اثر پارامتر سرعت بر خواص مکانیکی لوله‌های فولادی گرید B تولید شده به روش جوشکاری مقاومت الکتریکی

محمود مندنی زاده[۱] ، علی حیدری مقدم[۲*]

[۱]دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک ساخت و تولید، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران.
[۲]استادیار، عضو هیات علمی گروه مهندسی مواد و متالورژی، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران.

دریافت: زمستان ۹۵ پذیرش: بهار ۹۶

چکیده

در این مقاله نرمالیزه کردن لوله‌های فولادی گرید B تولید شده به روش جوشکاری مقاومت الکتریکی(ERW) مورد مطالعه قرار گرفته است. هفت لوله که یکی از آنها نرمالیزه نشده و مابقی در سرعت‌های مختلف به همراه نرمالیزه شده نمونه‌برداری گردید. نتایج آزمون‌های کشش، میکروسختی جهت بررسی خواص مکانیکی و آزمون متالوگرافی جهت بررسی ساختار لوله‌ها بیان گردید.با مطالعه جوش قبل از نرمالیزاسیون مشخص شد ناحیه جوش قبل از نرمالیزاسیون دارای ساختار فریت سوزنی می‌باشد. نمونه دارای منطقه متأثر از حرارت با دانه‌های ریزتر از منطقه جوش و سختی منطقه متأثر از حرارت بالاتر از ناحیه جوش می‌باشد همچنین سختی از نمونه‌هایی که نرمالیزه شده‌اند بیشتر است. در بین نمونه‌هایی که با سرعت‌های مختلف تولید شده‌اند نمونه‌ای که با سرعت ۱۲ متر بر دقیقه تولید شده است شرایط مناسب‌تری دارد زیرا دارای ساختاری مشابه ساختار فلز پایه است. این نمونه دارای کمترین میزان سختی در ناحیه جوش و بیشترین انعطاف پذیری در بین نمونه‌ها و به میزان ۶ درصد است. بیشترین استحکام کششی مربوط به نمونه بدون نرمالیزه و کمترین آن مربوط به نمونه تولید شده با سرعت ۱۲ متر بر دقیقه است.

*عهده دار مکاتبات: alheidarym@yahoo.com

واژه‌های کلیدی: جوشکاری مقاومت الکتریکی، سختی، میکروسختی، عملیات حرارتی، استحکام کششی.

۱- مقدمه

جوشکاری مقاومت الکتریکی[۱] یکی از فرآیندهای جوشکاری است که در حال حاضر برای لوله‌هایی که به صورت پیوسته تولید می‌شوند بکار می‌رود. این فرآیند قادر به تولید لوله‌هایی با ابعاد مختلف با بهره‌وری بالا، بدون استفاده از هر گونه مواد مصرفی جوشکاری است. با استفاده از جوشکاری مقاومت الکتریکی می‌توان خط تولید لوله‌های فولادی با متراژ ۱۸ متر، قطر ۵۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۱۳ میلی‌متر، برای اتصال به خط لوله‌هایی با مسافت‌های طولانی برای گاز طبیعی یا نفت بکار برد[۱]. در این روش جهت ایجاد درز جوش توسط جوشکاری مقاومت الکتریکی دو لبه ورق پس از عبور از یک قالب Vee شکل به این فرآیند به صورت شماتیک در شکل ۱ نشان داده است[۲،۳]. لبه‌های ورق توسط جریان الکتریکی به حالت خمیری رانده‌مان بالا، عدم مواد مصرفی و منطقه جوش باریک‌تر مورد توجه تولیدکنندگان لوله قرار دارد. با این حال، جوش‌های HF[۲] نیاز به عملیات حرارتی پس از جوشکاری[۳] و توجه ویژه برای رسیدن به سطح سختی قابل قبول در جوش است[۲]. بسیاری از پارامترهای ارائه شده از روش‌های پیچیده جوشکاری و یا عملیات حرارتی پس از جوشکاری در تکمیل مقیاس صنعتی وجود دارد. مسئله مهم در جوشکاری القایی فرکانس بالا وجود کربن در مرکز جوش (محدوده انجماد) است، که در مقایسه با مواد غیر پیوست از دست دادن کربن در حدود ۳۰٪ است. با این حال، تشخیص این محدوده مشترک از طریق تحقیقات متالوگرافی توسط کنتراست روشن و درخشان قابل انجام است[۴].

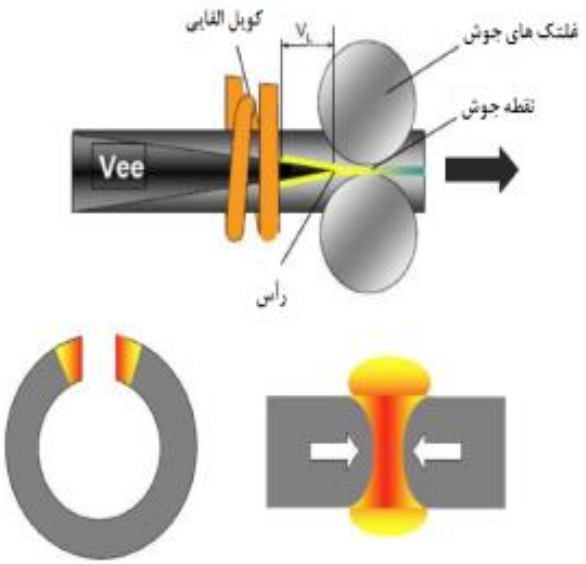
۱ - Electric Resistance Welding (ERW)
۲ – High frequency
۳ – Post-weld heat treatment (PWHT)

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.4.4.3]

شکل در آمده و با فشار مکانیکی که توسط غلتک‌های جوش ایجاد می‌شود در یکدیگر ادغام می‌شوند. در این حالت حرارت ایجاد شده برای جوشکاری، توسط مقاومت در برابر جریان الکتریکی (اعمال شده به صورت القایی و یا تماسی) به لبه‌ی ورق وارد می‌شود. فرآیند جوش مقاومت الکتریکی با توجه به مزایای بیش از حد و جذاب آن مانند ساختار فولاد، پس از عمل اتصال لبه‌ها به هم به سرعت توسط یک یا چند عملیات حرارتی القایی با هدف بازسازی خواص تخریب شده توسط عملیات جوشکاری انجام می‌شود[۵]. هدف از نرمالیزاسیون، جایگزینی ساختار درشت در ارتباط با عملیات جوشکاری با دانه آستنیت کوچکتر و فاز فریتی خوب، همگن کردن کربن در محل اتصال جوش و تولید ریز ساختار نهایی برای جوش بهینه معین شده است[۳]. پس از عملیات حرارتی کربن در طول سطوح به صورت CO و CO_2 اکسید شده و به همراه برخی از عناصر در طول حرارت‌دهی خارج می‌شوند[۶]. از جمله پارامترهای مهم که بر روی خواص مکانیکی فولادهای نرماله و آنیل شده اثر می‌گذارد، درصد کربن فولاد است. هرچه درصد کربن بیشتر باشد (تا حد یوتکتویید) پرلیت بیشتری تشکیل شده و در نتیجه استحکام و سختی فولاد زیادتر و انعطاف‌پذیری آن کمتر می شود[۷]. بنابراین پارامترهای عملیات حرارتی، اثر قابل توجهی بر ساختار متالوگرافی و خواص مکانیکی می‌گذارد. با انتخاب دقیق پارامترهای عملیات حرارتی و دستیابی به یک میدان دمایی مناسب، به کیفیت جوش و مصرف بهینه انرژی کمک می‌کند[۸].

یان و همکارانش [۲] خواص کششی لوله تولید شده از ورق X65 به روش جوشکاری مقاومت الکتریکی فرکانس بالا را بررسی کردند. نتایج نشان داد که استحکام کششی در قسمت جوش بالاتر از سطح ورق بوده است. عملیات حرارتی به طور قابل توجهی باعث بهبود انعطاف پذیری جوش شده، در مجموع طول افزایش یافته، استحکام کششی نهایی کاهش یافته و شکست در خط اتصال، مربوط به منطقه وسط جوش مشاهده شده است[۲].

پی. سی. چانگ [۹] وپی.یان [۳] در مورد لوله‌های فولادی X65 به این نتیجه رسیدند که عملیات حرارتی پس از جوشکاری منجر به کاهش کلی سختی در لوله‌ها نسبت به فلز پایه شده است و افت ناگهانی سختی، در محل اتصال جوش است. همچنین ساختار در منطقه جوش یکنواخت‌تر و میزان کربن کاهش یافته است[۳،۹].



شکل۱: نمایش شماتیک از فرآیندهای حرارتی که منجر به شکل‌گیری یک اتصال در طول جوشکاری القایی با فرکانس بالا می‌باشد[۳].

۲- مواد و روش تحقیق

ورق تهیه شده از جنس API 5L GR.B برای تولید لوله‌ای با ضخامت ۴٫۴۰ میلی‌متر، طول ۱۲ متر و قطر ۱۶۸٫۳ میلی‌متر (۶ اینچ) مورد استفاده قرار گرفت. ترکیب شیمیایی و خواص کششی ورق اولیه به ترتیب در جدول۱ و ۲ ارایه شده است. ابتدا یک نمونه هنگامی که کوره خاموش می‌باشد و هیچ‌گونه نرمالیزاسیون روی لوله انجام نشده است تهیه گردید. سپس ۶ نمونه مطابق با سرعت‌های خط تولید ارائه شده در جدول۳ به همراه نرمالیزاسیون ساخته شد.کوره القایی با محدوده حرارت‌دهی ۹۰۰-۸۵۰ درجه سانتی‌گراد و متمرکز بر روی ناحیه جوش جهت عملیات حرارتی لوله‌ها استفاده گردید. نمونه‌های تست کشش مطابق با استاندارد ASTM A370 که در شکل ۲ آمده است تهیه شد و جهت انجام میکروسختی از میکروسکوپ نوری دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول با مشخصه INNOVA TEST با درشت‌نمایی ۴۰۰ که در شکل ۳ آمده است استفاده شد، ابتدا سطح نمونه آزمایش، پرداخت و بسیار براق شده و به وسیله محلول نایتال ۵ درصد اچ[۴] شد. نیروی وارد شده بر روی نمونه ۱/۹۶۱N که معادل ۲۰۰ گرم می‌باشد. پروفیل سختی به فاصله ۰٫۵ میلی‌متر در نظرگرفته شده است که سه نقطه آن در منطقه جوش، دو نقطه در منطقه متأثر از حرارت و مابقی در فلز پایه است.

۴- محلول حاوی ۹۵ درصد الکل با خلوص ۹۶ درصد و ۵ درصد نیتریک اسید(HNO_3)

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.4.4.3]

جدول ۱: ترکیب شیمیایی فلز پایه

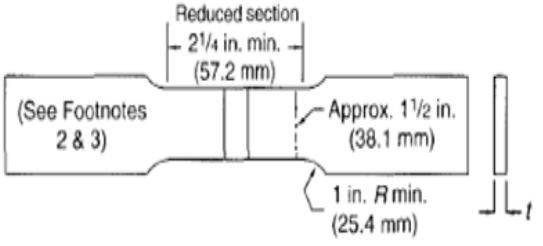
٪C	۰/۱۲۱
٪Mn	۰/۷۹۷
٪Si	۰/۱۵۵
٪P	۰/۰۰۹
٪S	۰/۰۰۶
٪Al	۰/۰۳۲
٪V	۰/۰۰۳
٪Nb	۰/۰۰۱
٪Ti	۰/۰۰۱
٪Cr	۰/۰۱
٪Mo	۰/۰۰۱
٪Ni	۰/۰۲۶

جدول ۲: خواص کششی فلز پایه

استحکام تسلیم (مگاپاسکال)	۳۳۰
استحکام کششی (مگاپاسکال)	۴۵۳
ازدیاد طول (٪)	۳۸

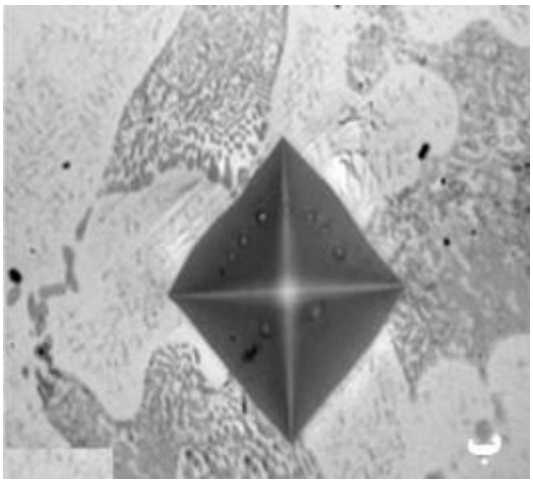
جدول ۳: شماره گذاری نمونه ها بر اساس سرعت خط تولید

سرعت خط تولید (متر بر دقیقه)	شماره نمونه
نمونه نرماله نشده	۱
۱۱	۲
۱۲	۳
۱۳	۴
۱۳/۷	۵
۱۴/۵	۶
۱۶	۷



شکل۲: نمونه آزمون کشش





شکل۳: الف) دستگاه میکروسختی به همراه نمونه‌های آزمایش. ب) ساختار مشاهده شده در زیر میکروسکوپ نوری.

۴- نتایج و بحث

تصاویر متالوگرافی در شکل‌های۴ و ۵ شامل فلز پایه و ناحیه جوش کلیه نمونه‌ها در بزرگنمایی یکسان(۱۰۰برابر) می‌باشد فلز پایه که فولادی کم کربن است دارای ساختاری فریتی و پرلیتی می‌باشد. در نمونه‌ی شماره ۱ که پس از اتصال لبه‌ها به هم و ایجاد جوش نرمالیزاسیون انجام نگردید ساختار جوش مشاهده شده در متالوگرافی گواه بر متفاوت بودن با ساختار فلز پایه می‌باشد ساختار این نمونه پرلیت و فریت سوزنی یا ویدمن‌اشتاین است. همچنین منطقه متأثر از حرارت در نمونه بدون نرمالیزه با دانه‌بندی ریز مشاهده گردید. در

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.4.4.3]

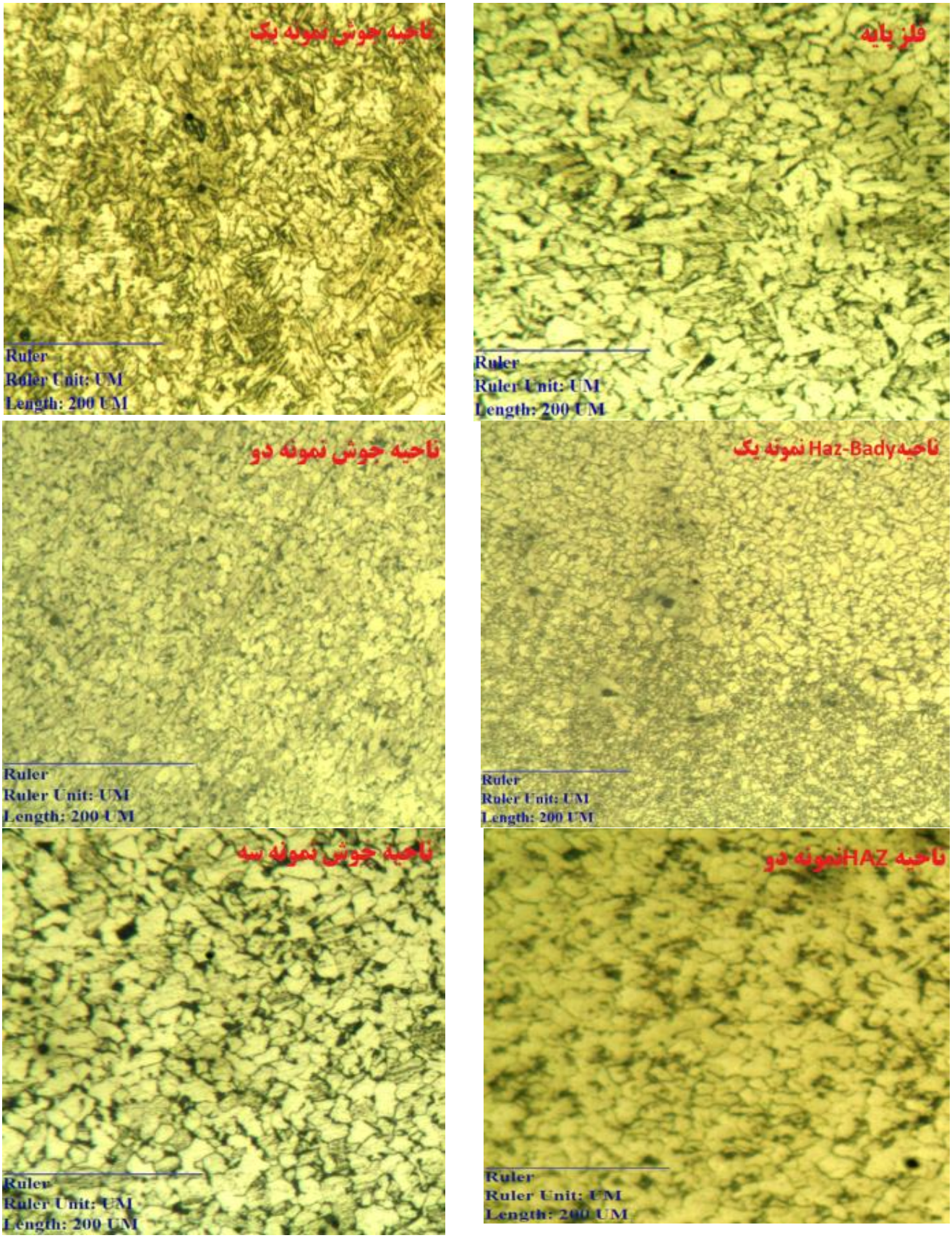
نمونه‌ی ۲ در شکل۴، علاوه بر اینکه منطقه‌ی جوش ریز دانه است دارای منطقه متأثر از حرارت نیز می‌باشد. در نمونه‌های۴ و ۵ در شکل ۵ نتایج قابل توجهی در بررسی‌های متالوگرافی نمونه‌ها دریافت شد. در این دو نمونه بر خلاف مابقی نمونه‌ها، منطقه متأثر از مکانیکی حرارتی مشاهده گردید. همچنین در نمونه ۴ منطقه متأثر از حرارت نیز مشاهده گردید و ساختار منطقه جوش نمونه ۴ از نمونه ۵ ریزدانه‌تر است.

پس از نرمالیزاسیون، در ساختار نمونه‌های ۳، ۶ و ۷ در اشکال ۴ و ۵ منطقه متأثر از حرارت و منطقه متأثر از مکانیکی حرارتی مشاهده نشد. اما به نظر می‌رسد ساختار جوش نمونه‌ی ۳ به فلز پایه نزدیک‌تر است.

نتایج حاصل از آزمون کشش و میکروسختی در شکل۶ و ۷مقایسه شده است. بیشترین میزان استحکام کششی و میزان سختی در نمونه نرمالیزه نشده است که استحکام کششی آن برابر با ۴۸۰ مگاپاسکال و میزان سختی آن ۱۶۳ ویکرز می‌باشد که می‌توان علت آن را ترد بودن منطقه جوش و ریز دانه بودن ساختار آن دانست. پس از نرمالیزه کردن در تمامی سرعت‌های خط تولید با کاهش استحکام کششی نسبت به نمونه بدون نرمالیزه همراه هستیم که بیشترین استحکام کششی مربوط به نمونه تولید شده با سرعت ۱۳ متر بر دقیقه (نمونه ۴) است که برابر با ۴۶۲ مگاپاسکال می‌باشد که علت آن را می‌توان وجود منطقه متأثر از مکانیکی حرارتی و دانه بندی زیر ساختار جوش بیان نمود. نمونه ۷ بیشترین میزان سختی را دارد که علت آن را می‌توان دانه‌بندی ریز ساختار نام برد. کمترین میزان استحکام کششی و بیشترین میزان کرنش مربوط به نمونه تولید شده با سرعت ۱۲ متر بر دقیقه (نمونه ۳) است، همچنین با توجه به شکل ۶ کمترین میزان سختی در نمونه‌های نرمالیزه شده، نمونه ۳ است. که با توجه به نزدیک بودن ساختار نمونه با فلز پایه نسبت به نمونه‌های نرمالیزه شده قابل توجیه می‌باشد.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

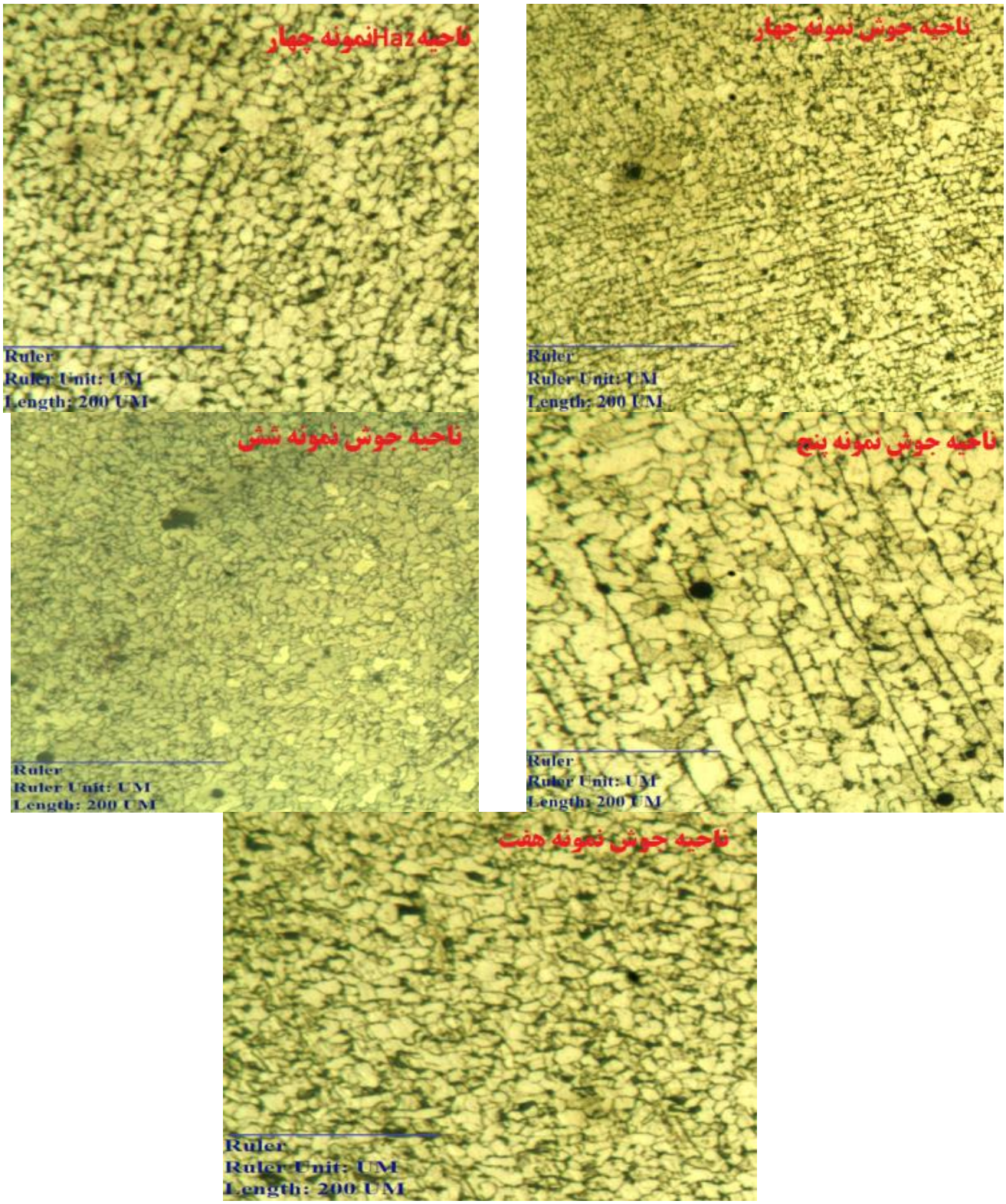
[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.4.4.3]



شکل۴: تصاویر متالوگرافی فلز پایه و نمونه‌های ۱ الی ۳

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

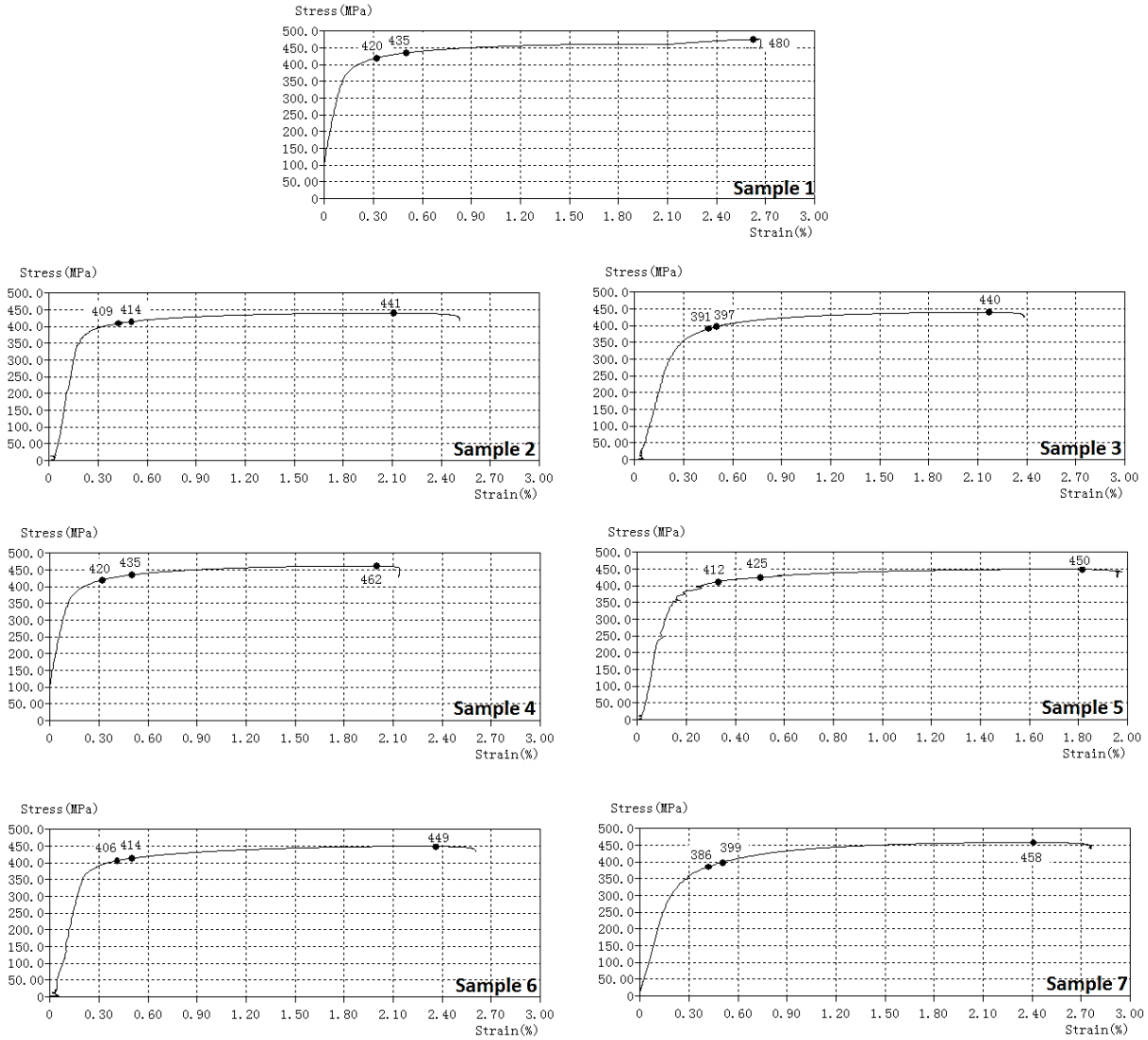
[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.4.4.3]



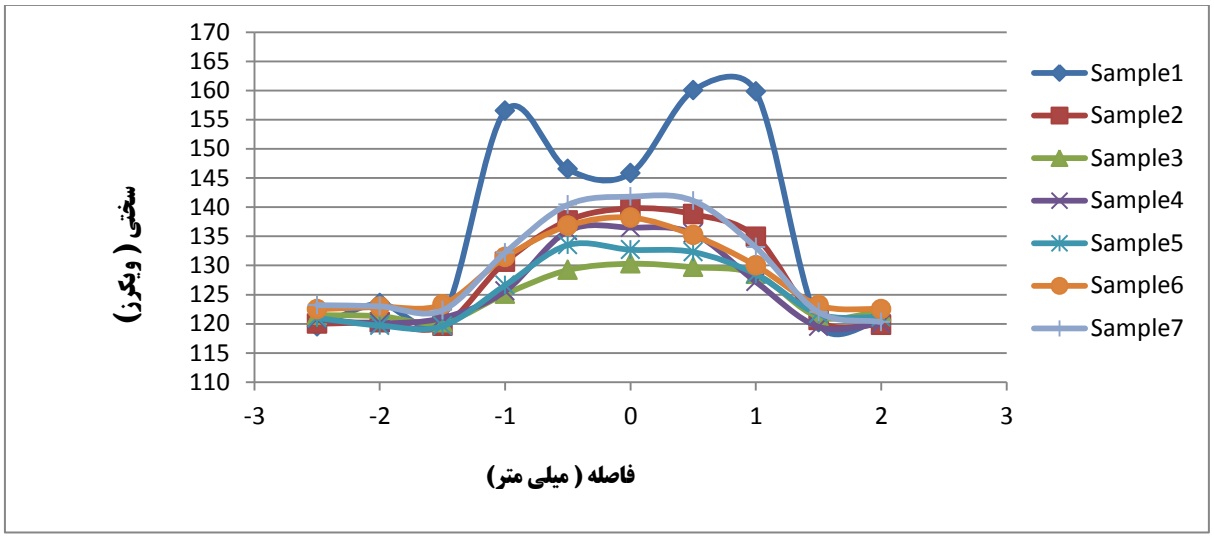
شکل۵: تصاویر متالوگرافی نمونه‌های ۴ الی ۶

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.4.4.3]



شکل ۶: نمودار تنش- کرنش حاصل از تست کشش نمونه‌های مختلف



شکل ۷: نمودار تغییرات سختی در نمونه‌های مختلف

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.4.4.3]

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق، نرمالیزه کردن لوله‌های فولادی گرید B تولید شده به روش جوشکاری مقاومت الکتریکی مورد مطالعه قرار گرفته است. ریزساختار فلز پایه شامل دانه‌های هم محور پرلیت و فریت است نتایج نشان داد که ریزساختار ناحیه جوش قبل از نرمالیزاسیون پرلیت و فریت سوزنی می‌باشد که به دلیل ریز دانه بودن ساختار و ترد بودن منطقه جوش این نمونه بیشترین استحکام کششی و بیشترین میزان سختی را دارد. در بین نمونه‌هایی که با سرعت‌های مختلف تولید و نرمالیزه شده است نمونه‌ای که با سرعت ۱۳ تولید شده است به دلیل داشتن منطقه متأثر از مکانیکی حرارتی و متأثر از حرارت بیشترین استحکام کششی را دارد. اما بیشترین میزان سختی مربوط به نمونه‌ای است که با سرعت ۱۶ متر بر دقیقه تولید شده است. نمونه‌ای که با سرعت ۱۲متر بر دقیقه تولید شده است شرایط مناسب‌تری دارد زیرا دارای ساختاری مشابه با ساختار فلز پایه (فریت و پرلیت هم محور) بوده و دارای کمترین میزان سختی و بیشترین انعطاف‌پذیری در ناحیه جوش است.

۶- مراجع

[1] P. Yan, O¨. E. Gu¨ngo¨r, P. Thibaux and H. K. D. H. Bhadeshia, Induction welding and heat treatment of steel pipes: evolution of crystallographic texture detrimental to toughness, Science and Technology of Welding and Joining, 2010 VOL 15 NO 2 137 .

[2] Ö.E.GÜNgÖr, P.Yan, P.Thibaux, M. Liebeherr, H. k. D. H. Bhadeshia, D. Quidort, , Investigations into the microstructure- toughness relation in high frequency induction welded pipes, IPC2010, 31372.

[3] P. Yan. ¨O. E. G¨ung¨or, P. Thibaux, M. Liebeherr, H. K. D. H. Bhadeshia, Tackling the Toughness of Steel Pipes Produced by High Frequency Induction Welding and Heat–Treatment. Materials Science and Engineering A 528 (2011) 8492– 8499.

[4] M. C o¨ l, M. Yılmaz, The determination of heat treatment parameters of X52 microalloyed steel after high frequency induction welding, Materials and Design 27 (2006) 507–512.

[5] Yan Pei, High Frequency Induction Welding & Post-Welding Heat Treatment of Steel Pipes, A dissertation submitted for the degree of Doctor of Philosophy. 2011.

[6] Inoue Tomohiro, Suzuki Masahito, Okabe Takatoshi, MatsuiYutaka, Development of Advanced Electric Resistance Welding (ERW) Linepipe "Mighty Seam™" with High Quality Weld Seam Suitable for Extra-Low Temperature Services. JFE TECHNICAL REPORT No. 18 (Mar. 2013).

[۷] دکتر گلعداز- محمدعلی- پاییز۱۳۸۸- اصول و کاربرد عملیات حرارتی فولادها- دانشگاه صنعتی اصفهان مرکز نشر.

[8] Yi Han , Enlin Yu , Hongliang Zhang , Daochen Huang, Numerical analysis on the medium-frequency induction heat treatment of welded pipe, Applied Thermal Engineering 51 (2013) 212 - 217 .

[9] P.C. Chung, Yoonjin Ham, Sanghoon Kim , Jeongho Lim , Changhee Lee, Effects of post-weld heat treatment cycles on microstructure and mechanical properties of electric resistance welded pipe welds, Materials and Design, 34 (2012) 685–690

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.4.4.3]