



مرکز بررسی‌ها و مطالعات دریایی

سازمان بنادر و دریانوردی به عنوان تنها مرجع حاکمیتی کشور در امور بندری، دریایی و کشتی‌رانی بازرگانی به منظور ایفای نقش مرجعیت دانشی خود و در راستای تحقق راهبردهای کلان نقشه جامع علمی کشور مبنی بر "حمایت از توسعه شبکه‌های تحقیقاتی و تسهیل انتقال و انتشار دانش و سامان‌دهی علمی" از طریق "استانداردسازی و اصلاح فرایندهای تولید، ثبت، داوری و سنجش و ایجاد بانک‌های اطلاعاتی یکپارچه برای نشریات، اختراعات و اکتشافات پژوهشگران"، اقدام به ارایه این اثر در سایت SID می‌نماید.



سازمان بنادر و دریانوردی



## ارزیابی و تعیین خصوصیات مکانیک شکست مود مرکب جوش در اتصالات سکویای ثابت دریایی با آزمایش آرکان

نقدعلی چوپانی  
دانشگاه صنعتی سهند

احمدرضا مصطفی قره‌باغی  
دانشگاه صنعتی سهند

سید رضا حسینی  
دانشگاه صنعتی سهند

[choupani@sut.ac.ir](mailto:choupani@sut.ac.ir)

[mgharabaghi@sut.ac.ir](mailto:mgharabaghi@sut.ac.ir)

[reza\\_ho@yahoo.com](mailto:reza_ho@yahoo.com)

### چکیده:

برای اولین بار یک سری آزمایشات مکانیک شکست تحت مود مرکب بر روی جوش لب به لب فولاد مقاومت بالا S355 J2G3 (مورد استفاده در اتصالات سکویای ثابت دریایی) انجام شده و مقادیر شکست از قبیل چقرمگی، نرخ آزاد سازی انرژی و ضرایب بی‌بعد شدت تنش در نوک ترک بر مبنای روابط انتگرال J و حداکثر تنش سه محوری به روش آزمایشگاهی و عددی بدست آمده است. نمونه‌ها از دو قطعه فولاد مقاومت بالا با جوش قوسی غوطه‌ور در وسط ساخته شده‌اند و ترکی تا میانه پهنای نمونه ایجاد شده است. از دستگاه اصلاح شده آرکان با انجام برخی تغییرات جهت بهبود عملکرد، برای آزمایشات استفاده شده و با مدلسازی دو بعدی و سه بعدی نمونه و دستگاه، مقادیر شکست برای مود کششی خالص (مود یک)، مود برشی خالص (مود دو) و مود مرکب داخل صفحه با نمودارهای مربوطه ارائه شده است. مقادیر شکست در مودهای مختلف و همچنین در ضخامت نمونه محاسبه و مورد ارزیابی قرار گرفته است. هدف از تحقیق حاضر بسط و توسعه ضوابط و معیارهای مکانیک شکست در سازه‌هایی است که خرابی‌هایی به شکل ترک دارند.

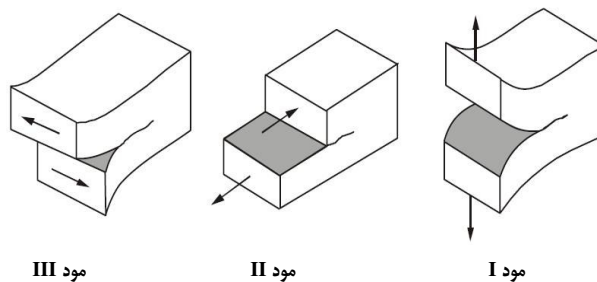
### مقدمه:

یکی از مباحثی که اخیراً در مطالعه شکست سازه‌ها و قطعات تحت بارهای تناوبی یا سیکلی مورد استفاده قرار می‌گیرد مبحث مکانیک شکست و بررسی تاثیر پارامترهای شکست بر سازه‌ها است. در بسیاری از موارد که سازه دچار ترک و گسیختگی می‌شود سیستم تحت بارهای دینامیکی و متناوب قرار داشته که در آنها بعضاً مقدار بار به میزان قابل توجهی کمتر از بار شکست استاتیکی است. در این موارد، علت اصلی گسیختگی، رشد ترک‌های بسیار ریز موجود در ماده بوده که از اندازه بسیار کوچک به تدریج تا اندازه بحرانی رشد می‌کند. میزان رشد و گسترش ترک وابسته به چقرمگی ماده و میزان آزاد سازی انرژی است که اگر ضریب شدت تنش در نوک ترک از مقدار معینی تجاوز کند ترک رشد خواهد نمود. در خصوص محاسبه عمر خستگی دو روش کلی وجود دارد که یکی روش تنش‌های بحرانی<sup>۱</sup> و استفاده از منحنی‌های S-N است و دیگری شیوه مکانیک شکست با استفاده از مدلسازی رشد ترک است. نقص عمده‌ای که روش منحنی‌های S-N دارد، این است که قابلیت به هنگام شدن را ندارد، بعبارت دیگر پس از گذشت مدتی از عمر سازه، توسعه ترک‌های ناشی از خستگی که تنها معیار فیزیکی قابل اندازه‌گیری است در روش مذکور اعمال نمی‌شود. اکثر آیین‌نامه‌های طراحی بدلیل سهولت، این روش را مبنای طراحی قرار می‌دهند لیکن این روش برای تجزیه و تحلیل یک عضو ترک‌دار مناسب نیست. امروزه با توجه به توسعه روشهای عددی و رایانه‌های قدرتمند روش دوم مورد استقبال محققین و طراحان قرار گرفته است که در این روش باید پارامترهای مکانیک شکست ماده مورد نظر از قبل تعیین شوند.

در روش مکانیک شکست عمر خستگی به سه مرحله تقسیم می‌شود:

- ۱) مرحله جوانه زنی ترک
- ۲) مرحله گسترش ترک
- ۳) مرحله ناپایداری ترک

<sup>1</sup> Hot Spot Stresses



شکل ۱ مودهای اساسی بارگذاری که شامل تغییر مکانهای متفاوت سطح ترک است.

در اتصالات جوشی به دلیل نقایص اولیه ناشی از جوشکاری، جوانه زنی ترک عمر بسیار کوتاهی دارد و اغلب قابل صرفنظر کردن است. در مرحله دوم ترک شروع به رشد می‌کند که ممکن است در راستای ضخامت جدار عضو و یا در محیط پیرامون عضو صورت گیرد. در سازه‌های دریایی به علت وجود بارهای تناوبی و شرایط محیطی طاقت فرسا، عمر سازه شدیداً متأثر از عمر اتصالات جوشی است. وجود عیوب در حین ساخت یا در زمان بهره برداری باعث کاهش عمر مفید سازه می‌گردد. اکثر خرابی‌هایی که در اتصالات این نوع سازه‌ها ایجاد می‌شود در قسمت جوش و به شکل ترک است. ورقها و اتصالات سازه‌های فراساحل با خصوصیات مکانیکی و متالورژیکی ناهمگن به علت فرایند جوشکاری نیازمند چقرمگی مناسب، با کیفیت و قابل اطمینان است. محققین بسیاری به مطالعه شکست جوش و تعیین پارامترهای مکانیک شکست جوش و ناحیه متأثر از حرارت<sup>۱</sup> (HAZ) پرداخته‌اند. Shin و همکاران (۲۰۰۶) به تعیین خصوصیات مکانیکی و متالورژیکی شکست جوش در فولاد مقاومت بالا API 2W Gr.50 مورد استفاده در سازه‌های فراساحل با نسبت‌های مختلف طول ترک به پهناي نمونه پرداختند. آنان مقادیر جابجایی بازشدگی نوک ترک<sup>۲</sup> (CTOD)، که وابسته به چقرمگی شارپی جوش ریشه است را برای نمونه‌های خمشی یک لبه شکاف‌دار<sup>۳</sup> (SENB) اندازه‌گیری نمودند. و توسط آزمایش شارپی با نمونه‌های دارای شکاف V شکل، چقرمگی شکست با موقعیت‌های مختلف جوش از قبیل جوش اولیه، جوش ریشه و جوش ثانویه را بدست آوردند [۱].

بر مبنای بارگذاری، سه مود اصلی رشد ترک وجود دارد (شکل ۱) که شامل:

I. مود کششی یا باز شدن، که سطوح ترک مستقیماً از هم فاصله می‌گیرند.

II. مود برشی داخل صفحه، سطوح ترک در جهتی عمود بر لبه جلویی ترک روی هم لغزش دارند.

III. مود پارگی، سطوح ترک در جهتی موازی با لبه جلویی ترک نسبت به هم حرکت می‌کنند.

مقصود از مکانیک شکست مود مرکب، پیش بینی مقادیر بحرانی در شرایطی است که تغییر شکل نوک ترک ترکیبی از حالات بازشدگی (مود یک)، لغزشی درون صفحه (مود دو) و لغزش خارج از صفحه (مود سه) باشد.

یک روش برای بدست آوردن مقادیر شکست مود مرکب آزمایش روی نمونه کوچکی از سازه و تعمیم نتایج به سازه واقعی است [۲]. مطالعات زیادی در خصوص تعیین پارامترهای شکست مواد مختلف صورت گرفته است و آزمایشات بسیاری نیز در این خصوص ارائه شده که هر کدام مزایا و معایبی نیز دارند. اغلب این آزمایشات فقط در یک مود کاربرد دارند. آزمایش تیر طره دویل<sup>۴</sup> (DCB) [۳]، آزمایش نمونه کششی فشرده<sup>۵</sup> (CT) [۴] و آزمایش خمش یک لبه شکاف‌دار<sup>۶</sup> (SENB) برای مود یک، آزمایش خمش انتهای شکاف (ENF)<sup>۷</sup> [۵] برای مود دو و آزمایش خمش مود مرکب<sup>۸</sup> (MMB) [۶] برای مود مرکب داخل صفحه از پرکاربردترین آزمایشات برای مواد شکل‌پذیر هستند (شکل ۲).

<sup>1</sup> Heat Affected Zone

<sup>2</sup> Crack Tip Opening Displacement

<sup>3</sup> Single Edge Notch Bending

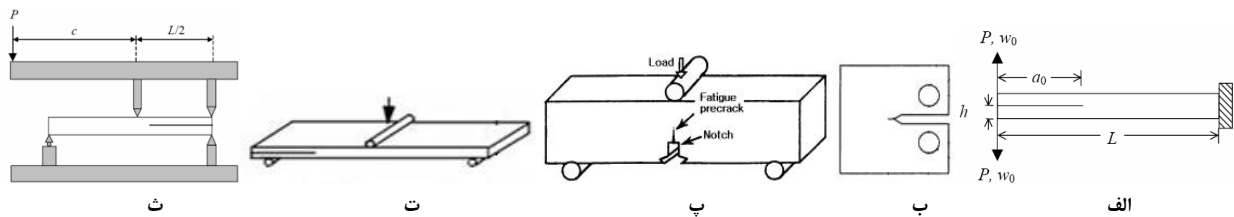
<sup>4</sup> Double Cantilever Beam

<sup>5</sup> Compact Tension specimen

<sup>6</sup> Single Edge Notch Bending

<sup>7</sup> End Notch Flexure

<sup>8</sup> Mixed-Mode Bending



شکل ۲ الف) آزمایش تیر طره دویل، ب) نمونه کششی فشرده، پ) آزمایش خمش یک لبه شکاف دار، ت) خمش انتهای شکاف، ث) آزمایش خمش مود مرکب.

آزمایش اصلاح شده آرکان این قابلیت را دارد که با نمونه‌های کوچک، ساده و یک شکل مقادیر شکست تحت مودهای خالص یک، دو و همچنین مودهای مرکب داخل صفحه را اندازه‌گیری نماید. محققین زیادی [۷ الی ۱۶] از این دستگاه برای آزمایش مواد شکل‌پذیر استفاده نموده‌اند. در مواد شکل‌پذیر با افزایش نیرو، ممکن است ترک موجود در ماده قبل از شکست، به صورت پایدار و آهسته‌گسترش یابد، که تعیین حداکثر شدت تنش شکست را مشکل می‌سازد زیرا طول نهایی ترک مشخص نیست. پیش از این حل الاستیک خطی برای موادی که تا حدودی از خود شکل‌پذیری نشان می‌دادند در مجاورت نوک ترک معتبر نبود، اما اکنون شکست مود مرکب I/II با مدلی از معیار حداکثر تنش حلقوی MHS<sup>1</sup> بر مبنای میدان مود مرکب HRR<sup>2</sup> [۱۷ و ۱۸] مطابقت دارد. اگر چه مطابقت فیزیکی معیار MHS در این موارد مشکوک است و در چنین مواردی شرایط الاستیک خطی در نوک ترک غالب نیست، اما معیار حداکثر تنش برشی MSS<sup>3</sup> مناسب‌تر بنظر می‌رسد. پس در این رابطه می‌توان گفت که تئوری مورد استفاده در مواد ترد در بعضی مصادیق با در نظر گرفتن اثر کند شدگی نوک ترک برای مواد شکل‌پذیر نیز قابل استفاده است [۷]. در نتیجه می‌توان گفت که حداکثر تنش مماسی به عنوان اندازه‌ای از حداکثر تنش برشی در صفحه‌های ۴۵ درجه نسبت به همان تنش مماسی عمل می‌کند. اهمیت در نظر گرفتن کند شدگی نوک ترک و ارتباط آن با شکست شکل‌پذیر مود I اولین بار توسط رایس و جانسون [۱۹] در سال ۱۹۷۰ شناخته شد. محققین بسیاری [۸، ۱۰ الی ۱۴] با مطالعه انتشار ترک دریافتند که رشد ترک در مواد شکل‌پذیر تحت مود یک به صورت مورب<sup>۴</sup> خواهد بود. این امر نشان دهنده غالب بودن معیار حداکثر تنش برشی در مود یک خالص است.

در این مقاله آزمایش‌هایی بر روی نمونه‌هایی که از جوش لب به لب نفوذی کامل در ورق با تمامی شرایط و کنترل‌های غیر مخرب لازم همانند اتصالات سکوه‌های ثابت دریایی، انجام گرفته است. در مدلسازی سه بعدی اثر کند شدگی نوک ترک در نظر گرفته شده است و تغییرات مقادیر شکست در ضخامت نمونه ارائه شده است.

### مبانی تئوری:

ضریب شدت تنش در راستای نوک ترک برای آزمایش اصلاح شده آرکان با روابط زیر محاسبه می‌شود [۱۶]:

$$K_I = \frac{P_c \sqrt{\pi a}}{wt} f_I(a/w), \quad K_{II} = \frac{P_c \sqrt{\pi a}}{wt} f_{II}(a/w) \quad (1)$$

که  $P_c$  بار شکست،  $a$  طول ترک،  $w$  پهناي نمونه،  $t$  ضخامت نمونه و  $f_I(a/w)$  و  $f_{II}(a/w)$  ضریب اصلاح هندسی است. مقادیر  $K_I$  و  $K_{II}$  با استفاده از ضرایب اصلاح هندسی  $f_I(a/w)$  و  $f_{II}(a/w)$  بدست می‌آیند. برای بدست آوردن ضریب اصلاح هندسی با مدلسازی نمونه و دستگاه آزمایش و همچنین با وارد نمودن مقدار ثابت بار شکست در مودهای مختلف، مقادیر  $K_I$  و  $K_{II}$  با استفاده از روابط انتگرال  $J$  و کانتور انتگرال توسط نرم افزار المان محدود محاسبه می‌شود. با قرار دادن مقادیر در رابطه (۱) ضریب اصلاح هندسی در هر مود به تفکیک بدست می‌آید. این ضرایب فقط به شکل هندسی نمونه وابسته‌اند و مستقل از جنس مصالح و همگن یا ناهمگن بودن آن هستند. لذا ضرایب بدست آمده برای تمامی نمونه‌ها با شکل و ابعاد ارائه شده قابل استفاده‌اند.

<sup>1</sup> Maximum Hoop Stress

<sup>2</sup> Hutchinson (1968) and Rice and Rosengren (1968)

<sup>3</sup> Maximum Shear Stress

<sup>4</sup> Slant

نرخ انرژی کرنشی آزاد شده در ترک از روابط زیر محاسبه می‌شود

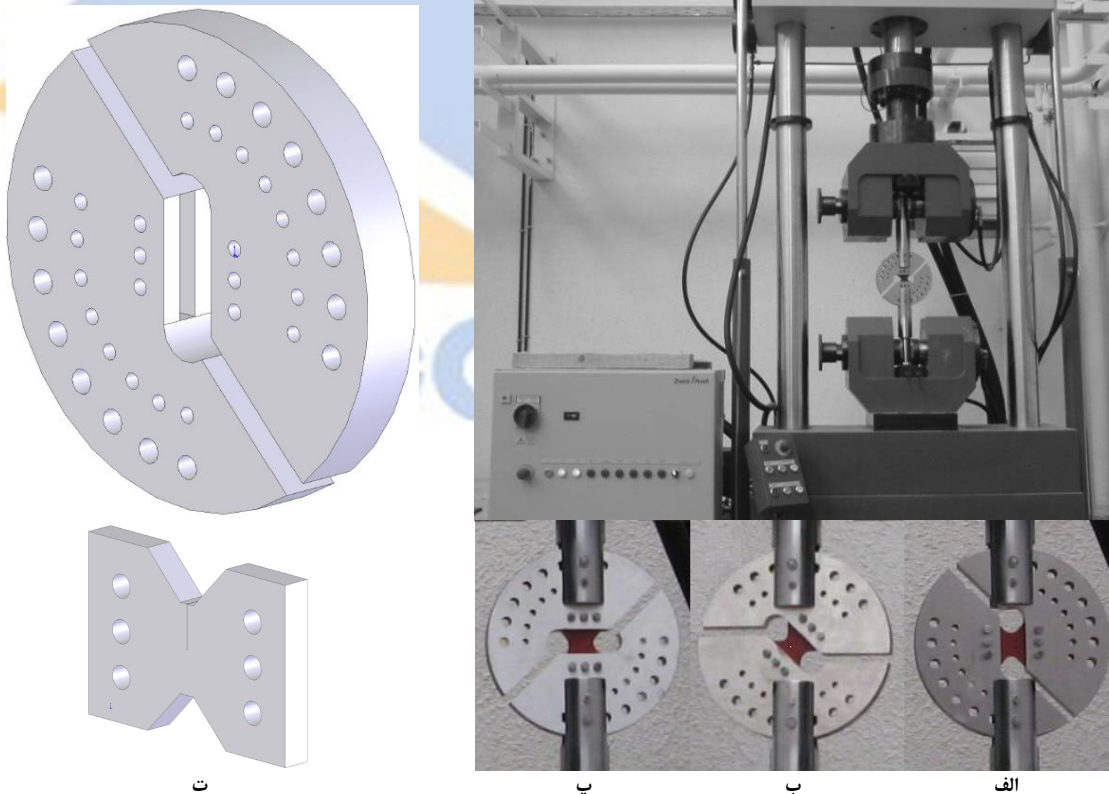
$$G_I = \frac{K_I^2}{E} \quad \text{و} \quad G_{II} = \frac{K_{II}^2}{E} \quad (2)$$

که در آن  $E$  مدول الاستیسیته ماده است. مقادیر انرژی انتگرال  $J$  محاسبه شده توسط نرم افزار بایستی برابر با مجموع انرژی‌های کرنشی آزاد شده بدست آمده از رابطه (۲) باشد، که در نتایج نمودار مربوطه آورده شده است. از ذکر روابط انتگرال  $J$  و همچنین روابط مورد استفاده در نرم افزار صرف نظر می‌شود، جهت مطالعه بیشتر به مراجع [۱۶ الی ۲۰] مراجعه شود.

### دستگاه اصلاح شده آرکان:

آرکان (Arcan) و همکاران (۱۹۷۸) از دستگاه آرکان جهت آزمایش بر روی مواد کامپوزیتی استفاده کردند [۲۱]. در سال ۱۹۹۵ آمستوتز (Amstutz) و همکاران دستگاه آرکان را برای آزمایش گسیختگی پایدار اصلاح نمودند [۲۲]. با تغییراتی که در دستگاه داده شد عملکرد آن برای آزمایش مواد مقاومت بالا اصلاح گردید. دستگاه و نمونه مورد آزمایش در شکل (۳) نشان داده شده است.

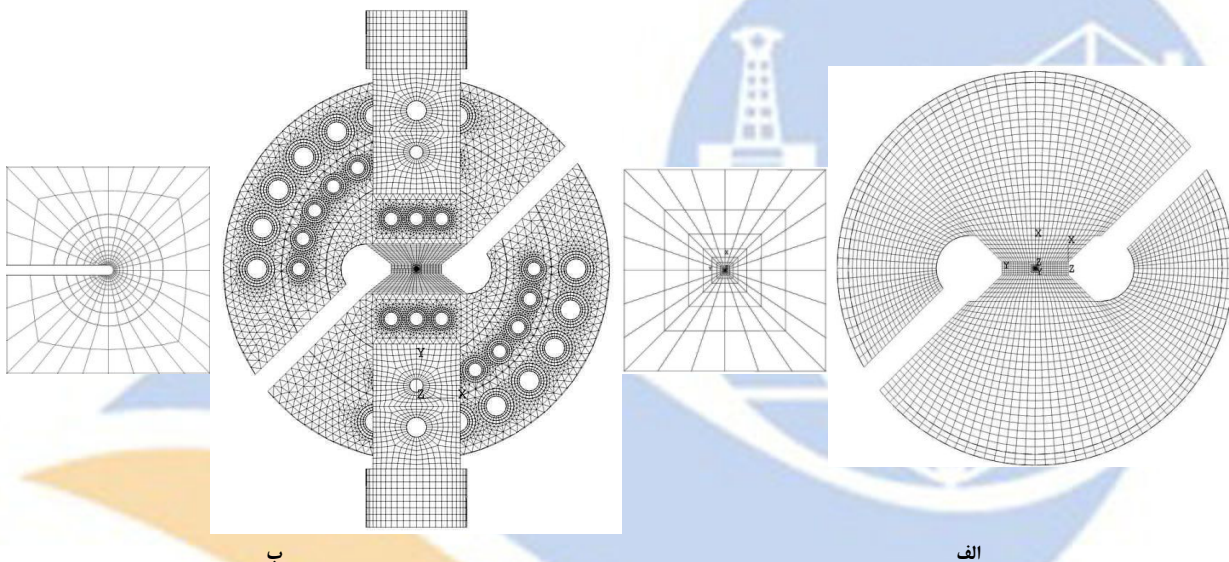
نمونه‌های آزمایشی از فولاد مقاومت بالا (S355 J2G3 (BS EN 10025 با مدول الاستیسیته  $E=206$  GPa، ضریب پواسون  $\nu=0.3$  و تنش تسلیم  $\sigma_y=465$  MPa و تنش نهایی  $\sigma_u=549$  MPa که توسط الکتروود FA5.1 E7018-1 با مدول الاستیسیته  $E=206$  GPa، ضریب پواسون  $\nu=0.3$  و تنش تسلیم  $\sigma_y=536$  MPa و تنش نهایی  $\sigma_u=585$  MPa جوش و ساخته شده‌اند. نمونه شامل دو قطعه فولادی است که در وسط به طور کامل به هم جوش داده شده و به شکل پروانه‌ای ماشین کاری شده است. ترک با استفاده از برش وایرکات به ضخامت  $0.25$  میلی‌متر در وسط و با طول‌های مختلف ایجاد شده است. دستگاه اصلاح شده آرکان از فولاد مقاومت بالا (DIN17200) 1.6582 با ضخامت  $30$  میلی‌متر ساخته شده است که قابلیت آزمایش نمونه‌هایی تا ضخامت  $10$  میلی‌متر را دارد. برای اعمال بارگذاری مود مرکب در محیط فیکسچر هر  $15$  درجه سوراخهایی ایجاد شده است.



شکل ۳ نمایشی از دستگاه و فیکسچر آزمایش، الف) مود دو ب) مود مرکب ۴۵ درجه پ) مود یک ت) طرح سه بعدی نمونه و فیکسچر

### مدل المان محدود:

دستگاه و نمونه با استفاده از نرم افزار المان محدود ABAQUS به صورت دو بعدی و سه بعدی مدل شده است. ۱۴۰ مورد تحلیل دو بعدی جهت تعیین ضرایب اصلاح هندسی تحت مودهای خالص یک، دو و مودهای مرکب داخل صفحه و مطالعه تغییرات پارامترهای شکست برای نسبت‌های مختلف طول ترک به پهنای نمونه انجام گردیده است. از مدل سه بعدی برای مطالعه تغییرات چقرمگی و ضرایب اصلاح هندسی در عمق استفاده شده است. در مدل دو بعدی، المانهای نوک ترک از نوع CPE8R مثلثی شش گره‌ای بوده و تحلیل‌های الاستیک خطی تحت شرایط تنش صفحه-ای و با استفاده از میدان تنش تکینگی<sup>۱</sup>  $1/r^{0.5}$  انجام شده است. ترک ایجاد شده کاملاً نوک تیز بوده و کانتورهای اطراف نوک ترک برای رسیدن به دقت لازم به حد کافی کوچک در نظر گرفته شده است. در مدل سه بعدی از المان مکعبی ۲۰ گره‌ای درجه دوم C3D20R در راس ترک و از المان گوه‌ای ۶ گره‌ای خطی C3D6 برای مدلسازی دستگاه استفاده شده است. برای رسیدن به شرایط تکینگی، گره‌های میانی روی اضلاع منتهی به نوک ترک به فاصله یک چهارم از راس ترک منتقل شده‌اند. بار ثابت ۴۰ کیلو نیوتن به تمامی مدل‌ها اعمال شده است. شکل (۴) مش بندی دو بعدی و سه بعدی به همراه کانتورهای راس ترک را نمایش می‌دهد.



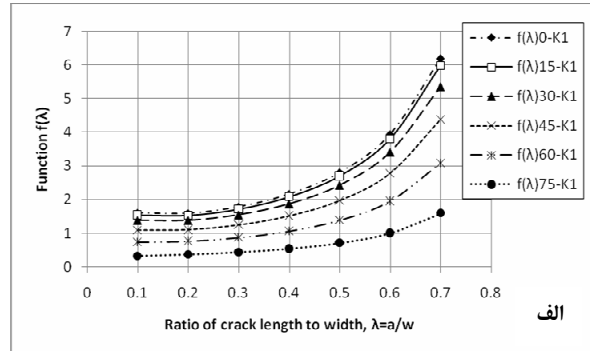
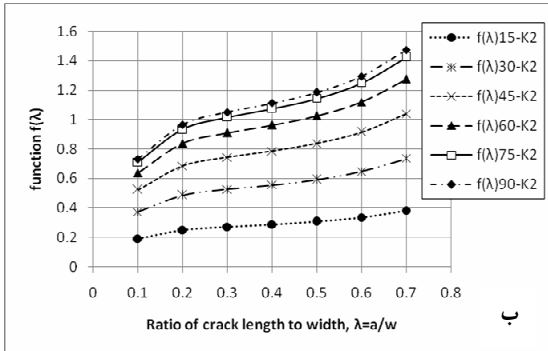
شکل ۴ مدل المان محدود نمونه و دستگاه آزمایش و کانتور راس ترک، (الف) مدل دو بعدی (ب) مدل سه بعدی

### تاثیر پارامترهای هندسی بر روی خصوصیات شکست

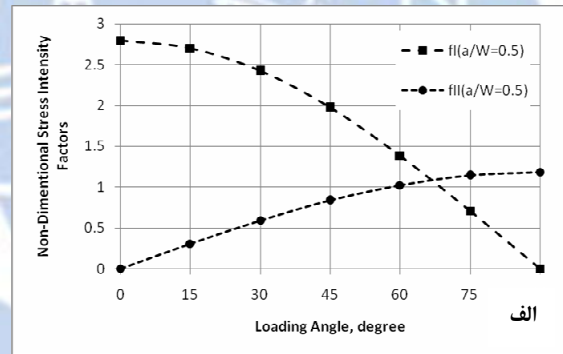
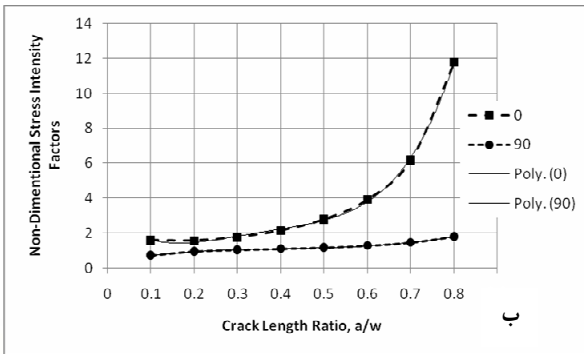
برای مطالعه عددی تاثیر طول ترک بر مقادیر شکست، مدل المان محدود مورد نظر با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS در نسبت طول ترک‌های مختلف به پهنای نمونه مورد تحلیل قرار گرفته است. برای بدست آوردن این ضرایب، محاسبات برای نسبت طول ترک به پهنای نمونه  $(a/w)$  مابین ۰/۱ تا ۰/۹ با فواصل ۰/۱ و همچنین بین ۰/۴۵ تا ۰/۵۵ با فاصله هر ۰/۰۱ و زوایای بارگذاری صفر تا ۹۰ درجه به ازای هر ۱۵ درجه انجام شده است. نمودار تغییرات ضریب اصلاح هندسی نسبت به  $a/w$  به تفکیک مود یک و دو در شکل (۵) ارائه شده است. تغییرات ضریب شدت تنش بدون بعد نسبت به راستای بارگذاری برای  $a/w=0/5$  و همچنین نسبت به  $a/w$  تحت زاویه بارگذاری صفر و ۹۰ درجه در شکل (۶) ارائه شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت طول ترک به ضخامت در تمامی موارد  $f(\sigma/w)$  افزایش می‌یابد. به منظور ارزیابی ضرایب هندسی یا ضرایب شدت تنش بی‌بعد دو معادله چند جمله‌ای مرتبه چهارم بر اساس نتایج تحلیل‌های المان محدود برازش شده است (معادلات ۳ و ۴). نمودار تغییرات انرژی آزاد شده انتگرال  $J$  نسبت به  $a/w$  در زوایای مختلف بارگذاری در شکل (۷) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت طول ترک از ۰/۷، مقادیر انرژی به شدت افزایش می‌یابد که نشان دهنده شکست ناگهانی در این نسبت است. در شکل (۸) مقادیر انرژی کرنشی آزاد شده

<sup>1</sup> singularity

به ازای زوایای بارگذاری مختلف برای نسبت  $a/w=0.5$  در مود یک و دو و انرژی کرنشی کل نشان داده شده است که  $(G_T=J)$ . در نمودار شکل (۶) الف) مشاهده می‌شود برای زوایای بارگذاری کمتر از  $67^\circ$  مود یک مود غالب شکست است و در زوایای بارگذاری بعد از  $67^\circ$  تا  $90^\circ$  درجه مود دو مود غالب شکست است و افزایش سهم مود دو با کاهش سهم مود یک همراه است.



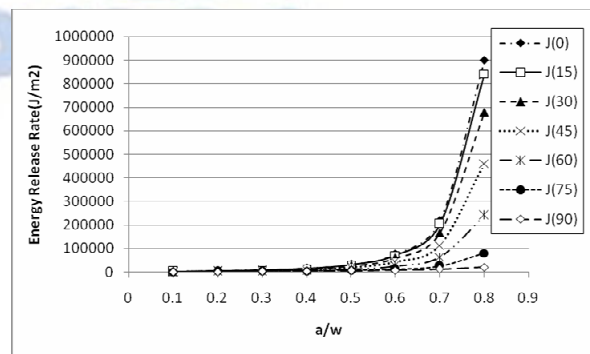
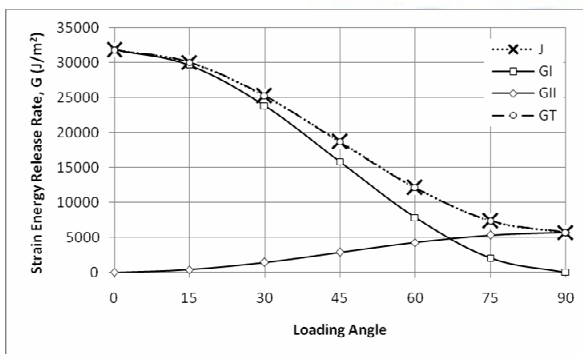
شکل ۵ نمودار فاکتور  $f(\lambda)$  به نسبت  $0.1 < a/w < 0.7$  (الف) مود یک (ب) مود دو



شکل ۶ نمودار فاکتور  $f(\lambda)$  به تفکیک مود یک و دو، الف) در زوایای مختلف به ازای  $a/w=0.5$  (ب) در  $0.1 < a/w < 0.8$  با زاویه بارگذاری  $0^\circ$  و  $90^\circ$  درجه

$$f_I(\lambda) = 188.6(a/w)^4 - 260.9(a/w)^3 + 134.2(a/w)^2 - 26.30(a/w) + 3.160, \quad R^2=0.999 \quad \text{مود یک} \quad (3)$$

$$f_{II}(\lambda) = -2.340(a/w)^4 + 12.04(a/w)^3 - 12.07(a/w)^2 + 4.977(a/w) + 0.348, \quad R^2=0.999 \quad \text{مود دو} \quad (4)$$



شکل ۸ نمودار انرژی کرنشی آزاد شده به زوایای بارگذاری مختلف در  $a/w=0.5$

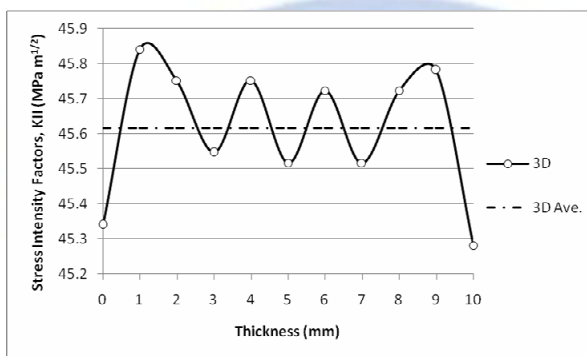
شکل ۷ نمودار انرژی انتگرال  $J$  به نسبت  $0.1 < a/w < 0.8$  در هر مود

## نتایج آزمایشگاهی

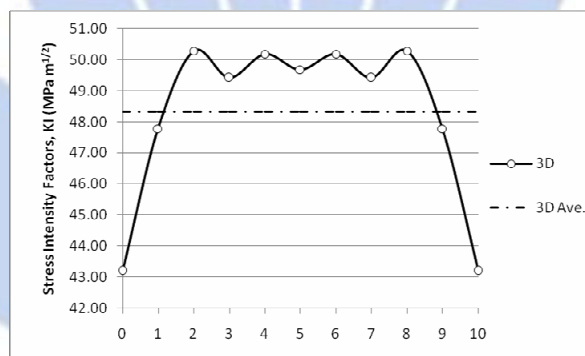
طول ترک در تمامی نمونه‌های آزمایشگاهی برابر با نصف پهنای نمونه ( $a/w=0.5$ ) است. با استفاده از شکل (۶ الف) مقادیر ضرایب اصلاح هندسی برای هر مود تعیین می‌شود. مقادیر بار بحرانی شکست در آزمایش‌ها، برابر با نیرو در لحظه شروع ترک است. با معلوم بودن ابعاد نمونه‌ها، مقادیر چقرمگی از معادله (۱) بدست می‌آید (جدول ۱). از رابطه (۲) مقادیر بحرانی انرژی کرنشی آزاد شده محاسبه شده است (جدول ۲).

جدول ۲ میانگین انرژی کرنشی آزاد شده $(G_c)$ ( $J/m^2$ ) در جوش لب به لب فولاد مقاومت بالا در $a/w=0.5$							جدول ۱ میانگین چقرمگی شکست بحرانی $(K_{Ic})$ ( $MPa\sqrt{m}$ ) در جوش لب به لب فولاد مقاومت بالا در $a/w=0.5$								
زاویه بارگذاری							زاویه بارگذاری								
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°		0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
$G_{IC}$	65253	60593	45761	28828	13224	3334	0	$K_{Ic}$	115.9	111.7	98	77	52	26	0
$G_{IIc}$	0	783	2742	5197	7224	8750	9930	$K_{IIc}$	0	12.70	24	33	39	42	45
$G_T$	65253	61376	48503	34026	20448	12085	9930	$K_{eq}$	115.9	112.4	100	84	65	50	45

با استفاده از نتایج مدل سه بعدی، تغییرات چقرمگی شکست در ضخامت نمونه برای مدهای خالص یک و دو، بترتیب بصورت شکل‌های (۹) و (۱۰) خواهد بود. بر اساس این نتایج ملاحظه می‌شود که با در نظر گرفتن کندی نوک ترک در مدل سه بعدی و انتشار ترک طبق معیار MSS مقادیر چقرمگی در مود یک کاهش می‌یابند. همانطور که انتظار می‌رود، در هر دو مود یک و دو، چقرمگی در لب‌ها کمترین مقدار است و در ضخامت به صورت یکنواخت نیست و حالت تناوبی دارد. هیلدلیچ و همکاران [۲۳] در سال ۲۰۰۷ با مطالعه جوش نقطه‌ای فولاد مقاومت بالا به نتایج مشابهی در خصوص نحوه توزیع سختی در ضخامت دست یافتند.



شکل ۱۰ تغییرات چقرمگی شکست مود دو در ضخامت



شکل ۹ تغییرات چقرمگی شکست مود یک در ضخامت

## نتیجه گیری

در این مقاله رفتار شکست مود مرکب نمونه جوش فولادی بر اساس کارهای آزمایشگاهی و عددی بررسی شده است. شکل خاصی از دستگاه اصلاح شده آرکان در سیستم بارگذاری مود مرکب استفاده گردید که نتایج بسیار خوبی حاصل گردید. در تمامی موارد ترک بصورت پایدار انتشار یافته که نمایانگر شکل‌پذیری جوش مورد نظر است. آزمایشات نشان می‌دهد که جوش مذکور شکل‌پذیری و چقرمگی شکست بسیار مناسبی دارد و اگر آزمون‌های غیر مخرب و کنترل‌های کیفی لازم در این جوش صورت پذیرد سازه دچار شکست‌های ناگهانی نخواهد شد. در مدلسازی ترک در مواد شکل پذیر، اثر کند شدگی نوک ترک باید در نظر گرفته شود. معیار انتشار ترک غالب در مود یک، معیار MSS است نه معیار MHS. و در نهایت ضرایب تصحیح فاکتور شدت تنش بدون بعد  $f(a/w)$  بر حسب زاویه بارگذاری نشان می‌دهد تا زاویه تقریباً ۶۷ درجه مود یک مود غالب بوده و از زاویه ۶۰ تا ۹۰ درجه مود دو تاثیر بیشتری خواهد داشت.



## قدردانی

مؤلفین این مقاله از شرکت محترم صدرا، جناب آقای مهندس بنایی مدیر عامل محترم شرکت، مهندس مقدم مدیر کارخانه جزیره صنعتی صدرا، مهندس نیک فرجام مدیر بخش کنترل کیفیت و جناب آقای مهندس ایمنی معاونت بخش مهندسی جزیره صنعتی صدرا بخاطر همکاری‌های صمیمانه‌شان جهت در اختیار قرار دادن مصالح، انجام جوشکاری و کنترل‌های کیفی لازم کمال تشکر و قدردانی دارند.

## مراجع

1. Shin Y.T. et-al., "Fracture characteristics of TMCP and QT steel weldments with respect to crack length", *Materials Science and Engineering A*, 2006, Vol. 434, pp. 365-371.
2. Hallback, N., "The influence of finite geometry and material properties on mixed mode I/II fracture of aluminum", *International Journal of Fracture*, 1997.
3. Wilkins, D. J.; Eisenmann, J. R.; Camin, R. A.; Margolis, W. S.; Benson, R. A.; "Characterizing delamination growth in graphite-epoxy", *Damage in Composite Materials*, ASTM STP 775, K. L. Reifsnider, Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1982, pp. 168-183.
4. American Society for Testing and Materials, Standard E399-06, "Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness K<sub>IC</sub> of Metallic Materials", *Annual Book of ASTM Standards*, Philadelphia, 2007.
5. Russell, A. J.; "On the measurement of mode II interlaminar fracture energies", *DREP Materials Report*, 82-0, Defense Research Establishment Pacific, Victoria, 1982.
6. Reeder, J. R.; and Crews, J. H., Jr.; "The mixed-mode bending method for delamination testing", *AIAA Journal*, 1990, Vol. 28, No.7, pp. 1270-1276.
7. Hallback, N., "Mixed mode I/II fracture behavior of a high strength steel. *International Journal of Fracture*", 1997.
8. Sutton, M.A. et-al., "Prediction of crack growth direction for mode I/II loading using small-scale yielding and void initiation/growth concepts", *International Journal of Fracture*, 1997, 83, pp. 275-290.
9. Chao, Y.J., Shu Liu, "On the failure of cracks under mixed-mode loads, *International Journal of Fracture*", 1997, 87, pp. 201-223.
10. Smith و D.J., Ayatollahi, M.R., "Mixed mode brittle and ductile fracture of a high strength rotor steel at room temperature", *International Journal of Fracture*, 1998, 94, pp. 235-250.
11. Sutton, M.A. et-al., "A combined modeling-experimental study of the crack opening displacement fracture criterion for characterization of stable crack growth under mixed mode I/II loading in thin sheet materials", *Engineering Fracture Mechanics*, 2000, 66, pp. 171-185.
12. Sutton, M.A. et-al., "Development and application of a crack tip opening displacement-based mixed mode fracture criterion", *International Journal of solid and structures*, 2000.
13. Sutton, M.A. et-al., "Mixed mode I/II fracture of 2024-T3 friction stir welds", *Engineering Fracture Mechanics*, 2003, 70, pp. 2215-2234.
14. Doyoyo, M., Wierzbicki, T., "Experimental studies on the yield behavior of ductile and brittle aluminum foams", *International Journal of Plasticity* 19, 1195-1214, 2003.
15. Langrand, B., Combescure, A., "Non-linear and failure behavior of spotwelds: a "global" finite element and experiments in pure and mixed modes I/II", *International Journal of Solids and Structures*, 2004, 41, pp. 6631-6646.
16. Choupani, N., "Experimental and numerical investigation of the mixed-mode delamination in Arcan laminated specimens", *International Journal of Materials Science & Engineering*, 2008, 478, pp. 229-242.
17. Hutchinson, J.W., "Singular behavior at the end of a tensile crack in a hardening material", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1968, 16, pp. 13-31.
18. Rice, J.R. and Rosengren, G.F., "Plane strain deformation near a crack tip in a power law hardening material", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1968, 16, pp. 1-12.
19. Rice, J.R. and Johnsson, M.A., "The role of large crack tip geometry changes in plane strain fracture. *Inelastic Behaviour of Solids*" (Edited by M.F. Kanninen, W.F. Adler, A.R. Rosenfield and R.I. Jaffee), McGraw-Hill Series in Material Science and Engineering, New York, 1970, pp. 641-672.
20. ABAQUS user's manual, version 6.5. Pawtucket, USA: Hibbit, Karlsson and Sorensen, HKS Inc; 2004.
21. Arcan M, Hashin Z, Voloshin A., "A method to produce uniform plan stress state with application to fiber-reinforced materials", *Experimental Mech.*, 1978, 18, pp. 141-6.
22. Amstutz, B.E., Sutton, M.A., Dawicke, D.S., Newman Jr., I.C., "An experimental study of CTOD for mode I/II stable crack growth in thin 2024-T3 aluminum specimens", *Fracture Mechanics ASTM STP*, 1995a, 1256, pp. 256-271.
23. Hilditch, T.B. et-al., "Effect of susceptibility to interfacial fracture on fatigue properties of spot-welded high strength sheet steel", *Materials & Design*, 2007, 28, pp. 2566-2576.

## **Estimation and Determination of the Mechanical Properties of Welding Mixed Mood Refraction in Fixed Offshore Structures through Arkan Test**

### **Abstract**

Refraction mechanical properties and their effects on the refraction of the structures is a very important issue. For the first time, a series of mechanical experiments on welding mixed mood refraction in fixed offshore structures was performed on double-u-butt weld of high-resistance steel S355 J2G3 (which is used in offshore structures) and the values of refraction including toughness, release rate and dimensionless coefficients of stress severity in the crack tip were calculated based on J integral. The maximum three-axial stress was estimated through laboratory and numerical methods. Samples are made of two pieces of high resistance steel. For the purpose of making some degrees of improvement, relevant instruments were also used. By two-dimensional and three-dimensional modeling of the samples, the values of refraction for some modes - such as pure tension (mode 1), shear mode (mode 2) and combined mode - were calculated. These values were further calculated for different modes and for the thickness of samples as well. This article intends to generalize the mechanical criteria of refraction in the structure that has undergone defects and failure.

**Keywords:** *welding mixed mood refraction, Refraction mechanical properties, toughness*