

تحلیل تنش و ارزیابی خستگی اتصالات تیرچه طولی به صفحه عرشه به روش مکانیک شکست در عرشه‌های ارتوتروپیک فولادی

مجتبی فتحی^{۱*}، محمد عباسی^۲ و احسان همت‌پوری فرخی^۲

^۱ عضو هیأت علمی گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی کرمانشاه

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی کرمانشاه

چکیده

خستگی پدیده‌ای شناخته شده در عرشه‌های ارتوتروپیک فولادی است. یکی از تهدید آمیزترین موقعیت‌ها برای ترک خستگی در عرشه‌های ارتوتروپیک فولادی، جوش‌های طولی بین اتصال تیرچه طولی بسته و صفحه عرشه است. در این مطالعه، نقاط مستعد ترک خستگی در اتصالات تیرچه طولی به صفحه عرشه با تحلیل‌های اجزای محدود بررسی شده است. برای مطالعه تنش در اتصالات، یک عرشه ارتوتروپیک فولادی با نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS به صورت سه‌بعدی مدل‌سازی و مطابق آیین‌نامه پل آشتو شبیه‌سازی خستگی شده است. تنش در نقاط مستعد ترک خستگی در مقاطع مختلف بررسی و مستعدترین محل ترک شناسایی شده است. سپس با مدل‌سازی سطح مقطع مستعدترین محل ترک توسط یک ریز مدل دوبعدی، ارزیابی‌های خستگی به روش مکانیک شکست تحلیل شده است. تحلیل مکانیک شکست با در نظر گرفتن اندازه‌های مختلف ترک در محل مستعد خستگی انجام شده و رشد ترک با استفاده از انتگرال‌گیری عددی شبیه‌سازی شده است. نتایج نشان می‌دهند، در اتصال تیرچه طولی به صفحه عرشه، ترکی که از پنجه جوش شروع شده و به داخل ضخامت صفحه عرشه نفوذ می‌کند، در نزدیک‌ترین مقطع به تیر عرضی مستعدترین محل ترک خستگی است. همچنین تا هنگامی که عمق نفوذ ترک در داخل ضخامت صفحه عرشه کوچک (در مطالعه حاضر کمتر از یک میلی‌متر) است، رشد ترک در مقابله با تعداد دوره بارگذاری آهسته است. سپس، ترک سریعاً با تعداد دوره بارگذاری بسیار کمتری تا عمق نهایی خود رشد می‌کند. بنابراین ضمن کنترل ترک برای عدم بحرانی شدن آن، برای کاهش میزان آسیب خستگی اتصال تیرچه طولی به صفحه عرشه، می‌توان با افزایش ضخامت عرشه و بالا بردن سختی آن، به این مهم دست یافت.

واژگان کلیدی: عرشه ارتوتروپیک فولادی، اتصال تیرچه طولی به صفحه عرشه، مکانیک شکست، ترک خستگی، دامنه ضریب شدت تنش.

۱- مقدمه

بالاتر هستند آغاز می‌شوند. این ترک از تهدید آمیزترین حالات

آسیب خستگی در عرشه‌های ارتوتروپیک فولادی است [۲].

مطابق شکل (۱)، با توجه به هندسه جوش در اتصال تیرچه طولی به صفحه عرشه، چهار نقطه مستعد ترک خستگی در

جوش اتصال وجود دارد، که در آن:

- ترک ۱ از ریشه جوش شروع شده و از طریق صفحه عرشه گسترش یافته است.

- ترک ۲ از پنجه جوش در صفحه عرشه شروع شده و از طریق صفحه عرشه گسترش یافته است.

- ترک ۳ از پنجه جوش در جداره تیرچه طولی شروع شده و از طریق جداره تیرچه طولی گسترش یافته است.

- ترک ۴ از ریشه جوش شروع شده و از طریق گلوی جوش در داخل فلز جوش گسترش یافته است [۴].

عرشه‌های ارتوتروپیک فولادی به خاطر مزایایی همچون وزن کم، ظرفیت بالای حمل بار، سرعت بالای ساخت به همراه زمان کوتاه نصب و ظاهر زیبا به کار گرفته می‌شوند [۱، ۲]. با این حال، هنگامی که حجم بار ترافیکی بر روی این عرشه‌ها افزایش می‌یابد، توزیع عرضی بارهای چرخ، لنگرهای خمشی خارج از صفحه قابل توجهی را در صفحه عرشه و جداره تیرچه طولی در محل اتصال تیرچه طولی به صفحه عرشه ایجاد می‌کند. همین عامل به همراه تنش‌های پسماند کششی موجود در جوش طولی اتصال، تمرکز تنش بالایی را به وجود می‌آورد، در نتیجه اتصال تیرچه طولی به صفحه عرشه مستعد به پذیرش آسیب‌های خستگی می‌شود [۲، ۳]. آسیب‌های خستگی در اتصالات تیرچه طولی به صفحه عرشه که به صورت ترک خوردگی نمایان می‌شوند، در پنجه جوش یا ریشه جوش که نقاطی با تمرکز تنش

ساخته برای وسایل نقلیه سبک وزن طراحی کردند. مقایسه نتایج آزمایشگاهی با روش LEFM نشان داد، این روش یک ارزیابی منطقی و با کیفیت را برای عرشه‌های ارتوتروپیک فولادی فراهم می‌کند.

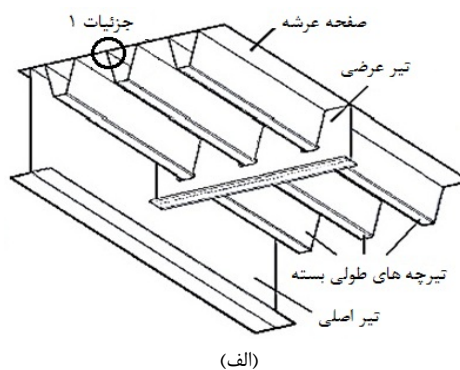
Sim و همکاران [۷] در سال ۲۰۱۲ با طراحی یک مدل آزمایشگاهی و به کمک مدل‌سازی‌های عددی، ترک‌های خستگی در اتصال تیرچه طولی به صفحه عرشه را به صورت مطالعات پارامتری بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان دادند که، جوش شیاری با نفوذ نسبی^۵ کمتر و افزایش ضخامت صفحه عرشه، مقاومت خستگی اتصال را افزایش می‌دهند.

Xiao و همکاران [۲] در سال ۲۰۰۸ با مدل‌سازی یک عرشه ارتوتروپیک فولادی، بر اساس روش LEFM و محاسبه دامنه ضریب شدت تنش مطابق معادلات تجربی ارائه شده توسط Newman و Raju [۸]، نقاط مستعد ترک خستگی در اتصال تیرچه طولی به صفحه عرشه را بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان دادند که، مقاومت خستگی اتصال توسط ترک‌های خستگی منتشر شده در داخل ضخامت صفحه عرشه تعیین می‌شود.

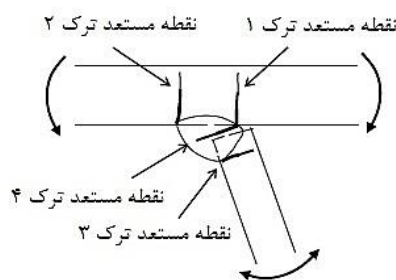
Xiao و همکاران [۶] مجدداً در سال ۲۰۱۲ با سه روش تنش نقطه حاد^۶، تنش در عمق یک میلی‌متر^۷ و LEFM، مقاومت خستگی یک اتصال سپری شکل^۸ با جوش گوشه در معرض بارهای خمشی را ارزیابی کردند. نتایج نشان دادند که، روش LEFM دقت بالاتری نسبت به دو روش دیگر دارد و این دقت با محاسبه دامنه ضریب شدت تنش به صورت عددی بالاتر می‌رود.

Zhang و همکاران [۳] نیز در سال ۲۰۱۱ بر اساس نتایج به دست آمده از کارهای Xiao و همکاران، رفتار خستگی اتصالات تیرچه طولی به صفحه عرشه را مطالعه کردند. نتایج این مطالعه نشان دادند علت اصلی ترک‌های خستگی در این اتصالات، دامنه تنش بالاتر به خاطر عبور بار چرخ وسایل نقلیه سنگین بر روی عرشه است.

Bohai و همکاران [۹] Rong و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۳ با مدل‌سازی یک عرشه ارتوتروپیک فولادی به صورت المان‌های Shell، در محل تقاطع تیرچه طولی و تیر عرضی با صفحه عرشه، مقاومت خستگی ترکی که از ریشه جوش شروع و به داخل ضخامت صفحه عرشه گسترش می‌یابد را به صورت



(الف)



(ب)

شکل ۱- عرشه‌های ارتوتروپیک فولادی: (الف) عناصر تشکیل دهنده، (ب) جزئیات ۱ و نقاط مستعد ترک خستگی در آن

برای ارزیابی خستگی اتصالات جوش شده مانند اتصالات تیرچه طولی به صفحه عرشه روش‌های مختلفی وجود دارد. از جدیدترین روش‌ها، روش مکانیک شکست الاستیک خطی^۱ که به اختصار LEFM خوانده می‌شود است. این روش با رشد ترک و مقاومت پسماند سازه‌های ترک خورده سروکار دارد و استفاده از آن بسیار وابسته به دقت در تعیین دامنه ضریب شدت تنش^۲ (SIF) در اطراف نوک ترک^۳ است [۵-۶]. از مزایای این روش می‌توان به نمایش منحنی گسترش ترک اشاره کرد که نشان می‌دهد یک ترک بر اثر پدیده خستگی چگونه رشد می‌کند [۵]. تحلیل‌های مکانیک شکست با فرض اندازه‌های مختلف ترک در نقاط مستعد ترک خستگی انجام شده و شبیه‌سازی رشد ترک با انتگرال گیری عددی از فرمول پاریس^۴ انجام می‌شود [۵].

در سال‌های اخیر به منظور بررسی آسیب‌های خستگی در اتصالات عرشه‌های ارتوتروپیک فولادی مطالعات متعددی صورت گرفته است. در این رابطه، Nguyen و همکاران [۵] در سال ۲۰۱۱ به منظور ارزیابی عمر خستگی اتصال تیرچه طولی به تیر عرضی به روش LEFM، یک عرشه ارتوتروپیک فولادی پیش-

5- Partial joint penetration groove weld

6- Hot spot stress

7- One millimetre stress

8- Tee joint

1- Linear elastic fracture mechanics

2- Stress intensity factor

3- Crack tip

4- Paris formula

که در آن، da/dN نرخ رشد ترک، a عمق ترک، N تعداد دوره بارگذاری، ΔK دامنه ضریب شدت تنش در نوک ترک و ΔK_{th} دامنه آستانه ضریب شدت تنش است که برای ΔK کمتر از این مقدار ترک خستگی رخ نمی‌دهد و در نهایت C و m ثابت‌های مربوط به مصالح هستند. شایان توجه است، در ضوابط مکانیک شکست مشخص شده است که ترک‌های کوچک خستگی در شدت تنش‌های زیر دامنه آستانه خستگی (ΔK_{th}) نیز می‌توانند انتشار یابند. به همین خاطر بهتر است در فرمول پاریس، دامنه آستانه خستگی در نظر گرفته نشود [۵]. دامنه ضریب شدت تنش (ΔK) بیانگر شدت میدان تنش در مجاورت نوک ترک است [۳] و مطابق رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} = F \cdot \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2)$$

که در آن، F ضریب تصحیح^۴ و $\Delta \sigma$ دامنه اسمی تنش در نقطه مستعد ترک است. با جایگزین کردن رابطه (۲) در معادله (۱) و انتگرال‌گیری از آن در محدوده بین عمق اولیه و نهایی ترک خواهیم داشت:

$$\int_0^N dN = \frac{1}{C \pi^{m/2}} \int_{a_i}^{a_f} \frac{1}{F^m (\Delta \sigma)^m a^{m/2}} da \quad (3)$$

در نهایت، تعداد دوره‌های بارگذاری (N) منجر به شکست خستگی را می‌توان مطابق رابطه (۴) محاسبه کرد:

$$N = \frac{2}{C(m-2)F^m (\Delta \sigma)^m \pi^{m/2}} \left[\frac{1}{a_i^{(m-2)/2}} - \frac{1}{a_f^{(m-2)/2}} \right] \quad (4)$$

که در آن، a_i عمق اولیه ترک و a_f عمق نهایی ترک در ضخامت صفحه فولادی است. همان‌طور که از رابطه (۴) مشخص است، تعداد دوره بارگذاری وابسته به تعیین ضریب تصحیح (F) است. ضریب تصحیح در برگزیده عواملی همچون تمرکز تنش در محل ترک، عمق و شکل و هندسه ترک، ضخامت، عرض و سطح آزاد صفحه ترک خورده است [۱۳] و برای محاسبه آن ابتدا دامنه ضریب شدت تنش به صورت تجربی با استفاده از معادله‌های ارائه شده از Newman و Raju [۸] و Baik و همکاران [۱۳] یا به صورت عددی با استفاده از نرم‌افزارهای اجزای محدود تعیین شده و سپس مطابق با رابطه (۲) محاسبه می‌شود. مطالعه حاضر، این ضریب به صورت عددی که روش دقیق‌تری است، محاسبه می‌شود.

مطالعات پارامتری بررسی کردند. سپس در سال ۲۰۱۴ با مدل سازی سطح مقطع محل فوق به صورت المان‌های Solid، با روش تنش نقطه حاد ارزیابی‌های خستگی را انجام دادند.

در این مطالعه، یک عرشه ارتوئوپیک فولادی توسط نرم‌افزار المان محدود ABAQUS [۱۱] به صورت سه بعدی مدل سازی شده و تحت بارگذاری خستگی مطابق آیین‌نامه طراحی پل آشتو [۱۲] شبیه‌سازی خستگی می‌شود. تنش‌ها در نقاط مستعد ترک خستگی اتصال تیرچه طولی به صفحه عرشه در پنج مقطع عرضی متفاوت بین دهانه میانی مدل بررسی شده و بحرانی‌ترین محل ترک خستگی شناسایی می‌شود. سپس سطح مقطع مستعدترین محل شناسایی شده برای ترک خستگی توسط یک ریز مدل دو بعدی با مش‌بندی متراکم مدل سازی و دامنه‌های ضریب شدت تنش با شبیه‌سازی عمق‌های مختلف ترک در نقطه مستعد ترک به روش عددی محاسبه می‌شود. در نهایت بر اساس نتایج تنش و با استفاده از روش LEFM ارزیابی‌های خستگی شامل شبیه‌سازی رشد ترک، تخمین دوره بارگذاری و مقاومت خستگی اتصال انجام می‌شود.

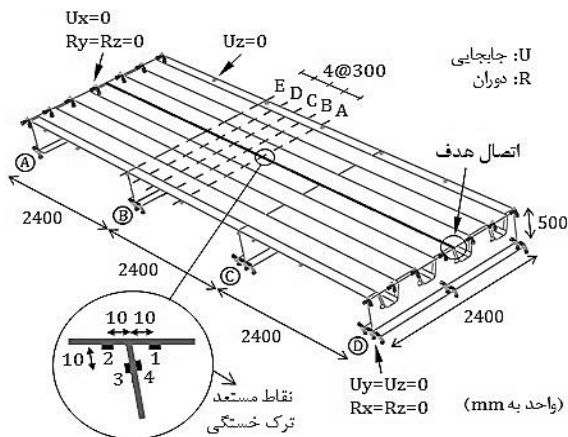
۲- ارزیابی خستگی به روش مکانیک شکست الاستیک خطی (LEFM)

فرایند آسیب خستگی در مصالح شامل سه مرحله می‌شود. مرحله شروع ترک، مرحله گسترش پایدار ترک و مرحله گسترش ناپایدار ترک، سه مرحله آن است. از آنجایی که نرخ (مدت زمان) مرحله گسترش ناپایدار ترک سریع است و تأثیر کمی بر روی عمر خستگی دارد، عمر خستگی با مجموع مرحله شروع ترک و مرحله گسترش پایدار ترک بیان می‌شود [۳]. از طرف دیگر، در اتصالات جوش شده اعضای فولادی، به خاطر وجود معایب ترک گونه مانند ریز ترک‌ها^۱، منافذ کوچک در سطح جوش^۲ و نفوذ ناقص جوش^۳ [۲-۶]، مرحله شروع ترک در مقایسه با مرحله گسترش پایدار ترک معمولاً کوتاه است. بنابراین، عمر خستگی اتصالات جوش شده را می‌توان با مرحله عمر گسترش پایدار ترک تخمین زد [۳]. عمر گسترش پایدار ترک معمولاً توسط فرمول پاریس که بر پایه روش LEFM است، محاسبه می‌شود [۶]. فرمول پاریس بیانگر رابطه بین نرخ گسترش پایدار ترک و دامنه ضریب شدت تنش (SIF) در نوک ترک است [۶] و به صورت معادله (۱) نوشته می‌شود:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K^m - \Delta K_{th}^m) \approx C \cdot \Delta K^m \quad (1)$$

- 1- Micro cracks
- 2- Blow holes
- 3- Incomplete weld penetration

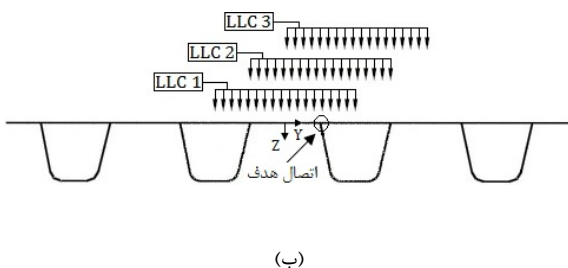
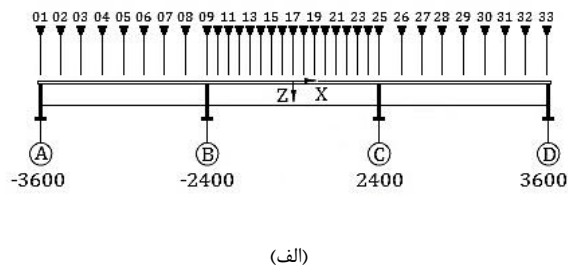
4- Correction factor



شکل ۳- نمایش اتصال هدف و نقاط مستعد ترک خستگی در آن، مقاطع مورد بررسی تنش و شرایط مرزی

برای شبیه‌سازی خستگی، بار طراحی خستگی بر روی عرشه در سه موقعیت عرضی رانندگی در اطراف اتصال هدف قرار داده شده و برای هر موقعیت عرضی، بار طراحی به صورت طولی در ۳۳ مرحله بر روی عرشه پل حرکت داده می‌شود. فاصله بارهای چرخ از یکدیگر در دهانه میانی ۱۵۰ میلی‌متر و خارج از دهانه میانی ۳۰۰ میلی‌متر است (شکل ۴-الف). سه موقعیت عرضی بار عبارتند از (شکل ۴-ب):

- مرکز بار چرخ بین دو تیرچه طولی میانی (LLC 1)
- مرکز بار چرخ بر روی جداره تیرچه طولی (LLC 2)
- مرکز بار چرخ بر روی مرکز تیرچه طولی (LLC 3)

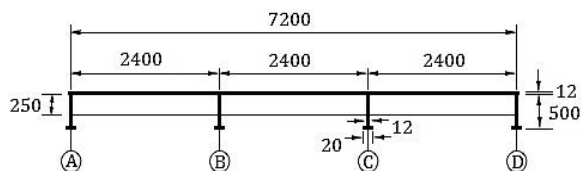


شکل ۴- آرایش بارگذاری بار چرخ بر روی عرشه: (الف) نمای طولی، (ب) موقعیت‌های عرضی بار طراحی

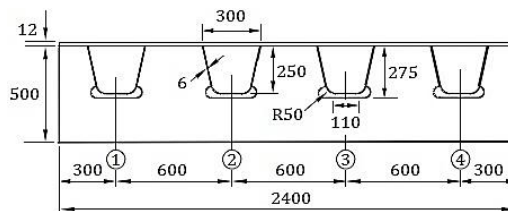
۳- مدل‌های مورد مطالعه

۳-۱- جزئیات

به منظور بررسی تنش و شناسایی مستعدترین محل ترک خوردگی در اتصالات تیرچه طولی به صفحه عرشه، یک مدل سه بعدی از یک عرشه ارتوتروپیک فولادی با ابعادی مطابق شکل (۲) ایجاد شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۲- جزئیات مدل مورد مطالعه (واحد به میلی‌متر):

الف) نمای طولی، (ب) نمای عرضی

از اتصالات تیرچه طولی به صفحه عرشه، اتصال سمت چپ از تیرچه طولی شماره ۳ به عنوان اتصال هدف در نظر گرفته شده و در تحلیل‌های اجزای محدود، تنش‌ها در فاصله ۱۰ میلی‌متری از محل تقاطع این اتصال به نمایندگی از نقاط مستعد ترک خستگی در پنج مقطع عرضی متفاوت با عنوان A, B, C, D و E بین تیرهای عرضی B و C (دهانه میانی مدل) بررسی می‌شوند. فاصله مقاطع عرضی از یکدیگر به همراه شرایط مرزی مدل در شکل (۳) نشان داده شده است. شایان توجه است در شکل (۳)، شماره ۱ نماینده نقطه مستعد ترک ۱، شماره ۲ نماینده نقطه مستعد ترک ۲ و شماره ۳ نماینده نقطه مستعد ترک ۳ است.

مطابق آیین‌نامه طراحی پل آشتو، برای محاسبه بیشینه دامنه تنش در اتصالات، بار طراحی خستگی ۱۲۵ کیلونیوتن و بر روی ناحیه‌ای به ابعاد ۵۱۰×۲۵۰ میلی‌متر توزیع می‌شود. وزن بار طراحی و ابعاد ناحیه ذکر شده در واقع سطح تماس یک جفت بار چرخ از محور عقب کامیون HS-20 بر روی روکاری موجود است.

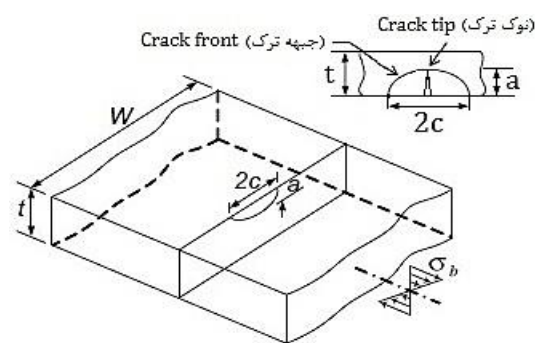
۳-۲- مدل سازی اجزای محدود

برای مدل سازی مدل های مورد مطالعه از نرم افزار ABAQUS استفاده شده است. در مدل سه بعدی، المان های فولادی استفاده شده به خاطر کوچک تر بودن بعد ضخامت نسبت به دو بعد دیگر، با استفاده از المان های سه بعدی پوسته-ای (Shell) مدل سازی شده و با المان S4R (المان های چهار گره ای با شش درجه آزادی در هر گره) نوع چهار وجهی (Quad) مش بندی شده است. المان های نزدیک به اتصال هدف از تراکم مش بندی بیشتری برخوردار هستند. دو تیرچه طولی داخلی (تیرچه طولی ۲ و ۳) و صفحه عرشه میان آن ها به همراه تیرهای عرضی میانی با ابعاد ۱۰ در ۱۰ میلی متر مش بندی شده است. از نوع فولاد ST52 با رفتار الاستیک پلاستیک کامل برای مدل سازی استفاده شده است. قید تمام اتصالات فولادی به یکدیگر از نوع Tie است.

شایان توجه است در تحلیل های اجزای محدود، سطح تماس بار چرخ بر روی صفحه عرشه با فرض روکاری موجود بر روی عرشه افزایش یافته است. لذا با در نظر گرفتن یک روکاری صلب با ضخامت ۵۰ میلی متر بر روی صفحه عرشه و زاویه توزیع بار ۴۵ درجه، سطح تماس بار چرخ بر روی صفحه عرشه از ابعاد ۵۱۰×۲۵۰ به ابعاد ۶۱۰×۳۵۰ میلی متر تغییر یافته است.

ریز مدل یک مدل اجزای محدود دو بعدی کرنش صفحه ای^۱ از اتصال تیرچه طولی به صفحه عرشه است. این ریز مدل از فاصله ۱۵۰ میلی متری در دو طرف بحرانی ترین مقطع عرضی بر روی اتصال هدف بیرون کشیده شده و مدل سازی شده است. جوش اتصال تیرچه طولی به صفحه عرشه مطابق با مقدار توصیه شده در آیین نامه پل آشتو دارای نفوذ ۸۰ درصد است. مش بندی نواحی نزدیک به پنجه و ریشه جوش به همراه المان جوش و همچنین ناحیه نزدیک به نوک ترک و در امتداد جبهه ترک^۲ (شکل (۵)) متراکم و به صورت چهار وجهی (CPE4R) و با ابعاد ۰/۰۱ میلی متر است. به کمک این مش بندی مناسب، دامنه ضریب شدت تنش به دست آمده از انتگرال J برای هر عمق ترک با دقت بالایی محاسبه می شود. مش بندی دیگر نواحی دارای ابعاد یک میلی متر است. شایان توجه است، شرایط مرزی و بارگذاری در ریز مدل دو بعدی از جابه جایی های گره ای وابسته به تحلیل مدل سه بعدی ایجاد می شود. مشخصات ریز مدل در شکل (۶) نشان داده شده است.

سپس برای ارزیابی های خستگی، سطح مقطع مستعدترین محل شناسایی شده برای ترک خستگی توسط یک ریز مدل دو بعدی مدل سازی شده و دامنه ضریب شدت تنش برای اندازه های مختلف ترک به روش عددی محاسبه می شوند. برای محاسبه دامنه ضریب شدت تنش به روش عددی، در مدل سازی ها ابتدا یک ترک با عمق اولیه مشخص در مستعدترین نقطه ترک خوردگی فرض می شود، سپس به منظور گسترش رشد ترک اولیه در نقطه مورد نظر، عمق های دیگر ترک تا رسیدن به عمق نهایی شبیه سازی شده و دامنه ضریب شدت تنش در نوک ترک برای هر عمق ترک شبیه سازی شده با استفاده از انتگرال J ارائه شده در نرم افزار ABAQUS محاسبه می شوند. شایان توجه است، به خاطر این که ترک در نوک آن و همچنین مسیره های بسیار نزدیک به نوک ترک ممکن است در ناحیه پلاستیک باشد و دارای نقاط تکین شود، با استفاده از خاصیت استقلال از مسیر انتگرال J می توان در مسیره های دورتر از نوک ترک، دامنه ضریب شدت تنش را تعیین کرد، بنابراین در هنگام محاسبه دامنه ضریب شدت تنش از چند مسیر اول صرف نظر می شود. مقدار واقعی دامنه ضریب شدت تنش را می توان از زمانی که مقدار انتگرال مسیری تقریباً از یک مسیر به بعد ثابت می شود، در نظر گرفت. از طرف دیگر، همان طور که در شکل (۵) نشان داده شده است، مطابق مدل پیشنهاد شده از Raju و Newman [۸]، با گسترش عمق ترک در داخل ضخامت صفحه فولادی (a)، ترک به صورت طولی (2c) در امتداد سطح نیز در حال گسترش است. بنابراین، ترک های شبیه سازی شده در داخل ضخامت صفحه فولادی به صورت قوس های هم مرکز مدل سازی می شوند. از پژوهش های انجام شده توسط Xiao و همکاران نیز مشخص شده است، تغییر در نسبت عمق ترک (a) به طول ترک (2c) تغییر قابل ملاحظه ای در عمر و مقاومت خستگی ایجاد نمی کند.



شکل ۵- نمایش رشد ترک در عمق و سطح صفحه فولادی در

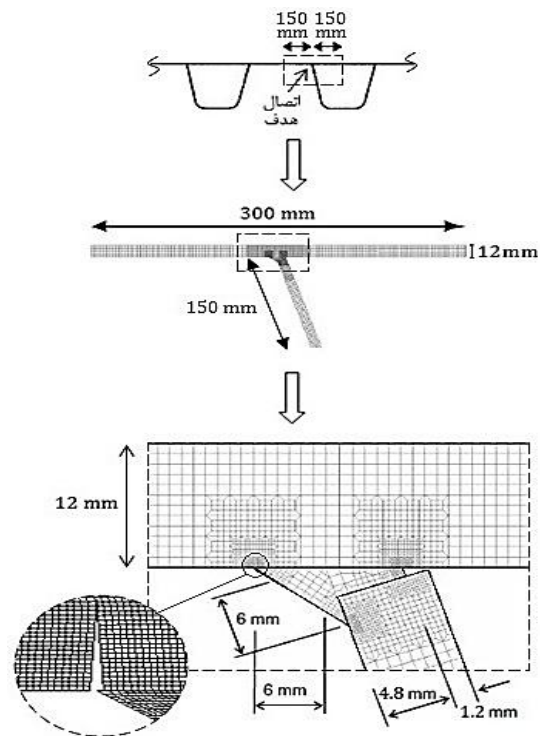
معرض خمش [۸]

1- Plane Strain

2- Crack front

طولی تنش می‌توان در هر مقطع برای هر نقطه مستعد ترک خستگی ترسیم کرد. در شکل (۹) بحرانی‌ترین حالت تنش برای نقاط مستعد ترک خستگی در اتصال هدف و در مقاطع مورد بررسی تنش نشان داده شده است. همچنین در جدول (۱)، نتایج کامل دامنه تنش برای نقاط مستعد ترک خستگی در هر پنج مقطع خلاصه شده است. شایان توجه است، با توجه به این که شرایط تنش برای نقاط مستعد ترک خستگی ۲، ۳ و ۴ در مقطع E به خاطر تقاطع جوش‌های اتصال تیر عرضی و تیرچه طولی با صفحه عرشه متفاوت است، به همین دلیل تنش‌ها در این سه نقطه در فاصله ۱۰ میلی‌متری از مقطع E محاسبه شده است.

با مشاهده نمودارهای شکل (۹) و جدول (۱) نتیجه گرفته می‌شود، هنگامی که بار چرخ به مقاطع مورد بررسی تنش (مقاطع عرضی A تا E) نزدیک‌تر شده است، تنش‌های عرضی در حال بزرگ‌تر شدن هستند و با قرارگیری بار چرخ بر روی هر یک از مقاطع مورد بررسی تنش، تنش‌های عرضی به بیشینه‌ترین مقدار خود رسیده است.



شکل ۶- ریز مدل دو بعدی

جدول ۱- دامنه‌های اسمی تنش بر حسب مگاپاسکال تحت بار چرخ ۱۲۵ کیلو نیوتنی برای نقاط مستعد ترک خستگی در اتصال

هدف و مقاطع عرضی A تا E

حالات عرضی بار چرخ			مقاطع مورد بررسی تنش	نقاط مورد بررسی تنش
LLC 3	LLC 2	LLC 1		
۱۱۰	۱۴۶	۱۱۱	A B C D E	نقطه مستعد ترک ۱
۱۱۵	۱۵۱	۱۱۳		
۱۱۹	۱۵۵	۱۱۶		
۱۲۴	۱۶۰	۱۲۱		
۱۶۳	۱۶۴	۹۷		
۱۱۴	۱۵۴	۱۲۰	A B C D E	نقطه مستعد ترک ۲
۱۱۹	۱۵۷	۱۲۱		
۱۲۳	۱۶۱	۱۲۳		
۱۲۷	۱۶۶	۱۲۸		
۱۳۹	۱۷۱	۱۴۱		
۲۹	۶۰	۹۶	A B C D E	نقطه مستعد ترک ۳
۲۷	۶۶	۹۴		
۲۶	۷۱	۸۷		
۲۳	۷۳	۸۰		
۱۹	۷۴	۷۸		
۵۸	۴۶	۵۳	A B C D E	نقطه مستعد ترک ۴
۵۸	۵۳	۵۷		
۵۸	۵۶	۵۶		
۵۸	۵۸	۵۲		
۱۲۷	۱۲۰	۸۸		

۳-۳- راستی آزمایی

راستی آزمایی مدل مورد مطالعه با مدل آزمایشگاهی فریتاس^۱ [۱۵] که در شکل (۷) نشان داده شده، انجام پذیرفته است. در این مدل آزمایشگاهی، مطابق الگوهای تعریف شده بار خستگی در آیین‌نامه EN1991-2^۲، دو نوع بار چرخ با وزن ۵۰ کیلو نیوتن در مقطع وسط دهانه اعمال و با استفاده از کرنش سنج، کرنش‌های عرضی در این مقطع اندازه‌گیری شده است. مقایسه نتایج کرنش‌های حاصل از مدل‌سازی با نتایج آزمایشگاهی در شکل (۸) نشان می‌دهد، در هر دو نوع بار چرخ توزیع کرنش‌ها بسیار نزدیک و تطابق آن در حدود 0.94 ± 0.01 است، بنابر این نتایج مدل‌سازی انجام شده در این مطالعه قابل اعتماد است.

۴- نتایج تحلیل‌های اجزای محدود

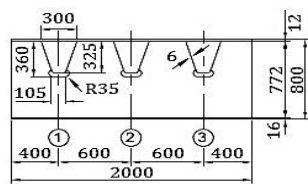
۴-۱- بررسی دامنه تنش در نقاط مستعد ترک خستگی و

شناسایی مستعدترین نقطه ترک خوردگی

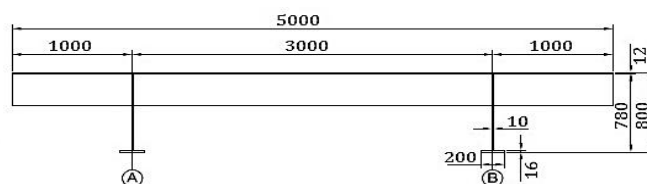
خطوط تأثیر طولی تنش در ارتباط با عمر خستگی است و با کمک آن می‌توان دامنه تنش در اتصالات را تعیین کرد. با توجه به آرایش بار چرخ بر روی صفحه عرشه، سه خط تأثیر

3- Sofia teixeira de freitas

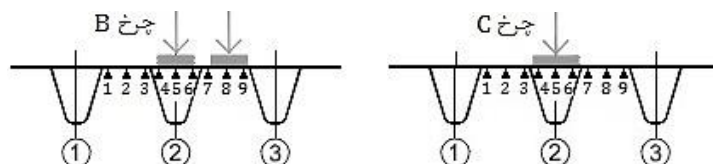
4- Eurocode 1 - Part 2: traffic loads on bridges



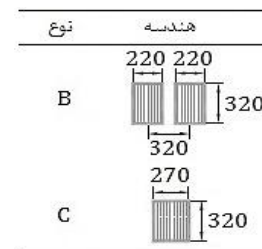
(ب)



(الف)



(ج)

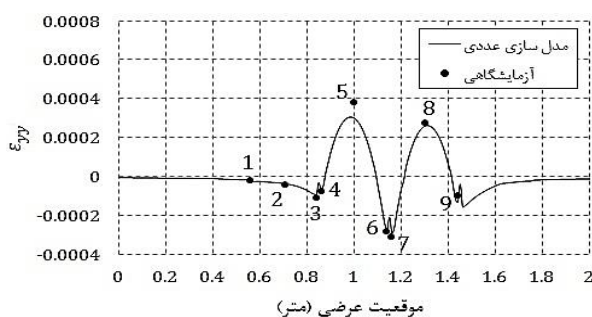


(ج)

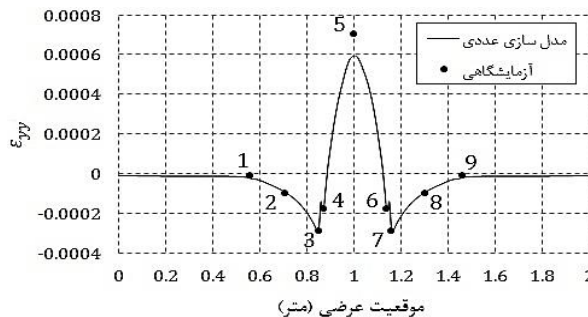


(ه)

شکل ۷- مشخصات مدل آزمایشگاهی فریتاس [۱۵]: (الف) نمای طولی، (ب) نمای عرضی، (ج) ابعاد اثر بار چرخ، (د) محل قرارگیری بار چرخ و کرنش سنج‌ها، (ه) نمای کلی از مدل آزمایشگاهی



(ب)

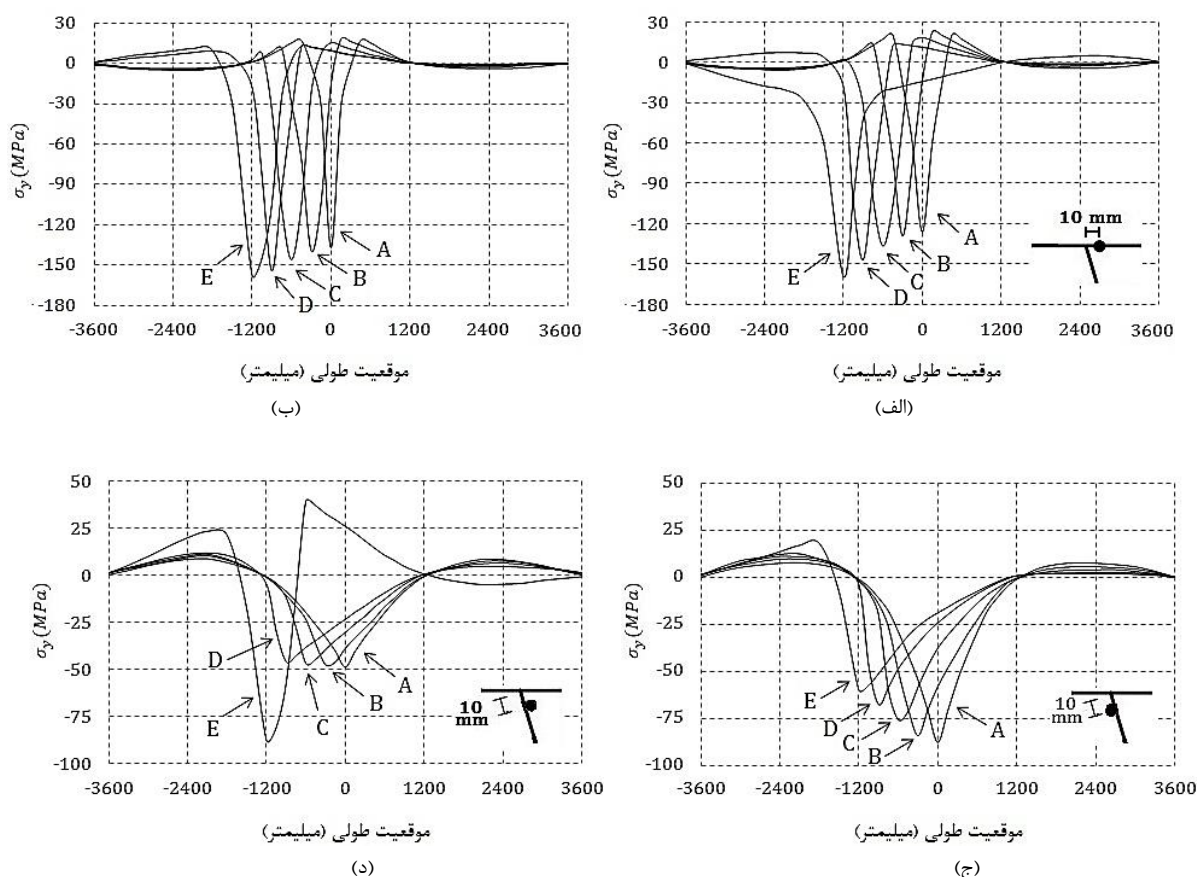


(الف)

شکل ۸- مقایسه نتایج کرنش‌های حاصل از مدل‌سازی با نتایج آزمایشگاهی: (الف) بار چرخ C، (ب) بار چرخ B

برای نقاط مستعد ترک خستگی در صفحه عرشه، حرکت طولی بار چرخ در حالت ۲ LLC نسبت به دو حالت دیگر عرضی بار چرخ، دامنه تنش بزرگ‌تری ایجاد می‌کند. همچنین احتمال ایجاد ترک خستگی در پنجه جوش (نقطه مستعد ترک ۲) به خاطر بزرگ‌تر بودن دامنه تنش آن نسبت به ریشه جوش (نقطه مستعد ترک ۱) بیشتر است. از طرف دیگر، دامنه تنش در این دو نقطه با نزدیک‌تر شدن بار چرخ به تیر عرضی در حال بزرگ‌تر شدن است، بنابراین برای نقاط مستعد ترک خستگی در صفحه عرشه، احتمال ایجاد ترک‌های خستگی در محلی که تیر عرضی و تیرچه طولی در تقاطع با یکدیگر به صفحه عرشه متصل می‌شوند، بیشتر است.

برای نقاط مستعد ترک خستگی در صفحه عرشه، حرکت طولی بار چرخ در حالت ۲ LLC نسبت به دو حالت دیگر عرضی بار چرخ، دامنه تنش بزرگ‌تری ایجاد می‌کند. همچنین احتمال ایجاد ترک خستگی در پنجه جوش (نقطه مستعد ترک ۲) به خاطر بزرگ‌تر بودن دامنه تنش آن نسبت به ریشه جوش (نقطه مستعد ترک ۱) بیشتر است. از طرف دیگر، دامنه تنش در این دو نقطه با نزدیک‌تر شدن بار چرخ به تیر عرضی در حال بزرگ‌تر شدن است، بنابراین برای نقاط مستعد ترک خستگی در صفحه عرشه، احتمال ایجاد ترک‌های خستگی در محلی که تیر عرضی و تیرچه طولی در تقاطع با یکدیگر به صفحه عرشه متصل می‌شوند، بیشتر است.



شکل ۹- خطوط تأثیر طولی تنش برای نقاط مستعد ترک خستگی در اتصال هدف: الف) بیشینه تنش در نقطه مستعد ترک ۱ (تحت بارگذاری LLC 2)، ب) بیشینه تنش در نقطه مستعد ترک ۲ (تحت بارگذاری LLC 2)، ج) بیشینه تنش در نقطه مستعد ترک ۳ (تحت بارگذاری LLC 1)، د) بیشینه تنش در نقطه مستعد ترک ۴ (تحت بارگذاری LLC 3)

گیری در اطراف نوک ترک تعریف می‌شود (اولین مسیر به عنوان مسیر گره نوک ترک تعریف می‌شود و مسیرهای دیگر با توجه به مش بندی اطراف نوک ترک انتخاب می‌شوند). بنابراین، ریز مدل اجزای محدود با عمق‌های مختلف ترک تحلیل شده و به پیروی از آن، دامنه ضرایب شدت تنش برای مسیرهای مختلف محاسبه می‌شود (شکل ۱۰-ب)).

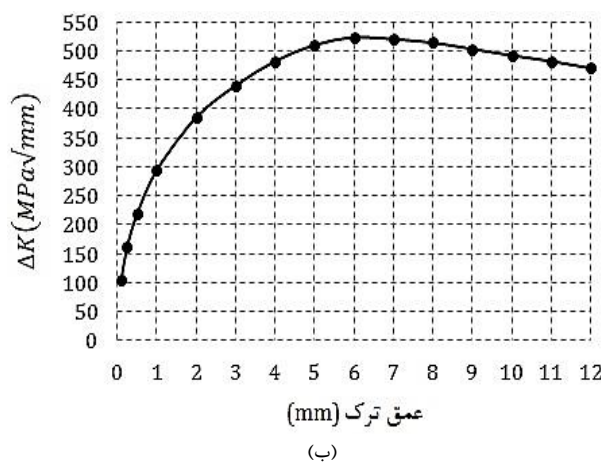
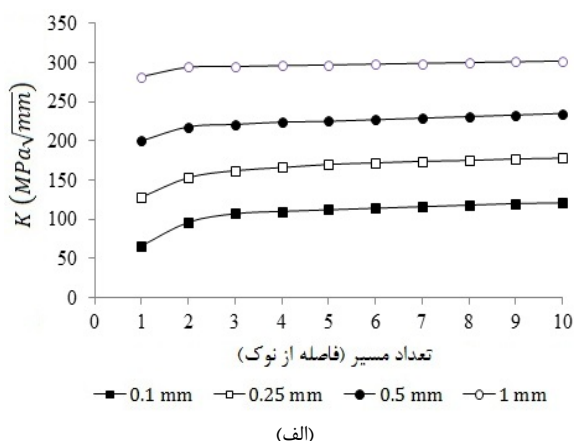
شکل (۱۱-الف)، ضرایب شدت تنش نسبت به مسیرهای انتگرال‌گیری را برای چهار عمق اولیه ترک نشان می‌دهد. همان طور که از این شکل مشخص است، تقریباً با ثابت شدن مقدار دامنه ضریب شدت تنش از مسیر سوم، این ضریب برای محاسبات در نظر گرفته شده است (این مقدار می‌تواند با برون یابی عددی هم محاسبه شود).

۲-۴- ارزیابی خستگی

با شناسایی مستعدترین محل ترک خستگی در اتصال تیرچه طولی به صفحه عرشه، دامنه ضرایب شدت تنش برای ارزیابی خستگی محاسبه می‌شوند. به این منظور با استفاده از ریز مدل دو بعدی، ۱۵ عمق مختلف ترک از ۰/۱ میلی‌متر به عنوان عمق اولیه ترک تا ۱۲ میلی‌متر به عنوان عمق نهایی ترک در محل پنجه جوش شبیه‌سازی شده و دامنه ضریب شدت تنش برای هر عمق ترک محاسبه می‌شود. ترک‌ها همان‌گونه که در شکل (۱۰-الف) نشان داده شده است به صورت عمود در داخل ضخامت صفحه فولادی ($\theta = 90^\circ$) و قوس‌های هم مرکز و با فرض این که بین عمق ترک با نیمی از طول ترک رابطه $a/c = 0.5$ برقرار باشد، شبیه‌سازی شده است. عمق‌های ترک و نسبت عمق به طول ترک ($a/2c$) در جدول (۲) ارائه شده است. همچنین در نرم افزار، تعداد ۱۰ مسیر برای انتگرال-

نمودار شکل (۱۱-ب) نیز دامنه ضریب شدت تنش نسبت به عمق ترک را نشان می‌دهد.

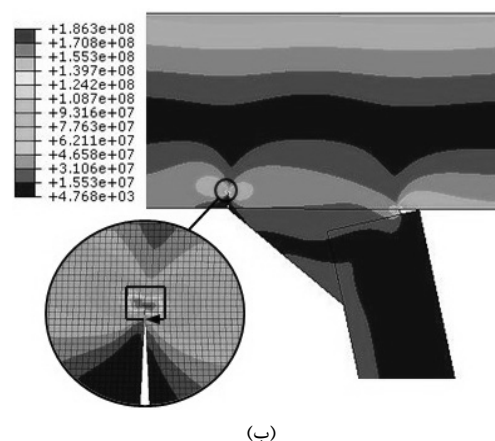
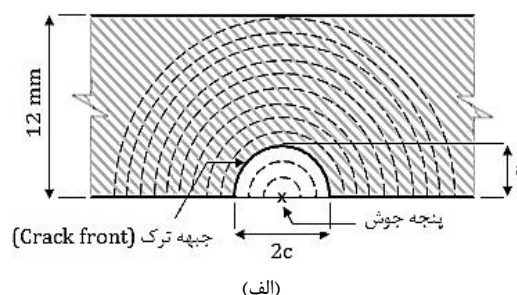
در نهایت، با توجه به دامنه ضریب شدت تنش به دست آمده برای هر عمق ترک، بر اساس رابطه ۴، منحنی رشد ترک در ضخامت صفحه عرشه در برابر تعداد دوره بارگذاری (N) مطابق شکل (۱۲-الف) شبیه‌سازی شده و سپس مقاومت خستگی اتصال مطابق شکل (۱۲-ب) تعیین شده است. شایان توجه است، در رابطه (۴) مطابق با منحنی‌های طراحی فولاد در آیین-نامه طراحی خستگی انجمن سازه‌های فولادی ژاپن ($JSSC$)، ثابت‌های مصالح برای فولادهای پرمقاومت به کار رفته در عرشه-های ارتوتروپیک فولادی، برابر با $m = 2.75$ و $C = 5.01 \times 10^{-12}$ است [۱۶]. همچنین، مقاومت خستگی اتصال مطابق آیین‌نامه پل آشتو در دو میلیون دوره بارگذاری تعیین شده است.



شکل ۱۱- محاسبه دامنه ضریب شدت تنش: الف) نسبت به تعداد مسیرها، ب) نسبت به عمق ترک

جدول ۲- عمق‌های ترک و نسبت‌های شکل

$a/2c$	c (mm)	a (mm)
۰/۲۵	۰/۲	۰/۱
۰/۲۵	۰/۵	۰/۲۵
۰/۲۵	۱	۰/۵
۰/۲۵	۲	۱
۰/۲۵	۴	۲
۰/۲۵	۰/۲	۰/۱
۰/۲۵	۰/۵	۰/۲۵
۰/۲۵	۱	۰/۵
۰/۲۵	۲	۱
۰/۲۵	۴	۲
۰/۲۵	۶	۳
۰/۲۵	۸	۴
۰/۲۵	۱۰	۵
۰/۲۵	۱۲	۶
۰/۲۵	۱۴	۷
۰/۲۵	۱۶	۸
۰/۲۵	۱۸	۹
۰/۲۵	۲۰	۱۰
۰/۲۵	۲۲	۱۱
۰/۲۵	۲۴	۱۲



شکل ۱۰- محاسبه دامنه ضریب شدت تنش در ریز مدل دو بعدی: الف) شبیه‌سازی ترک‌های هم مرکز قوسی شکل در پنجه جوش (نقطه مستعد ترک ۲)، ب) تنش بیشینه در ریز مدل دو بعدی با عمق ترک ۱ میلی‌متر و انتگرال‌گیری مسیری در اطراف نوک ترک

عرشه در نظر گرفت و ترک‌هایی که کوچک‌تر از این اندازه هستند را قبل از وارد شدن به مرحله بحرانی شناسایی کرد. در نهایت برای مستعدترین نقطه ترک خستگی در اتصال تیرچه طولی به صفحه عرشه، عمر خستگی در حدود $1/6$ میلیون دوره بارگذاری پیش‌بینی شده است. عمر خستگی پیش‌بینی شده کمتر از دو میلیون دوره بارگذاری تعیین شده در آیین نامه آشتو است و مقاومت مورد نیاز طراحی را برآورده نکرده است، لذا باید راه حل مناسبی برای این وضعیت در نظر گرفته شود.

افزایش ضخامت صفحه عرشه به منظور بالا بردن سختی صفحه عرشه یکی از بهترین راه حل‌ها است. سخت‌تر کردن نقاط مستعد ترک خستگی کاهش و عمر خستگی در اتصالات تیرچه طولی به صفحه عرشه را افزایش دهد. به همین دلیل در جدول (۳)، تأثیر ضخامت صفحه عرشه بر روی رفتار خستگی مستعدترین محل وقوع ترک خستگی (نقطه مستعد ترک ۲ در مقطع E) بررسی شده است.

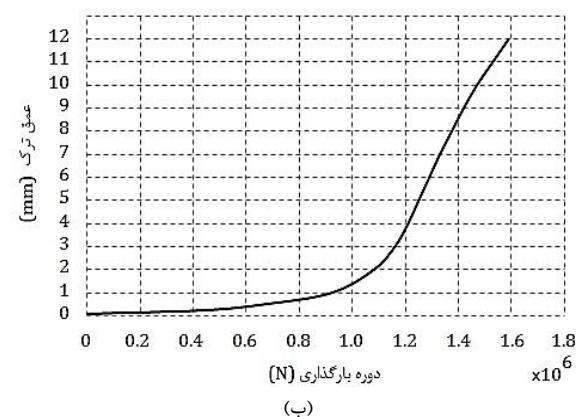
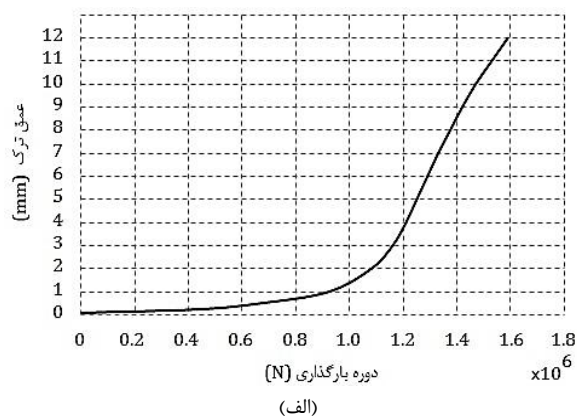
جدول ۳- تأثیر ضخامت صفحه عرشه بر روی رفتار خستگی

مستعدترین محل ترک خستگی در اتصال تیرچه طولی به

صفحه عرشه

دوره بارگذاری	دامنه تنش (MPa)	ضخامت صفحه عرشه (mm)
$1/6 \times 10^6$	۱۷۱	۱۲
$4/12 \times 10^6$	۱۱۵	۱۴
13.5×10^6	۷۹	۱۶
45×10^6	۵۱	۱۸
127×10^6	۳۵	۲۰
403×10^6	۲۳	۲۲
1577×10^6	۱۴	۲۴

همان‌طور که در این جدول مشخص است، تنها با افزایش دو میلی‌متری ضخامت صفحه عرشه، دامنه تنش در مستعدترین نقطه ترک خستگی در حدود ۳۵ درصد کاهش یافته و در مقابل آن دوره بارگذاری بیش از سه برابر شده و نیاز طراحی را برآورده کرده است. بنابر این نتیجه گرفته می‌شود، با افزایش ضخامت صفحه عرشه می‌توان رفتار خستگی را در اتصالات عرشه‌های ارتوتروپیک فولادی بهتر کرد.



شکل ۱۲- منحنی‌های ارزیابی خستگی: الف) شبیه‌سازی رشد ترک در داخل ضخامت صفحه عرشه، ب) تعیین مقاومت خستگی اتصال تیرچه طولی به صفحه عرشه

از شکل (۱۲) نتیجه گرفته می‌شود، تا هنگامی که عمق نفوذ ترک در داخل ضخامت صفحه عرشه کمتر از یک میلی‌متر است ($a=1\text{mm}$)، رشد ترک آهسته و دوره بارگذاری آن تا رسیدن ترک به این عمق در حدود ۹۵۰ هزار دوره است. پس از عبور عمق نفوذ ترک از یک میلی‌متر، ترک تنها در طی ۶۵۰ هزار دوره بارگذاری سریعاً تا عمق ۱۲ میلی‌متری رشد می‌کند. از این نکته نتیجه گرفته می‌شود، تا هنگامی که عمق نفوذ ترک به داخل ضخامت صفحه عرشه کمتر از یک میلی‌متر است، مقاومت صفحه عرشه دستخوش تغییرات کمتری است و ترک نفوذ کرده پایداری صفحه عرشه را به خطر نمی‌اندازد، اما پس از عبور عمق نفوذ ترک از یک میلی‌متر، ترک سریعاً رشد کرده و پایداری صفحه عرشه را دچار مخاطره می‌کند. بنابر این، عمق یک میلی‌متری نفوذ ترک به داخل ضخامت صفحه عرشه را می‌توان به عنوان معیار کیفیت اتصالات جوش شده تیرچه طولی به صفحه

- Orthotropic Steel Deck", *Advanced Materials Research*, 2011, 163-167, 410-416.
- [4] Liao, J., "Fatigue Damage in the Orthotropic Steel Deck with Respect to the Trough-to-deck Plate Joint in Between the Crossbeams", MSc Thesis, Delft University of Technology, Netherlands, 2011.
- [5] Nguyena, H., Chub, Q., Kima, S., "Fatigue Analysis of a Pre-Fabricated Orthotropic Steel Deck for Light-Weight Vehicles", *Journal of Constructional Steel Research*, 2011, 67, 647-655.
- [6] Xiao, Z., Chen, T., Zhao, X., "Fatigue Strength Evaluation of Transverse Fillet Welded Joints Subjected to Bending Loads", *International Journal of Fatigue*, 2012, 38, 57-64.
- [7] Sim, H., Uang, C., "Stress Analyses and Parametric Study on Full-Scale Fatigue Tests of Rib-to-Deck Welded Joints in Steel Orthotropic Decks", *Journal of Bridge Engineering*, 2012, 17 (5), 765-773.
- [8] Newman, J. C., Raju, I. S., "An Empirical Stress-intensity Factor Equation for the Surface Crack", *Engineering Fracture Mechanics*, 1981, 15 (1-2), 185-192
- [7] Sim, H., Uang, C., "Stress Analyses and Parametric Study on Full-Scale Fatigue Tests of Rib-to-Deck Welded Joints in Steel Orthotropic Decks", *Journal of Bridge Engineering*, 2012, 17 (5), 765-773.
- [8] Newman, J. C., Raju, I. S., "An Empirical Stress-intensity Factor Equation for the Surface Crack", *Engineering Fracture Mechanics*, 1981, 15 (1-2), 185-192.
- [9] Bohai, J., Rong, L., Ce, C., Hirofumi, M., Xiongfei, C., "Analytical Evaluation on Root-deck Fatigue of Orthotropic Steel Bridge Deck", *Journal of Constructional Steel Research*, 2013, 90, 174-183.
- [10] Rong, L., Yuqing, L., Bohai, J., Manman, W., Yuan, T., "Hot Spot Stress Analysis on Rib-Deck Welded Joint in Orthotropic Steel Decks", *Journal of Constructional Steel Research*, 2014, 97, 1-9
- [11] Hibbitt, Karlsson & Sorensen, "ABAQUS/standard User's Manual, Version 6.11.3", RI, US, 2012.
- [12] AASHTO, "LRFD Bridge Design Specifications", 5th Edition, AASHTO, Washington DC, US, 2010.
- [13] Baik, B., Yamada, K., Ishikawa, T., "Fatigue Crack Propagation Analysis for Welded Joint Subjected to Bending", *International Journal of Fatigue*, 2011, 33, 746-758.

۵- نتیجه گیری

در پنج مقطع عرضی متفاوت، تنش‌ها برای نقاط مستعد ترک خستگی در اتصال تیرچه طولی به صفحه عرشه بررسی شدند و نتیجه گرفته شد، نقاط مستعد ترک خستگی در صفحه عرشه به خاطر بزرگ‌تر بودن سطح تنش‌ها در آن‌ها نسبت به نقاط مستعد ترک خستگی در جداره تیرچه طولی بیشتر در معرض پذیرش آسیب خستگی هستند و مقاومت خستگی اتصال توسط ترک‌های خستگی منتشر شده در داخل ضخامت صفحه عرشه تعیین می‌شود. همچنین ترکی که از پنجه جوش شروع شده و به داخل ضخامت صفحه عرشه نفوذ می‌کند در نزدیک‌ترین مقطع به تیر عرضی، مستعدترین محل ترک خستگی در اتصالات تیرچه طولی به صفحه عرشه است.

از طرف دیگر، در صورت ایجاد ترک در مستعدترین نقطه ترک خستگی، تا هنگامی که ترک کمتر از یک میلی‌متر به داخل ضخامت صفحه عرشه نفوذ کند، رشد ترک در مقابل تعداد دوره‌های بارگذاری آهسته است. اما پس از عبور عمق نفوذ ترک از یک میلی‌متر، ترک سریعاً با تعداد دوره‌های بارگذاری بسیار کمتری تا عمق نهایی خود رشد می‌کند و پایداری صفحه عرشه را به مخاطره می‌اندازد. بنابر این باید در اتصالات تیرچه طولی به صفحه عرشه، کنترل ترک به طور مستمر بررسی شود تا به محض ایجاد ترک و در مراحل اولیه ایجاد آن (در مطالعه حاضر ترک کوچک‌تر از یک میلی‌متر) و قبل از وارد شدن به مرحله بحرانی شناسایی و ترمیم شوند.

در نهایت مشخص شد، مهم‌ترین پارامتر تأثیرگذار در عمر خستگی اتصال دامنه تنش است و به منظور جلوگیری یا حداقل کاهش میزان آسیب‌های خستگی در اتصالات تیرچه طولی به صفحه عرشه، می‌توان با بالا بردن سختی صفحه عرشه به صورت افزایش ضخامت آن به این مهم دست یافت.

۶- مراجع

- [1] Oh, C., Hong, K., Bae, D., Do, H., Han, T., "Analytical and Experimental Studies on Optimal Details of Orthotropic Steel Decks for Long Span Bridges", *International Journal of Steel Structures*, 2011, 11 (2), 227-234.
- [2] Xiao, Z., Yamada, K., Ya, S., Zhao, X., "Stress Analyses and Fatigue Evaluation of Rib-to-deck Joints in steel Orthotropic Decks", *International Journal of Fatigue*, 2008, 30, 1387-1397.
- [3] Zhang, Y., Li, Y., Zhang, D., "Fatigue Life Estimation of Rib-to-Deck Joints in

- [14] Xiao, Z. G., Yamada, K., Inoue, J., Yamaguchi, K., "Fatigue Crack in Longitudinal Ribs of Steel Orthotropic Deck", International Journal of Fatigue, 2006, 28, 409-416.
- [15] Freitas, S., "Fatigue Classification of Welded Joints in Orthotropic Steel Bridge Decks", PhD Thesis, Delft University of Technology, Netherlands, 2012.
- [16] Japanese Society of Steel Construction (JSSC), "Fatigue Design Recommendations for Steel Structures and Commentary", Gihodo Publishing, 1993.