



پیش بینی عمر خستگی اتصالات جوش نقطه ای تحت بارگذاری برشی دینامیکی یک سویه

علی حبیبی زاده¹، سعید گلابی^{2*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، نجف آباد

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان

* کاشان، صندوق پستی 8731751167، golabi-s@kashanu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

یکی از عوامل ایجاد سر و صدا در خودروهای مستهلک، جدایی اتصالات نقطه جوش در اثر پدیده خستگی می باشد. برای تعیین عمر خستگی نقطه جوش‌ها بر روی ورق‌های مورد استفاده در صنعت خودرو سازی در این تحقیق، عمر خستگی اتصالات جوش نقطه ای برای قطر ناگت 6 میلی متر تحت بارگذاری برشی دینامیکی یک سویه روی ورق های نازک فولادی ST12 مورد بررسی قرار گرفته و اثر ضخامت و گام نقطه جوش ها طبق استاندارد C-G006 نسبت به یکدیگر ارزیابی شده است. برای این منظور نمونه تست طبق استاندارد DIN50165 انتخاب و در تحلیل المان محدود جهت تحلیل استاتیکی از نرم افزار آباکوس استفاده و برای تخمین عمر خستگی نقطه جوش از نرم افزار اف ای - سیف و نمودار استاندارد ASME1998 برای فولاد استفاده گردید. عمر خستگی براساس تنش و معیارهای گودمن و گربر بدست آمد. جهت آزمایش خستگی از دستگاه تست خستگی که توسط نویسندگان این مقاله طراحی شده است، استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که خروجی المان محدود معیار گربر با نتایج آزمایشات تطابق خوبی دارد. همچنین نتایج المان محدود نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت، استحکام و عمر خستگی افزایش می یابد. از دیگر نتایج بدست آمده می توان به عدم تاثیر گام نقطه جوش در حالت مقارن روی عمر خستگی اشاره نمود. از مهمترین خروجی‌های این پژوهش، نمودار تنش - عمر برای نقطه جوش با قطر ناگت 6 میلی‌متر روی ورق ST12 می‌باشد که می‌تواند در صنعت خودرو سازی مورد استفاده طراحان قرار گیرد و موجب کاهش زمان تولید و افزایش راندمان گردد.

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 24 تیر 1393
پذیرش: 01 مهر 1393
ارائه در سایت: 04 آبان 1393
کلید واژگان:
عمر خستگی
جوش مقاومتی نقطه ای
المان محدود
دستگاه تست خستگی

Prediction of fatigue life of spot welding connections subjected to unidirectional dynamic shear load

Ali Habibzadeh¹, Sa'id Golabi^{2*}

1- Department of Mechanical Engineering, Najaf Abad Branch, Islamic Azad University, Najaf Abad, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

* P.O.B. 8731751167 Kashan, Iran, golabi-s@kashanu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 15 July 2014
Accepted 23 September 2014
Available Online 26 October 2014

Keywords:
Fatigue life
Resistance spot welding
Finite element
Fatigue test machine

ABSTRACT

Disjoining of spot welds in steel sheets because of fatigue failure is one of the main reasons for noise in used cars. Fatigue life of spot welding connections of ST12 steel sheets, used in car industry, with 6mm nugget diameter and subjected to uniaxial dynamic shear load is studied and determined in this research. Sheet thickness and other spot welding parameters including weld pitch are considered and compared according to C-G006 standard utilizing the test sample selected according to DIN50165 standard. ABAQUS and FE-SAFE software is used for static and fatigue life analysis respectively. To generate Stress-Number of life cycle (S-N) diagram, the equivalent fully reversed load is determined using Goodman and Gerber theories since the applied load is unidirectional. The resultant finite element results were verified experimentally by a fatigue test machine designed and manufactured during this study by the authors. The finite element results showed a good agreement with Gerber criterion and it was concluded that with increase in sheet thickness, both static strength and fatigue life would be increased. The results also indicate that the weld pitch has no effect on fatigue life. Stress-life graph for 6mm nugget diameter spot weld on ST12 sheet is the most important output of this research that can be used in automobile industry.

1- مقدمه

جهت پیش بینی عمر خستگی و استحکام اتصالات نقطه جوش می‌توان به روش‌های تنش - عمر، کرنش - عمر و مکانیک شکست، اشاره نمود [1]. محاسبه‌ی بار خستگی در اتصالات نقطه جوش به دلیل وجود بارهای نوسانی در بدنه‌ی خودرو از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. لذا تکنیک‌های مختلف محاسبه‌ی عمر خستگی در اتصالات، ورق به ورق آزموده شده است تا بهترین روش‌ها برای تعیین عمر به دست آیند. از نمونه فعالیت‌های انجام

در عصر حاضر بسیاری از سازه‌های فلزی توسط اتصالات نقطه جوش به یکدیگر متصل می‌گردند. به عنوان مثال می‌توان به صنایع خودروسازی که در آن حدود 3000 تا 4000 نقطه جوش برای ایجاد یک خودرو مورد نیاز است، اشاره نمود. بنابراین استحکام و عمر خستگی این اتصالات از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد.

شده روش کانگ و همکارانش [2] می‌باشد که محل ایجاد ترک نیز در آنجا محاسبه می‌گردد. محاسبه‌ی عمر در تغییرات دامنه‌ای کرنش نیز به صورت سیکلیک در حالت‌های تنش برشی و ام.سی.پی¹ و تغییر تنش برشی در آنالیز المان محدود و تجربی مورد مقایسه قرار گرفته و نتایج قابل قبولی حاصل شده است [3]. تغییرات فرکانس طبیعی بر اساس پیشروی عمر خستگی یکی از معیارهای تعیین عمر خستگی و پیش بینی میزان عمر خستگی می‌باشد. به گونه‌ای که پس از گذشت 60 درصد از عمر خستگی پاسخ دینامیکی به شدت کاهش می‌یابد. ترک خستگی در سطح نمونه، معمولاً در لبه منطقه متأثر از حرارت² یا ناگت ظاهر می‌شود و تنها به وضوح بر روی سطح بیرونی اتصال در حدود 95% از عمر خستگی نمونه‌ها قابل مشاهده است. از آنجا که محل معمول ترک خستگی در نمونه‌های کششی - برشی به خوبی شناخته شده است، ممکن است در موارد خاص به منظور مشاهده ترک خستگی از عکس میکروگرافی استفاده شود [4]. پیش‌بینی عمر خستگی سازه‌های صفحه‌ای چند نقطه جوش داده شده با استفاده از فاکتور شدت تنش معادل، از دیگر روش‌ها برای بررسی عمر خستگی بوده و میزان تنش و کرنش در پیشانی ترک می‌تواند توسط این معیار محاسبه گردد [5]. یکی از روش‌های تحلیل عمر خستگی، بررسی مسیر رشد ترک با استفاده از ضریب شدت تنش و همچنین روش‌های تجربی در برخی از سطوح مقاطع، مشخص می‌باشد. مدل اسکورکاپ³ نمونه خوبی برای بررسی مقاومت و عمر خستگی نقطه جوش تحت حالت‌های ترکیبی بی باری و بارگذاری برشی است. فاکتور شدت تنش در این نمونه به صورت غیر یکنواخت بوده که به خاطر طراحی و نحوه بارگذاری روش مکانیک شکست، اغلب برای بررسی فاکتور شدت تنش ماکزیمم در نقاط بحرانی نقطه جوش مورد استفاده قرار گرفته است [6]. روش‌های نوین مانند روش شبکه‌های عصبی نیز جهت بهینه سازی طراحی نقطه جوش از فعالیت‌های صورت گرفته می‌باشد [7]. تعیین عمر خستگی و مقایسه‌ی بین مقاومت خستگی نقطه جوش و فلز پایه در مقاطع تی شکل و مقایسه آن با حالت تجربی توسط لی و همکارانش انجام شده است. این مطالعه جهت بررسی عمر خستگی در پنجره‌ی اتوبوس و نحوه‌ی ارتباط میان مدل معرفی شده و مدل واقعی می‌باشد [8].

سین و همکارانش، عمر خستگی را توسط ضریب لاغری⁴ تخمین زده‌اند. ضریب براساس تنش گسیختگی و زمان بدست آمده توسط تست شبه استاتیکی برشی بدست می‌آید. روش افت پتانسیل جریان مستقیم برای بررسی، آغاز شد و انتشار ترک‌ها علاوه بر آزمون فوق، مورد استفاده قرار گرفت. در این روش ضریب لاغری را توسط جریان جوش تغییر می‌دهیم که مشخصه ثابت از 2 یا 3 لبه جوش می‌باشد. عمر خستگی از معادلات تخمین زده شده و با نتایج تجربی مقایسه می‌شود و در نهایت آنالیز بین تعداد لبه، جریان جوش و عمر خستگی با این روش می‌توان زمان ذخیره فرآیند و هزینه برای یک سیکل عمر سازه را پیش بینی کرد [9]. در بارگذاری تصادفی سه روش برای تعیین عمر وجود دارد: 1- روش تنش اسمی با استفاده از معادله پیش بینی عمر خستگی 2- کرنش محلی برای بدست آوردن عمر شروع ترک 3- استفاده از روش مکانیک شکست برای بدست آوردن عمر انتشار ترک. روش دوم به دلیل اندازه گیری در ریشه ناگت و همچنین تغییرات خواص مکانیکی در آن منطقه سخت تر است و آسیب می‌تواند باعث کاهش سختی سازه شود. اندازه‌گیری فرکانس طبیعی می‌تواند به عنوان یک روش غیر مخرب برای آسیب باشد. تغییرات

فرکانس طبیعی نسبت به عمر خستگی غیر خطی بوده و فرکانس طبیعی به طور چشمگیری در انتهای عمر خستگی کاهش می‌یابد. با استفاده از فرکانس طبیعی و ارتعاش می‌توان محل ترک و ایجاد یک مدل تئوری برای پیش بینی طول ترک را ایجاد نمود. مقایسه نتایج پیش‌بینی عمر نشان می‌دهد که با استفاده از روش تغییر فرکانس طبیعی می‌توان نتایجی شبیه به حالت آزمایش بدست آورد [10]. روش الاستوپلاستیک المان محدود برای بدست آوردن تنش محلی و کرنش نزدیک ریشه ناگت در منطقه متأثر از حرارت، گرہ‌ها با فواصل مختلف نسبت به ریشه ناگت انتخاب شد، با روش‌های پیشین عمر خستگی جوش نقطه‌ای با معادله موروز اصلاح شده، معادله آسیب منسون - کافین و معادله آسیب اسمیت - واتسون - توپر پیش بینی می‌شود. نتایج پیش بینی عمر نشان داد که هر دو فرمول، نتایج خوبی با اطلاعات تجربی در عمر خستگی سیکل پایین دارد [11].

2- مبانی تئوری

با توجه به اینکه هدف اصلی این تحقیق تعیین عمر خستگی نقطه جوش‌ها با قطر ناگت 6 میلی‌متر به طور تحلیلی و آزمایشی بر روی ورق‌های مورد استفاده در صنعت خودرو می‌باشد و با توجه به اینکه برای تحلیل و پیش‌بینی آزمایشی عمر خستگی بارگذاری یک سوبه مطابق شکل 1 وارد می‌شود، در تحلیل‌ها از معیارهای گریر طبق رابطه (1) و گودمن طبق رابطه (2) استفاده گردیده است [1].

$$\frac{S_a}{S_f} + \left(\frac{S_m}{S_{ut}}\right)^2 = 1 \quad (1)$$

$$\frac{S_a}{S_f} + \frac{S_m}{S_{ut}} = 1 \quad (2)$$

3- آزمایش تجربی

3-1- آزمایش استاتیکی

ابتدا دو ورق فولادی ST12 به ابعاد $147/5 \times 45 \times 1$ میلی‌متر مطابق شکل 2 بر روی یکدیگر قرار داده سپس پارامترهای فرآیندی جوش برای بدست آوردن قطر ناگت 6 میلی‌متر، تنظیم و به وسیله گان C سه نقطه جوش بر روی دو ورق ایجاد گردیده است. فاصله‌ی دو نقطه جوش را طبق استاندارد CG-006 حداقل 20 یا 25 میلی‌متر در نظر گرفته تا پدیده اتصال کوتاه در آن‌ها رخ ندهد.

جهت تست استاتیکی نمونه‌ها مطابق شکل 3 با قیچی تخریب مورد آزمایش قرار گرفته و پس از تخریب نمونه‌ها، قطعه کار مورد ارزیابی قرار گرفته است. اگر ناگت جوش بطور صحیح تشکیل شده باشد، قطر ناگت مطابق استاندارد CG-006 اندازه‌گیری می‌گردد. طبق استاندارد قطر ناگت می‌تواند تا $\pm 0/1$ تلرانس داشته باشد و اگر ناگت جوش نگرفته، ضعیف و یا قطر ناگت مناسب نباشد پارامترهای فرآیند جوش را تغییر داده تا نقطه جوش با قطر ناگت مناسب ایجاد شود.

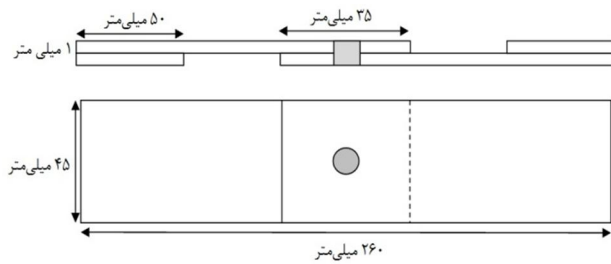
در شکل 4 نمونه تست تخریب برای قطر ناگت 6 میلی‌متر نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشخص است پارگی در ورق ایجاد شده که این نشان دهنده مناسب بودن استحکام جوش است.

1- Modified Coach Peel (MCP)

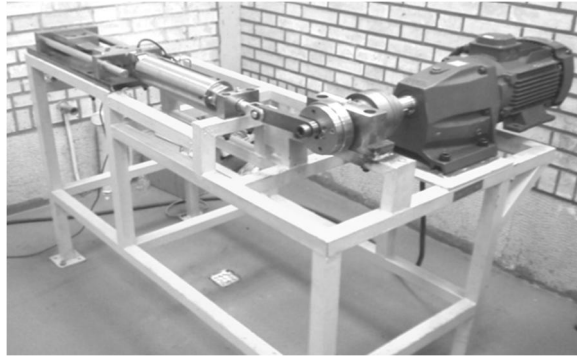
2- HAZ

3- Square-cup

4- Lethargy



شکل 5 مدل اتصال نقطه جوش طبق استاندارد DIN50165



شکل 6 دستگاه تست خستگی

جدول 1 پارامترهای فرآیندی

تیپ الکتروود	زمان جوش (میلی ثانیه)	نیروی الکتروود (دکا نیوتن)	جریان (کیلو آمپر)
D6	10	260	9

جدول 2 خصوصیات مکانیکی فولاد ST12

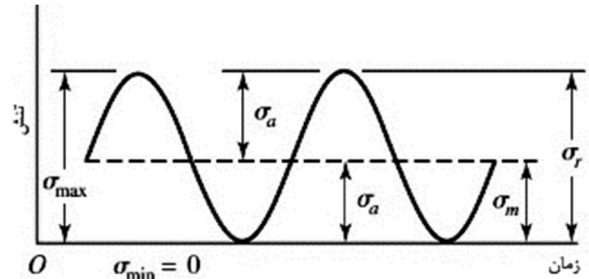
مدول یانگ (گیگاپاسگال)	ضرب پواسون	تنش تسلیم (مگا پاسگال)	تنش نهایی (مگا پاسگال)	تغییر طول
200	0/3	233	314	0/42

پارامترهای فرآیندی (شدت جریان، نیروی الکتروود و زمان) و همچنین نوع الکتروود، متناسب با قطر ناگت 6 مطابق جدول شماره 1 مورد استفاده قرار گرفته است. جنس الکتروود از مس-کروم-زیرکونیوم می باشد. همچنین خصوصیات مکانیکی فولاد ST12 مطابق جدول شماره 2 می باشد.

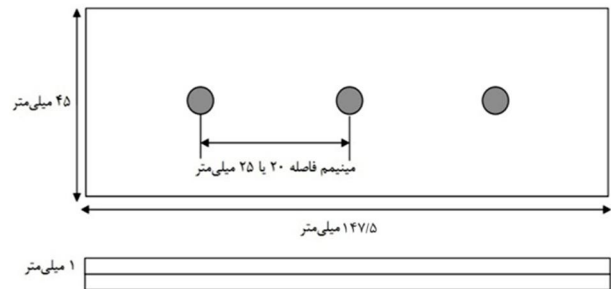
برای تست نقطه جوشها از دستگاه تست خستگی محوری با نیروی کششی - برشی مطابق شکل 6 مورد استفاده قرار گرفته است. قابل ذکر است که مکانیزم این دستگاه جدید بوده و توسط نویسندگان این مقاله طراحی و ساخته شده است. مکانیزم دستگاه بصورت سیستم لنگ می باشد و با تغییر فاصله لنگ از مرکز فلاپویل نیروی مورد نظر توسط فشرده شدن فنر تامین می گردد. همچنین تستها در دمای اتاق و در فرکانس 2/5 هرتز انجام شده است.

مراحل تست خستگی بدین صورت است که ابتدا نمونه تست را بین فکهای دستگاه بسته (شکل 7-الف) سپس نیروی دستگاه را تنظیم نموده و تست شروع می گردد. پس از طی تعدادی سیکل ترک اولیه در نمونه ایجاد می شود (شکل 7-ب) و در ادامه ترک گسترش یافته (شکل 7-ج) و در نهایت پدیده شکست در ورق و یا نقطه جوش به وجود می آید. (شکل 7-د)

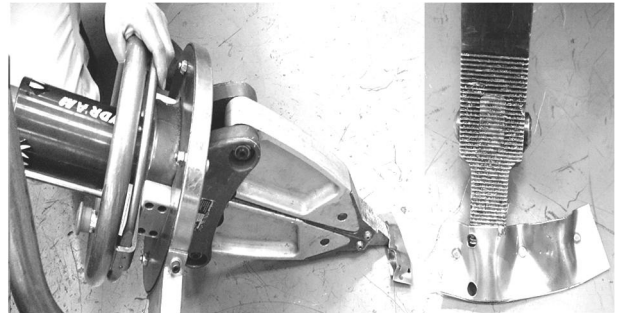
نتایج بدست آمده از تست خستگی نقطه جوش با قطر ناگت 6 میلی متر تحت نیروی 5000، 4000 و 1000 نیوتن به ترتیب مطابق جدول 3، 4 و 5 می باشد. همچنین نمونه تست خستگی پس از شکست تحت نیروی 5000، 4000 و 1000 نیوتن مطابق شکل 8 می باشد.



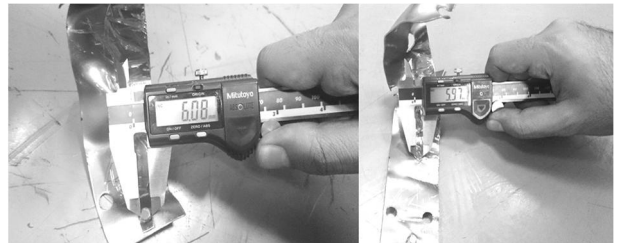
شکل 1 نمودار تنش تکرار شونده یک سوبه R=0 و A=1



شکل 2 نمونه برای تست استاتیکی



شکل 3 تست استاتیکی نمونه با قیچی تخریب



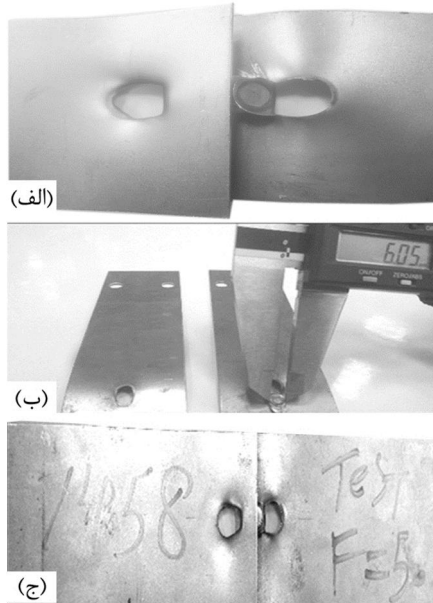
شکل 4 اندازه گیری نقطه جوش با قطر ناگت 6 میلی متر پس از تست تخریب

همچنین پس از اطمینان از استحکام جوش قطر ناگت اندازه گیری شده که در نمونه هایی که برای قطر ناگت 6 میلی متر تنظیم شده بودند، عدد 5/97 و 6/08 توسط کولیس قرائت شد، که طبق استاندارد CG-006 مورد تایید می باشد.

پس از اطمینان از صحت قطر نقطه جوش و استحکام مناسب آن با همان گان و پارامترهایی که توانسته تست تخریب را پاس کند 15 نمونه تست برای آزمایش خستگی ایجاد گردید، که 5 نمونه تحت بارگذاری 1000 نیوتن، 5 نمونه تحت بارگذاری 4000 نیوتن و 5 نمونه تحت بارگذاری 5000 نیوتن قرار داده شدند.

3-2- آزمایش خستگی

صفحاتی از جنس فولاد ST12 به ضخامت 1 میلی متر مطابق استاندارد DIN50165 و با ایجاد یک نقطه جوش روی آن مورد بررسی قرار گرفت. مدل اتصالات نقطه جوش مورد استفاده در این تحقیق مطابق شکل 5 می باشد.



شکل 8 نمونه تست خستگی با قطر ناگت 6 میلی متر تحت نیروی الف) 1000 نیوتن
ب) 4000 نیوتن ج) 5000 نیوتن

جدول 5 نتایج آزمایش خستگی نقطه جوش با قطر ناگت 6 میلی متر تحت نیروی 1000 نیوتن

شماره نمونه	قطر ناگت (میلی متر)	نیرو (نیوتن)	فرکانس (هرتز)	نسبت تنش (R)	تعداد سیکل شکست	محل شکست
1	6/1	1000	2/5	0	566792	HAZ
2	6	1000	2/5	0	518953	HAZ
3	6	1000	2/5	0	520369	HAZ
4	5/9	1000	2/5	0	489875	HAZ
5	6	1000	2/5	0	549768	HAZ

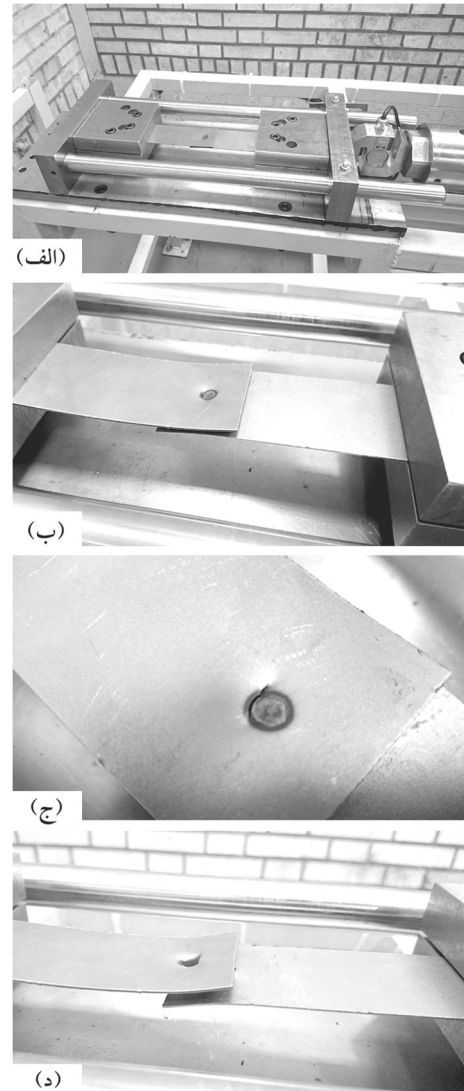
در شکل 9 نتایج حاصل از آزمایش تجربی برای 15 نمونه تست تحت بارگذاری 1000، 4000 و 5000 نیوتن نمایش داده شده است. همانطور که از شکل استنتاج می شود عمر خستگی با افزایش نیرو، کاهش می یابد همچنین نتایج آزمایشات به یکدیگر نزدیک می باشد.

4- شبیه سازی المان محدود

برای مدل سازی و شبیه سازی اتصالات نقطه جوش جهت تحلیل استاتیکی از نرم افزار آباکوس/استاندارد¹ و همچنین برای تحلیل خستگی از نرم افزار اف ای-سیف² استفاده شده است.

از خروجی نرم افزار آباکوس به عنوان ورودی نرم افزار اف ای-سیف استفاده می شود و جهت تحلیل خستگی از نمودار خستگی فولاد طبق استاندارد ASME 1998 استفاده شده است.

المان انتخابی برای مدل سازی نقطه جوش در نرم افزار آباکوس المان C3D8R است. این المان، یک المان سه بعدی با هشت گره است که از روش انتگرال کاهش یافته برای حل انتگرال ها استفاده می کند. این المان در هر گره دارای سه درجه آزادی جابه جایی در جهت محورهای X، Y و Z است همچنین جهت تحلیل دقیق تر مدل را به سه منطقه فلز پایه، منطقه متأثر از جوش و ناگت تقسیم می کنیم که در محل ناگت و منطقه متأثر از حرارت از المان هایی ریزتر مطابق شکل 10 استفاده شده است. خواص مکانیکی ورق و نقطه جوش یکسان در نظر گرفته شده است.



شکل 7 مراحل تست خستگی الف) نصب نمونه تست در دستگاه ب) ایجاد ترک اولیه ج) گسترش ترک د) شکست نمونه

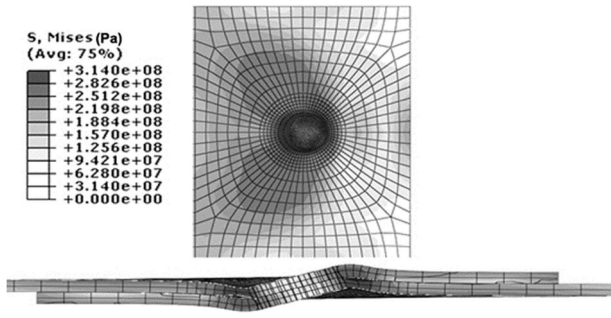
جدول 3 نتایج آزمایش خستگی نقطه جوش با قطر ناگت 6 میلی متر تحت نیروی 5000 نیوتن

شماره نمونه	قطر ناگت (میلی متر)	نیرو (نیوتن)	فرکانس (هرتز)	نسبت تنش (R)	تعداد سیکل شکست	محل شکست
1	6	5000	2/5	0	17045	HAZ
2	6/1	5000	2/5	0	18729	HAZ
3	5/9	5000	2/5	0	14720	HAZ
4	5/9	5000	2/5	0	16853	HAZ
5	6	5000	2/5	0	16238	HAZ

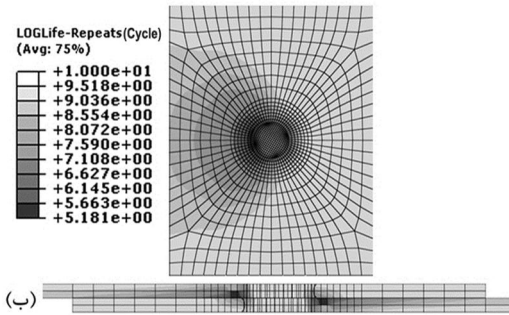
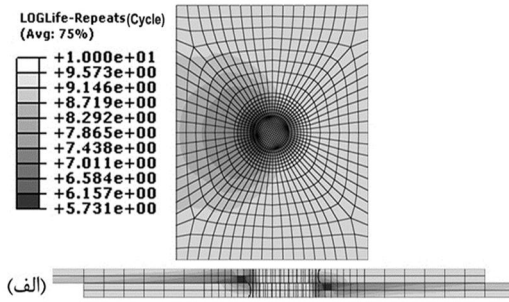
جدول 4 نتایج آزمایش خستگی نقطه جوش با قطر ناگت 6 میلی متر تحت نیروی 4000 نیوتن

شماره نمونه	قطر ناگت (میلی متر)	نیرو (نیوتن)	فرکانس (هرتز)	نسبت تنش (R)	تعداد سیکل شکست	محل شکست
1	6	4000	2/5	0	56005	HAZ
2	6/1	4000	2/5	0	59748	HAZ
3	5/9	4000	2/5	0	50789	HAZ
4	5/9	4000	2/5	0	49857	HAZ
5	6/1	4000	2/5	0	58807	HAZ

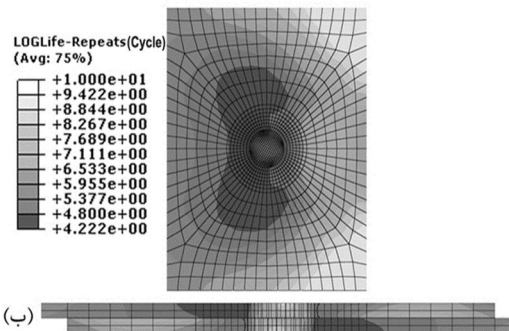
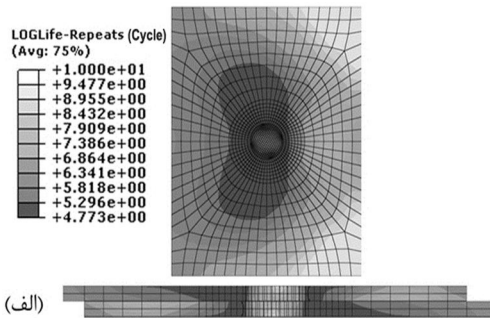
1- Abaqus/Standard
2- Fe-Safe



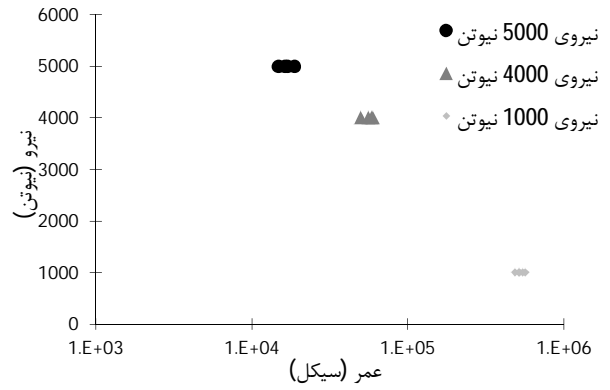
شکل 13 کانتور تنش فون مایز برای قطر ناگت 6 میلی متر تحت نیروی 5000 نیوتن



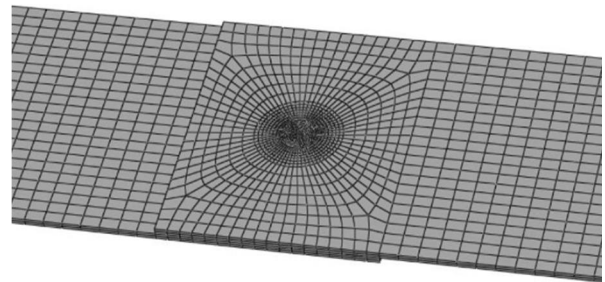
شکل 14 تحلیل خستگی برای قطر ناگت 6 میلی متر تحت نیروی 1000 نیوتن (الف) تئوری گربر، (ب) تئوری گودمن



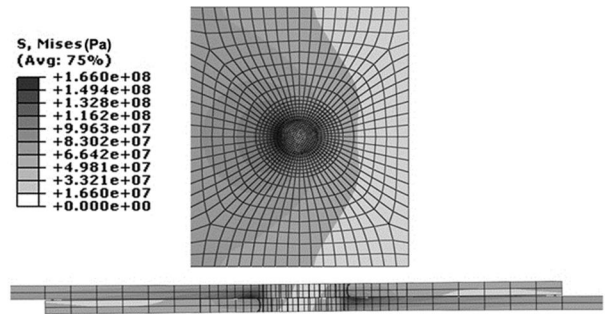
شکل 15 تحلیل خستگی برای قطر ناگت 6 میلی متر تحت نیروی 4000 نیوتن (الف) تئوری گربر، (ب) تئوری گودمن



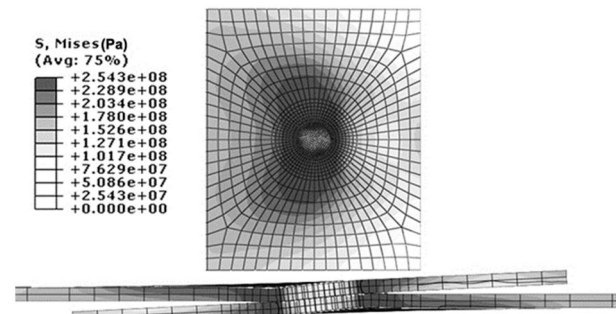
شکل 9 نمودار نیرو - عمر خستگی برای قطر ناگت 6 میلی متر تحت نیروی 1000، 4000 و 5000 نیوتن



شکل 10 مدل سازی و مش بندی ورق و نقطه جوش با المان سه بعدی جامد



شکل 11 کانتور تنش فون مایز برای قطر ناگت 6 میلی متر تحت نیروی 1000 نیوتن



شکل 12 کانتور تنش فون مایز برای قطر ناگت 6 میلی متر تحت نیروی 4000 نیوتن

4-1- تأثیر نیرو بر عمر خستگی

در شکل 11، 12 و 13 به ترتیب نتایج تحلیل استاتیکی براساس کانتور تنش فون مایز برای قطر ناگت 6 میلی متر تحت نیروی 1000، 4000 و 5000 نیوتن نمایش داده شده است.

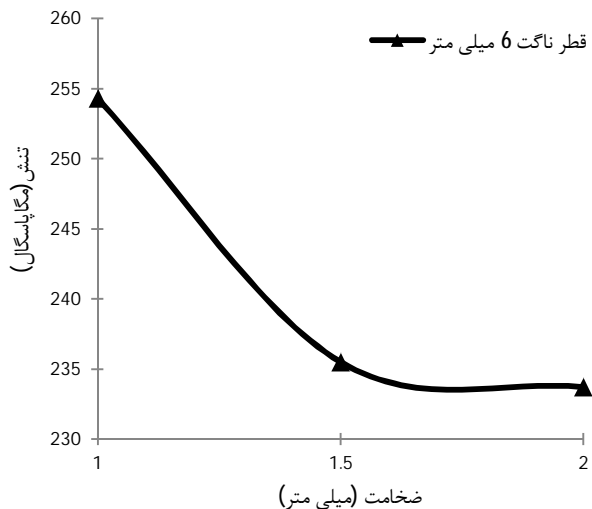
در شکل 14، 15 و 16 به ترتیب نتایج تحلیل خستگی برای قطر ناگت 6 میلی متر تحت نیروی 1000، 4000 و 5000 نیوتن براساس دو تئوری گربر و گودمن نمایش داده شده است.

افزایش ضخامت ورق، عمر خستگی افزایش می یابد. این افزایش عمر خستگی در ضخامت 1 به 1/5 بصورت خطی افزایش می یابد ولی از ضخامت 1/5 به 2 افزایش عمر خستگی بسیار ناچیز می شود [12].

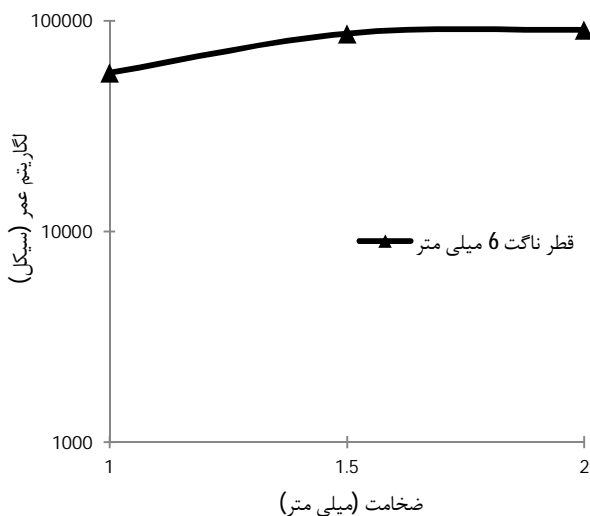
4-3- تأثیر گام نقطه جوش بر عمر خستگی

برای تعیین مینیمم گام نقطه جوش ها از استاندارد KES CG-006 استفاده شده است. طبق این استاندارد مینیمم گام نقطه جوش ها از مرکز ناگت های جوش برای ضخامت 1 میلی متر حدود 20 میلی متر در نظر گرفته شده تا پدیده اتصال کوتاه در آن رخ ندهد همچنین در این استاندارد ماکزیمم گام مطرح نشده است. بنابراین جهت تحلیل استاتیکی ابتدا دو ورق به ابعاد $120 \times 147/5 \times 1$ میلی متر مطابق شکل 21 زیر آماده گردید.

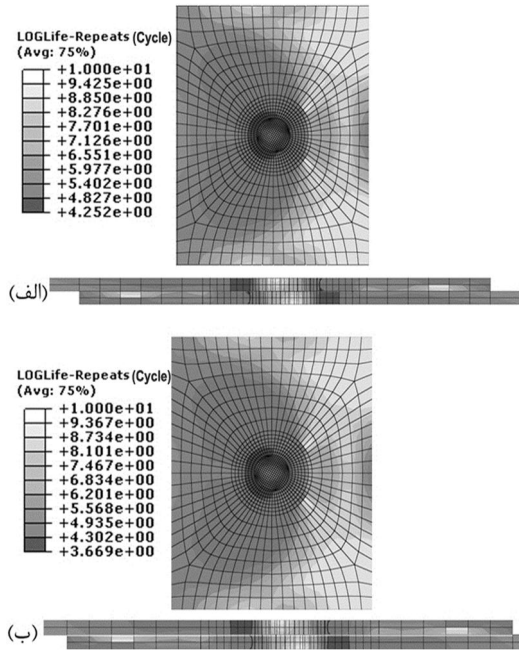
جهت تحلیل المان محدود استاتیکی و خستگی دو نقطه جوش به قطر ناگت 6 میلی متر و گام 20 تا 100 میلی متر تحت نیروهای 1000 و 3000 را مورد تحلیل قرار می دهیم نتایج تحلیل استاتیکی و خستگی برای نیروی 1000 و 3000 نیوتن به ترتیب مطابق جدول 6 و 7 می باشد. همانطور که از نتایج جداول 6 و 7 مشخص است گام نقطه جوش تأثیری بر عمر خستگی ندارد.



شکل 18 نمودار تنش بر حسب ضخامت براساس تنش فون مایز تحت نیروی 4000 نیوتن

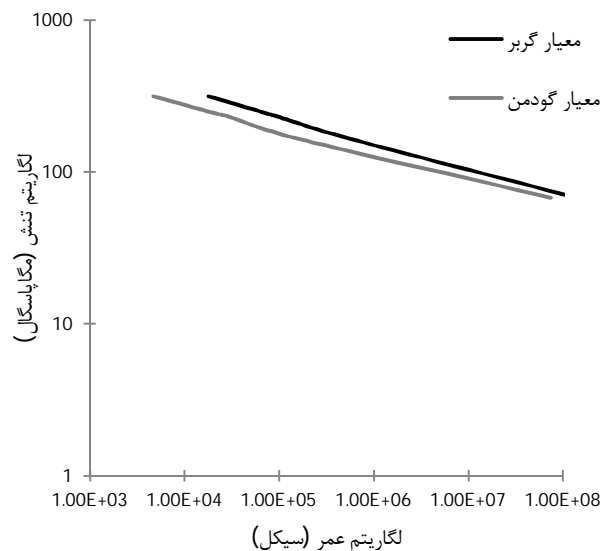


شکل 19 نمودار لگاریتم عمر بر حسب ضخامت براساس تئوری گربن تحت نیروی 4000 نیوتن



شکل 16 تحلیل خستگی برای قطر ناگت 6 میلی متر تحت نیروی 5000 نیوتن (الف)

تئوری گربن، (ب) تئوری گودمن



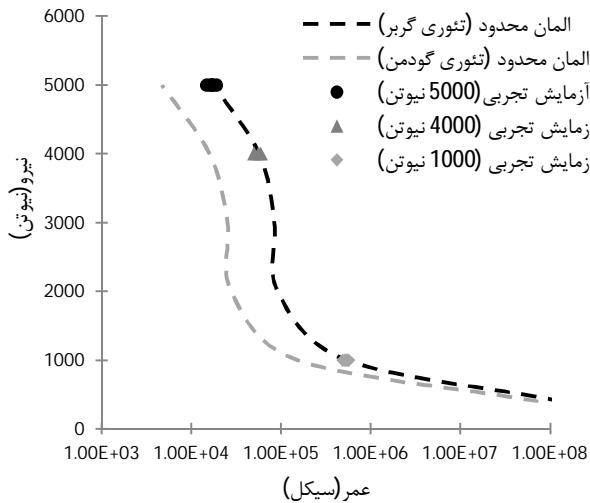
شکل 17 نمودار لگاریتم تنش - عمر برای قطر ناگت 6 میلی متر طبق تئوری گودمن و گربن

نتایج تحلیل المان محدود خستگی نقطه جوش برای تئوری های گربن و گودمن برای قطر ناگت 6 میلی متر تحت نیروی 400-5000 نیوتن در شکل 17 نمایش داده شده است.

4-2- تأثیر ضخامت بر عمر خستگی

جهت بررسی اثر ضخامت بر روی عمر خستگی، از سه ورق به ضخامت 1، 1/5 و 2 میلی متر در تحلیل استاتیکی و خستگی استفاده شده است. نتیجه تحلیل استاتیکی نقطه جوش با قطر ناگت 6 میلی متر تحت نیروی 4000 نیوتن در شکل 18 نمایش داده شده است. همانطور که از نمودار مشخص است با افزایش ضخامت مقدار تنش کاهش می یابد [12].

همچنین نتایج تحلیل خستگی نقطه جوش با قطر ناگت 6 میلی متر تحت نیروی 4000 نیوتن، براساس دو تئوری گربن و گودمن به ترتیب مطابق شکل 19 و 20 می باشد. همانطور که از روند نمودارها مشخص است با



شکل 22 نمودار مقایسه‌ای نیرو - عمر خستگی مربوط به نتایج المان محدود برای تئوری‌های گودمن و گربر با نتایج تست برای قطر ناگت 6 میلی‌متر و نیروی 1000، 4000 و 5000 نیوتن

جدول 8 درصد خطای آزمایش تجربی خستگی با المان محدود تئوری گودمن

درصد خطای	میانگین عمر خستگی (سیکل)		نیرو (نیوتن)	قطر ناگت (میلی‌متر)
	المان محدود (تئوری گودمن)	آزمایش تجربی		
72	4664	16717	5000	6
71	15901	55041	4000	6
71	151626	529151	1000	6

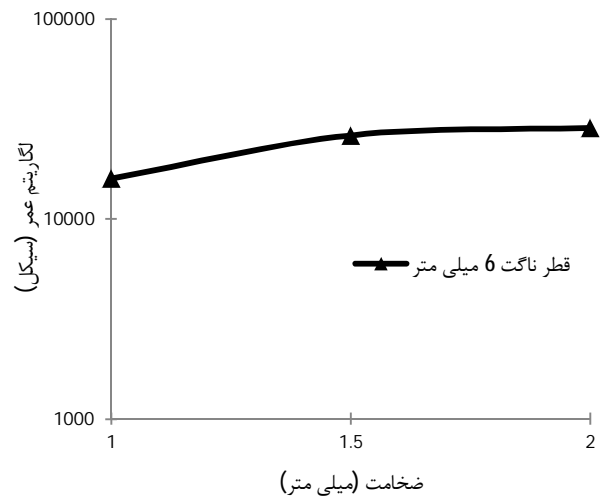
جدول 9 درصد خطای آزمایش تجربی خستگی با المان محدود تئوری معیار گربر

درصد خطای	میانگین عمر خستگی (سیکل)		نیرو (نیوتن)	قطر ناگت (میلی‌متر)
	المان محدود (تئوری گربر)	آزمایش تجربی		
7	17873	16717	5000	6
3	56849	55041	4000	6
1/6	537596	529151	1000	6

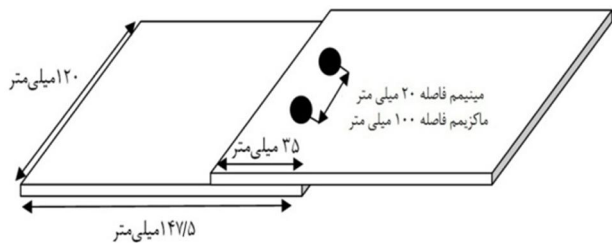
در جداول 8 و 9 به ترتیب درصد خطای نتایج آزمایشات تجربی خستگی با المان محدود تئوری گودمن و گربر را نشان می‌دهد. همانطور که از جداول استخراج می‌شود نتایج آزمایشات تجربی برای نیروی 1000، 4000 و 5000 نیوتن حدود 72 درصد خطا با تئوری گودمن و حدود 4 درصد خطا با تئوری گربر دارد.

6- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

- با افزایش نیرو از 400 به 5000 نیوتن، عمر خستگی کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج آزمایش تجربی و المان محدود، عمر خستگی برای ناگت 6 در نیروی 400 نیوتن حدود 3/3 برابر بیشتر از همان قطر در نیروی 5000 نیوتن می‌باشد.
- از نتایج المان محدود و تست به نظر می‌رسد که خستگی و شکست بیشتر در منطقه متأثر از جوش به وجود می‌آید.
- مقایسه نتایج المان محدود و آزمایشات تجربی نشان می‌دهد که آزمایشات تجربی با المان محدود معیار گربر تطابق بسیار نزدیکی دارد و حدود 4 درصد خطا بین آن‌ها وجود دارد.
- نتایج حاصل از تغییر گام نقطه جوش تحت نیروی 1000 و 3000 نیوتن



شکل 20 نمودار لگاریتم عمر بر حسب ضخامت براساس تئوری گودمن تحت نیروی 4000 نیوتن



شکل 21 مدل اتصال نقطه جوش تحت گام متفاوت

جدول 6 نتایج تحلیل استاتیکی و خستگی برای قطر ناگت 6 میلی‌متر تحت نیروی 3000 نیوتن برای فواصل 20-100 میلی‌متر

معیار	معیار	تنش	نیروی هر نقطه جوش	گام نقطه جوش (میلی‌متر)	قطر ناگت (میلی‌متر)
گربر (سیکل)	گودمن (سیکل)	فون میز (مگاپاسگال)	3000 (نیوتن)	20	6
84418	25210	236/8	3000	40	6
85087	25448	236/7	3000	60	6
84285	25163	237	3000	80	6
81790	24267	237/9	3000	100	6
80999	23984	238/1	3000		6

جدول 7 نتایج تحلیل استاتیکی و خستگی برای قطر ناگت 6 میلی‌متر تحت نیروی 1000 نیوتن برای فواصل 20-100 میلی‌متر

معیار	معیار	تنش	نیروی هر نقطه جوش	گام نقطه جوش (میلی‌متر)	قطر ناگت (میلی‌متر)
گربر (سیکل)	گودمن (سیکل)	فون میز (مگاپاسگال)	1000 (نیوتن)	20	6
134688	4445	198/4	1000	40	6
136157	45112	198/3	1000	60	6
133729	43557	198/5	1000	80	6
133602	42739	198/7	1000	100	6
138495	46562	198	1000		6

5- مقایسه نتایج المان محدود و آزمایشات تجربی

نتایج حاصل از آزمایشات تجربی برای نقطه جوش با قطر ناگت 6 میلی‌متر و المان محدود در شکل 22 نشان داده شده است. همانطور که از نمودار مشخص است نتایج تجربی تطابق بسیار خوبی با نمودار المان محدود گربر دارد.

- [2] H. Kang, M. E. Barkey, Y. Lee, Evaluation of multiaxial spot weld fatigue parameters for proportional loading, *International Journal of Fatigue* 22, pp. 691-702, 2000.
- [3] N. Pan, S. Sheppard, Spot welds fatigue life prediction with cyclic strain range, *International Journal of Fatigue* 24, pp. 519-528, 2002.
- [4] D. G. Shang, M. E. Barkey, Y. Wang, T. C. Lim, Effect of fatigue damage on the dynamic response frequency of spot-welded joints, *International Journal of Fatigue* 25, pp. 311-316, 2003.
- [5] H. Lee, N. Kim, Fatigue life prediction of multi-spot-welded panel structures using an equivalent stress intensity factor, *International Journal of Fatigue* 26, pp. 403-412, 2004.
- [6] S. H. Lin, J. Pan, P. Wung, J. Chiang, A fatigue crack growth model for spot welds under cyclic loading conditions, *International Journal of Fatigue* 28, pp. 792-803, 2006.
- [7] J. M. Park, H. T. Kang, Prediction of fatigue life for spot welds using back-propagation neural networks, *Materials and Design* 28, pp. 2577-2584, 2007.
- [8] D. H. Bae, G. Y. Lee and S. K. Park, Fatigue Design Approach For The Spot-Welded T-type Member Using a Simulated Single Spot-Welded Joint, *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 9, No. 2, pp. 197-201, 2008.
- [9] S. R. Sin, S. M. Yang, H. S. Yu, C. W. Kim and H. Y. Kang, Fatigue Analysis for a Multi-Lap Spot Welded Joint of High Strength Steel Using Quasi Static Tensile-Shear Test, *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 9, No. 1, pp. 81-86, 2008.
- [10] R. J. Wang, D. G. Shang, Low-cycle fatigue life prediction of spot welds based on hardness distribution and finite element analysis, *International Journal of Fatigue* 31, pp. 508-514, 2009.
- [11] H. T. Kang, I. Accors, B. Patel, E. Pakalnins, Fatigue performance of resistance spot welds in three sheet stack-up, *Procedia Engineering* 2, pp. 129-138, 2010.
- [12] M.M. Rahman, A.B. Rosli, M.M. Noor, M.S.M. Sani and J.M. Julie, Effects of Spot Diameter and Sheets Thickness on Fatigue Life of Spot Welded Structure based on FEA Approach, *American Journal of Applied Sciences*, pp. 137-142, 2009.

نشان می‌دهد با افزایش گام نقطه جوش از 20-100 میلی‌متر تأثیری روی استحکام و عمر خستگی ندارد.

5- براساس نتایج تحلیل اجزا محدود با افزایش ضخامت ورق، عمر خستگی افزایش می‌یابد. بدین صورت که با افزایش ضخامت ورق از 1 به 1/5 عمر خستگی طبق تئوری‌های گریبر و گودمن به میزان 1/4 برابر و با افزایش ضخامت ورق از 1/5 به 2 میلی‌متر حدود 1/04 برابر افزایش می‌یابد. همچنین آزمایش تجربی درستی این نتیجه را برای ورق با ضخامت 1 میلی‌متر و کمتر صحت‌گذاری کرده است.

6- از نمودار تنش - عمر بدست آمده از این پژوهش می‌توان به عنوان نمودار مرجع جهت تعیین تعداد نقطه جوش با توجه به استحکام مورد نظر طراح در صنعت خودروسازی، مورد استفاده قرار گیرد. که از مزایایی آن می‌توان به استحکام بیشتر خودرو، کاهش هزینه‌ها و افزایش راندمان اشاره نمود.

7- فهرست علائم

S_a	دامنه تنش (مگا پاسگال)
S_f	حد خستگی کاملاً معکوس (مگا پاسگال)
S_m	تنش میانگین (مگا پاسگال)
S_{ut}	تنش نهایی (مگا پاسگال)

8- مراجع

- [1] R. G. Budynas, J. K. Nisbett, *Shigley's Mechanical Engineering Design*, Ninth Edition. Published by McGraw-Hill, New York, 2011.