



تعیین موقعیت‌های جوش مقاومتی نقطه‌ای در ورق‌های مونتاژی به منظور افزایش استحکام اتصال

داود منافی^۱، داود اکبری^{*}

^۱دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۶/۰۱/۲۷
بازنگری: ۱۳۹۶/۱۲/۰۷
پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۲۰
ارائه آنلاین: ۱۳۹۶/۱۱/۱۹

کلمات کلیدی:

جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای
چیدمان نقطه جوش
مدل‌سازی
الگوریتم ازدحام ذرات

خلاصه: جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای یکی از روش‌های متداول برای اتصال ورق‌های فلزی است که موقعیت و تعداد نقطه جوش‌ها روی استحکام، هزینه و زمان تولید ورق‌ها تأثیر دارد. از این رو در این مقاله رویکردی برای طراحی موقعیت نقطه جوش‌ها ارائه شده است. برای این کار از ترکیب روش اجزاء محدود و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات استفاده شده است. ابتدا یک نقطه جوش روی ورق‌های مونتاژ شده ایجاد و تحت آزمون کشش قرار گرفته است تا رفتار مکانیکی آن بدست آید. با استفاده از این رفتار، نقطه جوش در نرم‌افزار اجزاء محدود مدل‌سازی و نتایج آن با داده‌های تجربی سه نوع چیدمان متفاوت نقطه جوش‌ها صحت‌سنجی شده است. پس از صحت‌سنجی، از این مدل برای فرایند بهینه‌سازی استفاده شده است. با استفاده از این روش مشاهده شده که با انتخاب صحیح موقعیت دو، سه و چهار نقطه جوش‌ها، به ترتیب نیرو شکست تا ۱/۹، ۲/۱۳ و ۲/۷۶ برابر نسبت به نیروی شکست تک جوش افزایش یافته است. از طرفی انتخاب اتصال با چهار نقطه جوش که در دایره‌ی به شعاع ۱۸/۰۴ میلی‌متر قرار دارند و زاویه یکی از محورهای تقارن با محور بارگذاری ۶۵/۸۹ درجه است، ۲/۷۶ برابر استحکام اتصال را افزایش می‌دهد.

۱- مقدمه

جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای یکی از فرایندهای متداول در اتصال سازه‌های ورقه‌ای شکل می‌باشد. در این فرایند، گرمای جوشکاری از طریق مقاومت ناشی از عبور جریان الکتریکی بین الکترودها در یک زمان کوتاه ایجاد می‌شود و همراه با ایجاد یک فشار جزئی، اتصال برقرار می‌گردد. این فرایند عموماً برای جوشکاری ورق‌های مونتاژ شده در اتومبیل‌ها، کابین‌های کامیون و غیره استفاده می‌شود [۱ و ۲].

کیفیت نقطه جوش در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای به پارامترهای جریان، شکل و ویژگی الکترودها، فشار وارد بر ورق‌ها، کیفیت سطح ورق‌ها و زمان جوشکاری وابسته است. از این رو کنترل این پارامترها برای دستیابی به یک نقطه جوش با کیفیت مناسب ضروری است [۳]. در یک سازه اتومبیل بین ۷۰۰۰ تا ۱۲۰۰۰ نقطه جوش وجود دارد. بنابراین می‌توان بیان کرد که تعیین درست تعداد و موقعیت نقطه جوش‌ها (چیدمان نقطه جوش) برای کاهش هزینه و کیفیت سازه‌ها لازم و ضروری است [۱].

پژوهش‌های زیادی در زمینه جوشکاری نقطه‌ای انجام شده است که می‌توان آن‌ها را به سه دسته کلی تقسیم کرد: (۱) پژوهش‌های

انجام شده بر روی مدل‌سازی اجزاء محدود فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای، (۲) پژوهش‌های انجام شده جهت تعیین تأثیر پارامترهای جوشکاری روی کیفیت نقطه جوش و (۳) پژوهش‌های انجام شده برای تعیین اثر چیدمان نقطه جوش روی عملکرد سازه.

در دسته‌ی اول، ادیب و همکاران [۴] روی مدل‌سازی اجزاء محدود نقطه جوش مطالعه و مدل شبیه‌سازی شده خود را با داده‌های تجربی صحت‌سنجی کردند. خو و دینگ [۵] روش‌های مختلف و اجزاء‌های متفاوتی برای مدل‌سازی استفاده و نشان دادند که وقتی جوش تحت کشش ساده قرار می‌گیرد، مدل ساده شده دقت خوبی در پیش‌بینی رفتار نقطه جوش دارد. سونگ و همکاران [۶] نشان دادند که با تغییر نوع اجزاء در محدوده‌ی جوش، می‌توان دقت نتایج بدست آمده از اجزاء محدود را افزایش داد. دانکیت و همکاران [۷] بر روی مدل‌سازی اجزاء محدود نقطه جوش از منظر پارامترهای شکست آن کار کردند. در این مدل‌سازی تفاوت بین شکست نرم و شکست نیمه‌نرم در اطراف جوش از هم تفکیک شده بود.

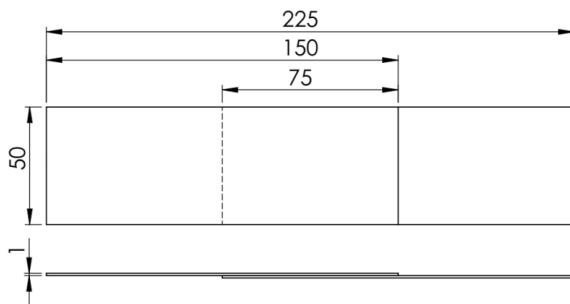
در دسته‌ی دوم، روسینیکی و همکاران [۸] تأثیر قطر جوش را در مقدار جذب انرژی مطالعه و نشان دادند که قطر جوش تأثیر معنی‌داری روی جذب انرژی در سازه دارد. کونگ و همکاران [۹] برای مدل‌سازی جوش نقطه‌ای، جوش را به سه ناحیه تقسیم و ویژگی این نواحی را

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: daakbari@modares.ac.ir

موقعیت سه نقطه جوش در یک سازه ورقی شکل پرداختند بطوریکه بیشترین نیروی شکست محوری در سازه دست آید. در کل می‌توان بیان کرد که در زمینه مدل‌سازی و پارامترهای نقطه جوش پژوهش‌های زیادی انجام شده و تأثیر اکثر پارامترهای مهم روی نقطه جوش تعیین شده است. با این حال پژوهش‌های کمی روی تعیین درست چیدمان نقطه جوش و پیدا کردن حالت بهینه آن برای یک سازه انجام شده است. همچنین، در پژوهش‌های انجام شده پیشین، روش‌های پیشنهاد شده دارای عیب‌هایی از جمله نیاز به تعیین تعداد نقطه جوش‌های مورد نیاز سازه، تعیین مکان نقطه جوش‌ها و تعیین چیدمان اولیه نقطه جوش‌ها وجود دارد. همچنین روش‌های ارائه شده ممکن است در سازه‌هایی با تعداد نقطه جوش زیاد سرعت پایینی داشته باشد. از این رو در این پژوهش روش ترکیب اجزاء محدود و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای تعیین درست موقعیت نقطه جوش‌ها در یک سازه ارائه شده است تا علاوه بر برطرف نمودن محدودیت‌های بیان شده، قابلیت اضافه کردن پارامترهای دیگر و قیدهای سازه را داشته باشد.

۲- جوش نقطه‌ای و مدل‌سازی

جوشکاری نقطه‌ای برای اتصال صفحات مونتاژ شده استفاده می‌شود. برای انجام بررسی‌های اولیه در این پژوهش از اتصال ورق‌های فولاد با جنس استی‌تی ۳۷ و با ابعاد نشان داده شده در شکل ۱ استفاده شده است. بخش روی هم اتصال جهت بهینه‌سازی چیدمان نقطه جوش‌ها، در فضای ۷۵×۵۰ میلی‌متری نشان داده شده ایجاد خواهد شد. خواص مکانیکی این ورق در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۱: ابعاد هندسی ورق‌ها جوشکاری نقطه‌ای

Fig1: Geometric dimension of spot welding sheets

جدول ۱: خواص مکانیکی فولاد st37

Table1: Mechanical properties of steel st37

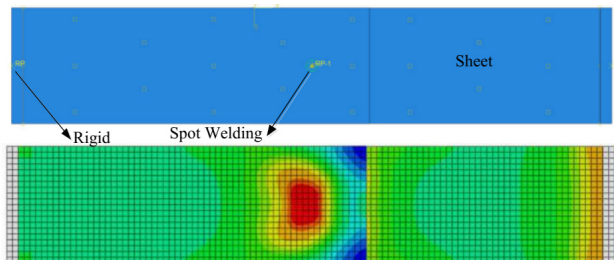
چگالی ($\frac{kg}{m^3}$)	مدول الاستیسیته (GPa)	ضریب یواسون	تنش تسلیم (MPa)	استحکام کششی نهایی (MPa)
۷۸۰۰	۲۰۷	۰/۳	۲۹۶	۴۰۰

بدست آوردن خواص ماده و رفتار یک نقطه جوش برای مدل‌سازی درست اجزاء محدود نقطه جوش لازم و ضروری است. از این رو ابتدا از

از آزمایش سختی بدست آوردند. سپس نشان دادند که قطر جوش و ضخامت ورق روی تنش تسلیم ماده تأثیر به‌سزایی دارد. زنجیر و همکاران [۱۰] از یک مدل اجزاء محدود برای پیش‌بینی توزیع دمایی و تنش پسماند استفاده کردند. آن‌ها نشان دادند که بیشترین مقدار تنش پسماند در مرکز نقطه جوش ایجاد می‌شود. آسلانلار و همکاران [۲] روی تأثیر زمان جوشکاری روی مقاومت برشی و کششی نقطه جوش مطالعه کردند. آن‌ها برای این کار از داده‌های تجربی استفاده و به این نتیجه رسیدند که یک زمان بهینه برای بدست آوردن بیشترین استحکام کششی و برشی وجود دارد. لیو و همکاران [۱۱] روی تأثیر شرایط سطح جوشکاری در کیفیت نقطه جوش مطالعه کردند. مارتین و همکاران [۱۲] با استفاده از داده‌های تجربی و شبکه عصبی به بررسی اثر پارامترهای جوشکاری روی خواص مکانیکی نقطه جوش پرداختند. عیسی‌زاده و همکاران [۱۳] تأثیر پارامترهای جوشکاری را روی نحوه‌ی شکل‌گیری نقطه جوش مورد مطالعه قرار دادند و پی بردند که با افزایش ضخامت ورق، جریان مورد نیاز برای جوشکاری افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش نیروی وارد بر الکتروود، اندازه نقطه جوش کاهش می‌یابد. حسنی‌فرد [۱۴] عمر خستگی نقطه جوش را به کمک داده‌های تجربی مورد مطالعه قرار داد. آشتیانی و همکاران [۱۵] تأثیر قطر الکتروود را روی توزیع دمایی فرایند و شکل‌گیری نقطه جوش در آلیاژ اینکونل ۶۲۵ بررسی کردند. آن‌ها با استفاده از روش اجزاء محدود نشان دادند که با کاهش قطر الکتروود در جریان ثابت، قطر نقطه‌ی جوش افزایش می‌یابد.

در دسته‌ی سوم پژوهش‌های انجام شده، لیو و همکاران [۱۶] بر روی چیدمان نقطه جوش در یک سازه صنعتی کار کرد. در این پژوهش الگوریتم ژنتیک برای تعیین تعداد و مکان جوش استفاده شده است. در این پژوهش مکان‌های جوش از قبل تعیین شده بود. کدیوار و همکاران [۱۷] از الگوریتم ژنتیک و مدل ترمومکانیک سازه برای بدست آوردن ترتیب جوشکاری نقطه‌ای در یک سازه استفاده کردند. هدف آن‌ها کاهش تنش پسماند ناشی از جوشکاری در سازه بود. حسنی‌فرد و همکاران [۱۸] و [۱۹] سه طرح مختلف برای چهار نقطه جوش در نظر گرفته‌اند و نشان دادند که نوع چیدمان روی عمر خستگی تأثیر می‌گذارد. بهاتی و همکاران [۲۰] با استفاده از روش اضافه یا کم کردن تعداد نقطه جوش سعی کردند چیدمان بهینه نقطه جوش را در یک سازه اتومبیل بدست آورند. یوسه و سوگان [۲۱] با استفاده از روش تصمیم‌گیری به پیدا کردن چیدمان اولیه توسط مهندسين ارائه شده و سپس با حذف نقطه جوش و سعی در حفظ عملکرد سازه، چیدمان بهینه نقطه جوش بدست می‌آید. هاسه‌گاو و همکاران [۲۲] از الگوریتم فراابتکاری برای پیدا کردن تعداد و موقعیت نقطه جوش‌ها در یک سازه با ۱۵ نقطه جوش استفاده کردند. وانگ و همکاران [۲۳] روشی برای کاهش تعداد نقطه جوش برای سازه‌های اتومبیل ارائه دادند که در آن هدف کاهش تعداد نقطه جوش‌ها به همراه پیشینه کردن فرکانس ویژه اول پیچش و خمش در سازه بود. آن‌ها با این روش حدود ۲۰٪ تعداد نقطه جوش‌ها را کاهش دادند، بدون اینکه رفتار سازه تغییر قابل توجهی داشته باشند. چا و همکاران [۲۴] به پیدا کردن

۳ برای مدل سازی جوش نقطه ای استفاده کرد. برای مدل سازی از حل دینامیکی صریح استفاده شده است. در این مدل یک سمت ورق ثابت در نظر گرفته شده است و از سمت دیگر با یک نیرو کشیده می شود که این نیرو به تدریج افزایش می یابد.



شکل ۴: مدل سازی اجزاء محدود یک نقطه جوش
Fig4: Finite element (FE) of one spot weld

هدف اولیه در این مقاله بررسی استحکام مکانیکی چند نقطه جوش با فرض داشتن استحکام تک جوش می باشد. به دلیل ماهیت پیچیده فرایند جوشکاری و تعامل همزمان حوزه های فیزیکی-متالورژیکی و اثر آنها بر استحکام مکانیکی، در این مقاله برای اعمال اثرات کلی این حوزه ها در مدل سازی، از داده های تجربی بدست آمده برای یک نقطه جوش استفاده شده و استحکام بدست آمده به عنوان استحکام تک جوش در مدل سازی اعمال شده است.

برای صحت سنجی مدل شبیه سازی شده، ورق ها بار دیگر با سه طرح متفاوت (دو نقطه جوش، سه نقطه جوش مثلثی و چهار نقطه جوش لوزی شکل) به هم جوش داده شده و تحت کشش قرار گرفتند (شکل ۵). نیرویی که در آن شکست رخ داده، ثبت و با نیروهای شکست بدست آمده از روش اجزاء محدود مقایسه شده است. نتایج بدست آمده در جدول ۲ خلاصه شده است. همان طور که مشاهده می شود بیشترین خطای مدل سازی ۱/۴۵٪ می باشد.

جدول ۲: مقایسه نتایج بین داده های تجربی و اجزاء محدود
Table2: Comparing experimental and FE results

چهار جوش	سه جوش	دو جوش	تک جوش	
۲۰/۱۵	۲۰/۴۱	۱۵/۸۶	۹/۸۴	بیشترین نیروی شکست تجربی (kN)
۲/۰۵	۲/۰۷	۱/۶۱	۱	نسبت نیرو شکست نقطه جوش ها به نیروی شکست تک جوش در آزمایش تجربی
۲/۰۷	۲/۱	۱/۶۳	۱	نسبت نیرو شکست نقطه جوش ها به نیروی شکست تک جوش در مدل اجزاء محدود
۰/۸۱	۱/۴۵	۱/۴۵	-	درصد خطای مدل سازی

یک نقطه جوش برای اتصال دو ورق که در شکل ۱ مشاهده می شوند، استفاده شده است. سپس ورق های جوش داده شده تحت آزمون کشش قرار گرفته تا رفتار یک نقطه جوش بدست آید (شکل ۲). دستگاه جوش مقاومتی مدل آپی ایکس^۱ برای جوشکاری استفاده شده است. در شکل ۳ رفتار یک نقطه جوش آورده شده است.

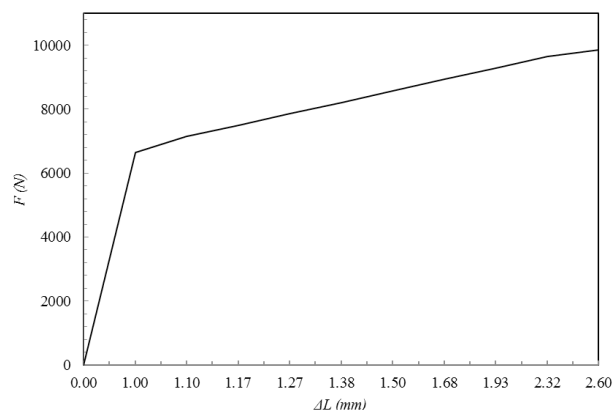


(الف)



(ب)

شکل ۲: نقطه جوش (الف) ورق های جوش داده شده، (ب) ورق ها بعد از کشش
Fig2: Spot weld (a) welded sheets (b) after tensile testing



شکل ۳: منحنی نیرو-جابجایی حاصل از آزمون کشش برای نمونه تک جوش
Fig3: Displacement-force diagram of one spot weld under tensile testing

با استفاده از نتایج آزمون کشش و استخراج ویژگی جنس ورق و یک نقطه جوش، مدل اجزاء محدود قطعه کار و نقطه جوش در آن در نرم افزار اجزاء محدود آباکوس شبیه سازی شده است. در این مدل سازی، ورق ها به صورت پوسته^۲ و نقطه جوش به صورت بست^۳ مدل سازی شده است (شکل ۴). در مدل سازی بست می توان خواص الاستیک و پلاستیک را براساس جابه جایی و نیرو مشخص نمود [۲۵]؛ از این رو به راحتی می توان از شکل

- 1 APX
- 2 Shell
- 3 Fastener

۳- الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات توسط کندی و ابره‌ارت در سال ۱۹۹۵ با الهام از رفتار اجتماعی زنبورها، ماهی و یا دسته‌ی پرندگان ابداع شده است. در این الگوریتم بهینه‌سازی، هر یک از ذرات در واقع عناصر جامع بوده و رفتار آن‌ها را تقلید می‌کنند. برای بهینه‌سازی یک فرایند، ابتدا فضای جستجو و تابع هدف مشخص شده و ذرات در فضای جستجو به‌طور کاملاً تصادفی پخش می‌شوند. هر ذره دو ویژگی دارد: موقعیت و سرعت. بعد از پخش شدن ذرات، هر ذره موقعیت و مقدار تابع هدف خود را با دیگر اعضا به اشتراک می‌گذارد. بعد از تعیین موقعیت بهترین ذره، ذرات با سرعت مشخصی به موقعیت جدید هدایت می‌شوند. مقدار و راستای سرعت حرکت هر ذره، وابسته به سرعت قبلی، فاصله ذره از بهترین موقعیت کشف شده و غیره می‌باشد [۲۶ و ۲۷].

روند کلی الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات به صورت زیر می‌باشد که در آن Z شماره ذره‌ها و i مراحل الگوریتم می‌باشد.

۱- N ذره را در نظر بگیر.

۲- برای هر ذره موقعیت تصادفی ایجاد کن.

۳- تابع هدف ذرات را محاسبه کن.

۴- در ابتدا سرعت اولیه ذرات صفر می‌باشد.

۵- $i=1$

۶- برای مرحله i ام مراحل i تا j را انجام بده

ا. بهترین موقعیتی که تا به حال هر ذره داشته است را در

$G_{best,j}$ ذخیره کن.

ب. بهترین ذره را در کل ذرات شناسایی و آن را در G_{best}

ذخیره کن.

ت. سرعت هر ذره را طبق رابطه‌ی زیر تعیین کن.

$$V_j(i) = \dots \quad (1)$$

$$V_j(i-1) + c_1 r_1 [P_{best,j} - X_{j(i-1)}] + c_2 r_2 [G_{best} - X_{j(i-1)}]$$

که در آن c_1 و c_2 ضرایب نرخ یادگیری شخص و جامعه می‌باشد.

r_1 و r_2 عدد تصادفی بین ۰ و ۱ می‌باشد.

ث. موقعیت بعدی هر یک از ذرات را طبق رابطه‌ی زیر حساب کن.

$$X_j(i) = X_j(i-1) + V_j(i) \quad (2)$$

ج. تابع هدف هر یک از ذرات را طبق موقعیت جدید محاسبه کن.

۷- در صورتی که شرط همگرایی ارضاء نشده باشد $i=i+1$ کن و به

مرحله ۵ برو؛ در غیر این صورت برنامه رو تمام کن.

در این مقاله هر دو نرخ یادگیری شخص و جامعه $1/4962$ در نظر

گرفته شده است [۲۸].

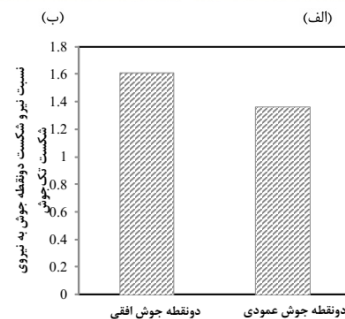
۴- روند یکپارچه‌سازی اجزاء محدود و الگوریتم بهینه‌سازی

برای بهینه‌سازی هر فرایندی لازم است که متغیرها و تابع هدف مشخص شود. علاوه بر تعیین دقیق متغیرها، تعیین درست بازه‌ی



شکل ۵: نمونه‌های تجربی جوشکاری شده بعد از جوشکاری و بعد از آزمون کشش (الف) دو نقطه جوش (ب) سه نقطه جوش (ج) چهار نقطه جوش
Fig5: Experimental samples (a) two spots welding (b) three spots welding (c) four spots welding

در شکل ۶ تأثیر موقعیت جوش مقاومتی نقطه‌ای برای دو نقطه جوش نشان داده شده است. در این آزمایش دو نقطه جوش یک بار به صورت افقی و بار دیگر به صورت عمودی جوشکاری شده و تحت بارگذاری کشش قرار گرفته‌اند تا نیروی شکست آن‌ها بدست آید. همانطور که مشاهده می‌شود با تغییر موقعیت نقطه جوش‌ها از حالت افقی به حالت عمودی، نسبت نیروی شکست آن‌ها به نیروی تک نقطه جوش از $1/61$ به $1/36$ کاهش یافته است که این موضوع اهمیت انتخاب درست موقعیت نقطه جوش‌ها را بخوبی نشان می‌دهد تا بیشترین استحکام اتصال بدست آید. از آنجایی که بی‌نهایت حالت برای چیدمان نقطه جوش‌ها وجود دارد؛ استفاده از روش‌های طرح آزمایش جواب‌گوی انتخاب درست موقعیت نقطه جوش‌ها نبوده و یکی از بهترین راه‌حل‌ها برای بدست آوردن موقعیت بهینه نقطه جوش‌ها استفاده از ترکیب الگوریتم‌های بهینه‌سازی مثل ازدحام ذرات و اجزاء محدود می‌باشد که در ادامه به پیاده‌سازی آن پرداخته شده است.

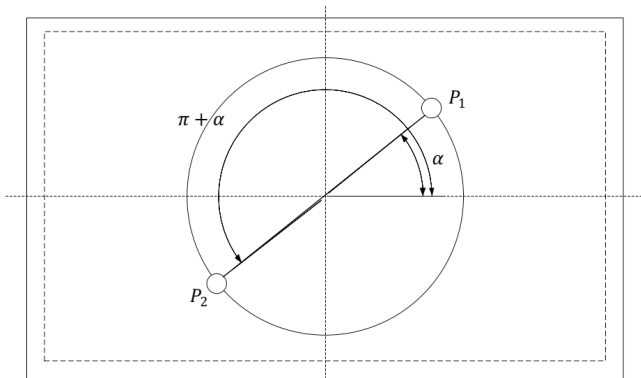


(ج)

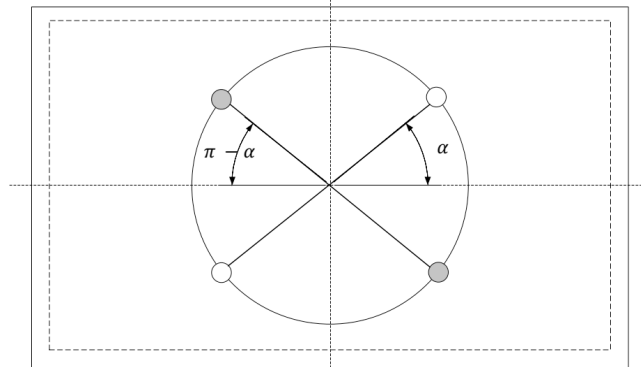
شکل ۶: تأثیر موقعیت نقطه جوش روی نیرو شکست (الف) دو نقطه جوش افقی (ب) دو نقطه جوش عمودی (ج) مقایسه‌ی نیروهای شکست
Fig6: Effect of the location spot weld on the fracture force (a) two horizontal spots, (b) two vertical spots, (c) fracture forces

است که نقطه جوش‌ها باید از لبه داشته باشند. این در حالی است که برای بهینه‌سازی می‌توان آلفا را بین $[\frac{\pi}{2} - \alpha, \frac{\pi}{2}]$ در نظر گرفت. زیرا α و $\pi + \alpha$ دو چیدمان مشابه در جوش را نشان می‌دهند و $\pi - \alpha$ و α به دلیل شکل صفحات در عمل یکسان بوده و فرقی ندارند (شکل ۸). البته باید دقت شود زمانی که $r > b$ باشد؛ آنگاه هر زاویه‌ای برای آلفا قابل قبول نبوده و محدوده زاویه طبق رابطه (۷) حساب می‌شود تا موقعیت‌های نقطه جوش از صفحه‌ی موردنظر خارج نشوند.

$$0 \leq \alpha \leq \text{Arc sin}\left(\frac{b-c}{r}\right) \quad (7)$$



(الف)



(ب)

شکل ۸: موقعیت‌های یکسان در نقطه جوش‌ها (الف) حالت اول، (ب) حالت دوم

Fig 8: Same state in spot welding (a) case 1 (b) case 2

تابع هدف موضوع دیگری است که باید به درستی تعیین شود. در این پژوهش، موقعیت نقطه جوش‌ها به گونه‌ای باید تعیین شود که میزان تحمل نیرو ورق‌های مونتاژ شده، نسبت به تک جوش افزایش بیشتری داشته باشد. از این رو تابع هدف پیشنهادی شدن رابطه‌ی زیر انتخاب شده است.

$$CF = \frac{F}{F_0} \quad (8)$$

که در آن F_0 و F به ترتیب نیروی لازم برای شکست تک جوش و چند جوش با چیدمان مشخص می‌باشد. تعیین مقدار تابع هدف برای هر یک از ذرات لازم و ضروری است.

جستجو برای پیدا کردن جواب بهینه لازم و ضروری است. برای تعیین این ویژگی‌ها لازم است فرایند موردنظر از لحاظ فیزیکی نیز مورد بررسی قرار گیرد. با توجه به اینکه مرکز ثقل نقطه جوش‌ها باید با مرکز ثقل بخش روی هم ورق‌ها (شکل ۱) یکی باشد و نقطه جوش‌ها به فاصله یکسانی از هم قرار گرفته باشند؛ در شرایط تقارن برای تعداد ۲، ۳ و ۴ نقطه جوش می‌توان فرض کرد نقطه جوش‌ها روی محیط دایره‌ای به شعاع r و با مرکز ثقل صفحه به فاصله یکسانی قرار دارند (شکل ۷). اگر فرض شود n نقطه جوش وجود دارد که روی این دایره به صورت مساوی پخش شده‌اند، مختصات کارتزین نقاط جوش نسبت به مرکز دایره طبق رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$P_{i,x',y'} = \quad (3)$$

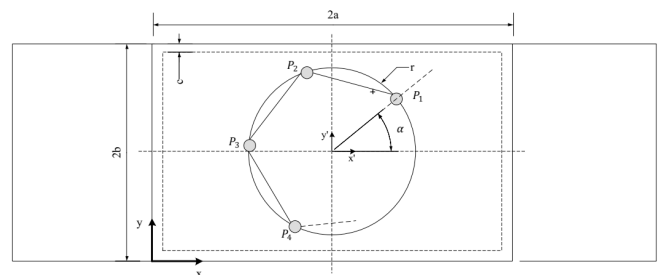
$$r \left\langle \cos\left(\alpha + \frac{(i-1)2\pi}{n}\right), \sin\left(\alpha + \frac{(i-1)2\pi}{n}\right) \right\rangle,$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

که در آن i شماره نقطه و α زاویه بین یکی از محورهای تقارن چیدمان جوش نسبت به محور مختصات است. مختصات همین نقاط نسبت به محور مختصات کلی (محور مختصات قطعه کار-XY) از طریق بردار انتقال بدست می‌آید (رابطه (۴)).

$$P'_{i,xy} = P_{i,x',y'} + \langle a_x, b_y \rangle \quad (4)$$

که در آن a_x و b_y فاصله مختصات از مرکز دایره می‌باشد.



شکل ۷: توزیع نقطه جوش‌ها روی دایره

Fig 7: Distribution of spot welds

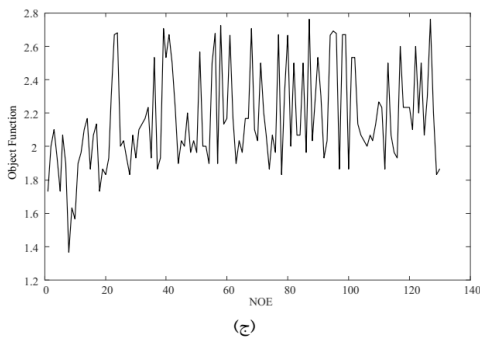
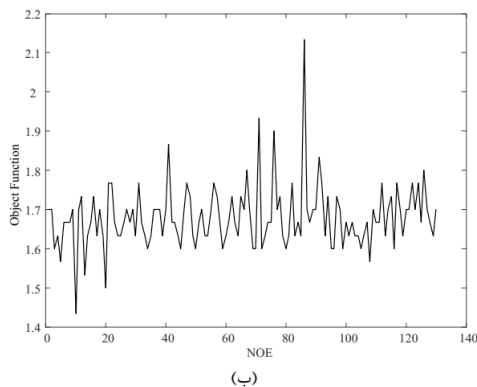
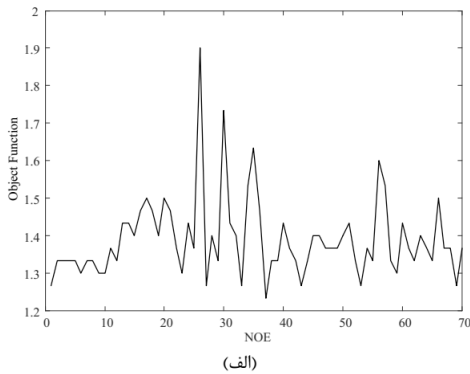
دو نقطه جوش در شکل ۸ نشان داده شده است که روی دایره‌ی به شعاع r قرار دارند. مختصات این نقاط طبق دو رابطه زیر تعیین می‌شود که با قرار دادن $n = 2$ در رابطه (۴) حاصل شده است.

$$P_1 = r \langle \cos(\alpha), \sin(\alpha) \rangle + \langle a, b \rangle \quad (5)$$

$$P_2 = -r \langle \cos(\alpha), \sin(\alpha) \rangle + \langle a, b \rangle \quad (6)$$

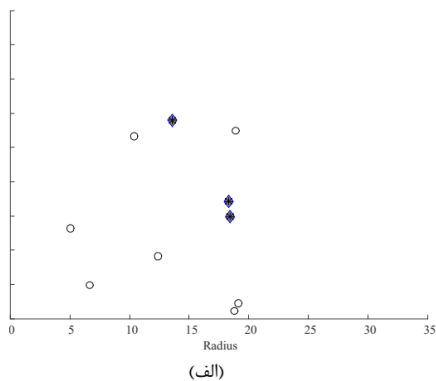
با توجه به مطالب بالا می‌توان بیان کرد که متغیرهای این فرایند، شعاع و زاویه می‌باشد. این موضوع برای هر n نقطه جوش که روی دایره با فاصله یکسان قرار دارند نیز صادق است. محدوده‌ی شعاع از $\frac{d}{2}$ تا $a - c$ می‌باشد که d قطر نقطه جوش و c حداقل فاصله‌ی

یکسانی است. این نشان می‌دهد که با چیدمان‌های متفاوت می‌توان به یک اندازه نیروی شکست را افزایش داد. از دید ریاضی نیز به معنای وجود نقاط بیشینه‌ی محلی است.



شکل ۱۰: نمودار همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی (الف) دو نقطه جوش (ب) سه نقطه جوش (ج) چهار نقطه جوش

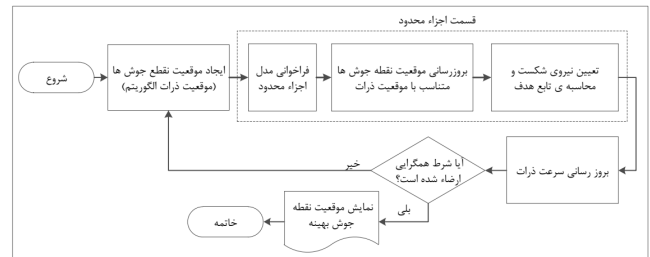
Fig10: Convergence plots (a) two spots welding (b) three spots welding (c) four spots welding



یکی از روش‌های تعیین نیروی شکست یا تابع هدف هر ذره استفاده از آزمایش‌های تجربی است. این روش به دلایل زمان‌بر بودن، هزینه‌بر بودن و عدم امکان آزمایش در برخی قطعات توصیه نمی‌شود. روش دیگر برای تعیین تابع هدف، استفاده از مدل اجزاء محدود می‌باشد. در بخش ۲ ورق‌های جوش داده شده مدل‌سازی و درستی آن‌ها نشان داده شد. بنابراین زمانی که موقعیت نقطه جوش‌ها عوض شود، مدل شبیه‌سازی شده فراخوانی شده و بعد از به‌روزرسانی موقعیت نقطه جوش‌ها، مدل اجرا شده و نیروی شکست تعیین می‌شود.

الگوریتم بهینه‌سازی ذرات زمانی همگرا می‌شود که ذرات در نزدیکی نقطه بهینه تجمع کرده باشند. البته می‌توان معیارهای دیگری نیز برای همگرایی تعریف کرد. در این پژوهش اگر جواب بهینه بعد از ۵ بار بروز رسانی موقعیت بهترین ذره بهبود نیابد؛ بهینه‌سازی متوقف شده و الگوریتم همگرا می‌شود.

فلوچارت یکپارچه‌سازی الگوریتم بهینه‌سازی با مدل اجزاء محدود در شکل ۹ نشان داده شده است. تمام مراحل الگوریتم بهینه‌سازی الگوریتم ذرات اجرا می‌شود و در مرحله‌ای که نیاز به تعیین تابع هدف باشد، مدل شبیه‌سازی شده فراخوانی و طبق موقعیت هر ذره، تابع هدف آن‌ها تعیین می‌شود.

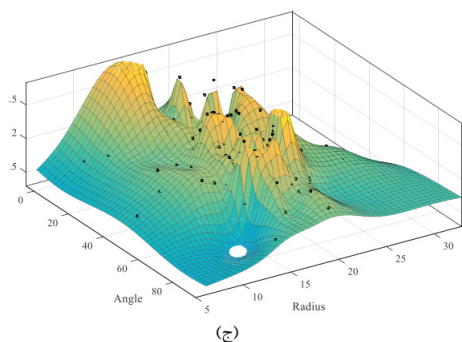


شکل ۹: فلوچارت یکپارچه‌سازی اجزاء محدود و بهینه‌سازی ذرات

Fig 9: Flowchart of Integrating FE and PSO

۵- نتایج و بحث

ترکیب الگوریتم بهینه‌سازی و اجزاء محدود برای تعیین موقعیت بهینه‌ی دو، سه و چهار نقطه جوش با تعداد ذرات ۱۰ به کار گرفته شده است. هدف تعیین موقعیت نقطه جوش‌ها با داشتن استحکام تک جوش است به نحوی که بیشترین نیروی شکست در مجموعه نقطه جوش‌ها حاصل شود. نمودار همگرایی الگوریتم در شکل ۱۰ آورده شده است. این نمودار برحسب تعداد دفعات فراخوانی تابع هدف و تابع هدف رسم شده است [۲۹]. در شکل ۱۱-الف و ب موقعیت ذرات در شروع و پایان بهینه‌سازی برای سه نقطه جوش نشان داده شده است. ذره یا ذراتی که به صورت لوزی نشان داده شده است، ذره یا ذراتی هستند که بیشترین تابع هدف را دارند. همان‌طور که مشاهده می‌شود نمودار همگرایی بهینه‌سازی نوسانات زیادی دارد با اینکه ذرات در انتهای بهینه‌سازی نزدیک به هم می‌باشند. این موضوع نشان می‌دهد که چیدمان نقطه جوش‌ها تأثیر زیادی روی تابع هدف داشته و تغییرات کوچک در چیدمان، روی تابع هدف تأثیر می‌گذارد. در شکل ۱۱-ب چند ذره با چیدمان جوش متفاوت، دارای تابع هدف



شکل ۱۲: نمودار تابع هدف برحسب شعاع و زاویه (الف) دو نقطه جوش (ب) سه نقطه جوش (ج) چهار نقطه جوش

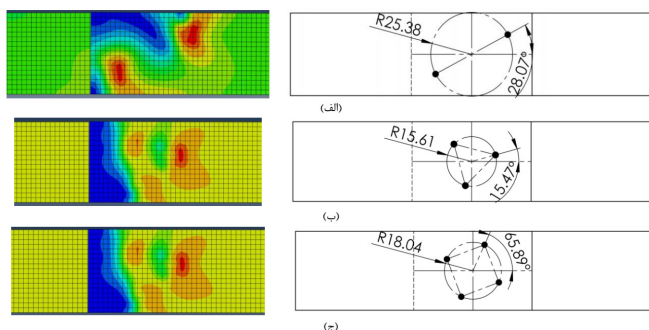
Fig12: Object function vs radius and angle (a) two spots welding (b) three spots welding (c) four spots welding

چیدمان بهینه برای دو، سه و چهار نقطه جوش در جدول ۳ و شکل ۱۳ نشان داده شده است. برای مثال با این موقعیت برای دو نقطه جوش، تابع هدف ۱/۹ می‌باشد. به عبارت دیگر نیروی شکست نسبت به حالت تک جوش ۱/۹ برابر شده است. با توجه به چیدمان بهینه می‌توان نتیجه گرفت که شعاع بهینه برای چیدمان نقطه جوش‌ها لزوماً دارای بیشترین فاصله‌ی ممکن از هم نبوده و یک مقدار بهینه دارد. همچنین یک زاویه بین راستای اعمال نیرو و محور تقارن چیدمان وجود دارد و بهتر است نقطه‌جوش‌ها دقیقاً در راستای نیرو ایجاد نشوند.

جدول ۳: مشخصات حالت بهینه

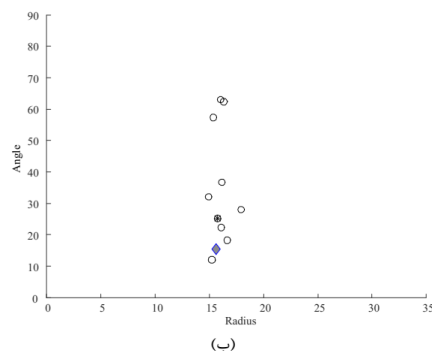
Table 3: Specifications of optimal state

مشخصات	دو نقطه جوش	سه نقطه جوش	چهار نقطه جوش
r (mm)	۲۵/۳۸	۱۵/۶۱	۱۸/۰۴
α (degree)	۲۸/۰۷۴۹	۲۵/۷۸۳۱	۶۵/۸۹
تابع هدف	۱/۹۰۰۰	۲/۱۳۳۳	۲/۷۶۰۳



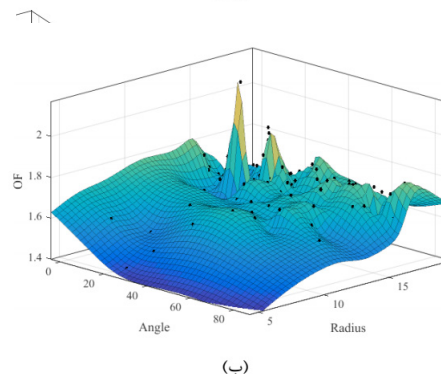
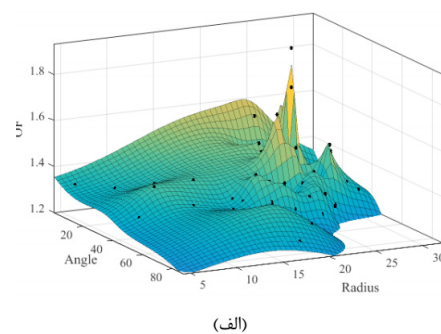
شکل ۱۳: چیدمان بهینه نقطه جوش‌ها، (الف) دو نقطه جوش (ب) سه نقطه جوش (ج) چهار نقطه جوش

Fig 13: Optimal location (a) two spots welding (b) three spots welding (c) four spots welding



شکل ۱۱: موقعیت ذرات (الف) شروع بهینه‌سازی (ب) پایان فرایند بهینه‌سازی
Fig11: Particle positions (a) at the beginning of optimization (b) at the end of optimization

با توجه به شکل ۱۰-ب و شکل ۱۱ می‌توان بیان کرد که شعاع نقطه بهینه در ذرات در مرحله‌ی پایانی (شکل ۱۱-ب) نزدیک به هم می‌باشد؛ یعنی شعاع بهینه حاصل شده است و این زاویه (دوران) چیدمان است که تأثیر زیادی در تابع هدف دارد و باعث ایجاد بیشینه‌های محلی می‌شود. تابع هدف برحسب شعاع دایره (r) و زاویه (α) در شکل ۱۲ آورده شده است که هر شعاع و زاویه یک چیدمان مشخصی از نقطه جوش‌ها را نشان می‌دهد. نقاط استفاده شده برای ترسیم این شکل، موقعیت ذرات بهینه‌سازی می‌باشد که طی فرآیند بهینه‌سازی ارزیابی شده‌اند. این نمودار نشان می‌دهد که رفتار تابع هدف (نیروی شکست) نسبت به شعاع و زاویه (چیدمان نقطه جوش‌ها) یک رفتار خطی نبوده و دارای چندین نقاط بهینه محلی است. همچنین نقاط بهینه نیز با تغییر تعداد نقطه جوش‌ها جابه‌جا می‌شود. این رفتار احتمالاً برای جوش کاری قطعات نامنظم و بزرگ، پیچیده‌تر نیز می‌باشد. بنابراین این رفتار پیچیده‌ی افزایش نیروی شکست برحسب چیدمان، اهمیت استفاده از روش پیشنهادی برای تعیین چیدمان نقطه جوش را به خوبی نشان می‌دهد.



۶- نتیجه‌گیری

تعیین موقعیت بهینه نقطه جوش‌های مقاومتی در اتصال ورق‌ها تأثیر به‌سزایی در افزایش استحکام اتصال نهایی دارد. بدلیل اینکه حالت‌های چیدمان نقطه جوش برای یک قطعه بی‌شمار می‌باشد و استفاده از طرح آزمایش برای دستیابی به حالت بهینه دشوار است. از این رو در این پژوهش روش ترکیبی الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات و اجزاء محدود برای تعیین این موقعیت پیشنهاد شد. روش پیشنهادی برای تعیین چیدمان دو، سه و چهار نقطه جوش در دو ورق مونتاژ شده بکار گرفته و طبق نتایج، با موقعیت بهینه نیروی شکست دو، سه و چهار نقطه جوش به ترتیب تا ۱/۹، ۲/۱۳ و ۲/۷۶ برابر نسبت به نیروی شکست تک جوش افزایش می‌یابد. همچنین نشان داده شد که رفتار نیروی شکست نسبت به چیدمان نقطه جوش، یک رفتار خطی و ساده نبوده و با افزایش تعداد نقطه جوش، چیدمان بهینه عوض می‌شود. این موضوع استفاده از روش پیشنهادی را کاملاً توجیه می‌کند. همچنین مشاهده شده که یک مقدار بهینه برای فاصله بین نقطه جوش‌ها وجود دارد و بهتر است یک زاویه بین محور تقارن چیدمان جوشکاری و راستای نیروی اعمالی وجود داشته باشد. در این پژوهش بیشترین استحکام کششی با چیدمانی حاصل شد که چهار نقطه جوش در دایره‌ای به شعاع ۱۸/۰۴ میلی‌متر با فاصله‌های مساوی قرار دارند و زاویه یکی از محورهای تقارن با محور بارگذاری ۶۵/۸۹ درجه است.

لازم بذکر است که در این روش می‌توان تعداد نقطه جوش‌ها را جزء پارامترهای متغیر بهینه‌سازی در نظر گرفت و برای سازه‌های پیچیده‌تر چیدمان نقطه جوش‌ها را در تعداد متفاوتی از نقطه جوش‌ها در نظر گرفت که مستلزم آزمایشات جداگانه متعدد و تکرار فرایندهای بهینه‌سازی است که با روش معرفی شده در این مقاله قابل انجام است.

۷- فهرست علائم

علائم انگلیسی	
a	نصف طول ناحیه جوش کاری
b	نصف عرض ناحیه جوش کاری
c	حداقل فاصله نقطه جوش از لبه‌های ورق
c_i	ضریب یادگیری الگوریتم بهینه‌سازی
d	قطر نقطه جوش
F_0	نیروی شکست یک نقطه جوش
F	نیروی شکست نقطه جوش‌ها
G_{best}	بهترین موقعیت کل ذره
$G_{best,j}$	بهترین موقعیت ذره ژام
r_i	اعداد تصادفی بین ۰ و ۱

r	شعاع دایره
V_j	سرعت ذره‌ی ژام
P_i	مختصات نقطه ژام
OF	تابع هدف
X_j	موقعیت ذره‌ی ژام
علائم یونانی	
α	زاویه (درجه)

۸- منابع و مراجع

- [1] P. Salvini, F. Vivio, V. Vullo, A spot weld finite element for structural modelling, *International Journal of Fatigue*, 22(8) (2000) 645-656.
- [2] S. Aslanlar, A. Ogur, U. Ozsarac, E. Ilhan, Welding time effect on mechanical properties of automotive sheets in electrical resistance spot welding, *Materials & Design*, 29(7) (2008) 1427-1431.
- [3] H. Zhang, J. Senkara, Resistance welding: fundamentals and applications, CRC press, 2011.
- [4] H. Adib, J. Jeong, G. Pluvinaige, Three-Dimensional Finite Element Analysis of Tensile-Shear Spot-Welded Joints in Tensile and Compressive Loading Conditions, *Strength of Materials*, 36(4) (2004) 353-364.
- [5] S. Xu, X. Deng, An evaluation of simplified finite element models for spot-welded joints, *Finite Elements in Analysis and Design*, 40(9-10) (2004) 1175-1194.
- [6] J.-H. Song, H. Huh, H.-G. Kim, S.-H. Kim, Evaluation of the Finite Element Modeling of Spot-Welded Region for Crash Analysis, *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers*, 14(2) (2006) 174-183.
- [7] S. Dancette, D. Fabregue, R. Estevez, V. Massardier, T. Dupuy, M. Bouzekri, A finite element model for the prediction of Advanced High Strength Steel spot welds fracture, *Engineering Fracture Mechanics*, 87 (2012) 48-61.
- [8] E. Rusiński, A. Kopczyński, J. Czmochoński, Tests of thin-walled beams joined by spot welding, *Journal of Materials Processing Technology*, 157-158 (2004) 405-409.
- [9] X. Kong, Q. Yang, B. Li, G. Rothwell, R. English, X.J. Ren, Numerical study of strengths of spot-welded joints of steel, *Materials & Design*, 29(8) (2008) 1554-1561.

- [19] S. Hassanifard, M. Zehsaz, F. Esmaceli, Spot weld arrangement effects on the fatigue behavior of multi-spot welded joints, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 25(3) (2011) 647-653.
- [20] Q.I. Bhatti, M. Ouisse, S. Cogan, An adaptive optimization procedure for spot-welded structures, *Computers & Structures*, 89(17) (2011) 1697-1711.
- [21] M. Ouisse, S. Cogan, Robust design of spot welds in automotive structures: A decision-making methodology, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 24(4) (2010) 1172-1190.
- [22] H. Hasegawa, H. Sasaki, H. Uehara, K. Kawamo, The optimisation of spot-weld positions for vehicle design by using hybrid meta-heuristics, *International Journal of Vehicle Design*, 43(1-4) (2007) 151-172.
- [23] L. Wang, P.K. Basu, J.P. Leiva, Design optimisation of automobile welds, *International Journal of Vehicle Design*, 31(4) (2003) 377-391.
- [24] S.-W. Chae, K.-Y. Kwon, T.-S. Lee, An optimal design system for spot welding locations, *Finite Elements in Analysis and Design*, 38(3) (2002) 277-294.
- [25] A. Version, 6.13, *Analysis User's Guide*, Dassault Systems, (2013).
- [26] S.S. Rao, S. Rao, *Engineering optimization: theory and practice*, John Wiley & Sons, 2009.
- [27] R.C. Eberhart, J. Kennedy, A new optimizer using particle swarm theory, in: *Proceedings of the sixth international symposium on micro machine and human science*, New York, NY, 1995, pp. 39-43.
- [28] M. Clerc, J. Kennedy, The particle swarm-explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space, *Evolutionary Computation*, *IEEE Transactions on*, 6(1) (2002) 58-73.
- [29] K. Socha, M. Dorigo, Ant colony optimization for continuous domains, *European journal of operational research*, 185(3) (2008) 1155-1173.
- [10] I. Ranjbar Nodeh, S. Serajzadeh, A.H. Kokabi, Simulation of welding residual stresses in resistance spot welding, FE modeling and X-ray verification, *Journal of Materials Processing Technology*, 205(1-3) (2008) 60-69.
- [11] L. Liu, S.Q. Zhou, Y.H. Tian, J.C. Feng, J.P. Jung, Y.N. Zhou, Effects of surface conditions on resistance spot welding of Mg alloy AZ31, *Science and Technology of Welding and Joining*, 14(4) (2009) 356-361.
- [12] Ó. Martín, P. De Tiedra, M. López, Artificial neural networks for pitting potential prediction of resistance spot welding joints of AISI 304 austenitic stainless steel, *Corrosion Science*, 52(7) (2010) 2397-2402.
- [13] H. Eisazadeh, M. Hamedí, A. Halvaeae, New parametric study of nugget size in resistance spot welding process using finite element method, *Materials & Design*, 31(1) (2010) 149-157.
- [14] S. Hassanifard, 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, *Modares Mechanical Engineering*, 11(2) (2011) 39-48.
- [15] H.R. Rezaei Ashtiani, R. Zarandooz, M. Sohrabian, The numerical investigation of influence of electrode diameter on nugget diameter and thermal distribution in the resistance spot welding (RSW) of Inconel 625, *Modares Mechanical Engineering*, 15(8) (2015) 116-124.
- [16] Y.G. Liao, Optimal design of weld pattern in sheet metal assembly based on a genetic algorithm, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 26(5) (2005) 512-516.
- [17] M.H. Kadivar, K. Jafarpur, G.H. Baradaran, Optimizing welding sequence with genetic algorithm, *Computational Mechanics*, 26(6) (2000) 514-519.
- [18] S. Hassanifard, M.M. Etefagh, Numerical and experimental investigation of fatigue life and frequency response of the different arrangements of tensile-shear spot-welded joints, *Modares Mechanical Engineering*, 12(1) (2012) 77-84.

