

## کاربرد الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی فرآیند جوشکاری اصطکاکی - اغتشاشی

محمد رضا احمدی  
گروه آموزشی مهندسی مکانیک  
دانشگاه آزاد اسلامی واحد نراق  
[m\\_r\\_ahmadi@yahoo.com](mailto:m_r_ahmadi@yahoo.com)

فاطمه احمدی  
گروه آموزشی مهندسی کامپیوتر  
دانشگاه جامع پیام نور قم  
[ahmadi\\_art@yahoo.com](mailto:ahmadi_art@yahoo.com)

احمد شریف  
گروه آموزشی مهندسی کامپیوتر  
موسسه آموزش عالی شهاب دانش  
[asharif@noornet.net](mailto:asharif@noornet.net)

از الگوریتم‌های تکاملی است طراحی شده است. به این صورت که می‌توان با بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیک، اندازه بهینه سرعت حرکت و سرعت چرخش پین را در عملیات جوشکاری با توجه به خواص آلیاژها به دست آورد. این روش در حقیقت روش جستجوی کامپیوتری بر پایه الگوریتم‌های بهینه‌سازی و بر اساس ساختار کروموزم‌ها است که در نهایت منجر به پیدا کردن یک جواب بهینه می‌گردد که شاید نتوان در مدت زمان زندگی یک فرد به آن دست یافت [1].

### ۲- مفاهیم و تعاریف اولیه

رشته یا دنباله‌ای از بیت‌ها را که یک جواب ممکن از مساله مورد نظر می‌باشد، کروموزم و مجموعه‌ای از کروموزم‌ها را جمعیت گویند. الگوریتم‌های ژنتیکی به جای تمرکز بر روی یک نقطه از فضای جستجو یا یک کروموزم، بر روی جمعیتی از کروموزم‌ها کار می‌کند که بر اساس میزان برازندگی آنها انتخاب شده تا در مراحل بعدی مورد استفاده قرار گیرند. عملگر تقاطع یا جابجایی که بر روی یک جفت از کروموزم‌ها عمل می‌کند می‌تواند به صورت تک نقطه‌ای، چند نقطه‌ای و یکنواخت باشد. عملگر جهش عبارت است از تغییر تصادفی تعدادی از بیت‌های یک کروموزم با احتمال  $P_m$  بطوری که کروموزم جدید صفاتی متفاوت با گذشته داشته باشد. در نهایت مناسب بودن یا نبودن جواب، با معیاری که از تابع هدف بدست می‌آید، سنجیده می‌شود. هر قدر که یک جواب مناسب‌تر باشد، مقدار برازندگی بزرگتری دارد [4].

در نهایت همه افراد جمعیت جدید مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. چنانچه شرایط خاتمه فراهم شده باشد الگوریتم ژنتیک پایان می‌پذیرد. در غیر این صورت جمعیت به عنوان جمعیت اولیه برای مرحله بعد مورد استفاده قرار می‌گیرد [5,7].

### ۳- روش جوشکاری FSW

در جوشکاری به روش FSW یک پین وجود دارد که که از بالا و پایین آلیاژ، روی محل تماس دو قطعه آلیاژ، حرکت کرده و می‌چرخد و با ایجاد حرارت و خمیری کردن آلیاژ، آنها را به هم جوش می‌دهد شکل (۱). در طی فرآیند جوشکاری، خواص آلیاژ از قبیل استحکام

**چکیده:** این مقاله در مورد طراحی یک نرم‌افزار به منظور استفاده بهینه از فرآیند جوشکاری اصطکاکی - اغتشاشی است که یکی از فرآیندهای نوین جوشکاری در حالت جامد است. این نرم‌افزار که با زبان C# و با استفاده از الگوریتم ژنتیک طراحی شده، کاربر را قادر می‌سازد با ورود مقادیر اندازه‌گیری شده خواص آلیاژ، و با ورود درصد میزان اهمیت خواص به سیستم، به مقادیر بهینه‌ای از سرعت حرکت و سرعت چرخش که در میزان تغییرات خواص آلیاژ مؤثرند، دست یابد. این نرم‌افزار با در نظر گرفتن وزن برای هر یک از خواص، این امکان را ایجاد می‌کند که بتوان بعضی از خواص را نسبت به برخی دیگر در حصول نتیجه، برتری داد. با این نوآوری امکان استفاده گسترده از این متد در صنایع مختلف، که در آنها یک یا چند خاصیت، اهمیت بیشتری نسبت به خواص دیگر دارند، فراهم می‌گردد.

**واژه های کلیدی:** الگوریتم ژنتیک، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، سرعت چرخش پین، سرعت حرکت پین، ضریب اهمیت خواص.

### ۱- مقدمه

این فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی Friction Stir Welding (FSW) در سال ۱۹۹۱ در انستیتو جوش انگلستان (TWI) اختراع شده و در ایران نیز در سال ۱۳۸۵ ساخته و ثبت شده است [3]. در این روش عملیات جوش بدون انجام ذوب و بدون استفاده از مواد پرکننده صورت می‌گیرد و در این فرآیند پینی وجود دارد که با حرکت و چرخش بر روی محل تماس دو قطعه با ایجاد حرارت و خمیر کردن آنها را به هم جوش می‌دهد. در این روش هیچگونه ناخالصی که در فرآیندهای ذوبی معمول در جوش ایجاد می‌شود وجود ندارد. فرآیند، دوست محیط زیست است و هیچ گونه دود، ولتاژ بالا یا تابش‌های خطرناکی در آن وجود ندارد [3,10]. در حال حاضر این فرآیند با موفقیت در صنایع هوا فضا، کشتی سازی و مونتاژ مخازن سوخت هسته‌ای مورد استفاده قرار گرفته است [11]. نرم‌افزاری که در این مقاله از آن استفاده شده است برای اولین بار مطرح و بر اساس شاخه‌ای

ارقام ذکر شده بیانگر این موضوعند که افزایش و یا کاهش سرعت حرکت و چرخش پین، باعث افزایش و یا کاهش کلیه مقادیر خواص نمی‌شود و نیز خواص ذکر شده در بالا، در صنایع مختلف کاربردهای ویژه‌ای دارند و از اهمیت خاصی برخوردارند [9]. در نرم‌افزار تهیه شده با در نظر گرفتن درصد اهمیت برای هر یک از خواص، می‌توان یک یا چند خاصیت را در نتیجه مسأله، مثر ثمرتر قرار داد.

#### ۴- متدولوژی کاربرد الگوریتم ژنتیک در بهینه‌یابی سرعت چرخش و سرعت حرکت پین

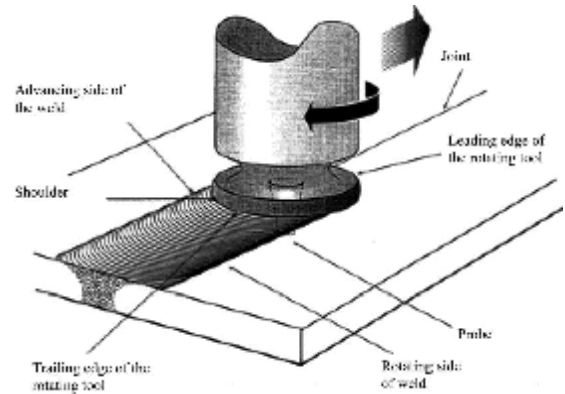
با توجه وابستگی‌های خواص به سرعت چرخش و سرعت حرکت پین، روش‌های موجود برای بدست آوردن مقادیر بهینه بسیار زمانبر است و بهترین روش برای بدست آوردن مقادیر بهینه، استفاده از الگوریتم ژنتیک می‌باشد [6].

#### ۴-۱ مرحله اول، مدل‌سازی داده‌ها (جمعیت اولیه)

در این نرم‌افزار ابتدا کاربر برای آلیاژ مورد نظر مقادیر سرعت چرخش و سرعت حرکت پین را که بر اساس آنها خواص آلیاژ جوشکاری شده، اندازه‌گیری شده است، وارد نموده، سپس میزان اهمیت و مقادیر مربوط به هر یک از خواص را به ازای هر جفت متشکل از سرعت چرخش و سرعت حرکت، مشخص می‌نماید. مقادیر سرعت چرخش و سرعت حرکت هر یک به عنوان کروموزم جداگانه‌ای مدل می‌شود و از ترکیب این دو به‌صورت جفت متغیرها، جمعیت اولیه بدست می‌آید و هر دو به عنوان متغیرهای تابع برازندگی، مورد استفاده قرار می‌گیرند. بطور مثال با داشتن ۵ مقدار از سرعت چرخش پین و ۴ مقدار از سرعت حرکت پین، ۲۰ جفت متغیر وجود دارد که به ازای هر یک از جفت‌ها یک مقدار، برای هر یک از خواص وجود دارد. از ترکیب خواص ذکر شده و در نظر گرفتن ضریب اهمیت آنها، تابع برازندگی بدست می‌آید. در این مقاله ما قصد داریم به مقادیر بهینه سرعت چرخش و حرکت پین دست یابیم که مقادیر بهینه مورد نظر، در بازه دریافت شده توسط کاربر، وجود دارند و نیز نرم‌افزار به ازای تعداد محدودی از جفت‌های سرعت چرخش و سرعت حرکت، که کاربر وارد کرده است مقادیر خواص را در اختیار دارد (جدول ۱). بنابراین نرم‌افزار برای جفت‌هایی که مقادیر سرعت چرخش و سرعت حرکت آنها در بازه تعریف شده قرار دارند ولی در جمعیت اولیه‌ی ذکر شده نیستند، مقادیر خواص آلیاژ جوشکاری شده را در اختیار ندارد. برای حل این مشکل از روش درونیابی لاگرانژ برای توابع دو متغیره [2]، استفاده شده است. فرض شود مقدار تابع دو متغیره  $f$  در  $(m+1).(n+1)$  نقطه  $(x,y)$  است، که  $i=0,1,2,\dots,n$  و  $j=0,1,2,\dots,m$  بصورت فرمول (۱) داده شود:

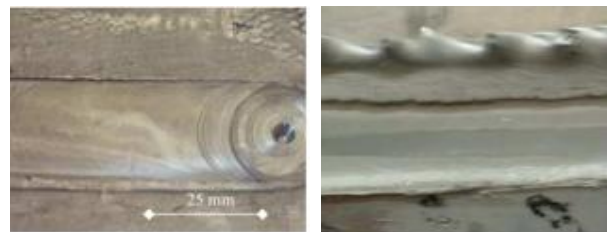
$$f(x_i, y_j) = f_{i,j} \quad \text{و} \quad \begin{cases} i=0,1,2,\dots,n \\ j=0,1,2,\dots,m \end{cases} \quad (1)$$

کششی، استحکام تسلیم، درصد ازدیاد طول، سختی آلیاژ در منطقه HAZ و سختی منطقه جوش تغییر می‌کند که در این مقاله از این ۵ خاصیت نامبرده، استفاده شده است.



شکل (۱): طرحی از طرز کار دستگاه FSW [9]

نتایج بدست آمده از تحقیقات، بیانگر این موضوع است که افزایش سرعت حرکت و کاهش سرعت چرخش، باعث کاهش حرارت ورودی می‌شود، بنابراین افزایش سرعت حرکت، باعث افزایش استحکام کششی، و افزایش سرعت چرخش باعث کاهش استحکام کششی می‌شود. به هر حال افزایش سرعت چرخش منجر به افزایش حرارت ورودی و در نتیجه بزرگ شدن منطقه HAZ (منطقه ضعیف متأثر از جوش) می‌شود که باعث کاهش استحکام کششی می‌گردد. به همین ترتیب افزایش سرعت حرکت، با کاهش حرارت جوشکاری و در نتیجه کوچک شدن منطقه HAZ همراه است. تست کشش آلیاژ، اطلاعاتی در مورد درصد ازدیاد طول به ما می‌دهد. هر قدر حرارت ورودی افزایش یابد درصد ازدیاد طول نیز زیاد می‌شود. برای مثال نمونه‌های جوشکاری شده برای آلیاژی از آلومینیوم، با سرعت چرخش ۱۵۰۰ دور در دقیقه و سرعت حرکت ۶/۲۵ میلی‌متر بر دقیقه، بیشترین درصد ازدیاد طول را نشان می‌دهد، در حالی‌که نمونه‌ای با سرعت چرخش ۵۰۰ دور در دقیقه و ۲۰ میلی‌متر در دقیقه حداقل درصد ازدیاد طول را نشان می‌دهد. جوشکاری با بالاترین سرعت حرکت و کمترین سرعت چرخش، سطح جوشکاری صافی را نتیجه می‌دهد در حالیکه جوشکاری با سرعت حرکت پایین و سرعت چرخشی بالا باعث ایجاد لبه‌های موجی در سطح قطعه کار می‌گردد (شکل ۲).



شکل (۲): نمایی نزدیک از ورقه جوشکاری شده با استفاده از

دستگاه FSW

پس از عملیات جهش، تست می‌شود که مقادیر فرزندان تولید شده، خارج از محدوده تعریفی کاربر نباشد.

#### ۴-۴ مرحله پایانی، برازندگی (Fitness)

پس از تست، مقدار برازندگی برای تمام فرزندان محاسبه می‌شود [8]. تابع برازندگی با استفاده از مجموع حاصل ضرب هریک از مقادیر خواص در ضریب اهمیت آن، بدست می‌آید. ولی واحد هریک از خواص با خواص دیگر متفاوت است و در نتیجه مقادیر هر یک از آنها در بازه‌های متفاوتی قرار دارند. بطور مثال یک خاصیت در بازه (۳ و ۱۲) و خاصیت دیگر در بازه (۷۶ و ۱۱۲) است، قطعاً تأثیر خاصیت دوم در نتیجه تابع برازندگی مؤثرتر است و لذا عمل نرمال سازی انجام می‌شود.

برای این منظور، ابتدا میانگین مقادیر هر یک از خواص محاسبه شده و ضریب نرمال‌سازی، برای هر یک از خواص، از تقسیم بزرگترین مقدار میانگین، بر میانگین مقادیر خاصیت مورد نظر بدست می‌آید؛ بنابراین تابع برازندگی به ازای یک جفت مقادیر متشکل از سرعت چرخش و سرعت حرکت، از مجموع حاصل ضرب هریک از مقادیر خواص  $C_k$  (که با استفاده از درونیایی لاگرانژ بدست می‌آید) در ضریب اهمیت آن  $z_k$  و ضریب نرمال‌سازی آن خاصیت  $h_k$  بدست می‌آید، فرمول (۶).

$$f(x, y) = \sum_{k=1}^n z_k \cdot h_k \cdot C_k(x, y) \quad (6)$$

حال مجموعه کروموزم‌های والدین و فرزندان بر اساس بالاترین مقدار تابع برازندگی، مرتب شده و به تعداد کروموزم‌های فرزندان، از انتهای لیست، کروموزم‌ها حذف می‌شوند و کار با تعداد اولیه کروموزم‌ها، برای تولید فرزندان جدید، ادامه می‌یابد.

این نرم‌افزار به ازای مقادیر موجود در جدول (۱) به عنوان مقادیر اولیه، آزمایش شده، سپس نرم‌افزار ۵ مرتبه، با وارد کردن ضریب اهمیت واحد به ازای هر یک از خواص اجرا شده و در هربار اجرا مقادیر سرعت چرخش و حرکت پین در حالت بهینه، به ازای ضریب اهمیت خواص وارد شده در ورودی نرم‌افزار، بدست آمده است که نتایج موجود، در جدول (۲) آورده شده است.

#### ۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این روش که برای اولین بار و به منظور استفاده بهینه از دستگاه جوشکاری FSW از محاسبه‌ی ژنتیک استفاده شده است، در نهایت به صنعت‌گران کمک می‌کند تا با برآورد درصد اهمیت هر یک از خواص، در آلیاژ مورد نظر مقدار بهینه سرعت چرخش و سرعت حرکت پین را بدست آورند و با این نوآوری قطعاتی با کیفیت بالا تولید کنند.

برای توسعه نرم‌افزار و ادامه کار می‌توان آنرا به دستگاه جوش FSW مرتبط ساخته تا کاربر بتواند تنها با وارد کردن مقادیر مورد نیاز به نرم‌افزار، به سرعت چرخش و حرکت پین بهینه ماشین دست یابد و

چند جمله  $P_{n,m}(x,y)$  را به صورت فرمول (۲) ارائه می‌دهیم:

$$P_{n,m}(x_i, y_j) = f_{ij} \quad \begin{cases} i = 0, 1, 2, \dots, n \\ j = 0, 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (2)$$

تابع  $L_{ij}(x,y)$  را به صورت فرمول‌های (۳ و ۴) تعریف می‌کنیم:

$$L_{i,j}(x, y) = L_i(x) \cdot L_j(y) \quad \begin{cases} i = 0, 1, 2, \dots, n \\ j = 0, 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (3)$$

$$L_0(x) = \frac{(x-x_1) \cdot (x-x_2) \dots (x-x_n)}{(x_0-x_1) \cdot (x_0-x_2) \dots (x_0-x_n)}$$

$$L_1(x) = \frac{(x-x_0) \cdot (x-x_2) \dots (x-x_n)}{(x_1-x_0) \cdot (x_1-x_2) \dots (x_1-x_n)} \quad (4)$$

$$L_n(x) = \frac{(x-x_0) \cdot (x-x_1) \dots (x-x_{n-1})}{(x_n-x) \cdot (x_n-x_1) \dots (x_n-x_{n-1})}$$

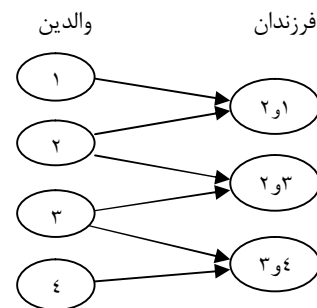
چند جمله‌ای درونیایی لاگرانژ  $f$  را در نقاط درونیایی مزبور به صورت فرمول (۵) تعریف می‌کنیم:

$$P_{n,m}(x, y) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m L_{i,j}(x, y) f_{i,j} \quad (5)$$

نرم‌افزار با این روش برای یک جفت متشکل از متغیرهای سرعت چرخش و سرعت حرکت، مقدار هر یک از ۵ خاصیت را بدست آورده و مقدار تابع برازندگی را برای جفت سرعت چرخش و سرعت حرکت مورد نظر محاسبه می‌کند.

#### ۲-۴ مرحله دوم، تقاطع (Crossover)

تعداد کل کروموزم‌های فرزندان تولید شده از کروموزم‌های والدین، یکی کمتر از کل کروموزم‌های والدین است شکل (۳). روش Crossover استفاده شده، ادغام تک نقطه‌ای می‌باشد.



شکل (۳): تعداد و طریقه تولید فرزندان در هر بار فراخوانی تابع تقاطع

#### ۳-۴ مرحله سوم، جهش (Mutation)

پس از عملیات تقاطع عملیات جهش روی کروموزم‌های فرزند انجام می‌شود و مقدار هر ژن از کروموزم‌ها با احتمال ۰.۲۰ معکوس می‌شود

جدول (۱): داده‌های آزمایشگاهی مربوط به آلیاژ نمونه (آلومینیوم) [9]

سرعت چرخش پین (rpm)	سرعت حرکت پین (mm/min)	استحکام کششی (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)	درصد ازدیاد طول (%)	سختی منطقه جوش	سختی منطقه HAZ
۵۰۰	۶/۳۵	۱۱۲	۸۶	۳/۰۴	۲۷/۳	۲۷/۶
	۱۰	۱۰۴	۸۰	۳/۳۴	۲۷/۵	۲۸
	۱۶	۱۰۳	۷۸	۳/۷۱	۲۸	۲۸۳
	۳۰	۱۰۲	۷۶	۴/۷۸	۲۸/۳	۲۸۵
۸۰۰	۶/۳۵	۱۰۲	۷۷	۵/۳۳	۲۶/۸	۲۶/۵۵
	۱۰	۱۰۱	۷۵	۵/۴۴	۲۷	۲۶/۶
	۱۶	۹۲	۶۶	۵/۵۲	۲۷/۶	۲۷
	۳۰	۹۱	۶۵	۵/۶۳	۲۷/۸	۲۷/۶
۱۰۰۰	۶/۳۵	۹۹	۷۵	۵/۶۵	۲۶/۴	۲۶
	۱۰	۹۱	۶۶	۶/۳۶	۲۶/۸	۲۴/۸
	۱۶	۸۹	۶۳	۶/۹۴	۲۷	۲۶/۷
	۳۰	۸۸	۶۰	۷/۶۳	۲۷/۳	۲۷/۳
۱۳۵۰	۶/۳۵	۸۸	۶۰	۷	۲۴	۲۴/۱
	۱۰	۸۷	۵۷	۷/۰۷	۲۴/۸	۲۴/۸
	۱۶	۸۶	۵۶	۷/۳۶	۲۵/۷	۲۵/۳
	۳۰	۸۴	۵۳	۸/۳۸	۲۶/۱	۲۵/۹
۱۵۰۰	۶/۳۵	۸۰	۵۸	۷/۴۵	۲۱/۴	۲۳/۴
	۱۰	۷۹	۵۶	۱۰/۱۷	۲۲	۲۳/۷
	۱۶	۷۷	۵۲	۱۰/۳۹	۲۲/۹	۲۴/۸
	۳۰	۷۶	۴۷	۱۱/۳۶	۲۳/۸	۲۵/۳

جدول (۲): مقادیر خروجی نرم افزار

درصد اهمیت استحکام کششی	درصد اهمیت استحکام تسلیم	درصد اهمیت درصد ازدیاد طول	درصد اهمیت سختی منطقه جوش	درصد اهمیت سختی منطقه HAZ	خروجی نرم افزار: سرعت چرخش	خروجی نرم افزار: سرعت حرکت
۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۶۹۰	۸۸۰
۱۵	۱۵	۱۰	۴۰	۳۰	۵۰۰	۳۰
۳۰	۳۰	۳۰	۱۰	۱۰	۶۷۰	۸/۶۹
۳۰	۳۵	۳۵	۱۵	۱۵	۱۵۰۰	۱۳/۶
۱۰	۱۰	۳۰	۳۰	۳۰	۱۰۴۶	۱۹/۹۷

[۳] احمدی، محمد رضا، راستی، جواد، ساخت دستگاه جوشکاری اصطکاکی - اغتشاشی (FSW)، شماره ثبت ۳۸۶۳، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نراق، قم، ۱۳۸۵.

- [4] Melanie, Mitchell., *An Introduction to Genetic Algorithm*, MIT Press, 1999
- [5] Michalewicz, Zbigniew., *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, Springer, 1999
- [6] Chambers, Lance., *The Practical Handbook Of Genetic Algorithms Applications*, Chapman & Hall/CRC, 2001
- [7] Haupt, Randy, L., Haupt, Sue Ellen., *Practical Genetic Algorithm*, Wiley-Interscience Publishing, 2004

خود دستگاه به طور خودکار با مقادیر خروجی نرم افزار کار کند. بنابراین از این نرم افزار می توان بصورت گسترده ای در صنایع مختلف به منظور دستیابی سریعتر به اهداف صنعتی استفاده کرد.

#### ۶- مراجع

- [۱] علی رضا، مهدی، مقدمه ای بر الگوریتم های ژنتیکی و کاربردهای آن، تهران، شرکت ناقوس اندیشه، ۱۳۸۵
- [۲] وحیدی، جواد، قاسم پور، صابر، روش های محاسبات عددی، تهران، انتشارات دانش نگار، پاییز ۱۳۸۳.

- [8] Menon, Anil. , *Frontiers of Evolutionary Computation*, Kluwer Academic Publishers, 2004
- [9] Okuyucu, Hasan, Curt, Adem, Arcaklioglu, Erol, "Artificial neural network application to the friction stir welding of aluminum plates", *Materials and design*, jun 2005
- [10] Liu, H.J., "Tensile properties and fracture locations of friction-stir-welded joints of 2017-T351 aluminum alloy", *Journal of Materials Processing Technology*, 142, 2003
- [11] Meran, C., "The joint properties of brass plates by friction stir welding", *Materials and Design*, 2005