

## Optimization of Weld Penetration in Presence of the MgO Nano-Particles in SAW Process Using Taguchi Method

### Abstract

Nowadays, optimization by reducing manufacturing costs and time has become one of the important activities of manufacturing engineers and specially that of welding engineers in order to increase productivity. This paper reports a study carried out to analyze and subsequently optimize the welding input parameters in submerged arc welding (SAW) process in presence of the MgO nano-particles in order to relate them with the weld bead penetration which determines the stress carrying capacity of weldments. Therefore, a five-level five-factor Taguchi technique using 25 experiments based on orthogonal arrays was considered for collecting experimental data. Moreover, the input parameters considered were the welding current, arc voltage, nozzle-to-plate distance, welding speed, and thickness of MgO nano-particles. On the basis of the signal-to-noise ratio and analysis of variance (ANOVA), optimum levels for different input parameters were obtained. Since the weld penetration should be maximum in order to have a good quality weld, therefore, weld penetration was maximized accordingly. Based on the results obtained it is concluded that welding current is the most significant input parameter affecting the weld bead penetration. Analysis was carried out using Minitab 14 software. In the paper the interactions were not taken into consideration. On the basis of results obtained from this research work, it is concluded that, the weld bead penetration increased with the increase in the thickness of MgO nano-particles due to the so called Marangoni effect.

**Keywords :** Submerged Arc Welding , Weld Penetration , Taguchi Method , Analysis of Variance , Optimization

## بهینه سازی نفوذ جوش در حضور نانوذرات اکسید منیزیم در فرآیند جوشکاری زیر پودری با استفاده از روش تاگوچی

### چکیده:

از آنجا که بهینه سازی و کاهش هزینه و زمان همواره یکی از دغدغه های مهم بشرامروز بخصوص مهندسين جوش بوده است برآن شدیم تا با انجام بررسی و مطالعه پیرامون بهینه سازی پارامترهای ورودی جوشکاری زیر پودری و نانوذرات اکسید منیزیم که رابطه ای مستقیم با هندسه گرده جوش دارند به پردازیم. با استفاده از روش تاگوچی و براساس آرایه های متعامد برای پنج پارامتر ورودی جریان، ولتاژ، سرعت، فاصله نازل تا قطعه کار و ضخامت نانوذرات اکسید منیزیم در پنج سطح با در نظر گرفتن درجات آزادی مجموعاً با انجام ۲۵ آزمایش به بررسی متغیر خروجی نفوذ جوش پرداختیم. با استفاده از مقادیر سیگنال به نویز و تحلیل واریانس به سطوح بهینه پارامترهای ورودی دست یافتیم. که در این پژوهش بیشترین مقدار برای نفوذ براساس بهینه سازی انجام شده مدنظر قرار گرفته است. در پایان با توجه به نتایج نهایی بدست آمده از تحلیل واریانس، موثرترین پارامترهای ورودی برای عمق نفوذ جوش جریان می باشد. تمامی تحلیل ها با استفاده از نرم افزار آماری Minitab 14 انجام شده است و از اندرکنش پارامترهای ورودی در این پژوهش صرف نظر شده است.

واژه های کلیدی: جوشکاری زیر پودری، عمق نفوذ جوش، روش تاگوچی، تحلیل واریانس، بهینه سازی

## مقدمه

جوشکاری زیر پودری یکی از پر کاربردترین روش های اتصال دائم قطعات بوده که در بین روش های جوشکاری قوس الکتریکی به خاطر مزایایی چون کیفیت بالای جوش، جوشکاری با سرعت بالا، جوش با عمق نفوذ بالا و بدون پاشش قطرات مذاب و سطح هموار (Rowlands, Antony (2003)، (Tarnng, yang, luang, 2000)، جای پای خود را در صنایع کشور باز نموده و کاربرد های فراوانی در صنایع نفت و گاز، کشتی سازی، مخازن تحت فشار، خطوط لوله های انتقال و غیره پیدا کرده است (Houldcroft, 1989). در جوشکاری زیر پودری همانند سایر روش ها، کیفیت اتصال بطور مستقیم از هندسه جوش تاثیر می پذیرد (Gunaraj, Murugan, 2000). بنابراین ایجاد جوشی با مشخصات هندسی مطلوب برای تحمل تنش های وارد شده بسیار با اهمیت است. در این رابطه، به دلیل گستردگی و تعداد بالای پارامترهای دخالت کننده، تنظیم صحیح پارامترهای ورودی شامل سرعت جوشکاری، ولتاژ، نرخ تغذیه سیم، فاصله نازل تا قطعه کار جهت حصول جوش با مشخصات هندسی مطلوب باید به بهترین نحو تعیین شود. در گذشته تعیین سطوح بهینه پارامترهای ورودی فرآیند، معمولاً علاوه بر دقت کم اغلب پر هزینه می باشد (Nagesh, 2002). در جوشکاری قطعات با ضخامت بالا، افزایش عمق نفوذ، یکی از اهداف مطلوب اصلی می باشد. افزایش عمق نفوذ، هزینه های جوشکاری را تا حد زیادی کاهش می دهد، که دلایل آن می تواند کاهش تجهیزات مورد نیاز برای پخ زنی و آماده سازی نمونه جوش، کاهش در تعداد پاس های جوش، کوتاه شدن زمان جوشکاری، صرفه جویی در میزان فلز پر کننده، حذف شیار زنی و سنگ زنی و کاهش اعوجاج می باشد. با توجه به اینکه افزایش عمق نفوذ باعث کاهش هزینه و زمان و نیز افزایش بهره روری می شود، یکی از اهداف بررسی این فرآیند، افزایش عمق نفوذ جوش با استفاده از فلاکس فعال کننده بر روی سطح قطعه است که بارخ دادن این مکانیزم تمرکز قوس افزایش می یابد و منجر به افزایش چگالی جریان در راس قوس می شود و در نهایت عمق نفوذ افزایش می یابد (کوکبی، ۱۳۸۳). روش دیگر، افزایش میزان جریان جوشکاری است. با افزایش میزان جریان جوشکاری، حرارت ورودی و عرض ناحیه منطقه متأثر از گرما نیز افزایش می یابد، که امری نامطلوب است. بنابراین مقادیر پارامترهای ورودی باید طوری انتخاب شوند که به حداکثر عمق نفوذ دست پیدا کرد.

سابقه استفاده از پودر پوششی به آنما و هم کارانش بر می گردد که تاثیر پودر پوششی  $TiO_2$  را بر روی خواص مکانیکی و ریز ساختار فولادهای جوشکاری شده با فرآیند جوشکاری زیر پودری بررسی نمودند (Ma, et al, 2001). فتیحی و همکاران بهبود ضریب چقرمگی فلز جوش AWS E6010 با اضافه شدن نانوذرات  $TiO_2$  به پوشش الکترودها را گزارش کردند (Fattahi, Nabhani, Vaezi, Rahimi, 2011). پال و مایتنی اثر اندازه نانوذرات  $TiO_2$  را بر روی خواص مکانیکی الکترود نوع AWS E11018M بررسی کردند و نتیجه گرفتند که خواص ضربه شاری به علت تغییرات مقدار تیتانیوم رسوب جوش بهبود یافته است (Pal, Maity, 2011). آقاخانی و همکاران اثر نانوذرات  $TiO_2$  بر روی پهنای جوش را در فرآیند جوشکاری قوسی زیر پودری بررسی کردند و نتیجه گرفتند که اضافه شدن نانوذرات  $TiO_2$  در ابتدا پهنای جوش را افزایش و سپس آن را کاهش می دهد (Aghakhani, Ghaderi, slampanah, Farzamnia, 2012). همچنین، آقاخانی و همکاران گزارش کردند که نفوذ جوش به وسیله اضافه شدن نانوذرات  $TiO_2$  به حوضچه جوش تحت تاثیر قرار می گیرد (Aghakhani, Ghaderi, Rajabi, Derakhshan, 2011). در این مقاله، از روش تاگوشی برای مدلسازی و بهینه سازی نفوذ جوش در فرآیند جوشکاری زیر پودری استفاده شد. بدین منظور پارامترهای موثر این فرآیند که شامل ولتاژ جوشکاری (V)، شدت جریان جوشکاری (I)، فاصله نازل تا قطعه کار (N)، سرعت جوشکاری (S) و پارامتر دیگری که ضخامت نانو ذرات اکسید منیزیم (F) می باشد به عنوان پارامترهای ورودی انتخاب شد. نتایج کار نشان می دهد که روش تاگوشی با دقت بسیار بالایی می تواند ابعاد گرده جوشکاری را تخمین بزند.

## طراحی آزمایشات

### روش آزمایش

برای جوشکاری قطعات، سطح قطعه کار با ناپودر اکسید منیزیم پوشانده شد. سپس فرآیند جوشکاری با استفاده از دستگاه نیمه اتوماتیک پارس کت<sup>۱</sup> P2310 با جریان مستقیم و قطبیت معکوس (DCRP) روی این لایه به روش جوشکاری مهره روی ورق<sup>۲</sup> انجام شد. ابعاد قطعه کار ۱۵mm×۵۰mm×۱۵۰mm و جنس آن فولاد St37 است، سیم جوش مصرفی S1 (DIN EN 756) با قطر ۳.۲ میلیمتری باشد. شکل ۱ دستگاه جوشکاری زیر پودری را برای انجام آزمایشات نشان می دهد. ترکیب شیمیایی سیم جوش و فلز پایه بترتیب در جدول ۱ و ۲ آمده است.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی سیم جوش مصرفی

نوع سیم جوش		درصد وزنی				
نام تجاری آما	DIN/EN	کربن	سیلیسیم	منگنز	مولیبدن	کروم
50-11	S1	۰.۰۴-۰.۰۸	۰.۵-۰.۸	۰.۹-۱.۳	-	-

جدول ۲- ترکیب شیمیایی فلز پایه

نوع فلز		ترکیب شیمیایی		
درجه یا دسته	DIN/EN	فسفر	سیلیسیم	کربن
St37	۱۶۲۹	≤۰.۱۷	≤۰.۰۴۰	≤۰.۰۴۰

پس از اتمام جوشکاری، قطعات به وسیله دستگاه وایرکات<sup>۳</sup> در راستای عمود بر خط جوش به فاصله ۷۰ میلیمتر از لبه بریده شدند. سطح مقطع برش خورده ابتدا سمباده زنی به وسیله سمباده های ۲۴۰، ۳۲۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ آماده سازی شد و سپس توسط آلومینای ۶ میکرومتر پولیش داده شدند. سپس، سطح مقطع قطعات به وسیله محلول ۲ درصد، نایتال<sup>۴</sup> به مدت ۱ دقیقه اچ گردید. پس از آماده شدن قطعات، نفوذ جوش به وسیله میکروسکوپ الیمپوس<sup>۵</sup> (مدل PME3) اندازه گیری شد.

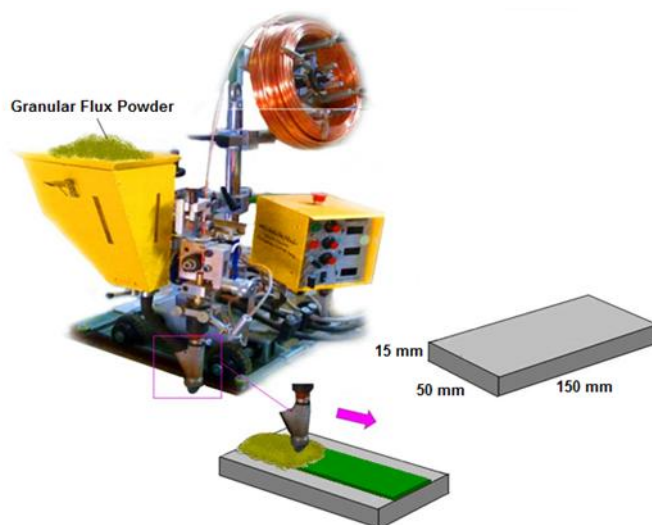
۱- Pars Cat

۲- Bead-on-Plate

۳- Wire Cut

۴- Nital

۵- Olympus



شکل ۱ - دستگاه جوشکاری زیر پودری

### طراحی آزمایش بر اساس روش تاگوچی

انجام آزمایش بطور وسیعی در علوم مختلف از جمله علوم مهندسی به کار می‌رود. هدف از انجام آزمایش بررسی اثر پارامترهای ورودی و همچنین ارائه یک مدل به منظور عدم تکرار آزمایش در شرایط مشابه و در نتیجه کاهش هزینه‌ها و زمان و افزایش بهره‌وری می‌باشد. بر این اساس، هدف از این مطالعه بهینه‌سازی و مدل‌سازی پارامترهای ورودی فرآیند جوشکاری زیر پودری به کمک روش تحلیل آزمایش - های تاگوچی می‌باشد. روش تاگوچی یک روش تحلیل آزمایش است؛ که بر مبنای آن می‌توان با تعداد معینی آزمایش میزان تاثیر عوامل و سطوح بهینه مطالعات تجربی و آزمایشگاهی را پیش‌بینی کرد. به همین منظور، بر اساس آرایه‌های متعامد  $L_{25}$  برای پنج پارامتر ورودی شدت جریان جوشکاری، ولتاژ قوس، فاصله نازل تا قطعه کار، سرعت جوشکاری و ضخامت نانو پودر اکسید منیزیم ( $MgO$ ) در پنج سطح بانجام ۲۵ آزمایش به بررسی پارامترهای خروجی عمق نفوذ جوش فولاد St37 پرداخته شد. مقادیر پارامترهای ورودی در سطوح مختلف در جدول ۳ و ماتریس طراحی و در جدول ۴ نشان داده شده است. همچنین، با استفاده از مقادیر نسبت سیگنال به نویز<sup>۶</sup> و تحلیل واریانس<sup>۷</sup> به سطوح بهینه پارامترهای ورودی دست یافتیم. تمامی تحلیل‌ها با استفاده از نرم افزار آماری Minitab 14 انجام شده است و از اندرکنش پارامترهای ورودی در این پژوهش صرف نظر شده است.

۶- Signal to Noise ratio (S/N)

۷- Analysis of variance (ANOVA)

جدول ۳- پارامترهای جوشکاری و محدوده های آنها

واحد	کدگذاری					نماد	
	۵	۴	۳	۲	۱		متغیر ورودی
آمپر	۷۰۰	۶۵۰	۶۰۰	۵۵۰	۵۰۰	I	جریان
ولت	۳۲	۳۰	۲۸	۲۶	۲۴	V	ولتاژ قوس
میلیمتر	۴۰	۳۷.۵	۳۵	۳۲.۵	۳۰	N	فاصله نازل تا قطعه کار
میلیمتر/ دقیقه	۵۰۰	۴۵۰	۴۰۰	۳۵۰	۳۰۰	S	سرعت جوشکاری
میلیمتر	۱	۰.۷۵	۰.۵	۰.۲۵	۰	F	ضخامت مواد نانو

جدول ۴- ماتریس طراحی

No.	V	I	N	S	F		No.	V	I	N	S	F
۱	۱	۱	۱	۱	۱		۱۴	۳	۴	۱	۳	۵
۲	۱	۲	۲	۲	۲		۱۵	۳	۵	۲	۴	۱
۳	۱	۳	۳	۳	۳		۱۶	۴	۱	۴	۲	۵
۴	۱	۴	۴	۴	۴		۱۷	۴	۲	۵	۳	۱
۵	۱	۵	۵	۵	۵		۱۸	۴	۳	۱	۴	۲
۶	۲	۱	۲	۳	۴		۱۹	۴	۴	۲	۵	۳
۷	۲	۲	۳	۴	۵		۲۰	۴	۵	۳	۱	۴
۸	۲	۳	۴	۵	۱		۲۱	۵	۱	۵	۴	۳
۹	۲	۴	۵	۱	۲		۲۲	۵	۲	۱	۵	۴
۱۰	۲	۵	۱	۲	۳		۲۳	۵	۳	۲	۱	۵
۱۱	۳	۱	۳	۵	۲		۲۴	۵	۴	۳	۲	۱
۱۲	۳	۲	۴	۱	۳		۲۵	۵	۵	۴	۳	۲
۱۳	۳	۳	۵	۲	۴							

## نتایج و بحث

### نسبت S/N

بمنظور دستیابی به میزان حساسیت پارامترها و شرایط بهینه در فرآیند جوشکاری از روش تاگوچی استفاده کرده ایم چرا که این دیدگاه روشی برای بهبود کیفیت محصول از طریق کاهش اثرات تغییرات بدون حذف علت آن هاست (Chen, Allen, Tsui, Mistree, 1996), (Du, Sudjianto, Chen, 2004), (Seok, Soon, Seok, Deuk, Won, 2010), در این روش پارامترهای فرآیند به دو گروه پارامترهای قابل کنترل و غیر قابل کنترل تقسیم بندی می شوند. به عنوان مثال در جوشکاری زیرپودری شدت جریان، ولتاژ، سرعت، فاصله نازل تا قطعه کار و .... جزء عوامل کنترلی هستند. پارامترهای غیرکنترلی تمام عواملی هستند که باعث ایجاد تغییرات می شوند؛



امابه دلیل این که کنترل آن هامشکل است یا شناخت کافی از آن ها وجود ندارد، بر حسب مورد ثابت در نظر گرفته می شوند. به عنوان مثال، در فرآیند جوشکاری زیر پودری ارتعاشات دستگاه، تغییر پارامترهای داده شده به دستگاه در حین جوشکاری، دما، رطوبت و سایر عوامل محیطی، عوامل غیرکنترلی محسوب می شوند. ابزاری که روش تاگوشی برای تحلیل نتایج حاصل از آزمایشات از آن استفاده می کند؛ روش تحلیل نسبت SN می باشد، که این نسبت نشان دهنده حساسیت مشخصه مورد بررسی به فاکتورهای ورودی در یک فرآیند کنترل شده می باشد. شرایط بهینه با تعیین تاثیر هر یک از فاکتورهای ورودی بر روی مشخصه خروجی، شناسایی می شود (Roy, 1990) که هدف آنالیز S/N تعیین بهترین ترکیب بندی سطوح عوامل مختلف برای دستیابی به پاسخ بهینه می باشد و درسه حالت متفاوت به صورت ذیل تعریف می شود:

« مقدار اسمی-بهر» (NB) «مقدار کمتر-بهر» (LB) و «مقدار بزرگتر-بهر» (HB)

در این مقاله برای دستیابی به نتایج مطلوب برای عمق نفوذ جوش مقدار HB منظور شده است ؛ که مقدار این نسبت برای پارامتر خروجی نامبرده به صورت زیر (رابطه ۱) محاسبه می شوند:

$$SN = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \right) \quad (1) \quad \text{هر چه بزرگتر بهتر}$$

در این رابطه  $Y_i$  مقدار پاسخ یا خروجی و  $n$  تعداد آزمایشات انجام شده است. با استفاده از مقادیر تجربی پارامترهای خروجی مقادیر نسبت S/N برای پارامتر عمق نفوذ جوش محاسبه شد (جدول ۵). در جدول ۶ نسبت مطلوبیت به بدی کارکرد S/N برای هریک از سطوح فاکتورهای کنترل محاسبه شده است که با مقایسه مقدار این نسبت برای سطوح هر فاکتور، بیشترین مقدار نشان دهنده بهترین سطح هر فاکتور است. بر اساس نسبت S/N در جدول دو عنوان Delta و Rank مشاهده می شود که نشان دهنده اهمیت پارامترها در فرآیند می باشد. هر چقدر مقدار Delta برای یک پارامتر بیشتر باشد نشان دهنده مهمتر بودن آن پارامتر در فرآیند است. با افزایش مقدار Rank نیز اهمیت و تاثیر آن پارامتر بر خروجی مورد نظر کاسته می شود.

جدول ۵- مقادیر تجربی پارامترهای و مقادیر نسبت S/N

No.	Penetration	SN ratio	No.	Penetration	SN ratio
۱	۳.۶۱	۱۱.۱۵۰۱	۱۴	۵.۸۳	۱۵.۳۱۳۴
۲	۲.۹۲	۹.۳۰۷۷	۱۵	۵.۳۱	۱۴.۵۰۱۹
۳	۳.۶۷	۱۱.۲۹۳۳	۱۶	۶.۳۶	۱۶.۰۶۹۱
۴	۲.۹۸	۹.۴۸۴۳	۱۷	۶.۷۵	۱۶.۵۸۶۱
۵	۲.۹۳	۹.۳۳۷۴	۱۸	۵.۹۷	۱۵.۵۱۹۵
۶	۳.۹۴	۱۱.۹۰۹۹	۱۹	۶.۰۶	۱۵.۶۴۹۵
۷	۴.۹۲	۱۳.۸۳۹۳	۲۰	۶.۲۶	۱۵.۹۳۱۵
۸	۴.۲۰	۱۲.۴۶۵۰	۲۱	۷.۴۴	۱۷.۴۳۱۵
۹	۴.۳۹	۱۲.۸۴۹۳	۲۲	۷.۴۴	۱۷.۴۳۱۵
۱۰	۴.۴۸	۱۳.۰۲۵۶	۲۳	۹.۹۱	۱۹.۹۲۱۵
۱۱	۴.۳۶	۱۲.۷۸۹۷	۲۴	۸.۰۶	۱۸.۱۲۶۷
۱۲	۴.۸۸	۱۳.۷۶۸۴	۲۵	۶.۹۵	۱۶.۸۳۹۷
۱۳	۵.۱۱	۱۴.۱۶۸۴			

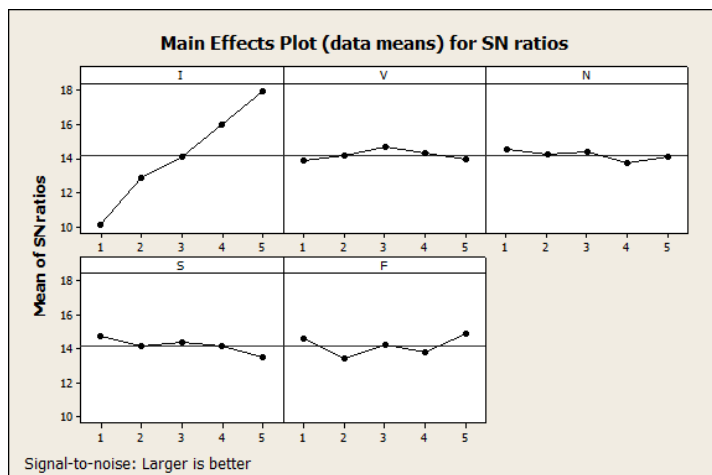
در فاکتورولتاژ سطح سوم دارای بیشترین نسبت  $S/N$  است، لذا ولتاژ ۲۴ ولت برای این فاکتور به عنوان بهترین سطح انتخاب می‌شود. فاکتور جریان در سطح پنجم (۷۰۰ آمپر)، فاکتور فاصله نازل تا قطعه کار در سطح اول (۳۰ میلی‌متر)، سرعت در سطح اول (۳۰۰ میلی‌متر بر دقیقه) و ضخامت نانوذرات در سطح پنجم (۱ میلی‌متر) به عنوان بهترین سطوح انتخاب می‌شوند. در این جدول، با مقایسه مقدار دلتا که از تفاضل بیشترین مقدار نسبت  $S/N$  به کمترین مقدار آن به دست می‌آید، می‌توان متغیرها را براساس بیشترین تأثیر بر نسبت  $S/N$  رتبه بندی کرد. با توجه به جدول فوق به ترتیب جریان، ضخامت نانوذرات، سرعت، ولتاژ و فاصله نازل تا قطعه کار روی نفوذ دارای بیشترین تأثیر هستند.

جدول ۶- پاسخ‌های متوسط نسبت  $S/N$  برای نفوذ.

سطح	V	I	N	S	F
۱	۱۳.۸۷	۱۰.۱۱	۱۴.۴۹	۱۴.۷۲	۱۴.۵۷
۲	۱۴.۱۹	۱۲.۸۲	۱۴.۲۶	۱۴.۱۴	۱۳.۴۶
۳	۱۴.۶۷	۱۴.۱۱	۱۴.۴۰	۱۴.۳۹	۱۴.۲۳
۴	۱۴.۲۸	۱۵.۹۵	۱۳.۷۳	۱۴.۱۶	۱۳.۷۹
۵	۱۳.۹۳	۱۷.۹۵	۱۴.۰۷	۱۳.۵۳	۱۴.۹۰
Delta	۰.۸۰	۷.۸۴	۰.۷۶	۱.۱۹	۱.۴۳
Rank	۴	۱	۵	۳	۲

علاوه بر این، تأثیر پارامترهای ورودی بر روی نسبت  $S/N$  در شکل ۲ نشان داده شده است. نقطه بالاتر نشان دهنده مقدار بیشتر نسبت  $S/N$  است. در فاکتور جریان سطح پنجم بیشترین مقدار، ولتاژ در سطح سوم، فاصله نازل تا قطعه کار و سرعت در سطح اول و ضخامت نانوذرات در سطح پنجم دارای بیشترین مقدار نسبت  $S/N$  است که این نتایج در واقع شکل ترسیمی از نتایج جدول بالا است. با توجه به نمودار می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش جریان نفوذ نیز افزایش خواهد داشت چون گرمای ورودی افزایش یافته اما تأثیر سایر پارامترهای ورودی سرعت، ولتاژ، فاصله نازل تا قطعه کار و ضخامت نانوذرات بر تغییرات نفوذ نوسانی است. هرچه شیب خطوط در هر فاکتور بیشتر باشد، اثرات اصلی آن فاکتور بر نسبت  $S/N$  بیشتر است؛ حالت بهینه در مرحله  $I_5V_3N_1S_1F_5$  در تحلیل  $S/N$  که برای نفوذ هر چه بیشتر، بهتر رخ می‌دهد.





شکل ۲- تاثیر پارامترهای ورودی بر روی نسبت S/N

### تحلیل واریانس و بهینه‌سازی

به منظور اعتبار سنجی و انتخاب مدل‌های برتر، از آزمون‌های آماری استفاده می‌شود. جدول ۷ تحلیل واریانس برای نفوذجوش را نشان می‌دهد. براساس تحلیل آماری داده‌ها، این روش می‌تواند استدلال کند که کدام پارامتر مهم‌ترین و بیشترین اثر را بر پارامتر خروجی مورد نظر خواهد داشت. که در جدول ANOVA مقدار P دارای اهمیت است، بدین صورت که اگر کمترین مقدار داشته باشد یعنی آن پارامتر ورودی تاثیر و اهمیت بیشتری بر پارامتر خروجی مورد نظر دارد. در این مقاله زمانی که مقدار P کمتر از ۰.۰۵ باشد اثر پارامترهای ورودی بر خروجی بیشترین خواهد بود. سطح اطمینان برای این تحقیق برابر ۹۵٪ انتخاب گردیده است (ناطق، هنربخش رئوف، وحدتی خاکی، ۱۳۸۹).

جدول ۷- تحلیل واریانس پارامترها برای نفوذ.

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
I	۴	۶۵.۹۵۲۵	۶۵.۹۵۲۵	۱۶.۴۸۸۱	۸۳.۷۴	۰.۰۰۰
V	۴	۱.۲۷۲۹	۱.۲۷۲۹	۰.۳۱۸۲	۱.۶۲	۰.۳۲۷
N	۴	۰.۸۵۳۶	۰.۸۵۳۶	۰.۲۱۳۴	۱.۰۸	۰.۴۷۰
S	۴	۱.۶۷۹۴	۱.۹۷۹۴	۰.۴۱۹۸	۲.۱۳	۰.۲۴۱
F	۴	۳.۴۳۸۹	۳.۴۳۸۹	۰.۸۵۹۷	۴.۳۷	۰.۰۹۱
Error	۴	۰.۷۸۷۶	۰.۷۸۷۶	۰.۱۹۶۹		
Total	۲۴	۷۳.۹۸۵۰				

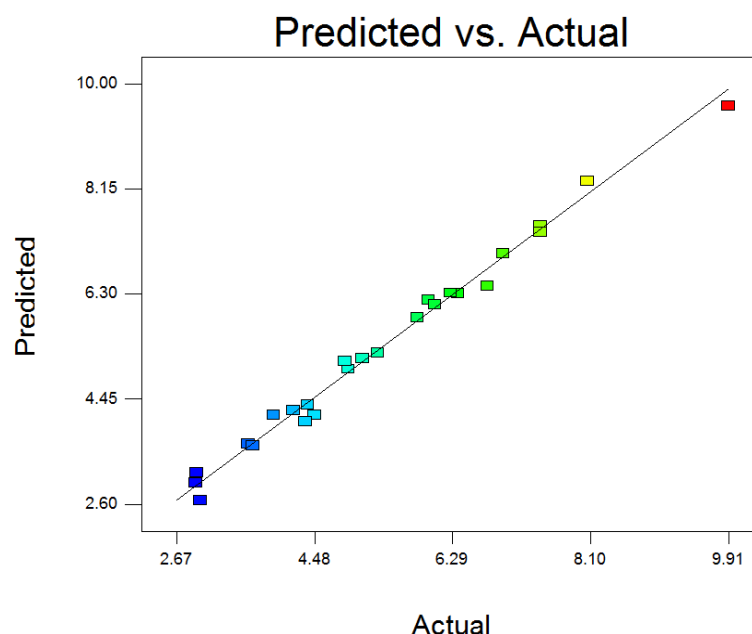
DF= Degrees of Freedom, Seq SS = Sequential Sum of Squares; Adj SS= Adjusted Mean Squares; Adj MS= Adjusted Mean Squares; F= Fisher's F ratio; P= Probability of Significance

S = 0.4437

$R^2 = 98.9\%$

$R^2_{adj} = 93.6\%$

باتوجه به جدول ۷ و مقدار P حاصل پارامترهای مؤثر بر نفوذ به ترتیب اهمیت: جریان، ضخامت نانوذرات، سرعت، ولتاژ و فاصله نازل تاقطعه کارمی باشد. یکی دیگر از معیارهای مهم برای ارزیابی دقت و کیفیت مدل های برازش شده، ضریب همبستگی<sup>۸</sup> است. این ضریب، میزان وابستگی بین پارامترهای ورودی و خروجی یک سیستم را تعیین می نماید. هرچه این مقدار به سمت یک میل کند، نشان دهنده وابستگی بیشتر بین پارامترهای ورودی و خروجی خواهد بود. (Montgomery, Runger, 2010) شکل ۳ میزان همبستگی داده ها و پیش بینی های روش تاگوچی را نشان می دهد که همان گونه که در نتایج آنالیز واریانس هم آمده دقت آن ۹۳.۶٪ است که توسط نرم افزار Design Expert 7.0 استخراج شده است.



شکل ۳- نمودار مقادیر پیش بینی شده در مقابل مقدار واقعی برای نفوذ.

در این مقاله عمق نفوذ جوش می تواند مقداری بهینه داشته باشد که برای محاسبه آن از تابع مطلوبیت استفاده می شود. برای این منظور، با استفاده از نرم افزار Minitab 14، تابع مطلوبیت کلی براساس توابع مطلوبیت میانگین ها و واریانس های پنج پارامتر ورودی در پنج سطح معرفی گردید که نتایج در جدول ۸ ارائه شده است. همچنین، جواب بهینه نیز برای پنج پارامتر مؤثر در جدول ۸ آورده شده است. در این روش، مطلوبیت هر هدف مشخص شده و سپس با استفاده از روشی نظیر میانگین هندسی مطلوبیت کل محاسبه می شود. اگر مطلوبیت تابع  $y_i(x)$  به صورت یکنواخت افزایشی باشد، میزان مطلوبیت مطابق رابطه ۲ محاسبه می شود (رشیدی، ۱۳۸۸):

<sup>۸</sup>- Correlation Coefficient

$$d_i = \begin{cases} 0 & \hat{y}_i(x) \leq Y_i^{\min} \\ \left[ \frac{\hat{y}_i(x) - Y_i^{\min}}{Y_i^{\max} - Y_i^{\min}} \right]^t & Y_i^{\min} \leq \hat{y}_i(x) \leq Y_i^{\max} \\ 1 & \hat{y}_i(x) \geq Y_i^{\max} \end{cases} \quad (2)$$

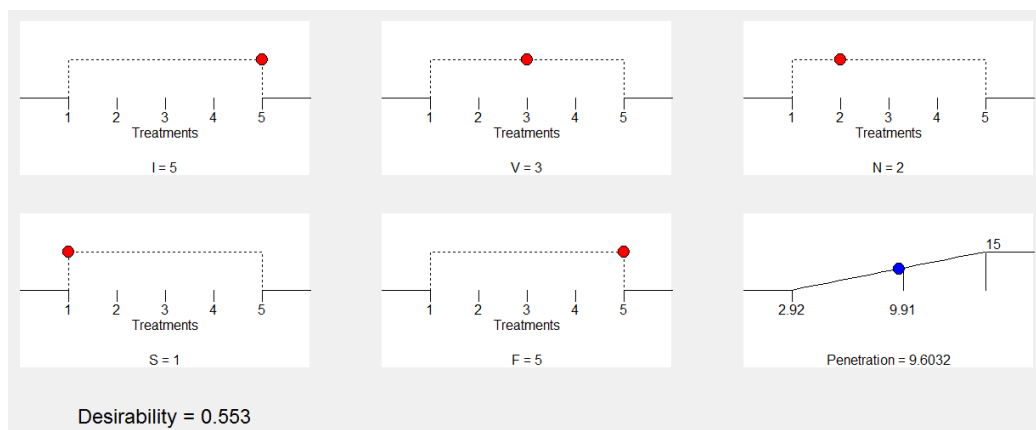
که در آن  $\hat{y}_i(x)$  تخمینی از  $y_i(x)$  و  $Y_i^{\min}$  حداقل مقدار قابل قبول  $y_i(x)$  از نظر تصمیم گیرنده،  $Y_i^{\max}$  مقداری از  $y_i(x)$  که حداکثر مطلوبیت را برای تصمیم گیرنده دارد و از آن به بعد مطلوبیت افزایش نمی‌یابد و  $t$  نیز پارامتر تعیین کننده شکل تابع مطلوبیت می‌باشد.

استفاده از تابع مطلوبیت هر چند روش کارآمدی محسوب می‌شود، ولی مشکلات خاص خود را داراست. یکی از مشکلات این روش، دشوار بودن رسم منحنی‌های بی‌تفاوتی و تعیین مطلوبیت است. تعیین مطلوبیت نسبت به قضاوت‌های تصمیم گیرنده بسیار حساس است. از سوی دیگر، تکنیک فوق زمانی کاربرد دارد که مطلوبیت مربوط به متغیرهای وابسته به طور یکنواخت کاهشی یا افزایشی باشد یا به بیان دیگر، هر چه میزان متغیر پاسخ بیشتر (یا کمتر) باشد مطلوب‌تر باشد. اما همواره این احتمال وجود دارد که تابع مطلوبیت از توان دوم باشد. در این صورت مناسب‌ترین ارزش یک پاسخ ممکن است در وسط دامنه تغییرات آن قرار گیرد.

جدول ۸- مقادیر بهینه پارامترهای ورودی برای نفوذ.

I	V	N	S	F	Max of Penetration
۵	۳	۲	۱	۵	mm ۹.۶۰

شرایط بهینه عوامل در محدوده سطوح انتخاب شده شامل میزان شدت جریان ۶۰۰ آمپر، ولتاژ قوس ۲۸ ولت، فاصله نازل تا قطعه - کار ۳۲.۵ میلیمتر، سرعت جوشکاری ۳۰۰ میلیمتر بر دقیقه و ضخامت نانو مواد ۱ میلیمتر می‌باشد. در این حالت حداکثر نفوذ جوش ۹.۶۰ میلیمتر می‌باشد و مقدار مطلوبیت مطابق شکل ۴ برابر ۰.۵۵۳ می‌باشد.



شکل ۴- تابع مطلوبیت برای نفوذ جوش

### نتیجه گیری

هدف از انجام این تحقیق دستیابی به مقادیر بهینه برای بهبود در کیفیت جوش و خواص مکانیکی مورد نظر بوده است. در پایان با انجام تمام مراحل اثر هر یک از پارامترهای ورودی را بر عمق نفوذ جوش به صورت زیر می‌باشد:

۱ - باتوجه به نمودارهای میانگین SN و نتایج تحلیل واریانس، حالت بهینه برای نفوذ جوش (هر چه بیشتر، بهتر) در مرحله  $I_5V_3N_1S_1F_5$  رخ می‌دهد.

۲ - با توجه به نتایج جدول و درجه اطمینان ۹۵ درصد به ترتیب پارامترهای ورودی شدت جریان، ضخامت نانوذرات، سرعت، ولتاژ و فاصله نازل تا قطعه کار روی نفوذ جوش دارای بیشترین تأثیر هستند علت این افزایش نفوذ با افزایش شدت جریان گرمای ورودی به قطعه کار افزایش می‌یابد پس نفوذ زیاد می‌شود همچنین با افزایش مواد نانو و ایجاد پدیده مارانگونی نفوذ زیاد می‌شود و با کاهش سرعت حرکت نازل جوش باعث افزایش گرمای محل جوشکاری شده و نفوذ افزایش می‌یابد و با افزایش ولتاژ نفوذ به میزان کمی افزایش می‌یابد چون ولتاژ بیشتر تحت تأثیر جریان می‌باشد و همچنین با کاهش فاصله نازل تا قطعه کار تمرکز حرارتی در منطقه جوشکاری افزایش می‌یابد و باعث افزایش نفوذ جوش می‌شود

۳ - با توجه به نتایج تحلیل واریانس بدست آمده ضریب همبستگی ۹۳.۶٪ و مقدار مطلوبیت برابر ۰.۵۵۳ می‌باشد.

## مراجع

رشیدی، علی رضا (۱۳۸۸). استفاده از مدل برنامه ریزی آرمانی غیر خطی برای بهینه سازی مسائل دارای چند سطح پاسخ: فصلنامه مدیریت. سال ششم. شماره ۱۴.

کوکبی، امیر حسین (۱۳۸۳). تکنولوژی جوشکاری: انتشارات آزاده. جامعه ریخته‌گران.

ناطق، بهزاد و هنربخش رئوف، عباس و وحدتی خاکی، جلیل (۱۳۸۹). تعیین شرایط بهینه تولید آلیاژ آمورف در سامانه Ni-Sn در حضور تیتانیوم به روش آلیاژسازی مکانیکی با استفاده از روش تاگوچی. چهارمین همایش مشترک انجمن مهندسی متالورژی و انجمن علمی ریخته‌گری ایران: دانشگاه علم و صنعت. ص ۴۳۸-۴۵۱.

Aghakhani.M., Ghaderi. M.R., Eslampanah A.H., & Farzamnia.S. (2012). "Prediction of bead width in submerged arc welding process using nano TiO<sub>2</sub> by fuzzy logic". 20th Annual International Conference on Mechanical Engineering-ISME, Iran.

Aghakhani.M., Ghaderi. M.R., Rajabi.L., & Derakhshan.A.A. (2011). "Modeling of weld penetration in submerged arc welding of mild steel coated with TiO<sub>2</sub> Nano particles using response surface methodology". Journal of Nanoengineering and Nanomanufacturing. 1(2011), Pp. 203-211.

Chatterjee.S., & Hadi.A.S. (2006). "Regression Analysis by Example". Wiley-Interscience.

Chen. W., Allen.J.K., Tsui.K.L., & Mistree. F. (1996). "A procedure for robust design: minimizing variations caused by noise factors and control factors", ASME Journal of Mechanical Design. 4(1996), Pp. 478-485.

Du. X., Sudjianto. A., & Chen.W. (2004). "An integrated framework for optimization under uncertainty using inverse reliability strategy". ASME Journal of Mechanical Design. 126 (4) (2004), Pp. 562-570.

Fattahi. M., Nabhani.N., Vaezi.M., & Rahimi.E. (2011). "Improvement of impact toughness of AWS E6010 weld metal by adding TiO<sub>2</sub> nanoparticles to the electrode coating". Materials Science and Engineering. A; 528(2011), Pp. 8031-8039.

Gunaraj.V., & Murugan.N. (2000). "Prediction and optimization of weld bead volume for the submerged arc process". Welding Journal AWS, Pp. 286-294.

Houldcroft. P. T. (1989). "Submerged Arc Welding 2nd ed". Abington Publishing. Cambridge. England.

Lu.Sh., Fujii.H., Sugiyama.H., Tanaka.M., & Nogo. K. (2002). "Weld penetration and marangoni convection with oxide fluxes in GTA welding". Materials Transactions, vol. 43. No. 11 Pp. 2926 - 2931.

Ma.A. (2001). "Effect of TiO<sub>2</sub> - containing fluxes on the mechanical properties and microstructure in submerged-arc weld steels". Material characterization. 00(2001), Pp. 30-31.

Montgomery.D.C., & Runger.G.C. (2010). "Applied Statistics and Probability for Engineers", John Wiley & Sons.

Nagesh .G.L.D. (2002). "Prediction of weld bead geometry and penetration in shielded metal arc welding using artificial neural network". Journal of Materials Processing Technology. No. 123. Pp. 303-312.

Pal.T.K., & Maity.U.K. (2011). "Effect of nano size TiO<sub>2</sub> particles on mechanical properties of AWS E 11018M type electrode". Materials Sciences and Applications. 2(2011), Pp. 1285-1292.

Rowlands. H., & Antony. F. (2003). "Application of design of experiments to a spot welding process, Assembly Automation". 23(2003), Pp. 273-279.

Roy. R.K. (1990). "A primer on the Taguchi method", New York: Van Nostrand Reinhold.

Seok.H.B., Soon.H.H., Seok .S.C., Deuk.Y.J., & Won.S.J. (2010). "Optimization of process parameters for recycling of mill scale using Taguchi experimental design". Journal of Mechanical Science and Technology. 24(10)(2010), Pp. 2127-2134.

Tarng. Y.S., Yang.W.H., & Juang.S.C. (2000). "The use of fuzzy logic in the Taguchi method for optimization of the submerged arc welding process". The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 16(2000), Pp. 688-694.