

## تخمین عمر باقیمانده بدنه فشار یک زیردریایی از دیدگاه مکانیک شکست، در سناریوهای مختلف عمق روی

سید میثم حسینی<sup>۱\*</sup>، بهروز اسدی<sup>۲</sup>، احمد رهبر رنجی<sup>۳</sup>، امیر خدابخشی<sup>۴</sup>

msm\_hsn1986@yahoo.com

<sup>۱\*</sup> نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل

behrouz\_asadi84@yahoo.com

<sup>۲</sup> کارشناسی ارشد، مهندسی کشتی سازی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران

rahbar@aut.ac.ir

<sup>۳</sup> دکتری تخصصی، مهندسی کشتی سازی، دانشکده مهندسی کشتی سازی و صنایع دریایی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

amirkhodabakhshicr7@gmail.com

<sup>۴</sup> کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۰/۱۵

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۱/۱۹

### چکیده

در این مقاله با استفاده از دیدگاه مکانیک شکست به تعیین عمر باقیمانده یک زیردریایی پرداخته می شود که در آزمون های دوره ای، عیوبی در سازه بدنه فشار آن مشاهده شده است. یک زیردریایی واقعی به عنوان نمونه مفروض در نظر گرفته شده و تحلیل ها و شبیه سازی ها برای مشخصات بدنه فشار این زیردریایی انجام می پذیرد. به زیردریایی مفروض پس از مدل سازی و تعیین نواحی بحرانی آن، یک دسته عیوب فرضی (ترک هایی با عمق مشخص) در ناحیه بحرانی اعمال می شود. سپس با تعریف ۱۵ سناریوی عمق روی محتمل در بهره برداری زیردریایی، روند رشد ترک ها در شرایط کاری گفته شده مورد بررسی قرار گرفته و بر اساس قانون پاریس به تخمین عمر زیردریایی در حضور این ترک ها پرداخته می شود. در نهایت نتیجه شد که ضریب شدت تنش پسماند ناشی از فرایندهای جوشکاری، سهم بیشتری در ضریب شدت تنش کل وارد بر سازه دارد و به شدت عمر زیردریایی را کاهش خواهد داد. لازم به یادآوری است در انجام تحلیل های المان محدود از نرم افزار آباکوس نسخه ۶/۱۴ استفاده شده است.

**واژه های کلیدی:** زیردریایی، بدنه فشار، مکانیک شکست، رشد ترک خستگی، ضریب شدت تنش، تحلیل المان محدود

### ۱. مقدمه

امروزه اهمیت وجود و به کارگیری زیردریایی ها با توجه به نقش استراتژیکی که در ناوگان های دریایی کشورهای مختلف به خود اختصاص می دهند، بر کسی پوشیده نیست. ایجاد تعادلی نسبی در دو دیدگاه حفظ ایمنی و اقتصادی

بودن، در استفاده از یک زیردریایی و البته فقط در حوزه مربوط به بررسی و تحلیل بدنه فشار و از بعد سازه ای، بحث اصلی و بنیادی در مقاله حاضر است. در واقع بررسی عمر کاری و میزان ایمنی یک زیردریایی از نظر سازه و از دیدگاه مکانیک شکست، زمانی که در معرض مهمترین

فلپ در پاشنه یک شناور تندرو تک بدنه روی مقاومت این شناور و مقایسه این دو مورد پرداختند [۷].

بعد از توسعه استفاده از زیر دریایی های با رانش هسته ای، به علت توانایی آن ها در ماندگاری بلندمدت در عمق های آب به نسبت زیر دریایی های رانش دیزل-الکترونیک، بررسی پدیده خستگی نیز در بدنه فشار زیر دریایی ها بیشتر مورد توجه قرار گرفت، در چندین بار از شروع دهه ۱۳۶۰ مورد بررسی قرار گرفت [۸]. چندین محقق، خستگی ناشی از رشد ترک در بدنه فشار زیر دریایی را مطالعه کردند. دونهام و کیلپاتریک آزمایش هایی با مدل های بدنه فشار در معرض فشار خارجی نوسانی و نمایش رشد ترک در سازه انجام دادند [۹-۱۰]. این محققان نتیجه گرفتند که ترک ها در بخش داخلی بدنه فشار و در محل جوش ها رشد می کنند. این ترک ها؛ ابتدا اطراف محیط بدنه فشار رشد می کنند و به سمت یک ترک محیطی طویل سوق داده می شوند، سپس در امتداد ضخامت بدنه فشار رشد می کنند [۱۱]. این مؤلفان همچنین نتیجه گرفتند که هندسه ساختاری بدنه فشار، دامنه بارگذاری هیدروستاتیک نوسانی و طول ترک اولیه از پارامترهای اساسی برای ارزیابی آسیب خستگی در بدنه فشارند. وو و همکاران، با استفاده از روش بسته شدن دهانه ترک (VCCT) لوله مورد کشش و دارای ترک محیطی راه به در، که به وسیله وصله کامپوزیتی ترمیم شده را تحلیل نمودند [۱۲]. رزین زاده و همکاران، خستگی لوله آلومینیومی حاوی ترک راه به در محیطی که با وصله کامپوزیتی موضعی شیشه/اپوکسی ترمیم شده را مورد بررسی قرار دادند [۱۳-۱۴]. بل حدری و همکاران با استفاده از نرم افزار آباکوس به مقاوم سازی لوله حاوی ترک سطحی زیر فشار با استفاده از وصله دور تا دوری کامپوزیتی از جنس کربن/اپوکسی و با لحاظ کردن مودهای لغزشی و پارگی ترک پرداختند [۱۵]. بوجرا و همکاران با استفاده از المان محدود توسعه یافته به ترمیم لوله حاوی ترک راه به در طولی با استفاده از کامپوزیت به صورت دور تا دوری پرداختند [۱۶]. پژوهش های زیادی در استفاده از دیدگاه خستگی و مکانیک شکست در انواع مسائل مهندسی مانند ورق، لوله، مخازن

بارگذاری متغیر وارد بر آن (فشار هیدروستاتیک) قرار می گیرد، موضوع مهمی است که در این مقاله دنبال می شود. یک زیر دریایی در طول عمر مفید خود به سبب غوص و صعودهای بسیار، در معرض بارهای متناوب با منشأ فشار هیدروستاتیک قرار می گیرد و این موضوع عامل ایجاد پدیده مخرب خستگی در بدنه فشار خواهد بود. پیشرفت علوم و دانش بشر در حوزه مکانیک شکست، چنین بیان می کند که عامل حداقل ۹۰ درصد شکست های ناشی از اعمال بارهای متناوب در حین کار و سازه های تحت بارگذاری های دینامیکی عامل خستگی است [۱]. و این موضوع لزوم و اهمیت پرداختن به این پدیده را بسیار بارزتر می کند. برای استناد بخشی و قابل تعمیم بودن موضوع و نتایج، یک زیر دریایی واقعی آلمانی به عنوان نمونه مفروض انتخاب شده است و تحلیل ها و شبیه سازی ها برای مشخصات بدنه فشار بهینه شده این زیر دریایی انجام شده است [۲].

خستگی در قالب یک فرایند جوانه زنی ترک و رشد، عامل اصلی برای انهدام و شکست مخازن زیر فشار است [۳]. ترک ها از سطح صاف و از عیوب داخلی و سطحی تحت کشش به طور عمده در شکل های مختلف رشد می کنند [۴]. گالاتولو و لازری، رشد ترک خستگی را تا مرز واماندگی در قطعات هواپیما بررسی کردند [۵]. آن ها مدلی عددی برای شبیه سازی رشد ترک های خستگی در سوراخ پرچ های صفحه هواپیما ارائه کردند و برای تصدیق این مدل، تعدادی آزمایش خستگی روی نمونه های اتصال پرچ شده انجام دادند. مقایسه بین نتایج تجربی و شبیه سازی عددی نشان می دهد که تطابق خوبی حاصل شده و مدل ارائه شده می تواند ابزاری مناسب برای ارزیابی عمر خستگی اتصالات پرچی هواپیما باشد. سالاری و شاهانی، تحلیل رشد ترک خستگی یک پوسته استوانه ای تقویت شده تحت بارگذاری اتفاقی را مورد بررسی قرار دادند [۶]. آن ها ابتدا به کمک روش زیرمدل پوسته به حجیم به تحلیل تنش پوسته در نرم افزار آباکوس پرداختند و نقاط بحرانی و مستعد رشد ترک را شناسایی کردند. سپس با استفاده از نرم افزار زونکرک و بر اساس تئوری حد مرکزی، عمر خستگی قطعه را محاسبه کردند. جادمیکو و همکاران به بررسی اثرات نصب گوه و

کل وارد بر سازه دارد و به شدت عمر زیردریایی را کاهش خواهد داد.

## ۲. تعریف مسئله

زیردریایی‌های نوع VII رایج‌ترین نوع زیردریایی‌های کلاس U-boat آلمان در جنگ جهانی دوم بودند. زیردریایی U-100 یکی از زیردریایی‌های نیروی دریایی آلمان نازی از نوع VIII B از سری شناورهای کلاس «یو» است که برای انجام فرایندهای تحلیلی در این مقاله به عنوان زیردریایی هدف انتخاب شده است. اطلاعات و مشخصات فنی و واقعی این زیردریایی به سبب خارج شدن آن از رده طبقه‌بندی در منابع با دسترسی عمومی موجود است. اما به‌اختصار در جدول ۱ فقط به مشخصات سازه بدنه فشار زیردریایی مفروض که مورد نیاز فرایند تحلیلی این مقاله است، پرداخته شده است [۲]. جنس فولاد بدنه فشار در نظر گرفته شده، HSLA-100 است که خواص ذاتی، فیزیکی و مکانیک شکست آن در جدول ۲ ارائه شده است [۲، ۱۷].

تحت فشار و ... انجام شده است؛ اما تاکنون به استفاده کاربردی از این دیدگاه در یک سازه عملیاتی مانند هواپیما، زیردریایی، خودرو و ... پرداخته نشده است. در این تحقیق با استفاده از کاربرد دیدگاه مکانیک شکست به تعیین عمر باقیمانده در یک سازه عملیاتی مانند یک زیردریایی پرداخته می‌شود. زیردریایی موردنظر در این تحقیق، زیردریایی کلاس U-boat آلمان است و تحلیل‌ها و شبیه‌سازی‌ها برای مشخصات بدنه فشار این زیردریایی انجام می‌پذیرد. این زیردریایی پس از مدلسازی و تعیین نواحی بحرانی، در اثر وجود ترک در نواحی بحرانی نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس با تعریف انواع سناریوی بهره‌برداری زیردریایی، روند رشد ترک‌ها در شرایط کاری گفته شده مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در ادامه بر اساس قانون پاریس به تخمین عمر زیردریایی در حضور این ترک‌ها پرداخته می‌شود. پس از تحلیل نتایج مشاهده شد که ضریب شدت تنش پسماند ناشی از فرایندهای جوشکاری سهم بیشتری در ضریب شدت تنش

جدول ۱. مشخصات بدنه فشار زیردریایی U-100 [۱۷]

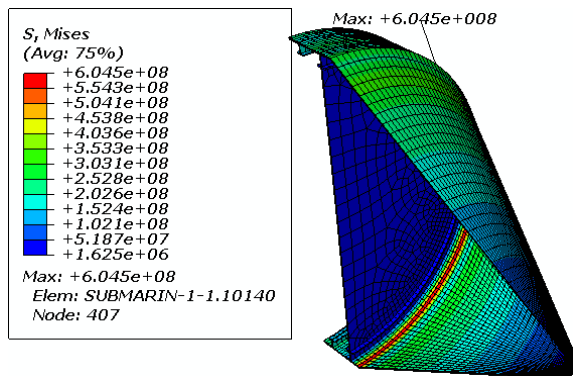
ردیف	مشخصات بدنه فشار	مقدار (میلی متر)
۱	طول	۳۷۵۰۱
۲	قطر	۴۷۰۰
۳	ضخامت بدنه	۲۲
۴	فواصل رینگ‌های تقویتی	۴۰۰
۵	حداکثر عمق تحمل فشار (عمق نهایی)	۲۵۰۰۰۰
۶	حداکثر عمق کاری	۲۰۰۰۰۰

جدول ۲. مشخصات جنس بدنه فشار [۱۷]

ردیف	نوع خواص	پارامترها	نماد	مقدار	واحد
۱	خواص ذاتی	تنش تسلیم	$\sigma_y$	۶۹۰-۸۴۰	MPa
۲		تنش نهایی	$\sigma_U$	۹۸۰-۱۰۸۰	MPa
۳		مدول الاستیک	E	۱۹۷	GPa
۴		ضریب پواسون	$\nu$	۰/۲۹۱۶	-
۵		چگالی	$\rho$	۷۸۰۰	kg/m <sup>3</sup>
۶	خواص مکانیک شکست	چقرمگی شکست بحرانی	$K_{IC}$	۲۲۰	MPa. $\sqrt{m}$
۷		ضریب رابطه پاریس	C	$3/14 \times 10^{-7}$	$(MPa \cdot \sqrt{m})^{-m}$
۸		ضریب رابطه پاریس	m	۲/۴۸	-

بهره گرفته شده است و ناحیه بحرانی بر اساس اعمال شرایط مرزی submodel و با افزایش تعداد المان‌ها مجدداً مورد تحلیل تنش قرار گرفته است.

طبق شکل ۲، حداکثر تنش فون مایسز در ناحیه بحرانی MPa ۶۰۴/۵ است. ملاحظه می‌شود که در این شکل نیز ناحیه بحرانی در محل اتصال بدنه استوانه‌ای میانی به بدنه مخروطی شکل و در سطح داخلی آن اتفاق افتاده است که صحت مدل‌سازی و تحلیل انجام‌شده را مطابق با منابع [۱۸]، تأیید می‌کند. استفاده از تنش فون مایسز در این تحلیل تنها برای ارزیابی ناحیه بحرانی است و در تحلیل خستگی، تنها تنش‌های عمودی حداکثر ملاک کار خواهد بود.



شکل ۲. تحلیل تنش زیرمدل در ناحیه بحرانی

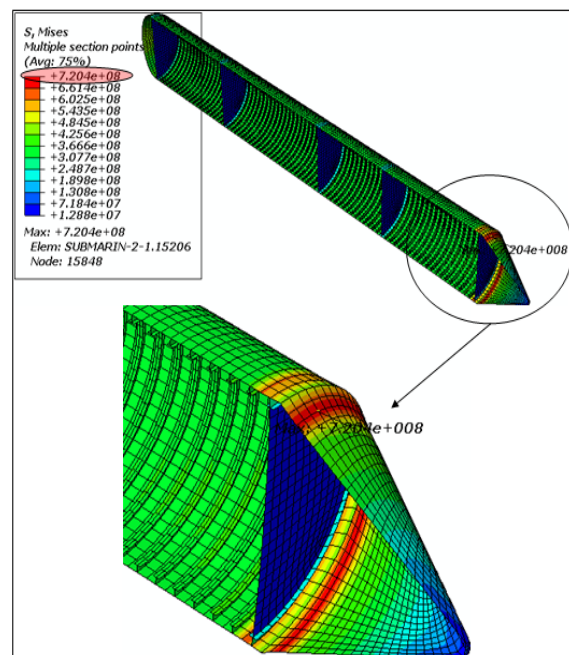
### ۳-۱. مبانی روند تحلیل عددی

در این مقاله، برای محاسبه عمر خستگی از رابطه پارسیس استفاده می‌شود. بر اساس این رابطه که در معادله (۱) ارائه شده است، رشد ترک خستگی در بدنه یک سازه حاوی ترک، رفتاری مطابق با این رابطه خواهد داشت، که در آن ضرایب  $C$  و  $m$  به جنس سازه مربوط می‌شوند.

با در نظر گرفتن یک سناریوی عمق‌روی (محدوده عمق کاری) مشخص برای زیردریایی، مقدار تغییرات ضرایب شدت تنش به صورت تابعی از طول ترک مشخص می‌شود. بنابراین تعداد سیکل‌های قابل تحمل سازه شامل یک طول ترک معین که ترک از طول اولیه ( $a_{initial}$ )، به طول نهایی ( $a_{final}$ ) می‌رسد را، می‌توان به صورت رابطه (۲) تعریف نمود [۱۹].

### ۳. مدل‌سازی و تحلیل تنش بدنه فشار به روش المان محدود<sup>۱</sup>

برای مدل‌سازی بدنه فشار زیردریایی در نرم‌افزار آباکوس، به دلیل تقارن هندسی و بارگذاری، تنها از نصف مدل زیردریایی استفاده شده است. لازم به یادآوری است که فشار خارجی معادل فشار هیدروستاتیک ناشی از عمق عملیاتی زیردریایی به بدنه فشار اعمال شده است و مرکز مخروطی انتهای زیردریایی و مرکز کره در ابتدای زیردریایی به عنوان محل اعمال شرایط مرزی تکیه‌گاه ساده در نظر گرفته شده است.



شکل ۱. تحلیل تنش بدنه فشار در آباکوس

پس از مدل‌سازی بدنه فشار در نرم‌افزار آباکوس، اعمال شرایط مرزی مناسب، همگرا سازی المان‌ها به منظور اعتباربخشی بیشتر به نتایج تحلیل‌های المان محدود، در نهایت تنش‌های وارد بر زیردریایی و نواحی بحرانی بدنه در شکل ۱ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل نیز مشاهده می‌شود محل بحرانی زیردریایی در محل اتصال بدنه استوانه‌ای میانی به بدنه مخروطی شکل عقب است، که این موضوع نیز قابل تخمین بود [۱۸]. در ادامه با استفاده از اصل سن و نانت، برای بررسی دقیق‌تر و ریزتر کردن مش‌ها در نواحی بحرانی و تبدیل المان‌ها از نوع shell به solid از تکنیک submodel

جدول ۳. ترک‌های فرضی اعمال

سناریوی عمق‌روی	$\bar{a}_i$	سناریوی عمق‌روی	$\bar{a}_j$	سناریوی عمق‌روی	$\bar{a}_k$
۱۰۰-۲۰۰ متر	۱۱	۵۰-۱۰۰ متر	۶	۰-۵۰ متر	۱
۱۰۰-۲۵۰ متر	۱۲	۵۰-۱۵۰ متر	۷	۰-۱۰۰ متر	۲
۱۵۰-۲۰۰ متر	۱۳	۵۰-۲۰۰ متر	۸	۰-۱۵۰ متر	۳
۱۵۰-۲۵۰ متر	۱۴	۵۰-۲۵۰ متر	۹	۰-۲۰۰ متر	۴
۲۰۰-۲۵۰ متر	۱۵	۱۰۰-۱۵۰ متر	۱۰	۰-۲۵۰ متر	۵

همچنین در این تحقیق ۷ ترک فرضی اعمالی با طول‌های مختلف از ۱/۱ میلی‌متر تا ۱۱ میلی‌متر مطابق جدول ۴، به منظور انجام تحلیل‌ها و ترسیم نمودارهای تخمین عمر در هر یک از عمق‌کاری‌های مورد نظر، بررسی می‌شوند.

جدول ۴. ترک‌های فرضی اعمال

ترک فرضی	ترک اول	ترک دوم	ترک سوم	ترک چهارم	ترک پنجم	ترک ششم	ترک هفتم
طول ترک (mm)	۱/۱	۲/۲	۴/۴	۶/۶	۸/۸	۹/۹	۱۱

### ۳-۳. محاسبه تغییرات ضریب شدت تنش ( $\Delta K$ )

همان‌طور که در رابطه (۲) مشاهده شد، برای محاسبه تعداد سیکل عمق‌روی زیردریایی تا رسیدن طول ترک به طول ترک نهایی، نیاز به محاسبه تغییرات ضرایب شدت تنش در هر یک از محدوده‌های عمق‌روی مطابق جدول ۳ است. برای این منظور می‌توان با در نظر گرفتن یک طول ترک اولیه و یک محدوده تنش معادل با نوسانات عمق‌روی زیردریایی، از رابطه زیر استفاده کرد [۲۰]:

$$(\Delta K_I)_k = (K_I)_i - (K_I)_j \quad (3)$$

در این رابطه  $i$  و  $j$  مربوط به محدوده عمق‌روی زیردریایی است و  $k$  اندیسی است که محدوده تغییرات تنش متناسب به اندیس‌های  $i$  و  $j$  را مشخص می‌کند. در رابطه (۳) میزان  $K_I$  در واقع اشاره به ضریب شدت تنش کل دارد، که طبق رابطه (۴) مجموعی از ضرایب شدت تنش فشاری، خمشی و

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_{tot})^m \quad (1)$$

$$N_k = \frac{1}{C} \int_{(a_{initial})_k}^{(a_{final})_k} (\Delta K(a)_k)^{-m} da \quad (2)$$

در رابطه (۲) که از رابطه (۱) قابل تعمیم است در واقع  $N_k$  بیانگر تعداد سیکل‌هایی است که زیردریایی حاوی ترک در محدوده عمق  $k$  می‌تواند تحمل نماید (تعداد سیکل‌های نوسانی زیردریایی در محدوده میان عمق‌های  $i$  و  $j$  تا اینکه ترک به  $(a_{final})_k$  خود برسد).

واضح است برای سناریوهای مختلف عمق‌روی زیردریایی و با در نظر گرفتن یک طول ترک معین، تعداد سیکل‌های لازم برای آنکه طول ترک به میزان طول ترک در عمق نهایی آن سناریو عمق روی رشد کند، می‌توان از معادله (۲) استفاده کرد. نتایج این محاسبات را می‌توان در قالب یک نمودار به‌عنوان نمودار تخمین عمر زیردریایی ارائه نمود. در این نمودارها می‌توان به تعیین بیشترین تعداد سیکل‌های غوطه‌وری ممکن، در هر محدوده کاری (سناریو عمق‌روی) برای جلوگیری از شکست ناپایدار سازه، پرداخت. در این تحقیق برای بررسی عمر زیردریایی، ۱۵ سناریوی مختلف عمق‌روی که احتمال دارد سازه در طول عمر کاری خود تجربه کند، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

### ۳-۲. انتخاب سناریوهای عمق‌روی و مشخصات ترک-

#### های فرضی اعمالی

محدوده کاری یک زیردریایی از نظر عمق‌روی ثابت نیست و یک زیردریایی در طول عمر خود در عمق‌کاری مختلف مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد. از طرفی محدوده عمق‌کاری زیردریایی، نقش مهم و مستقیمی در وقوع پدیده خستگی بدنه آن دارد. مأموریت‌های زیردریایی‌ها اغلب معلوم و در پی آن سناریوی عمق‌روی آن‌ها تعیین می‌شود. در این تحقیق سعی شده با پوشش محدوده وسیعی از عمق‌های کاری ممکن که زیردریایی در طول عمر کاری خود تجربه می‌کند، یک ارزیابی کلی در تعریف سناریوهای عمق‌روی در نظر گرفته شود. بر این اساس ۱۵ سناریو عمق‌روی طبق جدول ۳ انتخاب شده است.

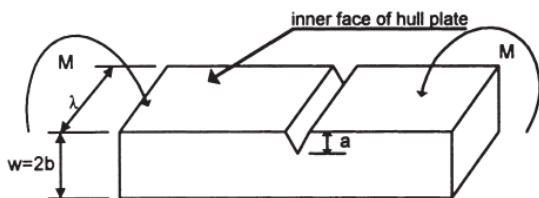
**۳-۲-۳. ضریب شدت تنش ناشی از بارگذاری خمشی**

برای محاسبه ضریب شدت تنش ناشی از ممان خمشی، می توان از رابطه (۶) و (۷) استفاده نمود [۲۱].

$$K_f = \frac{6M}{(w-a)^{3/2}} g(a/w) \quad (۶)$$

$$M = \frac{\sigma_F w^2}{6} \quad (۷)$$

طبق شکل ۴ در رابطه بالا،  $M$  ممان خمشی ناشی از فشار هیدروستاتیک،  $w$  ضخامت جداره سازه،  $a$  طول ترک،  $\sigma_F$  مولفه تنش ناشی از ممان خمشی و  $g(a/w)$  ضریب تصحیح هندسی در بارگذاری خمشی است که طبق جدول ۶ تعیین می شود.



شکل ۴. مدل ضریب شدت تنش در اعمال بار خمشی [۲۱]

جدول ۶. مقادیر ضریب تصحیح هندسی بارگذاری خمشی [۲۱]

$g(a/w)$	$a/w$
۰/۳۶	۰/۰۵
۰/۴۹	۰/۱
۰/۶	۰/۲
۰/۶۶	۰/۳
۰/۶۹	۰/۴
۰/۷۲	۰/۵
۰/۷۳	۰/۶ و بالاتر

**۳-۳-۳. ضریب شدت تنش ناشی از تنش پسماند**

برای محاسبه ضریب شدت تنش ناشی از تنش های پسماند اعمال شده روی بدنه فشار در محل جوش، در این قسمت از روش سائوزا و همکاران [۲۳] استفاده شده است. در این روش مطالعه ای در راستای تخمین توزیع تنش های پسماند انجام شده است. بر اساس این مطالعه تنش پسماند کل، ترکیبی از دو نوع تنش پسماند است: ۱. تنش پسماند در راستای خط جوش طولی، که مقدار آن برابر با تنش تسلیم فولاد بوده و توزیع آن در راستای ضخامت ورق ثابت است.

پسماند در هر یک از عمق های کاری زیردریایی و برای یک طول ترک مشخص است [۲۱].

$$K_{tot} = K_n + K_f + K_r \quad (۴)$$

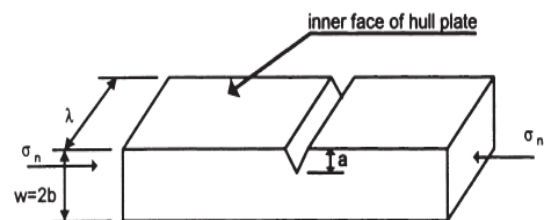
در رابطه بالا  $K_n$  ضریب شدت تنش ناشی از بارگذاری عمودی،  $K_f$  ضریب شدت تنش ناشی از بارگذاری خمشی و  $K_r$  ضریب شدت تنش ناشی از تنش های پسماند است.

**۳-۳-۱. ضریب شدت تنش عمودی**

بر اساس روش ارائه شده در مراجع [۲۱] و [۲۲] در حضور مؤلفه تنش نرمال، محاسبه ضریب شدت تنش عمودی ( $K_n$ ) با رابطه (۵) قابل محاسبه است:

$$K_n = 1.12 \sigma_n \sqrt{\pi a k(a/b)} \quad (۵)$$

مطابق شکل ۳ در رابطه بالا،  $\sigma_n$  مؤلفه فشاری تنش ناشی از اعمال فشار هیدروستاتیک،  $a$  طول ترک،  $b$  نصف ضخامت جداره و  $k(a/b)$  ضریب تصحیح هندسی است که طبق جدول ۵ تعیین می شود.



شکل ۳. مدل ضریب شدت تنش در اعمال بار محوری [۲۱]

جدول ۵. مقادیر ضریب تصحیح هندسی [۲۲]

$K(a/b)$	$a/b$
۱	۰
۱/۰۳	۰/۱
۱/۰۷	۰/۲
۱/۱۵	۰/۳
۱/۲۲	۰/۴
۱/۳۵	۰/۵
۱/۵	۰/۶
۱/۶۹	۰/۷
۱/۹۱	۰/۸
۲/۲	۰/۹
۲/۵۵	۱

زیردریایی (h) بستگی دارند. برای این منظور از رابطه‌های (۹) تا (۱۲) که برای محاسبه تنش ناشی از اعمال فشار هیدروستاتیک روی بدنه فشار زیردریایی در عمق‌های کاری مختلف و به روش عددی ارائه شده است، بهره گرفته می‌شود [۲۵].

$$\sigma_{l \text{ int}}(h) = \sigma_{l \text{ int}}(h_{\text{max}}) \cdot \frac{h}{h_{\text{max}}} \quad (9)$$

$$\sigma_{l \text{ ext}}(h) = \sigma_{l \text{ ext}}(h_{\text{max}}) \cdot \frac{h}{h_{\text{max}}} \quad (10)$$

$$\sigma_{F(h)} = \frac{\sigma_{l \text{ int}} - \sigma_{l \text{ ext}}}{2} \cdot \frac{h}{h_{\text{max}}} \quad (11)$$

$$\sigma_n(h) = \sigma_{l \text{ int}}(h) - \sigma_{F(h)} \quad (12)$$

در روابط بالا  $\sigma_{l \text{ int}}(h)$  تنش نرمال طولی سطح داخلی و در عمق کاری h،  $\sigma_{l \text{ int}}(h_{\text{max}})$  تنش نرمال طولی در سطح داخلی و در بیشترین عمق کاری،  $\sigma_{l \text{ ext}}(h)$  تنش نرمال طولی سطح خارجی و در عمق کاری h و  $\sigma_{l \text{ ext}}(h_{\text{max}})$  تنش نرمال طولی در سطح خارجی و در بیشترین عمق کاری است.

بر اساس تحلیل تنش انجام شده با نرم افزار آباکوس در بدنه فشار زیردریایی موردنظر، نتایج زیر برای تنش‌های طولی (تنش در امتداد طول مخزن) در ناحیه بحرانی آن و در بیشترین بارگذاری اعمالی (حداکثر عمق کاری) به دست آمده‌اند:

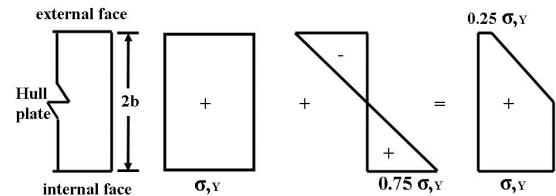
$$\sigma_{L \text{ int}}(h_{\text{Max}}) = -260 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_{L \text{ ext}}(h_{\text{Max}}) = -8 \text{ Mpa}$$

با توجه به این مقادیر و استفاده از رابطه‌های (۹) تا (۱۲)، می‌توان مقادیر تنش در عمق‌های کاری ۰، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ متر که به عنوان محدوده سناریو عمق‌روی زیردریایی مفروض در نظر گرفته شده است را به صورت جدول ۷ محاسبه و ارائه نمود.

در قدم بعد با داشتن مقادیر مؤلفه‌های تنش (خمشی و فشاری) در عمق‌های مختلف گفته شده و با استفاده از رابطه‌های (۵) و (۶) قادر به محاسبه ضرایب شدت تنش فشاری و خمشی خواهیم بود. در این تحقیق ضرایب شدت تنش، برای ۷ ترک فرضی اعمالی با طول‌های مختلف از ۱/۱ میلی‌متر تا ۱۱ میلی‌متر (طول ترک‌های ۱/۱، ۲/۲، ۴/۴، ۶/۶،

۲. تنش پسماند ناشی از جوش فیلت (گلوبی) در راستای محیط بدنه که مقدار آن برابر با ۷۵٪ تنش تسلیم در بخش داخلی ورق و در راستای ضخامت دارای تغییرات خطی است. (شکل ۵)

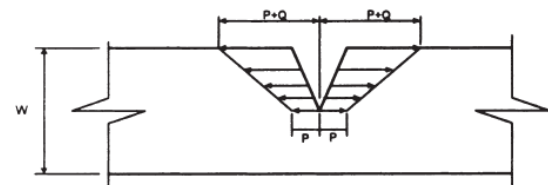


شکل ۵. توزیع طولی تنش پسماند [۲۴]

برای یک مود بازشوندگی خطی (مود یک ترک و موردنظر این تحقیق) به ازای توزیع تنش در امتداد وجه ترک، ضریب شدت تنش، ناشی از اعمال تنش پسماند، به صورت رابطه (۸) و با توجه به شکل ۶، قابل محاسبه است [۲۴].

$$K_T = (1.1215P + 0.4398Q)\sqrt{\pi a} \quad (8)$$

در رابطه بالا P تنش در نوک ترک و Q تنش در وجه دهانه (بازشدگی) ترک است.



شکل ۶. تنش پسماند در نوک ترک [۲۴]

پارامترهای P و Q به دلیل آنکه تابعی از رشد طول ترک هستند و از آنجا که توزیع تنش پسماند متغیر است، می‌توانند تغییر کنند.

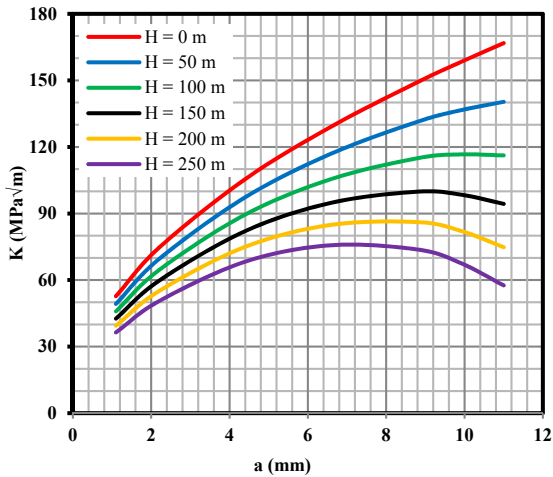
#### ۴. محاسبه ضرایب شدت تنش

##### ۴-۱. محاسبه ضرایب شدت تنش به روش تحلیلی

با توجه به روابط بیان شده برای محاسبه ضرایب شدت تنش، واضح است با محاسبه هر یک از آن‌ها و کاربرد رابطه (۴) قادر به محاسبه ضریب شدت تنش کل خواهیم بود. بنابراین در اولین اقدام باید به محاسبه مقادیر مؤلفه‌های فشاری و خمشی تنش ناشی از فشار هیدرواستاتیک پرداخته شود. واضح است توزیع تنش فشاری و خمشی به عمق کاری



مشاهده می‌شود مقدار ضریب شدت تنش در عمق‌های بیش از ۱۵۰ متر و در طول ترک‌های بیش از ۸ میلی‌متر منفی‌تر شده و میزان افزایش ضریب شدت تنش ناشی از تنش پسماند با افزایش طول ترک در برابر آن ناچیز است.



شکل ۷- نمودار ضریب شدت تنش کل بر حسب طول ترک، در عمق‌های مختلف زیر دریایی به روش تحلیلی

#### ۴-۲. محاسبه ضرایب شدت تنش به روش المان محدود

در این بخش به جای محاسبه ضرایب شدت تنش با استفاده از روش‌های تجربی و تحلیلی، از روش المان محدود استفاده شده است. لازم به یادآوری است که به دلیل عدم اعمال تنش‌های پسماند در نرم‌افزار، از نقش آن‌ها صرفه نظر شده و ضریب شدت تنش حاصل از نرم‌افزار تنها ناشی از شرایط بارگذاری هیدروستاتیکی و شرایط مرزی در نظر گرفته شده در حل مسئله است. بنابراین ضریب شدت تنش ارائه شده با نرم‌افزار در واقع مجموعی از ضرایب شدت تنش فشاری و خمشی است. به این منظور، پس از مدل‌سازی ترک با طول‌های مختلف در ناحیه بحرانی زیر دریایی مطابق شکل ۸، نتایج حاصل را به عنوان مجموع ضریب شدت تنش فشاری و خمشی حاصل از روش المان محدود می‌توان در جدول ۹ ارائه داد.

مجموع ضریب شدت تنش فشاری و خمشی حاصل از روش المان محدود در جدول ۹ با مقادیر متناظر در روش تحلیلی و با استفاده از رابطه‌های (۵) و (۶) مورد مقایسه قرار گرفته است و میزان درصد انحراف‌ها ارائه شده است.

در هر یک از عمق‌های یادشده، مورد بررسی قرار می‌گیرند. همچنین به منظور محاسبه ضریب شدت تنش ناشی از تنش‌های پسماند حاصل از جوشکاری، چنانکه گفته شد از رابطه (۸) استفاده شده و نتایج محاسبات را می‌توان در قالب جدول ۸ ارائه نمود. لازم به یادآوری است که ضریب شدت تنش پسماند برخلاف ضریب شدت تنش عمودی و خمشی تابعی از عمق نبوده و تنها متأثر از طول ترک است.

جدول ۷. مقادیر مؤلفه‌های تنش طولی، فشاری و خمشی ناشی از اعمال تنش‌های هیدرواستاتیکی در ناحیه بحرانی بدنه فشار

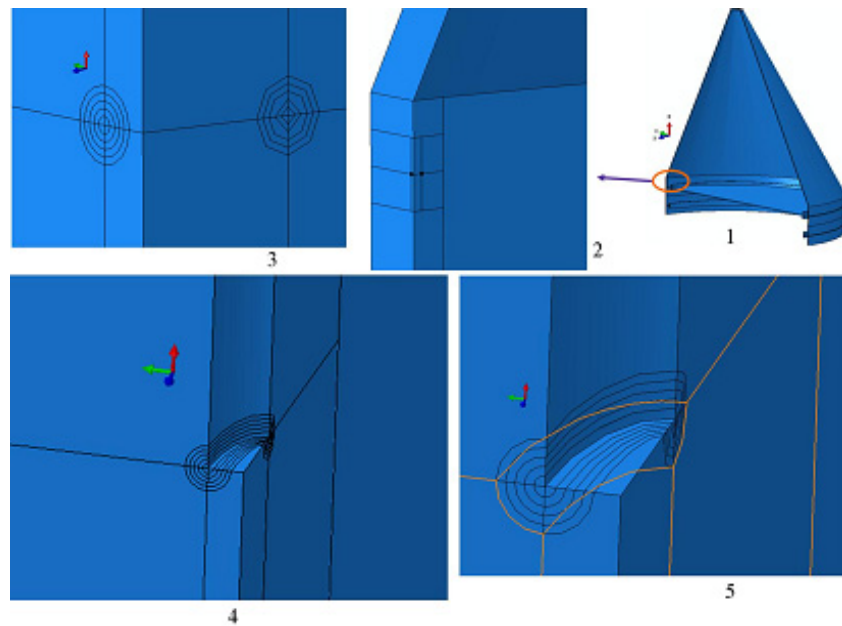
ردیف	عمق (h)	$\sigma_{int}$	$\sigma_{ext}$	$\sigma_F(h)$	$\sigma_n(h)$
۱	۰	۰	۰	۰	۰
۲	۵۰	-۵۲	-۱/۶	-۵/۰۴	-۴۶/۶۹
۳	۱۰۰	-۱۰۴	-۳/۲	-۲۰/۱۶	-۸۳/۸۴
۴	۱۵۰	-۱۵۶	-۴/۸	-۴۵/۳۶	-۱۱۰/۶۴
۵	۲۰۰	-۲۰۸	-۶/۴	-۸۰/۶۴	-۱۲۷/۳۶
۶	۲۵۰	-۲۶۰	-۸	-۱۲۶	-۱۳۴

جدول ۸. ضریب شدت تنش پسماند در طول‌های ترک مختلف

ردیف	a (mm)	$K_r$ (MPa√m)
۱	۱/۱	۵۲/۷۲۹۱
۲	۲/۲	۷۴/۵۷۰۲
۳	۴/۴	۱۰۵/۴۵۸
۴	۶/۶	۱۲۹/۱۵۹
۵	۸/۸	۱۴۹/۱۴
۶	۹/۹	۱۵۸/۱۸۷
۷	۱۱	۱۶۶/۷۴۴

در نهایت پس از محاسبه هر سه پارامتر ضرایب شدت تنش برای هر یک از ۷ عمق ترک و در هر یک از ۶ عمق کاری در نظر گرفته شده برای سازه، با استفاده از رابطه (۴) قادر به محاسبه ضریب شدت تنش کل خواهیم بود. نمودار شکل ۷ این نتایج را نشان می‌دهد. در این نمودار ضریب شدت تنش در عمق‌های بیش از ۱۵۰ متر و در طول ترک‌های بیش از ۸ میلی‌متر کاهش می‌یابد. دلیل این رفتار کاهش، نرخ افزایش مجموع ضریب شدت تنش فشاری و خمشی است که در جدول ۹ نشان داده می‌شود. همان‌طور که در جدول ۹





شکل ۸. مدل سازی ترک در نرم افزار و در ناحیه بحرانی

جدول ۹. مقایسه مجموع ضریب شدت تنش فشاری و خمشی برای هر عمق ترک و در هر عمق کاری زیردریایی، به روش تحلیلی و FEM

درصد انحراف (%)	مجموع شدت تنش فشاری و خمشی (MPa. $\sqrt{m}$ )		عمق (m)	طول ترک فرضی (mm)	ردیف
	FEM	تحلیلی			
۰	۰	۰	۰	۱/۱	۱
۶/۳۶	-۳/۷۱	-۳/۴۷	۵۰		۲
۴/۱۴	-۷/۱۵	-۶/۸۵	۱۰۰		۳
۶/۷۵	-۱۰/۸۵	-۱۰/۱۲	۱۵۰		۴
۵/۴	-۱۴/۰۵	-۱۳/۲۹	۲۰۰		۵
۵/۶	-۱۷/۳۳	-۱۶/۳۵	۲۵۰		۶
۰	۰	۰	۰	۲/۲	۷
۴/۳۱	-۵/۳۴	-۵/۱۱	۵۰		۸
۷/۱۱	-۱۰/۸۴	-۱۰/۰۷	۱۰۰		۹
۶/۴۳	-۱۵/۹۱	-۱۴/۸۸	۱۵۰		۱۰
۶/۴۲	-۲۰/۸۹	-۱۹/۵۵	۲۰۰		۱۱
۳/۹۶	-۲۵/۰۷	-۲۴/۰۷	۲۵۰		۱۲
۰	۰	۰	۰	۴/۴	۱۳
۵/۱۶	-۸/۶۲	-۸/۱۷	۵۰		۱۴
۴/۷۹	-۱۶/۷۸	-۱۵/۹۷	۱۰۰		۱۵
۴/۷۲	-۲۴/۵۸	-۲۳/۴۱	۱۵۰		۱۶
۵/۷۳	-۳۲/۳۴	-۳۰/۴۹	۲۰۰		۱۷
۵/۵۹	-۳۹/۴	-۳۷/۲	۲۵۰		۱۸

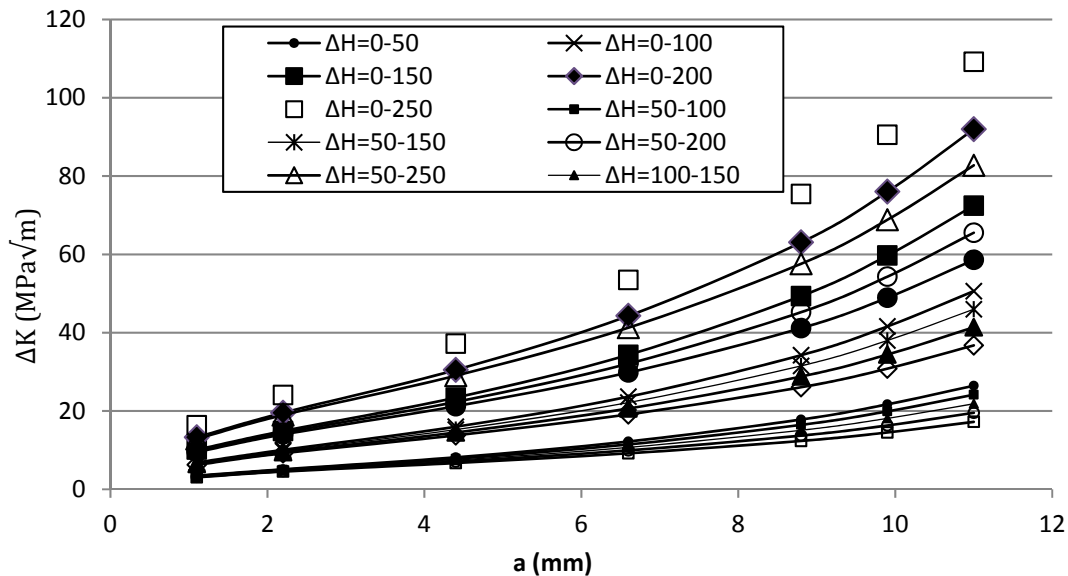
درصد انحراف (%)	مجموع شدت تنش فشاری و خمشی ( $\text{MPa}\cdot\sqrt{m}$ )		عمق (m)	طول ترک فرضی (mm)	ردیف
	FEM	تحلیلی			
۰	۰	۰	۰	۶/۶	۱۹
۶/۳۲	-۱۳/۰۳	-۱۲/۲	۵۰		۲۰
۵/۴۴	-۲۵/۰۱	-۲۳/۶۵	۱۰۰		۲۱
۴/۶۵	-۳۶/۰۲	-۳۴/۳۴	۱۵۰		۲۲
۴/۱۸	-۴۶/۲۲	-۴۴/۲۸	۲۰۰		۲۳
۴/۷۲	-۵۶/۱۳	-۵۳/۴۷	۲۵۰		۲۴
۰	۰	۰	۰	۸/۸	۲۵
۴/۶۷	-۱۸/۶۹	-۱۷/۸۱	۵۰		۲۶
۴/۲۹	-۳۵/۸	-۳۴/۲۵	۱۰۰		۲۷
۵/۴۲	-۵۲/۱۷	-۴۹/۳۴	۱۵۰		۲۸
۴/۸۹	-۶۶/۳	-۶۳/۰۵	۲۰۰		۲۹
۶/۵۲	-۸۰/۶۷	-۷۵/۴۱	۲۵۰		۳۰
۰	۰	۰	۰	۹/۹	۳۱
۵/۸۳	-۲۳/۰۴	-۲۱/۶۹	۵۰		۳۲
۶/۳۶	-۴۴/۴۳	-۴۱/۵۹	۱۰۰		۳۳
۴/۷۸	-۶۲/۷	-۵۹/۶۹	۱۵۰		۳۴
۶/۲۳	-۸۱/۰۷	-۷۶	۲۰۰		۳۵
۳/۸۲	-۹۴/۱۳	-۹۰/۵۲	۲۵۰		۳۶
۰	۰	۰	۰	۱۱	۳۷
۴/۵۴	-۲۷/۷۱	-۲۶/۴۵	۵۰		۳۸
۴/۷۱	-۵۳/۱	-۵۰/۵۹	۱۰۰		۳۹
۶/۶۴	-۷۷/۵۹	-۷۲/۴۴	۱۵۰		۴۰
۵/۶۱	-۹۷/۴۴	-۹۱/۹۷	۲۰۰		۴۱
۵/۳۴	-۱۱۵/۳۶	-۱۰۹/۲۱	۲۵۰		۴۲

بنابراین ضریب شدت تنش کل در هر عمقی مطابق جدول ۱۰ و با در نظر گرفتن هر یک از سناریوهای عمق روی ارائه شده در جدول ۳ و احتساب ضرایب شدت تنش کل آن‌ها در هر یک از ۷ طول ترک فرضی ارائه شده و با کاربرد رابطه ۵، به راحتی می‌توان میزان تغییرات ضریب شدت تنش را محاسبه نمود. نتایج حاصل از این محاسبات در نمودارهای شکل ۹ ارائه شده است.

بنابراین ضریب شدت تنش کل در عمق‌های کاری مختلف زیردریایی و به ازای طول ترک‌های مختلف، با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود به وسیله نرم‌افزار آباکوس و مطابق با جدول ۱۰ محاسبه می‌شود. لازم به یادآوری است که نتایج ضرایب شدت تنش موجود در این جدول با نتایج تحلیلی ضرایب شدت تنش صحنه‌سنجی شده است و حداکثر درصد خطا حدود ۷ درصد بوده است.

جدول ۱۰. ضرایب شدت تنش کل در طول ترک‌های موردنظر و در عمق‌های مختلف زیردریایی

$K_{tot}$	h	a	ردیف		$K_{tot}$	h	a	ردیف
۹۴/۸۱۸۴	۱۵۰	۶/۶	۲۲		۵۲/۷۳	۰	۱/۱	۱
۸۴/۸۷۷۳	۲۰۰		۲۳		۴۹/۲۵۵	۵۰		۲
۷۵/۶۸۹۱	۲۵۰		۲۴		۴۵/۸۸۲۲	۱۰۰		۳
۱۴۹/۱۴	۰	۸/۸	۲۵		۴۲/۶۱۱۷	۱۵۰		۴
۱۳۱/۳۳۰۹	۵۰		۲۶		۳۹/۴۴۳۳	۲۰۰		۵
۱۱۴/۸۸۵۷	۱۰۰		۲۷		۳۶/۳۷۷	۲۵۰		۶
۹۹/۸۰۴۴	۱۵۰		۲۸		۷۴/۵۷	۰	۲/۲	۷
۸۶/۰۸۷	۲۰۰		۲۹		۶۹/۴۶۳۶	۵۰		۸
۷۳/۷۳۳۵	۲۵۰		۳۰		۶۴/۵۰۳	۱۰۰		۹
۱۵۸/۱۸۷	۰	۹/۹	۳۱		۵۹/۶۸۸۵	۱۵۰		۱۰
۱۳۶/۴۹۳۹	۵۰		۳۲		۵۵/۰۱۹۹	۲۰۰		۱۱
۱۱۶/۵۹۵۸	۱۰۰		۳۳		۵۰/۴۹۷۲	۲۵۰	۱۲	
۹۸/۴۹۲۶	۱۵۰		۳۴		۱۰۵/۴۵۸	۰	۴/۴	۱۳
۸۲/۱۸۴۴	۲۰۰		۳۵		۹۷/۲۸۸۷	۵۰		۱۴
۶۷/۶۷۱۱	۲۵۰		۳۶		۸۹/۴۸۴۲	۱۰۰		۱۵
۱۶۶/۷۴۴	۰	۱۱	۳۷		۸۲/۰۴۴۵	۱۵۰		۱۶
۱۴۰/۲۹۵	۵۰		۳۸		۷۴/۹۶۹۵	۲۰۰		۱۷
۱۱۶/۱۴۹۸	۱۰۰		۳۹		۶۸/۲۵۹۳	۲۵۰	۱۸	
۹۴/۳۰۸۳	۱۵۰		۴۰		۱۲۹/۱۵۹	۰	۶/۶	۱۹
۷۴/۷۷۰۷	۲۰۰		۴۱		۱۱۶/۹۵۹۲	۵۰		۲۰
۵۷/۵۳۶۷	۲۵۰		۴۲		۱۰۵/۵۱۲۴	۱۰۰		۲۱



شکل ۹. نمودار تغییرات ضریب شدت تنش ( $\Delta K$ ) بر حسب عمق ترک، در محدوده سناریوهای مختلف عمق روی

$$y = 0.0144x^3 - 0.148x^2 + 1.7253x + 1.5449$$

For 100-200:

$$y = 0.0279x^3 - 0.3008x^2 + 3.4218x + 3.032$$

For 100-250:

$$y = 0.0403x^3 - 0.4583x^2 + 5.0896x + 4.4606$$

For 150-200:

$$y = 0.0134x^3 - 0.1528x^2 + 1.6965x + 1.4871$$

For 150-250:

$$y = 0.0258x^3 - 0.3103x^2 + 3.3643x + 2.9157$$

For 200-250:

$$y = 0.0124x^3 - 0.1575x^2 + 1.6678x + 1.4286$$

بنابراین اگر در معادله‌های منحنی‌های یادشده به جای  $y$  مقدار تغییرات تنش ( $\Delta K$ ) و به جای  $x$  مقدار طول ترک ( $a$ ) را جایگزین کنیم، مشخص است که در هر محدوده سناریو عمق روی زیردریایی، تابع مقدار تغییرات ضریب شدت تنش بر حسب عمق ترک را طبق رابطه (۱۳) خواهیم داشت. واضح است این توابع در واقع روابط مورد نیاز ما در رابطه (۲) برای محاسبه سیکل‌های تحمل آسیب، هستند.

$$\Delta K_{i \sim j} = f(a) \quad (13)$$

با استفاده از منحنی‌های شکل ۹، می‌توان رابطه تغییرات ضرایب شدت تنش را به ازای طول ترک‌های مختلف و با استفاده از روش برازش منحنی در عمق‌های کاری مختلف استخراج کرد. پس از این کار معادله‌های هریک از منحنی‌های شکل ۹ را می‌توان به قرار زیر به دست آورد:

For 0-50:

$$y = 0.0165x^3 - 0.1385x^2 + 1.7817x + 1.6645$$

For 0-100:

$$y = 0.0319x^3 - 0.2817x^2 + 3.5354x + 3.2691$$

For 0-150:

$$y = 0.0464x^3 - 0.4298x^2 + 5.2607x + 4.814$$

For 0-200:

$$y = 0.0598x^3 - 0.5826x^2 + 6.9572x + 6.3011$$

For 0-250:

$$y = 0.0722x^3 - 0.74x^2 + 8.625x + 7.7297$$

For 50-100:

$$y = 0.0155x^3 - 0.1433x^2 + 1.7537x + 1.6046$$

For 50-150:

$$y = 0.0299x^3 - 0.2913x^2 + 3.479x + 3.1495$$

For 50-200:

$$y = 0.0433x^3 - 0.4441x^2 + 5.1755x + 4.6366$$

For 50-250:

$$y = 0.0557x^3 - 0.6016x^2 + 6.8433x + 6.0652$$

For 100-150:

## ۵. نتایج

## ۵-۱. محاسبه عمق ترک بحرانی و تخمین عمر سازه

در فرایند رشد ترک در بدنه یک سازه، با رسیدن طول ترک به مقدار بحرانی، سازه دچار شکست ترد<sup>۲</sup> می‌شود. به همین منظور اطلاع از نقطه پایانی در فرایند رشد دادن ترک‌های فرضی اعمالی در فرایند عمق‌روی امری مهم است. بیشترین طول ترک مجاز در سازه بدنه فشار زیردریایی از طریق کاربرد اصول مکانیک شکست الاستیک خطی قابل تعیین است. بر این اساس، زمانی که ضریب شدت تنش کل با ضریب شدت تنش بحرانی ماده ( $K_{IC}$ ) برابر شود، یک شکست ناپایدار در سازه به وجود خواهد آمد. با برقراری تساوی رابطه (۱۴)، ماکزیمم طول ترک محاسبه می‌شود. بنابراین اگر طول ترک موردنظر بزرگ‌تر از طول ترک بحرانی باشد، ساختار بدنه فشار با ایجاد یک شکست خستگی ناپایدار در طول عمر کاری خود مواجه خواهد شد.

$$K_{tot}(a_{critical}) = K_{IC} \quad (14)$$

با توجه به ضرایب شدت تنش در بخش ۸ که به صورت تابعی از طول ترک است، می‌توان نتیجه گرفت زمانی که زیردریایی روی سطح و در عمق کاری صفر قرار دارد، ترک تحت بیشترین میزان تنش قرار دارد. باید گفت که این نتیجه در پژوهش رابلس و همکاران [۲۰] نیز مشاهده شده است.

واضح است تنش‌های محوری فشاری و خمشی ناشی از فشار هیدروستاتیک در عمق کاری صفر (حرکت سطحی-زمانی که محور طولی زیردریایی مماس بر سطح آب است) مقدار صفر را به خود اختصاص می‌دهند [۱]، بنابراین در این حالت (حرکت سطحی) ضریب شدت تنش کل، برابر با ضریب شدت تنش ناشی از تنش‌های پسماند کششی به جا مانده از فرایندهای جوشکاری، خواهد بود. در این صورت واضح است که بیشترین عمق ترک را می‌توان با برقراری تساوی بین  $K_{IC}$  و  $K_T$  مطابق با رابطه (۱۵)، به دست آورد [۲۰]. شایان ذکر است که سایر مراجع [۲۵] نیز از این رابطه برای تعیین ضریب شدت تنش پسماند استفاده کردند.

$$K_t = K_r = \frac{(1.1215P + 0.43Q)\sqrt{\pi a_{critic}}}{1000} = K_{IC} \quad (15)$$

P و Q به ترتیب تنش عمودی حداکثر در نوک ترک و وجه دهانه ترک است. با توجه به اینکه در حرکت سطحی زیردریایی  $Q = 0$  و  $P = 800 \text{ Mpa}$  می‌باشد [۲۶]، و بر اساس اطلاعات جدول ۲ مقدار  $K_{IC}$  مشخص است، بر اساس رابطه (۱۵) طول بحرانی ترک برابر است با:

$$a_{critical} = 19.139 \text{ mm}$$

## ۵-۲. استخراج گراف سیکل‌های تحمل آسیب

با داشتن تغییرات ضریب شدت تنش ( $\Delta K_I$ ) در هر محدوده سناریوی عمق‌روی به صورت تابعی از طول ترک (a)، که در بخش ۸ محاسبه شد، تعداد سیکل‌های عمر خستگی سازه از دیدگاه تحمل آسیب می‌تواند محاسبه شود. بر اساس بخش ۹، بیشترین طول ترک مجاز برابر با  $19/139$  میلی‌متر محاسبه شد. برای تخمین عمر سازه نیاز به طول ترک اولیه است. راه حل درست برای تعیین طول ترک اولیه انجام آزمایش‌های غیر مخرب<sup>۳</sup> است. اما به دلیل عدم دسترسی به نتایج چنین آزمایش‌هایی، حداکثر دقت این آزمایش‌ها به عنوان مبنای طول ترک اولیه قرار می‌گیرد. بنابراین طول ترک اولیه برابر با حداکثر دقت این آزمایش‌ها، برابر با  $2 \text{ mm}$  است، در نظر گرفته می‌شود. در این حالت رابطه (۲) بر اساس ضرایب ثابت مطابق جدول ۲، به صورت رابطه (۱۶) ارائه می‌شود.

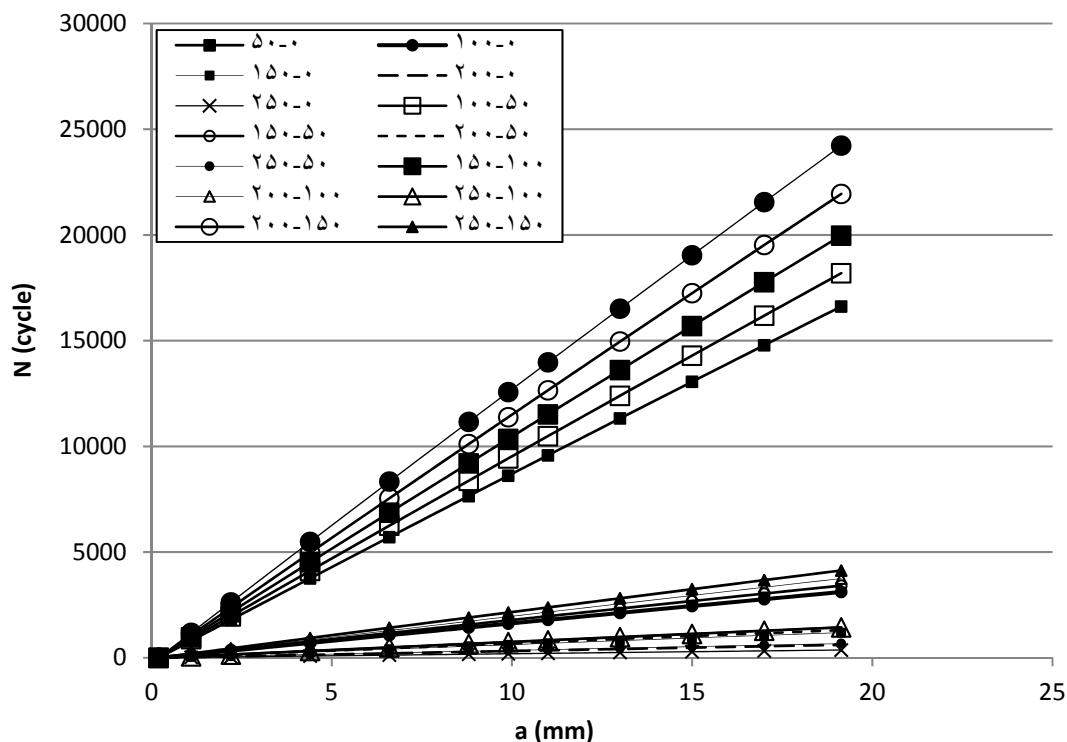
$$N = \frac{10^7}{3.14} \int_{0.2}^a (\Delta K(a))^{-2.48} da \quad (16)$$

بنابراین با کاربرد رابطه (۱۶) برای هر سناریوی عمق‌روی و افزایش مرحله به مرحله طول ترک تا مقدار بحرانی، نمودار تغییرات عمر زیردریایی بر اساس طول ترک‌های مختلف مشاهده شده توسط آزمایش‌های غیرمخرب در بدنه فشار زیردریایی و انواع سناریوهای عمق روی طبق شکل ۱۰ به دست می‌آید. در این نمودار، محور افقی طول ترک اولیه مشاهده شده در بدنه فشار زیردریایی است؛ بنابراین همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود با افزایش عمق عملیاتی عمر زیردریایی کاهش می‌یابد و با کاهش عمق عملیاتی، عمر

مشخص کند، طول ترک گفته شده بعد از  $N_1$  سیکل به طول  $a_{final,1}$  می‌رسد. لازم به یادآوری است که  $a_{final,1}$  طول ترک اولیه زیردریایی برای بهره‌برداری در محدوده شناوری بعدی خواهد بود. چنانچه این زیردریایی در مأموریت بعدی با طول ترک اولیه  $a_{final,1}$  در یک محدوده شناوری دیگری بهره‌برداری شود، این طول ترک بعد از  $N_2$  سیکل به طول  $a_{final,2}$  خواهد رسید. در نتیجه با توجه به طول ترک نهایی  $19/139$  mm برای بدنه زیردریایی و محدوده‌های شناوری متصور برای زیردریایی توسط بهره‌بردار، عمر نهایی زیردریایی مجموع  $N$ ‌های محاسبه شده در هر یک از عمق‌های عملیاتی گفته شده تا رسیدن به طول ترک نهایی  $19/139$  mm خواهد بود.

زیردریایی افزایش می‌یابد. بدیهی است که با افزایش طول ترک نهایی مجاز مطابق بازه انتگرال گیری در رابطه (۱۶)، عمر زیردریایی افزایش می‌یابد زیرا تعداد سیکل‌های بیشتری می‌تواند تا قبل از رسیدن به طول ترک نهایی بهره‌برداری شود. همچنین برای تمام عمق‌های عملیاتی، با افزایش طول ترک اولیه میزان عمر زیردریایی تا رسیدن به طول ترک نهایی  $19/139$  mm کاهش می‌یابد؛ یعنی چنانچه یک ترک با طول اولیه  $5$  mm در بدنه فشار زیردریایی مشاهده شود نسبت به طول ترک اولیه  $15$  mm، عمر بیشتری را تا رسیدن به طول ترک نهایی  $19/139$  mm طی می‌کند.

لازم است بدانیم که اگر یک زیردریایی با یک طول ترک مشخص ( $a_{initial}$ ) که در تست‌های غیرمخرب شناسایی می‌شود، شروع به بهره‌برداری در یک محدوده شناوری



شکل ۱۰. نمودار عمر برحسب طول ترک در عمق‌های کاری مختلف - نمای کلی

برای ارزیابی آسیب خستگی بدنه فشار زیردریایی بر اساس دیدگاه مکانیک شکست الاستیک خطی ارائه شده است. در این مدل نیازی به محاسبه مرحله به مرحله رشد ترک نیست. این مدل روی یک نوع اتصال مخروطی موجود در بدنه فشار زیردریایی اعمال می‌شود.

## ۶. نتیجه گیری

نقش تنش‌های پسماند و وجود عیوب حاصل از فرایندهای ساخت مانند جوشکاری عاملی مهم در بررسی خستگی و تخمین عمر باقیمانده سازه‌ها مانند بدنه فشار زیردریایی بوده و لزوم توجه به آن کاملاً مشهود است. در این مقاله مدلی

معرفی پارامتر	واحد	نماد
عمق اولیه ترک در لحظه ای که زیردریایی وارد محدوده عمق کاری $k$ می شود.	mm	$(a_{initial})_k$
عمق نهایی ترک در لحظه ای که زیردریایی محدوده عمق کاری $k$ را ترک می کند.	mm	$(a_{final})_k$
تغییرات ضریب شدت تنش	MPa. $\sqrt{m}$	$\Delta K$
تابع تغییرات ضریب شدت تنش برحسب عمق ترک در محدوده عمق کاری $k$	MPa. $\sqrt{m}$	$\Delta K(a)_k$
تعداد سیکل هایی که زیردریایی در محدوده عمق $k$ در حضور ترک می تواند تحمل نماید.	-	$N_k$
ضریب شدت تنش کل	MPa. $\sqrt{m}$	$K_{tot}$
ضریب شدت تنش فشاری	MPa. $\sqrt{m}$	$K_n$
ضریب شدت تنش خمشی	MPa. $\sqrt{m}$	$K_f$
ضریب شدت تنش پسماند	MPa. $\sqrt{m}$	$K_r$
طول ترک بحرانی که در آن شکست ترد اتفاق می افتد.	mm	$a_{critical}$
تنش در نوک ترک	pa	P
تنش در وجه دهانه (بازشدگی) ترک	pa	Q

### مراجع

[۱] قاجار رحمت الله. مقدمه ای بر مکانیک شکست. تهران: انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی؛ ۱۳۸۱.

[۲] اسدی بهروز. تخمین عمر پوسته بدنه زیردریایی تحت فشار هیدرواستاتیک از دیدگاه تحمل آسیب [پایان نامه کارشناسی ارشد]. تهران: دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، دانشکده علوم و فنون دریایی؛ ۱۳۹۳.

[3] Raju IS, Newman Jr JC. Stress Intensity Factor for Internal and external Surface Cracks in

تجزیه و تحلیل پارامترهای مدل، نشان می دهد که توزیع تنش پسماند ناشی از جوشکاری بر فرایند خستگی بدنه فشار زیردریایی تأثیر قابل توجهی دارد. این مدل بر اساس تجزیه میدان تنش ناشی از فشار هیدرواستاتیک خارجی به تنش خمشی و غشایی ارائه می شود. با استفاده از این توزیع تنش و با توجه به اینکه بدنه فشار شامل یک ترک محیطی می تواند به عنوان یک سازه در شرایط کرنش صفحه ای تحلیل شود، ضرایب شدت تنش مربوط به این تنش ها و تنش پسماند، می تواند با روابط ساده محاسبه شوند.

با توجه به سناریوهای بهره برداری و عمق روی مشخص شده برای زیردریایی و تعیین عمق های عملیاتی، این مدل محدوده ضریب شدت تنش را برای یک عمق ترک معین به عنوان تابعی از عمق عملیاتی مشخص می کند. بر اساس نتایج ضرایب شدت تنش و اعمال رابطه پاریس برای پیش بینی رشد ترک، تعداد سیکل های عمق روی زیردریایی تا رسیدن به طول ترک بحرانی که موجب شکست ناپایدار بدنه فشار زیردریایی خواهد شد، در یک عمق عملیاتی مشخص به دست می آید.

نتایج عددی ارائه شده در این مقاله نشان می دهد که اندازه ترک اولیه تأثیر زیادی بر تحلیل خستگی دارد، زیرا این پارامتر حد پایین انتگرال رابطه پاریس را تعیین می کند. همچنین ابتدای عمر عملیاتی سازه رشد ترک بسیار کم است و به تدریج با افزایش عمق عملیاتی، رشد ترک افزایش می یابد. نتایج تحقیق حاضر این امکان را ایجاد می کند که با مشاهده هر نوع ترکی با عمق مشخص بر روی بدنه فشار زیردریایی و با توجه به محدوده و سناریوی عمق روی و بهره برداری از زیردریایی، قابلیت پیش بینی نحوه رشد آن ترک و در نتیجه تخمین عمر زیردریایی وجود داشته باشد.

### ۷. فهرست علائم

معرفی پارامتر	واحد	نماد
عمق ترک فرضی	mm	a
ضریب رابطه پاریس	-	C
ضریب رابطه پاریس	-	m



- Frattura ed Integrità Strutturale. 2019 Jun 26;13(49):599-613.
- [16] Bouadjra BB, Abdelkader M. Optimization of the geometrical parameters of bonded composite wrap for repairing cracked pipelines. *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2018 Sep 23;12(46):102-12.
- [17] Leister B. Fracture Toughness of NUCu-140 Simulated Heat Affected Zones [Master's thesis]. Univ. Lehigh; 2011.
- [18] ASME Boiler and Pressure Vessel Code. Section VIII. Division 2; 2013.
- [19] Salari M, Shahani AR, Moayeri Kashani H. Fatigue crack growth analysis of a reinforced cylindrical shell under random loading. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2014 Nov;37(11):1197-210.
- [20] Robles LB, Buelta MA, Goncalves E, Souza GF. A method for the evaluation of the fatigue operational life of submarine pressure hulls. *International journal of fatigue*. 2000 Jan 1;22(1):41-52.
- [21] Burcher R, Rydill L. Concepts in submarine design. Cambridge University Press; 1995.
- [22] Duffey TA, Rodriguez EA. Remaining life of containment vessels for repeated explosive testing. ASME-PUBLICATIONS-PVP. 2001;430:327-32.
- [23] Souza GFM. Analysis of residual stress in welded structures [Dissertation]. Sao Paulo, Department of Engineering Naval Ocean: Univ. EPUSP; 1990.
- [24] Murakami Y. Stress intensity factor handbook. Oxford: Pergamon; 1987. p. 110. (Vol. 1).
- [25] Robles LB, Buelta MA, Goncalves E, Souza GF. A method for the evaluation of the fatigue operational life of submarine pressure hulls. *International journal of fatigue*. 2000 Jan 1;22(1):41-52.
- [26] Souza GFM. Analysis of residual stress in welded structures [Dissertation]. Sao Paulo, Department of Engineering Naval Ocean: Univ. EPUSP; 1990.
- Cylindrical Vessels. *Trans. ASME, Journal of Pressure Vessel Technology*. 1982;106:293-8.
- [4] Rickerby DG, Fenici P. Simultaneous light ion irradiation and fatigue experiment for the Ispra cyclotron. *Journal of Nuclear Materials*. 1981 Jan 1;104:1577-81.
- [5] MINOTTI M, SALVINI P. Experiments and model predictions for fatigue crack propagation in riveted lap-joints with multiple site damage. *Fracture of Engineering Materials & Structures*; 2015.
- [6] Salari M, Shahani AR, Moayeri Kashani H. Fatigue crack growth analysis of a reinforced cylindrical shell under random loading. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2014 Nov;37(11):1197-210.
- [7] Jadmiko E, Arief IS, Arif L. Comparison of Stern Wedge and Stern Flap on Fast Monohull Vessel Resistance. *International Journal of Marine Engineering Innovation and Research*. 2018 Dec 26;3(2):41-9.
- [8] HELLER JR, USN SR. A Personal Philosophy of Structural Design of Submarine Pressure Hulls. *Naval Engineers Journal*. 1962 May;74(2):223-36.
- [9] Dunham FW. Fatigue testing of large-scale models of submarine structural details. *Marine Technology*. 1965;2(3):299-307.
- [10] Kilpatrick IM. The fatigue characteristics of submarine structures subjected to external pressure cycling. *International Conference Held at the Admiralty Research Establishment*; 1986 May 20-23; Dunfermline, Scotland.
- [11] Fuchs HO, Stephens RI. Metal fatigue in engineering. Iowa: John Wiley and Sons; 1980.
- [12] Woo KS, Ahn JS, Yang SH. Cylindrical discrete-layer model for analysis of circumferential cracked pipes with externally bonded composite materials. *Composite Structures*. 2016 May 20;143:317-23.
- [13] Zarrinzadeh H, Kabir MZ, Deylami A. Crack growth and debonding analysis of an aluminum pipe repaired by composite patch under fatigue loading. *Thin-Walled Structures*. 2017 Mar 1;112:140-8.
- [14] Zarrinzadeh H, Kabir MZ, Deylami A. Experimental and numerical fatigue crack growth of an aluminium pipe repaired by composite patch. *Engineering Structures*. 2017 Feb 15;133:24-32.
- [15] Belhadri DE, Belhamiani M, Bouzitouna WN, Oudad W. Stress intensity factors analyses for external semi-elliptical crack for repaired gas-pipeline by composite overwrap under pressure.

## پی نوشت

1. Finite Element Method (FEM)
2. Fast Fracture (Brittle Fracture)
3. Non Destructive Tests (NDT)