

## استحکام نهایی ورق تقویت شده تحت خوردگی حفره‌ای و ترک مورب تحت فشار تگ‌سویه

احمد رهبر رنجی<sup>۱</sup>، مصطفی کاظمی<sup>۲\*</sup> و میلاد مهدیان پور<sup>۳</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۰/۲۹ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۴/۲۲	<p>یک سازه در طول عمر خود دچار عیوبی می‌شود که باید نقش آن‌ها در استحکام سازه‌ای مورد بررسی قرار گیرد. از جمله این عیوب سازه‌ای، ترک‌های سازه‌ای و خوردگی است که در اثر عوامل مختلف به وجود می‌آیند و گسترش می‌یابند. پیش‌بینی استحکام نهایی ورق‌های خوردده شده و دارای ترک، یک موضوع مهم برای تخمین عمر سازه‌هاست. در این مطالعه، از روش غیرخطی اجزای محدود (FEM) برای تحلیل استحکام نهایی ورق فولادی تقویت شده با خوردگی حفره‌ای و ترک استفاده شده است. پارامترهای مؤثر شامل طول ترک، زاویه ترک، چگالی خوردگی حفره‌ای و تعداد حفره‌هاست. نتایج نشان می‌دهد که استحکام نهایی با افزایش طول ترک و افزایش زاویه ترک نسبت به لبه بارگذاری شده، کاهش می‌یابد. کاهش استحکام نهایی در ورق متوسط، به DOP و تعداد حفره بستگی دارد. همچنین در تأثیر هم‌زمان این عیوب، کاهش استحکام نهایی ورق منجر به قانون جمع آثار نمی‌شود.</p>
<p><b>واژگان کلیدی:</b> استحکام نهایی، ترک مورب، خوردگی حفره‌ای، ورق تقویت شده.</p>	

### ۱- مقدمه

سازه‌ای همچون کشتی پس از مدتی در طول عمر خود دچار عیوبی می‌شود که استحکام آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد. از جمله این آسیب‌ها وجود ترک و خوردگی است. هرکدام از این آسیب‌ها به نوبه خود باعث کاهش استحکام نهایی سازه می‌شود. خوردگی با توجه به نوع آن، تأثیر خود را بر روی استحکام نهایی می‌گذارد و ترک نیز با توجه به اینکه تحت بار متناوب یا ثابت باشد، استحکام نهایی را کاهش می‌دهد. پیش‌بینی استحکام نهایی سازه‌های دارای عیوب برای نظارت بر سالم بودن و تعمیر آن‌ها امری مهم تلقی می‌شود. تحلیل استحکام نهایی در ورق‌های خوردده شده و دارای ترک موضوعی است که در سال‌های گذشته توسط پژوهشگران زیادی مورد بررسی قرار گرفته

است. از اولین بررسی‌ها می‌توان به چاپی کس (۱۹۶۷) اشاره کرد که تأثیر خوردگی حفره‌ای بر استحکام نهایی ورق را مطالعه و مفهوم ضخامت معادل را برای صفحات حفره‌دار معرفی کرد [۱]. پیک و همکاران (۲۰۰۳-۲۰۰۴) استحکام نهایی المان‌های ورق با خوردگی حفره‌ای تحت بارگذاری فشاری و برشی را مطالعه کردند [۲]. سعدالدین و سوارز (۲۰۰۹) فروپاشی ورق‌ها را تحت بار فشاری با تحلیل اجزای محدود غیرخطی با خوردگی‌های مختلف انجام دادند و فرمولی را به منظور پیش‌بینی کاهش استحکام نهایی به دست آوردند [۳]. نوری و خدمتی (۲۰۱۰) تأثیر توزیع تصادفی خرابی خوردگی عمومی را بر استحکام نهایی و رفتار ورق‌های تقویت شده و تقویت نشده فولادی که تحت فشار طولی قرار داشتند، بررسی کرده، رابطه‌ای را برای

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: kazemi-m@aut.ac.ir

۱. دانشیار، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲. کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

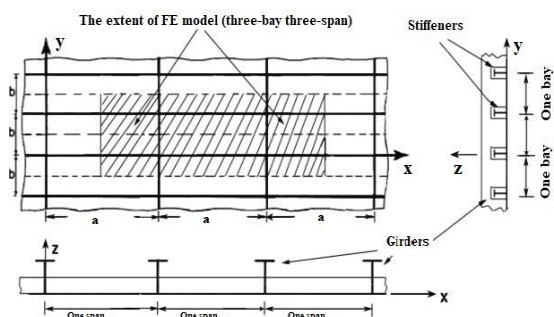
۳. کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

خورده‌شده با انواع مختلف حفره و شکل واقعی آن به‌صورت مخروطی و همچنین ترک مورب با زوایای مختلف مورد بررسی قرار نگرفته است. هدف اصلی این مقاله، تعیین استحکام نهایی باقیمانده بر ورق تقویت‌شده با آسیب از نوع خوردگی حفره و ترک مورب است.

## ۲- مدل اجزای محدود

### ۲-۱- مدل اجزای محدود از ورق تقویت‌شده دارای حفره

ورق‌های تقویت‌شده، از اجزای اصلی سازه‌های دریایی از جمله کشتی و سازه‌های فراساحل هستند که ورق‌های نازک تقویت‌شده با تقویت‌کننده‌های نسبتاً ضعیف یک‌طرفه و شاه‌تیرهای قوی را شامل می‌شوند. مدل یائو و همکاران (۱۹۹۸) مبنای انجام آنالیز المان محدود در نرم‌افزار آباکوس<sup>۱</sup> مطابق با شکل ۱ انتخاب شده است. در هر دو لبه طولی و عرضی از مدل، شرایط پیوسته دوره‌ای در نظر گرفته شده است [۱۴]. شاه‌تیرهای عرضی مدل‌سازی نشده اند و تأثیر آن‌ها با محدود کردن اعوجاج ورق و تقویت‌کننده در امتداد خطوط شاه‌تیرهای عرضی در جهت عمودی و جانبی به‌ترتیب در نظر گرفته شده است [۱۵]. فشار یکنواخت بر عرضی اعمال شده است.



شکل ۱- ورق تقویت‌شده، سیستم مختصات و مدل سه‌دهانه از FE [۱۴]

برای شبیه‌سازی رفتار مواد در ناحیه پلاستیک در این مقاله، از مدل الاستیک-پلاستیک خطی استفاده شده است. فولاد در نظر گرفته شده، تنش تسلیم  $313/6 \text{ MPa}$ ، مدول الاستیسیته  $205/8 \text{ GPa}$ ، نسبت پواسون  $0/3$  و سختی کرنشی  $\frac{E}{65}$  دارد.

عیوب اولیه در سازه‌های فولادی ناشی از فرایند ساخت،

تخمین استحکام نهایی ورق‌های خورده‌شده پیشنهاد دادند [۴]. ژیانگ و سوارز (۲۰۱۱) اثر خوردگی را بر روی استحکام نهایی صفحات مستطیلی از جنس فولاد بررسی کردند. نتایج نشان داد که اثر تخریبی توزیع حفره‌ها به‌صورت یک‌طرفه نسبت به توزیع دوطرفه حفره‌ها به‌طور نامحسوسی بیشتر است [۵]. رهبر و باروکیان (۲۰۱۴) اثر ترک عرضی بر روی استحکام نهایی ورق تقویت‌شده تحت فشار درون‌صفحه‌ای تک‌سویه را مورد بررسی قرار دادند [۶]. رهبر و همکاران (۲۰۱۵) به‌صورت عددی به بررسی اثر خوردگی حفره‌ای بر روی استحکام نهایی ورق‌های فولادی تقویت‌شده پرداختند و نتیجه گرفتند که با افزایش نسبت عمق حفره به ضخامت ورق، استحکام کاهش می‌یابد [۷]. چونگ کوی و همکاران (۲۰۱۶) به‌صورت عددی، اثر سه نوع مختلف ترک (طولی، عرضی و مورب) را بر استحکام نهایی ورق‌های فولادی مورد بررسی قرار دادند [۸]. چونگ کوی و همکاران (۲۰۱۷) مجموعه‌ای از تحلیل‌های غیرخطی را در راستای اثر ترک بر استحکام نهایی ورق‌های تقویت‌شده انجام دادند. در این پژوهش، نقش پارامترهایی از قبیل طول ترک و موقعیت آن بر قطعه و ضخامت ورق بر استحکام نهایی ورق تقویت‌شده مورد بررسی قرار گرفت [۹]. سوارز و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی استحکام نهایی ورق تقویت‌شده با خوردگی حفره‌ای تحت فشار تک‌سویه به‌صورت عددی و تجربی پرداختند. نتایج نشان داد که با افزایش حجم از دست‌رفته، استحکام کاهش می‌یابد [۱۰]. عاقبتی و شریفی (۲۰۱۸) به بررسی تعیین مقاومت نهایی ورق‌های فولادی که در حالات گوناگون از حجم خوردگی قرار دارند، پرداختند در این پژوهش، تنش فشاری و ضخامت ورق، بیشترین تأثیر را بر مقاومت نهایی ورق دارند [۱۱]. حیدری و همکاران (۲۰۱۴) به بررسی تقریب مقادیر ویژه ورق با استفاده از شبکه مصنوعی پرداختند که نتایج قابل‌قبولی از پارامترهای ورق و مقایسه آن با مدل اجزای محدود به دست آمد [۱۲]. رارانی و همکاران (۲۰۱۷) معادلات فرکانسی یک ورق دایره‌ای را با سه تکیه‌گاه مختلف استخراج نموده، فرکانس حاصل را با استفاده از نتایج المان محدود مقایسه کردند [۱۳]. علی‌رغم وجود تحقیقات بسیار در زمینه استحکام نهایی ورق‌های خورده‌شده و دارای ترک، استحکام نهایی ورق‌های

<sup>1</sup> Abaqus

ستون همانند شکل (۲-الف) و (۲-ج) مطابق رابطه (۳) داشته باشند.

$$W_{os}(x) = 0/001 \frac{a}{h_w} \left( \frac{\pi x}{a} \right) \quad (3)$$

حفره، یک خوردگی موضعی در فرم سوراخ‌های عمیق بوده، هر حفره دارای شکل و عمق منحصر به فرد است. با توجه به سیستم محیط فلزی، می‌توان انواع مختلفی از الگوهای خوردگی را انتظار داشت. به‌عنوان یک روش رایج و معمول، به‌جای مدل‌سازی حفره‌های تکی، گروهی از آسیب‌های حفره در نزدیکی یکدیگر با شکل مخروطی دارای نسبت قطر به عمق ۱۰:۱ انتخاب گردیده و عمق حفره‌ها برابر با ۴ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. مخروط با پنج دایره تشکیل گردیده و فاصله هر دایره ۰/۸ در نظر گرفته شده است. مقدار Offset ratio طبق رابطه (۴) برای هر مقطع دایره در نظر گرفته شده است.

$$\text{Offset ratio}(i) = \frac{t_0 - t_i}{2t_i} \quad (4)$$

که در آن،  $t_0$  ضخامت ورق و  $t_i$  ضخامت دایره‌های کوچک‌تر است. معمولاً، اندازه آسیب‌های حفره‌ای با استفاده از  $DOP^1$  که به‌صورت رابطه (۵) برابر با نسبت مساحت خورده‌شده در کل سطح ورق تعریف می‌شود.

$$DOP = \frac{n_{pit} A_{pit}}{ab} \quad (5)$$

$$A_{pit} = \frac{\pi D_{pit}^2}{4}$$

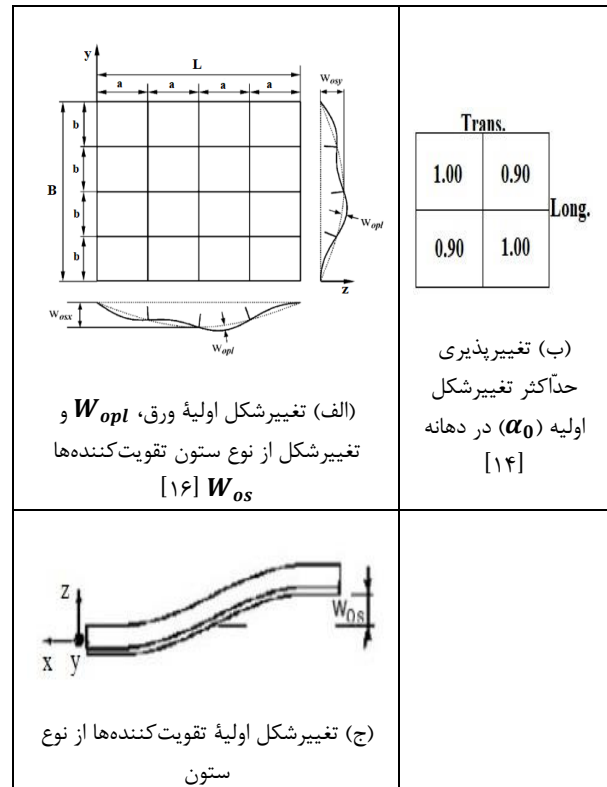
که در آن،  $A_{pit}$  مساحت هر حفره،  $n$  تعداد حفره و  $a$  و  $b$  ابعاد ورق است. شکل (۳) توزیع حفره‌های مختلف را در یک ورق کشتی تانکر سوخت با  $DOP$  برابر با ۰/۱۰، ۰/۲۰، ۰/۳۰ و ۰/۵۰ نشان می‌دهد.

ورق با خوردگی حفره‌ای می‌تواند به‌صورت المان‌های Shell و Solid مدل‌سازی شود. رهبر (۲۰۱۳) نشان داد که استفاده از المان‌های Shell و Solid برای آنالیز ورق‌های خورده‌شده، نتایج مشابهی دارد [۱۷].

در این مقاله از المان Shell برای مدل‌سازی ورق استفاده شده است که جزء S4R برای تحلیل انتخاب شده است. این جزء دارای چهار گره است که هرکدام از آن‌ها شش درجه آزادی دارند. با توجه به این موضوع، برای مدل‌سازی حفره‌ها به‌صورت مخروطی‌شکل از تکنیک مدل‌سازی لایه

مانند برش و جوشکاری، امری اجتناب‌ناپذیر است. در میان آن‌ها تنش پسماند و اعوجاج اولیه بیشتر رایج است. در این مطالعه، اثر تنش پسماند در نظر گرفته نشده، اما تغییرشکل‌های اولیه در نظر گرفته شده است.

### ۲-۱-۱- تغییرشکل اولیه ورق بین تقویت‌کننده‌ها



شکل ۲- انواع تغییرشکل در ورق تقویت‌شده

ورق تقویت‌شده بین دو تقویت‌کننده طولی و شاه‌تیرهای عرضی مطابق شکل (۲-الف) تغییرشکل رابطه (۱) دارند.

$$W_{opt}(x, y) = 0/05 \alpha_0 \beta^2 t s \sin\left(\frac{3\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{b}\right) \quad (1)$$

که در آن،  $\alpha_0$  حداکثر تغییرشکل از دو دهانه،  $a$  طول ورق،  $b$  عرض ورق و  $\beta$  ضریب لاغری ورق است که از رابطه (۲) به دست می‌آید.

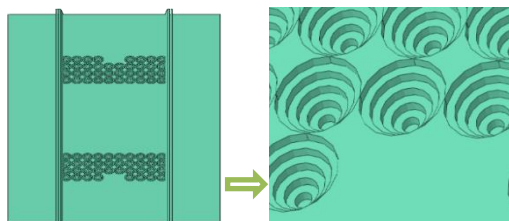
$$\beta = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_{YP}}{E}} \quad (2)$$

که در آن،  $t$  ضخامت ورق،  $E$  مدول الاستیسیته و  $\sigma_{YP}$  تنش تسلیم است. در شکل (۲-ب)  $\alpha_0$  بیشترین تغییرشکل اولیه را در پانل‌های مجاور نشان می‌دهد.

۲-۱-۲- تغییرشکل اولیه تقویت‌کننده‌ها از نوع ستون تقویت‌کننده‌ها می‌توانند تغییرشکل اولیه به شکل کمانش

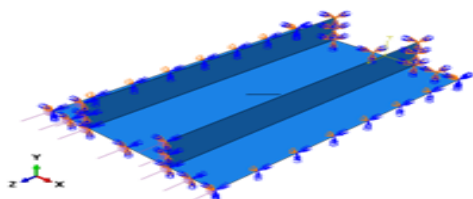
<sup>1</sup> Density of pitting corrosion

به لایه براساس الگوی اسلامی مجد و رهبر [۱۸] استفاده شده است.

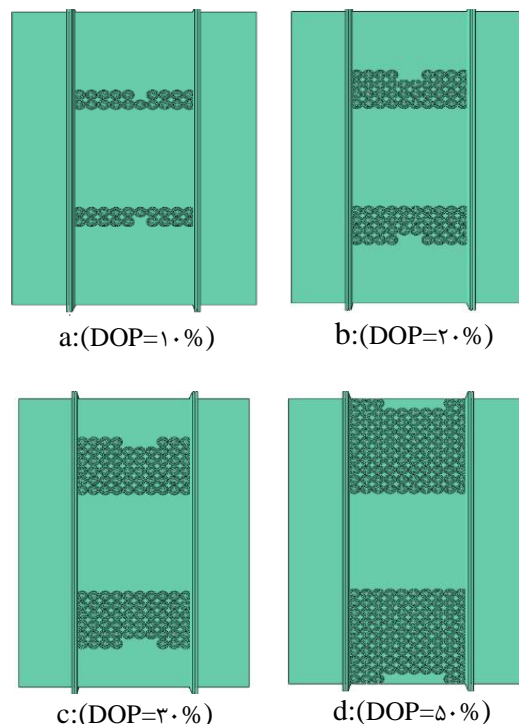


شکل ۵- حفره مدل سازی شده در نرم افزار المان محدود

این فاصله در ترک واقعی بسیار کم و قابل صرف نظر است؛ اما در مدل سازی المان محدود باید یک فاصله درز مصنوعی در نظر گرفت. در مدل های بررسی شده در این مقاله، طبق تعدادی از بررسی های آماری، درز ترک به اندازه ۰/۰۱ طول ترک در نظر گرفته شده است. با توجه به ماهیت تکین بودن معادلات مکانیک شکست در نوک ترک<sup>۲</sup>، برای تحلیل های مکانیک شکست باید از المان های خاصی استفاده شود که قابلیت حل معادلات تکین را داشته باشد. در خصوص استحکام نهایی و استحکام کمانشی سازه های دارای ترک، نیازی به استفاده از المان با قابلیت حل معادلات تکین نیست و المان های معمولی ورق مورد استفاده قرار گرفته است. شکل (۶) نشان دهنده ترک مدل سازی شده همراه با شرایط مرزی در نرم افزار المان محدود است. در مدل های بررسی شده، موقعیت مکانی ترک مورب در مرکز ورق تقویت شده است که در این مقاله، طول ترک ۴۰، ۱۲۰ و ۲۰۰ میلی متر است و زاویه آن نسبت به لبه عرضی بارگذاری، ۱۵، ۴۵ و ۷۵ درجه انتخاب شده است. شرایط مرزی در نظر گرفته شده برای مدل در لبه بالا (لبه بدون بارگذاری) همه قیدهای جابه جایی و قیدهای چرخش در سه جهت محور مختصات صفر در نظر گرفته شده است. برای لبه های کناری جابه جایی در جهت Y و Z و همچنین چرخش در جهت X مخالف صفر و در سایر محورها صفر در نظر گرفته شده است. برای لبه پایین (لبه بارگذاری) فقط جابه جایی در جهت Z مخالف صفر و در سایر محورها جابه جایی و چرخش صفر انتخاب شده است.

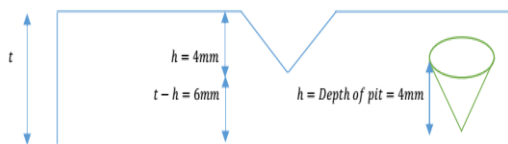


شکل ۶- نمایی از ترک مدل سازی شده همراه با بارگذاری



شکل ۳- توزیع حفره های در نظر گرفته شده در این مطالعه

شکل (۴) نمایی از ضخامت ورق را به همراه حفره مخروطی قبل از مدل سازی نشان می دهد. شکل ۵ نشان دهنده حفره مدل سازی شده در نرم افزار المان محدود است. خوردگی حفره ای فقط در یک طرف ورق (در همان طرف که تقویت کننده ها هست) مورد توجه قرار گرفته است و خوردگی تقویت کننده ها مورد توجه نیست. ابعاد ورق با طول ۱۲۰۰ mm، عرض کلی ۸۰۰ mm و ضخامت ۱۰ mm با دو تقویت کننده طولی با ضخامت ۱۷ mm و ارتفاع ۱۵۰ mm در نظر گرفته شده است.



شکل ۴- نمایی از ضخامت ورق همراه با حفره مخروطی شکل

## ۲-۲- مدل اجزای محدود از ورق تقویت شده دارای ترک مورب

در مدل سازی ترک، پارامترهای مختلفی در نظر گرفته شده است. از جمله مهم ترین این پارامترها، فاصله درز<sup>۱</sup> بین دو لبه است.

2. Crack Trip

1. Gap

است.

جدول ۱- خطای نسبی مدل عددی (درصد)

خطای نسبی مدل سازی [درصد]	نتایج بررسی
۵/۴۲	IACS S11 [۱۹]
۲/۱۷	IACS CSR [۱۹]
۶/۵۴	ABS Safe Hull [۱۹]
۴/۷۱	میانگین خطای مدل سازی عددی

جدول ۱ نشان می‌دهد که تطابق قابل قبولی در نتایج به دست آمده است.

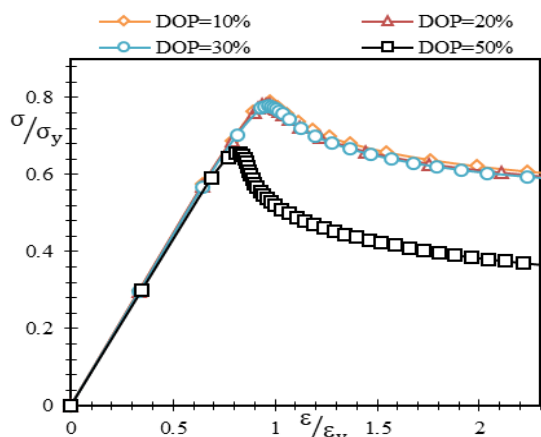
#### ۴- نتایج المان محدود

##### ۴-۱- نتایج مربوط به خوردگی حفره‌ای

برای تحلیل استحکام نهایی ورق تقویت شده از چهار مدل خوردگی حفره‌ای استفاده شده است که با توجه به رابطه (۴) تعداد حفره‌های مورد نیاز برای رسیدن به سطح مورد نظر خوردگی محاسبه شده و اطلاعات کامل آن در جدول ۲ آورده شده است.

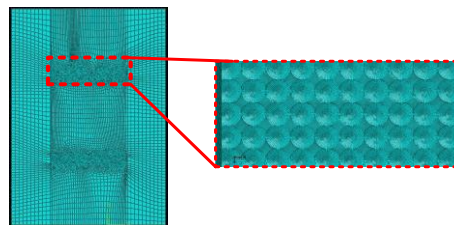
جدول ۲- مشخصات مدل‌های خوردگی حفره‌ای

نام مدل	چگالی خوردگی حفره‌ای (DOP%)	عمق (میلی متر)	قطر (میلی متر)	تعداد حفره
a	۱۰	۴	۴۰	۳۸
b	۲۰	۴	۴۰	۷۶
c	۳۰	۴	۴۰	۱۱۴
d	۵۰	۴	۴۰	۱۹۰

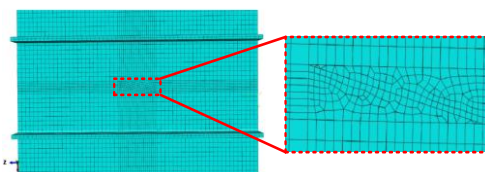


شکل ۱۰- نمودار تنش-کرنش مربوط به ورق تقویت شده با خوردگی حفره‌ای

شکل (۷) و (۸) نشان‌دهنده شبکه‌بندی ترک مورب و خوردگی حفره‌ای در ورق تقویت شده است که در نواحی اطراف ترک و خوردگی این شبکه‌بندی برای تحلیل دقیق تر ریز شده است.



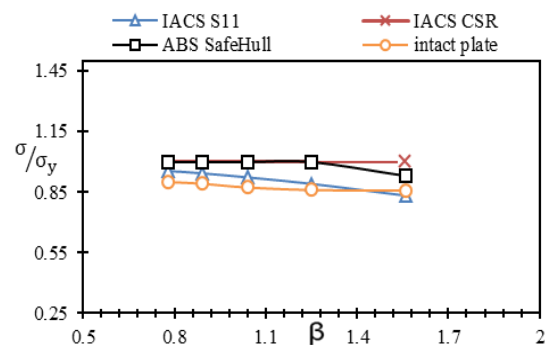
شکل ۷- شبکه‌بندی خوردگی حفره‌ای



شکل ۸- شبکه‌بندی ترک مورب

##### ۳- صحت‌سنجی نتایج

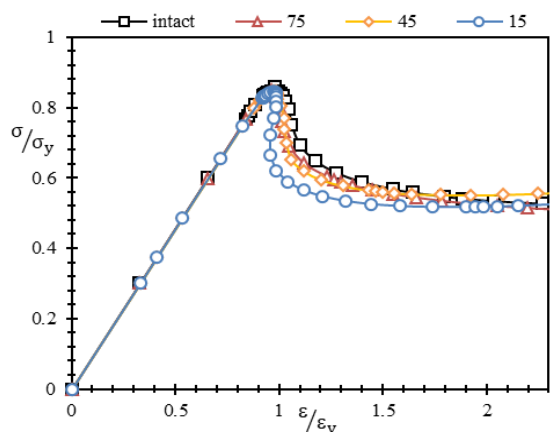
صحت‌سنجی مدل عددی، نوعی تأیید توانایی مدل عددی در مدل‌سازی پدیده‌های مورد نظر است. برای اطمینان از اینکه مدل عددی در شرایط متفاوت نیز به درستی رفتار می‌کند، ورق سالم با ضخامت‌های مدنظر مدل‌سازی و استحکام نهایی آن‌ها توسط تحلیل المان محدود محاسبه شده است. با توجه به فرمول‌های تجربی (پیوست یک) موجود برای محاسبه استحکام نهایی ورق، مانند IACS, IACS S11 و CSR و ABS Safe Hull نیز استحکام نهایی ورق با ضخامت‌های مدنظر محاسبه گردیده که نتایج در نمودار شکل (۹) نشان داده شده است.



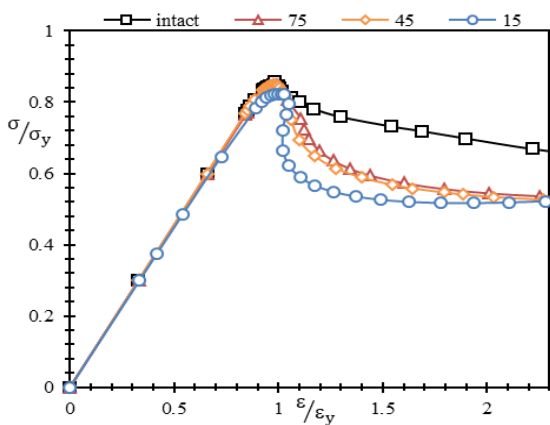
شکل ۹- اعتبارسنجی نتایج حاصل از المان محدود با فرمول‌های تجربی

مقدار درصد خطای نسبی مدل عددی با توجه به نتایج به دست آمده در جدول ۱ آورده شده که این میزان خطا به صورت میانگین در مدل‌سازی عددی برابر ۴/۷۱ درصد

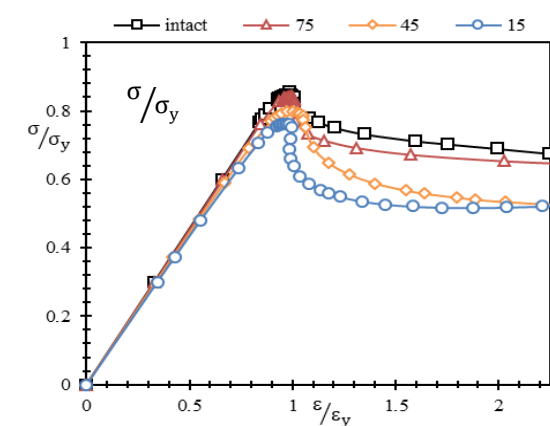
که مشاهده می‌شود افزایش طول ترک، رابطه مستقیم با کاهش استحکام نهایی ورق تقویت‌شده دارد.



شکل ۱۰- نمودار تنش- کرنش مربوط به ورق با نسبت ترک ۰/۱



شکل ۱۱- نمودار تنش- کرنش مربوط به ورق با نسبت ترک ۰/۳



شکل ۱۲- نمودار تنش- کرنش مربوط به ورق با نسبت ترک ۰/۵

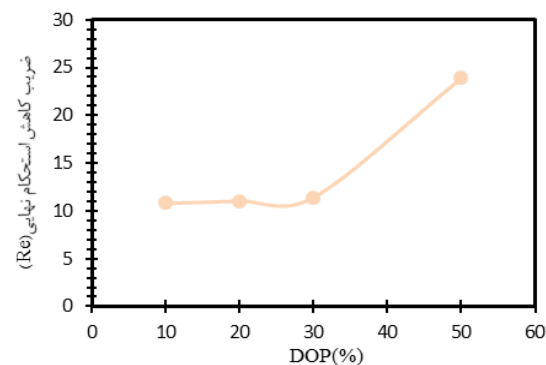
در نمودار شکل (۱۵)، مقدار کاهش استحکام نهایی ورق تقویت‌شده با افزایش طول ترک به‌وضوح قابل مشاهده است.

با توجه به تعریف ضریب کاهش استحکام نهایی، مقادیر مربوط به این ضریب، با آسیب ترک مورب در شکل (۱۶) قابل مشاهده است.

با توجه به نمودار شکل (۱۰) که مربوط به تأثیر خوردگی حفره‌ای بر مدل موردنظر است، به‌روشنی می‌توان مشاهده کرد که با افزایش چگالی خوردگی حفره‌ای، به‌مراتب سطح استحکام نهایی ورق تقویت‌شده نیز کاهش یافته است. استحکام نهایی با چگالی خوردگی حفره‌ای ۰/۱۰ و ۰/۵۰ به‌ترتیب برابر با ۰/۷۸۹ و ۰/۶۵۴ استخراج شده است. برای تأثیر پارامترهای مختلف بر کاهش استحکام نهایی، پارامتر جدیدی طبق رابطه (۶) تعریف شده است.

$$Re = \frac{\text{استحکام نهایی ورق آسیب دیده} - \text{استحکام نهایی ورق سالم}}{\text{استحکام نهایی ورق سالم}} \times 100 \quad (6)$$

با توجه به نمودار شکل (۱۱)، با افزایش چگالی خوردگی حفره‌ای، به‌مراتب میزان ضریب کاهش استحکام نهایی نیز افزایش پیدا کرده که این موضوع نشان می‌دهد میزان افزایش چگالی خوردگی حفره‌ای، تأثیر مستقیمی بر کاهش سطح استحکام نهایی ورق دارد.



شکل ۱۳- نمودار ضریب کاهش استحکام نهایی بر حسب چگالی خوردگی حفره‌ای

#### ۴-۲- نتایج مربوط به ترک مورب

در تحلیل استحکام نهایی ورق تقویت‌شده با ترک مورب، تأثیر افزایش طول ترک و همچنین تأثیر زوایای ترک در نظر گرفته شده است. طول کلی ترک دارای مقادیر ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ عرض ورق در نظر گرفته شده و همچنین برای بررسی زوایای ترک، زاویه‌های ترک نسبت به عرض ورق دارای مقادیر ۱۵، ۴۵ و ۷۵ درجه انتخاب شده است. با توجه به نمودار شکل‌های (۱۲)، (۱۳) و (۱۴) مشاهده شده که با افزایش زاویه ترک نسبت به عرض ورق، میزان استحکام نهایی افزایش یافته است که می‌توان از آن نتیجه گرفت که افزایش زاویه ترک، رابطه‌ای مستقیم با افزایش استحکام نهایی ورق تقویت‌شده دارد. همچنین با افزایش طول ترک، میزان استحکام نهایی کاهش پیدا کرده است

کاهش داده و ترک شماره ۲ مربوط به کم آسیب‌ترین نوع ترک است که کمترین میزان از استحکام ورق را کاهش داده است.

جدول ۳- مشخصات ترک‌های مورب در تأثیر هم‌زمان هر دو آسیب ترک و خوردگی

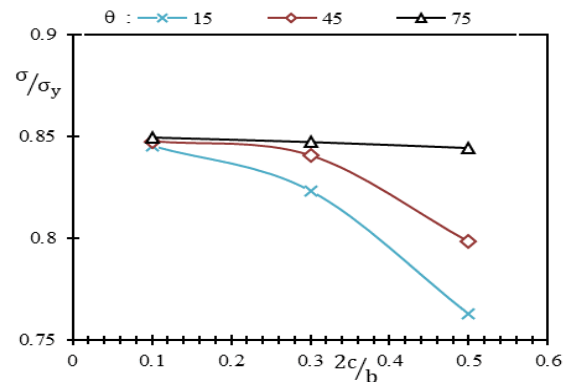
نام ترک	نسبت ترک ( $2c/b$ )	طول ترک (میلی‌متر)	زاویه ترک (درجه)
ترک ۱	۰/۵	۲۰۰	۱۵
ترک ۲	۰/۱	۴۰	۷۵

برای هر دو ترک مورب، با افزایش چگالی خوردگی حفره ای، میزان استحکام نهایی ورق کاهش یافته است و همان طور که انتظار می‌رود، ورق خورده‌شده با ترک شماره ۱ در تمامی حالت‌ها دارای سطح استحکام کمتری نسبت به ورق خورده‌شده با ترک شماره ۲ است. از برآورد نتایج مربوط به جدول ۴ می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش چگالی خوردگی حفره‌ای از ۳۰ درصد به ۵۰ درصد، ورق خورده‌شده با ترک مورب، دچار تغییر زیادی در کاهش استحکام نهایی می‌شود، در حالی که با افزایش چگالی خوردگی حفره‌ای برای همین ورق، میزان استحکام نهایی با شدت کمتری دچار کاهش می‌گردد.

جدول ۴- مقادیر استحکام نهایی برای ورق با دو ترک مورب در معرض خوردگی حفره‌ای

چگالی خوردگی حفره‌ای (DOP%)	استحکام نهایی برای ورق خورده‌شده با ترک ۱	استحکام نهایی برای ورق خورده‌شده با ترک ۲
۱۰	۰/۷۶۵	۰/۷۸۹
۲۰	۰/۷۶۳	۰/۷۸۱
۳۰	۰/۷۶۰	۰/۷۷۷
۵۰	۰/۶۵۳	۰/۶۵۳

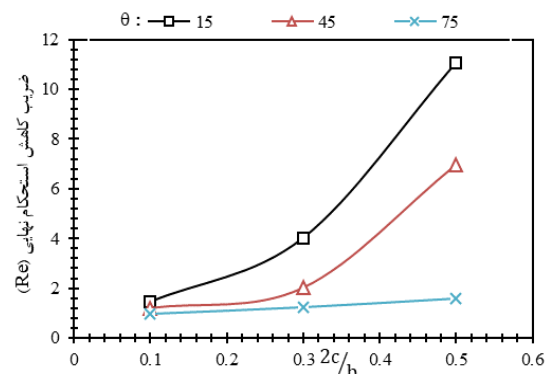
همچنین با توجه به این بررسی‌ها مشاهده می‌شود که ورق خورده‌شده با ترک شماره ۱، با افزایش چگالی‌های خوردگی حفره‌ای تا ۵۰ درصد، تقریباً ۱۴/۴۷ درصد استحکام ورق نسبت به حالت ورق ترک‌دار کاهش می‌یابد. در ورق خورده‌شده با ترک شماره ۲ نیز در تمامی حالات، میزان استحکام نهایی، کمتر از ورق ترک‌دار است؛ از این رو ظاهراً فاکتور تأثیرگذار در تحلیل‌های صورت‌گرفته بر ورق خورده‌شده با ترک شماره ۲، میزان خوردگی است، ولی برای ورق خورده‌شده با ترک شماره ۱، مقدار استحکام



شکل ۱۵- نمودار استحکام نهایی ورق در زوایای متفاوت

بر حسب نسبت‌های ترک

با توجه به نمودار شکل (۱۶)، در یک نسبت معین، با افزایش زاویه ترک نسبت به عرض ورق، میزان ضریب کاهش استحکام نهایی ورق نیز کاهش یافته است که نشان می‌دهد هر چه زاویه ترک در راستای طول ورق باشد، میزان استحکام ورق نیز کاهش یافته است و در مقایسه با طول ترک‌های مختلف می‌توان مشاهده کرد که با افزایش طول ترک، میزان کاهش استحکام ورق نیز افزایش یافته است. از این رو بیشترین میزان استحکام نهایی مربوط به ورق با ترک در زاویه ۷۵ درجه و طول ترک معادل ۴۰ میلی‌متر و همچنین کمترین میزان استحکام مربوط به ورق در زاویه ۱۵ درجه و طول ترک معادل ۲۰۰ میلی‌متر به دست آمده است.

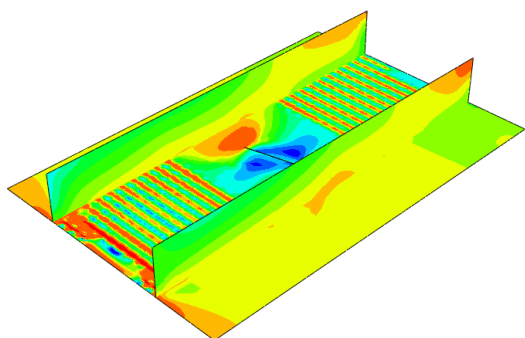


شکل ۱۶- ضریب کاهش استحکام نهایی ورق در زوایای

متفاوت بر حسب نسبت‌های مختلف ترک

#### ۳-۴ نتایج مربوط به تأثیر هم‌زمان ترک مورب با خوردگی حفره‌ای

در این قسمت، به اثر هم‌زمان دو ترک مورب با خوردگی حفره‌ای پرداخته شده است. اطلاعات مربوط به این دو ترک مورب در جدول ۳ آورده شده است. ترک شماره ۱ مربوط به خطرناک‌ترین نوع ترک مورب در تحلیل‌هاست که بیشترین میزان استحکام ورق را نسبت به حالت سالم

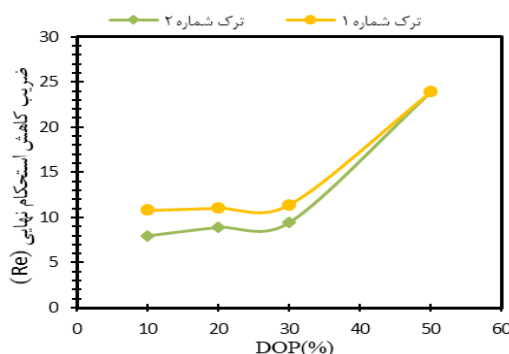


شکل ۱۸- توزیع تنش برای ورق ترک‌دار در معرض خوردگی حفره‌ای

### ۵- نتیجه‌گیری

در تحلیل استحکام نهایی ورق تقویت‌شده با خوردگی حفره ای و ترک مورب و تأثیر توأم این دو عیب، با افزایش زاویه ترک نسبت به عرض ورق، میزان استحکام نهایی ورق نیز افزایش یافته است، به طوری که از نظر زاویه ترک مورب، ورق با ترک ۱۵ درجه دارای کمترین میزان استحکام و ورق با زاویه ۷۵ درجه دارای بیشترین میزان استحکام در ورق تقویت‌شده است. بنابراین با توجه به تحلیل ترک بر روی ورق تقویت‌شده، ترک ۲۰۰ میلی‌متر در زاویه ۱۵ درجه به‌عنوان خطرناک‌ترین نوع ترک و همچنین ترک ۴۰ میلی‌متر در زاویه ۷۵ درجه به‌عنوان کم‌آسیب‌ترین نوع ترک شناخته شده است. با افزایش چگالی خوردگی حفره‌ای و نهایتاً با افزایش تعداد حفره‌های مخروطی‌شکل بر روی سطح ورق، استحکام نهایی ورق نیز کاهش می‌یابد، به طوری که ورق با چگالی خوردگی حفره‌ای ۵۰ درصد، کمترین میزان استحکام را دارد. در تأثیر هم‌زمان ترک و خوردگی، کاهش استحکام نهایی ورق از قانون جمع آثار پیروی نمی‌کند. در تأثیر هم‌زمان ترک و خوردگی، تأثیر خوردگی نسبت به ترک در کاهش استحکام نهایی ورق بیشتر است.

نهایی در چگالی‌های خوردگی ۱۰ و ۲۰ درصد تقریباً برابر با ورق ترک‌دار است. در بررسی تأثیر توأم ترک و حفره با توجه به شکل (۱۷) می‌توان گفت با افزایش تعداد حفره‌ها بر روی سطح ورق، استحکام نهایی ورق ترک‌دار خورده‌شده نسبت به ورق سالم (بی‌عیب) در تمامی موارد نهایتاً ۲۳/۹ درصد کاهش می‌یابد و این مقدار کاهش استحکام نهایی بسیار نزدیک به حالتی است که فقط خوردگی حفره‌ای در ورق وجود دارد. از سوی دیگر، با توجه به اینکه خوردگی حفره‌ای در ورق به‌تنهایی در تمامی حالات نهایتاً باعث کاهش استحکام تا ۲۳/۶۹ درصد و ترک در ورق به‌تنهایی ۱۱/۰۵ و ۰/۹۸ درصد نسبت به ورق سالم می‌گردد، ترکیب این دو منجر به قانون جمع آثار نمی‌شود و نهایتاً با ترکیب ترک و حفره خوردگی، کاهش استحکام ۲۳/۹۱ درصد نسبت به ورق سالم خواهد بود.



شکل ۱۷- ضریب کاهش استحکام نهایی ورق در معرض خوردگی حفره‌ای و ترک مورب با هم

در شکل (۱۸) می‌توان نحوه توزیع تنش و اثر تغییرشکل های ورق تقویت‌شده با چگالی خوردگی حفره‌ای ۱۰ درصد را که دارای ترک شماره ۱ است، مشاهده کرد. تنش در ورق در مکان‌هایی که در معرض خوردگی حفره‌ای قرار دارد، در مقایسه با مکان‌هایی که در معرض ترک مورب است، بیشتر می‌باشد. در بررسی کلی بر روی ضریب کاهش استحکام نهایی، می‌توان مشاهده کرد که تأثیر ترک در کاهش استحکام نهایی ورق همواره کمتر از خوردگی حفره‌ای است.

### پیوست یک: استحکام کمانشی و نهایی ورق طبق فرمول‌های تجربی [۱۹]

ضریب	IACS S11 $\sigma_{cr} = C \sigma_y$	IACS CSR $\sigma_{cr} = C \sigma_y$	ABS Safe Hull $\sigma_u = C \sigma_y$
C	$\begin{cases} \frac{36}{\beta^2} & , \beta \geq 2.68 \\ 1 - \frac{\beta^2}{14.4} & , \beta < 2.68 \end{cases}$	$\begin{cases} \frac{2.14}{\beta} - \frac{0.89}{\beta^2} & , \beta \geq 1.58 \\ 1 & , \beta < 1.58 \end{cases}$	$\begin{cases} \frac{2.25}{\beta} - \frac{1.25}{\beta^2} & , \beta \geq 1.25 \\ 1 & , \beta < 1.25 \end{cases}$



## مراجع

- [1] D.T. Chapkis, "Simulation of pitting corrosion of hull plating under static loading", Trudy TSNIIMF, Vol. 82, 1967, pp. 34-50.
- [2] 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.
- [3] S. Saad-Eldeen and C. Guedes Soares, "Effect of pitting corrosion on the collapse strength of rectangular plates under axial compression", Analysis and Design of Marine Structures, Vol. 65, 2009, pp. 231-236.
- [4] Z. Nouri, M.R. Khedmati and M.M. Roshanali, "Degradation of the compressive strength of unstiffened/stiffened steel plates due to both-sides randomly distributed corrosion wastage", Latin American Journal of solids and structure, Vol. 6, No. 4, 2010, pp. 335-367.
- [5] X. Jiang and C. Guedes Soares, "Ultimate Capacity of rectangular plates with partial depth pits under uniaxial loads", Marine Structures, Vol. 26, No. 1, 2011, pp. 27-41.
- [6] A. Rahbar-Ranji and A. Zarookian, "Ultimate strength of stiffened plates with a transverse crack under uniaxial compression", Ships and Offshore Structures, Vol. 10, No. 4, 2014, pp. 416-425
- [7] A. Rahbar-Ranji, N. Niamir and A. Zarookian, "Ultimate strength of stiffened plates with pitting corrosion", International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Vol. 7, No. 3, 2015, pp. 509-525.
- [8] C. Chong, P. Yang and T. Xia, "Assessment of residual ultimate strength of cracked steel plates under longitudinal compression", Ocean Engineering, Vol. 121, 2016, pp. 178-183.
- [9] C. Chong, P. Yang, Ch. Li and T. Xia, "Ultimate strength characteristics of cracked stiffened plates subjected to uniaxial compression", Thin-Walled Structures, Vol. 113, 2017, pp. 27-38.
- [10] J. Zhang, XH. Shi and CG. Soares, "Experimental analysis of residual ultimate strength of stiffened panels with pitting corrosion under compression", Engineering Structures, Vol. 152, 2017, pp. 70-86.
- [۱۱] بهنام عاقبتی و یاسر شریفی، «تأثیر خوردگی حفره‌ای در برآورد ظرفیت باربری ورق‌های فولادی تحت تنش فشاری تک‌محوره»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۵، ۱۳۹۷، صفحه ۲۲۱-۲۳۴.
- [۱۲] علی حیدری، داود توکلی و پویان فخاریان، «تقریب مقادیر ویژه ورق با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۱، شماره ۳۵، ۱۳۹۲، صفحه ۴۹-۶۲.
- [۱۳] محمد حیدری رارانی، شهرام حسینی و کیوان ترابی، «حل دقیق برای معادلات فرکانسی ارتعاشات آزاد شعاعی و عرضی یک ورق دایره‌ای با شرایط مرزی مختلف»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۵، شماره ۵۰، ۱۳۹۶، صفحه ۱۶۹-۱۷۸.
- [14] T. Yao, M. Fujikubo and D. Yanagihara, "On loading and boundary conditions for buckling/plastic collapse analysis of continuous stiffened plate by FEM", Proceedings of the 12th Asian technical exchange and advisory meeting on marine structures, Vol. 98, 1998, pp. 305-314.
- [15] J.K. Paik, B.J. Kim and J.K. Seo, "Methods for ultimate limit state assessment of ships and ship-shaped offshore structures", Part II stiffened panels. Ocean Engineering, Vol. 35, No. 2, 2008, pp.271-280.
- [16] J.K. Paik and B.J. Kim, "Ultimate strength formulations for stiffened panels under combined axial load, in-plane bending and lateral pressure", a benchmark study. Thin-Walled Structures, Vol. 40, No. 1, 2002, pp. 45-83.
- [17] A. Rahbar-Ranji, "Elastic buckling strength of corroded steel plates", Sadhana-Academy Proceedings in Engineering Sciences, Vol. 38, No.1, 2013, pp. 89-99.
- [18] A. Eslami-Majd and A. Rahbar-Ranji, "Comparison of different modeling approaches for dynamic analysis of corroded plates", Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on Marine Structures, 2017, pp. 573-582.
- [19] A. Rahbar-Ranji, "Ultimate strength of corroded steel plates with irregular surface under in-plane compression", Ocean Engineering, Vol. 54, 2012, pp. 261-269.