

## مقدمه

تغییر رویکرد طراحی محصولات فلزی به سمت کاهش وزن و بهبود خواص مکانیکی یا شیمیایی قطعات باعث تغییر گرایش طراحان و مهندسیین از استفاده از فولاد و آلیاژهای آن به سمت مواد سبکتر و مقاوم تر مانند آلیاژهای تیتانیوم، آلومینیوم و مواد مرکب شده است، از میان این مواد آلیاژهای آلومینیوم به خاطر قیمت پایین تر و سهولت در دسترسی جذابیت بیشتری برای آن‌ها دارد. آلیاژهای آلومینیوم به دو دسته کلی آلیاژهای کار شده و آلیاژهای ریختگی تقسیم می‌شوند که آلیاژهای کار شده به صورت ورق، میلگرد و دیگر مقاطع موجود می‌باشند. آلومینیوم به صورت ورق کاربرد زیادی در گستره وسیعی از صنایع مانند صنایع خوردوسازی، لوازم خانگی، تجهیزات ساحلی و فراساحلی، کشتی سازی، ساخت مبدل‌های حرارتی و ... دارد و روش‌های جوشکاری قوس الکتریکی یک از مهمترین فرآیندهایی است که در این صنایع بر روی ورق آلومینیوم انجام می‌گیرد. از میان روش‌های جوشکاری قوس الکتریکی فرآیند جوش الکترو تنگستن با گاز محافظ<sup>۱</sup> به علت ویژگی‌هایی مانند محافظت از حوضچه مذاب در مقابل گازهای اتمسفر و تمرکز حرارتی بالا در نقطه جوش و قابلیت ایجاد اتصالات جوشی ظریف و تمیز دارای ارجحیت است. (گروه جوشکاری آدور (ADOR)، ۲۰۰۵)

تاکنون تحقیقات بسیاری بر روی جوشکاری فلزات آلیاژهای گوناگون به روش جوش با الکترو تنگستن با گاز محافظ انجام شده است که هر یک به بررسی یک سری از ویژگی‌های اتصالات حاصله از این فرآیند مانند استحکام، هندسه گرده جوش، ساختار و اندازه دانه‌ها و میزان سختی فلز در نواحی مختلف گرده جوش پرداخته‌اند. ناگش و داتا (۲۰۱۰) در تحقیق خود با استفاده از داده‌های یک مقاله منتشر شده سعی در به دست آوردن رابطه بین پارامترهای کنترلی فرآیند جوش ورق آلومینیوم ۱۱۰۰ شامل سرعت خطی جوش، سرعت تغذیه سیم فلزی پرکننده، درصد زمان تمیزکاری یک سیکل، آمپراژ جریان و گپ بین نوک الکتروود و ورق با خروجی آزمایش که شامل پارامترهای هندسه گرده جوش یعنی عرض بالایی و پایینی و ارتفاع بالایی و پایینی گرده جوش داشته‌اند. بالاسوبرامانیان و جایابالان (۲۰۰۷) بر روی مدلسازی با روش سطوح پاسخ جوش الکترو تنگستن ورقی از جنس آلیاژ تیتانیوم (Ti-6Al-4V) و ضخامت ۱.۶ میلی‌متر مطالعه‌ای صورت داده‌اند. خروجی‌هایی که در این مقاله مورد مطالعه قرار گرفته‌اند سختی ناحیه جوش و اندازه دانه‌ها در ناحیه متأثر از حرارت است. بالاسوبرامانیان، جایابالان و بالاسوبرامانیان (۲۰۰۷) با استفاده از نمونه‌های آزمایشات تحقیق قبلی خود به مطالعه نرخ خوردگی بر حسب میلی‌متر در سال ناحیه اتصال جوشی ورق از جنس آلیاژ تیتانیوم (Ti-6Al-4V) پرداخته‌اند. کومار، بالاسوبرامانیان و ساناواولا (۲۰۰۷) در تحقیقی به بررسی و مدلسازی تأثیر پارامترهای جوشکاری تیگ پالسی بر روی پارامترهای استحکام کششی ورقی از جنس آلومینیوم ۶۰۶۱ پرداخته‌اند. دوتا و پراتیهار (۲۰۰۷) در تحقیق خود با استفاده از داده‌های مقاله منتشر شده برای ایجاد یک رابطه بین ورودی و خروجی فرآیند جوش تیگ (TIG)<sup>۲</sup> برای انجام تحلیل رگرسیون<sup>۳</sup> استفاده کرده‌اند. تارنگ، تسایو یه (۱۹۹۹) در تحقیقی برای بررسی اثر پارامترهای مختلف جوشکاری تیگ بر روی هندسه گرده جوش ورق‌های

<sup>1</sup> gas tungsten arc welding (GTAW)

<sup>2</sup> tungsten inert gas

<sup>3</sup> regression

آلومینیوم از طراحی تحلیل آزمایشات تاگوچی استفاده کردند. نرم‌ن، دراژنر و پرانگل (۱۹۹۹) در مقاله خود تغییرات ساختار ورق آلیاژ آلومینیومی در جوشکاری تیگ را مورد بررسی قرار داده اند.

در این متن به بررسی تأثیر عوامل قابل کنترل در فرآیند جوش الکتروکود تنگستن با گاز محافظ بر تغییر اندازه ناحیه متأثر از حرارت در مقطع جوش ورق آلومینیومی سری ۵۰۰۰ پرداخته شده است علت انتخاب این نوع آلیاژ ویژگی جوش پذیری خوب و مقاومت مناسب نسبت به خستگی خوردگی این سری از آلیاژهای است. این سری از آلیاژهای آلومینیوم کار شده قابلیت سختکاری با عملیات حرارتی را ندارند بنابراین استحکام فلز در ناحیه تحت تأثیر حرارت کمتر از فلز پایه است همچنین خاصیت مقاومت به خوردگی آن‌ها در ناحیه تأثیر گرفته از حرارت دچار افت می‌گردد (گروه تکنولوژی جوشکاری ESAB) لذا کاهش هرچه بیشتر وسعت این منطقه از جوش باعث بهبود استحکام و مقاومت به خوردگی ناحیه اتصال بین دو ورق می‌گردد. در این تحقیق برای بررسی تأثیر عوامل کنترل پذیر بر روی اندازه ناحیه آزمایشاتی بر اساس طرح مرکب مرکزی که یکی از روش‌های رویکرد طراحی آزمایشات می‌باشد طراحی و اجرا گردید. سپس نمونه‌ها برای استخراج اندازه ناحیه تأثیر گرفته از حرارت مورد بررسی و اندازه‌گیری قرار گرفتند. داده‌های به دست آمده به نرم افزار تحلیل آماری منتقل شد تا با روش تحلیل سطوح پاسخ مورد تحلیل، مدلسازی و در نهایت بهینه‌سازی قرار گیرند. در این متن ابتدا به توضیح در مورد طراحی آزمایشات انجام شده در این تحقیق و شرایط و تجهیزات موجود در انجام آزمایشات پرداخته شده است. سپس روش اندازه‌گیری انجام شده بر روی نمونه‌ها و استخراج داده‌ها شرح داده خواهد شد. در ادامه نتایج حاصل از تحلیل آماری داده‌های آزمایشات به صورت مدل‌های ریاضی که یک رابطه بین ورودی و خروجی فرآیند جوش تعریف می‌کنند ارائه و در مورد معیار صحت آن‌ها بحث خواهد شد. در ادامه با بررسی کانتورهای ترسیم شده به وسیله نرم افزار آماری نحوه تأثیر هر کدام از عوامل قابل کنترل بر تغییر اندازه ناحیه متأثر از حرارت شرح داده خواهد شد. در ادامه نحوه استفاده از مدل‌های ریاضی به دست آمده از روش سطوح پاسخ و جایگذاری آنها در الگوریتم بهینه‌سازی تریپل تدریجی مقادیر بهینه هر یک از عوامل جهت دستیابی به کمترین اندازه توضیح داده شده است و همچنین برای تعیین صحت مقادیر بهینه به دست آمده از این روش با مقادیر بهینه پیشنهادی توسط ابزار تحلیل سطوح پاسخ نرم افزار مقایسه شده است. در پایان نتایج به دست آمده مورد بحث قرار گرفته است.

### طراحی آزمایشات

برای طراحی آزمایشات به منظور بررسی تغییرات وسعت ناحیه متأثر از حرارت در روش جوش الکتروکود تنگستن با گاز محافظ ابتدا باید عوامل مؤثر و قابل کنترل فرآیند تعیین گردد. در این تحقیق برای جوشکاری نمونه‌های مورد مطالعه بر خلاف اکثر مقالات گذشته از روش جوشکاری الکتروکود تنگستن با جریان متناوب استفاده شده است بنابراین جریان پایه و جریان اوج که در جوشکاری پالسی جزء عوامل اصلی قابل کنترل هستند وجود ندارند همچنین به دلیل عدم استفاده از فلز پرکننده در جوش ورق سرعت تغذیه مفتول فلز پرکننده نیز از لیست عوامل قابل کنترل حذف شده است. چهار عامل قابل کنترل در فرآیند جوشکاری مورد بررسی در این تحقیق عبارتند از: شدت جریان، فرکانس جریان متناوب، سرعت حرکت خطی تورچ و فاصله نوک الکتروکود با ورق یا به اصطلاح گپ الکتروکود. پس از تعیین عوامل قابل کنترل بایستی بازه تغییرات هر یک از عوامل نیز مشخص گردد بدین منظور تعدادی نمونه با مقادیر مختلف

برای هر یک از عوامل جوش داده شد تا بازه هر یک از آنها که در آن بازه جوشکاری و اتصال بین دو ورق امکانپذیر باشد مشخص گردد. گام بعدی در طراحی آزمایشات تعیین تعداد سطوح هر یک از عوامل است که در این تحقیق به دلیل استفاده از روش سطوح پاسخ برای هر یک از عوامل ۲ سطح بالا و پایین در نظر گرفته شده است (خوری (khuri) و موخوپدهیای (mukhopadhyay). (۲۰۱۰). دامنه تغییرات و سطوح هر یک از این عوامل در جدول ۱ به نمایش درآمده است.

جدول ۱- پارامترهای کنترلی فرآیند جوشکاری

| نام عامل                  | نماد | واحد اندازه گیری | دامنه تغییرات | سطح پایین | سطح بالا |
|---------------------------|------|------------------|---------------|-----------|----------|
| شدت جریان                 | A    | آمپر             | ۱۱۰ - ۱۳۰     | ۱۱۰       | ۱۳۰      |
| فرکانس جریان              | F    | هرتز             | ۸۵ - ۱۱۵      | ۸۵        | ۱۱۵      |
| سرعت خطی                  | S    | میلیمتر بر دقیقه | ۲۴۰ - ۳۶۰     | ۲۴۰       | ۳۶۰      |
| فاصله اکتروود با ورق (گپ) | G    | میلی متر         | ۲/۵ - ۳/۵     | ۲/۵       | ۳/۵      |

از آنجا که روش تحلیل آماری مورد استفاده در این تحقیق روش تحلیل سطوح پاسخ<sup>۴</sup> بوده است برای طراحی آزمایشات به شیوه طرح عاملی کسری دو انتخاب اصلی وجود دارد که این دو شیوه شامل طرح مرکب مرکزی<sup>۵</sup> و طرح باکس بنکن<sup>۶</sup> می شوند. از آنجا که طرح مرکب مرکزی از دقت بالاتری برای مدلسازی فرآیندها برخوردار است (هند بوک آمار مهندسی) این شیوه برای طراحی آزمایشات جوشکاری نمونه ها انتخاب شد. مقدار پارامترها در نقاط محوری طرح آزمایش همان مقدار پارامترها در نقاط گوشه ای لحاظ گردید زیرا با خروج مقدار پارامترها از بازه تعیین شده امکان ایجاد جوش خصوصا در سرعت های بالاتر و شدت جریان پایین تر امکانپذیر نبود، به همین دلیل نوع طرح آزمایش طرح مرکب مرکزی مرکز وجهی<sup>۷</sup> انتخاب گردید. به به منظور حفظ دقت و رعایت اصل اجرای تصادفی آزمایشات بلوک بندی آزمایشات در طراحی جدول آزمایشات لحاظ گردید، بدین ترتیب آزمایشات هر بلوک در یک روز مشخص انجام گرفت. از آنجا که اصل تکرارپذیری در انجام آزمایشات رعایت شده بود تغییرات مقادیر خروجی در نقطه مرکزی بسیار کم پیش بینی می شد بنابراین تعداد تکرار نقطه مرکزی به سه عدد محدود گشت. ماتریس طراحی آزمایشات در جدول ۲ به نمایش درآمده است.

<sup>4</sup> response surface method

<sup>5</sup> central composite design

<sup>6</sup> Box- Behnken

<sup>7</sup> face center central composite design

جدول ۲- ماتریس طراحی آزمایشات

| شماره<br>آزمایش | شماره<br>بلوک | شدت<br>جریان<br>A | فرکانس<br>جریان<br>F | سرعت<br>خطی<br>S | گپ<br>G | مساحت ناحیه متأثر از<br>حرارت (mm <sup>2</sup> )(area) | نسبت ناحیه متأثر از<br>حرارت به مقطع گرده<br>جوش (ratio) |
|-----------------|---------------|-------------------|----------------------|------------------|---------|--|--|
| ۱               | ۲             | ۱۱۰               | ۸۵                   | ۲۴۰              | ۲/۵     | ۷/۴۳۰۷   | ۰/۶۹۲۶۲  |
| ۲               | ۱             | ۱۳۰               | ۸۵                   | ۲۴۰              | ۲/۵     | ۱۳/۰۸۷۲  | ۰/۷۷۴۸۴  |
| ۳               | ۱             | ۱۱۰               | ۱۱۵                  | ۲۴۰              | ۲/۵     | ۶/۳۵۰۹   | ۰/۷۱۰۰۸  |
| ۴               | ۲             | ۱۳۰               | ۱۱۵                  | ۲۴۰              | ۲/۵     | ۱۲/۲۶۶۶  | ۰/۷۵۵۵۴  |
| ۵               | ۱             | ۱۱۰               | ۸۵                   | ۳۶۰              | ۲/۵     | ۶/۵۴۳۶   | ۱  |
| ۶               | ۲             | ۱۳۰               | ۸۵                   | ۳۶۰              | ۲/۵     | ۸/۹۷۰۵   | ۰/۷۵۱۷۲  |
| ۷               | ۲             | ۱۱۰               | ۱۱۵                  | ۳۶۰              | ۲/۵     | ۴/۴۶۲۴   | ۱  |
| ۸               | ۱             | ۱۳۰               | ۱۱۵                  | ۳۶۰              | ۲/۵     | ۸/۲۹۹۰   | ۰/۷۷۹۳۸  |
| ۹               | ۲             | ۱۱۰               | ۸۵                   | ۲۴۰              | ۳/۵     | ۵/۳۹۷۰   | ۰/۴۳۱۷۳  |
| ۱۰              | ۲             | ۱۳۰               | ۸۵                   | ۲۴۰              | ۳/۵     | ۱۳/۳۳۴۹  | ۰/۷۲۷۱۷  |
| ۱۱              | ۲             | ۱۱۰               | ۱۱۵                  | ۲۴۰              | ۳/۵     | ۸/۹۵۰۴   | ۰/۷۲۰۱۱  |
| ۱۲              | ۱             | ۱۳۰               | ۱۱۵                  | ۲۴۰              | ۳/۵     | ۱۲/۹۳۸۹  | ۰/۷۵۳۱۳  |
| ۱۳              | ۲             | ۱۱۰               | ۸۵                   | ۳۶۰              | ۳/۵     | ۵/۰۲۹۷   | ۰/۸۶۳۵۲  |
| ۱۴              | ۱             | ۱۳۰               | ۸۵                   | ۳۶۰              | ۳/۵     | ۹/۴۴۰۲   | ۰/۷۵۱۴۶  |
| ۱۵              | ۱             | ۱۱۰               | ۱۱۵                  | ۳۶۰              | ۳/۵     | ۳/۴۴۲۱   | ۱  |
| ۱۶              | ۲             | ۱۳۰               | ۱۱۵                  | ۳۶۰              | ۳/۵     | ۶/۴۱۹۶   | ۰/۵۷۰۱۱  |

|    |   |     |     |     |     |         |         |
|----|---|-----|-----|-----|-----|---------|---------|
| ۱۷ | ۳ | ۱۱۰ | ۱۰۰ | ۳۰۰ | ۳   | ۷/۲۵۷۳  | ۰/۷۹۳۴۱ |
| ۱۸ | ۳ | ۱۳۰ | ۱۰۰ | ۳۰۰ | ۳   | ۱۱/۲۶۷۶ | ۰/۷۵۸۱۰ |
| ۱۹ | ۳ | ۱۲۰ | ۸۵  | ۳۰۰ | ۳   | ۸/۵۸۲۲  | ۰/۷۱۵۹۵ |
| ۲۰ | ۳ | ۱۲۰ | ۱۱۵ | ۳۰۰ | ۳   | ۸/۳۸۴۳  | ۰/۷۳۱۹۳ |
| ۲۱ | ۳ | ۱۲۰ | ۱۰۰ | ۲۴۰ | ۳   | ۹/۹۰۸۶  | ۰/۷۸۲۸۳ |
| ۲۲ | ۳ | ۱۲۰ | ۱۰۰ | ۳۶۰ | ۳   | ۶/۴۹۴۶  | ۰/۷۸۹۳۳ |
| ۲۳ | ۳ | ۱۲۰ | ۱۰۰ | ۳۰۰ | ۲/۵ | ۸/۶۴۹۵  | ۰/۷۶۷۲۵ |
| ۲۴ | ۳ | ۱۲۰ | ۱۰۰ | ۳۰۰ | ۳/۵ | ۵/۹۲۹۴  | ۰/۵۴۵۰۴ |
| ۲۵ | ۱ | ۱۲۰ | ۱۰۰ | ۳۰۰ | ۳   | ۸/۵۸۵۱  | ۰/۷۳۵۰۷ |
| ۲۶ | ۱ | ۱۲۰ | ۱۰۰ | ۳۰۰ | ۳   | ۷/۶۳۳۹  | ۰/۷۳۱۷۳ |
| ۲۷ | ۲ | ۱۲۰ | ۱۰۰ | ۳۰۰ | ۳   | ۸/۰۰۱۷  | ۰/۷۴۴۶۰ |

## اجرای آزمایشات Conference 2014

در این تحقیق از ورق‌های از جنس آلومینیوم ۵۰۵۲ با ضخامت ۲ میلی‌متر برای تأمین نمونه‌های مورد نیاز برای جوشکاری استفاده شد. علت انتخاب این ماده ویژگی مقاومت به خوردگی بالا و داشتن بالاترین استحکام در بین گروه آلیاژهای آلومینیوم مقاوم به خوردگی، مقاومت نسبت به خستگی خوب کاربرد فراوان آن در کاربردهای روزمره مانند ساخت مخازن اتمسفریک، خودروهای زره پوش، لوازم خانگی و همچنین در موارد تخصصی مانند ساخت بدنه شناورهای سبک و ساخت مبدل‌های حرارتی است. جدول ترکیب شیمیایی نمونه ورق که از طریق آزمایش طیف سنجی که با نام کوانتومتری شناخته می‌شود به دست آمده است در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳= ترکیب عناصر آلیاژی آلومینیوم ۵۰۵۲

| نام عنصر آلیاژی | منیزیم | آهن | کروم | سیلیسیم | مس   |
|-----------------|--------|-----|------|---------|------|
| درصد            | ۲/۶۵۸  | ۰/۴ | ۰/۱۹ | ۰/۱۲۳   | ۰/۰۹ |

نمونه های مورد استفاده برای جوشکاری به صورت قطعاتی با ابعاد ۵۰×۱۰۰ میلی‌متر برش داده شدند، سپس لبه های آنها به منظور آماده سازی برای جوشکاری از هرگونه آلودگی و لایه اکسیدی توسط سمباده و برس سیمی زدوده شد. در آخرین مرحله آماده سازی سطح مجاور لبه ها به وسیله الکل از مواد روغنی و اثرات به جامانده از مراحل قبل پاک گردید. از آنجا که نوع اتصال مورد نظر برای نمونه های جوش در این تحقیق از نوع اتصال لب به لب<sup>۸</sup> برای اجرای هر آزمایش جوش دو نمونه بر روی میز اتوماتیک طراحی شده به این منظور در کنار یکدیگر مستقر و به وسیله روبندهایی گیره بندی شدند. در این تحقیق جوشکاری نمونه ها تحت گاز محافظ آرگون با خلوص ۹۹/۷ درصد و با استفاده از دستگاه جوش الکترو تنگستن مدل دیجی تیگ<sup>۹</sup> ۲۵۰ ساخت شرکت گام الکتریک انجام شد. شرایط و پارامترهایی که در کلیه آزمایشات مقدار آنها ثابت لحاظ شده است در جدول ۴ به نمایش در آمده است.

جدول ۴- پارامترهای ثابت در فرآیند جوشکاری

| نام   | دبی جریان گاز | قطبیت معکوس | قطر الکترو د | زاویه الکترو د |
|-------|---------------|-------------|--------------|----------------|
| واحد  | لیتر در دقیقه | درصد سیکل   | میلی متر     | درجه           |
| مقدار | ۱۵            | ۴۰          | ۲/۴          | ۷۵             |

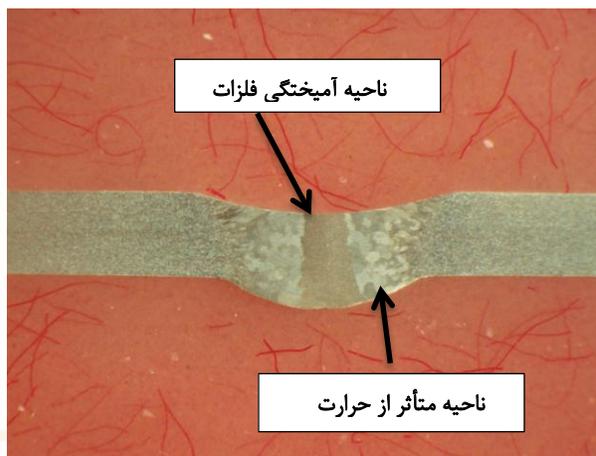
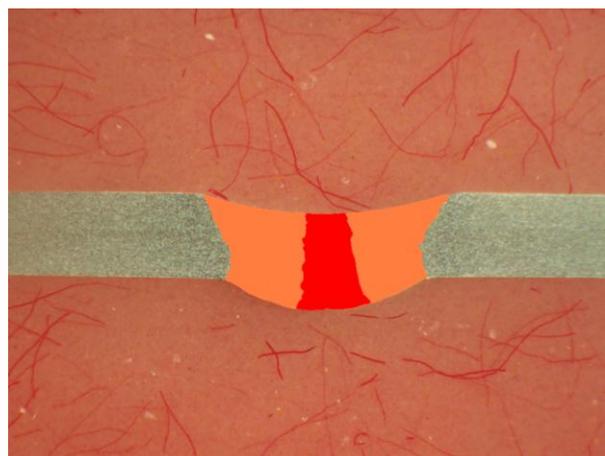
#### اندازه گیری و استخراج داده ها

به منظور آماده سازی نمونه های جوش داده شده برای انجام اندازه گیری ابتدا از فاصله ۴۰ میلی متری انتهای خط جوش تا فاصله ۲۵ میلی متری انتهای جوش نواری از قطعه جوش داده شده جدا شد تا بدین ترتیب اثرات ناشی از نوسانات ولتاژ، شدت جریان و سرعت خطی در ابتدا و انتهای خط جوش بر مقطع جوش مورد بررسی به حداقل ممکن کاهش یابد، سپس قطعه مستطیلی به مرکزیت خط جوش و به عرض ۳۰ میلی متر از این نوار بریده شد. قطعه به دست آمده به وسیله قالبگیری حرارتی در ماده ای با پایه اکریلیک ثابت و مستقر گردید. با انجام عملیات سمباده زنی و پولیش مکانیکی سطح نمونه قالب گیری شده که سطح مقطع جوش را در بر گرفته

<sup>8</sup> butt joint

<sup>9</sup> DIGITIG

آماده عمل اچ گردید. فرآیند اچ به وسیله محلول پولنت<sup>۱۰</sup> و به مدت ۷ ثانیه انجام گرفت، بدین ترتیب با آشکارشدن تغییرات ایجاد شده در ریز ساختارهای فلزی در نواحی مختلف نمونه، این نواحی در تصاویر با بزرگ‌نمایی کم همانگونه که در تصویر ۱ مشاهده می‌شود قابل تشخیص خواهند بود. تصویر سطح مقطع جوش هر نمونه با استفاده از استریوماکروسکوپ<sup>۱۱</sup> ساخت شرکت الیمپیوس<sup>۱۲</sup> با بزرگ‌نمایی ۱۰ برابر ثبت گردید. تصاویر ثبت شده برای اندازه‌گیری مساحت ناحیه متأثر از حرارت به نرم افزار پردازش تصاویر ام-آی‌پی (MIP) که به طور خاص به منظور تحلیل ریز ساختار فلزات تولید شده است منتقل گردید که نتایج خروجی این نرم افزار در تصویر ۲ به نمایش درآمده است. داده‌های به دست آمده شامل مساحت ناحیه متأثر از حرارت و مساحت قسمت درهم‌آمیختگی فلزات است. نتایج حاصل از اندازه‌گیری در دو ستون انتهایی جدول ۲ به نمایش درآمده است.



تصویر ۲- مناطق مختلف گرده جوش تفکیک شده توسط نرم افزار ام-آی‌پی

تصویر ۱- تصاویر ثبت شده به وسیله استریوماکروسکوپ

### تحلیل داده‌ها

از داده‌های به دست آمده از نرم افزار پردازش تصویر دو پارامتر مساحت ناحیه متأثر از حرارت و همچنین نسبت مساحت ناحیه متأثر از حرارت به مساحت کل مقطع جوش به دست آمد. هرچه مقطع گرده جوش کوچکتر باشد به تبع مساحت ناحیه متأثر از حرارت نیز کوچکتر است و مقطع جوش کوچک ممکن است با ریسک عدم نفوذ همراه باشد لذا مساحت ناحیه متأثر از حرارت به تنهایی معیار مناسبی برای قضاوت در مورد بهینه‌گی گرده جوش نیست. به همین دلیل در این تحقیق علاوه بر مساحت ناحیه متأثر از

<sup>10</sup> poulant

<sup>11</sup> stereo microscope

<sup>12</sup> Olympus

حرارت متغیر نسبت ناحیه متأثر از حرارت به مقطع گرده جوش نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. هر چه مقدار این خروجی کمتر باشد مساحت کمتری از گرده جوش در ناحیه متأثر از حرارت قرار دارد و ناحیه درهم آمیختگی فلزات سهم بیشتری از مساحت گرده جوش را تشکیل می‌دهد که این امر تضمین کننده وجود یک اتصال جوشی با نفوذ کامل خواهد بود. به منظور بهینه سازی همزمان این دو پارامتر با استفاده از روش وزن دهی و هم مرتبه سازی خروجی‌ها یک خروجی واحد که ترکیبی از مساحت و نسبت ناحیه متأثر از حرارت به دست آمد. در این روش نسبت ناحیه متأثر از حرارت به علت اهمیت بالاتر در کیفیت جوش دارای ضریب وزنی ۰/۷ و مساحت ناحیه مثر از حرارت ضریب وزنی ۰/۳ را دریافت کرد.

با استفاده از تحلیل رگرسیونی روش سطوح پاسخ نرم افزار آماری مورد استفاده، برای هر یک از خروجی‌های مورد نظر مدل ریاضی به صورت چند جمله‌ای درجه دو به دست آمده است. برای بررسی برازش مدل‌های ریاضی از معیار ضریب همبستگی و ضریب همبستگی تعدیل یافته<sup>۱۳</sup> استفاده شده است بدین شکل که هر چه عدد ضریب همبستگی و ضریب همبستگی تعدیل یافته به عدد یک نزدیکتر باشد مدل از دقت بیشتری برای پیش بینی نتیجه آزمایشات برخوردار است. همچنین تحلیل باقیمانده‌ها نیز به عنوان یکی از معیارهای کیفیت مدل مورد بررسی قرار گرفته اند.

از آنجا که مدل درجه ۲ کامل از نظر معیار ضریب همبستگی تعدیل یافته مناسب تشخیص داده نشده اند شکل اصلاح شده‌ای از یک چند جمله‌ای درجه ۲ به عنوان مدل ریاضی برای هر یک از خروجی‌ها ارائه گردیده است. بدین ترتیب برای مساحت ناحیه متأثر از حرارت رابطه شماره (۱) توسط روش رگرسیون به دست آمده است که ضریب همبستگی ۹۸/۸ درصد و ضریب همبستگی تعدیل یافته ۹۷ درصد برای این چند جمله‌ای محاسبه شده است. برای نسبت مساحت ناحیه متأثر از حرارت به مساحت کل مقطع جوش رابطه شماره (۲) ارائه گردیده است که ضریب همبستگی ۹۷ درصد و ضریب همبستگی تعدیل یافته ۹۵ درصد برای این چند جمله‌ای برای آن به دست آمده است. برای خروجی ترکیبی رابطه (۳) به دست آمده است که ضریب همبستگی ۹۸/۶ درصد و ضریب همبستگی تعدیل یافته ۹۶/۶ درصد برای این چند جمله‌ای برای آن به دست آمده است، همچنین نمودارهای تحلیل باقیمانده‌ها این خروجی در نمودار ۱ و ۲ به نمایش درآمده است. نمودار ۱ که مقدار باقیمانده‌ها در هر اجرای آزمایش را به نمایش گذاشته است بیانگر این امر است که الگوی تغییرات مقدار باقیمانده‌ها با شماره آزمایشات هیچ نوع وابستگی ندارد. نمودار ۲ که مقدار باقیمانده‌ها در مقابل مقادیر خروجی نشان می‌دهد که مقدار باقیمانده ارتباطی با خروجی آزمایشات ندارد و افزایش مقدار خروجی‌ها باعث تغییر الگوی باقیمانده‌ها نمی‌گردد.

$$\begin{aligned} \text{area} = & 78.5174 - 2.3916A - 0.2686F + 0.1899S + 33.7379G + 0.0119A^2 \quad (1) \\ & + 0.0018F^2 - 7.4699G^2 - 0.0016AS + 0.0873AG - 0.0005FS + 0.0002SG \end{aligned}$$

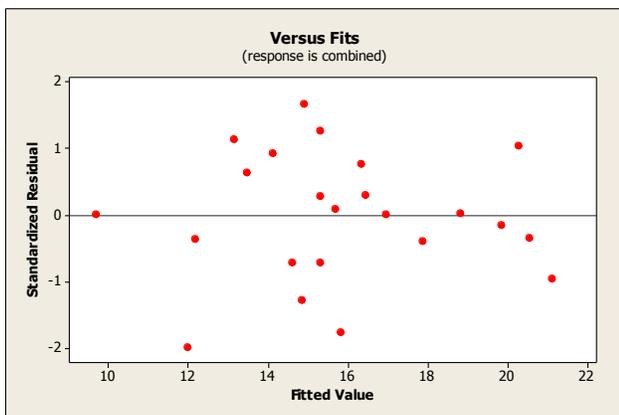
<sup>13</sup> adjusted (adj)

$$\text{ratio} = -8.04372 + 0.08097 A + 0.08077 F + 0.01743 S - 1.58534 G - 0.0001 F^2 + 0.00001 S^2 \quad (2)$$

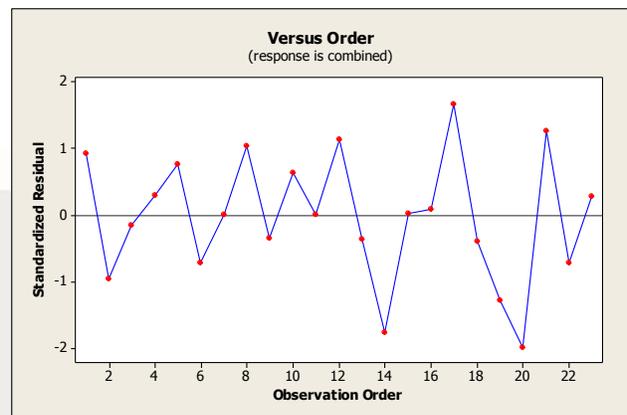
$$- 0.00049 A F - 0.00018 A S + 0.00602 A G - 0.00005 F S + 0.00449 F G + 0.00114 S G$$

$$\text{combined} = 84.1364 - 3.6196 A + 1.1262 F + 0.256 S + 34.2584 G + 0.0202 A^2 + 0.0003 S^2 \quad (3)$$

$$- 10.9381 G^2 - 0.0074 A F - 0.003 A S + 0.1798 A G - 0.0014 F S + 0.0506 F G + 0.012 S G$$



نمودار ۲- نمودار باقیماندها در مقابل مقدار خروجی آزمایش



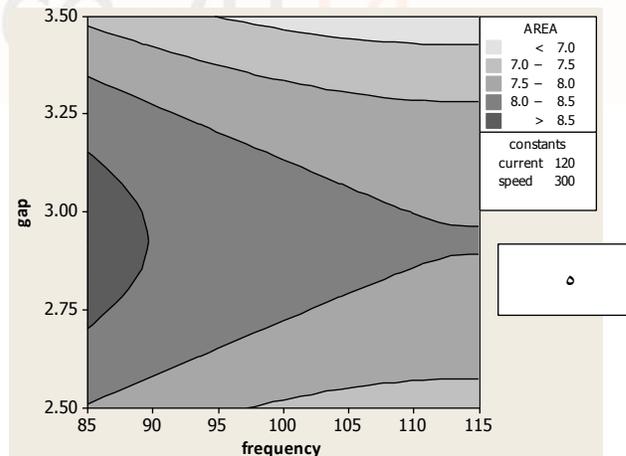
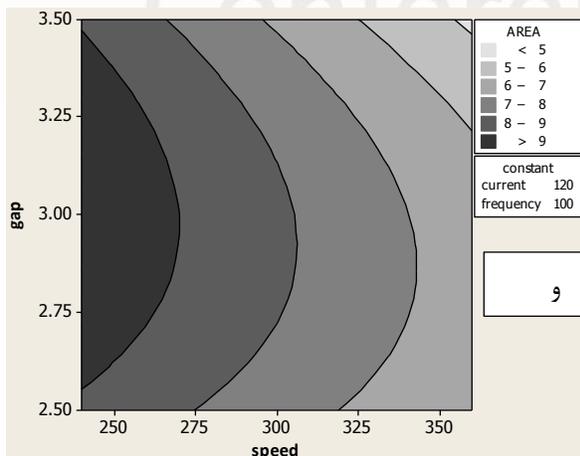
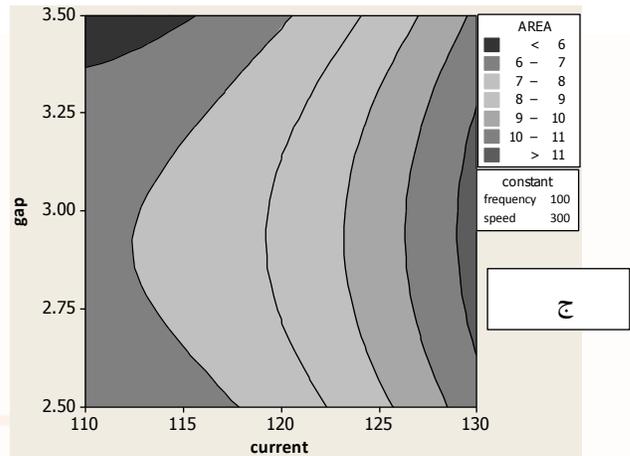
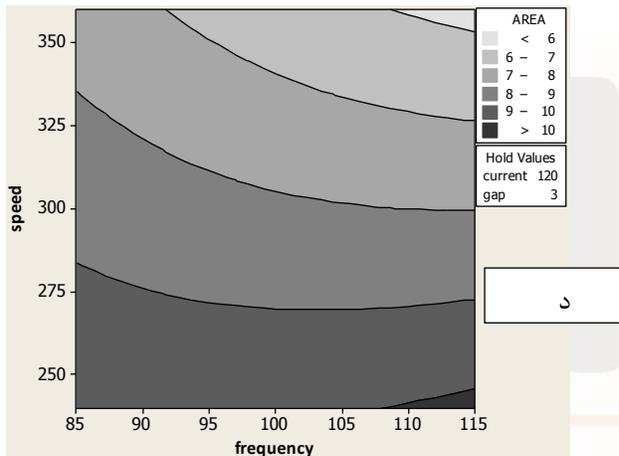
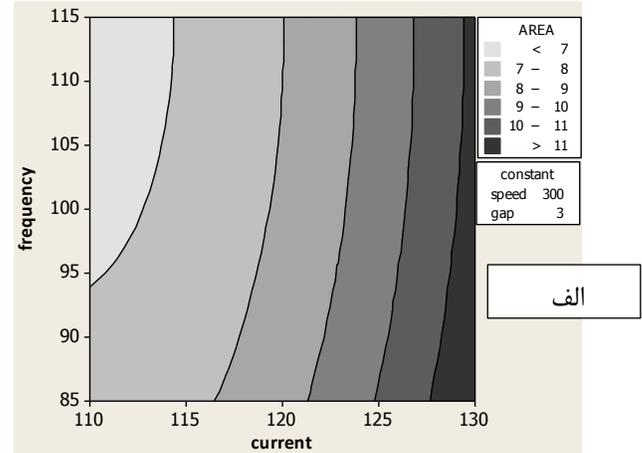
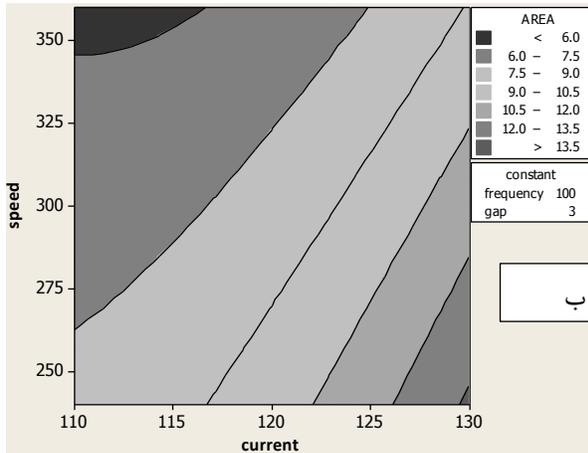
نمودار ۱- نمودار باقیماندها در مقابل شماره شماره آزمایش

یکی از روش‌ها موثر برای درک بهتر یک فرآیند استفاده از داده‌های ترسیمی است که به صورت گرافیکی تغییرات آن فرآیند را به نمایش می‌گذارند. کانتورها یکی از پرکاربردترین انواع داده‌های ترسیمی است که تفسیر آن نیز آسان‌تر از تفسیر بسیاری دیگر از انواع داده‌های ترسیمی است. با بررسی کانتورهای ترسیم شده به وسیله نرم افزار می‌توان نحوه تأثیرگذاری تغییر مقادیر پارامترها را بر روی خروجی‌های آزمایشات به صورت دو به دو تفسیر نمود. تصویر شماره ۳ کانتورهای نحوه تأثیرگذاری پارامترهای کنترلی جوش را به تصویر کشیده است. همانگونه که در کانتور (الف) تصویر ۳ مشاهده می‌شود با در شدد جریان پایینتر افزایش فرکانس باعث کاهش مساحت ناحیه متأثر از حرارت می‌گردد علت این پدیده را می‌توان با افزایش تکرار تغییر قطبیت در واحد زمان و کوچکتر شدن زمان قطبیت مستقیم که باعث کاهش انتقال حرارت قوس به قطعه می‌گردد مرتبط دانست اما با افزایش شدت جریان میزان تأثیرگذاری این پدیده کاهش می‌یابد زیرا با افزایش شدت جریان حرارت تولید شده توسط قوس الکتریکی افزایش یافته تأثیر افزایش فرکانس را کاهش می‌دهد و به تبع آن ناحیه بزرگتری از قطعه تحت تأثیر حرارت قرار می‌گیرند. کانتور (ب) تصویر ۳ بیانگر این واقعیت بدیهی است که با افزایش سرعت حرکت تورچ قطعه جوش دادنی مدت کمتری در معرض حرارت تولیدی توسط قوس قرار می‌گیرد بنابراین حرارت کمتری به آن منتقل می‌گردد که باعث کاهش وسعت ناحیه متأثر از حرارت می‌گردد. کانتور (ج) تصویر ۳ نشان دهنده این موضوع است که وسعت ناحیه متأثر از حرارت با قرار گرفتن نوک الکتروود در فاصله ۳ میلیمتری به بیشترین مقدار می‌رسد با افزایش

فاصله قوس پایداری خود را به تدریج از دست می دهد و به همین علت تمرکز حرارت قوس کاهش می یابد. کانتور (د) تصویر ۳ نشان دهنده آن است که افزایش سرعت حرکت الکتروود تأثیر بیشتری نسبت به افزایش فرکانس بر کاهش وسعت ناحیه متأثر از حرارت دارد. کانتور (ه) و کانتور (و) تصویر ۳ نشاندهنده تأثیر کاهشی افزایش مقادیر فرکانس و سرعت در مقادیر مختلف فاصله نوک الکتروود از قطعه می باشد.

### بهینه سازی

از آنجا که ماهیت فرآیند جوشکاری در این تحقیق از نظر ناپیوستگی مقادیر قابل تنظیم بر روی تجهیزات آزمایشگاهی گسسته است، الگوریتم‌های بهینه یابی ابتکاری از کارایی مناسبی برای یافتن مقادیر بهینه پارامترهای کنترلی آن برخوردارند. در این تحقیق به منظور یافتن مقادیر بهینه پارامترهای کنترلی برای کاهش وسعت ناحیه متأثر از حرارت و نسبت ناحیه متأثر از حرارت به مقطع گرده جوش از الگوریتم شبیه سازی تبرید تدریجی (SA) استفاده شده است. این الگوریتم از دسته الگوریتم‌های غیر قطعی است که از روش جستجو همسایگی<sup>۳</sup>ها برای یافتن جواب بهینه استفاده می کند. در این تحقیق مدل ترکیبی نسبت ناحیه متأثر از حرارت و مساحت ناحیه متأثر از حرارت که وسیله تحلیل رگرسیون روش سطوح پاسخ به دست آمده برای بهینه سازی (کمینه سازی) همزمان (چند هدفه) به الگوریتم تبرید تدریجی ارائه گردید. الگوریتم با استفاده از این مدل ها فضای جستجویی شامل کلیه حالات آزمایشات را ایجاد کرد و در آن به جستجو پرداخت. از آنجا که الگوریتم‌های جستجوی همسایگی در هر اجرا از یک نقطه تصادفی شروع به جستجو می کند در هر اجرا امکان نزدیک نشدن به نقطه بهینه کلی وجود دارد بنابراین در این تحقیق این الگوریتم تا ۸۰ اجرا تکرار گردید و از بین خروجی تمام اجراها کمترین خروجی به عنوان بهینه کلی فرآیند برگزیده شد. با قرار دادن مقادیر بهینه به دست آمده از بهینه سازی همزمان در روابط (۱) و (۲) مقدار تخمین زده شده برای نسبت ناحیه متأثر از حرارت و مساحت آن به دست می آید، سپس به منظور صحت سنجی نتایج بهینه سازی آزمایشاتی با تنظیم پارامترهای کنترلی بر روی این مقادیر بهینه به دست آمده از الگوریتم انجام شد. مقادیر بهینه پارامترهای کنترلی تخمین زده شده از طریق بهینه سازی انجام شده به وسیله الگوریتم تبرید شبیه سازی شده و خروجی‌های مربوط به آنها و نیز نتایج آزمایشاتی که با تنظیم پارامترهای کنترلی روی این مقادیر انجام شده در جدول به نمایش در آمده است که بیانگر عملکرد مناسب بهینه سازی انجام شده در کاهش وسعت ناحیه متأثر از حرارت است. مقایسه بین اعداد پیش بینی شده توسط مدل ریاضی برای مقادیر بهینه خروجی<sup>۳</sup>ها نشان دهنده تطابق مناسب مدل ریاضی با فرآیند جوشکاری است و عملکرد مناسب آن در تخمین مقادیر خروجی فرآیند می باشد.



تصویر ۳- کانتورهای اثر پارامترها بر وسعت ناحیه متأثر از حرارت

جدول ۵- نتایج بهینه به دست آمده از بهینه سازی چند هدفه

| فاصله الکتروود | سرعت | فرکانس | آمپر | مساحت کمینه | نسبت کمینه | روش بهینه یابی  |
|----------------|------|--------|------|-------------|------------|-----------------|
| ۳/۳            | ۲۹۶  | ۹۴     | ۱۱۶  | ۶/۱۲        | ۰/۷۰۸      | روش سطوح پاسخ   |
| ۳/۵            | ۳۰۴  | ۹۱     | ۱۱۵  | ۶/۶۷        | ۰/۶۵۷      | الگوریتم SA     |
| ۳/۵            | ۳۰۴  | ۹۱     | ۱۱۵  | ۶/۸۳        | ۰/۶۷۴      | آزمایش صحت سنجی |

### نتیجه گیری

در این تحقیق با استخراج داده های تعداد ۲۷ نمونه آزمایشی جوش که با روش طراحی مرکب مرکزی طراحی شده بودند و تحلیل این داده‌ها با روش سطوح پاسخ مدل های ریاضی برای تخمین وسعت ناحیه متأثر از حرارت و نسبت وسعت ناحیه متأثر از حرارت به مساحت مقطع گرده جوش تهیه گردید. مدل‌های به دست آمده برای هر دو خروجی مورد مطالعه در این تحقیق دارای دقت مناسبی برای پیش بینی نتایج آزمایشات هستند که عدد ضرایب همبستگی، نمودار تحلیل باقیمانده ها و مقایسه نتایج آزمایشات صحت سنجی بهینه سازی مبین این موضوع هستند. به علت ماهیت گسسته فرآیند جوشکاری از نظر مقادیر قابل تنظیم بر روی تجهیزات الگوریتم-های ابتکاری مانند الگوریتم شبیه سازی تبرید از کارایی مناسبی برای یافتن مقادیر بهینه پارامترهای کنترلی برخوردارند درصد کاهش وسعت ناحیه جوش آزمایشات صحت سنجی بهینه سازی نسبت به آزمایشات طرح آزمایش این گفته را تصدیق می‌کند.

Conference 2014

### منابع

ADOR welding group, (2005). , "Modern Arc Welding Technology". Oxford & IBH Publishing Co. Pvt. Ltd.

Nagesh, D.S. , Datta, G.L. (2010). "Genetic algorithm for optimization of welding variables for height to width ratio and application of ANN for prediction of bead geometry for TIG welding process".journal of Applied Soft Computing, vol. 10, Pp.897-907.

Balasubramanian, M. , Jayabalan, V. ,Balasubramanian, V. (2007). "Response surface approach to optimize the pulsed current gas tungsten arc welding parameters of Ti-6Al-4V titanium alloy ". journal of METALS AND MATERIALS International, Vol. 13, No. 4, Pp. 335-344.

Balasubramanian, M. , Jayabalan, V. ,Balasubramanian,. (2007). "Optimizing pulsed current parameters to minimize corrosion rate in gas tungsten arc welded titanium alloy ".The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 39, No.5-6, Pp. 474-481.

Senthil Kumar, T. , Balasubramanian , V.Sanavullah, M.Y. (2007). "Influences of pulsed current tungsten inert gas welding parameters on the tensile properties of AA 6061 aluminium alloy ". journal of Materials & Design, vol. 28, No. 7, Pb. 2080-2092.

Dutta. P. , Pratihari, D. K.,(2007). "Modeling of TIG welding process using conventional regression analysis and neural network-based approaches". Journal of Materials Processing Technology, vol. 184, No. 1-3 , Pp. 56-68.

Tarng, Y.S. , Tsai, H.L. , Yeh, S.S. (1999). "Modeling, optimization and classification of weld quality in tungsten inert gas welding", International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. 39 , 1427–1438,

Norman, A.F., Drazhner, V., Prangnell, P.B. (1999). "Effect of welding parameters on the solidification microstructure of autogenous TIG welds in an Al-Cu-Mg-Mn alloy", Materials Science and Engineering , A259 ,Pp. 53–64.

ESAB corporation .(2013). "HAZ in Aluminium welds". [www.esab.com](http://www.esab.com)

Khuri, A., Mukhopadhyay, S. (2010). "response surface methodology". John Wiley & Sons, Inc.

"Comparisons of response surface designs". Engineering statistic handbook. [www.itl.nist.gov/di](http://www.itl.nist.gov/di) v898/handbook. (2013).

8<sup>th</sup> Congress & 3<sup>rd</sup> International  
Engineering Materials & Metallurgy  
Conference

Iranian Metallurgical Engineering Society & Iranian Foundrymen's Soci-  
18-19 Nov., 2014 - Shahid Beheshti Conference Center, Tehran, Iran

**iMat**  
Conference 2014

هشتمین همایش مشترک و  
سومین کنفرانس بین المللی  
مواد مهندسی و متالورژی

(انجمن مهندسیین متالورژی ایران و انجمن علمی ریخته‌گری ایران)  
۲۷ و ۲۸ آبان ۱۳۹۳ - مرکز همایش‌های بین‌المللی شهید بهشتی، تهران

**iMat**  
Conference 2014