

تأثیر خوردگی حفره‌ای در برآورد ظرفیت باربری ورق‌های فولادی تحت تنش فشاری تک‌محوره

بهنام عاقبتی^۱ و یاسر شریفی^{۲*}

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۰۶/۲۱	<p>ورق‌های فلزی، یکی از مهم‌ترین المان‌های ساخت بسیاری از سازه‌ها از جمله کشتی‌ها هستند. از مهم‌ترین خرابی‌ها که امکان از بین بردن این نوع سازه را دارد، خوردگی است. برای طرح بازسازی سازه‌ها تخمین مقاومت موجود آن‌ها از مهم‌ترین عملیات‌ها است. از طرفی، خوردگی حفره‌ای از مهم‌ترین انواع خوردگی موضعی است که سبب سوراخ شدن و در نتیجه، زوال قطعه فلزی می‌گردد و این مسئله می‌تواند تبعات بسیار خطرناکی در ورق‌های فولادی باربر به همراه داشته باشد. علاوه بر این، برآورد مقاومت موجود ورق‌هایی که تحت تأثیر خوردگی حفره‌ای هستند، بسیار پیچیده است. در این تحقیق، علاوه بر بررسی نوع و شکل خوردگی حفره‌ای، تعیین مقاومت نهایی ورق‌ها که در حالات گوناگونی از حجم خوردگی قرار دارند، با به کارگیری روش اجزای محدود و به‌وسیله نرم‌افزار ABAQUS انجام می‌شود. نتایج حاصل نشان می‌دهد که پارامتر حجم خوردگی در ورق‌ها به همراه پارامترهای تنش تسلیم مصالح ورق، ضخامت و بعد تحت تنش فشاری تک‌محوره، بیشترین تأثیر بر مقاومت نهایی ورق‌ها دارد.</p>
پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۱۰/۲۵	
واژگان کلیدی: خوردگی حفره‌ای، مقاومت نهایی، حجم خوردگی، تنش فشاری تک‌محوره.	

۱- مقدمه

نظر جانی نیز خسارت‌های فراوانی ایجاد می‌کند. سازه‌های فولادی، به ویژه سازه‌های دریایی، به دلیل هوازدهی، رطوبت و یون کلراید، در معرض آسیب‌های خوردگی قرار می‌گیرند. این‌گونه از آسیب‌ها می‌تواند بر مسائل ایمنی، سلامت و محیط‌زیست اثرگذار بوده، هزینه‌های مالی بسیاری نیز به همراه داشته باشد. بنابراین باید به این موضوع، توجهی خاص داشت و به کنترل این آسیب‌ها پرداخت. خوردگی یکنواخت و حفره‌ای، از مهم‌ترین و رایج‌ترین انواع خوردگی‌ها است. در خوردگی یکنواخت، لایه‌های سطحی فلز، صدمه دیده، آثار خوردگی در تمام سطح آن مشاهده می‌شود و کاهش ضخامت در نقاط مختلف سطح فلز، تقریباً یکسان

پدیده خوردگی، واکنش شیمیایی یا الکتروشیمیایی بین یک ماده (معمولاً یک فلز) و محیط اطراف آن است که به تغییر خواص ماده منجر خواهد شد. پدیده خوردگی در تمامی دسته‌های اصلی مواد، شامل فلزات، سرامیک‌ها، پلیمرها و کامپوزیت‌ها اتفاق می‌افتد، اما وقوع آن در فلزات آن‌قدر شایع و فراگیر است و اثرات مخربی به جای می‌گذارد که هرگاه صحبت از خوردگی به میان می‌آید، ناخودآگاه خوردگی یک فلز به ذهن می‌رسد. خوردگی سبب به‌وجود آمدن زیان‌های فراوانی در کارایی سیستم‌های مختلف می‌شود. پدیده خوردگی علاوه بر خسارت‌های اقتصادی، از

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: yasser_sharifi@yahoo.com

۱. کارشناس ارشد سازه، گروه عمران، دانشگاه ولی‌عصر (عج) رفسنجان

۲. دانشیار، گروه عمران، دانشگاه ولی‌عصر (عج) رفسنجان

است. خوردگی حفره‌ای نیز از مهم‌ترین انواع خوردگی‌های موضعی است که سبب سوراخ شدن و در نتیجه، زوال قطعه می‌شود. در این نوع خوردگی ممکن است بدون اینکه هیچ‌گونه کاهش وزنی در فلز خورده‌شده، مشاهده شود، ضخامت قطعه به تدریج کاهش یابد که به دنبال این امر، شاهد کاهش چشمگیر در مقاومت نهایی ورق خواهیم بود. در این نوع خوردگی، قطر حفرات آن می‌تواند اندازه‌های مختلفی داشته باشد. با بهره‌گیری از روش‌های شبیه‌سازی عددی به جای روش‌های زمان‌بر و پرهزینه آزمایشگاهی، می‌توان به بررسی در این زمینه پرداخت و در مدت‌زمانی کوتاه با مدل‌سازی‌های بسیار، به نتایج مطلوب و نزدیک به واقعیت دست یافت. عموماً در حالت خوردگی یکنواخت، مقاومت نهایی ورق‌ها به آسانی می‌تواند به وسیله کاهش ضخامت ورق نسبت به حالت اولیه تخمین زده شود. از طرفی، فرمول‌های تجربی نیز برای برآورد مقاومت نهایی ورق‌ها که تحت خوردگی یکنواخت قرار دارند، موجود است. اما محاسبات مربوط به کاهش مقاومت ناشی از خوردگی حفره‌ای نسبت به خوردگی یکنواخت به مراتب سخت‌تر و پیچیده‌تر است. وقتی یک ورق باریک، تحت فشار قرار می‌گیرد، مواد نزدیک لبه‌ها به‌طور طبیعی، بیشترین بارگیری را انجام داده، در حالی که مواد ناحیه مرکزی آن، اثرپذیری کمتری نسبت به لبه‌های نزدیک بار از خود نشان می‌دهند. بنابراین، انتظار می‌رود خسارات و خوردگی در پیرامون مرکز، تأثیر کمتری بر روی مقاومت ورق، داشته باشد. در ضمن، مقاومت نهایی فشاری ورق‌های با لبه‌های سوراخ شده، به‌طور قابل ملاحظه‌ای کمتر از مقاومت نهایی فشاری ورق‌ها با سوراخ در ناحیه مرکزی است [۱]. پایک و همکاران، با مطالعات آزمایشگاهی و عددی بر روی ورق‌های فولادی با خوردگی حفره‌ای که تحت تنش برشی قرار داشت، دریافتند که مقاومت نهایی ورق‌های فولادی با خوردگی حفره‌ای و تحت اثر برش، به درصد سطحی خوردگی حفره‌ای وابستگی نشان می‌دهد [۳ و ۲]. TSCF، با مطالعات تئوری و آزمایشگاهی در زمینه مقاومت ورق‌های فولادی با خوردگی حفره‌ای و تحت خمش، فرمولی برای تعیین ضخامت معادل ورق‌های خورده شده و نیز برای ارزیابی ظرفیت خمشی این ورق‌ها پیشنهاد دادند [۴]. ناکایی و همکاران نیز در تست‌های کمانشی خود دریافتند که مقاومت نهایی در اعضای دارای خوردگی حفره‌ای، کمتر یا مساوی است با مقاومت نهایی اعضای با همان

خصوصیات هندسی و مصالح اعضای خورده‌شده، در صورتی که دارای خوردگی نبوده، به اندازه میانگین عمق حفرات در اعضای خورده‌شده از ضخامت این اعضا کاسته شود. آن‌ها مطالعاتی نیز در زمینه شکل حفرات خوردگی انجام دادند و دریافتند که شکل حفرات شبیه به مخروط، نیم‌کره و در پاره‌ای از موارد، سیلندر (استوانه) است [۵ و ۶]. پایک و تایامبالی، میزان مجاز زوال ضخامت ورق را برابر با ۵۰ درصد ضخامت اولیه ورق و میزان قابل قبول برای لحاظ حداکثر مساحت خوردگی را کمتر از ۳۰ درصد سطح اولیه ورق، پیشنهاد کردند و بیان داشتند، در صورت تجاوز از مقادیر مطرح‌شده، ورق‌ها نیاز به تقویت و یا تعویض دارند [۷]. از سوی دیگر، داپدولا و همکاران، حداکثر قطر حفرات در ورق‌های با خوردگی حفره‌ای را در محدوده ۲۵ تا ۸۰ میلی‌متر مطرح کردند [۸]. در مطالعه‌ای تعیین فرکانس زاوی ای طبیعی ورق‌ها با توجه به شرایط مختلف تکیه‌گاهی به کمک شبکه عصبی مصنوعی انجام شد. نتایج تحلیل به‌خوبی بیانگر عملکرد شبکه عصبی بوده، به طوری که زمان محاسبه فرکانس به میزان قابل توجهی کاهش یافته است [۹]. یک روش عددی به‌منظور بررسی و پیش‌بینی فرکانس‌های طبیعی یک ورق مواد مدرج بر بستر الاستیک، توسط محقق دیگری [۱۰] مورد بررسی قرار گرفت و نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که روش المان کوادراچر، از دقتی مناسب برای ورق با شش شرط مرزی مختلف برخوردار است. در تحقیقی دیگر، معادله‌های فرکانسی ارتعاشات آزاد شعاعی و عرضی یک ورق دایره‌ای با سه نوع تکیه‌گاه آزاد، ساده و گیردار به‌صورت حل دقیق بسته استخراج و معادلات حاکم نیز با استفاده از روش جداسازی متغیرها حل شده، یک رابطه دقیق بسته برای معادله فرکانسی در هر شرط مرزی به دست می‌آید. در نهایت، فرکانس‌های طبیعی حاصل از معادله‌های فرکانسی به‌دست آمده با نتایج المان محدود مقایسه شده است [۱۱]. از آنجا که هنوز عوامل تأثیرگذار بر روی مقاومت نهایی ورق‌های سازه‌ای با خوردگی حفره‌ای که تحت تنش فشاری تک محوره قرار دارند، به‌گونه‌ای واضح و دقیق مشخص نیست، در این تحقیق، سعی شده که عوامل مؤثر بر مقاومت نهایی این گونه ورق‌ها مورد بررسی قرار گرفته، با روش المان محدود و بهره‌گیری از نرم‌افزار قدرتمند ABAQUS، تأثیر شکل، عمق و قطر حفرات خوردگی و نیز ابعاد ورق‌ها برای دو نوع ورق فولادی نرم و با مقاومت بالا مورد ارزیابی قرار

خواص مصالح ورق‌های فولادی برای دو نوع ورق فولادی نرم و با مقاومت بالا که به ترتیب دارای تنش‌های تسلیم ۲۳۵ و ۳۵۲/۸ مگاپاسکال هستند، در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- خواص مصالح ورق‌های فولادی

تنش تسلیم (MPa)	ضریب پواسون	مدول یانگ (GPa)
۲۳۵ ۳۵۲/۸	۰/۳	۲۰۵/۸

۵- عیب هندسی اولیه

در حالت واقعی، ورق‌ها دارای شکل هندسی کاملاً منظمی نیستند و ممکن است خرابی‌هایی به صورت انحنای در آن‌ها وجود داشته باشد؛ ولی در شبیه‌سازی‌های عددی باید توجه کرد، زمانی که بار اعمالی به ورق به صورت کاملاً افقی و به موازات محور x (مطابق شکل ۲)، لحاظ شود و از آنجا که ورق ایجاد شده، فاقد هر گونه عیب و نقصی است، در این صورت، هرگز کمانشی در ورق اتفاق نخواهد افتاد. در واقع، سه عامل مهم، باعث به وجود آمدن پدیده کمانش می‌شود که عبارت‌اند از:

۱. وجود عیب و نقص در ساختار ورق؛

۲. خروج از مرکزیت بار اعمالی؛

۳. وجود بارهای جانبی.

بنابراین، در این تحقیق، برای ایجاد کمانش در ورق با توجه به موارد مطرح شده، در ساختار ورق، عیب و نقصی بسیار کوچک لحاظ کرده که در این مورد از دستور Imperfection استفاده خواهد شد.

۶- مدل‌سازی اجزای محدود

در این تحقیق، مدل‌سازی ورق‌های فولادی خورده شده که تحت تنش فشاری تک‌محوره قرار دارند، با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS و به روش اجزای محدود انجام خواهد شد و تعیین مقاومت نهایی ورق‌ها، در حالت غیرخطی صورت می‌پذیرد. مقاومت نهایی ورق‌ها به صورت میانگین حاصل از منحنی‌های تنش- کرنش مربوط به اجزای محدود در ورق‌ها، در نظر گرفته می‌شود. برای آنالیز مدل‌ها از تحلیل Static Riks، یکی از انواع موجود در کتابخانه تحلیل‌های ABAQUS، استفاده شده است. این آنالیز معمولاً برای تحلیل مسائل ناپایداری و کمانش و خرابی‌های غیرخطی سازه‌ای و در مواردی که اثر غیرخطی هندسی یا

بگیرد. در نهایت، پارامترهای تأثیرگذار و نیز پارامترهایی که تأثیر ناچیزی بر مقاومت نهایی این گونه ورق‌ها دارند، تعیین شود.

۲- خوردگی موضعی حفره‌ای

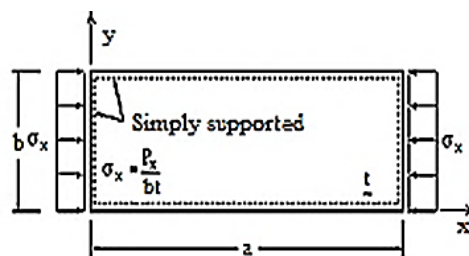
شکل (۱)، نوعی خوردگی را نشان می‌دهد که آثار نامطلوب و زیان‌باری بر فلزات به جا می‌گذارد. این خوردگی، حالتی خاص از حملات موضعی است و یکی از مهم‌ترین و مخرب‌ترین انواع خوردگی‌ها به شمار رفته، اغلب سریع و غافل‌گیرانه عمل می‌کند. خوردگی حفره‌ای به صورت موضعی باعث کاهش ضخامت ورق‌های فولادی می‌شود که در نتیجه، شاهد کاهش چشمگیر مقاومت نهایی ورق‌ها خواهیم بود.

شکل ۱- خوردگی موضعی حفره‌ای [۳]



۳- شرایط مرزی و نحوه بارگذاری بر روی ورق‌های فولادی

همان‌گونه که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، ورق فولادی که تحت تنش فشاری تک‌محوره قرار دارد، دارای طول a ، عرض b و ضخامت t است. محور x به صورت افقی و در راستای بعد a و محور y نیز در جهت عمودی و در راستای بعد بارگذاری شده (b)، لحاظ شده است. تمام چهار لبه ورق دارای تکیه‌گاه‌های ساده‌اند؛ چراکه تنها در این حالت است که می‌توان در ورق شکل‌گیری تنش‌های غشایی را که مسبب اصلی مقاومت بعد از کمانش در ورق است، مشاهده



کرد.

شکل ۲- چگونگی لحاظ محورهای مختصات و اعمال بار، بر روی ورق و نمایش تکیه‌گاه‌های آن [۳]

۴- خواص مصالح ورق‌های فولادی

مدل‌سازی اجزای محدود خود، از ورق‌هایی با مشخصات ارائه شده در جداول ۲ و ۳ استفاده کردند. همچنین، میزان DOP برای مدل‌ها، مطابق با جدول ۴ است. DOP، میزان سطح خوردگی را به صورت درصدی از سطح ورق بیان کرده، رابطه آن به صورت زیر تعریف می‌شود:

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

که در رابطه (۱)، A_{pi} سطح حفرات خوردگی و a و b نیز به ترتیب طول و عرض ورق را تشکیل می‌دهند. مدل‌های ۲ تا ۶ از جدول ۴، دارای میزان مشخصی DOP بوده، عمق حفرات خوردگی در آن‌ها، برابر ضخامت ورق است. شایان ذکر است که مدل شماره ۱ که دارای DOP برابر با ۰٪ بوده، هیچ‌گونه خوردگی ندارد و به عبارتی Intact است. پایک و همکاران در مدل‌سازی‌های خود، یک چهارم ورق‌ها را به جهت تقارن هندسی و نیز تقارن در بارگذاری، با استفاده از نرم‌افزار ANSYS مدل‌سازی کردند. از مزایای این‌گونه مدل‌سازی‌ها، می‌توان به ساخت سریع مدل‌ها و همچنین کاهش در زمان تحلیل و پردازش آن‌ها اشاره کرد. بنابراین، طبق داده‌های ارائه شده، مدل‌سازی‌ها انجام شد و بارگذاری مطابق با شکل (۲)، بر روی مدل‌ها اعمال گردید. در شکل (۳) مدل‌های اجزای محدود ورق‌ها ارائه شده است.

مدول یانگ (Gpa)	ضریب پواسون	تنش تسلیم (Mpa)
۲۰۵/۸	۰/۳	۳۵۲/۸

جدول ۳- خواص مصالح ورق‌های فولادی

در شکل (۴) نیز، مقاومت نهایی ورق‌ها به صورت نمودار تنش- کرنش، ارائه شده است. نمودارهای سمت راست مربوط به نتایج به دست آمده از نرم‌افزار ANSYS بوده که توسط پایک و همکاران صورت پذیرفته است. نمودارهای سمت چپ نیز مربوط به نتایج به دست آمده از نرم‌افزار ABAQUS است که توسط نگارنده حاصل شده است. اکنون، با توجه به صحت‌سنجی که انجام پذیرفت، می‌توان بیان کرد که روند مدل‌سازی و نتایج تحلیل‌های عددی که در این تحقیق حاصل خواهد شد، معتبر است.

۹- تأثیر شکل حفرات خوردگی در مقاومت

نهایی ورق‌های فولادی

حفرات خوردگی در سطح ورق‌های سازه‌ای، عموماً شکلی شبیه به مخروط، نیم‌کره و در پاره‌ای از موارد، سیلندر

همان تغییرشکل‌های بزرگ و اثر غیرخطی مصالح مد نظر باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرد. نوع المان به کاررفته در مش‌بندی نیز، المان سالیید (Solid)، شش‌وجهی با ۲۰ گره موجود در آن، خواهد بود.

۷- اهداف پژوهش

در این تحقیق، به بررسی تأثیر خوردگی حفره‌ای بر روی ظرفیت باربری نهایی ورق‌های تحت تنش فشاری تک‌محوره پرداخته شده و با روش المان محدود و بهره‌گیری از نرم‌افزار قدرتمند ABAQUS، تأثیر شکل، عمق و قطر حفرات خوردگی و نیز ابعاد ورق‌ها برای دو نوع ورق فولادی نرم و با مقاومت بالا مورد ارزیابی قرار گرفته است. در نهایت، پارامترهای تأثیرگذار و نیز پارامترهایی که تأثیری ناچیز بر مقاومت نهایی این‌گونه ورق‌ها دارند، ارائه شده است.

جدول ۲- خواص هندسی مدل‌ها

اهمیت این موضوع از آنجاست که اگر یک ورق سازه‌ای که

مدل‌ها	طول (m)	عرض (m)	ضخامت (m)
۱	۰/۸	۰/۸	۰/۰۱۵
۲	۰/۸	۰/۸	۰/۰۱۵
۳	۰/۸	۰/۸	۰/۰۱۵
۴	۰/۸	۰/۸	۰/۰۱۵
۵	۰/۸	۰/۸	۰/۰۱۵
۶	۰/۸	۰/۸	۰/۰۱۵

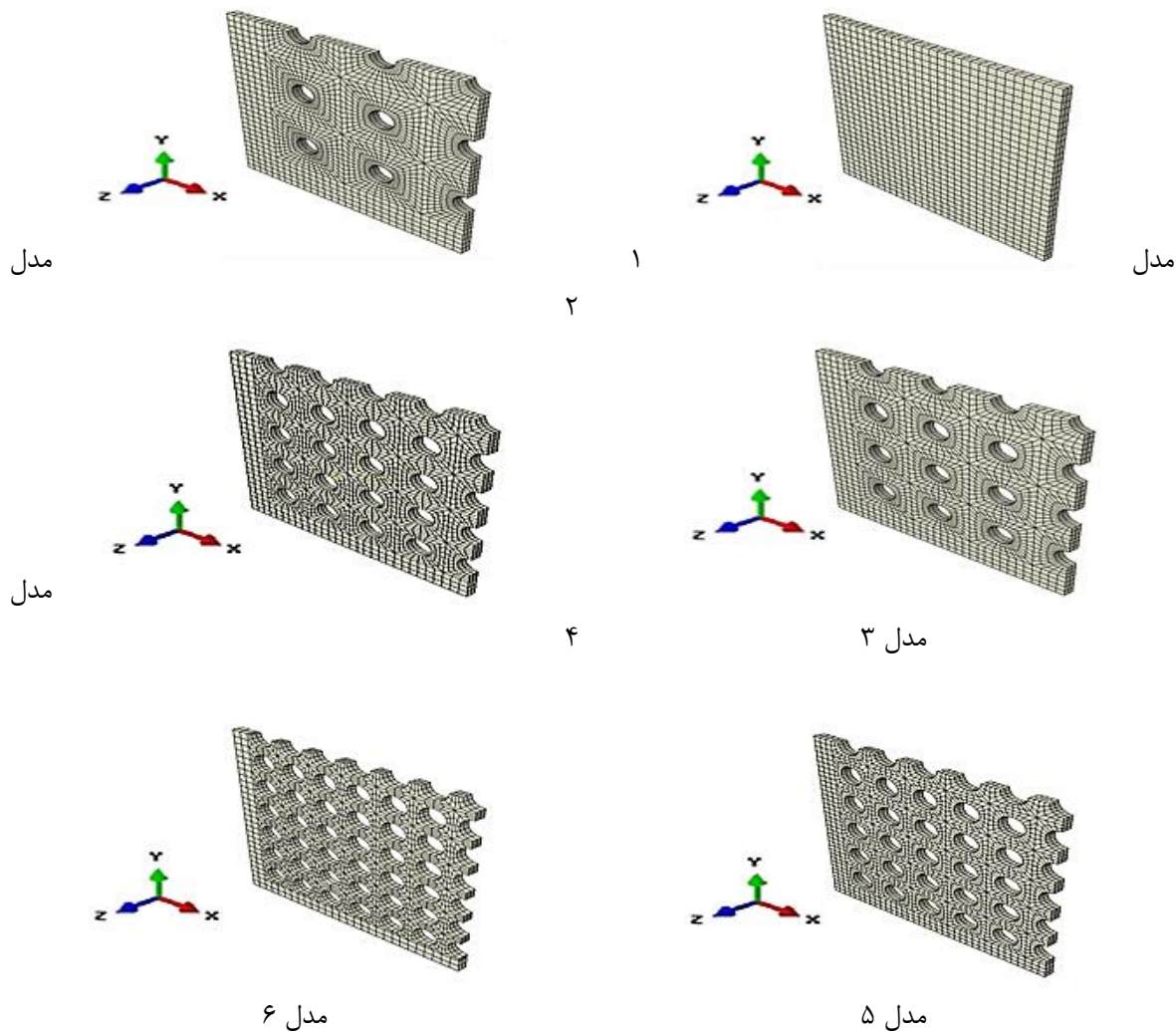
تحت تنش فشاری تک‌محوره قرار دارد، تحت تأثیر رطوبت و هوازگی، دچار خوردگی شود، عواملی همچون شکل، عمق و قطر حفرات خوردگی و نیز ابعاد ورق، مسلماً بر روی رفتار آن اثرگذار خواهند بود که عدم درک صحیح این موضوع، می‌تواند عواقب خطرناک و جبران‌ناپذیر جانی و مالی به همراه داشته باشد. بنابراین، بررسی در این زمینه و شناخت عوامل تأثیرگذار بر رفتار این‌گونه ورق‌ها، بسیار حائز اهمیت است.

۸- بررسی صحت مدل‌سازی اجزای محدود

از آنجا که نتایج این تحقیق، بر پایه تحلیل‌های عددی که در نرم‌افزار ABAQUS صورت می‌پذیرد، استوار خواهد بود، لازم است در ابتدا برای صحت‌سنجی مدل‌سازی اجزای محدود، به کالیبراسیون (تطبیق‌سازی با معیارهای استاندارد)، پرداخته شود. پایک و همکاران [۳] در

و گروه‌های ۴ تا ۶ (طبق جدول ۷)، نیز مربوط به ورق‌های فولادی نرمه هستند. شایان ذکر است که به جهت تقارن هندسی و نیز تقارن در بارگذاری، یک‌چهارم ورق‌ها مدل‌سازی شده‌اند که این امر به دلیل تسریع در ساخت مدل‌ها و همچنین کاهش زمان تحلیل و پردازش آن‌ها صورت گرفته است.

دارند؛ بنابراین با لحاظ شکل حفرات خوردگی به صورت مخروطی، نیم‌کروی و سیلندری، به بررسی تأثیر شکل حفرات خوردگی بر روی مقاومت نهایی ورق‌ها پرداخته می‌شود. برای این منظور، ۶ گروه که هرکدام دارای ۵ گروهک و هر گروهک نیز دارای ۳ مدل ورق هستند، مطابق با جداول ۶ و ۷، در نظر گرفته شده است. گروه‌های ۱ تا ۳، مربوط به ورق‌های فولادی با مقاومت بالا (طبق جدول ۶)



شکل ۳- مدل‌های اجزای محدود ورق‌ها به همراه شماره مربوط به مدل‌ها

جدول ۴- درصد DOP برای مدل‌ها

مدل‌ها	۱	۲	۳	۴	۵	۶
DOP (%)	۰	۴/۹۱	۹/۶۲	۱۵/۹۰	۲۳/۷۵	۳۳/۲۰

در شکل (۵)، نمونه‌هایی از ورق‌های مدل‌سازی شده که دارای شکل حفرات خوردگی مخروطی، نیمه‌کروی و سیلندری بوده، مربوط به گروهک ۱ از گروه ۱ هستند، ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، به‌دلیل تقارن هندسی و همچنین تقارن در بارگذاری، یک‌چهارم ورق‌ها، مدل‌سازی شده‌اند.

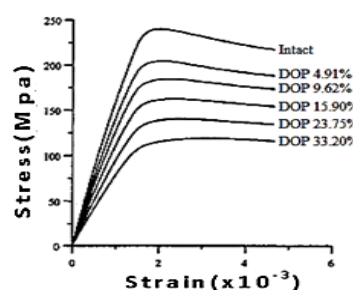
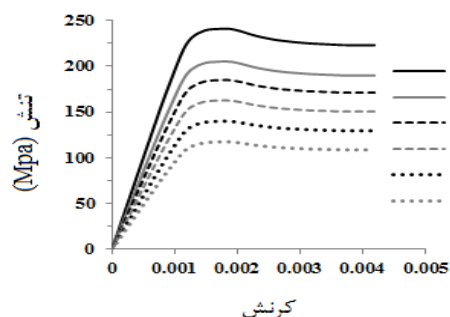
در اشکال (۶) و (۷)، مقاومت نهایی ورق‌های مربوط به هر گروه، به‌صورت نمودارهای ستونی، با درج مقاومت نهایی ورق‌ها در بالای هر ستون، ارائه شده است. شکل (۶) برای گروه‌های ۱ تا ۳ (فولاد با مقاومت بالا) و شکل (۷) نیز برای گروه‌های ۴ تا ۶ (فولاد نرمه) است. محور عمودی نمودارهای ستونی، مقاومت نهایی ورق‌ها و محور افقی نیز، گروهک‌های مربوط به گروه موردنظر را نشان می‌دهد. هریک از گروهک‌ها، متشکل از ۳ نوع ورق (از نظر شکل حفرات خوردگی)، هستند. خاطر نشان می‌شود که در هریک از گروهک‌های مربوط به نمودارهای ستونی ارائه‌شده، ستون سفید، خاکستری و سیاه‌رنگ، به‌ترتیب نمایانگر ورق‌های با خوردگی حفره‌ای سیلندری، مخروطی و نیمه‌کروی هستند.

در هر گروه، ابعاد هندسی، خواص مصالح، حجم خوردگی ورق‌ها و نیز نحوه توزیع حفرات خوردگی در سطح ورق‌ها یکسان بوده، ولی شعاع و عمق حفرات خوردگی در ورق‌ها متفاوت است. در جدول ۵، ابعاد هندسی ورق‌ها ارائه شده است.

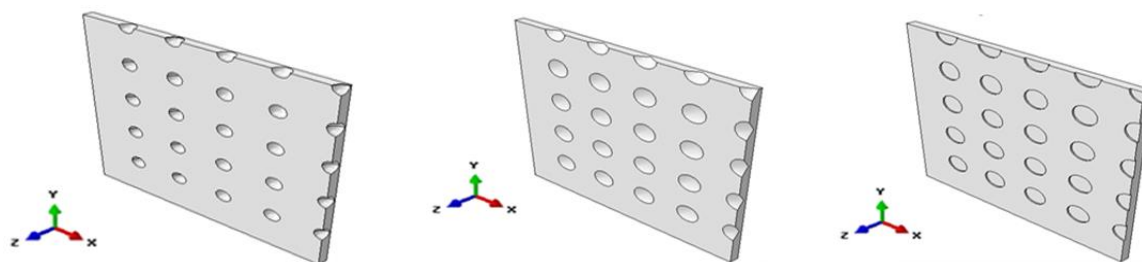
جدول ۵- ابعاد ورق‌ها در ۶ گروه

شماره گروه	طول (m)	عرض (m)	ضخامت (m)
۱	۰/۸	۰/۸	۰/۰۱۵
۲	۱	۱	۰/۰۱۸
۳	۱/۲	۱/۲	۰/۰۲
۴	۰/۸	۰/۸	۰/۰۱۵
۵	۱	۱	۰/۰۱۸
۶	۱/۲	۱/۲	۰/۰۲

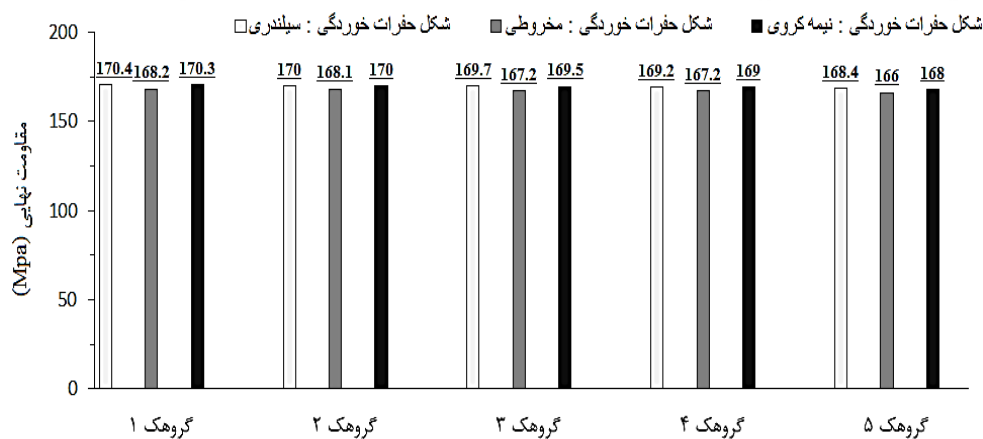
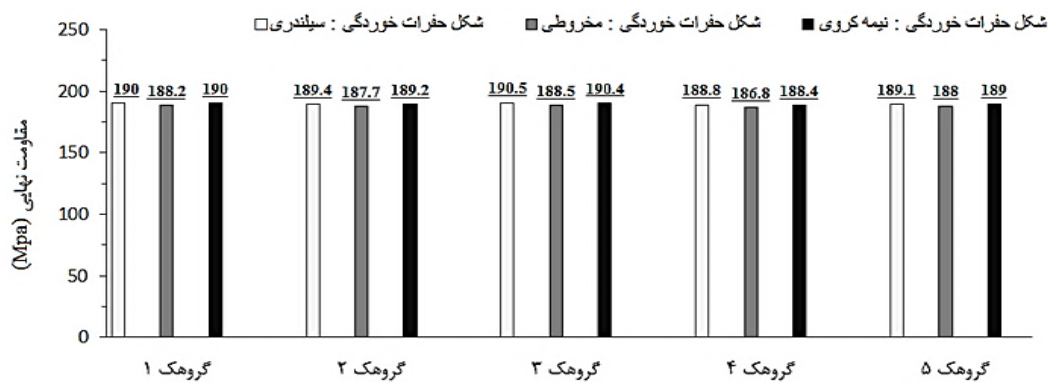
در هر گروه، ابعاد هندسی، خواص مصالح، حجم خوردگی ورق‌ها و نیز نحوه توزیع حفرات خوردگی در سطح ورق‌ها یکسان بوده، ولی شعاع و عمق حفرات خوردگی در ورق‌ها متفاوت است. در جدول ۵، ابعاد هندسی ورق‌ها ارائه شده است.



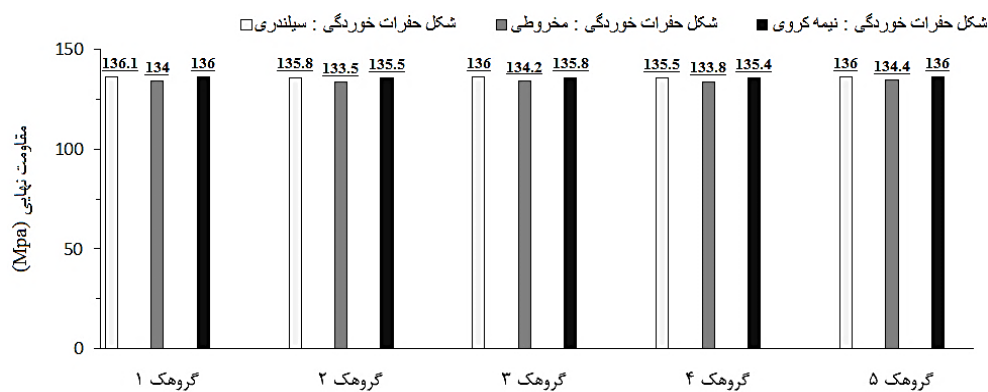
شکل ۴- نمودارهای تنش-کرنش مدل‌ها، (نمودارهای سمت راست، مربوط به نتایج پایک و همکاران و نمودارهای سمت چپ، مربوط به نتایج نگارنده است).



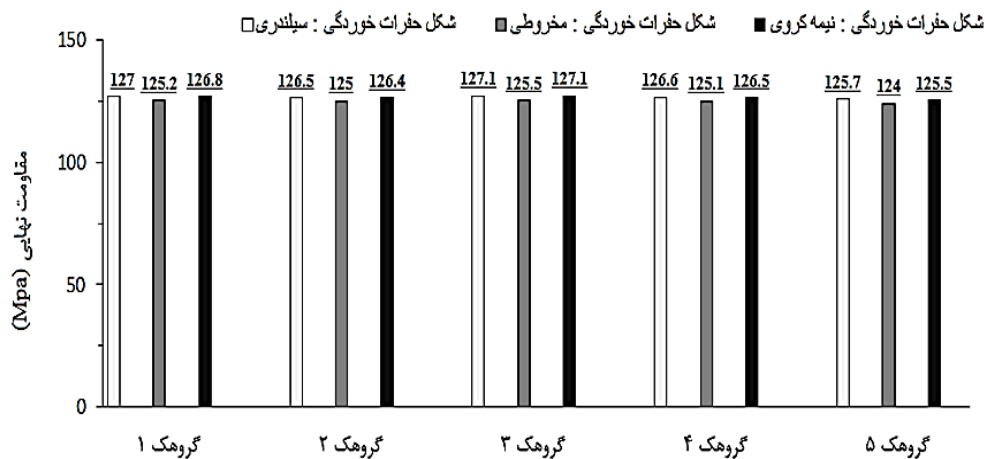
شکل ۵- ورق‌های مدل شده با حفرات خوردگی سیلندری، مخروطی و نیمه‌کروی (به‌ترتیب از راست به چپ)



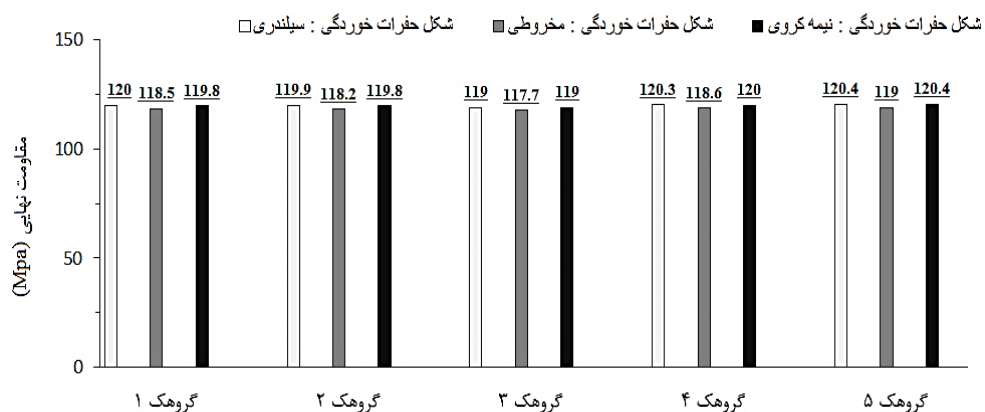
شکل ۶- مقاومت نهایی ورق‌های گروهک‌های پنج‌گانه مربوط به گروه‌های ۱ تا ۳ (ورق‌های فولادی با مقاومت بالا)



شکل ۷- مقاومت نهایی ورق‌های گروهک‌های پنج‌گانه مربوط به گروه‌های ۴ تا ۶ (ورق‌های فولادی نرمه)



گروه ۵



گروه ۶

ادامه شکل ۷- مقاومت نهایی ورق‌های گروهک‌های پنج‌گانه مربوط به گروه‌های ۴ تا ۶ (ورق‌های فولادی نرمه)

بسیار ساده است و پیچیدگی خاصی ندارد. در ضمن در زمان انجام مدل‌سازی نیز صرفه‌جویی می‌شود.

۱۰- تأثیر عمق و چگونگی توزیع حفرات خوردگی در مقاومت نهایی ورق‌ها

برای بررسی اثر عمق و نحوه توزیع حفرات خوردگی در مقاومت نهایی ورق‌ها، یک گروه در نظر گرفته شده است؛ به طوری که طول، عرض و ضخامت ورق‌های آن به ترتیب $0/8$ ، $0/8$ و $0/15$ متر و ورق‌های آن، از نوع فولاد نرمه است. این گروه دارای ۳ گروهک و هر گروهک نیز دارای ۵ مدل است (طبق جدول ۸). این گروه دارای ورق‌های فولادی نرمه با ابعاد و قطر حفرات خوردگی یکسان بوده، حجم‌های خوردگی در هر گروهک، یکسان و توزیع حفرات خوردگی در سطح ورق‌های مربوط به هر گروهک، متفاوت است.

نتایج به دست آمده، نشان می‌دهد که در هر گروهک از گروه مربوط، مقاومت نهایی ورق‌های با حفرات خوردگی مخروطی، نیمه‌کروی و سیلندری با یکدیگر و نیز با مقاومت نهایی ورق‌های گروهک‌های دیگر در آن گروه، تقریباً برابرند. به عبارت دیگر، اگر حجم خوردگی در ورق‌های دارای حفرات خوردگی مخروطی، نیمه‌کروی و سیلندری، با یکدیگر یکسان و ابعاد ورق‌ها، خواص مصالح آن‌ها و نیز نحوه توزیع حفرات خوردگی در سطح ورق‌ها یکی باشد، حتی اگر شعاع و عمق حفرات خوردگی متفاوت باشند، مقاومت نهایی ورق‌ها تقریباً برابر خواهد بود. بنابراین، با توجه به نتایج به دست آمده و نیز از آنجا که مدل‌سازی اشکال خوردگی واقعی (اشکالی شبیه به مخروط و نیم‌کره)، بسیار سخت، پیچیده و وقت‌گیر است، می‌توان از شکل سیلندری، برای مدل‌سازی حفرات خوردگی در ورق‌ها بهره برد؛ چراکه مدل‌سازی حفرات خوردگی به صورت سیلندری،

جدول ۶- گروه‌های مربوط به ورق‌های فولادی با مقاومت بالا، به همراه جزئیات مدل‌سازی آن

گروه ۲

شماره گروهک	شکل حفرات خوردگی	شعاع (mm)	عمق (mm)	DOP (%)
۱	سیلندری	۷	۱۶	۱/۲۵
	مخروطی	۱۹	۶/۵	۹/۱۹
	نیمه‌کروی	۱۰/۵	۱۰/۵	۲/۸۳
۲	سیلندری	۹	۱۵	۲/۰۶
	مخروطی	۱۵	۱۶/۲	۵/۷۲
	نیمه‌کروی	۱۲/۲	۱۲/۲	۳/۸۰
۳	سیلندری	۱۱	۱۰	۳/۰۸
	مخروطی	۱۷	۱۲/۶	۷/۳۵
	نیمه‌کروی	۱۲/۲	۱۲/۲	۳/۷۹
۴	سیلندری	۸	۱۲	۱/۶۳
	مخروطی	۱۵	۱۰/۲	۵/۷۲
	نیمه‌کروی	۱۰/۵	۱۰/۵	۲/۸۰
۵	سیلندری	۱۸	۷	۸/۲۴
	مخروطی	۲۰	۱۷	۱۰/۱۸
	نیمه‌کروی	۱۵	۱۵	۵/۷۶

گروه ۱

شماره گروهک	شکل حفرات خوردگی	شعاع (mm)	عمق (mm)	DOP (%)
۱	سیلندری	۱۹	۱	۲۹/۹۵
	مخروطی	۱۸	۳/۳	۲۶/۸۸
	نیمه‌کروی	۸/۱	۸/۱	۵/۵۱
۲	سیلندری	۷	۱۴	۴/۰۶
	مخروطی	۱۹	۵/۷	۲۹/۹۵
	نیمه‌کروی	۱۰/۱	۱۰/۱	۸/۴۵
۳	سیلندری	۱۸	۳	۲۶/۸۸
	مخروطی	۱۷	۱۰/۱	۲۳/۹۷
	نیمه‌کروی	۱۱/۳	۱۱/۳	۱۰/۶۷
۴	سیلندری	۱۶	۴	۲/۲۴
	مخروطی	۱۴/۵	۱۴/۶	۱۷/۴۴
	نیمه‌کروی	۱۲	۱۲	۱۱/۰۴
۵	سیلندری	۱۳	۱۰	۱۴/۰۲
	مخروطی	۱۹	۱۴	۲۹/۹۵
	نیمه‌کروی	۱۳/۶	۱۳/۶	۱۵/۴۲

گروه ۳

شماره گروهک	شکل حفرات خوردگی	شعاع (mm)	عمق (mm)	DOP (%)
۱	سیلندری	۲۰	۵	۲/۱۸
	مخروطی	۱۸	۱۸/۵	۱/۷۷
	نیمه‌کروی	۱۴/۴	۱۴/۴	۱/۱۳
۲	سیلندری	۱۸	۷	۱/۷۷
	مخروطی	۱۹	۱۸/۸	۱/۹۷
	نیمه‌کروی	۱۵	۱۵	۱/۲۳
۳	سیلندری	۱۵	۸	۱/۲۳
	مخروطی	۱۷	۱۸/۷	۱/۵۸
	نیمه‌کروی	۱۳/۹	۱۳/۹	۱/۰۶
۴	سیلندری	۱۲	۱۰	۰/۷۸
	مخروطی	۱۶	۱۶/۹	۱/۴۰
	نیمه‌کروی	۱۲/۹	۱۲/۹	۰/۹۱
۵	سیلندری	۶	۱۲	۰/۲۰
	مخروطی	۹	۱۶	۰/۴۴
	نیمه‌کروی	۸/۶	۸/۶	۰/۴۱

جدول ۷- گروه‌های مربوط به ورق‌های فولادی نرمه، به همراه جزییات مدل‌سازی آن

گروه ۵

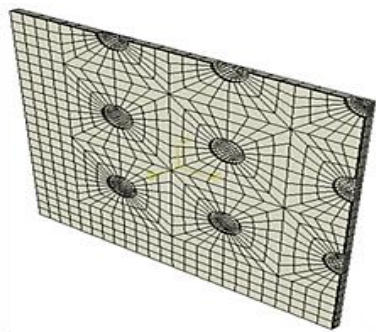
شماره گروهک	شکل حفرات خوردگی	شعاع (mm)	عمق (mm)	DOP (%)
۱	سیلندری	۱۲	۱	۳/۶۶
	مخروطی	۱۴	۲/۲	۴/۹۹
	نیمه‌کروی	۶	۶	۰/۹۲
۲	سیلندری	۱۴	۴	۴/۹۹
	مخروطی	۱۶	۹/۲	۶/۵۱
	نیمه‌کروی	۱۰/۵	۱۰/۵	۲/۸۳
۳	سیلندری	۱۵	۶	۵/۷۲
	مخروطی	۱۷	۱۴	۷/۳۵
	نیمه‌کروی	۱۲/۶	۱۲/۶	۴/۰۷
۴	سیلندری	۱۶	۸	۶/۵۱
	مخروطی	۱۸/۸	۱۷/۴	۸/۹۹
	نیمه‌کروی	۱۴/۵	۱۴/۵	۵/۳۸
۵	سیلندری	۱۶/۵	۸/۵	۶/۹۳
	مخروطی	۲۰	۱۷/۳	۱۰/۱۸
	نیمه‌کروی	۱۵	۱۵	۵/۸۳

گروه ۴

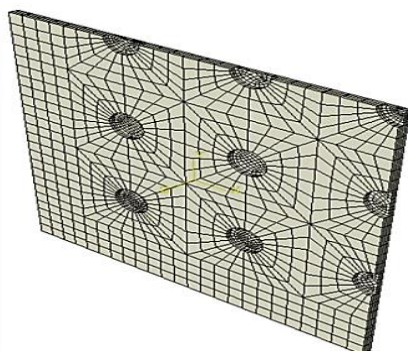
شماره گروهک	شکل حفرات خوردگی	شعاع (mm)	عمق (mm)	DOP (%)
۱	سیلندری	۱۰	۱/۵	۸/۳
	مخروطی	۲۰	۱/۱	۳۳/۱۸
	نیمه‌کروی	۶/۱	۶/۱	۳/۰۷
۲	سیلندری	۱۲	۳	۱۱/۹۵
	مخروطی	۱۹	۳/۶	۲۹/۹۵
	نیمه‌کروی	۸/۶	۸/۶	۶/۲۱
۳	سیلندری	۱۴	۴/۵	۱۶/۲۶
	مخروطی	۱۸	۸/۲	۲۶/۸۸
	نیمه‌کروی	۱۱	۱۱	۱۰
۴	سیلندری	۱۵	۶	۱۸/۶۶
	مخروطی	۱۷	۱۴	۲۳/۹۷
	نیمه‌کروی	۱۲/۶	۱۲/۶	۱۳/۲۸
۵	سیلندری	۱۶	۷/۵	۲۱/۲۴
	مخروطی	۱۶	۲۲/۵	۲۱/۲۴
	نیمه‌کروی	۱۴/۲	۱۴/۲	۱۶/۷۹

گروه ۶

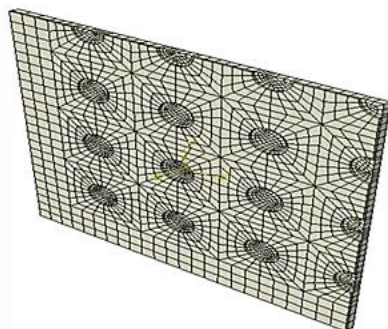
شماره گروهک	شکل حفرات خوردگی	شعاع (mm)	عمق (mm)	DOP (%)
۱	سیلندری	۱۱	۳	۰/۶۶
	مخروطی	۱۲	۷/۶	۰/۷۸
	نیمه‌کروی	۸/۲	۸/۲	۰/۳۶
۲	سیلندری	۱۳	۶	۰/۹۲
	مخروطی	۱۴	۱۵/۵	۱/۰۷
	نیمه‌کروی	۱۱/۵	۱۱/۵	۰/۷۲
۳	سیلندری	۱۴	۷	۱/۰۷
	مخروطی	۱۵	۱۸/۳	۱/۲۳
	نیمه‌کروی	۱۲/۷	۱۲/۷	۰/۸۸
۴	سیلندری	۸	۱۵	۰/۳۵
	مخروطی	۱۸	۸/۹	۱/۷۷
	نیمه‌کروی	۱۱/۳	۱۱/۳	۰/۶۹
۵	سیلندری	۱۰	۱۸	۰/۵۴
	مخروطی	۲۰	۱۳/۵	۲/۱۸
	نیمه‌کروی	۱۳/۹	۱۳/۹	۱/۰۶



مدل ۱ از گروهک ۱



مدل ۱ از گروهک ۲



مدل ۲ از گروهک ۳

شکل ۸- نمایش تعدادی از مدل‌ها به صورت اجزای محدود

۱۱- آنالیز حساسیت

فرآیند آنالیز حساسیت، اطلاعات ارزشمندی درباره میزان حساسیت مدل به متغیرهای ورودی، در اختیار طراح و معمار مدل قرار می‌دهد. با شناسایی میزان تأثیر متغیرهای ورودی، می‌توان متغیرهای کم‌اثر را از شبکه حذف و مدلی ساده‌تر را بسط و توسعه داد. در بررسی مقاومت نهایی ورق‌های همراه با خوردگی حفره‌ای که تحت تنش فشاری تک‌محوره قرار دارند، شناسایی پارامترهای تأثیرگذار بر

شایان ذکر است با توجه به نتیجه به دست آمده، در این قسمت، از حفرات خوردگی سیلندری بهره برده می‌شود. به دلیل تقارن هندسی و همچنین تقارن در بارگذاری، مدل‌ها به صورت یک چهارم ورق، در نظر گرفته شده‌اند. در شکل ۸، مدل اجزای محدود ۳ ورق ارائه شده است که با عمق‌ها و درصد DOP‌های گوناگون همراه‌اند.

جدول ۸- یک گروه با ۳ گروهک و دارای ورق‌های فولادی

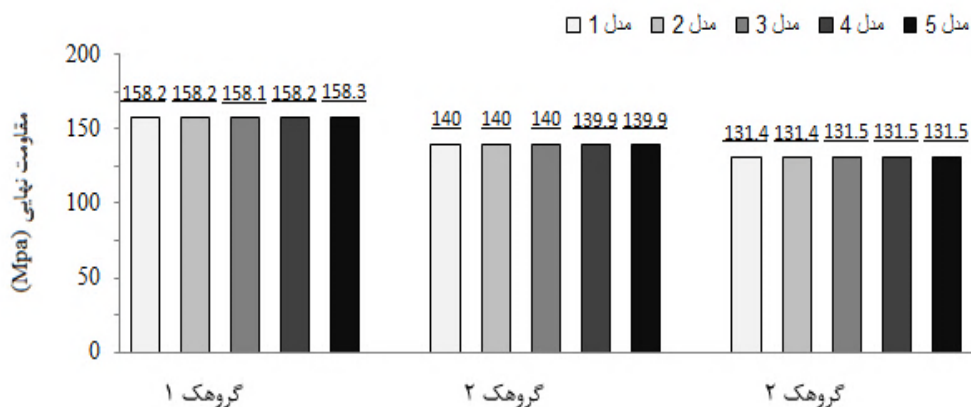
نرمه، به همراه جزئیات مربوط به مدل‌سازی

شماره گروهک	شماره مدل	عمق حفرات (m)	شعاع حفرات (m)	DOP (%)
۱	۱	۰/۰۱۲	۰/۰۲	۴/۹۱
	۲	۰/۰۰۶۱	۰/۰۲	۹/۶۲
	۳	۰/۰۰۳۷	۰/۰۲	۱۵/۹۰
	۴	۰/۰۰۲۵	۰/۰۲	۲۳/۷۵
	۵	۰/۰۰۱۸	۰/۰۲	۳۳/۲۰
۲	۱	۰/۰۱۴۵	۰/۰۲	۴/۹۱
	۲	۰/۰۰۷۴	۰/۰۲	۹/۶۲
	۳	۰/۰۰۴۵	۰/۰۲	۱۵/۹۰
	۴	۰/۰۰۰۳	۰/۰۲	۲۳/۷۵
	۵	۰/۰۰۲۱	۰/۰۲	۳۳/۲۰
۳	۱	۰/۰۱۳۷	۰/۰۲	۴/۹۱
	۲	۰/۰۰۰۷	۰/۰۲	۹/۶۲
	۳	۰/۰۰۴۲	۰/۰۲	۱۵/۹۰
	۴	۰/۰۰۲۸	۰/۰۲	۲۳/۷۵
	۵	۰/۰۰۰۲	۰/۰۲	۳۳/۲۰

همان گونه که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، مقاومت نهایی ورق‌ها، به صورت نمودار ستونی ارائه شده است؛ به گونه‌ای که محور عمودی، مقاومت نهایی ورق‌ها و محور افقی نیز گروهک‌های موردنظر را نشان می‌دهد. هر یک از گروهک‌ها، متشکل از ۵ نوع ورق است. در هر یک از گروهک‌های مربوط به نمودار ستونی ارائه شده، هر ستون، بیانگر مقاومت نهایی یکی از مدل‌ها است؛ به گونه‌ای که از ستون سفید به سمت ستون سیاه، به ترتیب، مدل‌های ۱ تا ۵ را در بر می‌گیرند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که در هر گروهک، در صورتی که ابعاد هندسی، حجم خوردگی و قطر حفرات خوردگی در ورق‌ها، یکسان باشند، با وجود تغییر در عمق و چگونگی توزیع حفرات خوردگی، شاهد مقاومت نهایی تقریباً یکسانی برای ورق‌ها خواهیم بود.

که پارامتر تنش تسلیم و طول ورق، به ترتیب، بیشترین و کمترین تأثیر را بر مقاومت نهایی دارند. علاوه بر پارامترهای تنش تسلیم، ضخامت و عرض ورق، پارامتر حجم خوردگی نیز تأثیر قابل توجهی بر مقاومت نهایی ورق‌های خوردده شده، از خود به جا می‌گذارد.

مقاومت نهایی آن‌ها بسیار مهم و ضروری است. بنابراین، با توسعه مدل‌های اجزای محدود مناسب، به تعیین این پارامترها پرداخته شد. همان‌گونه که در شکل (۱۰)، مشاهده می‌شود، از پارامتر تنش تسلیم تا پارامتر طول ورق (از چپ به راست در شکل ۱۰)، سیر نزولی تأثیرگذاری بر مقاومت نهایی ورق‌های خوردده شده، حاکم است؛ به طوری



شکل ۹- مقاومت نهایی مربوط به ورق‌های فولادی



شکل ۱۰- نتایج آنالیز حساسیت

۱. مقاومت نهایی ورق‌های با خوردگی حفره‌ای که تحت تنش فشاری تک‌محوره قرار دارند، به حجم خوردگی، وابستگی بسیاری نشان می‌دهد.

۲. در صورتی که حجم خوردگی در ورق‌های دارای حفرات خوردگی سیلندری با حجم خوردگی در ورق‌های دارای حفرات خوردگی مخروطی و یا نیم‌کروی، برابر بوده، همچنین، ابعاد هندسی و خواص مصالح و نیز نحوه توزیع حفرات خوردگی در سطح ورق‌ها با یکدیگر، یکسان باشد، حتی با وجود تفاوت در شعاع و عمق حفرات خوردگی در

۱۲- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، با تکیه بر روش اجزای محدود و سعی در توسعه منطقی و مناسب مدل‌ها، به بررسی تأثیر خوردگی حفره‌ای بر روی ظرفیت باربری نهایی ورق‌های تحت تنش فشاری تک‌محوره پرداخته شد و تأثیر شکل، عمق، قطر و چگونگی توزیع حفرات خوردگی و نیز ابعاد ورق‌ها برای دو نوع ورق فولادی نرم و با مقاومت بالا مورد ارزیابی قرار گرفت. در نهایت، نتایج حاصل شده، به صورت زیر ارائه می‌شود:

۳. در صورتی که ابعاد هندسی، خواص مصالح ورق‌ها، حجم خوردگی و نیز قطر حفرات خوردگی در ورق‌ها یکسان، ولی عمق و نحوه توزیع حفرات در سطح ورق‌ها متفاوت باشد، شاهد مقاومت نهایی تقریباً یکسانی برای ورق‌ها خواهیم بود.

۴. با توسعه مدل‌های اجزای محدود مناسب، به تعیین پارامترهای اثرگذار بر مقاومت نهایی ورق‌های خورده‌شده، پرداخته شد که پارامتر تنش تسلیم و پارامتر طول ورق به ترتیب، بیشترین و کمترین تأثیر را بر مقاومت نهایی ورق‌ها داشتند. علاوه بر پارامترهای تنش تسلیم، ضخامت و عرض ورق، پارامتر حجم خوردگی، تأثیری قابل توجه بر مقاومت نهایی ورق‌های خورده‌شده، از خود به جا می‌گذارد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند، از حمایت‌های بی‌دریغ دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان تشکر و قدردانی کنند.

ورق‌ها، مقاومت نهایی ورق‌ها، تقریباً با یکدیگر برابر خواهد بود. البته مقاومت نهایی ورق‌های با حفرات خوردگی نیم‌کروی و سیلندری، بسیار به یکدیگر نزدیک بوده، اختلاف آن‌ها کمتر از ۱ مگاپاسکال است که در همه موارد، مقاومت نهایی ورق‌های با حفرات خوردگی سیلندری بیشتر از مقاومت نهایی ورق‌های با حفرات خوردگی نیم‌کروی است. ولی مقاومت نهایی ورق‌های با حفرات خوردگی مخروطی در حدود ۱ تا ۲ مگاپاسکال، از آن دو کمتر است. بنابراین، از آنجا که مدل‌سازی اشکال خوردگی واقعی (اشکالی شبیه به مخروط و نیم‌کره)، بسیار سخت، پیچیده و وقت‌گیر است، می‌توان از شکل سیلندری، برای مدل‌سازی حفرات خوردگی در ورق‌ها بهره برد؛ چراکه مدل‌سازی حفرات خوردگی به صورت سیلندری بسیار ساده بوده، پیچیدگی خاصی ندارد. در ضمن، در زمان انجام مدل‌سازی نیز صرفه‌جویی می‌شود.

واژه‌نامه

Non-linear finite element analyses
Uniaxial compressive stresses
Yield strength
Pitting corrosion
Uniform corrosion
Simulation
Boundary condition
Thickness
Poisson ratio
Length
Breadth
Young modulus
Ultimate strength

تحلیل غیرخطی المان محدود
تنش‌های فشاری تک‌محوره
تنش تسلیم
خوردگی حفره‌ای
خوردگی یکنواخت
شبیه‌سازی
شرایط مرزی
ضخامت
ضریب پواسون
طول
عرض
مدول یانگ
مقاومت نهایی

مراجع

- [1] Y. Pu, "Prediction of ultimate capacity of perforated lipped channels", Journal of Structural Engineering, Vol. 125, 1999, PP. 510–514.
- [2] J.K. Paik, A.K. Thayamballi, Ultimate Limit State Design of Steel-Plated Structures, Wiley, New York, 2003.
- [3] J.K. Paik, J.M. Lee and M.J. Ko, "Ultimate compressive strength of plate elements with pit corrosion wastage", Journal of Engineering for the Maritime Environment, Vol. 217, 2003, PP. 185–200.
- [4] TSCF Experimental and theoretical investigation of the strength of corroded hull elements, Tanker Structure Co-operative Forum, Project 300, Report 84-3438, 1984.

[5] T. Nakai, H. Matsushita and N. Yamamoto, "Effect of pitting corrosion on local strength of hold frames of the bulk carriers (2nd report)-lateral distortional buckling and local face buckling", Marine Structures, Vol. 17, Issue 8, December 2004, pp. 612-641

[6] T. Nakai, H. Matsushita and N. Yamamoto, "Pitting corrosion and its influence on local strength of hull structural members", 24th international conference on offshore mechanics and arctic engineering, Halkidiki, Greece, January 2005.

[7] J.K. Paik and A.k. Thayamballi, "Ultimate strength of ageing ships", Journal Engineering for the Maritime Environment, Vol. 216, 2005, PP. 57-77.

[8] J.C. Daidila, J. Prente, I.R. Orisamolu and K.T. Ma, "Residual strength assesement of pitted plate panels". Ship Structure Committee Report SSC-394, 1997.

[۹] ع. حیدری، د. توکلی و پ. فخاریان، «تقریب مقادیر ویژه ورق با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، سال ۱۱، شماره ۳۵، زمستان ۱۳۹۲، صفحه ۴۹-۶۲.

[۱۰] ا. خدمتی بازکیایی، ح. دهقان طرزجانی و ن. محمدی، «بررسی ارتعاشات آزاد ورق نازک مواد مدرج تابعی بر بستر الاستیک وینکلر به کمک روش المان کوادراچر دیفرانسیلی»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، سال ۱۵، شماره ۴۹، تابستان ۱۳۹۶، صفحه ۸۹-۹۹.

[۱۱] م. حیدری رارانی، ش. حسینی و ک. ترابی، «حل دقیق برای معادلات فرکانسی ارتعاشات آزاد شعاعی و عرضی یک ورق دایره‌ای با شرایط مرزی مختلف»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، سال ۱۵، شماره ۵۰، پاییز ۱۳۹۶، صفحه ۱۶۹-۱۷۸.