

# تأثير فاصله‌ی بين صفحات بر روى عمر خستگى اتصالات نقطه‌جوش آلياژ آلومينيوم 5083-O

سوران حسنى فرد\*، محمد زهساز و فيروز اسماعيلى گلدرق  
دانشكده فنى مهندسى مكانيك، دانشگاه تبريز

(دریافت مقاله: ۱۳۹۰/۱۰/۱۹ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۱/۰۳/۲۴)

5083-O

چکیده -

5083-O

واژگان کلیدی :

## Effect of Sheet Spacing on Fatigue Life of 5083-O Aluminium Alloy Spot-Welded Joints

S. Hassanifard, M. Zehsaz and F.E. Goldarag

Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

**Abstract:** *The main goal of this investigation was to study the influence of sheet spacing on the fatigue life of 5083-O aluminium alloy spot-welded joints. The values of notch strength reduction factors were obtained for all kinds of spot-welded joints with different gap distances between sheets based on volumetric approach. The fatigue lives of spot welded joints were then determined using the notch strength reduction factors and the available smooth S-N curve of 5083-O aluminium alloy sheets. The results were compared with the experimental fatigue test data, showing a very good agreement between numerical predictions and experimental results.*

**Keywords:** *Spot welded joint, Fatigue life, Sheet spacing, Volumetric approach, Notch strength reduction factor, Stress gradient*

\* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: hasanifard@tabrizu.ac.ir

از نقطه جوش به طور گسترده برای اتصال فلزات زمانی که ضخامت صفحات اتصالی حداکثر تا حدود چهار میلی متر باشد، استفاده می شود. یکی از مثال های متداول کاربرد نقطه-جوش، اتصال صفحات فلزی در صنایع خودروسازی است که در آن برای مونتاژ بدنه یک خودرو حدود ۳۰۰۰ تا ۵۰۰۰ نقطه جوش استفاده می شود [۱].

از بین معیارهای مختلف طراحی مانند تسلیم شدن، کماتش، خستگی، خزش و خوردگی، پدیده خستگی مهم ترین و متداول ترین عامل شکست و گسیختگی است که باید با طراحی مناسب از آن اجتناب شود. علی رغم چاپ چندین مقاله مختلف در رابطه با عمر خستگی نقطه جوش [۲-۷]، به نظر می رسد به دلیل وجود پارامترهای پیچیده و گاهی ناشناخته مکانیکی و متالورژیکی، درک بهتر رفتار اتصالات که در معرض بارهای تکرار شونده قرار دارند، مستلزم تلاش های بیشتری است.

روش های متداول برای پیش بینی عمر خستگی اتصالات نقطه جوش را می توان به روش های عمر-تنش [۸-۱۱]، عمر- کرنش [۱۲-۱۴]، روش های مکانیک شکست و رشد ترک خستگی [۱۵-۱۸] دسته بندی کرد. مستقیم ترین و ساده ترین روش برای تعیین عمر خستگی، روش تحلیل عمر-بار است [۱۹]. اشکال این روش در آن است که برای تمام پارامترهای هندسی و مادی نقطه جوش، وجود داده های آزمون تجربی لازم است. پارامترهای هندسی شامل ضخامت صفحات و قطر ناگت نقطه جوش است. پارامترهای مادی علاوه بر خواص فلز پایه، خواص ناحیه حرارت دیده<sup>۲</sup> که به عوامل فرایند جوشکاری وابسته است را نیز در بر می گیرد. اما در صورت وجود داده های کافی، این روش منجر به نتایج سودمند، بدون در نظر گرفتن فرض های تحلیل تنش پیچیده می شود.

روش دیگر برای تعیین عمر خستگی اتصالات نقطه-جوش، روش تحلیل سازه ای<sup>۳</sup> است. روش تنش سازه ای بدین صورت است که تعدادی از جنبه های بحرانی حالت تنش در موقعیت شروع ترک اتصال نقطه جوش مشخص

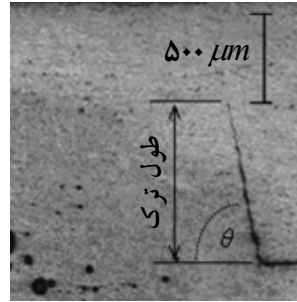
می شود و این حالت تنش بر پارامترهای شکست که به نیروها و گشتاورهای ناگت<sup>۴</sup> و هندسه اتصال که شامل قطر ناگت  $d$  و ضخامت صفحه  $t$  است، مرتبط می شود [۱۹]. این پارامترها معمولاً بر حسب تنش های سازه ای (یا اسمی) که رابطه خطی با نیروهای ناگت دارند، بیان می شوند. این روش بعضی مواقع پارامترهایی را برای در نظر گرفتن مود بارگذاری یا هندسه مسئله نیز در بر می گیرد. مشخصه ای که این روش را از روش های دیگر متمایز می سازد، جزئیات خاص آن برای چگونگی تعیین تنش ها از روی بارها و هندسه اتصال است.

روش دیگر برای تعیین عمر خستگی اتصالات نقطه جوش، روش رشد ترک خستگی است. در این روش، از یک مدل رشد ترک با به کارگیری رابطه  $d\dot{a}/dN$  و  $\Delta K$  برای پیش بینی عمر خستگی استفاده می شود. ابزار دیگر در به کارگیری روش مکانیک شکست، استفاده از فاکتور شدت تنش برای مشخص کردن بارگذاری است. فاکتور شدت تنش برای مدل تک لبه برشی محاسبه شده و هر دو مود اصلی شکست خستگی یعنی مود I و II در موقعیت شکست نقطه-جوش ها مشاهده می شود. روش شدت تنش برای اولین بار توسط پوک پیشنهاد شد که در آن مقاومت خستگی نقطه-جوش ها به صورت برشی-کششی بر حسب فاکتور شدت تنش در نقطه جوش مورد بررسی قرار گرفت [۲۰].

در روش عمر-کرنش لبه های نقطه جوش ها، جایی که ترک خستگی در آن اتفاق می افتد، به عنوان فاق هندسی با شعاع فاق مربوطه در ریشه در نظر گرفته می شود. در این روش، کرنش ها در یک یا چند نقطه خاص که معمولاً بر روی سطح بیرونی در نزدیکی لبه نقطه جوش قرار دارند، به عنوان مقادیر مرجع استفاده می شوند [۱۵]. رابطه ی بین  $N_i$  (عمر آغاز ترک خستگی) و دامنه کرنش الاستیک  $\Delta \epsilon_e / 2$  به صورت زیر است:

$$\frac{\Delta \epsilon_e}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_i)^b \quad (1)$$

شده، فاکتور کاهش مقاومت خستگی و شعاع فاق تأثیرات بسیار مهمی بر روی عمر خستگی اتصالات نقطه جوش دارند و نیازمند مطالعه بیشترند. آقای ادیب و همکارانش [۲۳] تخمین عمر خستگی اتصالات نقطه جوش را برای هندسه‌های مختلف، با در نظر گرفتن شکاف بین صفحات اتصالی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به منظور به دست آوردن تنش‌های مؤثر، فاصله مؤثر و فاکتور کاهش مقاومت فاق، توزیع تنش را در امتداد خط گسترش ترک که از نقطه حساس به شروع ترک در امتداد ضخامت و عمود بر جهت بارگذاری بود، رسم کردند. اما نتایج مورفولوژی رشد ترک در اتصالات برشی-کششی نقطه جوش نشان داده است که رشد ترک دقیقاً عمود بر امتداد بارگذاری انجام نمی‌گیرد، و زاویه ۷۵ درجه با امتداد بارگذاری می‌سازد [۲۴]. یک نمونه از رشد ترک خستگی در اتصال برشی-کششی نقطه جوش در شکل (۱) نشان داده شده است. شعاع فاق یا فاصله صفحات یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر عمر خستگی، به خصوص برای اتصال با یک نقطه-جوش است [۲۳ و ۲۴]. مقادیر مختلف فاصله بین صفحات باعث ایجاد توزیع تنش متفاوت در مجاورت ریشه نقطه-جوش شده، در نتیجه عمر خستگی اتصالات نقطه جوش را تغییر می‌دهد. اگرچه فاصله زیاد بین صفحات باعث افزایش مقدار تنش در ریشه فاق به علت تأثیر خمشی می‌شود، ولی همان‌طور که در این تحقیق نشان داده خواهد شد، این امر باعث کاهش تنش میانگین و محدوده کرنش در طی یک مرحله کامل بارگذاری و باربرداری می‌شود. فواصل زیاد همچنین می‌تواند مقادیر فاکتور کاهش مقاومت فاق را که یکی از عوامل بسیار مهم در بررسی عمر خستگی اتصالات است را کاهش دهد، در حالی که تنش‌ها به علت افزایش اثر خمشی افزایش می‌یابند. قابل ذکر است که فواصل شکاف بسیار کوچک (در حدود صفر) بین صفحات، مقادیر تنش را به علت ضریب تمرکز تنش بالا، افزایش می‌دهد. در این مورد، شکاف به عنوان یک ترک بسیار تند عمل می‌کند، ولی از اثرات خمشی می‌توان صرف نظر کرد.



شکل ۱- یک نمونه از رشد ترک خستگی در اتصال برشی-کششی نقطه جوش

که در آن  $\sigma'_f$  ضریب خستگی،  $b$  نمای استحکام خستگی و  $E$  مدول الاستیسیته‌اند. رابطه‌ی بین  $N_i$  و دامنه کرنش پلاستیک  $\Delta \epsilon_p / 2$  توسط کوفین و مانسون ارائه شده است [۲۱ و ۲۲]:

$$\frac{\Delta \epsilon_p}{2} = \epsilon'_f (2N_i)^c \quad (۲)$$

که در آن  $\epsilon'_f$  ضریب شکل پذیری خستگی و  $c$  نمای شکل پذیری خستگی‌اند. با ترکیب معادلات (۱) و (۲) معادله منحنی عمر-کرنش به صورت زیر در خواهد آمد:

$$\frac{\Delta \epsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_i)^b + \epsilon'_f (2N_i)^c \quad (۳)$$

در این معادله،  $\Delta \epsilon = \Delta \epsilon_e + \Delta \epsilon_p$  دامنه کرنش کل است. مارو [۱۹] زمانی که تنش میانگین نیز در نظر گرفته شود، معادله زیر را پیشنهاد داد:

$$\frac{\Delta \epsilon}{2} = \frac{\sigma'_f - \sigma_m}{E} (2N_i)^b + \epsilon'_f (2N_i)^c \quad (۴)$$

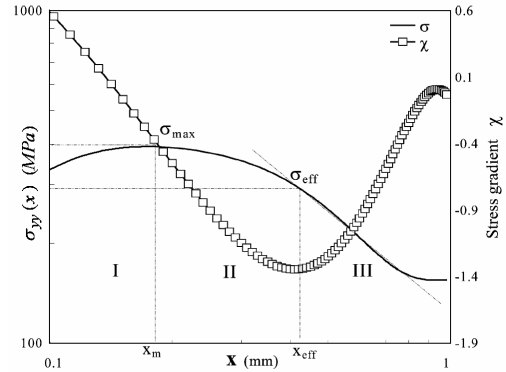
این معادله بیان می‌کند که تأثیر تنش میانگین  $\sigma_m$  را می‌توان با تصحیح قسمت الاستیک منحنی عمر-کرنش، در نظر گرفت. عواملی که عمر خستگی اتصالات نقطه جوش را تحت تأثیر قرار می‌دهند، عبارت‌اند از: ضریب تمرکز تنش، تنش‌های پسماند، ویژگی‌های ماده، پارامترهای فرایند جوشکاری (زمان جوشکاری، جریان الکتریکی و نیروی فشرده‌کننده) و کیفیت جوش (اندازه ناگت جوش، فاصله صفحات، نفوذ، تورفتگی و غیره). از بین عوامل ذکر

فاصله‌ی مؤثر به یک نقطه خاص از توزیع تنش الاستیک-پلاستیک که در نمودار لگاریتمی رسم شده، مربوط می‌شود. تنش مؤثر به یک مقدار میانگین در محدوده‌ی فاصله‌ی مؤثر که در آن اثرات فاصله و گرادیان نسبی تنش به صورت تابع وزنی لحاظ شده مربوط می‌شود. در روش حجمی فاکتور کاهش مقاومت فاق، با اعمال خواص مکانیکی و مشخصات هندسی مربوطه با استفاده از تحلیل اجزای محدود غیرخطی محاسبه می‌شود. محاسبه فاکتور کاهش مقاومت فاق و استفاده از منحنی مرجع<sup>۸</sup> (منحنی خستگی نمونه بدون فاق) منجر به منحنی خستگی نمونه فاقد در نمودار خستگی می‌شود. یک نمونه از توزیع تنش الاستیک-پلاستیک و گرادیان نسبی تنش در نزدیکی فاق در نمودار لگاریتمی شکل (۲) آورده شده است.

توزیع تنش باز کننده ترک<sup>۹</sup> خستگی  $\sigma_{yy}(x)$  در نزدیکی ریشه فاق مقدار ماکزیمم  $\sigma_{max}$  را داشته و با فاصله گرفتن از ریشه فاق کاهش می‌یابد. توزیع تنش در نمودار لگاریتمی سه ناحیه خاص را نشان می‌دهد که هر یک از این نواحی ویژگی‌های خاص خود را دارند که در ادامه توضیح داده می‌شود. مقدار ماکزیمم تنش و فاصله مربوط به آن در ناحیه I قابل تشخیص است. مشخصه مهم این ناحیه وجود ماکزیمم مقدار تنش در توزیع الاستیک-پلاستیک است که از تحلیل اجزای محدود الاستیک-پلاستیک به دست آمده، است. در ناحیه II مقدار تنش کاهش پیدا کرده و در نهایت توزیع تنش به یک مقدار تنش مؤثر  $\sigma_{eff}$  منتهی می‌شود. تنش مؤثر، اولین نقطه ناحیه III است و فاصله مربوط به آن یعنی فاصله‌ی مؤثر برای پیش‌بینی عمر خستگی و ناحیه پلاستیک مؤثر در مجاورت ریشه فاق مورد استفاده قرار می‌گیرد. در روش حجمی ضریب خستگی فاق و گرادیان تنش نسبی از معادله زیر قابل محاسبه است [۲۵]:

$$k_f = \frac{1}{X_{eff} \sigma_n} \int_0^{X_{eff}} \sigma_{yy}(x)(1-x\chi) dx \quad (5)$$

که در آن  $X_{eff}$  فاصله مؤثر،  $\sigma_n$  تنش خالص،  $\sigma_{yy}$  تنش باز کننده ترک و  $\chi$  گرادیان نسبی تنش است که به صورت زیر

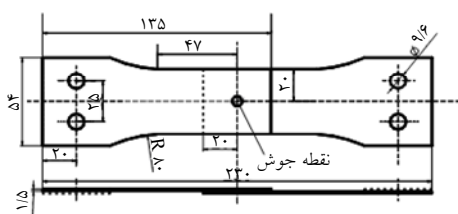


شکل ۲- توزیع تنش الاستیک- پلاستیک و گرادیان تنش نسبی در نمودار لگاریتمی برای ریشه فاق [۲۱].

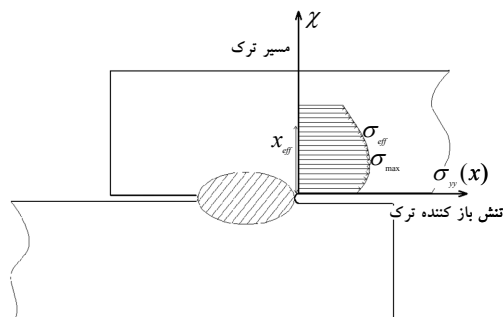
هدف از تحقیق موجود ارائه اطلاعات کامل درباره تأثیر شعاع فاق و در نتیجه اثرات تمرکز تنش بر روی مقاومت خستگی اتصالات نقطه جوش است. بدین منظور، اتصالاتی با مقادیر مختلف شعاع فاق در نظر گرفته شده، و فاکتورهای کاهش مقاومت خستگی تعیین شده است. از روش حجمی برای بررسی عمر خستگی اتصالات استفاده شده است.

## ۲- پیش زمینه‌ی نظریه

مقادیر تنش موضعی فاق‌ها در اثر ضریب تمرکز تنش  $K_t$ ، در مقایسه با تنش‌های میانگین اسمی بزرگترند این افزایش تنش برای شکست خستگی بسیار مضر است، ولی به صورت مستقیم محدوده تنش را در خستگی مشخص نمی‌کند. بنابراین باید کاهش مقاومت خستگی تعریف شود. در این تحقیق، فاکتور کاهش مقاومت خستگی بر مبنای روش حجمی پیشنهاد شده توسط پلاوینیچ [۲۵] تعیین شده است. روش حجمی<sup>۵</sup> روشی برای مطالعه رفتار خستگی در اطراف فاق‌هاست. اساس این روش در این است که شکست خستگی در فاق نیازمند وجود حجم فیزیکی برای به وقوع پیوستن است. این روش به یک معیار پیدایش ترک دو پارامتری، یعنی تنش مؤثر<sup>۶</sup> و فاصله‌ی مؤثر<sup>۷</sup>، منجر می‌شود.



شکل ۴- ابعاد و نمای ظاهری نمونه‌ی اتصال نقطه جوش



شکل ۳- امتداد تنش باز کننده ترک در برابر مسیر ترک

در اتصالات نقطه جوش

$$\sigma = \frac{P}{(w-d)t} \quad (8)$$

که در آن  $P$ ،  $w$ ،  $d$  و  $t$  به ترتیب عبارت‌اند از بار اعمالی، عرض صفحات اتصالی، قطر ناگت و ضخامت صفحات اتصالی.

### ۳- آزمون تجربی

ماده به کار رفته در این تحقیق آلیاژ آلومینیوم 5083-O با ضخامت ۱/۵ میلی‌متر است که خصوصیات مکانیکی و ترکیبات شیمیایی آن در جداول (۱) و (۲) آورده شده است. در این تحقیق سه نمونه اتصال نقطه جوش برشی-کششی با سه مقدار متفاوت نیروی الکتروود تهیه شد. جزییات پارامترهای فرایند و ویژگی‌های جوش مقاومتی نقطه‌ای در جدول (۳) ارائه شده است. ابعاد و نمای ظاهری نمونه اتصال نقطه جوش در شکل (۴) آورده شده است. نتایج آزمون خستگی برای سه نوع مختلف اتصال نقطه جوش در شکل (۵) آورده شده است.

همان‌طور که در شکل (۴) قابل مشاهده است، افزایش نیروی الکتروود از ۳۰۰۰N تا ۳۵۰۰N علی‌رغم کاهش در ناگت جوش، باعث بهبود عمر خستگی اتصالات به‌طور قابل ملاحظه‌ای می‌شود. در حالی افزایش نیروی الکتروود از ۲۵۰۰N تا ۳۰۰۰N تأثیری بر روی عمر خستگی اتصالات ندارد. جزییات بیشتر مربوط به آزمون‌های تجربی در مقاله قبلی حسنی‌فرد و همکارانش موجود است [۲۴].

### ۴- تحلیل اجزای محدود

به منظور به‌دست آوردن فاکتور کاهش مقاومت فاق و

جدول ۱- ترکیبات شیمیایی آلیاژ آلومینیوم 5083-O

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

جدول ۲- خصوصیات مکانیکی آلیاژ آلومینیوم 5083-O

مدول	تنش تسلیم	استحکام نهایی	ازدیاد طول نهایی (%)	نسبت پواسون
۷۰	۱۴۵	۲۹۰	۲۲	۰/۳۳

تعریف می‌شود:

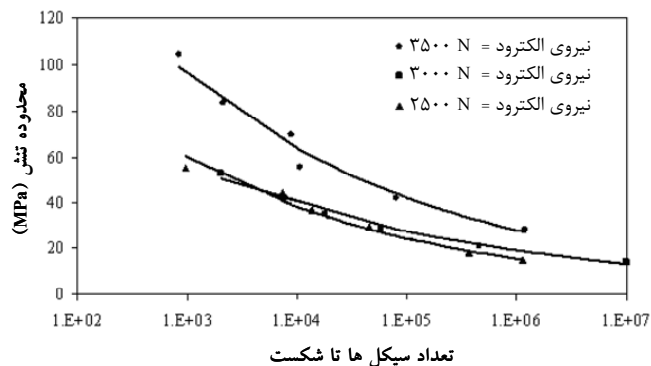
$$\chi = \frac{1}{\sigma(x)} \frac{d\sigma(x)}{dx} \quad (6)$$

شکل (۳) سیستم مختصات مورد استفاده در روش حجمی را نشان می‌دهد بر اساس این روش، مقدار فاکتور کاهش مقاومت فاق از معادله زیر قابل محاسبه است:

$$k_f = \frac{\sigma_{smooth}}{\sigma_{notched}} \quad (7)$$

که در آن  $\sigma_{smooth}$  و  $\sigma_{notched}$  مقادیر تنش اعمالی به ترتیب برای نمونه بدون فاق و فاقدار (اتصالات نقطه‌جوش) هستند. به‌کارگیری معادله (۷) منجر به حصول منحنی عمر خستگی برای اتصالات مورد نظر می‌شود.

تنش خالص به صورت زیر تعریف می‌شود:



شکل ۵- نتایج آزمون خستگی برای سه نوع مختلف اتصال نقطه جوش (فاصله‌ی بین صفحات اتصال به ترتیب برابر با ۰/۱۳ میلی‌متر معادل نیروی الکتروود ۳۵۰۰ نیوتن، ۰/۱۱ میلی‌متر معادل نیروی الکتروود ۳۰۰۰ نیوتن و ۰/۰۹ میلی‌متر معادل نیروی الکتروود ۲۵۰۰ نیوتن)

جدول ۳- جزئیات پارامترهای فرایند جوش مقاومتی نقطه‌ای

نیروی الکتروود (kN)	جریان الکتریکی (kA)	قطر ناگت (mm)	فاصله بین صفحات (mm)
۲/۵	۲۰	۷/۴۸ ( $6/10\sqrt{t}$ )	۰/۰۹
۳	۲۰	۷/۵۳ ( $6/14\sqrt{t}$ )	۰/۱۱
۳/۵	۲۰	۶/۰۸ ( $4/96\sqrt{t}$ )	۰/۱۳

سیکلینگ تنش و کرنش آلیاژ آلومینیوم 5083-O که بر اساس نتایج آزمون خستگی با شرایط کنترل کرنش مطابق استاندارد ASTM E606 در شکل (۷) رسم شده، انجام گرفت. بدیهی است که استفاده از منحنی تنش-کرنش سیکلیک به جای منحنی یکنواخت در تحلیل‌های خستگی نتایج دقیق‌تری به دنبال خواهد داشت. در مقاله حاضر از منحنی تنش-کرنش سیکلیک به منظور استفاده در مدل کرنش سختی سینماتیکی چند خطی<sup>۱۰</sup> برای به دست آوردن توزیع‌های تنش و در نتیجه تخمین عمر خستگی استفاده شده است. مدل شبکه‌بندی شامل یک شعاع فاق محدود در لبه

عمر خستگی اتصالات با سه مقدار مختلف فاصله صفحات که در جدول (۳) آورده شده است، مدل سه‌بعدی اتصالات با استفاده از نرم افزار اجزای محدود ANSYS شبیه‌سازی شد. برای انجام تحلیل غیرخطی به منظور به دست آوردن مقادیر تنش و کرنش در مجاورت ریشه ناگت‌ها از اجزای سازه‌ای هشت گرهی استفاده شد. برای حصول نتایج واقعی و غیر حساس به شبکه‌بندی اجزای محدود، از قابلیت زیر مدل‌سازی استفاده شد. شکل (۶) مدل و زیرمدل اجزای محدود شبکه‌بندی شده را در نماهای مختلف نشان می‌دهد. تحلیل اجزای محدود الاستیک-پلاستیک با استفاده از منحنی

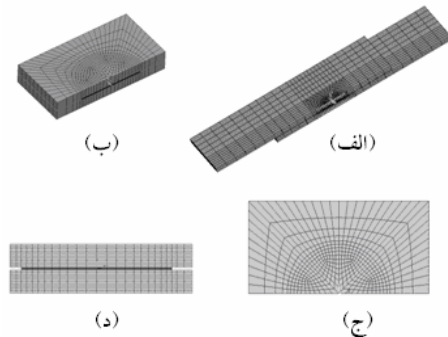
اجزای مجاور ریشه اتصالات نقطه جوش در حدود ۰/۰۲ میلی متر است.

در بررسی شکست خستگی عضوهای فاقدار، باید حجم محدودی از ماده وجود داشته باشد که فرایند شکست خستگی در آن رخ دهد. اندازه این منطقه را می توان با یک بعد که اندازه منطقه فرایند یا فاصله مؤثر نامیده می شود، مشخص کرد. اما در حالت کلی وضعیت کاملاً پیچیده بوده و بصورت کامل قابل درک نیست. این پدیده ذکر شده از چندین روش تجربی ارائه شده، مانند روش حجمی که در این تحقیق به کار برده شده، حاصل شده است.

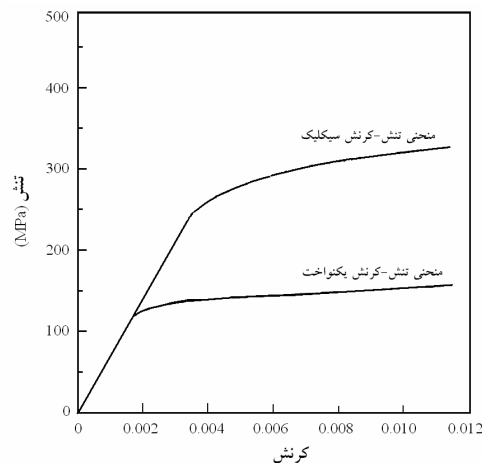
تحلیل الاستیک-پلاستیک برای بارهای مختلف در محدوده ۳۰ الی ۴۰٪ بار شکست استاتیکی که به مدل ها اعمال شده، انجام گرفت. و مقادیر مربوط به تنش میانگین معادل و محدوده کرنش با نسبت تنش ۰/۱ برای یک سیکل کامل بارگذاری و باربرداری به دست آمد. تعاریف مربوط به تنش میانگین و محدوده کرنش بدین صورت است که:  $\sigma_m = (\sigma_{max} + \sigma_{min})/2$  و  $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{max} - \varepsilon_{min}$  که در آن به ترتیب  $\sigma_{max}$  و  $\varepsilon_{max}$  مقادیر حداکثر تنش و کرنش معادل در ریشه فاق بعد از بارگذاری، و  $\sigma_{min}$  و  $\varepsilon_{min}$  مقادیر حداقل تنش و کرنش بعد از باربرداری اند. به علاوه توزیع تنش الاستیک-پلاستیک و گرادیان نسبی تنش در امتداد مسیر ترک از ریشه ناگت ها استخراج شد.

## ۵- نتایج و بحث

شکل (۸) توزیع تنش الاستیک-پلاستیک و گرادیان نسبی تنش در امتداد مسیر ترک از ریشه ناگت ها را به ازای بار اعمالی به مقدار ۵۰٪ بار شکست استاتیکی، برای نمونه های نقطه جوش با فاصله های متفاوت بین صفحات نشان می دهد. مقادیر مربوط به فاکتور کاهش مقاومت فاق برای محدوده های مختلف بار اعمالی، بر مبنای روش حجمی تعیین شده است. همان طور که در شکل (۸) مشخص است، مقدار حداکثر تنش در ریشه ناگت ها اتفاق نمی افتد.

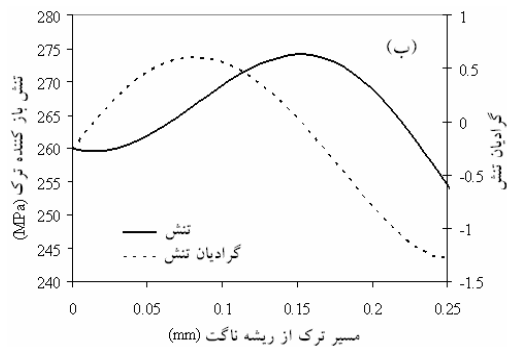
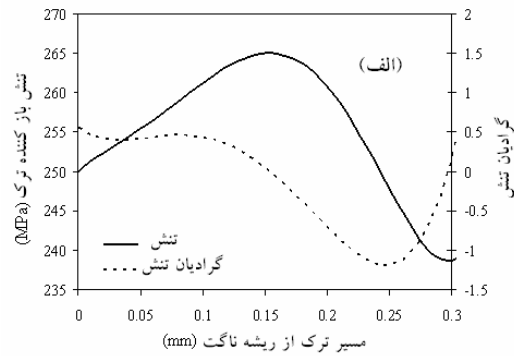


شکل ۶- مدل و زیرمدل اجزای محدود شبکه بندی شده اتصال در نماهای مختلف



شکل ۷- منحنی تنش-کرنش یکنواخت و سیکلی برای آلیاژ آلومینیوم 5083-O

ناگت جوش است. مطابق شعاع های مشاهده شده در نمونه های مقطع زده شده، شعاع های ۰/۰۴۵، ۰/۰۵۵ و ۰/۰۶۵ میلیمتر مدل سازی شد. با توجه به تقارن مسئله فقط از نصف مدل اتصالات در تحلیل ها استفاده شد. برای به دست آوردن نتایج دقیق تر و با توجه به اینکه مقادیر تنش های حداکثر دقیقاً در ریشه ناگت ها اتفاق نمی افتد، بلکه در فاصله بسیار کمی از ناگت ها رخ می دهد، در شبکه بندی ناگت ها و مناطق HAZ از شبکه بندی ریزتری استفاده شده است. بنابراین با توجه به مطالب اشاره شده در بالا، حداقل اندازه کوچکترین بعد



شکل ۸- توزیع تنش الاستیک-پلاستیک و گرادیان نسبی تنش در امتداد مسیر ترک از ریشه ناگت‌ها به ازای بار اعمالی به مقدار ۵۰٪ بار شکست استاتیکی الف) فاصله‌ی بین صفحات ۰/۰۹ میلی‌متر، ب) فاصله‌ی بین صفحات ۰/۱۱ میلی‌متر، ج) فاصله‌ی بین صفحات ۰/۱۳ میلی‌متر

به منظور مقایسه داده‌های آزمون‌های خستگی تجربی و عمرهای پیش‌بینی شده عددی، منحنی‌های S-N تجربی و تخمین عددی به صورت یک‌جا در شکل (۱۰) نمایش داده شده است.

#### ۶- نتیجه‌گیری

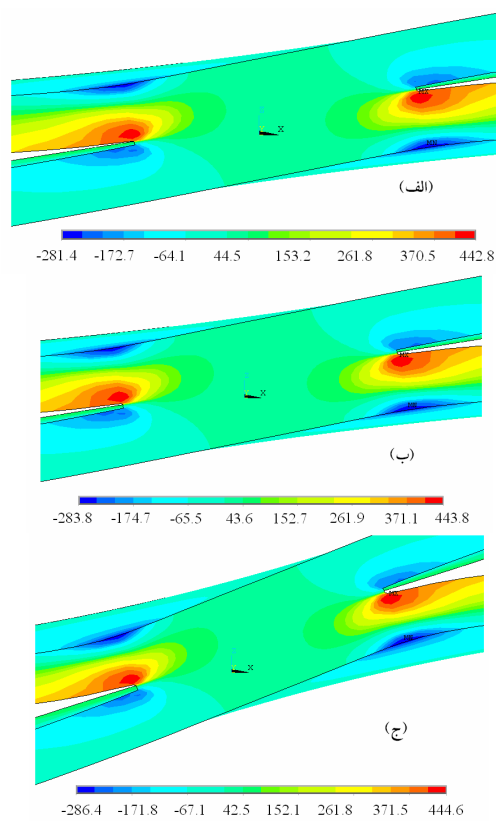
در این تحقیق، تأثیر فاصله‌ی صفحات در فرایند نقطه-جوش مقاومتی و همچنین فاکتور کاهش مقاومت فاق برای عمر خستگی اتصالات برشی-کششی آلیاژ آلومینیوم 5083-O مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که افزایش فاصله‌ی بین صفحات مقادیر تنش‌ها را در مجاورت ریشه فاق‌ها به علت اثرات خمشی افزایش می‌دهد. اما دیده شد که تنش

اطلاعات بارگذاری، تنش میانگین، دامنه کرنش و فاکتور کاهش مقاومت برای نمونه‌های نقطه‌جوش با سه مقدار مختلف فاصله‌ی بین صفحات در جدول (۴) لیست شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش فاصله‌ی بین صفحات منجر به کاهش مقادیر تنش میانگین، محدوده کرنش و فاکتور کاهش مقاومت فاق می‌شود. کاملاً مشخص است که بر اساس معادله شکست مارو افزایش تنش میانگین و محدوده‌ی کرنش تعداد سیکل‌های مربوط به شکست خستگی را کاهش خواهد داد [۱۹]. منحنی تنش در مجاورت ریشه فاق برای بار اعمالی به میزان ۸۰٪ بار شکست استاتیکی برای سه نوع اتصال نقطه‌جوش با مقادیر متفاوت فاصله صفحات در شکل (۹) نشان داده شده است.

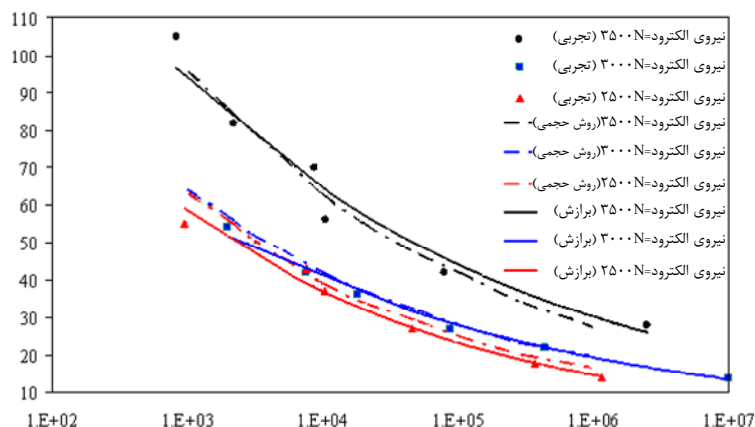


جدول ۴- تنش میانگین، دامنه کرنش و فاکتور کاهش مقاومت برای نمونه‌های نقطه جوش به ازای بارهای اعمالی مختلف

نوع A (Gap=0.09 mm)				نوع B (Gap=0.11 mm)				نوع C (Gap=0.13 mm)			
تنش خالص (MPa)	$\sigma_m$ (MPa)	$\Delta\varepsilon$	$k_f$	تنش خالص (MPa)	$\sigma_m$ (MPa)	$\Delta\varepsilon$	$k_f$	تنش خالص (MPa)	$\sigma_m$ (MPa)	$\Delta\varepsilon$	$k_f$
۱۶	۱۰۱	۰/۰۰۲۵	۱۵/۵	۲۰	۹۹	۰/۰۰۱۹	۱۲/۶	۲۸	۱۰۲	۰/۰۰۲۶	۸/۹
۲۹	۱۰۹	۰/۰۰۳۴	۱۳/۳	۳۰	۱۰۶	۰/۰۰۳۲	۱۲/۵	۴۴	۱۲۱	۰/۰۰۷۶	۸/۶
۳۹	۱۱۷	۰/۰۰۶۳	۱۳/۱	۴۱	۱۱۹	۰/۰۰۶۷	۱۱/۷	۶۳	۱۶۹	۰/۰۱۹۷	۷/۶
۴۳	۱۲۳	۰/۰۰۰۸	۱۱/۶	۴۶	۱۲۷	۰/۰۰۹۱	۱۰/۸	۷۰	۱۹۵	۰/۰۲۵۹	۷/۱
۵۴	۱۴۵	۰/۰۱۴۲	۱۰/۷	۵۶	۱۴۷	۰/۰۱۵۲	۱۰/۳	۸۵	۲۶۳	۰/۰۴۲۲	۶/۸
۶۳	۱۷۱	۰/۰۲۱	۱۰	۶۵	۱۷۰	۰/۰۲۲۲	۹/۷	۹۵	۳۱۹	۰/۰۵۵۴	۶/۶



شکل ۹- منحنی تنش در مجاورت ریشه فاق برای بار اعمالی به میزان ۸۰٪ بار شکست استاتیکی برای سه نوع اتصال نقطه جوش الف) فاصله‌ی صفحه ۰/۰۹ میلی‌متر، ب) فاصله‌ی صفحه ۰/۱۱ میلی‌متر، ج) فاصله صفحه ۰/۱۳ میلی‌متر (تنش‌ها بر حسب مگاپاسکال می‌باشد)



شکل ۱- مقایسه منحنی S-N تجربی و عمرهای پیش‌بینی شده عددی بر اساس روش حجمی

به رابطه‌ی ضریب حساسیت فاق با شعاع آن طبق روابطی نظیر رابطه پترسون ( $q = \frac{1}{1 + \alpha/p}$ ) که در آن  $q$  ضریب حساسیت فاق،  $\alpha$  ضریب پترسون وابسته به ماده و  $p$  شعاع فاق‌اند، هرچه قدر شعاع فاق بزرگتر باشد، مقدار ضریب حساسیت کوچکتر شده و لذا فاکتور کاهش مقاومت فاق نیز کمتر خواهد شد. همچنین با توجه به اینکه شعاع بزرگتر فاق، ضریب تمرکز تنش کوچکتری دارد، لذا مقادیر تنش بحرانی در اطراف فاق کمتر شده و عمر خستگی بیشتر خواهد بود.

نتایج به دست آمده بر مبنای روش حجمی با نتایج حاصله از آزمون‌های خستگی تجربی مقایسه شده و مشخص شد که مطابقت خوبی بین عمر پیش‌بینی شده عددی و نتایج تجربی وجود دارد.

میانگین و محدوده‌ی کرنش در یک سیکل کامل بارگذاری و باربرداری و همچنین مقادیر فاکتور کاهش مقاومت فاق با افزایش فاصله‌ی بین صفحات کاهش می‌یابد. مشخص شد که فاصله‌ی بین صفحات نقش قابل ملاحظه‌ای در کارایی خستگی اتصالات نقطه جوش دارد. وجود یک فاق با مقدار شعاع بزرگ در ریشه آن که در نتیجه اعمال نیروی الکتروود بیشتر ایجاد شده، دلیل مهمی برای داشتن عمر طولانی‌تر در اتصالات نقطه جوش است. به علاوه، اثرات ناپیوستگی فاق به عنوان یک ناحیه تمرکز تنش نقش مهمی در محدوده‌ی خستگی کم چرخه و پرچرخه ایفا می‌کند. نیروی الکتروود بزرگتر، فاصله‌ی بزرگتری بین صفحات اتصال نقطه جوش ایجاد کرده و در نتیجه شعاع فاق بزرگتر خواهد شد. با توجه

## واژه‌نامه

- |                               |                        |                                      |
|-------------------------------|------------------------|--------------------------------------|
| 1. gap                        | 5. volumetric approach | 9. crack opening stress              |
| 2. heat effected zone         | 6. effective stress    | 10. Multi-linear kinematic hardening |
| 3. structural stress approach | 7. effective distance  |                                      |
| 4. nugget                     | 8. reference curve     |                                      |

## مراجع

- Barauser, S., Pepke, L.A., Weber, G., and Rethmeier, M., "Deformation Behaviour of Spot-Welded High Strength Steels for Automotive Applications," *Materials Science and Engineering A527*, pp. 7099-7108, 2010.
- Long, X., and Khanna, S. K., "Fatigue Properties and Failure Characterization of Spot Welded High Strength Steel Sheet," *International Journal of*

- Fatigue*, Vol. 29, Issue 5, pp. 879-886, 2007.
3. Linder, J., Melander, A., Larsson, M., and Bergengren, Y., "Fatigue Design of Spot-Welded Austenitic and Duplex Stainless Sheet Steels," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 21, Issue 6, pp. 673-686, 1998.
  4. Spitsen, R., Kim, D., Flinn, B., Ramulu, M., and Easterbrook, E. T., "The Effects of Post-Weld cold Working Processes on the Fatigue Strength of Low Carbon Steel Resistance Spot Welds," *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, Vol. 127, Issue 4, pp. 718-723, 2005.
  5. Gean, A., Westgate, S. A., Kucza, J. C., and Ehrstrom, J. C., "Static and Fatigue Behavior of Spot Welded 5182-O Aluminum Alloy Sheet," *Welding Journal*, Vol. 78, No. 3, pp. 80-86, 1999.
  6. Sun, X.E., Stephens, V.R., Davies, W., Khaleel, M. A., and Spinella, D.J., "Effects of Fusion Zone Size on Failure Modes and Static Strength of Aluminum Resistance Spot Welds," *Welding Journal*, Vol. 83, No. 11, pp. 308-318, 2004.
  7. Chang, B. H., and Zhou, Y., "Numerical Study on the Effect of Electrode Force in Small-Scale Resistance Spot Welding," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 139, Issue 1-3, pp. 635-641, 2003.
  8. Radaj, D., and Sonsino, C. M., *Fatigue Assessment of Welded Joints by Local Approaches*, Woodhead Publishing Ltd, 1998.
  9. Bae, D.H., Sohn, I.S., and Hong, J.K., "Assessing the Effect of residual Stresses on the Fatigue Strength of Spot Welds," *Welding Journal*, Vol. 82, pp. 18-23, 2003.
  10. Son, K. J., Yang, Y. S., Choi, K. S., and Cho, S. K., *Fatigue Strength Evaluation on Resistance Spot Welds of the Vehicle Body*, Marcel Dekker Inc, 2003.
  11. Kang, H. T., *Fatigue Prediction of Spot Welded Joints Using Equivalent Structural Stress, Material and Design*, 2005.
  12. Pan, N., and Sheppard, S., "Spot Welds Fatigue Life Prediction with Cyclic Strain Range," *International Journal of Fatigue*, Vol. 24, Issue 5, pp. 519-528, 2002.
  13. Ni, K., and Mahadevan, S., "Strain-Based Probabilistic Fatigue Life Prediction of Spot-Welded joints," *International Journal of Fatigue*, Vol. 26, Issue 7, pp. 763-772, 2004.
  14. Hassanifard, S., Zehsaz, M., Tohgo, K., and Ohguma, T., "The Prediction of Fatigue Crack Initiation Life in Spot Welds," *Journal of Strain*, Vol. 45, Issue 6, pp. 489-497, 2009.
  15. 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*, Vol. 21, Issue 9, pp. 1123-1132, 1998.
  16. Henrisson, H.F., "Variable Amplitude Fatigue of Spot Welds," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 25, Issue 12, pp. 1187-1197, 2002.
  17. Ni, K., and Mahadevan, S., "Probabilistic Fatigue Crack Growth Analysis of Spot-Welded Joints," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 27, Issue 6, pp. 473-480, 2004.
  18. Pan, N., and Sheppard, S.D., "Stress Intensity Factors in Spot Welds," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 70, Issue 5, pp. 671-684, 2003.
  19. Lee, Y. L., Pan, J., Hathaway, R., and Barkey, M., *Fatigue Testing and Analysis (Theory and Practice)*, Elsevier Inc., Amsterdam, 2005.
  20. Pook, L. P., "Fracture Mechanics Analysis of the Fatigue Behavior of Spot Welds," *International Journal of Fracture*, Vol. 11, Issue 1, pp. 173-176, 1975.
  21. Manson, S.S., and Muralidharan, U., "Fatigue Life Prediction in Bending from Axial Fatigue Information," NASA CR-165563, 1982.
  22. Coffin, L.F., "A Study of the Effects of Cyclic Thermal Stresses on a Ductile Metal," *Trans. ASME*, Vol. 76, 1954.
  23. Adib, H., Gilgert, J., and Pluvinage, G., "Fatigue Life Duration Prediction for Welded Spots by Volumetric Method," *International Journal of Fatigue*, Vol. 26, Issue 1, pp. 81-94, 2004.
  24. Hassanifard, S., Zehsaz, M., and Tohgo, K., "The Effects of Electrode Force on the Mechanical Behaviour of Resistance Spot-Welded 5083-O Aluminum Alloy Joints," *Journal of Strain*, Vol. 47, pp. e196-e204, 2011.
  25. Pluvinage, G., *Fracture and Fatigue Emanating from Stress Concentrators*, Published by Springer, ISBN 14020-16093, 9781402016097, 2003.
  26. Pluvinage, G., "Application of Notch Fracture Mechanics to Fracture Emanating from Stress Concentrators," *In: Advances in Computational Engineering Congress of Computational Engineering Sciences*, pp. 213-218, 1997.