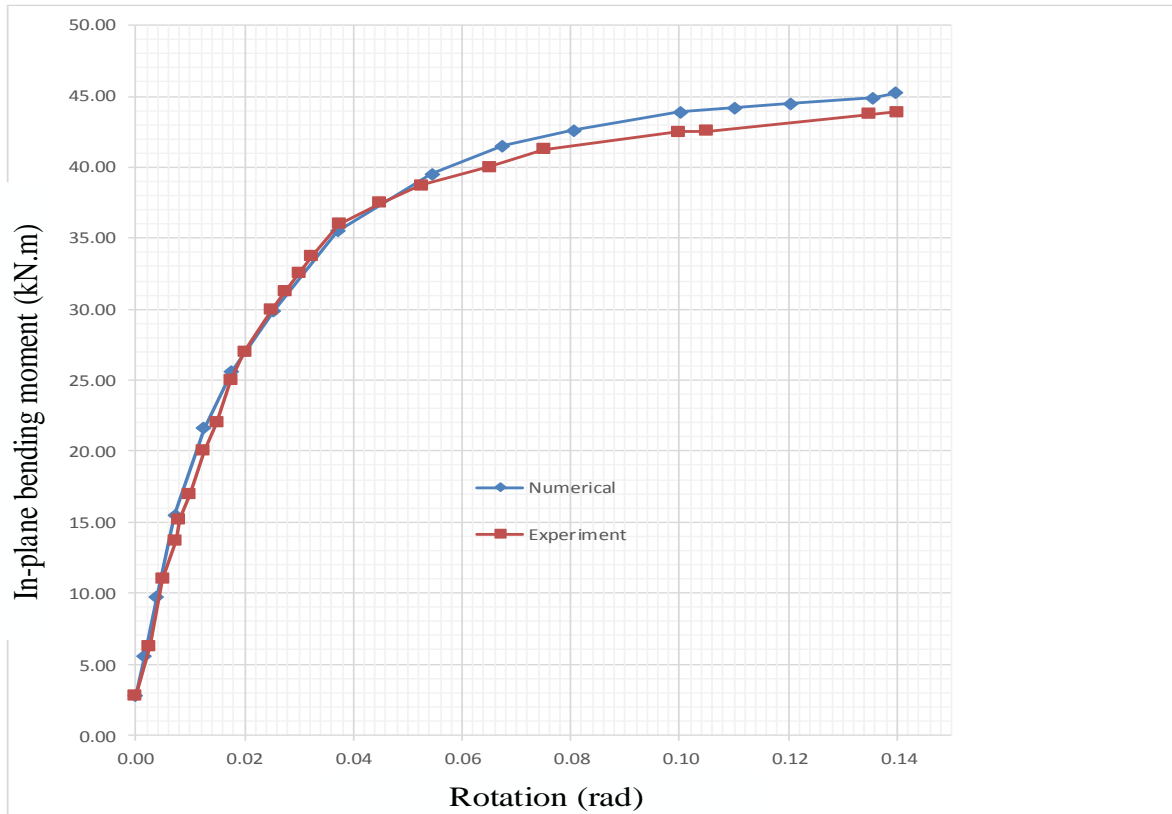
شکل (۱) مختصات جزء پوسته‌ای ۱۸۱ [۱۷].

جدول (۱) مشخصات هندسی مدل عددی

اعضا	طول (mm)	قطر (mm)	ضخامت (mm)
عضو اصلی	۲۲۰۰	۲۴۴٫۵	۶٫۳
عضو فرعی	۱۱۰۰	۱۶۸٫۷۰۵	۶٫۳

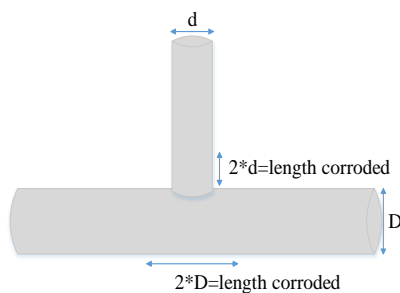
جدول (۲) مشخصات مصالح فولاد زنگ نزن S355 J2H

ضریب الاستیسیته (Gpa)	ضریب پواسون	مدول مماسی (Gpa)	تنش تسلیم (Mpa)
۲۱۰	۰٫۳	۲۰۰۹	۳۵۵

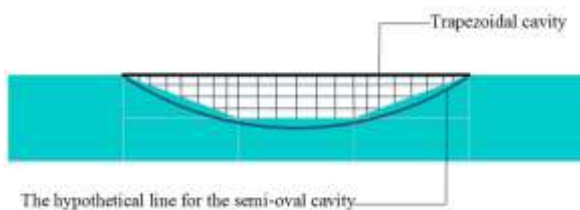


شکل (۴) نمودار نیرو-جابجایی مدل عددی سالم.

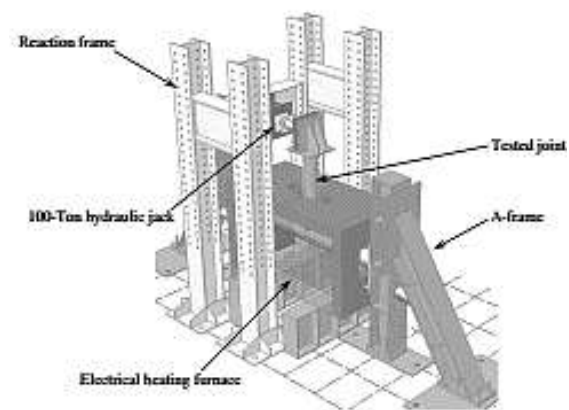
برای ارزیابی اثر الگوی پراکندگی خوردگی از ۶ الگوی متفاوت پراکندگی خوردگی که هر الگو شامل ۱۵ مدل خورده شده در سن‌های خوردگی متفاوت و دارای حفراتی با عمق‌های متفاوت می‌باشند، استفاده شده است.



شکل (۶) محدوده توزیع خوردگی در تقاطع اعضای اصلی و فرعی.



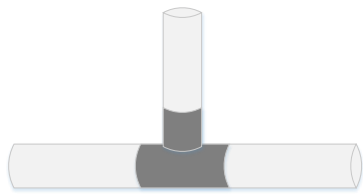
شکل (۷) طرح حفره خوردگی در مدل سازی عددی.



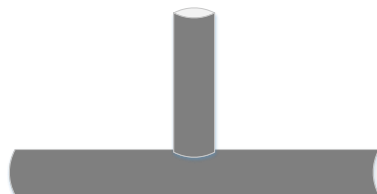
شکل (۵) مدل آزمایشگاهی اتصال [۷].

### ۵- اثر الگوی پراکندگی خوردگی

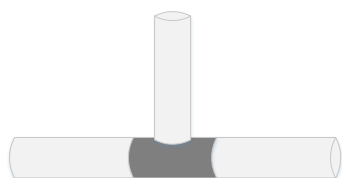
در تحقیقات پیشین الگوی پراکندگی خوردگی حفراهی به صورت سرتاسری بود، در شکل (۶) محدوده توزیع خوردگی در تقاطع اعضای اصلی و فرعی نشان داده شده است. حفرات خوردگی به شکل دوزنقه‌ای مدل شده است، که این طرح از خوردگی همان طور که در شکل (۷) طرح حفره خوردگی مشاهده می‌شود بسیار به خوردگی نیمه بیضی نزدیک است.



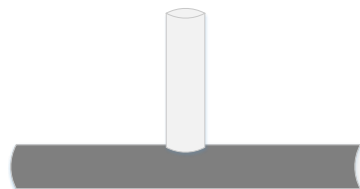
شکل (۱۱) الگو ۴ محدوده توزیع پراکندگی خوردگی در تقاطع اعضای اصلی و فرعی.



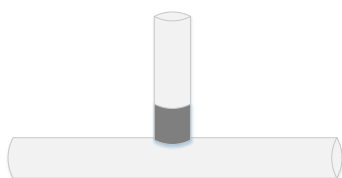
شکل (۸) الگو ۱ محدوده توزیع پراکندگی خوردگی سرتاسری.



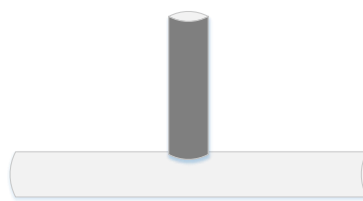
شکل (۱۲) الگو ۵ محدوده توزیع پراکندگی خوردگی در تقاطع عضو اصلی.



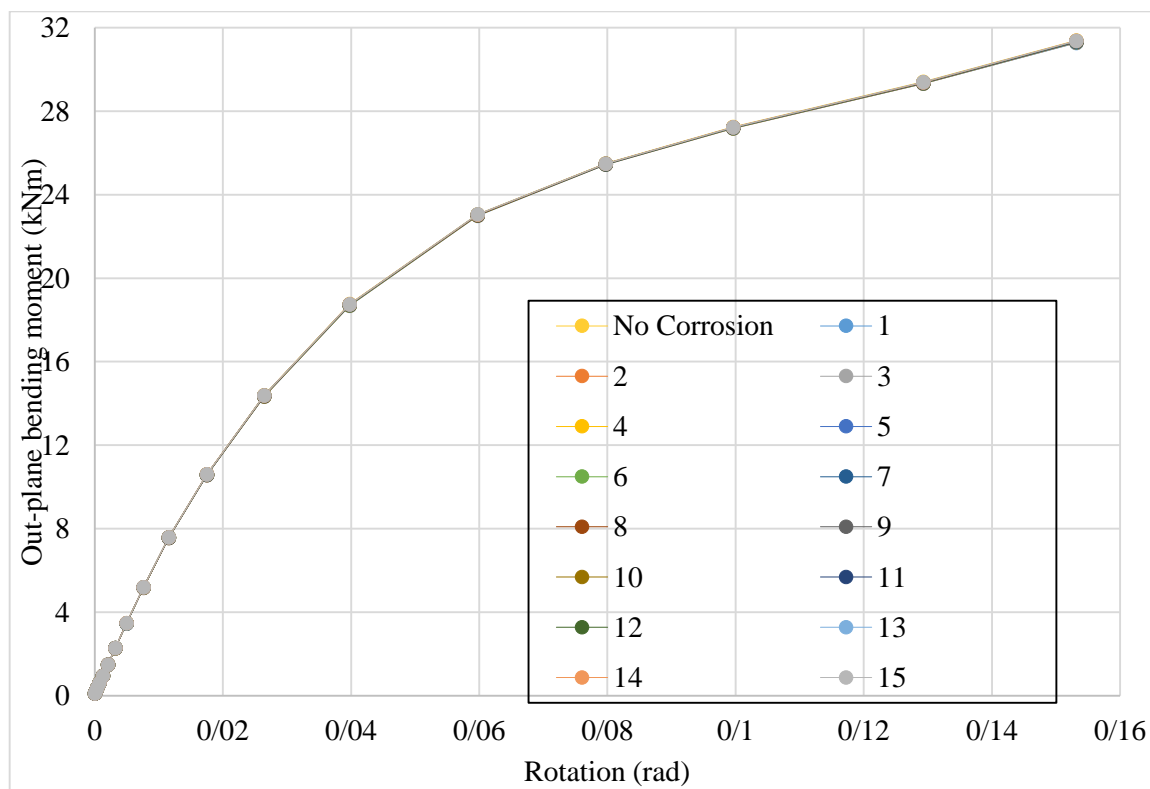
شکل (۹) الگو ۲ محدوده توزیع پراکندگی خوردگی در عضو اصلی.



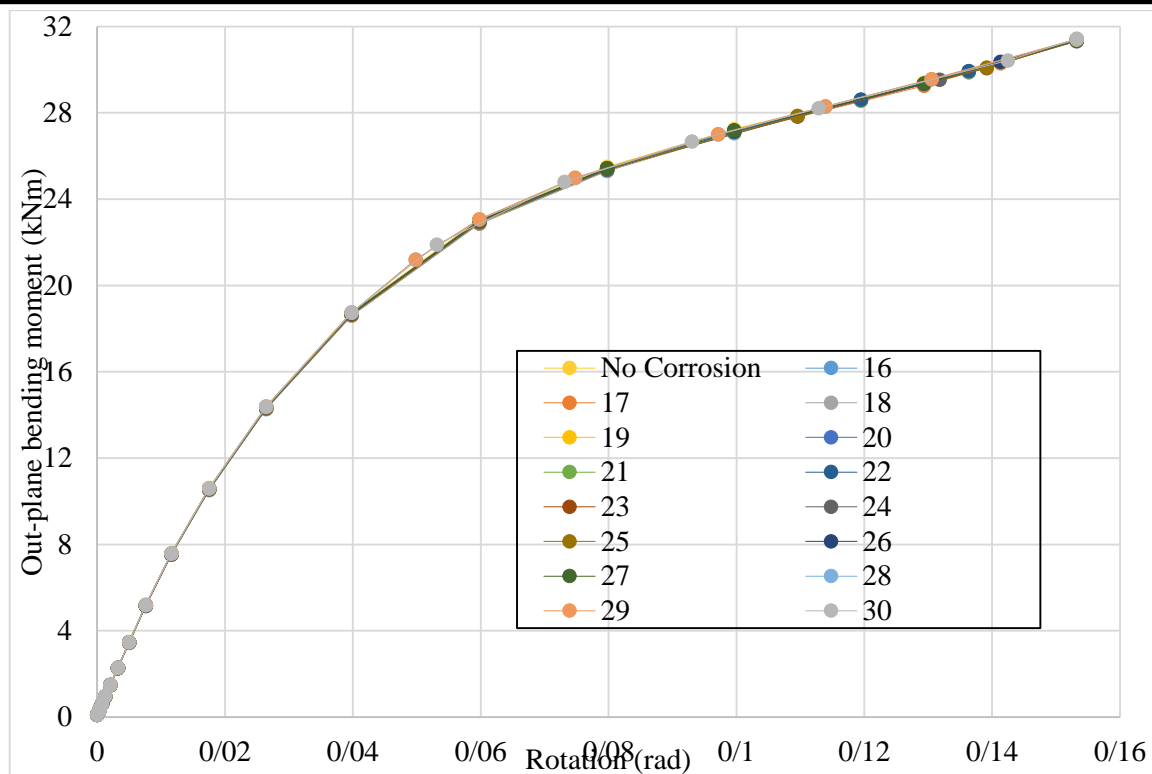
شکل (۱۳) الگو ۶ پراکندگی خوردگی فقط در تقاطع عضو فرعی.



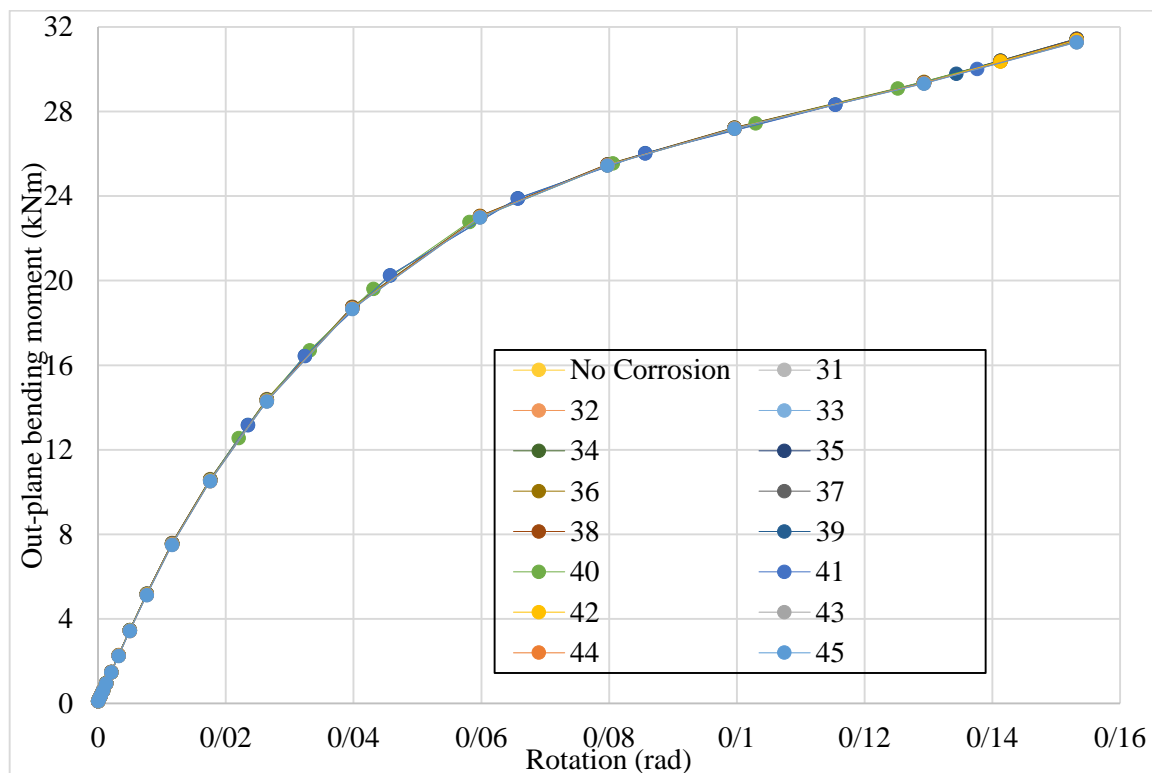
شکل (۱۰) الگو ۳ محدوده توزیع پراکندگی خوردگی در عضو فرعی.



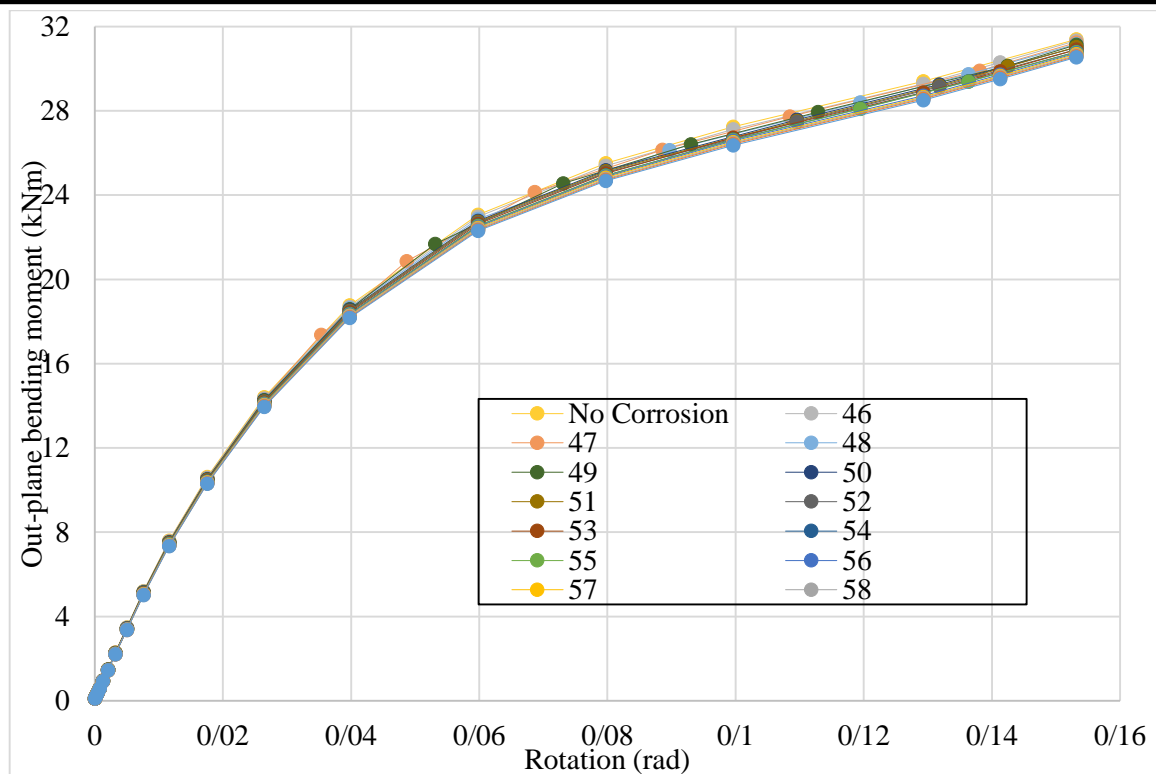
شکل (۱۴) نمودار مقایسه ی نیرو-جابجایی مدلی عددی سالم و مدل های خورده شده الگو ۱.



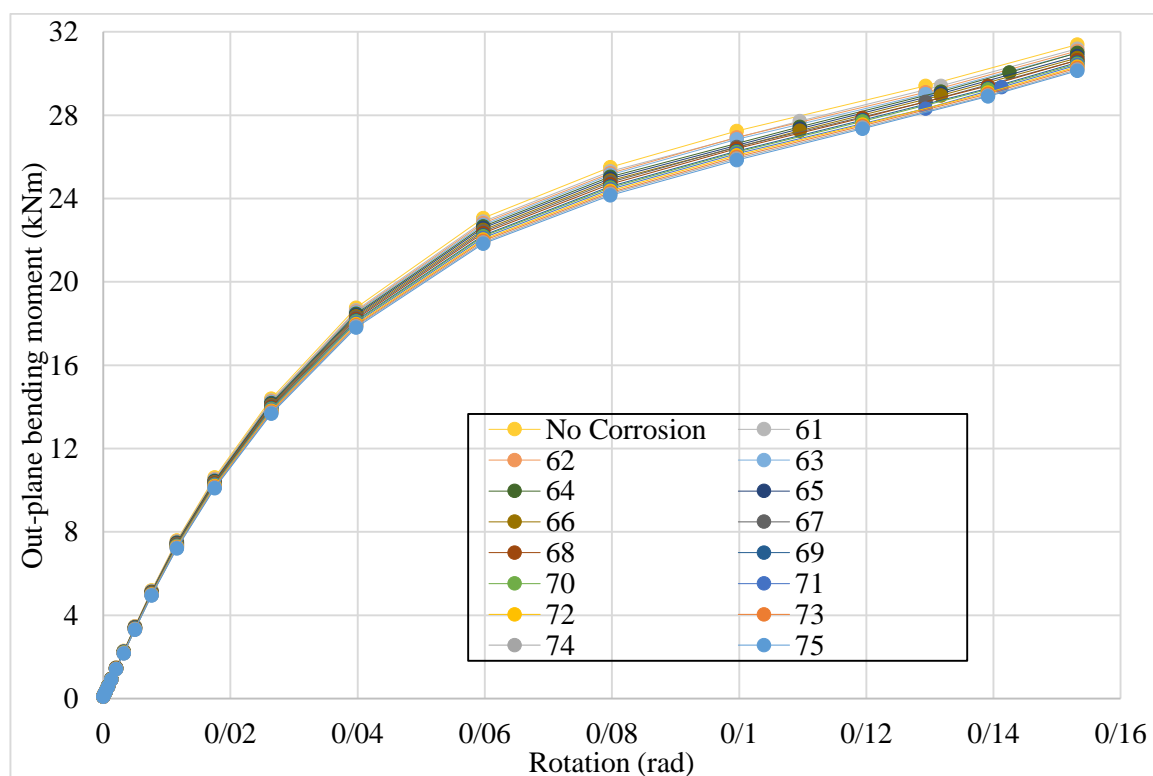
شکل (۱۵) نمودار مقایسه ی نیرو-جابجایی مدل عددی سالم و مدل های خورده شده الگو ۲.



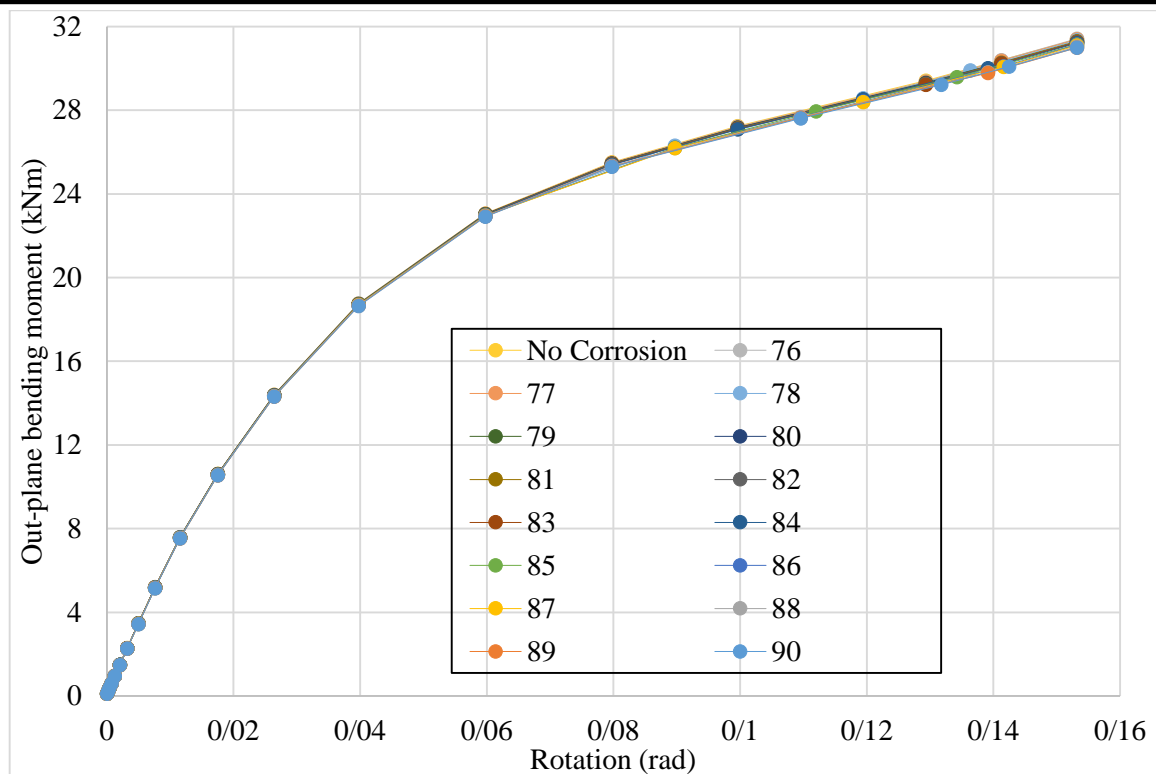
شکل (۱۶) نمودار مقایسه ی نیرو-جابجایی مدل عددی سالم و مدل های خورده شده الگو ۳.



شکل (۱۷) نمودار مقایسه ی نیرو-جابجایی مدل عددی سالم و مدل های خورده شده الگو ۴.



شکل (۱۸) نمودار مقایسه ی نیرو-جابجایی مدل عددی سالم و مدل های خورده شده الگو ۵.



شکل (۱۹) نمودار مقایسه‌ی نیرو-جابجایی مدل عددی سالم و مدل‌های خورده شده الگو ۶.

جدول (۳) مقایسه استحکام نهایی الگوهای مختلف پراکندگی خوردگی.

استحکام نهایی الگوهای مختلف پراکندگی خوردگی (kN)						سن خوردگی (سال)	درصد خوردگی (%)	عمق حفره (mm)
۶	۵	۴	۳	۲	۱			
۳۱,۳۸	۳۱,۱۹۷	۳۱,۳۲۸	۳۱,۳۶	۳۱,۳۴	۳۱,۳۷	۱ سال	۲,۵	۰,۷
۳۱,۳۷	۳۱,۰۸	۳۱,۲۳	۳۱,۳۵	۳۱,۳۱	۳۱,۳۶	۱ سال	۲,۵	۱
۳۱,۳۳	۳۰,۹۹۵	۳۱,۱۶	۳۱,۳۴۵	۳۱,۳	۳۱,۳۵۵	۱ سال	۲,۵	۱,۳
۳۱,۲۵۸	۳۰,۹۹	۳۱,۱۲	۳۱,۳۳۸	۳۱,۲۹	۳۱,۳۴۸	۲ سال	۲,۵	۱,۶
۳۱,۲۴	۳۰,۸۳	۳۱,۰۲	۳۱,۳۳	۳۱,۲۸	۳۱,۳۴	۲ سال	۲,۵	۱,۹
۳۱,۲۳۸	۳۰,۷۴	۳۱,۰۱	۳۱,۳	۳۱,۲۶	۳۱,۳۳۳	۴ سال	۲,۵	۲,۲
۳۱,۲۳۹	۳۰,۶۴	۳۰,۸۹۹	۳۱,۳۱۹	۳۱,۲۵	۳۱,۳۳	۴ سال	۲,۵	۲,۵
۳۱,۲۳۴	۳۰,۶۳	۳۰,۸۸	۳۱,۳۱	۳۱,۲۴۵	۳۱,۳۲۵	۴ سال	۲,۵	۲,۸
۳۱,۱۹۷	۳۰,۵۳	۳۰,۷۹۷	۳۱,۲۹	۳۱,۲۴۱	۳۱,۳۲	۵ سال	۲,۵	۳,۲
۳۱,۱۳۶	۳۰,۴۷۸	۳۰,۷۸	۳۱,۲۸	۳۱,۲۳۶	۳۱,۳۱	۵ سال	۲,۵	۳,۴
۳۱,۱۳	۳۰,۴	۳۰,۷۳	۳۱,۲۶	۳۱,۲۳۴	۳۱,۳	۵ سال	۲,۵	۳,۷
۳۱,۰۹	۳۰,۳۳	۳۰,۶۸	۳۱,۲	۳۱,۲۳	۳۱,۲۹	۵ سال	۲,۵	۴
۳۱,۰۳	۳۰,۲۶	۳۰,۶۳	۳۱,۱۹	۳۱,۲۲۸	۳۱,۲۸	۱۰ سال	۲,۵	۴,۳
۳۰,۹۸	۳۰,۱۹۹	۳۰,۵۸	۳۱,۱۸	۳۱,۲۲	۳۱,۲۷	۱۰ سال	۲,۵	۴,۶
۳۰,۹۷	۳۰,۱۴	۳۰,۵۳	۳۱,۱۷	۳۱,۲	۳۱,۲۶	۱۰ سال	۲,۵	۴,۹



جدول (۴) مقایسه استحکام نهایی الگوهای مختلف پراکندگی خوردگی.

اختلاف استحکام نهایی الگوهای پراکندگی خوردگی با استحکام نهایی مدل سالم (%)						سن خوردگی (سال)	درصد خوردگی (%)	عمق حفره (mm)
۶	۵	۴	۳	۲	۱			
٪۰٫۰۳	٪۰٫۶۱	٪۰٫۲	٪۰٫۱	٪۰٫۱۶	٪۰٫۰۶	سال ۱	۲٫۵	۰٫۷
٪۰٫۰۶	٪۰٫۹۹	٪۰٫۵۱	٪۰٫۱۳	٪۰٫۲۶	٪۰٫۱	سال ۱	۲٫۵	۱
٪۰٫۱۹	٪۱٫۲۶	٪۰٫۷۳	٪۰٫۱۴	٪۰٫۲۹	٪۰٫۱۱	سال ۱	۲٫۵	۱٫۳
٪۰٫۴۲	٪۱٫۲۷	٪۰٫۸۶	٪۰٫۱۷	٪۰٫۳۲	٪۰٫۱۳	سال ۲	۲٫۵	۱٫۶
٪۰٫۴۷	٪۱٫۷۸	٪۱٫۱۸	٪۰٫۱۹	٪۰٫۳۵	٪۰٫۱۶	سال ۲	۲٫۵	۱٫۹
٪۰٫۴۸	٪۲٫۰۷	٪۱٫۲۱	٪۰٫۲۹	٪۰٫۴۱	٪۰٫۱۸	سال ۴	۲٫۵	۲٫۲
٪۰٫۴۹	٪۲٫۳۹	٪۱٫۵۹	٪۰٫۲۳	٪۰٫۴۵	٪۰٫۱۹	سال ۴	۲٫۵	۲٫۵
٪۰٫۵	٪۲٫۴۲	٪۱٫۶۲	٪۰٫۲۵	٪۰٫۴۶	٪۰٫۲۱	سال ۴	۲٫۵	۲٫۸
٪۰٫۶۱	٪۲٫۷۴	٪۱٫۸۹	٪۰٫۳۲	٪۰٫۴۷	٪۰٫۲۳	سال ۵	۲٫۵	۳٫۲
٪۰٫۸۱	٪۲٫۹	٪۱٫۹۴	٪۰٫۳۵	٪۰٫۴۹	٪۰٫۲۵	سال ۵	۲٫۵	۳٫۴
٪۰٫۸۲	٪۳٫۱۵	٪۲٫۱	٪۰٫۴۱	٪۰٫۵	٪۰٫۲۹	سال ۵	۲٫۵	۳٫۷
٪۰٫۹۶	۳٫۳۸	٪۲٫۲۶	٪۰٫۶	٪۰٫۵۱	٪۰٫۳۲	سال ۵	۲٫۵	۴
٪۱٫۱۴	٪۳٫۶	٪۲٫۴۲	٪۰٫۶۴	٪۰٫۵۲	٪۰٫۳۵	سال ۱۰	۲٫۵	۴٫۳
٪۱٫۳۱	٪۳٫۸	٪۲٫۵۸	٪۰٫۶۷	٪۰٫۵۴	٪۰٫۳۸	سال ۱۰	۲٫۵	۴٫۶
٪۱٫۳۴	٪۳٫۹۸	٪۲٫۷۴	٪۰٫۷	٪۰٫۶۱	٪۰٫۴۱	سال ۱۰	۲٫۵	۴٫۹

- [2] Packer, J. A., "A Computer Program for the Structural Analysis of Welded Tubular Joints with RHS Chords", Advances in Engineering Software, Vol.1, 1979.
- [3] Robert, B.P., Fred, B.P., Kuong, J.G., "Ultimate Strength of Tubular Joints", Offshore Technology Conference, 1967.
- [4] Stamenkovi, A., Sparrow, K., "Load Interaction in T-joints of Steel Circular Hollow Section", Journal of Structural Engineering, Vol.109, 1983.
- [5] Shubin, H., Yongbo, Sh., Hongyan, Z., "Static Strength of Circular Tubular T-joints with Inner Doubler Plate Reinforcement Subjected to Axial Compression", The Open Ocean Engineering Journal, p.p.1-7, 2013.
- [6] Nazaria, M., Khedmati, M. R., Khalaj, A. F., "A Numerical Investigation into Ultimate Strength and Buckling Behavior of Locally Corroded Steel Tubular Members", Latin American Journal of Solids and Structures, Vol.11, 2014.
- [7] Fung, T.C., Tan, K.H., and Nguyen, M.P., "Structural Behavior of CHS T-Joints Subjected to Static In-Plane Bending in Fire Conditions", American Society of Civil Engineers, 2015.
- [8] Chen, Y., Feng, R.; Xiong, L., "Experimental and Numerical Investigations on Double-Skin CHS Tubular X-joints under Axial Compression", Thin-Walled Structures, pp.268-283, 2016.
- [9] Nassiraei, H., Lotfollahi. M.A., Ahmadi. H., "Static Strength of Collar Plate Reinforced Tubular T/Y-joints under Brace Compressive

در مجموع ۹۰ مدل خورده شده و ۱ مدل سالم در این بخش مورد ارزیابی قرار گرفته است، که در جداول (۳) و (۴) استحکام نهایی آن‌ها با یکدیگر مقایسه شده است. کلیه مدل‌های تحلیل شده با استفاده از نرم افزار متلب ۲۰۱۷ ساخته شده است [۲۰].

#### ۷- نتیجه‌گیری

مطالعات انجام شده نشان داد، که هر چه الگوی پراکندگی خوردگی به محل اتصال جوش نزدیک تر باشند استحکام نسبت به سایر الگوها بیشتر کاهش می‌یابد و با افزایش عمق حفره‌ها میزان استحکام کاسته می‌شود، این امر بعلاوه تمرکز تنش در حفره‌ها است، که با افزایش عمق حفره‌ها تمرکز تنش در حفره‌ها بیشتر می‌شود، در تحقیقات پیشین الگوی پراکندگی حالت ۴ که تحت نیروی فشاری انجام شده بود بیشترین کاهش استحکام را دارد، ولی در این تحقیق که برای اولین بار انجام شده است، نشان داد که بیشترین کاهش استحکام در الگوی حالت ۵ است، اتفاق می‌افتد، که به طور قابل توجهی استحکام را کاهش می‌دهد.

#### ۸- مراجع

- [1] <https://www.opetroleo.com.br>

- Loading”, Journal of Constructional Steel Research, pp.39-49, 2016.
- [10] Ahn, J., Choi, W., Jeon, S., Kim, S., Kim, I., “Residual Compressive Strength of Inclined Steel Tubular Members with Local Corrosion”, Applied Ocean Research, pp.498-509, 2016.
- [11] Jiang, X., Soares, C.G., “Residual Strength of Pitted Mild Steel Plates Subjected to Biaxial compression”, 35th International Conference on Ocean, 2016.
- [۱۲] الهه توانا، محمدرضا خدمتی، مسعود نظری، "ارزیابی استحکام ایستایی اتصالات لوله‌ای با احتساب خوردگی حفره‌ای تصادفی تحت نیروی محوری فشاری"، چهارمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی سازه، تهران، هتل المپیک، ۱۳۹۶.
- [13] Bhandari, J., Khan, F., Abbassi, R., Garaniya, V., Ojeda, R., “Modelling of Pitting Corrosion in Marine and Offshore Steel Structures - A Technical Review,” Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol.37, pp.39-62, 2015.
- [14] Kolios, A, Srikanth, S, Salonitis, K, “Numerical Simulation of Material Strength Deterioration due to Pitting Corrosion”, 2nd CIRP 2nd CIRP Conference on Surface Integrity, 2014.
- [15] Jin, A., Jin, C., Won, L., Hongseob, O., In-Tae, K., “Shear Buckling Experiments of Web Panel with Pitting and Through-Thickness Corrosion Damage”, Journal of Constructional Steel Research, Vol.115, pp.209-302, 2015.
- [16] ANSYS 16.1 reference manual, ANSYS Inc., 2016.
- [17] <http://www.ansys.fem.ir>
- [18] Mechanical APDL ANSYS Version 18.2 [Computer software].
- [19] Rhino Ceros 5.0, Modeling Tools for Designers [Computer software].
- [20] Matlab R2017b (9.3.0.713579) 64-Bit [Computer software]