



## مطالعه تجربی و تحلیلی اثر پارامترهای قطر نقطه جوش، فاصله صفحات و نیروی الکتروود بر عمر خستگی مود ترکیبی اتصالات جوش نقطه‌ای

سوران حسنی فرد\*

استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

\*تبریز، صندوق پستی ۵۱۶۶۶۱۴۷۶۶. hasanifard@tabrizu.ac.ir

**چکیده-** در این پژوهش اثرهای مسیر ترک خستگی در مود ترکیبی کششی و برشی بر عمر خستگی اتصالات نقطه‌جوش با قطر و فواصل مختلفی بین صفحاتشان مطالعه شده است. از تحلیل غیرخطی اجزای محدود برای محاسبه توزیع‌های تنش در راستای عمود بر جهت ترک استفاده شده است. مقادیر تنش مؤثر و همچنین ضرایب کاهش مقاومت ناچ به روش حجمی به‌دست آمده است. روش رشد ترک خستگی برای به‌دست آوردن ضریب‌های شدت تنش در مودهای اول و دوم شکست و تخمین عمر انتشار ترک خستگی به کار رفته است. نتایج به‌دست آمده از روش‌های تخمین عددی- از جمله روش حجمی و روش تخمین رشد ترک خستگی- با داده‌های تجربی خستگی مقایسه شده است. نتایج حاصل از روش رشد ترک خستگی با در نظر گرفتن مودهای اول و دوم شکست، نشان می‌دهد که اتصالات ایجاد شده توسط نیروی الکتروودی کوچکتر و با قطر نقطه‌جوش بزرگتر، ضریب شدت تنش کوچکتری نسبت به اتصالاتی دارند که قطر نقطه‌جوش آنها کوچکتر است، اما با توجه به رشد ترک خستگی در مود ترکیبی شکست، نسبت ضریب شدت تنش مود اول به مود دوم اهمیت بیشتری دارد.

**کلیدواژگان:** اتصال نقطه جوش، عمر خستگی، رشد ترک خستگی، مود ترکیبی شکست، روش حجمی.

## Analytical and Experimental Investigation of the Effects of Spot Weld Diameter, Gap Distance and Electrode Force on the Mixed Mode of Resistance Spot Welded-Joints

S. Hassanifard\*

Assist. Prof. of Mech. Eng., Tabriz Univ.

\*P.O.B. 5166614766 Tabriz, Iran. hasanifard@address.ac.ir

**Abstract-** The effects of mixed mode fracture and fatigue crack path have been investigated in tensile-shear spot weld specimens having different gaps between their sheets. Non-linear analysis has been performed to obtain the stress distributions along the line perpendicular to the fatigue crack path. The amounts of effective stress and notch strength reduction factors have been obtained using the volumetric method. Fatigue crack growth approach has been applied to obtain stress intensity factors in mode I and mode II of fracture and to estimate fatigue crack propagation of spot welds. The results obtained from numerical predictions such as the volumetric method and the fatigue crack growth approach have been compared with the available fatigue test data. The results obtained from the fatigue crack growth approach show that spot weld specimens with bigger nugget diameter have the smaller values of stress intensity factors compared with those spot welds with smaller nugget diameters. However, with due attention to the fact that fatigue cracks propagate in the mixed mode condition, the ratio of mode I stress intensity factor to the mode II become more important parameter while predicting the fatigue life of specimens.

**Keywords:** Spot welded joint, Fatigue life, Fatigue crack growth, Mixed mode fracture, Volumetric method.

## ۱- مقدمه

در اتصالات نقطه جوش، قطر و فاصله بین صفحات اتصال، مهمترین پارامترهای مؤثر بر عمر خستگی اتصال محسوب می‌شوند. به طور کلی روش‌های تخمین عمر خستگی، بر پایه تنش‌ها و کرنش‌های سازه‌ای نزدیک نقطه جوش‌ها را می‌توان به صورت زیر دسته‌بندی کرد: روش عمر-تنش، روش عمرکرنش، روش مکانیک شکست و روش‌های مبتنی بر انرژی.

روش عمر-تنش برای ارزیابی عمر خستگی قطعاتی که در آن تنش‌ها بیشتر در محدوده الاستیک هستند، به کار می‌رود. در روش سنتی عمر خستگی بر پایه تنش، به ویژه برای مسائل خستگی کم تناوب- که کرنش‌های موجود مؤلفه پلاستیک قابل توجهی دارند- ضرایب کاهش مقاومت ناچ باید به دقت به کار روند. در روش عمرکرنش، طول عمر خستگی برحسب تعداد تناوب بار، به دامنه کرنش مربوط می‌شود. این روش پلاستیسیته موضعی را در تخمین عمر آغاز ترک خستگی مد نظر قرار می‌دهد.

در تخمین استحکام خستگی نقطه جوش‌ها، معمولاً دو نوع شکست خستگی مد نظر قرار می‌گیرد: (الف) شکست صفحه که از نقطه جوش آغاز شده و برای نقطه جوش‌هایی با قطر نسبتاً بزرگ اتفاق می‌افتد. این نوع شکست در مسائل خستگی پر تناوب از ناحیه حرارت دیده (HAZ) و برای مسائل خستگی کم تناوب از ناحیه بیرون از HAZ اتفاق می‌افتد، (ب) شکست ناگت در سطح اتصال برای نقطه جوش‌هایی که قطر آنها نسبتاً کوچک و غیر محافظه-کارانه انتخاب شده است.

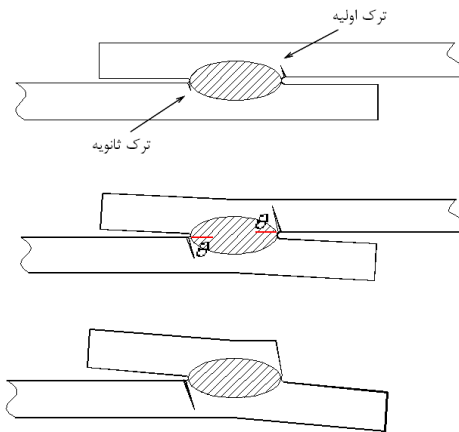
یکی از روش‌هایی که تاکنون در ارزیابی استحکام خستگی نقطه جوش‌ها بیشترین کاربرد را داشته، روش انتشار ترک بر مبنای مکانیک شکست خطی است. در بررسی رشد و انتشار ترک، دو مود خستگی اصلی در نقطه جوش‌ها دیده می‌شود: ترک در راستای ضخامت صفحه

اتصال با قطر نقطه جوش بزرگ و ترک در راستای نقطه جوش با قطر نقطه جوش کوچک. اگر رابطه  $d \geq 5\sqrt{t}$  برای نقطه جوش‌ها درست باشد، شکست صفحه در راستای ضخامت اتفاق می‌افتد (در این رابطه  $d$  قطر نقطه جوش و  $t$  ضخامت صفحات اتصال می‌باشند) [۱]. در روش مکانیک شکست، می‌توان از روابط مکانیک شکست خطی  $(\Delta K - N_f)$ ، روش رشد ترک خستگی برای محاسبه عمر مربوط به انتشار ترک، مکانیک شکست غیر خطی یا روش انتگرال J استفاده کرد.

نی<sup>۱</sup> و مهادوان<sup>۲</sup> در سال ۲۰۰۳، انتشار ترک خستگی احتمالی را در اتصالات نقطه جوش برای بارگذاری چند-محوره- که از پاسخ تحلیل مدل خودرو به دست آمده مطالعه کردند [۲]. آنان با توجه به اینکه در اتصالات نقطه جوش بدنه اتومبیل‌ها، معمولاً  $d \geq 5\sqrt{t}$ ، رشد ترک صفحه در راستای ضخامت را مود غالب شکست در نظر گرفته و مراحل زیر را برای ارزیابی عمر خستگی اتصال انجام دادند. برای به دست آوردن نیروها و گشتاورهای برآیند در نقطه جوش، ابتدا مدل اجزای محدود اتصال را- که در آن نقطه جوش با یک المان تیر و صفحات توسط المان‌های پوسته مدل سازی می‌شوند- ایجاد کردند. سپس با محاسبه تنش‌ها، ضریب شدت تنش معادل ( $K_{eq}$ ) را برای مودهای I و II شکست به دست آوردند و در پایان منحنی  $\Delta K_{eq} - N$  را برای تخمین عمر خستگی اتصال با فرض اینکه ضریب شدت تنش معادل را می‌توان مود I شکست در نظر گرفت، ارائه کردند. تحقیقات متعددی در زمینه نحوه رشد و انتشار ترک خستگی در اتصالات نقطه جوش و سازوکارهای مختلف شکست انجام شده و اثر پارامترهایی مانند قطر نقطه جوش و ضخامت صفحات مطالعه شده است [۳-۶]. همچنین روابطی برای تعیین

1. Ni
2. Mahadevan

شکل ۲ سازوکار شکست اتصالات برشی نقطه جوش‌های مورد نظر را به صورت طرح واره نشان می‌دهد.



شکل ۲ سازوکار شکست اتصالات برشی نقطه جوش

همچنان‌که در شکل ۲ دیده می‌شود، ترک‌های اولیه و ثانویه در دو طرف ناگت با زاویه  $\theta$  نسبت به فصل مشترک صفحات اتصال نقطه جوش ایجاد می‌شود.

برای تخمین عمر انتشار ترک خستگی، روش مکانیک شکست و رابطه واکر<sup>۳</sup> به کار خواهد رفت. نتایج تحلیل عددی با نتایج به دست آمده از آزمون‌های خستگی مقایسه خواهد شد. هدف اصلی این پژوهش، مطالعه جامع و کامل اثر فاصله بین صفحات اتصال در فرایند جوش مقاومتی نقطه‌ای بر عمر خستگی اتصالاتی از جنس آلیاژ آلومینیوم 5083-O در مود ترکیبی برشی و کششی است. برای این منظور، اتصالاتی از نوع کششی-برشی با یک نقطه جوش که توسط سه مقدار مختلف نیروی الکتروود ایجاد شده، مد نظر قرار خواهد گرفت. در مورد اتصالات نقطه جوش، رشد ترک خستگی را می‌توان با استفاده از مقادیر ضریب شدت تنش در مودهای اول و دوم شکست که در دست است، تعمیم داد.

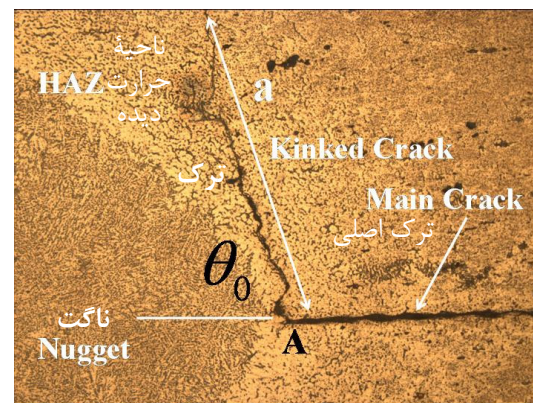
مشخصات ابعادی، نحوه اتصال جوش مقاومتی نقطه‌ای و نیز نحوه بارگذاری نمونه‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است.

ضریب‌های شدت تنش توسط ژنگ<sup>۴</sup> و راداج<sup>۴</sup> و محققان دیگر در این زمینه ارائه شده است [۷-۱۲].

## ۲- توصیف مسأله

در بیشتر پژوهش‌های قبلی در زمینه ارزیابی عمر خستگی اتصالات نقطه جوش به روش‌های مکانیک شکست یا روش‌های سنتی خستگی، ترک‌های خستگی یا فقط در مود کششی (مود I شکست) در راستای ضخامت صفحات اتصال یا فقط در راستای فصل مشترک دو صفحه به صورت مود برشی (مود II شکست) در نظر گرفته شده‌اند.

در این پژوهش، با توجه به اینکه ترک‌های خستگی در اتصالات نقطه جوش که از ریشه ناگت آغاز می‌شوند، در راستای مود ترکیبی کششی و برشی انتشار می‌یابند، اثر قطر نقطه جوش و فاصله بین صفحات اتصال در اتصال نقطه جوش در مود ترکیبی کششی و برشی بر عمر خستگی اتصال، به صورت عددی و تجربی مطالعه خواهد شد. شکل ۱ این واقعیت را که انتشار ترک خستگی در اتصال نقطه جوش در مود ترکیبی I و II شکست اتفاق می‌افتد، نشان می‌دهد.



شکل ۱ نحوه انتشار ترک خستگی در ریشه نقطه جوش

1. Walker

3. Zhang  
4. Radaj

ضریب شدت تنش معادل در مود I،  $K_{Ieq}$  به صورت زیر تعریف می شود:

$$K_{Ieq} = \sqrt{K_I^2 + \beta K_{II}^2} \quad (1)$$

در این رابطه  $\beta$  ثابت نشان دهنده تداخل بین  $K_I$  و  $K_{II}$  است.

$K_{Ieq}$  را می توان برحسب عمر خستگی اتصالات نقطه جوش مورد نظر به عنوان یک روش تخمین عمر، ترسیم کرد. از این روش به ویژه در حالتی استفاده می شود که بخواهیم تخمین عمر را برای شرایط بارگذاری و هندسه های مختلف نقطه جوش ها در نظر بگیریم.

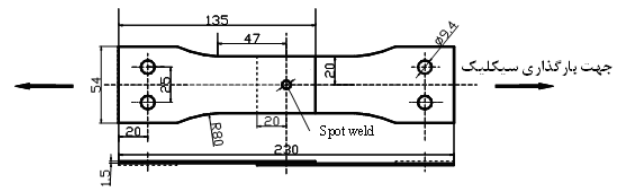
در این تحقیق از روابط ضریب های شدت تنش برای هندسه های اتصال نقطه جوش کششی-برشی سه بعدی که به روش های عددی محاسبه و توسط پوک<sup>۸</sup> ارائه شده استفاده شده است [۸]. با توجه به اینکه اتصالات نقطه جوش کششی-برشی همیشه از یک محل تحت شکست خستگی قرار می گیرند، لذا ضریب های شدت تنش فقط در محل شکست (نقطه A از شکل ۱) معرفی می شوند. در این نقطه، فقط مودهای اول و دوم شکست به وجود می آیند، که مقادیر آنها از روابط زیر به دست می آیند:

$$K_I = \frac{P}{r^{3/2}} [0.341 (\frac{2r}{t})^{0.397}] \quad (2)$$

$$K_{II} = \frac{P}{r^{3/2}} [0.282 + 0.162 (\frac{2r}{t})^{0.710}] \quad (3)$$

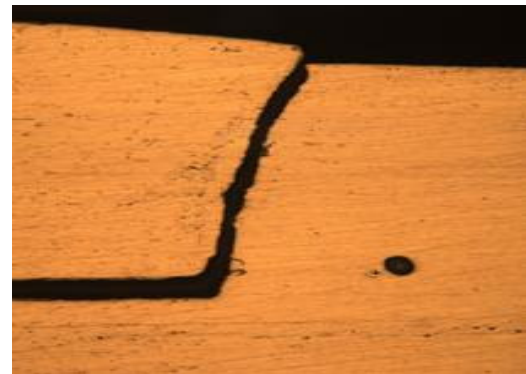
$r$  شعاع جوش،  $t$  ضخامت صفحات اتصال و  $P$  نیروی اعمال شده به اتصال نقطه جوش در جهت بارگذاری سیکلی مطابق شکل ۳ است.

فرض می شود که ترک در اتصال نقطه جوش در محل شکست را بتوان توسط یک ترک صفحه ای مدل سازی کرد. این تخمین برای مقادیر کوچک  $t/r$  معتبر است. اگر  $\theta_0$  در طی

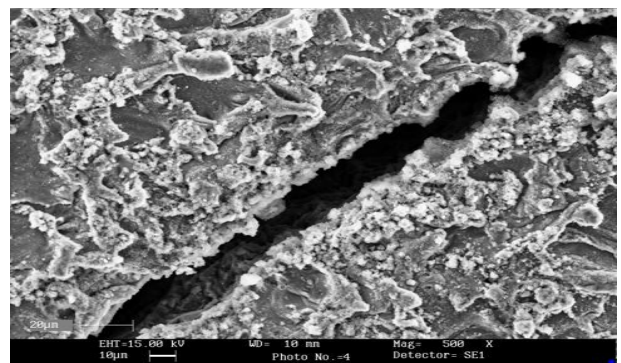


شکل ۳ هندسه، نحوه اتصال جوش مقاومتی نقطه ای و نیز نحوه بارگذاری نمونه ها

به دلیل تقارن، ترک خستگی می تواند از هر یک از سمت های صفحات اتصال شروع شده و رشد کند، اما نتایج تجربی نشان داده که شکست تقریباً همیشه از ترک بزرگی که از یکی از صفحات شروع می شود، اتفاق می افتد. شکل های ۴ و ۵ محل شکل گیری ترک خستگی و نحوه رشد و انتشار آن را در راستای ضخامت صفحات اتصال که به ترتیب توسط میکروسکوپ های نوری و الکترونی گرفته شده نشان می دهد.



شکل ۴ محل شکل گیری ترک خستگی و نحوه رشد و انتشار آن در راستای ضخامت صفحات اتصال



شکل ۵ عکس (SEM) ترک انتشار یافته در ریشه نقطه جوش

مقاومت ناچ با استفاده از مشخصات مکانیکی ماده و تحلیل اجزای محدود به دست می آید. با محاسبه ضریب کاهش مقاومت ناچ و با استفاده از منحنی مرجع، منحنی خستگی نمونه ناچ دار به دست می آید. در این روش، ضریب کاهش مقاومت ناچ و گرادیان تنش نسبی از روابط ۷ و ۸ محاسبه می شود [۱۴]:

$$k_f = \frac{1}{x_{eff} \sigma_n} \int_0^{x_{eff}} \sigma_{yy}(x)(1-x\chi)dx \quad (7)$$

$$\chi = \frac{1}{\sigma_{yy}(x)} \frac{d\sigma_{yy}(x)}{dx} \quad (8)$$

فاصله مؤثر فرایند خستگی،  $\sigma(x)$  تنش ایجاد کننده ترک خستگی،  $X$  گرادیان تنش الاستو-پلاستیک در راستای مسیر پیش‌بینی شده ترک خستگی و  $\sigma_n$  تنش خالص است. در رابطه (۷) فاصله مؤثر فرایند خستگی، همان فاصله مکان وقوع ترک از نوک ناچ است.

### ۳- آزمون‌های تجربی

ماده مورد استفاده در این پژوهش صفحاتی از جنس آلیاژ آلومینیم 5083-O با ضخامت ۱/۵mm است که ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی آن در جداول ۱ و ۲ ارائه شده.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیم 5083-O (درصد وزنی)

Cu	Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
۰/۱	۰/۴	۰/۴	۰/۴-۱	۴-۴/۹	۰/۲۵	۰/۱۵	Bal

جدول ۲ ویژگی‌های مکانیکی آلایژ آلومینیم 5083-O

نسبت پواسون	ازدیاد طول	استحکام نهایی (MPa)	تنش تسلیم (MPa)	مدول یانگ (GPa)
۰/۳۳	٪۲۲	۲۹۰	۱۴۵	۷۰

فرایند خستگی ثابت بماند، می‌توان ضریب شدت تنش را ثابت در نظر گرفت. این واقعیت با مشاهده تجربی ترک خستگی و ثابت ماندن تقریبی امتداد آن در سطح مقطع شکست (شکل ۱) همخوانی دارد. ضریب شدت تنش مؤثر مود  $I$  از رابطه زیر به دست می آید [۸]:

$$\Delta K = \frac{\Delta K_I}{\epsilon} \left[ 3 \cos \frac{\theta}{2} + \cos \frac{3\theta}{2} \right] - \frac{\Delta K_{II}}{\epsilon} \left[ 3 \sin \frac{\theta}{2} + 3 \sin \frac{3\theta}{2} \right] \quad (4)$$

اگر از رابطه واکر برای تخمین عمر خستگی اتصال نقطه جوش استفاده کنیم، داریم:

$$\frac{da}{dN} = C \left[ \frac{\Delta K}{(1-R)^{(1-\gamma)}} \right]^m \quad (5)$$

در حالت رشد ترک خستگی ثابت، از رابطه واکر می‌توان برای تعیین عمر انتشار ترک خستگی انتگرالگیری کرد:

$$N_f = \frac{t}{C \sin \theta_0} \left[ \frac{\Delta K}{(1-R)^{(1-\gamma)}} \right]^{-m} \quad (6)$$

نمودار تغییر  $da/dN$  برحسب تغییر  $\Delta K$  برای آلیاژ آلومینیم 5083-O در شکل ۶ نشان داده شده است [۱۳]. با استفاده از شکل ۶ برای نسبت بار ۰/۳۳، ثوابت رابطه واکر به دست می آید که در زیر داده شده‌اند:

$$m = 3.6 \quad \text{و} \quad \gamma = 0.65$$

$$C = 1.51 \times 10^{-8} \frac{\text{mm/cycle}}{(\text{MPa}\sqrt{m})^{m_1}}$$

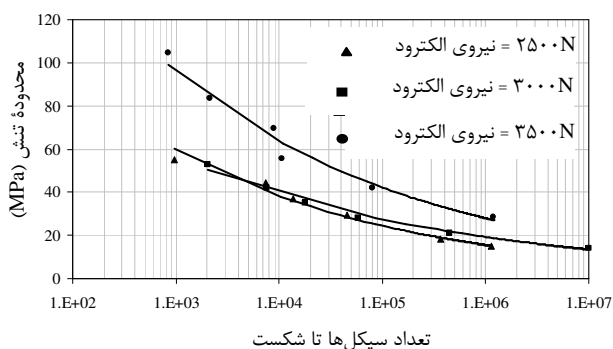
با این که مقاومت خستگی به‌طور قابل ملاحظه‌ای توسط ضریب تمرکز تنش الاستیک کاهش می‌یابد، اما این کاهش معمولاً کمتر از آن است که توسط ضریب تمرکز تنش الاستیک پیش‌بینی می‌شود. به همین دلیل ضریب کاهش مقاومت ناچ  $k_f$  معرفی می‌شود. در روش حجمی، ضریب کاهش

جدول ۳ پارامترهای فرایندی جوش نقطه‌ای برای سه نوع اتصال

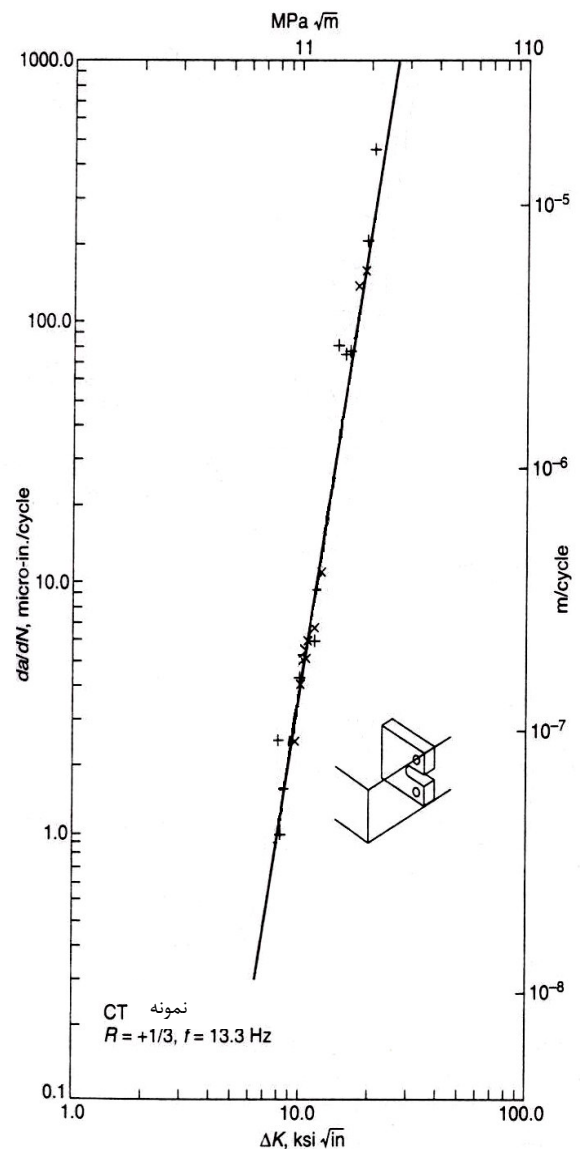
نیروی الکترود (N)	نیروی شکست استاتیکی (kN)	قطر ناگت (mm)	فاصله بین صفحات (mm)
۲۵۰۰	۳/۸	۷/۴۸ ( $۶/۱۰ \sqrt{t}$ )	۰/۰۹
۳۰۰۰	۴/۷	۷/۵۳ ( $۶/۱۴ \sqrt{t}$ )	۰/۱۱
۳۵۰۰	۳/۷	۶/۰۸ ( $۴/۹۶ \sqrt{t}$ )	۰/۱۳

آزمون‌های کشش نمونه‌های اتصال نقطه‌جوش، توسط دستگاه کشش-فشار Minebea انجام شده است. بار شکست استاتیکی هر یک از اتصال‌های یاد شده و قطر نقطه‌جوش و فاصله بین صفحات اتصال در جدول ۳ آورده شده است. آزمون‌های خستگی با کنترل نیرو توسط دستگاه MTS با بارگذاری متناوب، انجام شده و برای پیشگیری از کمناش احتمالی اتصالات، نسبت بار (نسبت نیروی کمینه به بیشینه)،  $R=0/1$  در نظر گرفته شده است. فرکانس بار متناوب در آزمایش خستگی برابر  $10\text{ Hz}$  تنظیم شده است.

نتایج آزمون خستگی برای سه نوع اتصال نقطه جوش مورد نظر در شکل ۷ نشان داده شده است. در این شکل، تنش‌ها از تقسیم نیروی اعمال شده بر سطح مقطع صفحات اتصال به دست آمده است. همچنین که در شکل ۷ دیده می‌شود، با افزایش نیروی الکترود از  $3000\text{ N}$  تا  $3500\text{ N}$ ، علی‌رغم کاهش در قطر نقطه‌جوش، عمر خستگی اتصالات به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. اما افزایش نیروی الکترود از  $2500\text{ N}$  تا  $3000\text{ N}$  تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر افزایش استحکام اتصال نقطه جوش نداشته است.



شکل ۷ نتایج آزمون خستگی برای سه نوع اتصال مورد نظر



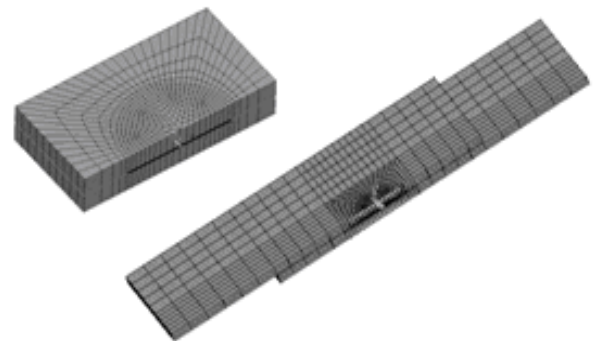
شکل ۶ تغییر  $da/dN$  به‌ازای تغییر  $\Delta K$  برای آلیاژ آلومینیم 5083-O [۱۳]

سه نوع اتصال نقطه‌جوش کششی-برشی با سه مقدار مختلف نیروی فشاری الکترود ( $2500\text{ N}$  و  $3000\text{ N}$  و  $3500\text{ N}$ ) به‌دست آمده که متناظر با هر یک از نیروهای الکترود، یک اتصال نقطه‌جوش با فاصله‌ای مشخص بین صفحات آن ایجاد شده است. جزئیات پارامترهای فرایندی جوش مقاومتی نقطه‌ای و سایر مشخصات جوش در جدول ۳ ارائه شده است.



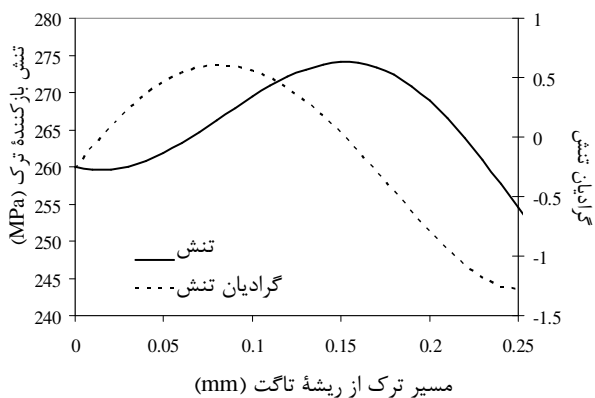
#### ۴- تحلیل اجزای محدود

برای تعیین عمر خستگی و نیز مقادیر ضریب کاهش استحکام خستگی، سه نوع اتصال مختلف نقطه جوش - که اندازه فاصله بین صفحات آنها در جدول ۳ آورده شده - توسط نرم افزار اجزای محدود ANSYS مدل سازی شد. از المان هشت گرهی برای تحلیل های غیرخطی تنش استفاده شد و مقادیر تنش و کرنش در نزدیکی ریشه ناگت های جوش به دست آمد. شکل ۸ مدل اجزای محدود مش بندی شده برای اتصال نقطه جوش را که به دلیل تقارن فقط نصف آن مدل سازی شده نشان می دهد.



شکل ۸ مدل اجزای محدود برای اتصال نقطه جوش

ضرایب کاهش مقاومت ناچ در تمامی سطوح بار اعمال شده با استفاده از نتایج اجزای محدود و کاربرد روابط ۷ و ۸، به روش حجمی به دست آمد. همچنان که در شکل ۹ دیده می شود، بیشینه تنش درست در ریشه نقطه جوش اتفاق نیافتاده که این در مقایسه با نتایج مورفولوژی ترک، نشان دهنده درستی تحلیل اجزای محدود در مورد موقعیت نقطه آغاز ترک خستگی است. داده های مربوط به اعمال بار، تنش های خالص و ضریب کاهش مقاومت ناچ برای نمونه های مختلف اتصال نقطه جوش - که دارای فواصل مختلف بین صفحات اتصالشان هستند - در جدول ۴ ارائه شده است.

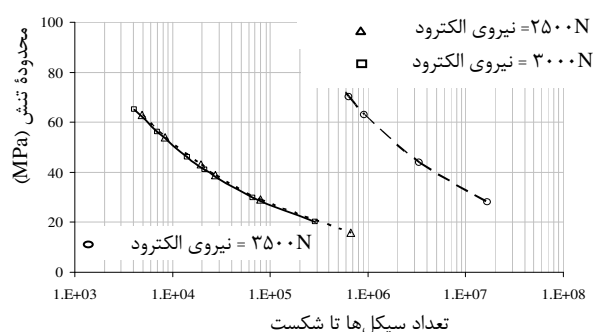


شکل ۹ توزیع تنش بازکننده ترک و گرادینان تنش الاستو-پلاستیک برای ۵۰٪ بار شکست استاتیکی (۱/۱۱=۰ فاصله بین صفحات)

شکل ۱۰ نمودار محدوده تنش را برحسب تعداد تناوب های خستگی اتصالات نقطه جوش - که با استفاده از روش حجمی به دست آمده - نشان می دهد. همچنان که در این شکل دیده می شود، مقادیر کوچکتر فاصله بین صفحات باعث کاهش عمر خستگی اتصالات نقطه جوش می شوند، زیرا فاصله کم بین صفحات می تواند به عنوان ترک نوک تیز عمل کرده و بنابراین می تواند باعث افزایش تنش در ریشه نقطه جوش - به دلیل وجود تمرکز تنش بالاتر - شود. هنگامی که فاصله بین صفحات افزایش می یابد، مقادیر تنش ها به دلیل اثر خمش بر اتصالات نوع کششی - برشی کمی افزایش می یابد، اما در عوض مقادیر ضریب تمرکز تنش و ضریب کاهش مقاومت ناچ به طور قابل ملاحظه ای کاهش یافته و بنابراین

تحلیل های غیرخطی تنش برای بارگذاری در محدوده ۳۰٪ تا ۸۰٪ بار شکست استاتیکی به عنوان شرایط مرزی به مدل های اجزای محدود ایجاد شده اعمال شده و مقادیر تنش میانگین معادل و محدوده کرنش در طول یک سیکل کامل بارگذاری و باربرداری به دست آمده است. برای به دست آوردن مقادیر ضرایب کاهش مقاومت ناچ، توزیع های تنش الاستیک - پلاستیک و گرادینان تنش در طول مسیر ترک که از ریشه نقطه جوش آغاز شده و در راستای ضخامت صفحات امتداد می یابند، به دست آمده است. به عنوان مثال، شکل ۹ توزیع تنش بازکننده ترک و نیز گرادینان تنش الاستوپلاستیک را در طول مسیر ترک - که از ریشه ناگت آغاز شده و در راستای ضخامت صفحه اتصال امتداد می یابد - برای اعمال ۵۰٪ بار شکست استاتیکی برای نمونه نقطه جوش با فاصله ۱۱mm/۱ بین صفحات اتصال نشان می دهد. بدین ترتیب، تمامی مقادیر

شکل ۱۱ منحنی محدوده تنش برحسب تعداد سیکل‌های انتشار ترک را- که از روش تخمین عمر رشد ترک خستگی به دست آمده- نشان می‌دهد.

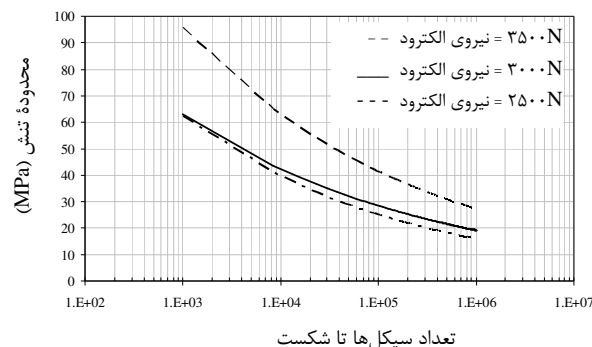


شکل ۱۱ منحنی تغییر محدوده تنش برحسب تعداد سیکل‌های انتشار ترک خستگی

جدول ۴ مقادیر تنش خالص و ضرایب کاهش مقاومت ناچ برای اتصالات نقطه جوش مورد نظر

نیروی الکتروود = ۲۵۰۰N		نیروی الکتروود = ۳۰۰۰N		نیروی الکتروود = ۳۵۰۰N	
تنش خالص (MPa)	$K_f$	تنش خالص (MPa)	$K_f$	تنش خالص (MPa)	$K_f$
۱۶	۱۵/۵	۲۰	۱۲/۶	۲۸	۸/۹
۲۹	۱۳/۳	۳۰	۱۲/۵	۴۴	۸/۶
۳۹	۱۳/۱	۴۱	۱۱/۷	۶۳	۷/۶
۴۳	۱۱/۶	۴۶	۱۰/۸	۷۰	۷/۱
۵۴	۱۰/۷	۵۶	۱۰/۳	۸۵	۶/۸
۶۳	۱۰	۶۵	۹/۷	۹۵	۶/۶

باعث افزایش عمر خستگی اتصالات می‌شوند. شکل ۱۰ همچنین تطابق خوبی را با نمودار S-N در شکل ۷ نشان می‌دهد.



شکل ۱۰ منحنی تخمین عمر خستگی اتصالات نقطه جوش مورد نظر برحسب محدوده تنش به روش حجمی

## ۵- نتایج حاصل از روش رشد ترک خستگی

برای به دست آوردن محدوده تغییر ضریب شدت تنش در مودهای اول و دوم شکست و همچنین تخمین عمر انتشار ترک خستگی از روابط ۴ و ۶ استفاده می‌شود. محدوده تغییر ضریب شدت تنش در مودهای اول و دوم شکست برای بارگذاری‌های اعمال شده بر اتصالات نقطه جوش مورد نظر در نسبت بار ۰/۱ در جدول ۵ خلاصه شده است. عمر انتشار ترک خستگی سه نوع اتصال نقطه جوش مورد نظر با استفاده از روش رشد ترک خستگی و نیز با توجه به اینکه هر دو مود اول و دوم شکست به صورت ترکیبی در انتشار آن نقش دارند، به دست می‌آید.

جدول ۵ محدوده تغییر ضریب شدت تنش در مودهای اول و دوم شکست اتصالات نقطه جوش مورد نظر در نسبت بار ۰/۱

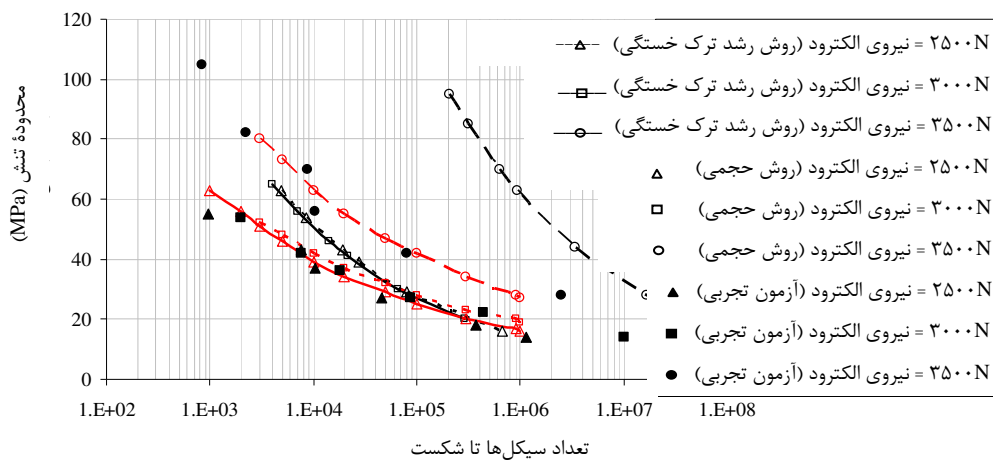
نیروی الکتروود = ۲۵۰۰N (فاصله بین صفحات = ۰/۰۹mm)			نیروی الکتروود = ۳۰۰۰N (فاصله بین صفحات = ۰/۱mm)			نیروی الکتروود = ۳۵۰۰N (فاصله بین صفحات = ۰/۱۳mm)		
$P_{max}$ (N)	$\Delta K_I$ (MPa $\sqrt{m}$ )	$\Delta K_{II}$ (MPa $\sqrt{m}$ )	$P_{max}$ (N)	$\Delta K_I$ (MPa $\sqrt{m}$ )	$\Delta K_{II}$ (MPa $\sqrt{m}$ )	$P_{max}$ (N)	$\Delta K_I$ (MPa $\sqrt{m}$ )	$\Delta K_{II}$ (MPa $\sqrt{m}$ )
۷۰۲	۱/۸۱	۲/۱۸	۸۹۰	۲/۲۴	۲/۷۳	۸۱۲	۵/۳۸	۳/۱۲
۱۲۵۱	۳/۱۷	۳/۸۸	۱۳۳۵	۳/۳۶	۴/۱۰	۱۲۷۶	۸/۴۶	۴/۹۰
۱۶۸۳	۴/۲۶	۵/۲۲	۱۸۲۵	۴/۶۰	۵/۶۱	۱۸۲۷	۱۲/۱۲	۷/۰۲
۱۸۵۵	۴/۷۰	۵/۷۵	۲۰۴۷	۵/۱۶	۶/۲۹	۲۰۳۰	۱۳/۴۷	۷/۸۰
۲۳۳۰	۵/۹۰	۷/۲۳	۲۴۹۲	۶/۲۸	۷/۶۶	۲۴۶۵	۱۶/۳۵	۹/۴۷
۲۷۱۹	۶/۸۹	۸/۴۳	۲۸۹۲	۷/۲۸	۸/۸۹	۲۷۵۵	۱۸/۲۸	۱۰/۵۹



رشد ترک خستگی با در نظر گرفتن مودهای اول و دوم شکست، نشان می‌دهد که اتصالاتی که قطر نقطه جوش بزرگتری دارند و با نیروی الکتروود کمتری ایجاد شده‌اند، ضریب شدت تنش کوچکتری نسبت به اتصالاتی دارند که قطر نقطه جوش آنها کوچکتر است. اما با توجه به رشد ترک خستگی در مود ترکیبی شکست، نسبت مقادیر ضریب شدت تنش مود اول به مود دوم و نیز اندازه قطر نقطه جوش‌ها نیز اهمیت زیادی می‌یابد.

به منظور ارزیابی و مقایسه بهتر نتایج تخمین عمر با داده‌های تجربی، شکل‌های ۷، ۱۰ و ۱۱ به صورت یک جا در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

همچنان که در شکل ۱۲ دیده می‌شود، نتایج حاصل از تخمین به روش حجمی همخوانی بهتری با داده‌های تجربی، نسبت به روش رشد ترک خستگی دارند. زیرا روش رشد ترک خستگی که در این مقاله بررسی شده، بر تحلیل دو بعدی ترک خستگی استوار بوده است. نتایج حاصل از روش



شکل ۱۲ مقایسه روش‌های تخمین عمر خستگی و داده‌های آزمون تجربی خستگی

نتایجی که از آزمون‌های تجربی خستگی به دست آمده، نشان می‌دهد که اتصالاتی که با نیروی الکتروود بزرگتری ایجاد شده، استحکام خستگی بالاتری دارند. تخمین‌های عددی مورد استفاده در این پژوهش، این را به روشنی نشان می‌دهند. نتایج حاصل از روش رشد ترک خستگی با در نظر گرفتن مودهای اول و دوم شکست، نشان می‌دهد که اتصالاتی که قطر نقطه جوش بزرگتری دارند و با نیروی الکتروود کمتری ایجاد شده‌اند، ضریب شدت تنش کوچکتری نسبت به اتصالاتی دارند که قطر نقطه جوش آنها کوچکتر است. اما با توجه به رشد ترک خستگی در مود ترکیبی شکست، نسبت ضریب شدت تنش مود اول به مود دوم و نیز اندازه قطر نقطه جوش‌ها اهمیت زیادی می‌یابد.

## ۶- بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش نشان داده شد که اثر فاصله بین صفحات اتصال تأثیر بسیار مهمی بر عملکرد خستگی اتصالات نقطه جوش دارد. وجود ناچ با شعاع بزرگ در ریشه نقطه جوش - که توسط نیروی الکتروود بزرگتری ایجاد شده - مهمترین دلیل برای عمر خستگی بیشتر برای اتصال است. همچنین، اثر تمرکز تنش در ریشه نقطه جوش تأثیر مهمی بر ارزیابی عمر خستگی اتصالات نقطه جوش - هم در ناحیه خستگی کم تناوب و هم در ناحیه خستگی پر تناوب - دارد. نتایج به دست آمده از روش حجمی با داده‌های تجربی خستگی، مقایسه شده و همخوانی نسبتاً خوبی بین تخمین عددی و نتایج تست تجربی دیده شده است.

- [7] Pan N., and Sheppard S.D.; "Stress intensity factors in spot welds" *Engineering Fracture Mechanics*, 70, 2003, pp671-684.
- [8] Newman J.A., and Dowling N.E.; "A crack growth approach to life prediction of spot-welded lap joints" *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 21, 1998, pp1123-1132.
- [9] Zhang S.; "Stress intensities at spot welds" *International Journal of Fracture*, 88, 1997, pp167-185.
- [10] Radaj D., and Sonsino C.M., *Fatigue Assessment of Welded Joints by Local Approaches*, Woodhead Publishing Ltd, 1998.
- [11] Bang H.S., Bang H.S., Joo S.M., Kim J.M., and Chang W.S.; "Mechanical characteristic of resistance multi spot welded joints" *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 8, No. 5, 2003.
- [12] Wang D.A., Lin S.H., and Pan J.; "Stress intensity factors for spot welds and associated kinked cracks in cup specimens" *International Journal of Fatigue* 27, 2005, pp581-598.
- [13] Maurice L.S., Glenn E.N., and Craig C.M., *Fatigue Design of Aluminum Components & Structures*, McGraw-Hill, 1996.
- [14] Pluvinage G., Application of notch fracture mechanics to fracture emanating from stress concentrators. In: *Advances in Computational Engineering Congress of Computational Engineering Sciences*; 1997.

## ۷- تشکر و قدردانی

این مقاله از گزارش نهایی طرح پژوهشی با عنوان "بررسی اثر مود ترکیبی شکست در اتصالات نقطه‌جوش روی استحکام خستگی اتصال" از محل اعتبارات پژوهشی دانشگاه تبریز استخراج شده است.

## ۸- منابع

- [1] Linder J., and Larsson M.; "Fatigue design of spot and plug welded stainless steel" *Swedish institute for metals research*, 2002.
- [2] Ni K., and Mahadevan S.; "Strain-based probabilistic fatigue life prediction of spot welded joints" *International Journal of Fatigue*, 26, 2004, pp763-772.
- [3] Carboni M., and Moroni F.; "Tensile-shear fatigue behavior of aluminum and magnesium lap-joints obtained by ultrasonic welding and adhesive bonding" *Procedia Engineering*, 10, 2011, pp3561-3566.
- [4] Kang H.T., Accorsi I., Patel B., and Pakalnins E.; "Fatigue performance of resistance spot welds in three sheet stack-ups" *Procedia Engineering*, 2, 2010, pp129-138.
- [۵] نراقیان الف. و میرزایی م.، "تحلیل تنش و تخمین عمر خستگی در اتصالات جوش نقطه‌ای" *مجله فنی و مهندسی مدرس*، شماره ۳۲، تابستان ۱۳۸۷.
- [6] Mirsalehi S.E., and Kokabi A.H.; "Fatigue life estimation of spot welds using a crack propagation-based method with consideration of residual stresses effect" *Materials Science and Engineering*, A527, 2010, pp6359-6363.