# بررسی تأثیرمقدار منگنز بر روی خواص مکانیکی و متالورژیکی فلز جوش در فرآیند جوشکاری ترمیتی ریلهای St49

محمدرضا شبگرد (مسئول مکاتبات)، دانشیار، دانشکده مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

محمد ملک آبادی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده فنی- مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران

هادی عیوضی باقری، دانش آموخته کارشناسی، دانشکده فنی- مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی‌واحد شیراز، شیراز، ایران

Email: mrshabgard@tabrizu.ac.ir

دریافت: ۹۲/۱۰/۱۷ پذیرش:۹۳/۰۳/۱۷

**چکیده :**

**جوشکاری ترمیتی یک فرآیند اتصال با استفاده از واکنش شیمیایی است که در آن درز اتصال بدون اعمال هیچگونه نیرویی با ریختن فلز مذاب بر روی درز، جوشکاری می‌شود. با توجه به اهمیت خواص مکانیکی و ریز ساختار سطح مقطع جوش در فرآیند جوشکاری ترمیتی، در این تحقیق تأثیر مقدار منگنز (که به عنوان یکی از گزینه های مورد نظر برای بهبود خواص مکانیکی و ریزساختار فولادها است)، بر روی ریزساختار و خواص مکانیکی سطح مقطع جوش (سختی، مقاوت به ضربه، استحکام کششی، درصد تغییر طول و مقاومت سایشی)، در فرآیندجوشکاری ترمیتی ریلهای فولادی St٤٩ مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد با افزایش مقدار منگنز در فلز جوش، استحکام کششی و مقاومت در برابر ضربه افزایش می‌یابد، اما وقتی مقدار منگنز از حد مشخصی (۲/۵ درصد) تجاوز کند، مقادیر مشخصه‌های مذکور در فلز جوش کاهش می‌یابند. همچنین نتایج نشان می‌دهند میزان سختی و مقاومت در برابر سایش فلز جوش، با افزایش مقدار منگنز افزایش یافته و بیشترین مقدار سختی به دست آمده در تاج ریل ۷۰۰ برینل و در جان ریل ۶۰۰ برینل است.**

**واژه‌های کلیدی:** جوشکاری ترمیتی، منگنز، سختی، استحکام کششی

## ۱. مقدمه

جوشکاری ترمیتی یکی از فرآیندهای اتصال ریلهای راه‌آهن است که در آن از حرارت ناشی از یک واکنش احیائی جهت ذوب دیواره‌های ریل و از محصول واکنش به منظور تأمین مذاب مورد نیاز درز جوش استفاده می‌شود. امکان ایجاد خطوط پیوسته ریلی، افزایش عمر و قابلیت اطمینان خطوط راه‌آهن و کاهش هزینه های نگهداری از مزایای مهم جوشکاری ترمیتی است[Ferjutz and Davis, 1983]. پودر مورد استفاده در جوشکاری ترمیت مخلوطی از پودر آلومینیم و اکسید آهن است که به وسیله یک فشفشه مخصوص حرارت داده می‌شود تا آلومینیوم و اکسید آهن طبق یک واکنش گرمازا به اکسید آلومینیوم و آهن خالص تبدیل شود. منگنز فلزی سخت با تردی زیاد است که به راحتی ذوب نمی‌شود، ولی بسیار آسان اکسید می‌گردد. این فلز پایدار کنندهٔ فاز آستنیت در فولاد است. مزایای استفاده از فولادهای پر منگنز در صنایع راه‌آهن به مقاومت عالی این فولادها در برابر بارهای فشاری متناوب، مقاومت سایشی خوب، ضربه پذیری عالی و ضریب اصطکاک پایین مربوط است. تحقیقات متعددی در ارتباط با جوشکاری فولادها به روش ترمیتی به عمل آمده است. برامفیت و همکاران [Bramfitt et al. 2008]، با انتخاب ترکیب‌های شیمیایی مختلف، تأثیر افزایش عدد اندازه دانه‌های فلز جوش را در جوشکاری ترمیتی مورد بررسی قرار داده‌اند. براساس نتایج به دست آمده از این پژوهش، از طریق اضافه‌کردن عناصر آلیاژی مانند وانادیوم می‌توان در ترکیب جوش به ساختار ریزدانه تری دست یافت که این امر باعث افزایش استحکام فلز جوش می‌گردد. اسکرودر و همکاران[Schroeder et al. 2007] تأثیر مقدار و اندازه آخال ها در جوشکاری ترمیتی را با عبور دادن مذاب جوش از فیلتر بر روی عمر مفید جوش بررسی کرده‌اند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که فیلترکردن مذاب درصدی از حجم آخالها را در مذاب جوش نهایی کاهش می‌دهد. با توجه به اینکه آخالها محلهایی برای رشد ترکهای خستگی هستند، با کاهش آنها عمر مفید جوش ترمیتی بهبود می‌یابد.فرای و همکاران [Fry et al. 1999]، تأثیر ارتعاش در موضع جوش ترمیتی را بررسی (فرکانس ارتعاش بین ۲۰ الی ۱۰۰ هرتز) و گزارش کرده است که مقدار تخلخل در جوشهایی که تحت ارتعاش قرار می‌گیرند کاهش قابل توجهی دارد. لیو و همکاران [Liu et al. 2005]، تأثیر اعمال یک مرحله فورج را طی مدت زمانی که مذاب جوش ترمیتی در حالت خمیری است بر روی خواص مکانیکی آن بررسی کرده اند.

نتایج مطالعات آنها نشان می‌دهد که اعمال فشار سبب افزایش خروج مذاب از داخل قالب به بیرون شده و در نتیجه منجر به کاهش تخلخل و آخال‌های باقیمانده در فلز جوش می‌گردد و به این طریق شکل پذیری فلز جوش بهبود قابل ملاحظه ای نسبت به جوش ترمیتی معمولی داشته و عمر خستگی آن افزایش می‌یابد. همچنین تعیین چقرمگی شکست فولاد ریل UIC۶۰ با استفاده از آزمایش ضربه شارپی در دماهای مختلف توسط قاجار و همکاران مورد مطالعه قرار گرفته است [Qhajar et al 2011]. براساس نتایج پژوهش آنها معیار مورد استفاده برای ترکهای شناسایی شده، ۳ میلیمتر توصیه شده است .به عبارت دیگر، مشاهده ترکی با طول ۳ میلیمتر در ریل در فصول سرد سال و در مناطق سرد ایران، می تواند تهدیدی برای ریل و ایمنی قطارها باشد. با توجه به اهمیت و لزوم بهبود خواص مکانیکی و متالورژیکی مقاطع جوشکاری شده در صنایع ریلی، هدف این پژوهش مطالعهٔ تأثیر درصد منگنز مورد استفاده در فرآیند جوشکاری ترمیتی بر روی خواص مکانیکی و ساختار میکروسکپی فلز جوش حاصل جهت دستیابی به خواص مکانیکی و متالورژیکی دلخواه در سطح مقطع جوش است.

## ۲. مواد و روش تحقیق

جهت تهیهٔ نمونه ها، ابتدا قطعات مورد نیاز از ریلهای St49 که در صنایع ریلی ایران مورد استفاده قرار می‌گیرد هر کدام به طول ۵۰ سانتی متر بریده شدند. جهت انجام هر کدام از آزمونهای جوشکاری

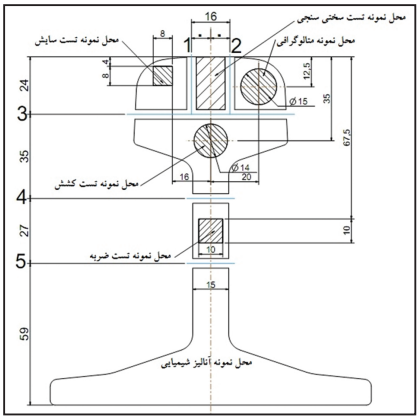
از پودر ترمیتی مطابق استاندارد راه‌آهن به میزان۶/۷۵ کیلوگرم استفاده گردید. به منظور مطالعهٔ تأثیر مقدار منگنز بر روی خواص مکانیکی و متالورژیکی جوش حاصل قبل از انجام جوشکاری هر کدام از نمونه ها، پودر منگنز به ترتیب ۱۵۰ گرم، ۳۰۰ گرم، ۴۵۰ گرم و ۶۰۰ گرم به پودر ترمیت اضافه شد.

جهت انجام آزمونهای جوشکاری، ابتدا دو نیمه قالب در اطراف ریل ها نصب شد و پس از درزبندی، قسمتهای راهگاه و سرباره گیر روی قالب نصب گردید.

سپس با قراردادن مشعل در درون قالب و طی زمان ۱۵ دقیقه، دمای دو سر درز جوش به ۹۰۰ درجه سانتی گراد رسانده شد. شکل ۱ روش آماده سازی نمونه ها جهت انجام عملیات جوشکاری را نشان می‌دهد.

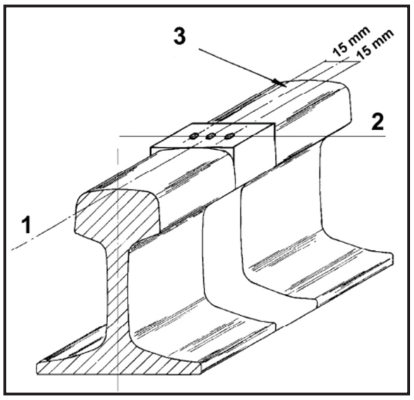
**شکل ۱. قالب و مشعل نصب شده جهت انجام عملیات جوشکاری**

در ادامه جهت انجام عملیات جوشکاری، پودر ترمیت در داخل بوته آتش زده شد و پس از گذشت زمان ۲۵ ثانیه مذاب آماده شده به درون قالب جاری گردید و بوته کنار گذاشته شد. ریلهای جوشکاری شده پس از یک ساعت از قالب جدا شده و قسمت جوشکاری شده به طول cm ۲۵ توسط ارهٔ مخصوص از بقیه ریل جدا گردید. سپس چنان که در شکل ۲ نمایش داده شده است، نمونه‌های مورد نیاز جهت انجام آزمونهای سایش، کشش، ضربه، سختی سنجی و متالوگرافی، توسط عملیات ماشینکاری از محلهای مختلف سطح مقطع مربوط به جوشهای به عمل آمده تهیه شد. عملیات متالوگرافی مطابق استاندارد EN ۱۴۷۳۰-۱ انجام شده است.




**شکل ۲. الگوی برش قطعات جوشکاری شده جهت انجام آزمون ها.**

جهت انجام آزمون کشش نمونه ها به طول ۵۰ mm و قطر ۱۰ mm مطابق با استاندارد DIN ۱۲۵ آماده شده و توسط دستگاه AL-۷۰۰۰ آزمونهای کشش انجام شد. برای انجام عملیات سختی سنجی نمونه ها از دستگاه سختی سنج برینل مدل DA-SM19 و همچنین برای سختی سنجی در منطقه HAZ از دستگاه سختی سنجی ویکرز مدل DA-SM20 استفاده شده است. شکل ۳ محل اندازه گیری سختی در تاج ریل را نشان می‌دهد. پس از ماشین کاری و آماده سازی نمونه‌های مورد نیاز، آزمون ضربه توسط دستگاه آزمون ضربه چارپی مدل GT-7045-HMH براساس استاندارد ISO 4547 در محدوده دمایی ۱۸ تا ۲۸ درجه سانتی گراد انجام شد. همچنین برای انجام آنالیز شیمیایی نمونه ها از دستگاه کوانتومتری مدل ARL-۳۴۶۰ استفاده شده است. جدول ۱ ترکیب شیمیایی نمونه‌های جوشکاری شده را نشان می‌دهد.




**شکل ۳. محل نمونه‌های سختی سنجی در تاج ریل.**
**(۱- خط محوری تاج ریل، ۲-خط مرکزی جوش، ۳-سطح تاج ریل)**

مطابق جدول ۱ نمونه‌های جوش ترمیتی مورد آزمایش به ترتیب دارای ۱/۶۱، ۲/۴۶، ۴/۰۵ و ۵/۲۶ درصد وزنی منگنز هستند. نمونه شماره (۱)، نمونه ای است که پودر منگنز به آن اضافه نشده است و به عنوان نمونه شاهد (مرجع) در نظرگرفته شده است. جهت انجام آزمون سایش پس از عملیات سنگ زنی، نمونه ها در ابعاد ۴۰ mm × ۸ × ۸ آماده شده و مطابق با استاندارد ASTM G83 به وسیلهٔ دستگاه آزمون سایش مدلTribometer UT 07 – با شرایط خشک و اصطکاکی مورد آزمایش قرار گرفتند.

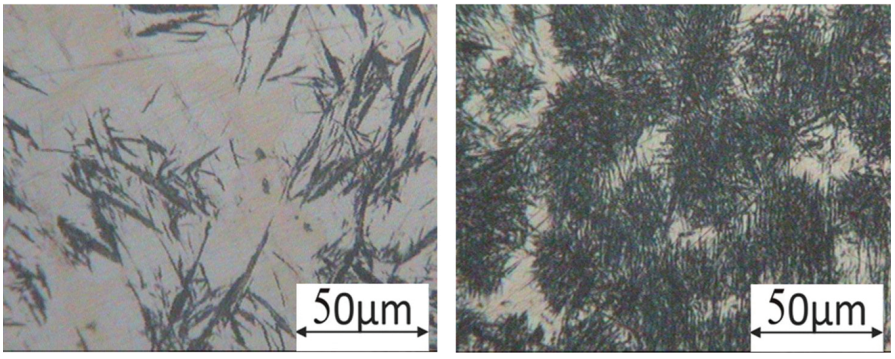
## ۳. نتایج و بحث

### ۳-۱ تأثیر درصد وزنی منگنز برروی ساختار میکروسکپی فلز جوش

ترکیب فلز منطقه جوش نمونه مرجع (شاهد) مطابق نمودار تعادلی آهن- کربن، در منطقه هیپویوتکتوئید قراردارد، بنابراین ساختار فلز تشکیل شده در منطقه جوش از نوع هیپویوتکتوئید است. این ساختار حاوی فریت است که عمدتاً در مرز دانه‌های آستنیت و مقداری در داخل دانه ها و نزدیک مرز دانه ها به صورت فریت‌های مستقل و بلوکی تشکیل می‌شوند. شکل ۴ ساختار میکروسکپی و فازهای تشکیل دهندهٔ منطقهٔ جوشکاری شده را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود ساختار زمینه در نمونه‌های جوش ترمیتی، آستنیت و مارتنزیت است، به طوری که با افزایش درصد وزنی پودر منگنز فاز آستنیت افزایش چشمگیری پیدا می‌کند. دلیل افزایش فاز آستنیت در اثر افزودن پودر منگنز را می‌توان به این صورت توجیه کرد که منگنز عنصری بسیار فعال است که با به تعویق انداختن هرگونه استحاله فاز آستنیت، سبب پایداری این فاز می‌گردد. در واقع با افزایش درصد وزنی منگنز در فلز جوش منحنی‌های TTT و CCT به سمت راست کشیده می‌شوند و این عامل مانع استحالهٔ فازی عادی سخت گردانی شده و در نتیجه پایداری فاز آستنیت در دمای اتاق افزایش می‌یابد[Golzar,1999 and Basu, 2002].

جدول ۱. ترکیب شیمیایی نمونه‌های جوشکاری شده.

| نمونه | Fe | C | Si | V | P | S | Cr | Ni | Al | W | Mn |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | پایه | ۰/۵۲ | ۰/۲۴ | ۰/۰۳۰ | ۰/۰۲۰ | ۰/۰۱۰ | ۰/۰۸۰ | ۰/۰۵۰ | ۰/۰۹۰ | ۰/۰۱۰ | ۰/۸۷ |
| ۲ | پایه | ۰/۴ | ۰/۶۵ | ۰/۰۱۱ | ۰/۰۱۷ | ۰/۰۰۹ | ۰/۱۰۳ | ۰/۰۴۴ | ۰/۱۳۵ | ۰/۰۱۴ | ۱/۶۱ |
| ۳ | پایه | ۰/۳۵ | ۰/۷ | ۰/۰۱۲ | ۰/۰۱۷ | ۰/۰۱۱ | ۰/۱۰۴ | ۰/۰۴۱ | ۰/۱۷ | ۰/۰۱۳ | ۲/۴۶ |
| ۴ | پایه | ۰/۲۵ | ۰/۶ | ۰/۰۱۷ | ۰/۰۱۷ | ۰/۰۱۷ | ۰/۱۱۳ | ۰/۰۴۳ | ۰/۳۹۳ | ۰/۰۱۲ | ۴/۰۵ |
| ۵ | پایه | ۰/۲ | ۰/۸ | ۰/۰۲۰ | ۰/۰۱۴ | ۰/۰۱۰ | ۰/۱۲۴ | ۰/۰۴۲ | ۰/۳۶۲ | ۰/۰۱۳ | ۵/۲۶ |




(ب) (الف)

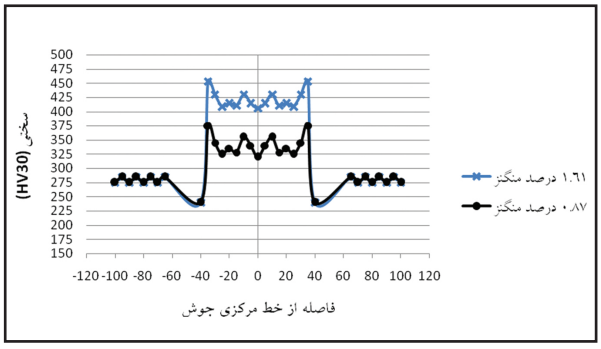
شکل ۴. ساختار فلز جوش با درصدهای مختلف منگنز.
الف) درصد وزنی منگنز در پودر ترمیت ۲/۴۶ درصد، ب) درصد وزنی منگنز در پودر ترمیت ۵/۲۶ درصد.

عامل دیگر افزایش فاز آستنیت همزمان با افزودن عنصر منگنز به پودر ترمیت، افزایش میزان کاربیدهای منگنز تشکیل شده در حین انجماد است، در نتیجه میزان کربن زمینه و ترکیب شیمیایی فولاد به سمت ترکیب فولادهای پریتکتیک با درصدهای پایین تر کربن سوق می‌نماید، به طوری که این امر سبب می‌شود در استحاله‌های فازی بعد از انجماد، آستنیت بیشتری در زمینه فلز جوش تشکیل شود [Golzar,1999;Schroedev and Poiriev, 2007, 2008].

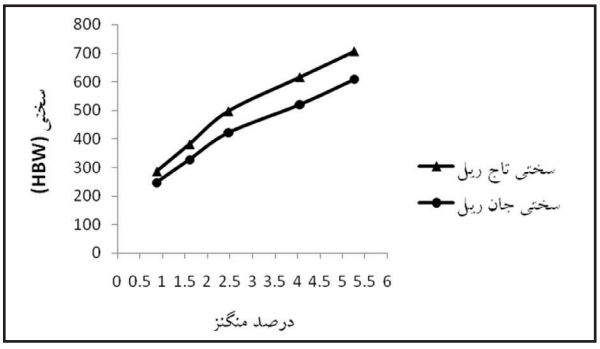
### ۳-۲ تأثیر درصد وزنی منگنز بر روی سختی و مقاومت سایشی فلز جوش

شکل ۵ منحنی مربوط به میزان سختی در سطح مقطع جوش ترمیتی را در مقایسه با نمونهٔ مرجع (۰/۸۷ درصد منگنز) نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش درصد منگنز سختی منطقه جوش ترمیتی افزایش می‌یابد. دلیل این مسئله را می‌توان چنین بیان نمود که، اولاً با افزایش درصد وزنی منگنز به دلیل تمایل منگنز به تشکیل کاربید، میزان کاربید منگنز که از سختی زیادی برخوردار است، در فلز جوش افزایش می‌یابد.

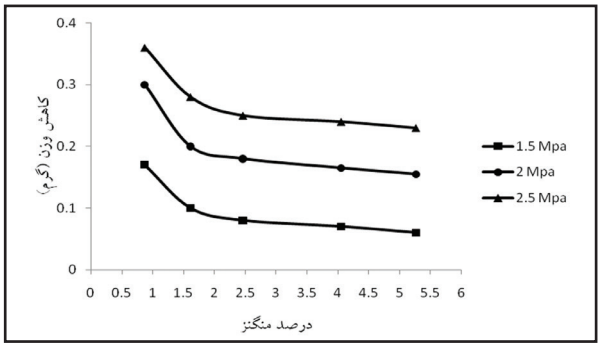
ثانیاً افزایش درصد وزنی منگنز، باعث تشکیل آستنیت ریز دانه (آستنیت ظریف) می‌گردد. از سویی دیگر با افزایش منگنز، ساختارمارتنزیتی موجود در منطقهٔ جوش به مارتنزیت سوزنی شکل تغییر می‌یابد و این مسئله باعث افزایش سختی فلز جوش می‌شود [Schroeder and Poirier 2008, Golzar, 1999 and Ode-rio,2008]. همچنین شکل ۶ تغییرات مقدارسختی در تاج و جان ریل را بر اساس درصد وزنی منگنز نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان سختی جوش در تاج ریل بیشتر از مقدار سختی در جان ریل است. دلیل این مسئله را می‌توان چنین بیان کرد که به سبب وجود ضخامت بیشتر لایهٔ دیرگداز (قالب) به هنگام جوشکاری در



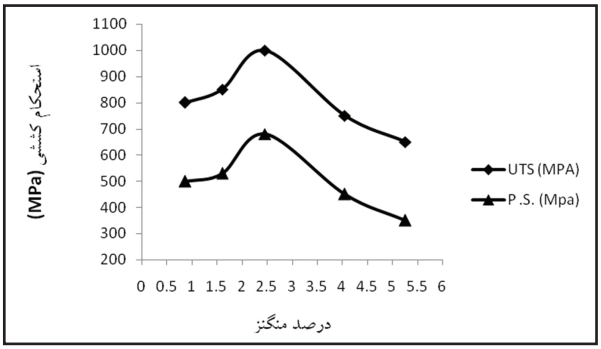

**شکل ۵. تغییرات سختی در سطح مقطع فلز جوش با افزایش درصد منگنز**




**شکل۶. مقایسه میزان سختی جوش در تاج و جان ریل بر اساس درصد وزنی منگنز در پودر ترمیت.**




**شکل ۷. میزان کاهش وزن نمونه ها در آزمون سایش نسبت به درصد وزنی منگنز در سه بار متفاوت.**

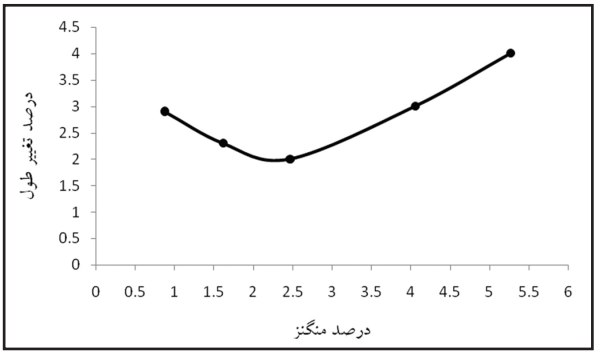



**شکل ۸. استحکام کششی فلز جوش نسبت به درصد وزنی منگنز.**

اطراف جان ریل و از طرفی تماس قسمت تاج ریل با هوا و در نتیجه به علت بالا بردن سرعت تبرید آن، میزان سختی تاج ریل بیش از جان ریل می‌گردد [Golzar,1999 Schroeder and Poiriev 2004 & 2008].شکل ۷ میزان کاهش وزن نمونه ها را در آزمون سایش برحسب مقادیر مختلف منگنز در پودر ترمیت تحت نیروهای متفاوت را نشان می‌دهد. چنان که ملاحظه می‌گردد با افزایش درصد منگنز، مقاومت به سایش فلز جوش افزایش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان چنین بیان کرد که افزایش درصد منگنز، با ایجاد فاز کاربید منگنز، تولید فاز آستنیت ظریف و با تشکیل مارتنزیت سوزنی شکل سبب افزایش مقاومت به سایش می‌گردد.

**۳-۳ تأثیر درصد وزنی منگنز بر روی استحکام کششی فلز جوش**

شکل ۸ استحکام کششی فلز جوش برحسب تغییرات مقدار منگنز در فلز جوش را نشان می‌دهد. مطابق این شکل استحکام کششی تا مقدار ۲/۵ درصد وزنی منگنز افزایش یافته، اما بعد از این مقدار کاهش می‌یابد. دلیل این مسئله را می‌توان چنین بیان کرد که با افزایش منگنز در فلز جوش، به دلیل تشکیل مارتنزیت‌های سوزنی شکل که دارای استحکام بیشتری هستند، استحکام فلز جوش افزایش می‌یابد. از طرفی چون با افزایش مقدار منگنز، مقدار فاز آستنیت افزایش یافته و همزمان فاز پرلیت در فلز جوش کاهش می‌یابد این امر سبب می‌شود میزان استحکام کششی فلز جوش نسبت به افزایش درصد منگنز در پودر ترمیت یک حالت بهینه داشته باشد[Schroeder and Poiriev 2004].



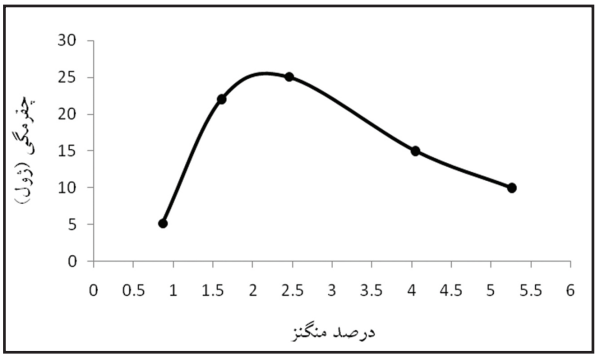

**شکل ۹. درصد تغییر طول جوش نسبت به درصد وزنی منگنز.**

**۴-۳ تأثیر درصد وزنی منگنز بر روی درصد تغییر طول فلز جوش**

شکل ۹ درصد تغییر طول فلز جوش برحسب میزان منگنز موجود در فلز جوش را نشان می‌دهد. چنان که مشاهد می‌شود درصد تغییر طول فلز جوش تا ۲/۵ درصد وزنی منگنز کاهش یافته، اما بعد از این مقدار افزایش می‌یابد. دلیل این مسئله را می‌توان چنین تشریح کرد که افزایش درصد منگنز به طور همزمان، سبب افزایش مقدار فاز کاربید منگنز و کاهش مقدار فاز مارتنزیت در فلز جوش می‌گردد. تقابل این عوامل با یکدیگر با میزان تأثیر گذاری متفاوت بر روی میزان تغییر شکل نمونه، سبب می‌شود میزان تغییر طول ابتدا کاهش و سپس افزایش یابد[Schroeder and Poiriev 2004].

**۵-۳ تأثیر درصد وزنی منگنز بر روی مقاوت به ضربهٔ فلز جوش**

شکل ۱۰ استحکام به ضربهٔ فلز جوش را بر حسب درصد افزایش منگنز در پودر ترمیت نشان می‌دهد. مطابق این شکل افزایش منگنز تا حدود ۲/۵ درصد، مقاومت به ضربه را افزایش می‌دهد، اما بعد از این مقدار مقاومت به ضربه در منطقهٔ جوش کاهش می‌یابد. دلیل این مسئله را می‌توان چنین توضیح داد که با افزایش درصد وزنی منگنز، مقدار فاز پرلیت کاهش و مقدار فاز آستنیت افزایش می‌یابد و این امر باعث افزایش چقرمگی می‌شود. همچنین کاهش ساختار مارتنزیت نیز به افزایش چقرمگی کمک می‌کند، زیرا ترک برای آنکه بتواند از این ساختار عبور کند، مجبور به تغییر مسیر می‌شود و انرژی مصرف شده افزایش یافته و چقرمگی بیشتر می‌گردد. عامل دیگر افزایش چقرمگی را می‌توان با خاصیت گوگردزدایی منگنز مرتبط




**شکل ۱۰. استحکام به ضربه فلز جوش نسبت به درصد وزنی منگنز.**

دانست، به طوری که منگنز سبب کاهش تردی ناشی از گوگرد شده و با حذف سولفید آهن در هنگام ذوب و انتقال آن به سرباره در هنگام جوشکاری خطر تردی ناشی از آن را کاهش می‌دهد. اما با ادامهٔ افزایش منگنز، به دلیل تشکیل کاربید منگنز که فازی ترد و شکننده است، چقرمگی فلز جوش کاهش می‌یابد [Shen, 2003 & Lonsdale and Lewandowsky, 2008].

## ۴. نتیجه گیری

۱- با افزایش درصد وزنی منگنز در پودر ترمیت سختی فلز جوش افزایش می‌یابد.

۲- با افزایش تدریجی درصد منگنز، چقرمگی جوش حاصل ابتدا افزایش و بعد از رسیدن به یک مقدار بیشینه کاهش می‌یابد.

۳- با افزایش تدریجی درصد وزنی منگنز تا ۲/۵ درصد، استحکام کششی فلز جوش ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد.

۴- با افزایش درصد وزنی منگنز تا ۲/۵ درصد، میزان ازدیاد طول فلز جوش ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد.

۵- با افزایش درصد وزنی منگنز مقدار سایش فلز جوش در تمامی‌بارهای وارده کاهش می‌یابد.

۶- به طور کلی نتایج حاصل نشان می‌دهد اگر میزان منگنز در پودر ترمیت در محدودهٔ ۲/۵ – ۱/۵ درصد باشد، بهترین خواص مکانیکی و متالورژیکی در فلز جوش به دست می‌آید.

## ۵. سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از مدیریت و کارکنان محترم شرکت صنایع ریلی ایران، جهت همکاری صمیمانهٔ آنها در انجام این پژوهش سپاسگزاری می‌کنند.

## ۶. منابع

- Bramfitt, B. L. (2008) "A synopsis of PST's advanced in-line head hardening process after two years of production and in-service testing", Proceedings of the 39th Mechanical Working and Steel Processing Conference International Symposium on Rail Steels, Indianapolis, pp. 1057-1060.

- Basu, B. (2002) "Microstructure variation in a high-strength structural steel weld under isoheat input conditions", Welding Journal, pp.239-248.

- Edmonds, D. V. (1996) "Precipitation in micro alloyed higher carbon steels", Fundamentals and applications of micro alloying forging steels, TMS, pp. 111-125.

- Ferjutz, K. and Davis, J. R. (1983) "Metal Handbook", Vol. 6

- Fry, G. T. (1999) "Modified thermite rail welding procedure" Association of American Railroads Report, Vol. II, No. R-826.

- Liu, W., Sun, J. and Markase, M. J. (2005) "Progress on the development of a Squeeze Thermite Process", Proceedings of the international Symposium on Rail Steels, Baltimore, MD, October, pp. 145-153.

- Lonsdale, C. P., and Lewandowski, J. J. (2008) "Fracture toughness of thermite rail weld steel", Proceedings of 39th mechanical working and steel processing confer-

ence-international symposium on rail steels, Indianapolis, pp.1083-1090.

- Oderio, J. A. (2008) “Metallurgical study of the detail fracture in thermite welded railroad rails” M. S. Thesis. The university of Illinois at Champaign Urbana, Urbana.

- Schroeder, L. C. and Poirier, D. R. (2007) “Improving the structure and properties of thermite weld metal” Materials Science and Engineering, pp. 23-33.

- Schroeder, L. C. and Poirier, D. R. (2008) “Thermite rail welds; The process, mechanical and metallurgical properties and possible improvements”, railroad welding, Proceeding of the rail welding symposium, Memphis, TN, Raylway systems and management association, Northfield, pp.21-59.

- Schroeder, L. C. and Poirier, D. R. (2004) “The mechanical properties of thermite welds in premium alloy rails”, Materials science and engineering. Vol. 63, pp. 1-21.

- Shen, C. D. (2003) ” Research of raising the toughness of rail joints using thermit welding”, Proceedings of the International Conference Joining of Metals, Inteniorhojskolen Helsinger Teknikum, Denmark, pp.246-250.

-قاجار، رحمت ا.، علیزاده، جواد، نعمتی، مهدی، علیزاده، یونس (۱۳۹۰) “تعیین چقرمگی شکست فولاد ریل UIC60با استفاده از آزمایش ضربه شارپی در دماهای مختلف” فصلنامه مهندسی حمل و نقل، سال دوم، ، شماره سوم، بهار ۱۳۹۰، ۹۰ص. ۲۴۹-۲۵۹

-گلعذار، محمد علی (۱۳۷۸)“ اصول و کاربرد عملیات حرارتی فولادها”، اصفهان: انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان