

بررسی عددی و تجربی عمر خستگی و پاسخ فرکانسی اتصالات جوش مقاومتی نقطه‌ای کششی-برشی با آرایش‌های مختلف

سوران حسنی فرد^{۱*}، میرمحمد اتفاق^۲

۱- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

۲- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

* تبریز، صندوق پستی ۱۴۷۶۶-۵۱۶۶۶، hasanifard@tabrizu.ac.ir

چکیده- در این مقاله، عمر خستگی اتصالات جوش مقاومتی نقطه‌ای از نوع کششی-برشی که در آن‌ها از چهار عدد نقطه‌جوش با آرایش‌های مختلف استفاده شده مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، سه نوع اتصال طولی (چهار عدد نقطه‌جوش در یک ردیف در راستای خط بارگذاری اتصال)، عرضی (چهار عدد نقطه‌جوش در یک ردیف عمود بر راستای خط بارگذاری) و لوزی‌شکل (چهار عدد نقطه‌جوش به صورت لوزی و متقارن نسبت به خط بارگذاری) انتخاب شدند. تخمین عمر خستگی اتصالات نقطه‌جوش با استفاده از منحنی تنش-عمر نمونه‌های هموار مربوط به جنس مورد نظر و مقادیر کاهش مقاومت خستگی انجام شد. نتایج به دست آمده از تحلیل عددی با داده‌های آزمون تجربی خستگی مقایسه شده و تطابق خوبی حاصل شده است. همچنین تست آنالیز مودال قبل و بعد از اعمال بارگذاری سیکلیک روی اتصالات مورد نظر انجام گرفته و مقادیر درصد کاهش فرکانس طبیعی، به منظور تحقیق در مورد عمر خستگی و زمان شکل‌گیری ترک خستگی در اتصالات مورد نظر، به دست آمده است.
کلید واژگان: جوش مقاومتی نقطه‌ای، عمر خستگی، آنالیز مودال

Numerical and experimental investigation of fatigue life and frequency response of the different arrangements of tensile-shear spot-welded joints

S. Hassanifard^{1*}, M. M. Etefagh²

1- Assis. Prof. of Mech. Eng., Univ. of Tabriz, Tabriz, Iran

2- Assis. Prof. of Mech. Eng., Univ. of Tabriz, Tabriz, Iran

* P. O. B. 51666-14766, Tabriz, hasanifard@tabrizu.ac.ir

Abstract- In this paper, fatigue lives of tensile-shear multi-spot welded joints with four spot per specimen with different arrangements have been investigated. For this purpose, three types of joints with axial, transverse and almond-shaped have been selected. The prediction of fatigue life of spot welded joints has been carried out based on the available S-N curve of smooth specimens and the values of fatigue strength reduction factors. The experimental results and numerical predictions were compared and it was observed a good agreement between experimental and numerical ones. In addition, the Experimental Modal Analysis (EMA) was applied on the specimens before and after different fatigue loadings. Then percent of the identified natural frequencies decreasing was investigated and its correlation with crack initiation and total fatigue life of spot welded joints was studied.

Keywords: Resistance Spot Welding, Fatigue Life, Modal Analysis, Strain-Life Approach

۱- مقدمه

انتخاب روشی مناسب برای مدلسازی نقطه‌جوش‌ها با توجه به عواملی از قبیل پیچیدگی سازه مورد تحلیل، به‌لحاظ هندسی و نوع بارگذاری وارده، از اهمیت خاصی برخوردار است. مدل‌های المان محدود مختلفی تاکنون برای اتصالات نقطه‌جوش در ادبیات فن پیشنهاد شده است که از آن جمله می‌توان به این موارد اشاره کرد: (الف) مدل میله الاستیک، که در آن هم میله و هم صفحات الاستیک‌اند. میله یک المان تیر بوده که قطر آن با قطر نقطه‌جوش یکسان بوده و طول آن برابر مجموع نصف مقادیر ضخامت دو صفحه است. (ب) مدل میله صلب، که در آن میله‌ای که دو صفحه را به هم اتصال می‌دهد صلب فرض شده، در حالی که خود صفحات الاستیک‌اند. (ج) مدل میله صلب-صفحه صلب، که در آن هم میله صلب بوده و هم صفحاتی که دو گره انتهایی میله را محصور کرده‌اند نیز صلب می‌باشند. در سه مدل فوق، می‌توان به جای یک المان تیر برای دکمه جوش^۱ از چند عدد المان تیر که بین المان‌های صفحات محصور می‌شوند استفاده کرد. (د) یک روش پیچیده‌تر و در عین حال دقیق‌تر مدلسازی اتصال استفاده از المان جامد (سه‌بعدی) برای دکمه جوش می‌باشد. در این مدل، صفحات اتصالی را می‌توان توسط المان‌های پوسته و یا جامد ایجاد کرد. بدیهی است که با استفاده از این روش مدلسازی با مش‌بندی ریز در اطراف نقطه‌جوش می‌توان نتایج دقیق‌تری به‌دست آورد، ولی استفاده از المان‌های سه‌بعدی برای سازه‌های پیچیده‌ای مثل بدنه خودرو که در آن‌ها از ۳۰۰۰ تا ۵۰۰۰ عدد نقطه‌جوش استفاده می‌شود [۱]، از نظر زمان انجام محاسبات و حجم آن‌ها مقرون‌به‌صرفه نبوده و عملاً امکان‌پذیر نیست. از میان کارهایی که جهت تخمین عمر خستگی اتصالات نقطه‌جوش انجام شده، می‌توان به روش‌های بر پایه تنش (تنش‌های اسمی) [۲-۵]، روش‌های عمر-کرنش [۶-۸] و روش‌های مکانیک شکست [۹-۱۲] اشاره کرد.

ادیب و همکارانش، رفتار خستگی اتصالات نقطه‌جوش را تحت بارگذاری کششی-برشی برای اتصالاتی با یک، سه و پنج عدد نقطه‌جوش، مورد بررسی قرار داده و برای به‌دست آوردن فاکتور کاهش مقاومت خستگی از روش حجمی استفاده کردند [۱۳].

بانگ و همکارانش خصوصیات مکانیکی اتصالات دارای چند عدد نقطه‌جوش را مورد بررسی قرار دادند [۱۴]. بر خلاف اتصال با یک عدد نقطه‌جوش، اتصالات دارای چند عدد نقطه‌جوش تقارن محوری نداشته و لذا شبیه‌سازی حل بایستی سه‌بعدی باشد. به همین دلیل، آن‌ها ابتدا مسئله سه‌بعدی هدایت حرارتی و برنامه الاستو-پلاستیک را به روش المان محدود ایزوپارامتریک بسط داده و سپس از نتایج تحلیل برای مشخص کردن خصوصیات حرارتی و مکانیکی اتصالات با یک عدد نقطه‌جوش و چند عدد نقطه‌جوش استفاده کردند. تحلیل‌ها نشان داده است که نتایج تحلیل دوبعدی با تقارن محوری، با نتایج عددی تحلیل‌های سه‌بعدی یکسان است.

شانگ و همکارانش اثر آسیب خستگی را روی پاسخ فرکانسی اتصالات جوش مقاومتی نقطه‌ای با یک و دو عدد نقطه‌جوش بررسی نموده و به این نتیجه رسیدند که تغییرات عمده‌ای در مقادیر فرکانس‌های طبیعی اتصال در عمرهای نزدیک به عمر نهایی خستگی اتصال ایجاد می‌شود. آن‌ها همچنین از اصل مکانیک آسیب تجمعی برای تخمین عمر انتشار خستگی اتصالات استفاده نمودند [۱۵، ۱۶]. وانگ و بارکی ترک خستگی و تأثیر آن را روی مشخصات پاسخ دینامیکی اتصالات نقطه‌جوش بررسی نموده و از نتایج کارشان برای عیب‌یابی و تشخیص ترک خستگی استفاده نمودند [۱۷، ۱۸].

نحوه چیدمان نقطه‌جوش‌ها در اتصالات با بیش از یک عدد نقطه‌جوش، پارامتر مؤثری در بررسی استحکام استاتیکی و خستگی اتصال می‌باشد. لذا، در مقاله حاضر، استحکام مکانیکی اتصالاتی با چهار عدد نقطه‌جوش و با سه نوع چیدمان مختلف طولی، لوزی‌شکل و عرضی، که از این به بعد به ترتیب اتصالات نوع A، نوع B و نوع C نامیده می‌شوند، بررسی می‌شود. همچنین، با توجه به اینکه فقط تعداد چهار عدد نقطه‌جوش در اتصال کششی-برشی مد نظر بوده و آرایش نقطه‌جوش‌ها هم نسبت به راستای خط بارگذاری متقارن می‌باشند، لذا برای حصول نتایج واقعی‌تر از المان‌های سه‌بعدی استفاده شده است. در این مقاله، برای مطالعه آسیب خستگی و بررسی زمان شکل‌گیری ترک خستگی و نحوه انتشار آن در طول بارگذاری سیکلیک در مورد اتصالاتی با چهار عدد نقطه‌جوش و با آرایش‌های مختلف ذکر شده، استخراج فرکانس‌های طبیعی سازه با شرایط مرزی یک سرگیردار انجام گرفته است.

1. Nugget

۲- مبانی تئوری

در این پژوهش، برای تخمین عمر خستگی اتصالات نقطه جوش، از منحنی خستگی S-N نمونه‌های صاف فولاد گالوانیزه به عنوان منحنی مرجع استفاده شده و سپس منحنی تنش-عمر اتصالات مورد نظر، از تقسیم منحنی مرجع بر مقادیر کاهش مقاومت خستگی به دست آمده است. در این روش، از توزیع‌های تنش الاستیک-پلاستیک و گرادیان تنش برای به دست آوردن مقادیر کاهش مقاومت خستگی استفاده می‌شود. ضریب کاهش مقاومت خستگی k_f ، بر مبنای شدت میدان تنش به صورت زیر نوشته می‌شود [۱۹]:

$$k_f = \frac{1}{x_{\text{eff}} \sigma_n} \int_0^{x_{\text{eff}}} \sigma(x)(1-xX) dx \quad (1)$$

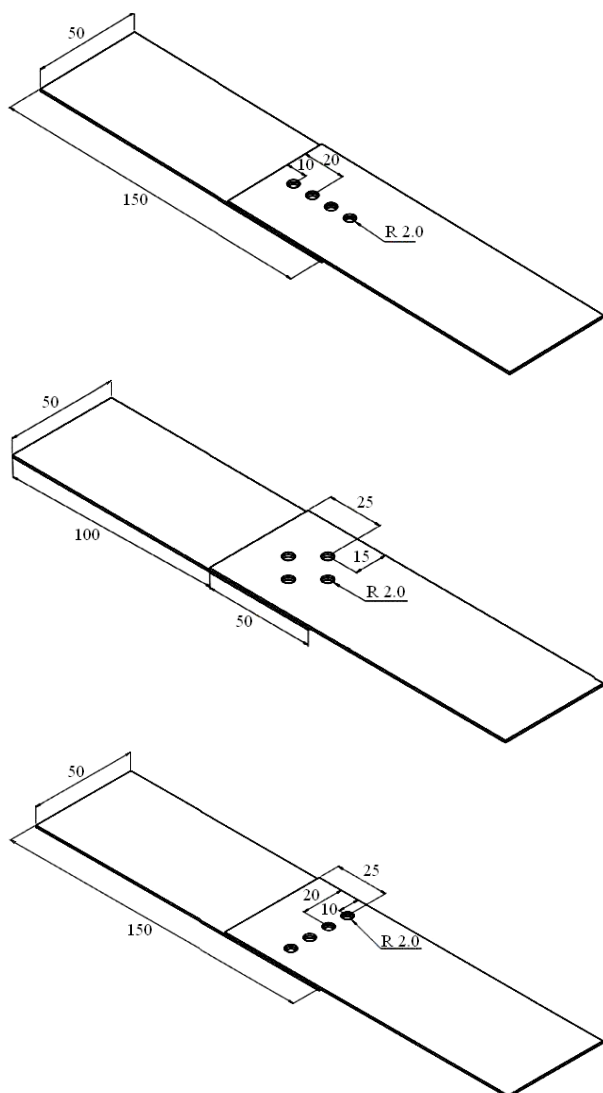
که در آن x_{eff} فاصله مؤثر فرایند خستگی، $\sigma(x)$ تنش ایجادکننده ترک خستگی، X گرادیان تنش و σ_n تنش خالص است. در رابطه (۱) فاصله مؤثر فرایند خستگی، همان فاصله مکان وقوع ترک از ریشه ناپیوستگی هندسی است. گرادیان تنش در این روش توسط رابطه زیر داده می‌شود:

$$X = \frac{1}{\sigma(x)} \frac{d\sigma(x)}{dx} \quad (2)$$

با داشتن مقادیر k_f و استفاده از رابطه $k_f = \sigma_{\text{smooth}} / \sigma_{\text{notched}}$ می‌توان عمر خستگی نمونه‌های دارای ناپیوستگی هندسی را تخمین زد. در رابطه فوق σ_{smooth} مقاومت خستگی نمونه‌های هموار و σ_{notched} مقاومت خستگی نمونه‌های دارای ناپیوستگی هندسی (اتصالات نقطه جوش) است.

۳- مواد و آزمون‌های تجربی خستگی

صفحاتی از جنس فولاد گالوانیزه و به ضخامت ۱ میلی‌متر برای ایجاد سه نوع اتصال نقطه جوش چهارتایی با آرایش‌های طولی (چهار عدد نقطه جوش در یک ردیف در راستای خط بارگذاری اتصال، نوع A)، لوزی شکل (چهار عدد نقطه جوش به صورت لوزی و متقارن نسبت به خط بارگذاری، نوع B) و عرضی (چهار عدد نقطه جوش در یک ردیف عمود بر راستای خط بارگذاری، نوع C) مورد استفاده قرار گرفت. مدل اتصالات نقطه جوش چهارتایی، با آرایش‌های مختلف مورد نظر در این تحقیق، در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱ مدل اتصالات نقطه جوش چهارتایی با آرایش‌های مختلف؛ به ترتیب از بالا به پایین، اتصال نوع A، نوع B و نوع C

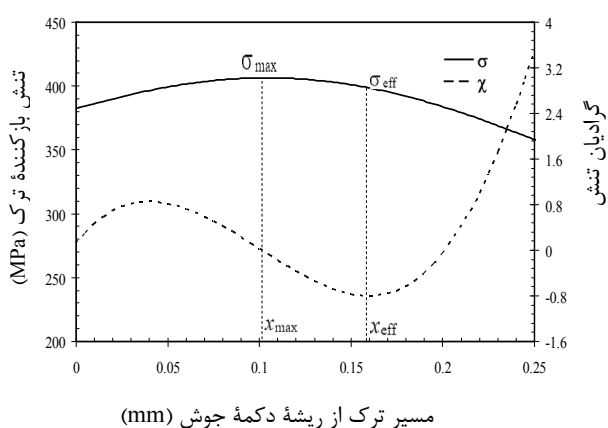
پارامترهای فرایندی (آمپراژ، ولتاژ، نیروی الکتروود و زمان) یکسانی برای ایجاد نقطه جوش‌ها مورد استفاده قرار گرفته و قطر نقطه جوش‌ها برابر ۴ میلی‌متر با تیرانس ۰/۱ به دست آمدند. خصوصیات مکانیکی فولاد گالوانیزه مورد استفاده در جدول ۱ لیست شده‌اند.

جدول ۱ ویژگی‌های مکانیکی فولاد گالوانیزه از نوع H220LAD

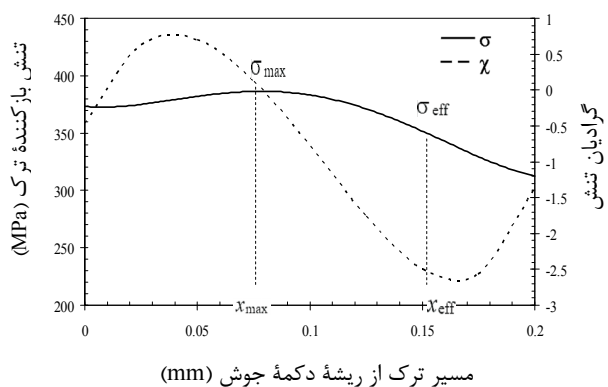
مدول یانگ (GPa)	تنش تسلیم (MPa)	استحکام نهایی (MPa)	سختی برینل
۲۰۰	۲۴۶	۳۷۱	۸۴

۴- شبیه‌سازی المان محدود برای تخمین عمر خستگی

برای به دست آوردن نمودارهای توزیع تنش بازکننده ترک و گرادیان تنش در مسیر رشد و انتشار ترک خستگی که از ریشه نقطه جوش‌ها شروع شده و در راستای ضخامت صفحات امتداد می‌یابند، مدل‌های نشان داده شده در شکل ۱ توسط نرم‌افزار ANSYS شبیه‌سازی شده و مش‌بندی دستی و حتی‌الامکان ریز در اطراف نقطه جوش‌ها ایجاد شده است. توزیع تنش بازکننده ترک و نیز گرادیان تنش برای هر سه نوع اتصال نقطه جوش در تمامی بارهای اعمالی به دست آمده‌اند که به علت محدودیت جا فقط برای اعمال باری برابر ۳ kN در شکل‌های ۴ تا ۶ نشان داده شده‌اند.

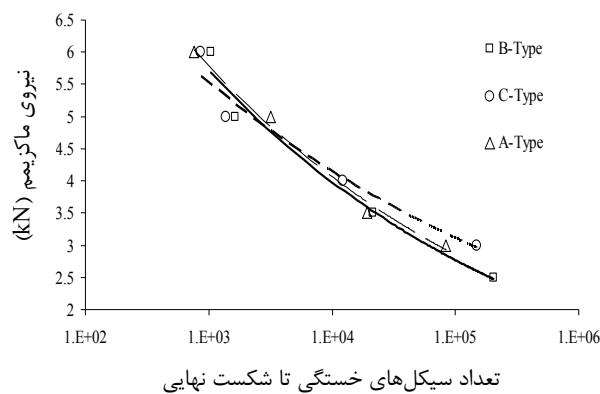


شکل ۴ توزیع تنش بازکننده ترک و گرادیان تنش الاستو-پلاستیک اتصال نقطه جوش نوع A در بار اعمالی ۳ kN



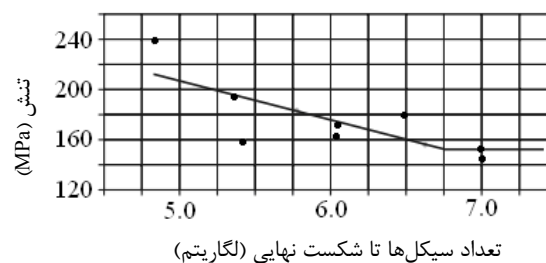
شکل ۵ توزیع تنش بازکننده ترک و گرادیان تنش الاستو-پلاستیک اتصال نقطه جوش نوع B در بار اعمالی ۳ kN

در این پژوهش، از اثر سخت‌شوندگی کرنشی دوخطی سینماتیک^۱ برای تعریف رفتار پلاستیکی ماده استفاده شده است. در این مدل فرض می‌شود دامنه تنش دو برابر تنش تسلیم است، بنابراین اثر باوشینگر در نظر گرفته شده است. نمونه‌های نقطه جوش از جنس فولاد گالوانیزه با آرایش‌های مختلف مورد نظر توسط دستگاه تست خستگی Zwick/Amsler و با فرکانس ۱۰ Hz تحت بارگذاری‌های مختلف آزمایش شده‌اند. در شکل ۲ منحنی‌های مربوط به تست خستگی اتصالات نقطه جوش مورد نظر نشان داده شده است.



شکل ۲ منحنی تست خستگی اتصالات نقطه جوش مورد نظر

نمودار S-N که به عنوان منحنی مرجع استفاده می‌شود منحنی تنش-عمر به دست آمده از آزمون خستگی نمونه‌های هموار فولاد گالوانیزه H220LAD است که تحت بارگذاری خمشی متقارن متناوب قرار گرفته‌اند. این منحنی در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳ منحنی S-N نمونه‌های هموار فولاد گالوانیزه از نوع H220LAD تحت بارگذاری خمشی متقارن متناوب [۲۰]

1. Bilinear Kinematic Hardening (BKH)

با مقایسه عمرهای خستگی نهایی به دست آمده از آزمون تجربی و نتایج تخمین عددی خستگی این نتیجه حاصل می شود که در کل تطابق خوبی بین داده های تجربی و تخمین های عددی برای اتصالات نقطه جوش مورد نظر وجود دارد.

۵- آنالیز مودال تجربی

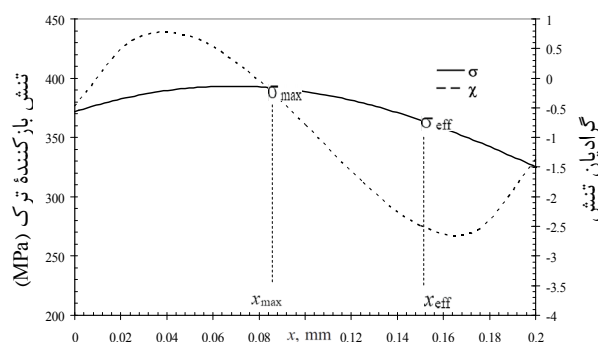
آنالیز مودال تجربی یکی از روش های بسیار مفید در استخراج مشخصات دینامیکی سازه ها از جمله فرکانس های طبیعی است که می تواند نتایج آن به عنوان مرجعی قابل اطمینان برای به روزرسانی سازه های مدلسازی شده و همچنین مطالعه دقیق رفتار دینامیک سازه بر اساس روند تغییرات مشخصات دینامیکی تحت شرایط مختلف به کار رود [۲۱]. به منظور آنالیز مودال تجربی اتصالات مورد نظر در این مقاله، هر اتصال به صورت یک سرگیردار همانند شکل ۸ به یک پایه صلب بسته می شود.



شکل ۸ تنظیمات تست آنالیز مودال

تحریک هر قطعه توسط چکش تحریک از نوع ۸۲۰۲ شرکت B&K انجام گرفته و نیروی وارده توسط سنسور نیرو متصل به چکش اندازه گیری می شود. پاسخ سازه به این تحریک به صورت سرعت در یک نقطه مشخص شده در قطعه به وسیله یک سنسور غیرتماسی پروپ لیزری دوپلر از نوع اومترون^۱ اندازه گیری می شود. داده های آنالوگ هر یک از سنسورهای یادشده توسط سیستم پالس^۲ شرکت B&K و نرم افزار مربوطه [۲۲] به داده های دیجیتال با فرکانس نمونه برداری ۶/۴ کیلوهرتز تبدیل

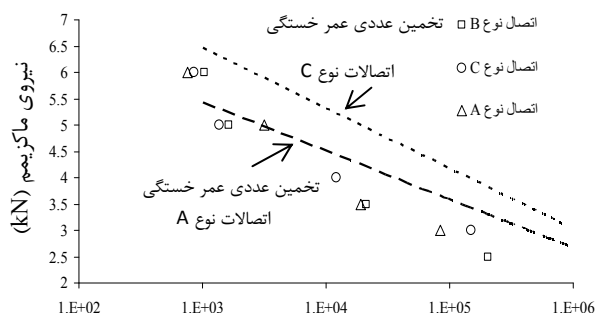
1. OMETRON
2. PULSE



مسیر ترک از ریشه دکه جوش (mm)

شکل ۶ توزیع تنش بازکننده ترک و گرادیان تنش الاستو-پلاستیک اتصال نقطه جوش نوع C در بار اعمالی ۳ kN

با استفاده از نمودارهای تنش و گرادیان تنش در همه بارهای اعمالی و به کارگیری روابط (۱) تا (۳)، مقادیر کاهش مقاومت خستگی به دست می آیند. با استفاده از منحنی مرجع S-N و مقادیر کاهش مقاومت خستگی، منحنی تخمینی عمر خستگی برای اتصالات نقطه جوش مورد نظر به صورت نشان داده شده در شکل ۷ رسم می شود. برای مقایسه بهتر نتایج تخمین عددی با نتایج آزمون تجربی، داده های به دست آمده از آزمون تجربی خستگی نیز در شکل ۷ نشان داده شده اند. شایان ذکر است با توجه به اینکه مقادیر تنش بازکننده ترک نشان داده شده در شکل های ۴ تا ۶ و همچنین مقادیر کاهش مقاومت خستگی برای اتصال نوع B بین اتصالات نوع A و C قرار می گیرد، عمر خستگی نمونه های نوع A و C برای نشان دادن باندهای پایین و بالای خستگی به دست آمده اند.



تعداد سیکل های خستگی تا شکست نهایی

شکل ۷ منحنی تخمین عمر خستگی اتصالات نقطه جوش مورد نظر به همراه داده های آزمون تجربی خستگی

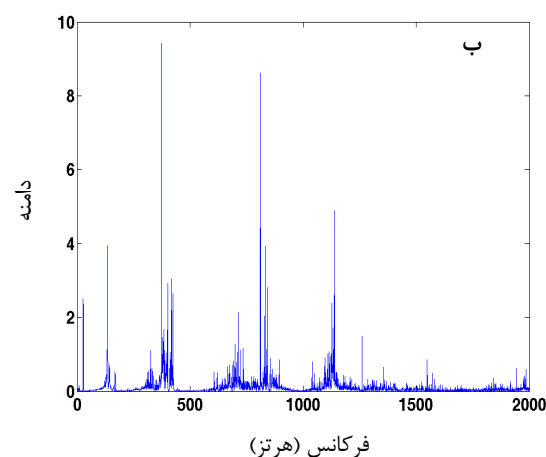
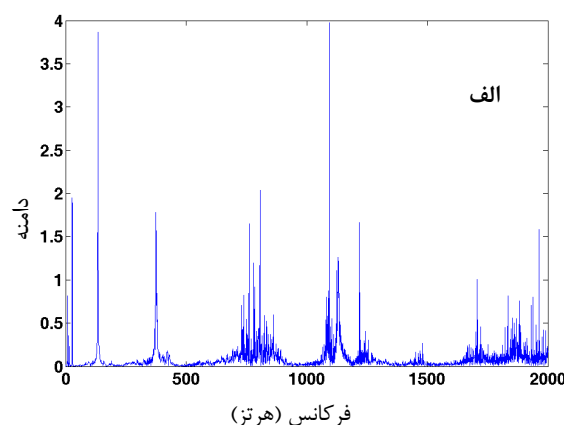
فرکانس‌های مختلف سازه اتصالات به‌کار گرفته شده را در عمرهای مختلف خستگی مشاهده نمود. شایان ذکر است که منظور از علائم f_i ($i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$) همان فرکانس‌های طبیعی استخراج‌شده از اتصالات مذکور در مودهای انتخابی اول تا ششم می‌باشد.

همان‌طوری که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، تقریباً در هر سه نوع اتصال با افزایش درصد عمر به عمر خستگی نهایی و در تمام فرکانس‌های بالا، متوسط و پایین یک کاهش تقریبی درصد فرکانس مشاهده می‌شود. لذا می‌توان گفت که به غیر از بعضی از فرکانس‌ها و عمرهای خستگی مرتبط که بحث در این مورد در ادامه انجام می‌گیرد، با رشد و انتشار تدریجی ترک خستگی، مقادیر فرکانس‌های طبیعی کاهش نسبی پیدا می‌کنند. به‌علاوه در فرکانس‌های پایین، افت فرکانسی در ۱۰ درصد عمر خستگی شدید بوده و این مسئله مخصوصاً در مورد اتصالات A و B مشهودتر است. همچنین در مورد اتصال C می‌توان مشاهده کرد که افت فرکانسی در فرکانس‌های بالا نسبت به سایر قطعات مشهودتر است. به‌علاوه با توجه به اینکه افت فرکانسی در اتصال C نسبت به سایر اتصالات در عمرهای مختلف خستگی (مخصوصاً بیشتر از ۳۰ درصد) از شدت کمتری برخوردار است و از طرف دیگر با توجه به ارتباط مستقیم شدت کاهش فرکانس و زمان آغاز انتشار ترک، می‌توان پیش‌بینی نمود که عمر آغاز ترک خستگی در این نوع اتصال نسبت به سایر انواع اتصالات بیشتر بوده و این مورد با توجه به شکل ۷ نیز مورد تأیید است.

۶- بحث و نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از تست خستگی اتصالات نقطه‌جوش مورد نظر در این تحقیق نشان داده است که اتصالات نوع C (چهار عدد نقطه‌جوش عمود بر راستای بارگذاری سیکلیک) دارای عمر خستگی بیشتری نسبت به سایر اتصالات می‌باشند. درستی این نتیجه توسط تخمین عمر خستگی به روش استفاده از مقادیر کاهش مقاومت خستگی نیز نشان داده شده است. همچنین در این مقاله نشان داده شده است که یک ارتباط مستقیم بین شدت کاهش فرکانس طبیعی اتصال و زمان آغاز ترک خستگی وجود دارد که این نتیجه نیز با داده‌های تست تجربی و تخمین‌های عددی تطابق کامل دارد.

و در یک کامپیوتر PC ذخیره می‌شوند. بعد از استخراج تابع پاسخ فرکانسی (FRF) سازه، روش آنالیز مودال "پیک تا پیک"^[۲۱] به کمک نرم‌افزار ام‌اسکوپ^[۲۳] بر روی FRF سازه پیاده شده و متعاقباً فرکانس‌های طبیعی استخراج می‌شوند. به عنوان نمونه FRF اتصال نوع A به ترتیب برای حالت‌های قبل از اعمال بارگذاری سیکلیک و بعد از ۱۰ درصد عمر خستگی نهایی آن در شکل ۹ نشان داده شده‌اند.



شکل ۹ FRF اتصال نوع A؛ (الف) قبل از اعمال بارگذاری سیکلیک و (ب) بعد از ۱۰ درصد عمر خستگی نهایی

به علت محدودیت جا و به منظور یکجا نمایش دادن تمامی نتایج حاصل از آزمایش آنالیز مودال (فرکانس‌های طبیعی) برای تمامی اتصالات A، B و C در تمامی عمرهای خستگی، شکل ۱۰ تهیه شده که در این شکل می‌توان روند تغییرات

1. Peak Picking
2. Mescop

[2] Radaj D., Sonsino C. M., *Fatigue Assessment of Welded Joints by Local Approaches*, England, Woodhead Publishing Ltd, 1998.

[3] Bae D. H., Sohn I. S., Hong J. K., "Assessing the Effect of Residual Stresses on the Fatigue Strength of Spot Welds", *Welding Journal*, Vol. 82, 2003, pp. 18-23.

[4] Son K. J., Yang Y. S., Choi K. S., Cho S. K., *Fatigue Strength Evaluation on Resistance Spot Welds of the Vehicle Body*, New York, Marcel Dekker Inc, 2003.

[5] Kang H. T., "Fatigue Prediction of Spot Welded Joints using Equivalent Structural Stress", *Material and Design*, Vol. 28, 2007, pp. 837-843.

[6] Pan N., Sheppard S., "Spot Welds Fatigue Life Prediction with Cyclic Strain Range," *International Journal of Fatigue*, Vol. 24, 2002, pp. 519-528.

[7] Ni K., Mahadevan S., "Strain-Based Probabilistic Fatigue Life Prediction of Spot-Welded Joints," *International Journal of Fatigue*, Vol. 26, 2004, pp. 763-772.

[8] Hassanifard S., Zehsaz M., Tohgo K., Ohguma T., "The Prediction of Fatigue Crack Initiation Life in Spot Welds," *Journal of Strain*, Vol. 45, No. 6, 2009, pp 489-497.

[9] Newman J. A., Dowling N. E., "A Crack Growth Approach to Life Prediction of Spot-Welded Lap Joints," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 21, 1998, pp. 1123-1132.

[10] Henrisson H. F., "Variable Amplitude Fatigue of Spot Welds," Blackwell Science Ltd, *Fatigue Fract. Engng. Mater Struct.*, Vol. 25, 2002, pp. 1187-1197.

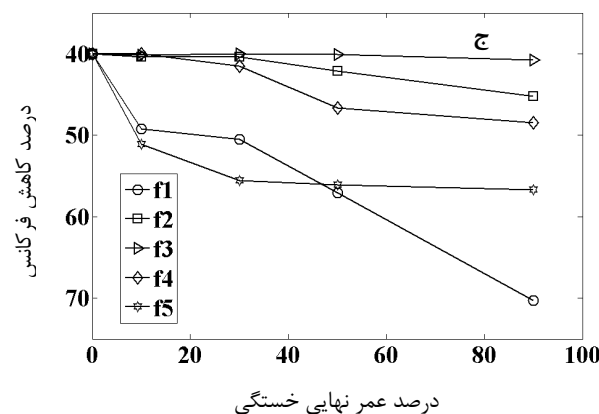
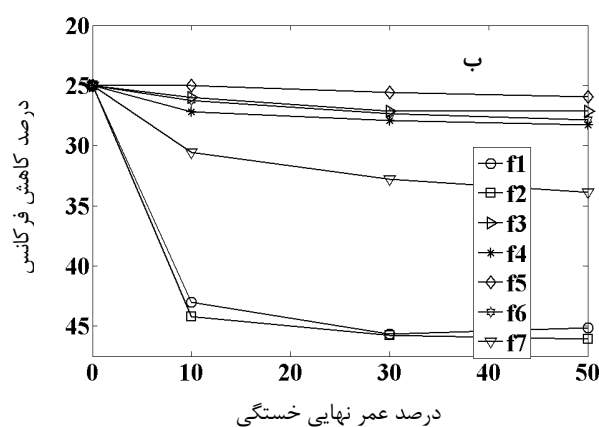
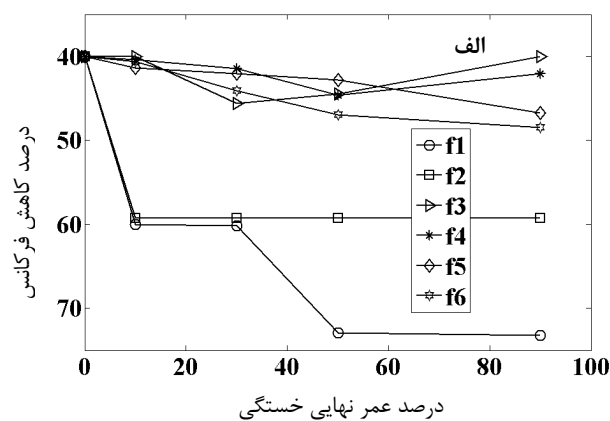
[11] Ni K., Mahadevan S., "Probabilistic Fatigue Crack Growth Analysis of Spot-Welded Joints," Blackwell Publishing Ltd. *Fatigue Fract. Engng. Mater Struct.*, Vol. 27, 2004, pp. 473-480.

[12] Pan N., Sheppard S. D., "Stress Intensity Factors in Spot Welds," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 70, 2003, pp. 671-684.

[13] Adib H., Gilgert J., Pluvinage G., "Fatigue Life Duration Prediction for Welded Spots by Volumetric Method," *International Journal of Fatigue*, Vol. 26, 2004, pp. 81-94.

[14] Bang H. S., Bang H. S., Joo S. M., Kim J. M., Chang W. S., "Mechanical Characteristic of Resistance Multi Spot Welded Joints," *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 8, No. 5, 2003, pp. 369-376.

[15] Shang D. G., Barkey M. E., Wang Y., Lim T. C., "Effect of Fatigue Damage on the Dynamic Response Frequency of Spot-Welded Joints," *International Journal of Fatigue*, Vol. 25, 2003, pp. 311-316.



شکل ۱۰ روند تغییرات فرکانس طبیعی اتصالات نوع A، B و C در عمرهای مختلف خستگی. (الف) اتصال A، (ب) اتصال B و (ج) اتصال C

۷- مراجع

[1] Barauser S., Pepke L. A., Weber G., "Rethmeier M., Deformation Behavior of Spot-Welded High Strength Steels for Automotive Applications", *Materials Science and Engineering A527*, 2010, pp. 7099-7108.

- [20] Bursak, M., Mamuzic, I., "Fatigue Properties of Galvanized Higher-Strength Steel Sheets," *METALURGIJA*, Vol. 46, No. 4, 2007, pp. 277-280.
- [21] Ewins D. J., *Modal Testing: Theory, Practice and Application*, Second Edition, Baldock, Herfordshire, England, Research Studies Press LTD, 2000.
- [22] PULSE, Analyzers and Solutions, Release 11.2, Bruel & Kjaer, Sound and Vibration Measurement A/S, Denmark, 2006, Key Code: 2320 72F0.
- [23] ME'scopeTM, Vibrant Technology, Inc. Visual Modal Pro (vt-550), Version: 2.0.0.21, Security Key: 10388, 2001.
- [16] Shang D. G., Barkey M. E., "Analysis of Fatigue Crack Behavior on Dynamic Response Simulations and Experiments for Tensile-Shear Spot-Welded Joints," *Fatigue Fract. Engng. Mater Struct.*, Vol. 29, 2006, pp. 23-30.
- [17] Wang G., Barkey M. E., "Fatigue Crack Identification in Tensile-Shear Spot Welded Joints by Dynamic Response Characteristics," *Transactions of the ASME*, Vol. 127, 2005.
- [18] Wang G., Barkey M. E., "Fatigue Cracking and Its Influence on Dynamic Response Characteristics of Spot Welded Specimens," *Society for Experimental Mechanics*, Vol. 44, No. 5, 2004, pp. 512-521.
- [19] Pluvinage G., *Fracture and Fatigue Emanating from Stress Concentrators*, Dordrecht, Netherlands, Springer, 2003.