

Investigation of the Effect of pitting corrosion on the splitting failure of bearing connections

Mohammadreza Mehditabar¹ Alireza Moazezi Mehrehtehran^{2*}

1- assistant professor, department of structure, Sharif university of technology, Tehran, Iran

2- Master student, department of structure, Sharif university of technology, Tehran, Iran

ABSTRACT

Steel connections are continuously exposed to strength degradation due to corrosion. To more accurately evaluate the performance of bolted steel structures under corrosive conditions, it is essential to characterize the behavior of corroded bolted connections and incorporate this into structural analyses. A review of the literature indicates that most previous studies have focused on the behavior of structural members, with only a few addressing the effects of pitting corrosion on connections. This study aims to numerically investigate the performance of bearing connections with splitting failure under pitting corrosion and to propose a relationship for the reduction in load-bearing capacity. This relationship can serve as a reference for assessing the safety of bolted connections in an in-service steel frame. In this research, pitting corrosion was modeled in ABAQUS software using a random distribution of pits generated by a Python script. By accurately simulating the failure modes and behavior of connections in ABAQUS, this study examines all possible failure scenarios of bearing connections with splitting failure and the impact of corrosion on their behavior. The results indicate that variations in pit distribution, even with constant corrosion characteristics and volume, can alter the failure mode, load-bearing capacity, and ductility of the connection. The findings also show that an increase in pit depth has the most significant effect on reducing load-bearing capacity. When the degree of volume loss reached its maximum value of 13.2%, specimens with pits 6.4 mm deep experienced a 15% reduction in strength. Finally, based on the degree of volume loss in the connection plate, three relationships were proposed to estimate the ultimate load-bearing capacity, representing the lower bound, linear regression, and upper bound of the predictive model.

ARTICLE INFO

Receive Date: 05 October 2024

Revise Date: 14 December 2024

Accept Date: 20 December 2024

Keywords:

Pitting corrosion
Splitting failure
Pits distribution
Bearing capacity
Failure mode

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2024.480272.3530

*Corresponding author: Alireza Moazezi Mehrehtehran

Email address: a.moazezi@sharif.edu

بررسی اثر خوردگی حفره‌ای بر پارگی شکافی اتصالات اتکایی

محمد رضا مهدی تبار^۱، علیرضا معززی مهرطهران^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

۲- استادیار گروه سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

چکیده

اتصالات فولادی پیوسته در معرض زوال مقاومت ناشی از خوردگی قرار دارند. جهت ارزیابی دقیق‌تر عملکرد سازه‌های فولادی پیچی تحت شرایط خورنده، لازم است رفتار اتصالات پیچی خورده شده تبیین و در تحلیل‌های سازه‌ای لحاظ شود. بررسی ادبیات موضوع در این حوزه نشان می‌دهد که بیشتر مطالعات پیشین به ارزیابی رفتار اعضای سازه‌ای معطوف بوده‌اند و تنها تعداد بسیار محدودی به بررسی اثر خوردگی حفره‌ای بر اتصالات پرداخته‌اند. از این‌رو، هدف از این پژوهش بررسی عددی عملکرد اتصالات اتکایی با پارگی شکافی تحت خوردگی حفره‌ای و ارائه رابطه‌ای متناظر با میزان کاهش ظرفیت باربری است، که می‌تواند مرجعی برای ارزیابی ایمنی اتصالات پیچی در یک قاب فولادی در حال خدمت باشد. در این پژوهش برای مدلسازی خوردگی در نرم افزار ABAQUS از توزیع تصادفی حفره‌ها که توسط یک کد پایتون تولید می‌شود، استفاده شد. این مطالعه با مدلسازی دقیق حالت خرابی و نحوه شکست اتصال در نرم‌افزار ABAQUS، به بررسی تمام حالات گسیختگی اتصالات اتکایی با پارگی شکافی و اثر خوردگی بر تغییر رفتار آن می‌پردازد. نتایج نشان می‌دهد که توزیع متفاوت حفره‌ها، حتی وقتی مشخصات و حجم خوردگی ثابت است می‌تواند باعث تغییر حالت خرابی، ظرفیت باربری و شکل‌پذیری اتصال شود. مطابق با نتایج افزایش عمق حفره‌ها، بیشترین تأثیر را بر روی کاهش ظرفیت باربری می‌گذارد. وقتی تراکم خوردگی به بالاترین میزان خود، یعنی ۱۳/۲٪ رسید، نمونه‌ها با حفره‌های به عمق ۶/۴ میلی‌متر با کاهش ۱۵ درصدی مقاومت مواجه شدند. در نهایت با توجه به میزان نسبت اتلاف حجم در ورق اتصال، سه رابطه جهت تخمین ظرفیت باربری نهایی اتصال ارائه شد تا نشان دهنده کران پایین، رگرسیون خطی و کران بالای مدل پیش‌بینی کننده باشد.

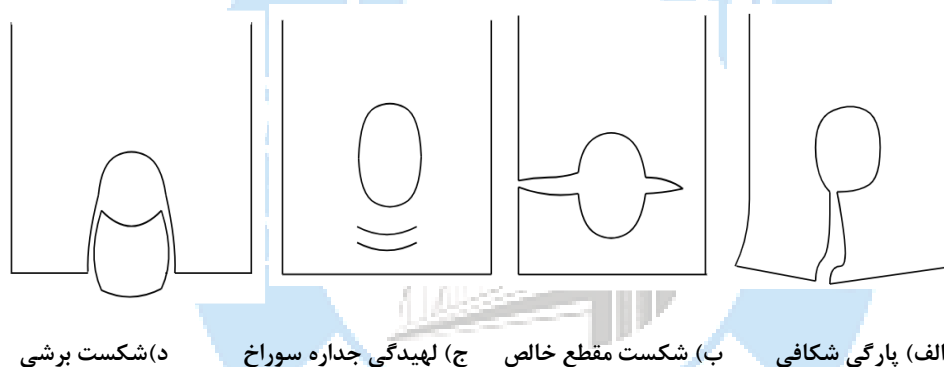
کلمات کلیدی: خوردگی حفره‌ای، پارگی شکافی، ظرفیت باربری، توزیع حفره‌ها، حالت خرابی.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
10.22065/jsce.2024.480272.3530	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
doi: https://doi.org/10.22065/jsce.2024.480272.3530	۱۴۰۴/۰۱/۳۱	۱۴۰۳/۰۹/۳۰	۱۴۰۳/۰۹/۳۰	۱۴۰۳/۰۹/۲۴	۱۴۰۳/۰۷/۱۴
علیرضا معززی مهرطهران a.moazezi@sharif.edu				*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

اتصالات به سه دسته اتکایی سفت بسته شده^۱، پیش تنیده^۲ و لغزش بحرانی^۳ تقسیم می‌شوند [۱]. در اتصالات اتکایی سفت بسته شده، پیچ‌ها تنها تا حدی که به آن شرایط سفتی کامل گفته می‌شود بسته می‌شوند. سفتی کامل زمانی تأمین می‌شود که تمامی صفحات یک اتصال در تماس سخت با یکدیگر باشند. با اعمال نیرو و لغزش صفحات بر روی هم در پیچ‌ها نیروی برشی ایجاد می‌شود. اگر پس از بستن اتصال، پیچ و مهره بیشتر پیچانده شوند، در پیچ‌ها تنش کششی ناشی از اعمال پیش‌تنیدگی ایجاد خواهد شد. این پیش‌تنیدگی باعث افزایش استحکام و پایداری اتصال، توزیع متوازن نیروهای خارجی، کاهش خزش و تغییر شکل اجزا و جلوگیری از لغزش تحت بارهای دینامیکی می‌شود. اتصال اخیر را اتصال پیش‌تنیده می‌نامند که برای جلوگیری از لغزش تحت اثر بارهای سرویس و تحمل بارهای رفت و برگشتی استفاده می‌شود. اتصالات پیش‌تنیده در برابر بارهای دینامیکی عملکرد بسیار خوبی دارند [۲].

اتصالات اتکایی تحت حالات متنوعی دچار شکست و گسیختگی می‌شوند [۳]. این گوناگونی در نوع گسیختگی موجب تغییر در ظرفیت باربری و شکل‌پذیری اتصالات می‌شود [۴]. شکل ۱ حالات خرابی متداول در این اتصالات را نشان می‌دهد. در اتصالات اتکایی، هنگام بارگذاری از طرف بدنه پیچ به جداره سوراخ نیروی فشاری وارد می‌شود. اگر ظرفیت لهیدگی جداره سوراخ ناکافی باشد، جداره سوراخ دچار ازدیاد طول و لهیدگی^۴ می‌شود. بسته به فاصله سوراخ از انتها و کناره ورق فولادی، اتصال می‌تواند قبل از لهیدگی دچار شکست مقطع خالص^۵ و پارگی شکافی^۶ و یا بعد از لهیدگی دچار پارگی برشی^۷ بشود [۵].



الف) پارگی شکافی ب) شکست مقطع خالص ج) لهیدگی جداره سوراخ د) شکست برشی

شکل ۱: حالات خرابی متداول.

ظرفیت باربری نهایی، یکی از مهم‌ترین پارامترهای طراحی برای اتصالات اتکایی است، چرا که مقدار حداکثر نیروی قابل تحمل یک اتصال را زمانی که از شکست مقطع خالص جلوگیری شود، مشخص می‌کند [۶]. شناخت مکانیزم شکست برشی و پارگی شکافی و تفاوت آن‌ها توسط پژوهشگران مورد مطالعه قرار گرفته است. در حالت کلی، پارگی شکافی یک حالت شکست مرزی بین شکست مقطع خالص و پارگی برشی است. پارگی شکافی در حالی اتفاق می‌افتد که فاصله سوراخ از کناره و انتهای ورق به گونه‌ای باشد که ورق تمایل به شکست تلفیقی دارد. در این حالت کناره‌های ورق دچار تغییر زاویه نسبت به حالت اولیه خود می‌شوند و ظرفیت باربری به میزان قابل توجهی نسبت به شکست برشی کاهش می‌یابد [۲]. شناخت نوع شکست برای اتصالاتی که شکل‌پذیری و ظرفیت نهایی در طراحی و عملکرد آن لحاظ شده است، اهمیت ویژه دارد [۷].

¹ Snug-tight

² Pretensioned

³ Slip critical

⁴ Bearing failure

⁵ Net cross section failure

⁶ Splitting failure

⁷ Tear-out failure

آیین نامه فولاد آمریکا [۱] و آیین نامه اتصالات پیچی پرمقاومت [۸] برای کنترل لهیدگی جداره سوراخ در اتصالات اتکایی، پیش - تنیده و لغزش بحرانی هنگامی که تغییر شکل سوراخ تحت بارهای سرویس در نظر گرفته شود، رابطه ۱ را توصیه می کنند.

$$\phi R_u = 2.4dtF_u \quad (1)$$

که در آن ϕ ضریب کاهش مقاومت است که برابر با ۰/۷۵ است، d قطر اسمی پیچ، t ضخامت عضو اتصال و F_u مقاومت نهایی فولاد است. این آیین نامه ها رابطه ۲ را نیز برای کنترل پارگی سوراخ ارائه می کنند.

$$\phi R_u = 1.2\phi L_c t F_u \leq 2.4\phi dt F_u \quad (2)$$

که در آن ϕ ضریب کاهش مقاومت است که برابر با ۰/۷۵ است، t ضخامت عضو اتصال، L_c فاصله خالص در راستای نیرو، بین دو سوراخ میانی یا یک سوراخ انتهایی و لبه آزاد ورق اتصال است و F_u نیز مقاومت نهایی فولاد است. همانطور که مشخص است، آیین نامه آمریکا پارگی شکافی را از شکست برشی تفکیک نمی کند.

خوردگی معمولا به دو دسته حفره ای^۸ و یکنواخت تقسیم می شود [۹]. مطالعات متعددی به بررسی اتصالات لغزش بحرانی (اصطکاکی) تحت خوردگی یکنواخت پرداخته اند [۱۰]. آزمایش ها نشان می دهند که خوردگی یکنواخت باعث کاهش نیروی پیش تنیدگی می شود [۱۱]. ضریب لغزش روند نامنظمی را در برابر افزایش نسبت اتلاف جرمی در اثر خوردگی نشان می دهد؛ چنان که ابتدا با افزایش نسبت اتلاف جرمی ضریب لغزش افزایش می یابد و با افزایش بیشتر نسبت اتلاف جرمی روندی کاهشی را تجربه می کند [۱۲].

خوردگی حفره ای یک نوع خوردگی موضعی است که در نتیجه آن، حفرات یا سوراخ هایی در قطعات فلزی ایجاد می شود. این نوع خوردگی با نام پیتینگ نیز شناخته می شود [۱۳]. حفره های کوچک و باریک که به وسیله خوردگی حفره ای ایجاد می شوند، می توانند باعث خرابی اتصالات و لوله های بزرگ فولادی شوند [۱۴]. برای جلوگیری از خوردگی حفره ای، انتخاب مواد مناسب، پوشش دهی محافظتی، کنترل محیط و طراحی سازه از راهکارهای مؤثر است [۱۵]. این خوردگی، باعث کاهش موضعی ضخامت قطعه می شود و می تواند تنش های محلی را افزایش دهد که به خستگی و ترک خوردگی ناشی از تنش منجر می شوند. قدمی و همکاران دریافتند لاغری ورق های فولادی تحت تأثیر خوردگی حفره ای کاهش می یابد و رفتار سازه ای آن ها به شدت تغییر می کند. نتایج نشان می دهد که خوردگی حفره ای با توزیع تصادفی می تواند استحکام برشی و ظرفیت باربری پانل ها را کاهش دهد [۱۶]. شکل ۲ حالات مختلف خوردگی حفره ای در فلزات را نشان می دهد [۱۷]. این تصاویر نمایانگر انواع شکل های خوردگی حفره ای است. از انواع خوردگی حفره ای می توان به خوردگی حفره ای نیم کره ای، خوردگی حفره ای مخروطی، خوردگی حفره ای سوزنی، خوردگی حفره ای نامنظم و ... اشاره کرد. المان های سازه ای و اتصالات، پیوسته مستعد قرار گرفتن در معرض خوردگی حفره ای هستند. تیرهایی که دچار این نوع خوردگی می شوند، دچار زوال در مقاومت خمشی خود می شوند [۱۸]. ظرفیت برشی تیرها و چشمه های اتصال نیز با افزایش میزان خوردگی کاهش پیدا می کند [۱۹]، [۲۰]. به طور کلی تیرها و ستون های دچار خوردگی حفره ای عملکرد ضعیف تر و شکل پذیری کمتری را در مقایسه با تیرهای بدون خوردگی نشان می دهند [۲۱].

تاکنون مطالعات متنوعی بر روی تأثیر خوردگی حفره ای بر روی فولاد و اعضای فولادی انجام شده است. روش های المان محدود یکی از روش های مطلوب برای بررسی تأثیرات خوردگی حفره ای است [۲۲]. شناخت انواع سوراخ و ریخت شناسی خوردگی حفره ای، مهم ترین مسئله برای تحلیل این نوع خوردگی است [۲۳]. زبری سطوحی که در معرض خوردگی حفره ای قرار می گیرند، با توجه به شدت خوردگی دستخوش تغییر می شود [۲۴]، لذا مدلسازی دقیق سطوح در معرض خوردگی حفره ای به بررسی دقیق تر این مسئله کمک می کند ولی هزینه محاسباتی را تا حد قابل توجهی بالا می برد [۲۵].

هوانگ و همکاران^۹ [۱۵] با مدلسازی سوراخ ها به صورت مخروطی، نیم کره و استوانه ای به بررسی مقاومت فشاری تک محوره و دومحوره ورق ها تحت خوردگی حفره ای با جانمایی تصادفی پرداختند. جیانگ و سوارز^{۱۰} [۲۶] تأثیرات درجه خوردگی^{۱۱} را بر روی مقاومت

⁸ Pitting corrosion

⁹ Huang

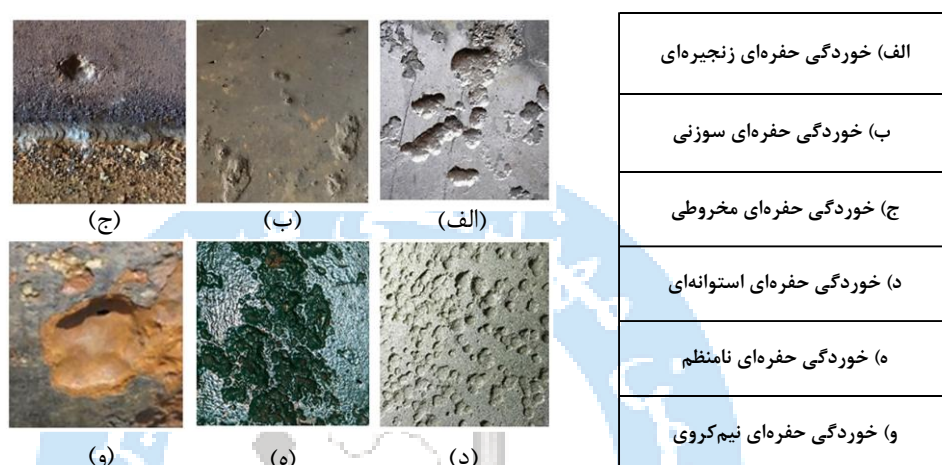
¹⁰ Jiang & Soares

¹¹ Degree of pitting

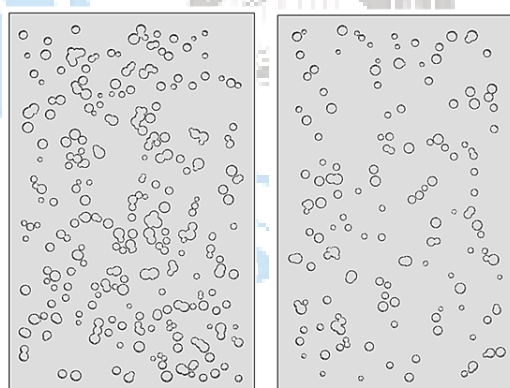
فشاری ورق‌های فولادی بررسی کردند. درجه خوردگی (DOP^{12}) که به عنوان معرف گستره خوردگی در یک عضو یا ورق شناخته می‌شود، در آیین‌نامه‌ها مطابق با رابطه ۳ تعریف می‌شود.

$$DOP = \frac{1}{ab} \sum_{i=1}^n A_{pi} \times 100\% \quad (3)$$

که در آن A_{pi} میزان مساحت درگیر خوردگی است، a بیانگر عرض ورق و b طول ورق است. برای مثال شکل ۳ دو درجه خوردگی ۱۰٪ و ۲۰٪ را در یک ورق فولادی نشان می‌دهد. مشاهدات فنگ^{۱۳} و همکاران [۲۷] نشان می‌دهد که افزایش درجه خوردگی و عمق آن باعث کاهش مقاومت فشاری ورق‌های فولادی می‌شود. آن‌ها دریافتند که خوردگی با توزیع تصادفی نسبت به خوردگی با توزیع منظم تأثیر بیشتری بر روی کاهش مقاومت فشاری ورق‌های فولادی می‌گذارد.



شکل ۲: حالات مختلف خوردگی حفره‌ای در فلزات [۱۷].



ب) درجه خوردگی ۲۰٪

الف) درجه خوردگی ۱۰٪

شکل ۳: درجات خوردگی مختلف در یک ورق فولادی.

وانگ^{۱۴} [۲۸] با بررسی اشکال مختلف سوراخ به این موضوع پی برد که شکل سوراخ تأثیر قابل توجهی بر تغییر شکل پلاستیک، مقاومت کششی و فشاری نهایی ورق‌های فولادی می‌گذارد؛ به طوری که سوراخ‌های استوانه‌ای نسبت به سوراخ‌های مخروطی ۲۰٪ مقاومت کمتری نشان می‌دهند. وانگ و لین^{۱۵} [۲۹] با مقایسه تأثیر عمق و شعاع سوراخ، به اثرگذاری بیشتر عمق در کاهش مقاومت تسلیم و نهایی

¹² Degree of pitting

¹³ Feng

¹⁴ Wang

¹⁵ Wang & Lin

یک ورق فولادی پی بردند. آن‌ها با در نظرگیری نسبت قطر به عمق سوراخ‌ها، اثر افزایش نسبت اتلاف حجمی بر روی مقاومت تسلیم و نهایی را بررسی کردند. لیان^{۱۶} و همکاران [۳۰]، با اعمال خوردگی حفره‌ای به کله پیچ، میزان کاهش پیش‌تنیدگی پیچ‌ها در اتصالات پیچی پرمقاومت را بررسی کردند؛ آن‌ها در نهایت یک رابطه برای محاسبه کاهش پیش‌تنیدگی بر حسب نسبت اتلاف وزنی ارائه دادند. معززی^{۱۷} با بررسی خوردگی حفره‌ای بر روی لوله‌های فولادی رابطه‌ای اصلاحی برای اندرکنش لنگر خمشی-نیروی محوری ارائه کرد [۳۱].

استاندارد ASTM G46 [۳۲] با ارائه جدول ۱ میزان گستره خوردگی حفره‌ای را در فلزات بیان می‌کند. این جدول نشانگر سطوح خوردگی حفره‌ای است که در آن‌ها در سه بخش تراکم، اندازه و عمق تقسیم‌بندی می‌کند.

جدول ۱: استاندارد درجه‌بندی حفره خوردگی

تراکم (num/m^2)	اندازه (mm^2)	عمق (mm)
۱	۰/۵	۰/۴
۲	۲	۰/۸
۳	۸	۱/۶
۴	۱۲/۵	۳/۲
۵	۲۴/۵	۶/۴

اکثر مطالعات در حوزه خوردگی حفره‌ای به تأثیر آن بر روی اعضا و ورق‌های فولادی پرداخته‌اند [۳۳]. مطالعات بسیار اندکی بر روی اثر خوردگی حفره‌ای بر روی اتصالات انجام شده است. از طرفی، این مطالعات معطوف به اتصالات اصطکاکی بوده‌اند و عملاً هیچ مطالعه پیشینی در خصوص اثر خوردگی حفره‌ای بر مقاومت اتصالات در حالت اتکایی مطرح نیست. از این رو، مطالعه حاضر به بررسی اثر خوردگی حفره‌ای بر روی اتصالات اتکایی و تأثیر آن بر روی حالت حدی خرابی شکافی و نحوه شکست متناظر در ورق اتصال می‌پردازد.

این مطالعه به بررسی اثر خوردگی حفره‌ای بر یک نمونه اتصال با تمایل به پارگی شکافی می‌پردازد. هدف از این پژوهش، مطالعه و بررسی تغییر رفتار اتصالات، حالات خرابی، مسیر ترک و ظرفیت باربری نهایی است. این کار به کمک ۳۶ مدل عددی با عمق، تراکم، مساحت و توزیع حفره‌های متفاوت صورت گرفته است.

۲- روش تحقیق

پژوهش حاضر با مدلسازی عددی یک نمونه اتصال اتکایی تحت خوردگی حفره‌ای در نرم‌افزار ABAQUS گزارشی جامع از عملکرد این نوع اتصالات در مواجهه با این پدیده می‌دهد. سه عامل عمق، تراکم و مساحت حفره‌ها با توزیع تصادفی برای دستیابی به این مهم انتخاب شدند. با توجه به اهمیت مطالعه اثر این سه عامل، چهار مقدار متفاوت برای عمق، سه مقدار برای تراکم، مساحت متغیر و سه توزیع تصادفی از هر میزان خوردگی که در مجموع ۳۶ مدل خورده شده را تشکیل می‌دهند، در نظر گرفته شد. در بخش‌های بعد به تفصیل به جزئیات مدلسازی اتصال و خوردگی حفره‌ای پرداخته می‌شود. جزئیات کامل مدل‌ها در جدول ۵ ارائه شده است.

۲-۱- جزئیات مدلسازی عددی

¹⁶ Lian

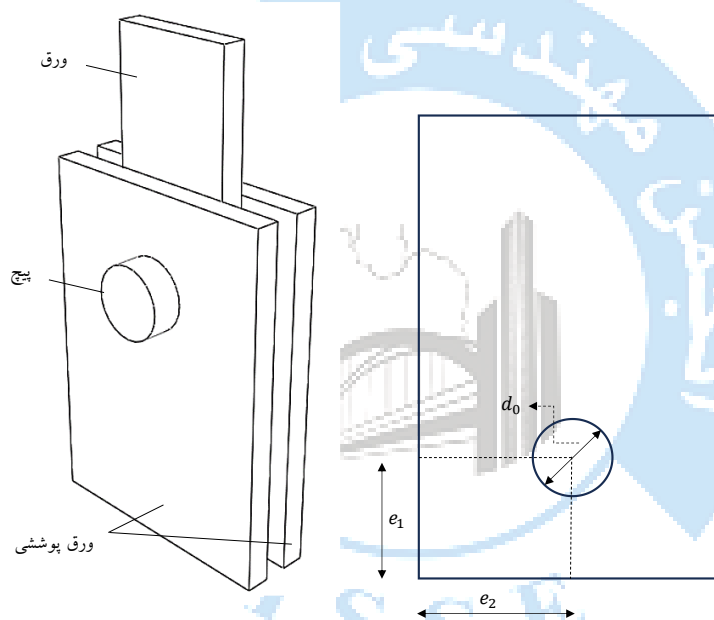
¹⁷ Moazezi

به منظور بررسی اثر خوردگی حفره‌ای بر روی اتصالات اتکایی، یک اتصال از نمونه‌های آزمایشگاهی وانگ و همکاران [۳] انتخاب شد. جدول ۲ جزئیات هندسی این نمونه را مشخص می‌کند. e_1 ، e_2 و d_0 در شکل ۴ نمایش داده شده است. شکل ۵ نیز جزئیات نمونه کامل را نشان می‌دهد.

در تمام نمونه‌ها از پیچ با قطر ۲۴ میلیمتر و رده ۱۲.۹ استفاده شده است. همچنین ورق‌ها از فولاد پرمقاومت با رده Q550 با مشخصات مطابق با جدول ۲ هستند. نحوه نامگذاری نمونه فاقد خوردگی و صحت‌سنجی شده به صورت SD- e_1/d_0 - e_2/d_0 -steel grade است. که SD مخفف لاتین پیچ تک، تحت دو صفحه برش^{۱۸} است. نحوه نام‌گذاری نمونه‌های دارای خوردگی در بخش مدلسازی نمونه‌های خورده شده توضیح داده می‌شود.

جدول ۲: جزئیات هندسی نمونه‌ها

نمونه	e_1/d_0	e_2/d_0	قطر سوراخ (mm)	ضخامت ورق (mm)	تنش تسلیم (MPa)	تنش نهایی (MPa)
SD-15-15-550	۱/۴۹	۱/۵	۲۶	۹/۹	۶۷۷	۷۵۷



شکل ۵: جزئیات هندسی نمونه کامل.

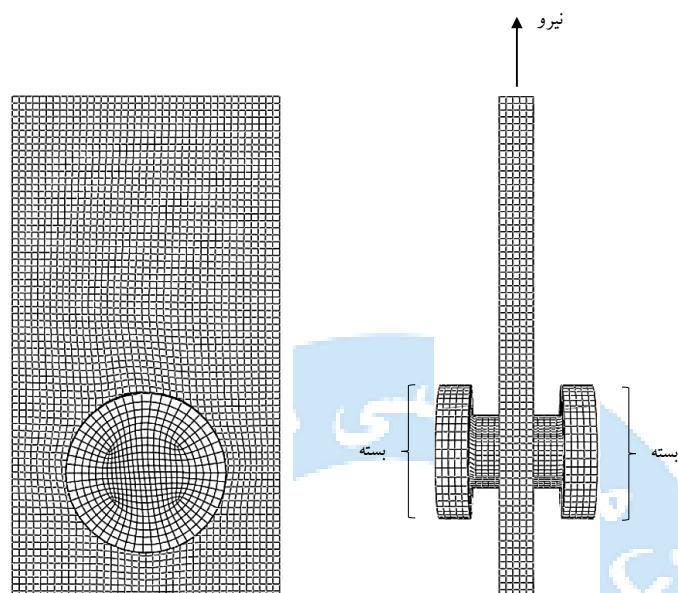
شکل ۴: تعاریف هندسی نمونه.

با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS [۳۴] به مدلسازی عددی نمونه‌های این پژوهش پرداخته شد. به علت عدم وجود پیش‌تنییدگی، از مدل ساده شده جهت تحلیل و آنالیز استفاده شد. در مدل ساده شده از مدلسازی ورق پوششی صرف‌نظر می‌شود. این نوع مدلسازی، درحالی‌که زمان تحلیل را تا حد قابل توجهی کاهش می‌دهد، نتایج قابل قبولی را برای اتصالات اتکایی ارائه می‌کند. صحت این روش توسط مژه [۵] و لیو [۲] کنترل شده است. المان‌ها پیچ و ورق، هر دو از نوع هشت‌گه‌ای آجری شکل، سه بعدی و دارای فرمول‌بندی کاهش یافته (C3D8R) هستند. اندازه مش 2×2 میلیمتر، برای ورق و پیچ، با توجه به مطالعه حساسیت مش، انتخاب شد. مطابق با شکل ۶ برای اعمال اثر ورق‌های پوششی، دو سر پیچ از هرگونه جابجایی انتقالی مقید شدند. نیرو به انتهای ورق اصلی به صورت جابجایی-کنترل اعمال شد. به علت در نظرگیری آسیب برای مواد و امکان پیشروی بهتر مدل‌ها تا حد حذف المان در نمونه‌های آسیب‌دیده، از تحلیل دینامیکی صریح^{۱۹} در ABAQUS استفاده شد.

¹⁸ Single bolt in double shear

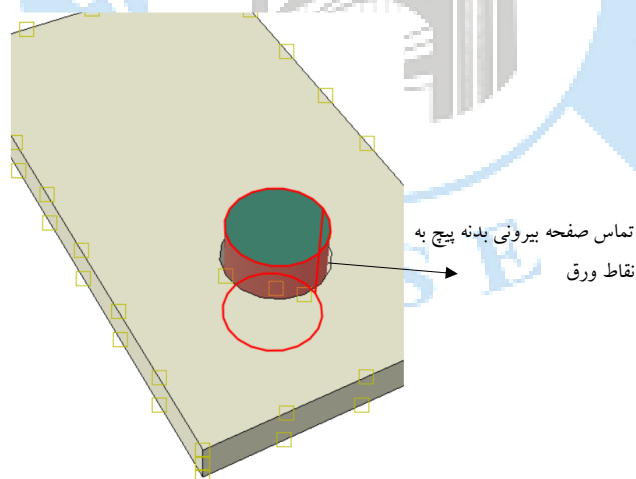
¹⁹ Explicit

ابتدا برای تعریف خصوصیات تماس، از تماس سطح به سطح استفاده شد؛ اما بعد از تعریف خصوصیات شکست مصالح و تحلیل نمونه‌ها، پیچ پس از حذف المان‌های جداره سوراخ ورق، دچار فرورفتگی در المان‌های پشتی سوراخ ورق شد. پس برای رفع مشکل از تماس نقطه به سطح^{۲۰} استفاده شد (شکل ۷). به این صورت که سطح بدنه پیچ به عنوان صفحه اصلی و نقاط ورق به عنوان نقاط ثانویه تماس انتخاب شد.



الف) شرایط مرزی نمونه ب) اندازه مش‌های نمونه

شکل ۶: جزئیات مدل‌سازی عددی.



شکل ۷: جزئیات تماس نمونه.

۲-۲- مدل‌سازی مواد، تعریف شکست و خرابی

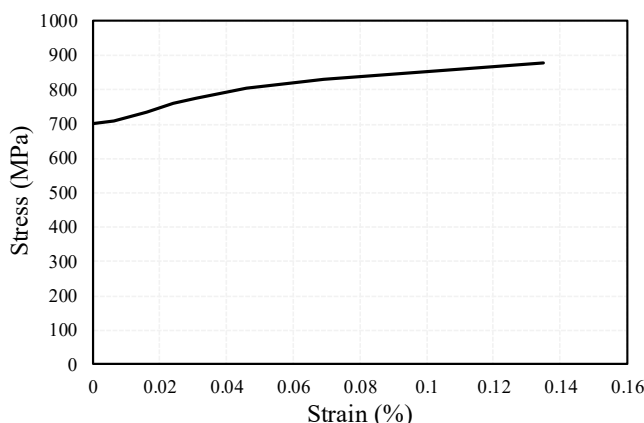
از مدل مصالح الاستوپلاستیک برای پیچ استفاده شد. برای تعریف مشخصات مصالح ورق، مدل نمونه کوپان با توجه به آیین‌نامه GB/T 228-2002 [۳۵] مدل‌سازی شد و نتایج آن با نمونه کوپان آزمایشگاهی مقایسه شد. برای شبیه‌سازی دقیق رفتار مکانیکی فولاد تحت

²⁰ Node to Surface

کرنش بزرگ، منحنی‌های تنش-کرنش واقعی با در نظر گرفتن تغییر سطح مقطع در نظر گرفته شدند. از این رو از رابطه ۴ برای محاسبه رفتار واقعی فولاد، قبل از گلوپی‌شدگی استفاده شد.

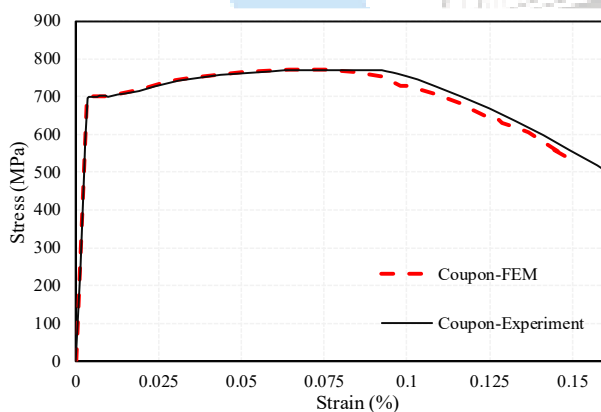
$$\varepsilon_i = \ln(1 + \varepsilon), \sigma_i = \sigma \times (1 + \varepsilon) \quad (۴)$$

که در آن ε_i و σ_i به ترتیب بیانگر کرنش و تنش حقیقی، ε و σ نیز بیانگر تنش و کرنش مهندسی هستند.

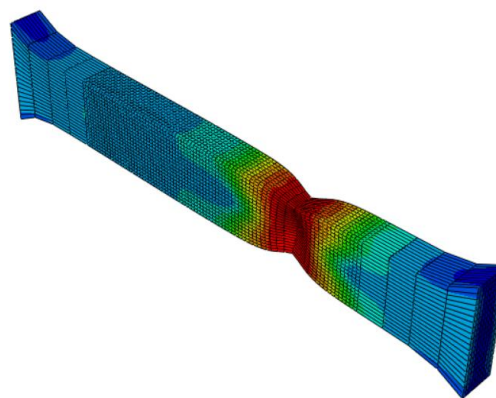


شکل ۸: مشخصات مصالح فولاد پرمقاومت در ABAQUS.

نقاط نمودار پس از گلوپی‌شدگی نیز با برون‌یابی نقاط بین مرحله تسلیم و گلوپی‌شدگی بدست آمد. شکل ۸ جزئیات مصالح اعمال شده در ABAQUS را نمایش می‌دهد. پس از مدلسازی کوپان در ABAQUS، نتایج نمودار نیرو-تغییر مکان آن با نمودار بدست آمده از آزمایش وانگ [۳] مقایسه شد. شکل ۹ نشان می‌دهد که این نتایج، با تقریب خوبی نزدیک به نتایج آزمایشگاهی هستند. این مدل مصالح، رفتار فولاد پرمقاومت Q550 را پس از گلوپی‌شدگی به خوبی ارزیابی می‌کند. مطابق با این نمودار ظرفیت باربری دو نمونه با هم منطبق و پس از بار بیشینه نیز خطا کمتر از ۲ درصد است.



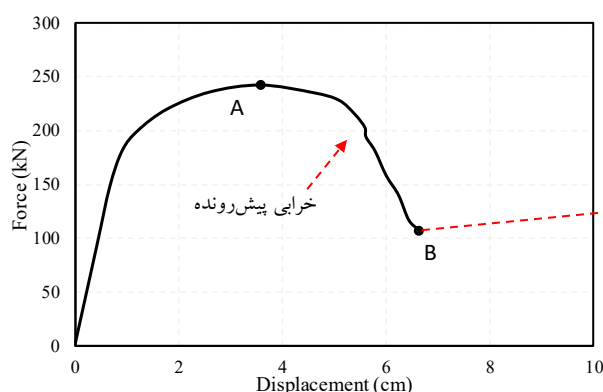
ب) نتایج صحت‌سنجی کوپان



الف) مدل عددی کوپان

شکل ۹: نتایج مدل عددی کوپان.

شکل ۱۰ نمودار نیرو-تغییر مکان آزمایشگاهی یک اتصال فولادی را نشان می‌دهد. وقتی نمودار به نقطه B می‌رسد، دیگر هیچ‌گونه نیرویی رو را تحمل نمی‌کند و نمونه دچار شکست کامل و گسیختگی می‌شود که این موضوع در قسمت (الف) شکل ۱۰ نشان داده شده است. آن قسمت از نمودار که ما بین نقاط A و B قرار دارد، اتلاف پیش‌رونده ظرفیت باربری تا نقطه خرابی کامل را نشان می‌دهد. از این رو شناسایی رفتار موارد قبل از گسیختگی حائز اهمیت است. نقطه A در نمودار بالا، ظرفیت باربری نهایی را نشان می‌دهد. برای بدست آوردن این ظرفیت در مدل‌های عددی، شبیه‌سازی دقیق رفتار خرابی و شکست پیش‌رونده مواد، ضروری است.



ب) نمودار نیرو-تغییر مکان

الف) حالت خرابی

شکل ۱۰: خرابی پیش‌رونده در نمودار نیرو-تغییر مکان.

برای شبیه‌سازی شکست اتصال این پژوهش از قابلیت آسیب شکل‌پذیر^{۲۱} در نرم‌افزار ABAQUS استفاده شد. معیار آسیب شکل‌پذیر مدلی برای پیش بینی آسیب مربوط به پدیدارشدن ریزحفره‌ها، رشد و به هم پیوستن آن‌ها در فلزات شکل‌پذیر است. در این مدل فرض می‌شود کرنش پلاستیک معادل در مدل آسیب، تابعی از نسبت تنش سه محوره و نرخ کرنش است. شکل ۱۱ خرابی پیش‌رونده مواد را بر اساس تئوری آسیب شکل‌پذیر در ABAQUS نشان می‌دهد. موادی که برای آن‌ها آسیب تعریف نشده باشد، مسیر a-b-c-d' را دنبال می‌کنند که با استفاده از نمونه کوپان بدست می‌آید و مسیر a-b-c-d بیانگر رفتار مواد آسیب‌دیده است. در این نمودار رفتار الاستیک ماده به صورت خطی و با شیب مدول الاستیسیته (E) در نظر گرفته شده است. هنگامی که تنش به مقدار بیشینه خود می‌رسد، کرنش پلاستیک معادل با کرنش شکست ابتدایی $\bar{\epsilon}_0^{pl}$ برابر است [۳۶].

ABAQUS با ارائه مدل خرابی و شکست پیش‌رونده برای مواد، سازو کار شکست که پیش از این توضیح داده شده را در خود جای داده است. با توجه به توضیحات ارائه شده، شکست زمانی آغاز می‌شود که رابطه ۵ برقرار شود.

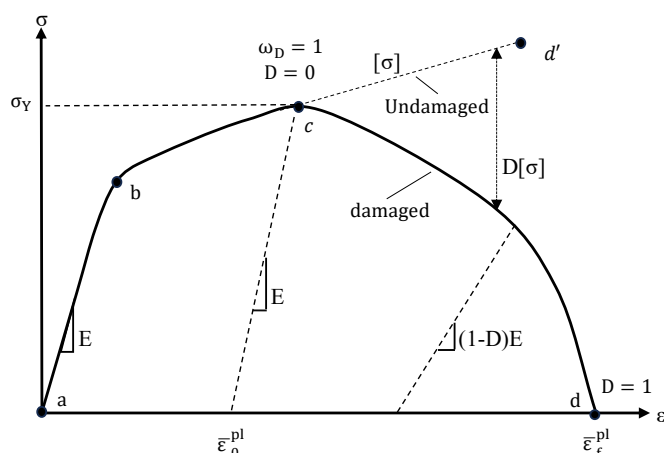
$$\omega_D = \int \frac{d\bar{\epsilon}^{pl}}{\bar{\epsilon}_0^{pl}} = 1 \quad (5)$$

که در آن ω_D یک متغیر حالت است که با تغییر شکل پلاستیک به صورت یکنواخت افزایش می‌یابد. معادله ۵ نشان می‌دهد که تاریخچه تغییر شکل پلاستیک در تعیین آغاز شکست مورد توجه قرار می‌گیرد. شکل ۱۱ نمودار تنش-کرنش با نقطه آغاز شکست $\omega_D = 1$ را نشان می‌دهد. با شروع آسیب، مدول الاستیسیته کاهش می‌یابد تا زمانی که کرنش پلاستیک معادل به حد شکست خود در $\bar{\epsilon}_f^{pl}$ برسد. پیشرفت آسیب توسط متغیر D نظارت می‌شود، که با شروع شکست فعال می‌شود ($D = 0$) و در شکست کامل به ۱ می‌رسد. اشکال مختلف تکامل آسیب در ABAQUS موجود است. برای کاهش وابستگی پاسخ آسیب در برابر تغییرات مش، رابطه ۶ برای محاسبه تغییر مکان پلاستیک معادل ارائه شده است [۳۶].

$$\bar{u}^{pl} = L_e \bar{\epsilon}^{pl} \quad (6)$$

که در آن L_e طول مشخصه المان است که به‌عنوان جذر مساحت نقطه انتگرال‌گیری برای المان‌های دوبعدی و ریشه مکعبی حجم نقطه انتگرال‌گیری برای المان‌های سه‌بعدی تعریف می‌شود. هنگامی که \bar{u}^{pl} به \bar{u}_f^{pl} در زمان شکست کامل برسد، المان‌هایی که نشان‌دهنده نقاط آسیب دیده اند، حذف می‌شوند. برای اعمال آسیب شکل‌پذیر در ABAQUS به سه پارامتر C_1 و C_2 و \bar{u}_f^{pl} نیاز است [۳۶]. با توجه به موارد اشاره شده، پارامترهای آسیب شکل‌پذیر برای فلز Q550 محاسبه و با سعی و خطا واسنجی شد. نتایج محاسبات در جدول ۳ نمایش داده شده است.

²¹ Ductile Damage



شکل ۱۱: نمودار آسیب مواد در ABAQUS [۳۴].

جدول ۳: جزئیات آسیب نرم نمونه‌ها

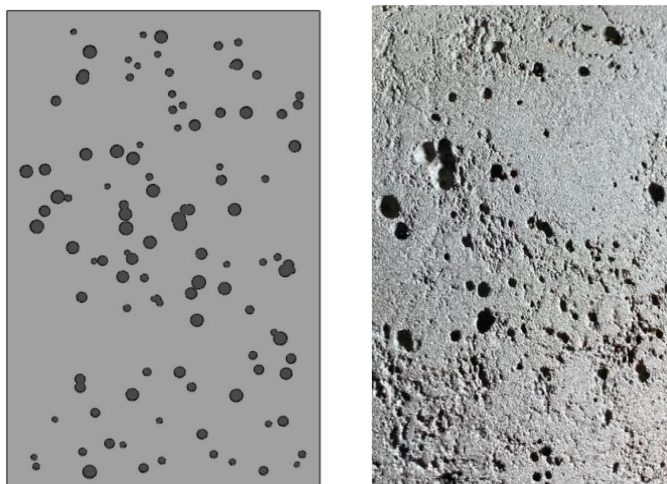
$\bar{\epsilon}_f^{pl}$	C_2	C_1	$\bar{\epsilon}_0^{pl}$	رده فولاد
۰/۱۴۶	۲/۶۸۸	۰/۵۴	۰/۰۷۱۵	Q550

۲-۳- مدلسازی نمونه‌های خورده شده

خوردگی حفره‌ای یکی از انواع خوردگی‌های موضعی است که به شکل حفره‌های کوچک و با عمق متفاوت روی سطح فلزات رخ می‌دهد. برای مدلسازی حفره‌ها در نرم‌افزار ABAQUS می‌توان از روش‌های مختلفی استفاده کرد. در مرحله پیش‌پردازش در نرم‌افزار، می‌توان به صورت دستی حفره‌ها را به عنوان بخش‌های جداگانه روی سطح قطعه مدل‌سازی کرد. این حفره‌ها می‌توانند به صورت نقاط یا سوراخ‌های کوچک بر روی سطح قطعه تعریف شوند. برای افزایش دقت در محل حفره‌ها، باید مش‌بندی مناسبی انجام شود. در نواحی نزدیک به هر خوردگی، مش‌ها باید ریزتر باشند تا نتایج دقیق‌تری در تحلیل به دست آید. برای مدلسازی خوردگی باید ماده‌ای با رفتار پلاستیک و شکست مناسب تعریف شود. همچنین، می‌توان از مدل‌های آسیب و شکست مانند آسیب شکل‌پذیر استفاده کرد تا رفتار شکست موضعی فلز در اثر وجود حفره‌ها را شبیه‌سازی کند. با توجه به بررسی نمونه‌های تحت خوردگی حفره‌ای از سوراخ‌های استوانه‌ای برای مدلسازی استفاده شد. این کار به کمک یک اسکریپت پایتون^{۲۲} انجام شد. این اسکریپت، با تولید سوراخ‌هایی با جانمایی و شعاع تصادفی و همچنین عمق ثابت در یک ورق مستطیلی، خوردگی حفره‌ای را شبیه‌سازی می‌کند. این اسکریپت، مش‌بندی هشت‌گه‌ای را ممکن می‌سازد؛ در نتیجه تحلیل‌های سریع و در عین حال دقیق را ممکن می‌سازد. نحوه کارکرد این اسکریپت در شکل ۱۲ نمایش داده شده است.

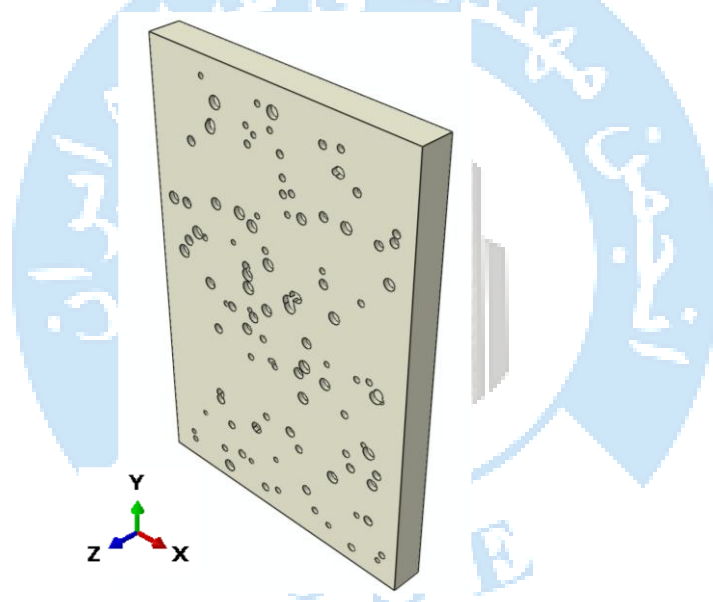
شکل ۱۳ نمای سه‌بعدی این مدلسازی را نشان می‌دهد. برای مش‌زنی نمونه‌های خورده شده از مش‌های هشت وجهی به صورت Sweep استفاده شد. این روش نسبت به مش‌های شش وجهی دقت بالاتر و سرعت تحلیل بیشتری نسبت به مش‌های ده وجهی دارد. اندازه مش‌ها بین ۱ میلی‌متر تا ۲/۵ میلی‌متر متغیر در نظر گرفته شد. از آنجایی که در تحلیل دینامیکی با حلگر صریح، کوچکترین سائز المان کنترل‌کننده اندازه گام‌های زمانی تحلیل است باید کنترل شود تا المان‌ها از حدی کوچک‌تر نشوند؛ به همین علت اندازه کمینه ۱ میلی‌متر برای اندازه مش انتخاب شد.

22 Python Script



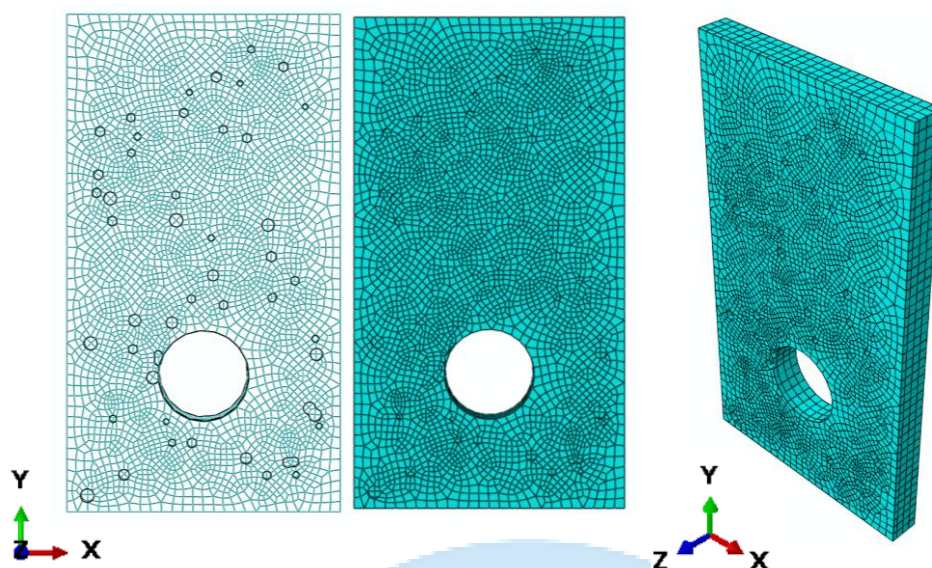
الف) خوردگی حفره‌ای نمونه واقعی ب) خوردگی حفره‌ای نمونه المان محدود

شکل ۱۲: نحوه مدلسازی خوردگی حفره‌ای در ABAQUS.



شکل ۱۳: نمای سه‌بعدی نمونه خورده شده.

شکل ۱۴ نحوه مش‌بندی نمونه را نشان می‌دهد. با توجه به استاندارد ASTM G46 [۳۲] سه عامل تراکم، مساحت سوراخ‌ها و عمق آن‌ها شکل خوردگی را مشخص می‌کند. بررسی این سه عامل این امکان را می‌دهد که اثر عمق در برابر اثر سطح بررسی شود و حالت بحرانی خوردگی تعیین گردد. برای اعمال این سه عامل، بازه‌های مشخصی از این استاندارد مشخص شد تا به خوبی کرانه پایین و بالای میزان خوردگی در اتصال موجود در این پژوهش را در خود ملحوظ دارد.



شکل ۱۴: نحوه مش بندی نمونه خورده شده.

یک نمونه اصلی و ۳۶ نمونه خورده شده ساخته شد. برای در نظرگیری فاکتور اندازه، شعاع‌ها به صورت تصادفی از بازه ۰/۸ تا ۲ میلیمتر مدلسازی شد تا کل بازه ۲ میلیمتر مربع تا ۱۲/۵ میلیمتر مربع را پوشش دهد. عامل تراکم به تعداد سوراخ تبدیل شد و عمق تراکم نیز با توجه به جدول ۴ در چهار اندازه مشخص مدلسازی شد. برای سادگی در نامگذاری، عامل تراکم A و عامل عمق نیز C نامگذاری شد. پس از مدلسازی نمونه‌ها، با استفاده از اسکریپت پایتون موجود، درصد اتلاف حجمی (DOV^{۲۳}) که با درصد اتلاف جرمی نیز برابر است، ثبت شد. درصد اتلاف حجمی با استفاده از رابطه ۷ محاسبه می‌شود:

$$DOV = \frac{V_0 - V}{V_0} \quad (7)$$

که V_0 حجم اولیه ورق و V حجم حفره‌های موجود در مدل است.

جدول ۴: جزئیات خوردگی در نمونه‌های موجود

A- تراکم (num/m ²)	B- اندازه (mm ²)	C- عمق (mm)	
۵×۱۰ ^۳	۲	۰/۸	۱
۱×۱۰ ^۴	۸	۱/۶	۲
۲×۱۰ ^۴	۱۲/۵	۳/۲	۳
-	-	۶/۴	۴

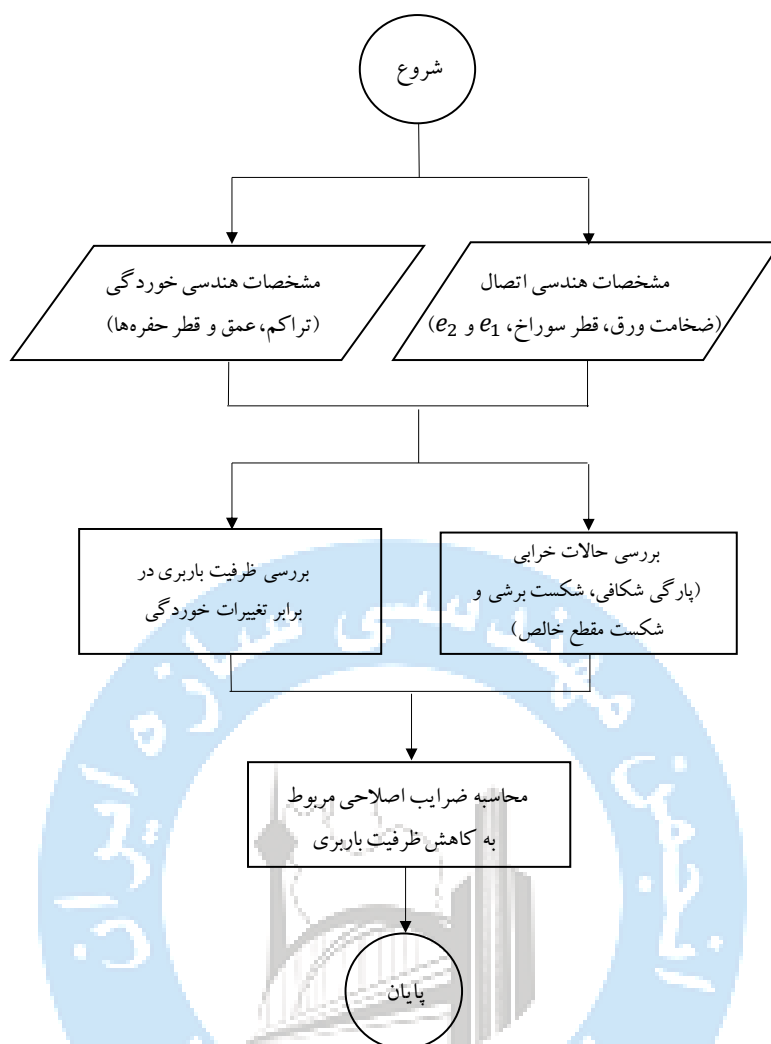
لازم به ذکر است که کاهش حجم سوراخ پیچ در حجم اولیه لحاظ شده است. از مدل‌های ساخته شده ۱۲ نمونه با مشخصات خوردگی متفاوت تشکیل شدند که از هر ۱۲ نمونه، ۳ نمونه با جانمایی سوراخ‌های تصادفی ساخته شد تا تأثیر محل سوراخ‌ها بررسی شود. جدول ۵ مشخصات ۳۶ نمونه خورده شده را نشان می‌دهد. حرف S در اول نمونه‌ها مخفف Splitting failure به معنی پارگی شکافی است که نشان دهنده‌ی تمایل نمونه فاقد خوردگی به حالت خرابی پارگی شکافی است. برای هر مدل DOP و DOV در جدول ۵ یادداشت شده است. Ai در این جدول به معنی تراکم سطح i و Cj در این جدول به معنی عمق سطح j است.

²³ Degree of volume loss

جدول ۵: جزئیات مشخصات نمونه‌های دارای خوردگی

نام مدل	عمق سوراخ (mm)	شعاع سوراخ (mm)	تراکم (num/m ²)	نسبت اتلاف حجمی (DOV %)	درجه خوردگی (DOP %)
S-A1C1-Rand1	۰/۸	۰/۸-۲	۵×۱۰ ^۲	۰/۴۰۲	۳/۲۳۹
S-A1C1-Rand2	۰/۸	۰/۸-۲	۵×۱۰ ^۲	۰/۲۹۱	۳/۴۴۲
S-A1C1-Rand3	۰/۸	۰/۸-۲	۵×۱۰ ^۲	۰/۲۷۴	۳/۳۱۲
S-A1C2-Rand1	۱/۶	۰/۸-۲	۵×۱۰ ^۲	۰/۵۳۳	۳/۵۰۱
S-A1C2-Rand2	۱/۶	۰/۸-۲	۵×۱۰ ^۲	۰/۵۱۱	۳/۴۳۱
S-A1C2-Rand3	۱/۶	۰/۸-۲	۵×۱۰ ^۲	۰/۵۲۸	۳/۳۱۲
S-A1C3-Rand1	۳/۲	۰/۸-۲	۵×۱۰ ^۲	۱/۰۰۸	۳/۲۷۷
S-A1C3-Rand2	۳/۲	۰/۸-۲	۵×۱۰ ^۲	۱/۰۸۱	۳/۱۰۸
S-A1C3-Rand3	۳/۲	۰/۸-۲	۵×۱۰ ^۲	۰/۹۵۸	۳/۳۵۵
S-A1C4-Rand1	۶/۴	۰/۸-۲	۵×۱۰ ^۲	۲/۰۹۷	۲/۹۱۹
S-A1C4-Rand2	۶/۴	۰/۸-۲	۵×۱۰ ^۲	۲/۱۳۸	۳/۰۹۴
S-A1C4-Rand3	۶/۴	۰/۸-۲	۵×۱۰ ^۲	۲/۲۵۳	۳/۷۶۷
S-A2C1-Rand1	۰/۸	۰/۸-۲	۱×۱۰ ^۴	۰/۵۷۵	۶/۶۰۲
S-A2C1-Rand2	۰/۸	۰/۸-۲	۱×۱۰ ^۴	۰/۵۵۳	۶/۵۲۹
S-A2C1-Rand3	۰/۸	۰/۸-۲	۱×۱۰ ^۴	۰/۵۵۲	۶/۵۹۶
S-A2C2-Rand1	۱/۶	۰/۸-۲	۱×۱۰ ^۴	۱/۱۲۱	۶/۶۴۴
S-A2C2-Rand2	۱/۶	۰/۸-۲	۱×۱۰ ^۴	۱/۰۵۸	۶/۶۹۸
S-A2C2-Rand3	۱/۶	۰/۸-۲	۱×۱۰ ^۴	۱/۱۰۳	۶/۷۵۲
S-A2C3-Rand1	۳/۲	۰/۸-۲	۱×۱۰ ^۴	۲/۳۴۰	۶/۵۵۵
S-A2C3-Rand2	۳/۲	۰/۸-۲	۱×۱۰ ^۴	۲/۱۸۰	۶/۵۹۸
S-A2C3-Rand3	۳/۲	۰/۸-۲	۱×۱۰ ^۴	۲/۱۰۹	۶/۰۶۸
S-A2C4-Rand1	۶/۴	۰/۸-۲	۱×۱۰ ^۴	۴/۰۵۰	۶/۵۳۸
S-A2C4-Rand2	۶/۴	۰/۸-۲	۱×۱۰ ^۴	۳/۹۸۵	۶/۸۸۰
S-A2C4-Rand3	۶/۴	۰/۸-۲	۱×۱۰ ^۴	۴/۴۶۹	۶/۳۸۴
S-A3C1-Rand1	۰/۸	۰/۸-۲	۲×۱۰ ^۴	۱/۱۱۳	۱۳/۳۴۵
S-A3C1-Rand2	۰/۸	۰/۸-۲	۲×۱۰ ^۴	۱/۱۱۶	۱۳/۲۶۷
S-A3C1-Rand3	۰/۸	۰/۸-۲	۲×۱۰ ^۴	۱/۱۰۲	۱۳/۴۱
S-A3C2-Rand1	۱/۶	۰/۸-۲	۲×۱۰ ^۴	۲/۱۷۵	۱۳/۰۸۸
S-A3C2-Rand2	۱/۶	۰/۸-۲	۲×۱۰ ^۴	۲/۰۳۳	۱۳/۱۲
S-A3C2-Rand3	۱/۶	۰/۸-۲	۲×۱۰ ^۴	۲/۰۷۷	۱۳/۲۰۷
S-A3C3-Rand1	۳/۲	۰/۸-۲	۲×۱۰ ^۴	۴/۱۳۲	۱۳/۲۵۵
S-A3C3-Rand2	۳/۲	۰/۸-۲	۲×۱۰ ^۴	۴/۴۰۵	۱۳/۲۸۵
S-A3C3-Rand3	۳/۲	۰/۸-۲	۲×۱۰ ^۴	۴/۰۹۷	۱۳/۲۴۹
S-A3C4-Rand1	۶/۴	۰/۸-۲	۲×۱۰ ^۴	۸/۶۰۵	۱۳/۹۸۰
S-A3C4-Rand2	۶/۴	۰/۸-۲	۲×۱۰ ^۴	۸/۴۰۸	۱۳/۲۲۹
S-A3C4-Rand3	۶/۴	۰/۸-۲	۲×۱۰ ^۴	۸/۴۵۷	۱۳/۴۷۱

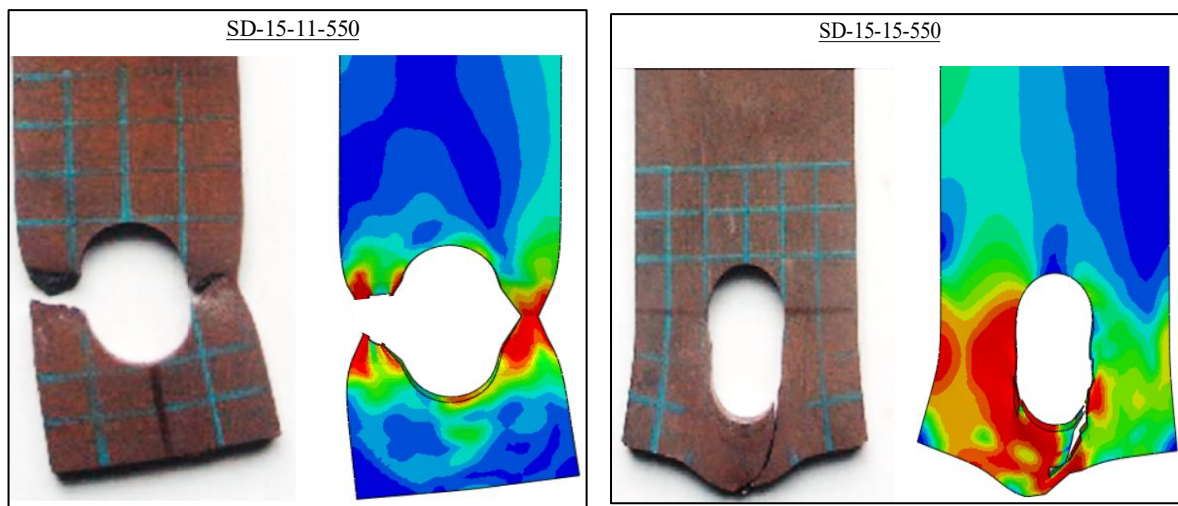
شکل ۱۵ روندنمای پژوهش حاضر را نشان می‌دهد. مطابق با این شکل، مراحل مدلسازی تا ارائه روابط اصلاحی مربوط به کاهش ظرفیت باربری نهایی در برابر خوردگی صورت خواهد گرفت.



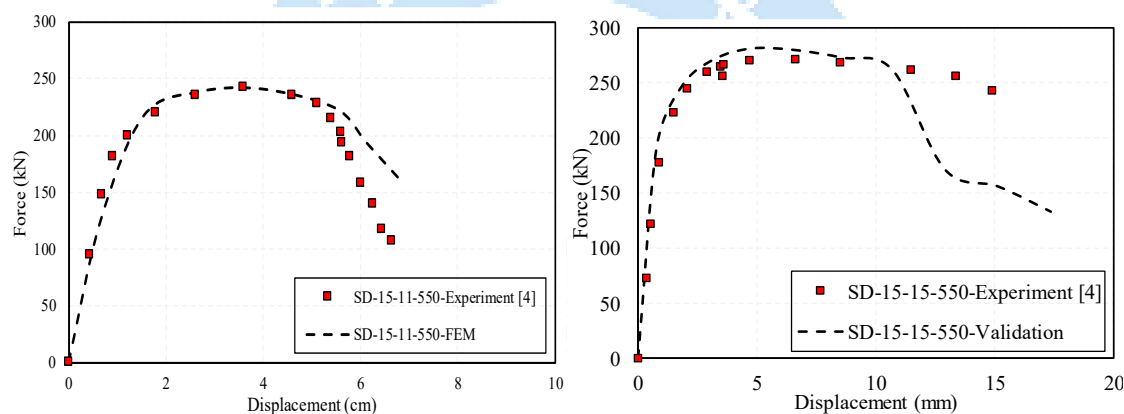
شکل ۱۵: روندنمای پژوهش حاضر.

۲-۴- صحت‌سنجی

برای بررسی صحت مدل‌سازی، از دو نمونه موجود در آزمایش‌های وانگ و همکاران [۳] استفاده شد. جهت ارزیابی صحت نتایج، حالت خرابی، نمودار نیرو-جابجایی و ظرفیت باربری نهایی نمونه‌های آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. به همین منظور دو نمونه با حالت خرابی پارگی شکافی و شکست مقطع خالص انتخاب شد. در شکل ۱۶ مقایسه حالت خرابی پارگی شکافی در نمونه‌های آزمایشگاهی و المان محدود نمایش داده شده است. این شکل به خوبی دقت نتایج را به تصویر می‌کشد. ازدیاد طول سوراخ و نقطه شروع شکست در نمونه آزمایشگاهی و المان محدود با دقت مناسبی با هم مطابقت دارند. در پارگی شکافی، دوران شکست مقطع خالص رخ می‌دهد. زاویه کنار ورق، این موضوع را تایید می‌کند. پارگی شکافی حالتی مابین شکست برشی و شکست مقطع خالص است. در این نوع شکست به علت اینکه فاصله سوراخ از انتهای ورق و کنار آن طوری است که ورق تمایل به شکست تلفیقی دارد. از این رو به جای شکست مقطع خالص که از کنار ورق رخ می‌دهد، خط شکست در آن بیشینه برش اتفاق می‌افتد، با دوران نسبت به حالت اولیه در انتهای ورق اتفاق می‌افتد. شکل ۱۷ نیز شکست مقطع خالص را نشان می‌دهد. مقطع خالص (net cross section) به مساحتی از مقطع اشاره دارد که بعد از حذف نواحی ضعیف شده یا سوراخ‌های موجود (مانند سوراخ پیچ‌ها یا برش‌های موجود در سازه) باقی می‌ماند. شکست مقطع خالص زمانی رخ می‌دهد که تنش‌های وارده به این مقطع خالص بیش از ظرفیت آن باشد و در نتیجه عضو سازه‌ای دچار شکست یا ترک خوردگی شود.



شکل ۱۶: حالت خرابی در نمونه‌ای با پارگی شکافی (الف) نمونه المان محدود (ب) نمونه آزمایشگاهی [۳]
 شکل ۱۷: حالت خرابی در نمونه‌ای با شکست مقطع خالص (الف) نمونه المان محدود (ب) نمونه آزمایشگاهی [۳]



شکل ۱۸: نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌ی پارگی شکافی
 شکل ۱۹: نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌ی شکست مقطع خالص

شکل‌های ۱۸ و ۱۹ نمودارهای نیرو-جابجایی دو نمونه صحت‌سنجی شده را نشان می‌دهد. به علت شبیه‌سازی به کمک آسیب شکل‌پذیر، شاخه افتان مطابقت خوبی با نمونه آزمایشگاهی دارد. این نوع مدل‌سازی کمک می‌کند تا ظرفیت باربری اتصال با دقت مناسبی بدست آید. مقایسه مقدار اندازه‌گیری شده‌ی ظرفیت باربری نهایی و مقدار پیش‌بینی شده‌ی آن توسط تحلیل المان محدود در جدول ۶ نشان داده است. با توجه به مدل‌سازی دقیق متریال و پیش‌بینی مناسب شاخه افتان، مقادیر ظرفیت باربری نهایی در نمونه آزمایشگاهی و نمونه المان محدود، بسیار به هم نزدیک‌اند و خطا نهایتاً به ۰.۴٪ محدود می‌شود؛ از این‌رو مقادیر بدست آمده از ABAQUS برای ظرفیت باربری نهایی قابل اعتمادند. با توجه به موارد بررسی شده و صحت نتایج بدست آمده، مدل‌های ساخته شده قابل اعتمادند و برای پژوهش پیش رو و مطالعه پارامتری می‌توان از آن‌ها استفاده کرد.

جدول ۶: مقایسه ظرفیت باربری نمونه‌های آزمایشگاهی و المان محدود

نمونه پارگی شکافی	نمونه شکست مقطع خالص	
۲۷۱/۰۲۳	۲۴۲/۱۲۱	ظرفیت باربری نمونه آزمایشگاهی (kN)
۲۸۱/۲۵۲	۲۴۰/۶۱۲	ظرفیت باربری نمونه المان محدود (kN)

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی حالات خرابی و گسیختگی

همانطور که ذکر شد پارگی شکافی که حالتی است مابین شکست مقطع خالص و شکست برشی، با تغییر زاویه شکست نسبت به حالت شکست مقطع خالص در انتهای ورق دچار پارگی می‌شود. پس از اعمال خوردگی به نمونه‌ها، تغییرات حالت خرابی آن‌ها بررسی شد. با توجه به اینکه میزان خوردگی، تراکم سطحی و عمق حفره‌ها تغییر می‌کرد، اثر هر یک جداگانه بررسی شد.

ابتدا اثر توزیع حفره‌ها بررسی شد. شکل‌های ۲۰ و ۲۱ فرآیند شکست نمونه‌های S-AIC3 را دو توزیع متفاوت و مشخصات یکسان نشان می‌دهد. این نمونه‌ها دارای ۵۲ سوراخ با عمق ۰/۸ میلی‌متر و شعاع ۰/۸ میلی‌متر هستند. نتایج نشان می‌دهد که توزیع تصادفی سوراخ‌ها می‌تواند حالت شکست را عوض کند. سوراخ‌هایی که در نواحی برشی بحرانی قرار می‌گیرند، مسیر شروع ترک و پارگی را تعیین می‌کنند.

اگر سوراخ‌ها در مسیر اولیه تنش برشی حداکثر نمونه فاقد خوردگی قرار گیرند، باعث تسریع شکست می‌شوند، توزیع سوراخ‌ها ممکن است به گونه‌ای باشد که شکست برشی به جای پارگی شکافی اتفاق بیفتد و یا مانند حالت (ج) شکل ۲۲ با تجمع سوراخ‌های عمیق در عرض ورق باعث تمایل به شکست در مقطع عرضی شوند.

سوراخ‌هایی که خارج از نواحی تنش برشی بحرانی قرار می‌گیرند با تغییر مسیر رشد ترک باعث طولانی‌تر شدن خط شکست و در بعضی از موارد سبب ازدیاد طول سوراخ و شکل‌پذیری بیشتر نمونه‌ها می‌شوند. نتایج نشان می‌دهد که در اغلب موارد تغییر مد خرابی و حالت شکست، تأثیر قابل توجهی بر روی ظرفیت باربری نمونه‌ها نمی‌گذارد.

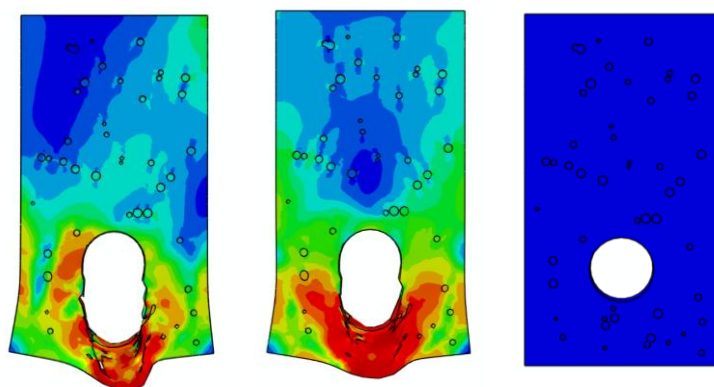
شکل ۲۲ سه حالت شکست متفاوت در نمونه‌های سری S را نشان می‌دهد. حالت (الف) پارگی شکافی با شکاف عریض را نشان می‌دهد که ناشی از اثرات خوردگی حفره‌ای عمیق است. در حالت (ب) به علت توزیع نسبتاً متقارن حفره‌ها در اطراف سوراخ پیچ، شکست برشی اتفاق افتاده است. این نوع شکست در نمونه‌های سری S باعث شکل‌پذیری بیشتر نمونه و ازدیاد طول سوراخ می‌شود. حالت (ج) گسیختگی ترکیبی شکست مقطع خالص و پارگی شکافی را نمایش می‌دهد. این حالت به علت تجمع سوراخ‌های عمیق در مقطع عرضی نمونه اتفاق افتاده است که باعث شکست ترکیبی شده است. شکل‌پذیری در این حالت افزایش یافت ولی ظرفیت باربری نهایی تقریباً مشابه به حالت دیگر خرابی با مشخصات خوردگی یکسان بود.

تراکم خوردگی و عامل DOP بر روی حالت شکست تأثیر می‌گذارد. در تراکم‌های خوردگی پایین و وقتی DOP زیر ۱۰ درصد است، حالات خرابی شکل‌های متنوع‌تری نسبت به هم می‌گیرند؛ اما با افزایش DOP عمدتاً پارگی شکافی اتفاق می‌افتد. این موضوع به این دلیل است که تمایل این دسته از نمونه‌ها به پارگی شکافی است و با افزایش حفره‌ها خط شکست سریع‌ترین و راحت‌ترین مسیر را برای پارگی و ترک انتخاب می‌کند که از بین سوراخ‌ها می‌گذرد؛ اما در DOP‌های پایین به علت اندک بودن تعداد سوراخ در مسیر شکست، خط شکست مجبور است مسیره‌های طولانی‌تری را طی کند.

عمق سوراخ نیز اثر قابل توجهی بر روی حالت خرابی دارد. سوراخ‌های عمیق، بیشتر خط شکست را تحت تأثیر قرار می‌دهند. این نوع سوراخ‌ها با کاهش مساحت مقطع شکست، ظرفیت باربری نهایی و شکل‌پذیری اتصال را به طور چشم‌گیری کاهش می‌دهند. در نمونه‌های سری S هرچه سوراخ‌ها عمیق‌تر می‌شود، ازدیاد طول سوراخ کمتر می‌شود و شکست زودتر از حالت فاقد خوردگی رخ می‌دهد.

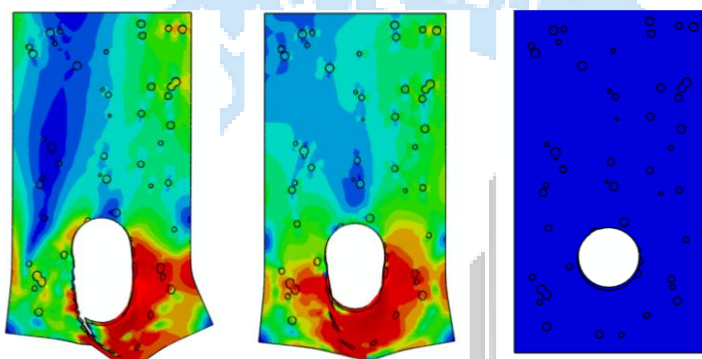
در حالت کلی اگر خوردگی حفره‌ای باعث تشکیل حفره‌های تصادفی شود، توزیع حفره‌ها تعیین‌کننده خواهد بود؛ به نحوی که اگر توزیع حفره‌های عمیق باعث تجمع آن‌ها در قسمت خاصی از ورق باشد، به جای پارگی شکافی ممکن است که شکست مقطع خالص

رخ بدهد و همینطور اگر توزیع حفره‌ها در دو طرف سوراخ به صورت متقارن باشد، به جای پارگی شکافی، احتمالاً شکست برشی رخ می‌دهد.



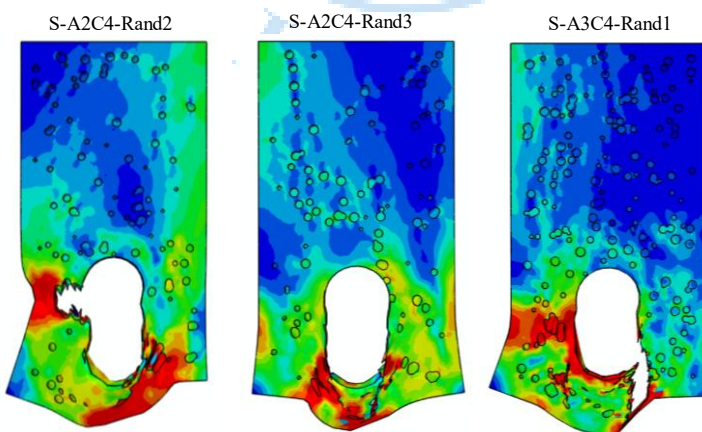
الف) ابتدای تحلیل ب) میانه‌ی تحلیل ج) انتهای تحلیل

شکل ۲۰: روند شکست نمونه‌ی S-A1C3-Rand2



الف) ابتدای تحلیل ب) میانه‌ی تحلیل ج) انتهای تحلیل

شکل ۲۱: روند شکست نمونه‌ی S-A1C3-Rand3

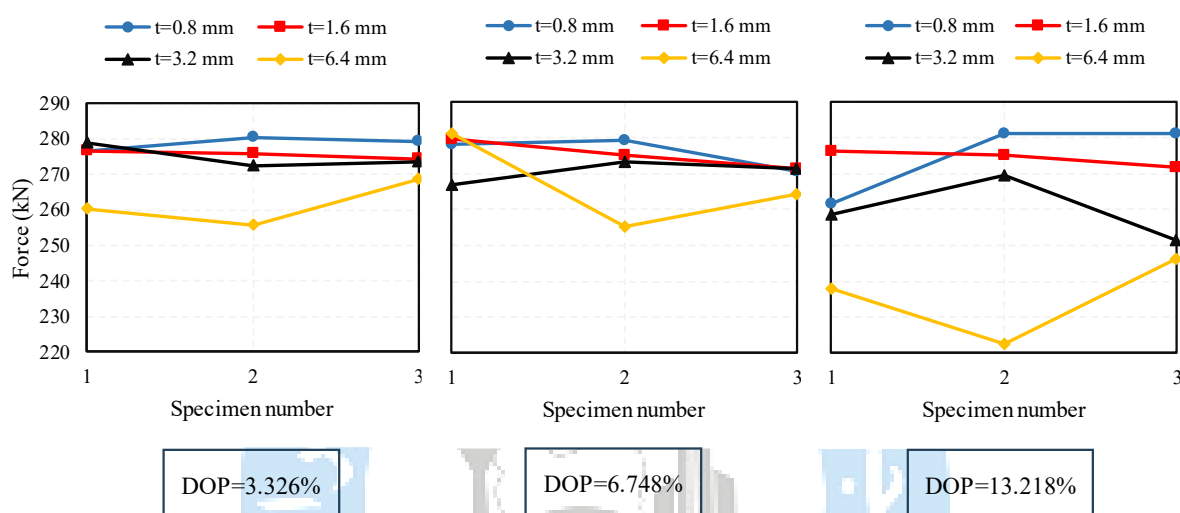


الف) پارگی شکافی ب) شکست برشی ج) ترکیب شکست مقطع خالص و پارگی شکافی

شکل ۲۲: حالات مختلف شکست نمونه‌ها.

۳-۲- اثر توزیع حفره‌ها بر روی ظرفیت باربری

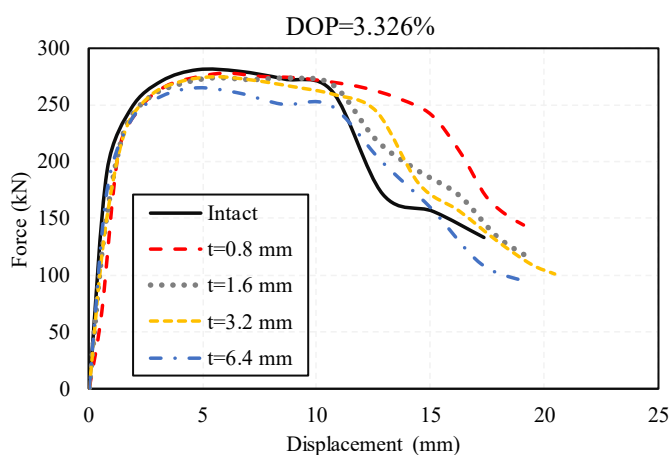
در حالت کلی اثر توزیع حفره‌ها بر روی مقاومت نهایی کم است. همانطور که در شکل ۲۳ مشاهده می‌شود، وقتی تراکم حفره‌ها پایین است، سه توزیع تصادفی مختلف از یک نوع خوردگی، مقاومت تقریباً مشابهی دارند. با افزایش تراکم خوردگی و همچنین عمق حفره‌ها، تفاوت در ظرفیت باربری بیشتر نمایان می‌شود. علت این تفاوت در تغییر وضعیت حفره‌ها در نواحی بحرانی است. توزیع متفاوت حفره‌ها می‌تواند باعث تغییر در حالت خرابی شود. در برخی از موارد ممکن است حالت خرابی ثابت بماند، اما تجمع حفره‌ها در پایین سوراخ که تنش فشاری (لهیدگی) حداکثر را تحمل می‌کند باعث شود لهیدگی و ازدیاد طول سوراخ دهد و در ادامه پارگی اتفاق بیفتد. حفره‌های عمیق اگر در مسیر تنش برشی بحرانی قرار بگیرند، باعث تسریع شکست و کاهش ظرفیت باربری نهایی می‌شوند. تغییر در مسیر ترک نیز تأثیر قابل توجهی بر مقاومت نهایی اتصال می‌گذارد. مسیره‌های طولانی عمدتاً ظرفیت باربری و شکل‌پذیری بیشتری را از خود نشان می‌دهند.



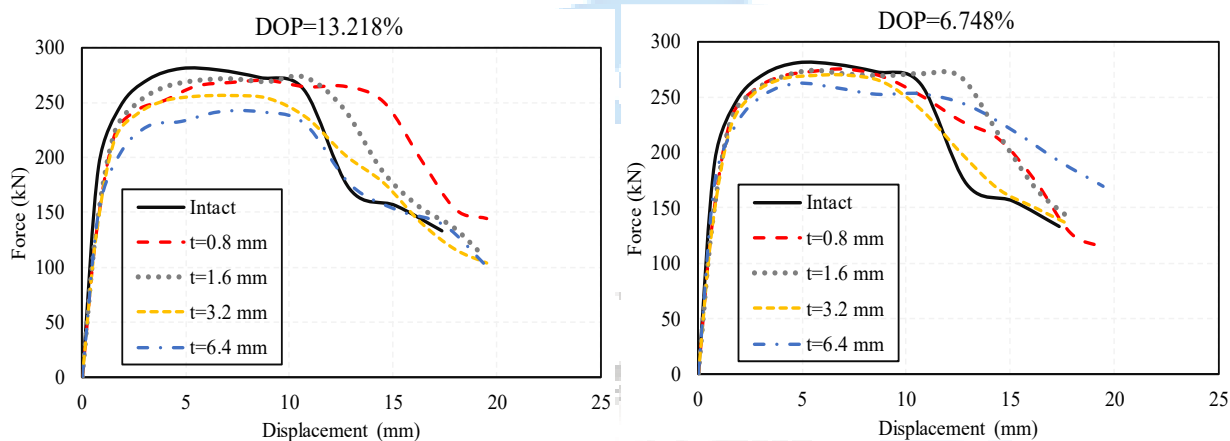
شکل ۲۳: اثر توزیع حفره‌ها بر روی ظرفیت باربری نهایی.

۳-۳- اثر عمق حفره‌ها بر روی ظرفیت باربری:

از هر سه نمونه با میزان خوردگی یکسان و توزیع تصادفی خوردگی متفاوت، میانگین گرفته شد و نمودار نیرو-جابجایی آن‌ها بر حسب ضخامت حفره‌ها ترسیم شد. با توجه به شکل‌های ۲۴، ۲۵ و ۲۶ در تمامی درجه‌های خوردگی، با افزایش میزان عمق حفره‌ها، ظرفیت باربری نهایی اتصال کاهش می‌یابد. شکل ۲۷ نشان می‌دهد که با تغییر عمق خوردگی ظرفیت باربری نهایی تا چه میزان کاهش می‌یابد. از این نمودار می‌توان دریافت که عمق خوردگی بیشترین اثر را بر روی مقاومت نهایی اتصال می‌گذارد. در نمونه‌هایی که درجه خوردگی ۱۳٪/۲۱۸ است، با افزایش ضخامت خوردگی به ۶/۴ میلیمتر، ظرفیت باربری نهایی ۱۵ درصد کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش DOP شیب تغییرات ظرفیت باربری نهایی نسبت به افزایش عمق خوردگی افزایش می‌یابد.



شکل ۲۴: میانگین نمودارهای نیرو-جابجایی عمق‌های خوردگی مختلف در درجه خوردگی ۳/۳۲۶٪

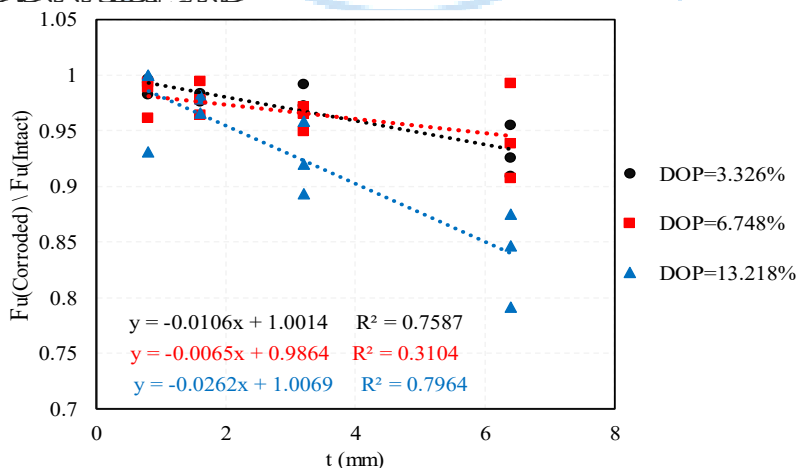


شکل ۲۵: میانگین نمودارهای نیرو-جابجایی عمق‌های

شکل ۲۶: میانگین نمودارهای نیرو-جابجایی عمق‌های

خوردگی مختلف در درجه خوردگی ۶/۷۴۸٪

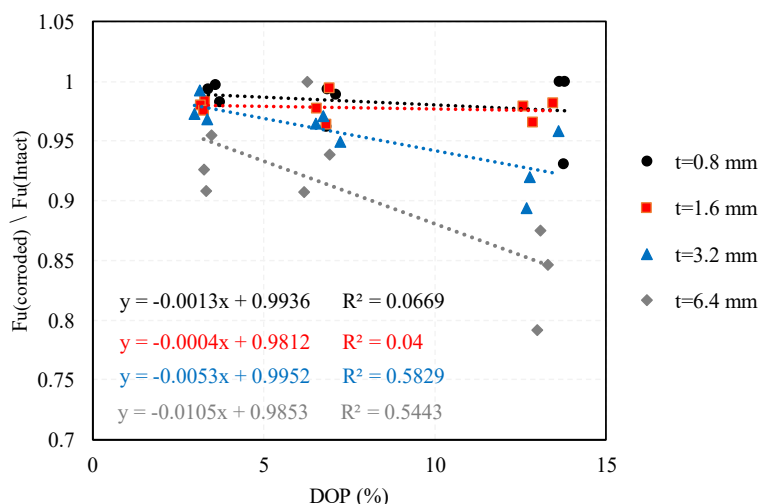
خوردگی مختلف در درجه خوردگی ۱۳/۲۱۸٪



شکل ۲۷: میزان کاهش مقاومت نهایی با تغییر عمق حفره‌ها

۳-۴- اثر درجه خوردگی بر روی ظرفیت باربری:

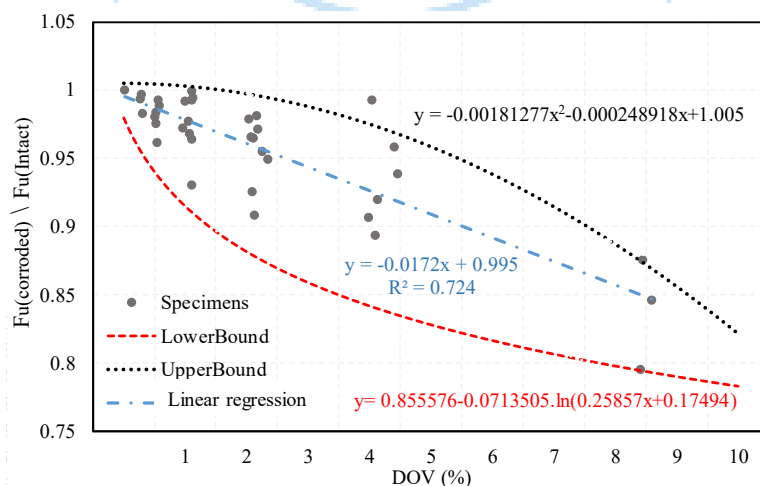
همانطور که در شکل ۲۸ مشاهده می‌شود وقتی عمق حفره‌ها کم است، اثر DOP ناچیز است. با افزایش عمق حفره‌ها، تأثیر DOP مشخص‌تر می‌شود. نمونه‌هایی که تراکم خوردگی بیشتری دارند، با کاهش ظرفیت باربری بیشتری مواجه می‌شوند. با توجه به این شکل، هرچه عمق خوردگی بیشتر می‌شود، شیب تغییرات ظرفیت باربری نهایی در برابر افزایش DOP بیشتر می‌شود. به عبارتی دیگر، اثر DOP زمانی مشخص می‌شود که عمق حفره‌ها از حدی بیشتر شود.



شکل ۲۸: میزان کاهش مقاومت نهایی با تغییر در عمق حفره

۳-۵- اثر اتلاف حجمی بر روی ظرفیت باربری:

یکی از مهم‌ترین شاخصه‌هایی که میزان خوردگی حفره‌ای را بیان می‌کند، نسبت اتلاف حجمی است. نسبت اتلاف حجمی بیانگر حجم از دسته رفته ورق یا عضو فولادی تحت خوردگی حفره‌ای است. پژوهشگران همواره در تلاش‌اند تا رابطه‌ای دقیق و مناسب برای میزان کاهش ظرفیت باربری نهایی در برابر نسبت اتلاف حجمی ارائه نمایند. شکل ۲۹ میزان کاهش ظرفیت باربری نهایی را در مقابل افزایش نسبت اتلاف حجمی نشان می‌دهد. برای مثال وقتی نسبت اتلاف حجمی به ۸٪ می‌رسد، مقاومت نهایی اتصال تا ۲۰٪ کاهش می‌یابد که مقدار قابل توجهی است.



شکل ۲۹: نمودار تغییرات ظرفیت باربری در برابر تغییرات نسبت اتلاف حجمی

برای پیش‌بینی میزان کاهش مقاومت در مقابل تغییرات نسبت اتلاف حجمی، سه رابطه ارائه شد. نقطه چین مشکی در شکل ۲۹ نشان‌دهنده حد بالایی مقاومت است یک پیش‌بینی خوش‌بینانه است. یک رگرسیون خطی به صورت نقطه خط ترسیم شده است. این

رگرسیون به صورت تقریبی، متصل کننده مقادیر میانگین است که با دقتی مناسب میزان کاهش ظرفیت باربری نهایی را پیش‌بینی می‌کند. خط‌چین قرمز حد پایین و بدبینانه مقاومت نهایی را پیش‌بینی می‌کند. قابل توجه است که این رابطه‌ها برای نسبت اتلاف حجمی زیر ۹ درصد برقرار است. رابطه‌های ۸، ۹ و ۱۰ به ترتیب بیانگر پیش‌بینی حد بالایی، رگرسیون خطی و حد پایینی ظرفیت باربری نهایی در مقابل نسبت اتلاف حجمی است.

$$\frac{F_u(\text{Corroded})}{F_u(\text{Intact})} = -0.00181277.(DOV)^2 - 0.0002489.(DOV) + 1.005 \quad (8)$$

$$\frac{F_u(\text{Corroded})}{F_u(\text{Intact})} = -0.0172.(DOV) + 0.995 \quad (9)$$

$$\frac{F_u(\text{Corroded})}{F_u(\text{Intact})} = 0.855576 - 0.0713505.\ln(0.25857.(DOV) + 0.17494) \quad (10)$$

خطای رگرسیون ارائه شده برای اکثر نمونه‌ها به ۴ درصد محدود می‌شود و تنها در چند نمونه خاص به ۶ و ۷ درصد می‌رسد. این اختلاف ناشی از توزیع متفاوت حفره‌ها، تغییر مسیر ترک، تغییر حالت خرابی و شکست و در بعضی از موارد دقت کم آسیب نرم در پیش‌بینی ظرفیت باربری است.

۱۰- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی اثر خوردگی حفره‌ای بر روی اتصالات اتکابی که تمایل به پارگی شکافی دارند پرداخته شده است. از نتایج این پژوهش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- نتایج نشان می‌دهد که خوردگی حفره‌ای بر روی حالت خرابی اتصال تأثیر می‌گذارد. توزیع متفاوت حفره‌ها در اتصالات مایل به پارگی شکافی، حتی در مواردی که میزان خوردگی ثابت است، حالت خرابی را دستخوش تغییر می‌کند. سوراخ‌هایی که در نواحی برشی بحرانی قرار می‌گیرند، مسیر شروع ترک و پارگی را تعیین می‌کنند. اگر سوراخ‌ها در مسیر اولیه تنش حداکثر نمونه فاقد خوردگی قرار گیرند، باعث تسریع شکست می‌شوند، توزیع سوراخ‌ها ممکن است به گونه‌ای باشد که شکست برشی به جای پارگی شکافی اتفاق بیفتد و یا با تجمع سوراخ‌های عمیق در عرض ورق باعث تمایل به شکست مقطع خالص شوند. سوراخ‌هایی که خارج از نواحی تنش برشی بحرانی قرار می‌گیرند با تغییر مسیر رشد ترک باعث طولانی‌تر شدن خط شکست و در بعضی از موارد سبب ازدیاد طول سوراخ و شکل‌پذیری بیشتر نمونه‌ها می‌شوند.
- تراکم خوردگی و مقدار DOP تأثیر بسزایی بر روی حالات خرابی اتصالات سری S (مدل‌های با مُد خرابی پارگی شکافی) می‌گذارد. معمولاً وقتی تراکم خوردگی کم است، ترک ناچار است مسیر طولانی‌تری را برای شکست طی کند. با افزایش تراکم خوردگی اکثر نمونه‌ها به صورت پارگی شکافی گسیخته شدند که این موضوع به علت قرارگیری تعداد زیادی از سوراخ‌ها بر مسیر شکست اولیه نمونه بود.
- افزایش عمق، بیشترین تأثیر را بر روی کاهش ظرفیت باربری می‌گذارد. وقتی تراکم خوردگی به بالاترین میزان خود، یعنی ۱۳/۲٪ رسید، نمونه‌های با حفره‌های ۶/۴ میلی‌متر با کاهش ۱۵ درصدی مقاومت مواجه شدند.
- با توجه به نتایج، وقتی ضخامت خوردگی کم است، اثر DOP ناچیز است. با افزایش ضخامت حفره‌ها، تأثیر DOP مشخص‌تر می‌شود. نمونه‌هایی که تراکم خوردگی بیشتری دارند، با کاهش ظرفیت باربری بیشتری مواجه می‌شوند. در نمونه‌های با خوردگی عمیق، اختلاف ظرفیت باربری در کم‌ترین و بیشترین درجه خوردگی به ۱۱ درصد رسید.

با توجه به پژوهش حاضر، توسعه مطالعه در خصوص رفتار اتصالات دارای خوردگی حفره‌ای که دچار مدهای دیگر خرابی می‌شوند و نیز رفتار آن‌ها تحت بارهای چرخه‌ای می‌تواند به تعمیق اطلاعات این حوزه کمک نماید.

مراجع

- [1] AISC-360-22, *Specification for structural steel buildings*, (2022). American Institute of Steel Construction , AISC 360-22, Chicago.”.
- [2] Lyu, Y. F., Wang, Y. B., Li, G. Q., & Jiang, J. (2019). Numerical analysis on the ultimate bearing resistance of single-bolt connection with high strength steels. *Journal of Constructional Steel Research*, 153, 118-129.
- [3] Wang, Y. B., Lyu, Y. F., Li, G. Q., & Liew, J. R. (2017). Behavior of single bolt bearing on high strength steel plate. *Journal of Constructional Steel Research*, 137, 19-30.
- [4] Kim, H. J., & Yura, J. A. (1999). The effect of ultimate-to-yield ratio on the bearing strength of bolted connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 49(3), 255-269.
- [5] Može, P., & Beg, D. (2014). A complete study of bearing stress in single bolt connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 95, 126-140.
- [6] Rex, C. O., & Easterling, W. S. (2003). Behavior and modeling of a bolt bearing on a single plate. *Journal of Structural Engineering*, 129(6), 792-800.
- [7] Zakeri, A. H., Vatani Oskoei, A., & Madani, S. (2017). Study of failure mechanism of double-lap joints of steel to FRP by bolt and resin. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 4(1), 126-137.
- [8] “RCSC-20," *Research Council on Structural Connections*", (2020). ‘Specification for Joints, Structural Bolts, Using High Strength Bolts’ RCSC-20, Chicago.
- [9] Ahn, J. H., Lee, J. M., Cheung, J. H., & Kim, I. T. (2016). Clamping force loss of high-strength bolts as a result of bolt head corrosion damage: Experimental research A. *Engineering Failure Analysis*, 59, 509-525.
- [10] Jiang, C., Xiong, W., Cai, C. S., Zhu, Y., & Liu, Z. (2022). Experimental study on the shear behavior of friction connections with corrosion damage. *Journal of Constructional Steel Research*, 197, 107449.
- [11] Kong, Z., Yang, F., Jin, Y., Hong, S., Wang, X., Vu, Q. V., ... & Kim, S. E. (2021). Experimental study on bearing capacity of corroded high-strength bolt connections under shear force. *Construction and Building Materials*, 309, 125117.
- [12] Jiang, C., Xiong, W., Cai, C. S., Zhu, Y., & Wang, J. (2022). Preload loss of high-strength bolts in friction connections considering corrosion damage and fatigue loading. *Engineering Failure Analysis*, 137, 106416.
- [13] Piscopo, V., & Scamardella, A. (2020). Ultimate strength assessment of intact and pitted platings under biaxial compression. *Engineering Structures*, 204, 110079.
- [14] Yuan, H., Liu, H., Ren, X., Zhang, X., Ai, D., & Luo, Y. (2019). The bearing performance of the bolt-sphere joints with stochastic pitting corrosion damage. *Journal of Constructional Steel Research*, 160, 359-373.
- [15] Huang, Y., Zhang, Y., Liu, G., & Zhang, Q. (2010). Ultimate strength assessment of hull structural plate with pitting corrosion damage under biaxial compression. *Ocean Engineering*, 37(17-18), 1503-1512.
- [16] Ghadami, A., Pourmoosavi, G., & Broujerdian, V. (2021). Slenderness classification of shear panels with random pitting corrosion damage. *Journal of Constructional Steel Research*, 184, 106802.
- [17] Malashin, I., Tynchenko, V., Nelyub, V., Borodulin, A., Gantimurov, A., Krysko, N. V., ... & Galinovsky, A. (2024). Deep Learning Approach for Pitting Corrosion Detection in Gas Pipelines. *Sensors*, 24(11), 3563.
- [18] Zhao, Z., Mo, S., Xiong, Q., Liu, H., & Liang, B. (2021). Moment capacity of H-section steel beam with randomly located pitting corrosion. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 66, 103161.

- [19] Zhao, Z., Zhang, N., Wu, J., Gao, Y., & Sun, Q. (2020). Shear capacity of steel plates with random local corrosion. *Construction and Building Materials*, 239, 117816.
- [20] Zhao, Z., Tang, L., Zhang, N., Cai, Q., Mo, S., & Liang, B. (2021). Shear capacity of H-shaped steel beam with randomly located pitting corrosion. *Applied Ocean Research*, 115, 102851.
- [21] Wang, F., Wang, R., & Ju, J. (2023). Ultimate Compressive Strength of H-Section Stub Columns Subject to Random Pitting Corrosion Damage. *Applied Sciences*, 13(19), 11051.
- [22] Duddu, R., Kota, N., & Qidwai, S. M. (2016). An extended finite element method based approach for modeling crevice and pitting corrosion. *Journal of Applied Mechanics*, 83(8), 081003.
- [23] Ghasemzadeh, M., Mokhtari, M., Bilgin, M. H., & Kefal, A. (2023). Pitting corrosion identification approach based on inverse finite element method for marine structure applications. *Ocean Engineering*, 273, 113953.
- [24] Chen, L., Ahadi, A., Zhou, J., & Ståhl, J. E. (2013). Modeling effect of surface roughness on nanoindentation tests. *Procedia CIRP*, 8, 334-339.
- [25] Zeng, S., Gu, S., Ren, S., Gu, Y., Kong, C., & Yang, L. (2022). A modeling method for finite element analysis of corroded steel structures with random pitting damage. *Buildings*, 12(11), 1793.
- [26] Jiang, X., & Soares, C. G. (2012). Ultimate capacity of rectangular plates with partial depth pits under uniaxial loads. *Marine Structures*, 26(1), 27-41.
- [27] Feng, L., He, J., Hu, L., Shi, H., Yu, C., Wang, S., & Yang, S. (2020). A parametric study on effects of pitting corrosion on steel plate's ultimate strength. *Applied Ocean Research*, 95, 102026.
- [28] Wang, R. (2021). On the effect of pit shape on pitted plates, Part II: Compressive behavior due to random pitting corrosion. *Ocean Engineering*, 236, 108737.
- [29] Wang, R., & Lin, S. (2021). On the effect of pit shape on pitted plates, Part I: Tensile behavior due to artificial corrosion pits. *Ocean Engineering*, 236, 108754.
- [30] Lian, F., Zhao, B., Li, T., Jin, Z., & Zhao, Z. (2023). Shear capacity of corroded high-strength bolted connections. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 204, 104981.
- [31] Mehretehran, A. M. (2024). Strength of thick-walled circular steel tubes with pitting corrosion under axial compression and bending moment. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 11(4).
- [32] "ASTM G46. (2005). *Standard guide for examination and evaluation of pitting corrosion*. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International."
- [33] Jia, C., Li, J., Guo, L., & Zhong, L. (2024). Behavior of stub SCFST columns with localized pitting corrosion damage. *Engineering Failure Analysis*, 156, 107824.
- [34] "ABAQUS, Analysis user's Manual, Version 2023, ABAQUS, Inc, 2023".
- [35] "National Standardization Technical Committees, GB/T 228-2002 *Metallic Materials: Tensile Testing at Ambient Temperature*, China Standard Press, Beijing, 2002 (in Chinese)".
- [36] Yu, H. L., & Jeong, D. Y. (2010). Application of a stress triaxiality dependent fracture criterion in the finite element analysis of unnotched Charpy specimens. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 54(1), 54-62.