



Experimental Relationship of Yield and Tensile Strengths with Hardness in High Strength APIX70 Steel Pipes

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Hajibagheri H.R.¹ MSc,
Heidari A.^{*1} PhD,
Amini R.² PhD

How to cite this article

Hajibagheri H.R, Heidari A, Amini R. Experimental Relationship of Yield and Tensile Strengths with Hardness in High Strength APIX70 Steel Pipes. Modares Mechanical Engineering, 2019;19(1):85-93.

ABSTRACT

Determining yield and tensile strengths is of utmost importance for engineers in identifying and examining the mechanical properties of pipelines. However, performing a tensile test requires sampling and is, therefore, time-consuming. Thus, it is essential to use an accessible and convenient parameter in order to investigate the relationship between yield and tensile strengths. Hardness can prove to be the parameter we are seeking. The present study used 10 gas transmission pipelines (grade X70, straight seam welded, outer diameter: 1422.2mm, and thickness: 15.9mm) in order to perform chemical analyses, impact tests (base metal, weld, HAZ), microstructural examinations, using an optical microscope, indentation hardness tests (base metal, weld, HAZ), and tensile tests. The minimum, maximum, mean, probability density function, and standard deviation of hardness, yield strength in base metal, and tensile strength in weld and base metal were obtained and compared with API 5L standard. The data were used to determine the relationship between strength and hardness. The results prove to be a reliable measure in order to estimate the strength of base metal in pipelines, which reduces the costs and the time needed in order to achieve an optimal strength.

Keywords Pipe Line; API X70; Hardness; Yield Strength; Tensile Strength

¹Mechanical Engineering Department, Mechanical Engineering Faculty, Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran
²Materials Science & Engineering Department, Materials Science & Engineering Faculty, Shiraz University of Technology, Fars, Iran

*Correspondence

Address: Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University, Daneshjoo Boulevard, Manzarieh, Khomeinishahr, Isfahan, Iran. Postal Code: 8418148499
Phone: +98 (31) 33660012
Fax: +98 (31) 33660088
heidari@iaukhsh.ac.ir

Article History

Received: July 19, 2018
Accepted: September 30, 2018
ePublished: January 1, 2019

CITATION LINKS

[1] Compressorless hydrogen transmission ... [2] Effects of Ti addition and reheating quenching ... [3] An experimental investigation of the nature ... [4] Thermo-mechanical processing of metallic ... [5] The use of hot torsion testing for determination of critical ... [6] The physical metallurgy of ... [7] Design of microalloyed steel hot rolling schedules ... [8] Influence of the chemical composition on transformation ... [9] API 5L-14, Standard specification ... [10] Investigation of cooling rate on continuous cooling ... [11] High strength microalloyed CMn (V-Nb-Ti) and CMn ... [12] Oil pipeline characteristics and risk factors: Illustrations ... [13] A review on welding of high strength oil... [14] The effect of chemical composition on microstructure ... [15] SStrength-hardness statistical correlation ... [16] Correlation of yield strength and tensile strength ... [17] Correlation of microstructure and fracture properties ... [18] On the relation of microstructure and impact ... [19] CTOA levels of welded joint in API X70 ... [20] Apportion of charpy energy in API 5L ... [21] The behavior of precipitates during ... [22] Thermomechanical processing of pipeline ... [23] ASTM E415-15: standard test method ... [24] ASTM E3-11: Standard guide for preparation ... [25] ASTM E407-07: Standard practice for ... [26] ASTM E92-82: Standard test method for vickers hardness ... [27] ASTM E23: Standard test method for notched bar impact testing ... [28] Effect of different microstructural parameters ... [29] A study of impact toughness of intercritically ... [30] Welding metallurgy of alloy ... [31] ASTM A370-17a: Standard test methods and definitions... [32] Shigley's mechanical engineering ... [33] ISO 6507-1: Metallic materials -- vickers hardness test ... [34] Measurement good practice No. 36: Estimating...

روابط تجربی استحکام تسلیم و نهایی با سختی برای لوله‌های فولادی استحکام بالا API X70

حمیدرضا حاجی‌باقری MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، واحد خمینی‌شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی‌شهر، اصفهان، ایران

علی حیدری PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، واحد خمینی‌شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی‌شهر، اصفهان، ایران

رسول امینی PhD

گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی شیراز، فارس، ایران

چکیده

تعیین استحکام تسلیم و نهایی در بررسی و پی‌بردن به خواص مکانیکی در خطوط لوله برای مهندسیین مهم است و از طرفی انجام آزمایش کشش نیاز به نمونه‌سازی داشته و زمان‌بر است. لذا رابطه بین استحکام تسلیم و نهایی با پارامتری که برای ما قابلیت دسترسی داشته باشد امر ضروری به حساب می‌آید. سختی می‌تواند همان پارامتر مورد نظر باشد. در این تحقیق از ۱۰ لوله خط انتقال گاز (گرید X70، درز جوش مستقیم، قطر خارجی ۱۴۲۲/۴ میلی‌متر و ضخامت ۱۵/۹ میلی‌متر) برای انجام آزمایش‌های آنالیز شیمیایی، آزمون ضربه (فلز پایه، جوش و منطقه متأثر از حرارت)، بررسی ریزساختار با میکروسکوپ نوری، سختی‌سنجی (فلز پایه، جوش و منطقه متأثر از حرارت) و آزمون کشش استفاده شد. با توجه به علم آمار حداقل، حداکثر، میانگین، تابع چگالی احتمال و انحراف معیار، مقادیر سختی، استحکام تسلیم در فلز پایه و استحکام نهایی در جوش و فلز پایه محاسبه شده و با استاندارد API 5L مقایسه و مورد ارزیابی قرار گرفت. با استفاده از داده‌ها روابط بین استحکام تسلیم و نهایی با سختی به دست آمد. این نتایج می‌تواند به‌عنوان یک منبع مناسب برای تخمین استحکام فلز پایه در خطوط لوله به کار رود که باعث صرفه‌جویی هزینه‌ها و کاهش زمان برای رسیدن به استحکام لوله می‌شود.

کلیدواژه‌ها: خطوط لوله، API X70، سختی، استحکام تسلیم، استحکام نهایی

تاریخ دریافت: ۹۷/۴/۲۸

تاریخ پذیرش: ۹۷/۷/۸

* نویسنده مسئول: heidari@iaukhsh.ac.ir

۱- مقدمه

خطوط انتقال لوله‌ای یکی از اقتصادی‌ترین روش‌های انتقال و جابه‌جایی سیالاتی در فواصل طولانی از قبیل نفت خام، گاز طبیعی یا محصولات آنها است^[1, 2]. از طرفی خطوط نفت و گاز یکی از مهم‌ترین و حیاتی‌ترین بخش‌ها و ارکان‌های هر کشوری به شمار می‌رود. بنابراین حفظ و نگهداری این خطوط یک امر بدیهی است^[3]. ورق‌های فولادهای مورد استفاده در ساخت لوله‌های انتقال گاز از گروه فولادهای کم‌آلیاژ پراسنیک (HSLA) هستند. روش‌های مختلفی برای طبقه‌بندی خطوط لوله وجود دارد، اما مفیدترین آنها براساس ریزساختار است، زیرا خواص مواد مهندسی به‌طور کلی توسط میکروساختار تعیین می‌شود. تحت این سیستم، این فولادها با دو ریزساختار فریت-پرلیتی یا فریت سوزنی-بینیتی تولید می‌شود^[4]. عناصر اصلی تشکیل‌دهنده فولادهای HSLA، کربن و منگنز است که مقادیر کمی از عناصر آلیاژی نیوبیوم، آلومینیوم و وانادیوم و تیتانیوم به‌منظور افزایش استحکام افزوده می‌شود^[4-6]. توسعه این فولادها از طریق نوآوری‌های متالورژیک در افزودن عناصر آلیاژی و همچنین روش‌های عملیات ترمومکانیک حاصل شده است. عملیات ترمومکانیک از نورد کنترل‌شده و سرمایش سریع تشکیل شده است. نورد کنترل‌شده در دو مرحله نورد خشن و نورد پرداخت انجام می‌شود. به‌منظور تعیین محدوده دمای نورد خشن و پرداخت و کنترل ریزساختار و خواص

مکانیکی نهایی فولاد، تعیین هر چه دقیق‌تر دماهای بحرانی عملیات ترمومکانیک شامل دمای عدم وقوع تبلور مجدد (T_{nr}) به‌عنوان کمترین دمای کامل‌شدن پدیده تبلور مجدد (جایگزینی دانه‌های تغییر شکل‌یافته با دانه‌های بدون کرنش) در فولاد و دماهای شروع و پایان استحاله آستنیت (A_{r1} , A_{r3}) از اهمیت بسیاری برخوردار است^[7, 8].

دسته‌ای از این فولادها که در ساخت لوله‌های انتقال نفت و گاز استفاده می‌شوند و توسط موسسه نفت ایالات متحده استاندارد شده‌اند، فولادهای API نامیده می‌شوند^[9]. استحکام بالا، قابلیت جوش‌پذیری مناسب، چقرمگی ضربه بالا و دمای انتقال شکست نرم به ترد پایین از ویژگی‌های اصلی این فولادها است^[10, 11]. در این میان فولاد با گرید API X70 یکی از پرکاربردترین فولادهای خط لوله است که در سال ۱۹۷۳ پدیدار شد^[12]. این فولاد در استانداردهای EN10208، ISO3183، به‌نام L485، استاندارد DIN 17172 به‌نام StE48.7 TM، استاندارد روسی به‌نام K60 و استاندارد BIS هند به‌نام YSt 483 شناخته می‌شود. طبقات تولیدی لوله به دو صورت PSL1 و PSL2 است که در تفاوت بین این دو، PSL2 دارای الزامات اجباری برای کرین معادل و ضربه بوده و به‌علاوه حداقل و حداکثر استحکام تسلیم و نهایی تعریف شده است و انتهای سر لوله بایستی ساده باشد، اما PSL1، حداقل محدودیت برای استحکام تسلیم و نهایی دارد و انتهای سر لوله می‌تواند (براساس رعایت گرید استاندارد API 5L) کاسه‌ای، رزوه‌ای و ساده باشد^[13]. جوشکاری درز جوش لوله‌های قطور بالا به‌صورت جوشکاری قوسی زیرپودری (SAW) بوده است و به دو دسته جوشکاری قوسی زیرپودری طولی (SAWL) (با خط جوش مستقیم) یا جوش قوسی مارپیچی زیرپودری (SAWH) (با خط جوش اسپیرال) تقسیم می‌شود^[14].

هاشمی^[15] روابط تجربی بین استحکام و سختی را با استفاده از اطلاعات ۱۰۰ نمونه فولاد API X65 (سایز ۴۸، درز جوش مارپیچ، ضخامت ۱۴/۳ میلی‌متر) به دست آورد. وی با استفاده از اطلاعات تنش تسلیم، نهایی و سختی روی بدنه لوله و درز جوش، حداقل، حداکثر، میانگین، انحراف معیار و تابع چگالی احتمال (PDF) را مورد تجزیه و تحلیل قرار داد و در نهایت، یک رابطه تجربی برای پیش‌بینی استحکام در فلز پایه لوله با توجه به داده‌های سختی ارائه کرد. *پاولینا* و *وان‌تاین*^[16] روابط تجربی تنش تسلیم و نهایی با سختی را برای فولاد هیپوتکتوئید به دست آوردند که محدوده تنش تسلیم فولاد، ۱۷۰۰-۳۰۰ MPa و تنش نهایی، ۲۳۵۰-۴۵۰ MPa بود. آنها برای تعیین همبستگی استحکام از تحلیل رگرسیون استفاده کردند.

برای فولاد API X70 در مطالعات قبلی بیشتر خصوصیات مانند بهبود ترکیب شیمیایی، ریزساختار، استحکام، خواص ضربه شاری (CVN)، چقرمگی و انرژی شکست ضربه آن بررسی شده است^[17].^[22] تحقیق حاضر روی ۱۰ لوله فولاد خط انتقال گاز API X70 آزمون کشش، آنالیز شیمیایی، تست ضربه (فلز پایه، جوش و منطقه متأثر از حرارت یا HAZ) و بررسی ریزساختارها انجام شد. علاوه بر آن آزمون سختی‌سنجی ویکرز در نقاط مختلف (فلز پایه، جوش و منطقه متأثر از حرارت) انجام گرفت. با استفاده از این داده‌ها، حداقل، حداکثر، میانگین، تابع چگالی احتمال و انحراف معیار مقادیر سختی و تنش تسلیم در فلز پایه و استحکام نهایی در جوش و فلز پایه محاسبه شد و با استاندارد API 5L مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت. در نهایت روابط بین تنش نهایی و

روابط تجربی استحکام تسلیم و نهایی با سختی برای لوله‌های فولادی استحکام بالا API X70 ۸۷ استاندارد API 5L برای لوله‌های تولید شده PSL2 که دارای معادل کرنی مساوی یا کمتر از ۱۲٪ باشند، معادل کرنی براساس فرمول زیر محاسبه می‌شود که بایستی حداکثر ۰/۲۵ باشد.

$$CE_{pcm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B$$

در فولاد مورد مطالعه مقدار CE_{pcm} حداکثر ۰/۲۱ به دست آمد که از مقدار ۰/۲۵ استاندارد کمتر است.

جدول (۱) نتایج آنالیز شیمیایی

عنصر	محدوده اندازه‌گیری شده (درصد وزنی)	انحراف معیار میانگین	محدوده استاندارد API 5L
C	۰/۰۵۰-۰/۱۰	۰/۰۷۰±۰/۰۸۴	۰/۱۲۰
Si	۰/۱۷۰-۰/۳۷	۰/۰۲۷±۰/۰۵۸	۰/۴۵۰
Mn	۱/۴۵-۱/۶۶	۱/۵۵±۰/۰۶۰	۱/۷۰۰
S	۰/۰۰۳-۰/۰۱۴	۰/۰۰۹۷±۰/۰۰۳	۰/۰۱۵
P	۰/۰۰۹-۰/۰۱	۰/۰۱۲±۰/۰۰۸	۰/۰۲۵
Ti	۰/۰۲-۰/۰۵	۰/۰۴۲±۰/۰۱۶	-
cu	۰/۰۱۰-۰/۰۴	۰/۰۲۵±۰/۰۱۰	-
Ni	۰/۰۰۸-۰/۰۳	۰/۰۰۷±۰/۰۰۹۶	-
Mo	۰/۰۰۱-۰/۰۸	۰/۰۵۰±۰/۰۳۶	-
Cr	۰/۰۴-۰/۲۰	۰/۰۸۰±۰/۰۵۹	-
V	۰/۰۰۷-۰/۰۵	۰/۰۲۴±۰/۰۱۰	-
Al	۰/۰۱-۰/۰۴	۰/۰۳۸±۰/۰۰۹	-
Nb	۰/۰۳-۰/۰۴	۰/۰۳۳±۰/۰۳۰	-

۳-۲- آزمون ضربه شارپی

در این پژوهش از ۱۰ لوله مورد آزمایش، آزمون ضربه شارپی به عمل آمد. برای هر لوله برای هر ناحیه (فلز پایه، جوش و منطقه متأثر از حرارت) آزمون سه بار، تکرار و میانگین انرژی جذب شده توسط سه نمونه برای هر قسمت محاسبه شد. ابعاد نمونه تست ۱۰×۱۰×۵۵mm مطابق با استاندارد ASTM E23 در جهت عرضی [27] و در ساعت ۳ یا ۹، لوله نسبت به درزجوش طولی (ساعت ۱۲) جدا شد (شیار نمونه در راستای طولی لوله). خلاصه آماری نتایج ضربه شارپی در جدول ۲ نشان داده شده است. نتایج با الزامات تعیین شده استاندارد API 5L برای گرید X70 مطابقت دارد.

جدول (۲) نتایج تست ضربه

منطقه	مقدار انرژی جذب شده (J)		انحراف معیار میانگین
	حداقل	حداکثر	
جوش	۴۰	۱۵۲/۳	۷۶/۵۴±۴۵/۲۷
حد استاندارد	۴۰	-	-
ناحیه متأثر از حرارت	۴۰	۱۷۴/۰	۱۲۰/۳±۷۲/۰۲
حد استاندارد	۴۰	-	-
بدنه لوله	۱۰۰	۲۵۵	۱۷۱/۵±۶۳/۸۷
حد استاندارد	۵۴	-	-

۳-۳ بررسی‌های ریزساختاری

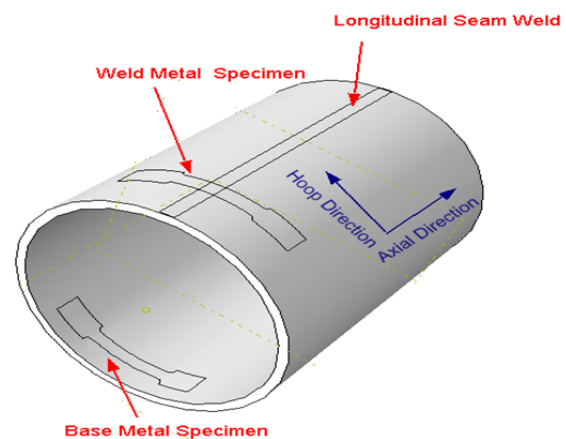
شکل ۲- a ریزساختار قسمت فلز پایه را نشان می‌دهد که دارای ساختار فریتی-پرلیتی است. بیش از ۹۰٪ میکروساختار از فریت تشکیل شده و مابقی آن پرلیت است. در این شکل ساختار پرلیت و فریت با پیکان نشان داده شده است. فریت به‌عنوان نرم‌ترین فاز موجود در فولاد شناخته می‌شود و مقاوم‌ترین فاز در مقابل انتشار ترک است، اما به‌منظور مقاوم کردن و بالابردن چقرمگی شکست آن مقداری از ساختارهای دیگر نظیر پرلیت نیز در میکروساختار فولاد اضافه می‌شود [28].

۲- ماده مورد آزمایش و روش تحقیق

اندازه‌گیری استحکام تسلیم و نهایی در لوله نیاز به نمونه‌سازی دارد و وقت‌گیر بوده و از سوی دیگر، آزمایش سختی نسبتاً آسان و سریع است. در این تحقیق با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده سختی و استحکام تسلیم و استحکام نهایی، معادلات تجربی بین سختی و استحکام در فلز پایه حاصل شد. آزمایشات روی ۱۰ نمونه لوله فولادی خط انتقال گاز (گرید X70، درز جوش مستقیم، قطر خارجی ۱۴۲۲/۴mm و ضخامت ۱۵/۹mm) و همچنین آنالیز شیمیایی کوانتومتری مطابق با استاندارد ASTM E415 انجام شد [23].

مطابق با الزامات استاندارد API 5L جهت لوله‌های PSL2، آزمون ضربه شارپی در دمای صفر درجه سانتی‌گراد صورت گرفت. به‌منظور بررسی ریزساختاری، نمونه‌های سطح فلز پایه، منطقه متأثر از حرارت و مرز ذوب مطابق با استاندارد ASTM E3 آماده [24] و مطابق با استاندارد [25] ASTM E407 توسط محلول نایتال ۲٪ اچ شدند و با میکروسکوپ نوری با بزرگ‌نمایی ۵۰۰ برابر مورد بررسی قرار گرفتند.

آزمون کشش برای تعیین استحکام ماده با دستگاه مدل al700c- la60 (شرکت Gotech) و همچنین جهت و موقعیت برش نمونه‌ها روی لوله برای تست کشش مطابق با استاندارد API 5L انجام شد. همان‌طور که در شکل ۱ دیده می‌شود، نمونه تست کشش در قسمت فلز پایه و جوش، در جهت عرضی لوله است، به‌طوری که نیروهای آزمایشگاهی در جهت تنش حلقوی لوله باشد. آزمون سختی‌سنجی ویکرز با اعمال نیروی ۱۰Kg مطابق با استاندارد ASTM E92 انجام شد [26]. سپس نتایج مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفت.



شکل (۱) جهت نمونه‌های تست کشش از بدنه و جوش طولی روی لوله

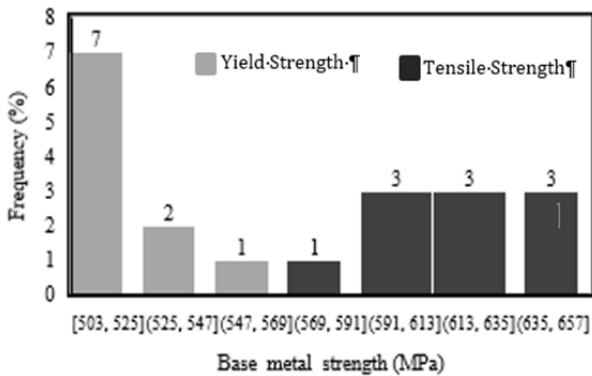
۳- نتایج

۳-۱- آنالیز شیمیایی

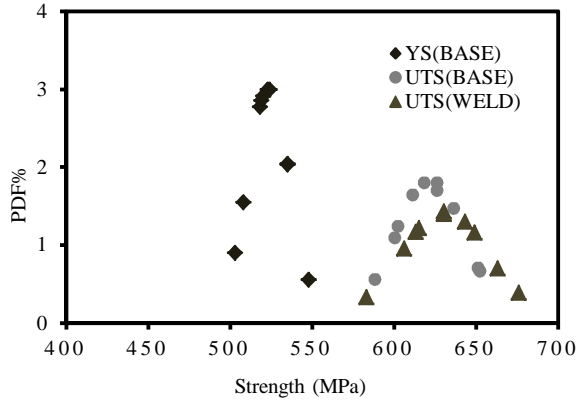
خلاصه آماری نتایج آنالیز شیمیایی روی ۱۰ نمونه شامل محدوده (حداقل- حداکثر)، میانگین و انحراف معیار در جدول ۱ نشان داده شده است. همچنین مطابق استاندارد مقدار Nb+V+Ti بایستی کمتر یا مساوی ۰/۱۵ باشد که حداکثر این مقدار برای نتایج ۰/۱۴ است. بررسی نتایج آنالیز ترکیب شیمیایی (جدول ۱) نشان می‌دهد که حداکثر مقدار اندازه‌گیری شده با حدود بالای تعیین شده توسط استاندارد API 5L برای گرید X70 مطابقت دارد. مطابق با

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (3)$$

در جدول ۳ داده‌های تجربی آزمون کشش و مقایسه آن با حدود مجاز استاندارد API 5L، محاسبه انحراف معیار و تابع چگالی احتمال هر نمونه آزمایش مشاهده می‌شود. نمودار ۱، توزیع تکرار استحکام تسلیم و استحکام نهایی را برای فلز پایه API X70 نشان می‌دهد. همان طور که در این نمودار مشاهده می‌شود، ۷۰٪ توزیع استحکام تسلیم بین ۵۰۳-۵۲۵MPa و ۹۰٪ توزیع استحکام نهایی بین ۵۹۱-۶۱۳MPa است. در نمودار ۲، تابع چگالی احتمال جهت استحکام نهایی جوش و فلز پایه و استحکام تسلیم جهت فلز پایه نشان داده شده است. استحکام نهایی به‌طور متوسط برای فلز پایه ۶۲۱/۳MPa و برای جوش ۶۳۰/۸MPa دیده می‌شود (جدول ۳).



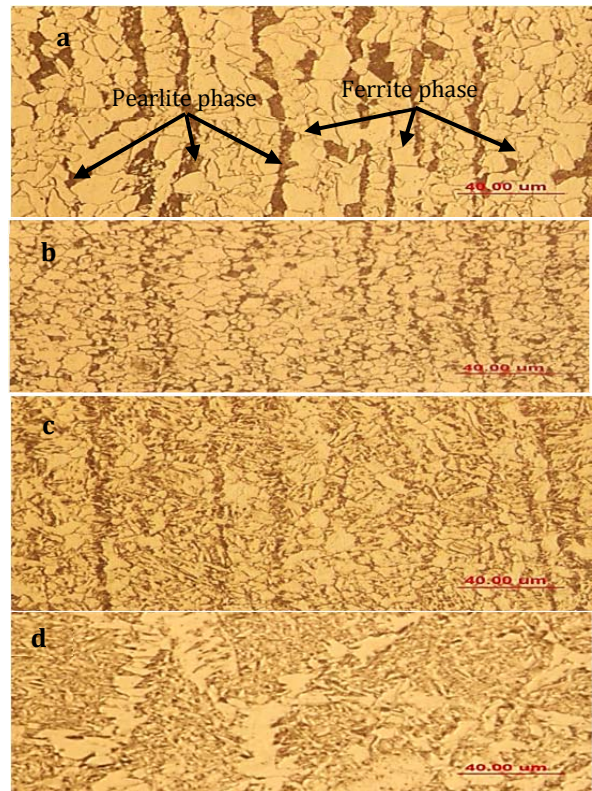
نمودار ۱) توزیع تکرار استحکام تسلیم و استحکام کششی فلز پایه API X70



نمودار ۲) تابع چگالی احتمال در برابر استحکام تسلیم فلز پایه، استحکام کششی فلز پایه و جوش

خاصیت	حداقل	حداکثر	میانگین درصد چگالی	انحراف معیار
استحکام تسلیم بدنه لوله	۵۰۳	۵۴۸	۵۲۳/۳	۱۳/۳
حد استاندارد API 5L	۴۸۵	۶۳۵	-	-
استحکام نهایی بدنه لوله	۵۸۸	۶۵۲	۶۲۱/۳	۲۱/۵
حد استاندارد API 5L	۵۷۰	۷۶۰	-	-
نسبت استحکام تسلیم به نهایی	۰/۸۰	۰/۸۹	۰/۸۵۰	۰/۰۳
حد استاندارد API 5L	-	۰/۹۳	-	-
درصد از یاد طولی بدنه لوله	۲۲/۲	۳۳/۱	۲۴/۸۹	۳/۶۰
حد استاندارد API 5L	-	-	-	-
استحکام نهایی جوش	۵۸۳	۶۷۶	۶۳۰/۸	۲۷/۹
حد استاندارد API 5L	۵۷۰	-	-	-

به‌علت تأثیرات حرارتی در منطقه متأثر از حرارت، تغییرات ریزساختاری در این ناحیه به‌وضوح قابل مشاهده است. افزایش دما در این منطقه باعث عملیات حرارتی روی فولاد شد که به‌تبع آن ریزساختار و به‌ویژه چقرمگی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این ناحیه به چهار قسمت شامل منطقه متأثر از حرارت درشت‌دانه (CGHAZ)، منطقه متأثر از حرارت ریزدانه (FGHAZ)، منطقه متأثر از حرارت بین بحرانی (ICHAZ) و منطقه متأثر از حرارت زیر بحرانی (SCHAZ) تقسیم می‌شود [29]. در شکل ۲- b و c منطقه متأثر از حرارت بین بحرانی و درشت‌دانه مشاهده می‌شود. علت وجود دو ناحیه دانه درشت و دانه ریز در منطقه متأثر از حرارت، تفاوت در دمای بیشینه و نقش کاربردها در ریزساختار است [30]. در شکل ۲- d ساختار مرز ذوب قابل مشاهده است.



شکل ۲) تصاویر میکروسکوپ نوری، (a) فلز پایه، (b) ناحیه متأثر از حرارت بین بحرانی، (c) ناحیه متأثر از حرارت درشت دانه، (d) ساختار مرز ذوب

۴-۳- تست کشش

از ۱۰ لوله مورد پژوهش، آزمایش کشش جهت تعیین استحکام تسلیم و نهایی فلز پایه و درزجوش مطابق استاندارد [31] ASTM A370 انجام شد [31].

با استفاده از داده‌های کشش و مطابق رابطه ۱، تابع چگالی احتمال محاسبه شد [32].

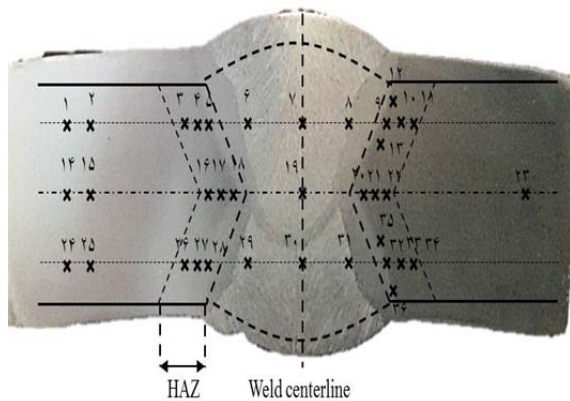
$$f(x) = \frac{1}{SD\sqrt{2\pi}} \exp \left[-1/2 \left(\frac{x-\bar{x}}{SD} \right)^2 \right] \quad (1)$$

که x ، استحکام اندازه‌گیری شده است و انحراف معیار هر نمونه آزمایش از رابطه ۲ به دست می‌آید:

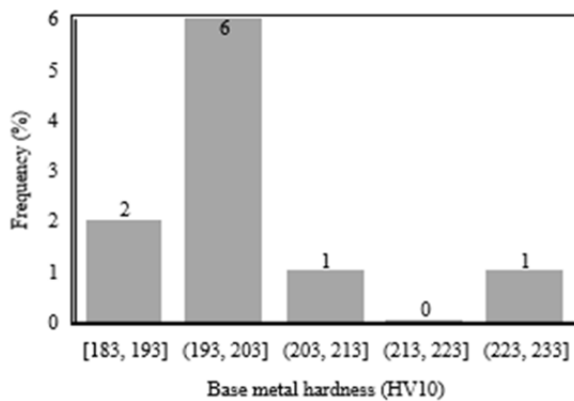
$$SD = \sqrt{\frac{\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2 / N}{N - 1}} \quad (2)$$

و میانگین استحکام هر نمونه از رابطه ۳ به دست می‌آید:

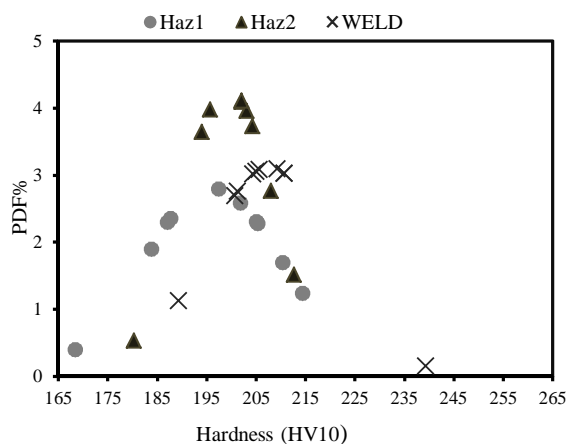
روابط تجربی استحکام تسلیم و نهایی با سختی برای لوله‌های فولادی استحکام بالا API X70 ۸۹ در نمودار ۴ تابع چگالی احتمال برای سختی سه ناحیه جوش، منطقه ۱ و ۲ متأثر از حرارت نمایش داده شده است. همان طور که در این نمودار دیده می‌شود، برای منطقه ۱ متأثر از حرارت و منطقه ۲ متأثر از حرارت به ترتیب ۱۹۶/۱ و ۱۹۹/۳ MPa به دست آمد. در نمودار ۵، تغییرات سختی و استحکام تسلیم سه ناحیه فلز پایه، جوش و منطقه متأثر از حرارت نشان داده شده است. بالاترین سطح سختی در جوش ۲۰۷/۶ HV10 و استحکام تسلیم ۶۳۰/۸ AMPa بوده و در منطقه ۱ و ۲ متأثر از حرارت کمترین سطح سختی با میانگین ۱۹۶/۱ HV10 است.



شکل ۳) نمایش مقطعی از جوش و نمایش نقاط مورد نظر برای اندازه‌گیری سختی



نمودار ۴) توزیع تکرار داده‌ها در مقابل سختی فلز پایه API X70



نمودار ۵) تابع چگالی احتمال در مقابل سختی (جوش، منطقه ۱ و ۲ متأثر از حرارت)

۳-۵- سختی‌سنجی

برای هر کدام از ۱۰ نمونه مورد آزمایش در ۴ ناحیه (فلز پایه، جوش، منطقه ۱ متأثر از حرارت در سمت چپ خط ذوب و منطقه ۲ متأثر از حرارت در سمت راست خط ذوب) مطابق با شکل ۳ آزمون سختی انجام شد که برای هر مقطع از نمونه لوله شامل ۳۶ نقطه است. در جدول ۴ نتایج حداقل، حداکثر، میانگین، انحراف معیار، درصد تابع چگالی و عدم قطعیت سختی از ۴ ناحیه مورد نظر ارائه شده است. همان طور که در نمودار ۳ مشاهده می‌شود، ۶۰٪ اندازه‌گیری‌های سختی در فلز پایه در بازه HV10 ۲۰۳-۱۹۳ است. عدم قطعیت اندازه‌گیری سختی (U) براساس استاندارد ISO 6507-1 با رابطه ۴ محاسبه شده است [33].

$$U = k * \sqrt{(u_E^2 + u_{CRM}^2 + u_H^2 + u_{\bar{x}}^2 + u_{ms}^2)} \quad (4)$$

که k سطح اطمینان با ضریب پوششی بوده و مقدار آن برابر ۲ در نظر گرفته شده است. u_E عدم قطعیت خطای نمونه تست (test block) است و با استفاده از رابطه ۵ به دست می‌آید:

$$u_E = \frac{u_{E.2r} * X_{CRM}}{2.8} \quad (5)$$

$u_{E.2r}$ بیشترین خطای مجاز است که از جدول ۵، استاندارد ISO 6507-2 استخراج می‌شود و X_{CRM} عدد سختی نمونه تست بوده که از روی گواهی‌نامه صادر شده از آزمایشگاه گرفته شده است. در رابطه ۴، u_{CRM} عدم قطعیت نمونه تست است و از رابطه ۶ به دست می‌آید:

$$u_{CRM} = \frac{U_{CRM}}{2} \quad (6)$$

U_{CRM} براساس جدول ۴، استاندارد ISO 6507-4 به دست می‌آید. u_H عدم قطعیت دستگاه در زمان استفاده از نمونه تست است.

$$u_H = \frac{t * SD}{\sqrt{n}} \quad (7)$$

که n تعداد دفعات اندازه‌گیری شده نمونه تست و SD انحراف معیار است که از رابطه ۲ به دست می‌آید. t براساس تعداد نمونه تست یا آزمایش از یک مرجع [34] استخراج می‌شود. $u_{\bar{x}}$ عدم قطعیت دستگاه در زمان استفاده از نمونه آزمایش است.

$$u_{\bar{x}} = \frac{t * SD}{\sqrt{m}} \quad (8)$$

که m تعداد دفعات اندازه‌گیری شده نمونه آزمایش بوده و u_{ms} عدم قطعیت دقت دستگاه است که طبق رابطه ۹ محاسبه می‌شود.

$$u_{ms} = \frac{2\bar{x}}{d} * \frac{\delta_{ms}}{2\sqrt{3}} \quad (9)$$

\bar{x} میانگین اندازه‌گیری‌های رابطه ۳ و δ_{ms} دقت دستگاه است. d میانگین قطر اثر فرورونده روی نمونه است که با استفاده از رابطه ۱۰ تعیین می‌شود.

$$d = \sqrt{\frac{1.8544 * p}{\bar{x}}} \quad (10)$$

p بار وارده بر حسب kgf است. در نهایت درصد عدم قطعیت با استفاده از رابطه ۱۱ محاسبه می‌شود.

$$Uncertainty\ percentage = 100 - \left(\frac{U}{\bar{x}} * 100\right) \quad (11)$$

جدول ۵) مقادیر استحکام تسلیم اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده فلز پایه فولاد API X70

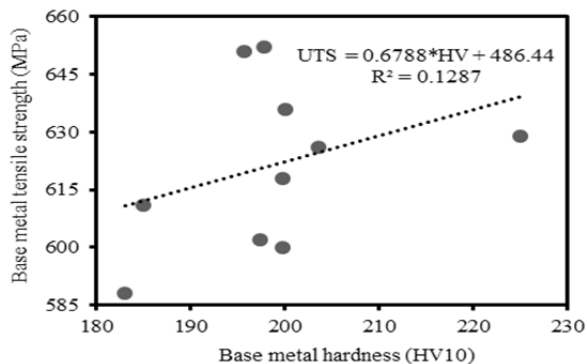
درصد خطا	استحکام تسلیم اندازه‌گیری شده (MPa)	استحکام تسلیم پیش‌بینی شده (MPa)	سختی اندازه‌گیری شده (HV10)
۲/۴	۵۰۳	۵۱۵/۰	۱۸۳/۰
۱/۶	۵۰۸	۵۱۶/۰	۱۸۵/۰
۰/۵	۵۲۰	۵۲۲/۵	۱۹۵/۷
۰/۲	۵۲۴	۵۲۳/۰	۱۹۷/۳
۲/۱	۵۳۵	۵۲۳/۷	۱۹۷/۷
۴/۲	۵۴۸	۵۲۴/۹	۱۹۹/۷
۰/۴	۵۲۳	۵۲۴/۹	۱۹۹/۷
۱/۹	۵۳۵	۵۲۵/۱	۲۰۰/۰
۱/۷	۵۱۸	۵۲۷/۰	۲۰۳/۶
۴/۰	۵۱۹	۵۳۹/۹	۲۲۵/۰

۳-۷- رابطه بین سختی و استحکام نهایی

با استفاده از داده‌های سختی و استحکام نهایی اندازه‌گیری شده، یک معادله تجربی برای محاسبه استحکام نهایی بر حسب سختی در فلز پایه حاصل شده است. نمودار ۷ یک رابطه خطی با ضریب همبستگی برابر با $R^2=0.1287$ برای پیش‌بینی استحکام نهایی در فلز پایه ارائه می‌کند:

$$UTS=0.6788*HV+486.44 \quad (13)$$

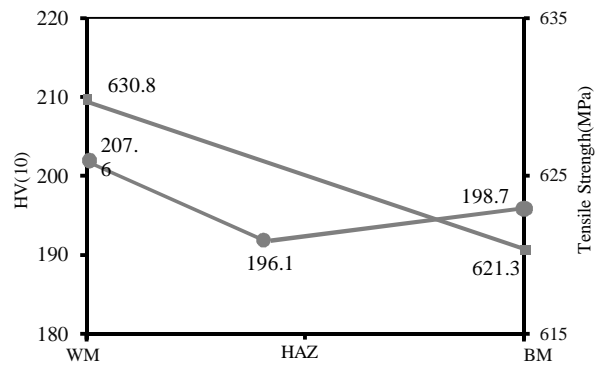
مقایسه داده‌های سختی اندازه‌گیری شده و مقدار استحکام نهایی توسط معادله ۱۳ و درصد خطا در جدول ۶ مشاهده می‌شود. حداقل و حداکثر خطا، ۰/۲ و ۴/۹٪ است. خطای ۴/۹٪ با سختی ۱۹۵/۷HV10 و استحکام نهایی اندازه‌گیری شده ۶۵۱MPa که مقدار پیش‌بینی آن ۶۱۹/۳MPa است و ۳۱/۷MPa اختلاف آنها است و مقدار ۶۱۹/۳MPa پیش‌بینی شده در محدوده استاندارد API 5L است (با توجه به میانگین استحکام نهایی ۶۲۱/۳MPa و انحراف معیار ۲۱/۵MPa در جدول ۳). در نتیجه از رابطه ۱۳ می‌توان برای پیش‌بینی استحکام نهایی استفاده کرد.



نمودار ۷) نمودار خطی بین استحکام نهایی و مقادیر سختی فلز پایه فولاد API X70

جدول ۶) مقادیر استحکام نهایی اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده فلز پایه فولاد API X70

درصد خطا	استحکام نهایی اندازه‌گیری شده (MPa)	استحکام نهایی پیش‌بینی شده (MPa)	سختی اندازه‌گیری شده (HV10)
۳/۹	۵۸۸	۶۱۰/۷	۱۸۳/۰
۰/۲	۶۱۱	۶۱۲/۰	۱۸۵/۰
۴/۹	۶۵۱	۶۱۹/۳	۱۹۵/۷
۳/۱	۶۰۲	۶۲۰/۴	۱۹۷/۳
۴/۸	۶۵۲	۶۲۰/۷	۱۹۷/۷
۳/۵	۶۰۰	۶۲۰/۷	۱۹۹/۷
۰/۶	۶۱۸	۶۲۲/۰	۱۹۹/۷
۲/۲	۶۳۶	۶۲۲/۲	۲۰۰/۰
۰/۲	۶۲۶	۶۲۴/۶	۲۰۳/۶
۱/۶	۶۲۹	۶۳۹/۲	۲۲۵/۰



نمودار ۵) تغییرات سختی و استحکام تسلیم در مقطع جوش

جدول ۴) داده‌های سختی (HV10) از ۱۰ لوله اندازه‌گیری شده در ۴ ناحیه مختلف

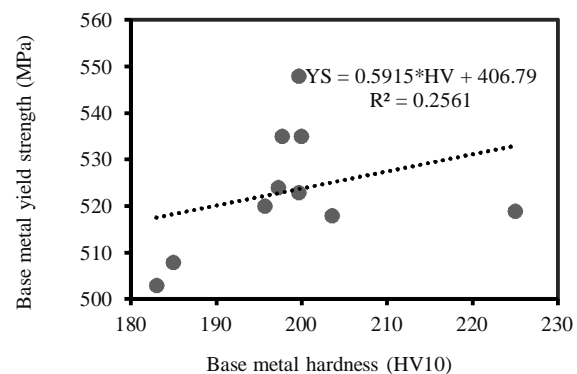
ناحیه	سختی (HV10)			درصد عدم قطعیت	انحراف معیار	درصد چگالی احتمال
	حداقل	حداکثر	میانگین			
جوش	۱۸۹/۳	۲۳۹/۳	۲۰۷/۶	۹۵/۰	۱۲/۸	۳/۱
منطقه ۱ متأثر از حرارت	۱۶۸/۳	۲۱۴/۳	۱۹۶/۱	۹۴/۲	۱۴/۲	۲/۸
منطقه ۲ متأثر از حرارت	۱۸۰/۳	۲۰۸/۰	۱۹۹/۳	۹۵/۶	۹/۳۰	۴/۳
بدنه لوله	۱۸۳/۰	۲۲۵/۰	۱۹۸/۷	۹۵/۱	۱۱/۳	۳/۵
حد استاندارد API 5L	-	۳۴۵/۰	-	-	-	-

۳-۶- رابطه بین سختی و استحکام تسلیم

با استفاده از داده‌های سختی و استحکام تسلیم اندازه‌گیری شده، نمودار بین سختی و تنش تسلیم جهت فلز پایه در نمودار ۶ نشان داده شده است که یک رابطه خطی با ضریب همبستگی $R^2=0.2561$ برای پیش‌بینی استحکام تسلیم در فلز پایه به دست می‌آید:

$$YS=0.5915*HV+406.79 \quad (12)$$

مقایسه داده‌های سختی اندازه‌گیری شده و مقدار تنش تسلیم توسط معادله ۱۲ و درصد خطا در جدول ۵ مشاهده می‌شود که حداقل و حداکثر خطا به ترتیب ۰/۲ و ۴/۲٪ است. خطای ۴/۲٪ با سختی ۱۹۹/۷HV10 و تنش تسلیم ۵۴۸MPa که مقدار پیش‌بینی آن ۵۲۴/۹MPa است و ۲۳/۸MPa اختلاف آنها است و مقدار ۵۲۴/۹MPa پیش‌بینی شده در محدوده استاندارد API 5L است (با توجه به میانگین استحکام تسلیم ۵۲۳/۳MPa و انحراف معیار ۱۳/۳MPa در جدول ۳). در نتیجه از معادله ۱۲ می‌توان برای پیش‌بینی تنش تسلیم استفاده کرد.



نمودار ۶) نمودار خطی بین استحکام تسلیم و مقادیر سختی فلز پایه فولاد API X70

آزمون کشش جهت تعیین استحکام تسلیم و نهایی در منطقه متاثر از حرارت انجام شد و مقدار آن ۵۰۸ و ۶۱۱ MPa بوده است که مقادیر گرید X70 را در بر دارد.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق از ۱۰ نمونه لوله (قطر خارجی ۱۴۲۲/۲۴ mm، ضخامت ۱۵/۹ mm و گرید API X70) استفاده شد که در خطوط انتقال گاز ایران کاربرد زیادی دارد و آزمایشات آنالیز شیمیایی، تست ضربه، بررسی ریزساختارها، آزمون کشش و سختی‌سنجی انجام پذیرفت. از بررسی داده‌های تجربی این تحقیق نتایج زیر حاصل شد:

- نتایج حاصل از آنالیز شیمیایی از بدنه لوله‌ها و انحراف معیار و میانگین آنها به دست آمد که مطابق با استاندارد API 5L گرید X70 بوده و با توجه به کربن معادل جزء PSL2 است.
- نتایج حاصل از تست ضربه گواهی بر این بود که این فولاد از چقرمگی مناسب برخوردار است.
- در بررسی ریزساختارها با گرید API X70 همخوانی داشت.
- آزمون کشش جهت خواص مکانیکی در فلز پایه و درزجوش مستقیم مورد آزمایش قرار گرفت که الزامات استاندارد API 5L را جهت API X70 پوشش داد که حداقل، حداکثر، میانگین، انحراف معیار و تابع چگالی برای داده‌ها محاسبه شد. طبق یافته‌ها برای فلز پایه میانگین تنش تسلیم ۵۲۳/۳ MPa با انحراف معیار ۱۳/۳ و تابع چگالی احتمال ۳٪ و میانگین سختی ۱۹۸/۷ HV10 با انحراف معیار ۱۱/۳ و تابع چگالی احتمال ۳/۵٪ به دست آمد.
- روابط تجربی برای پیش‌بینی تنش تسلیم و استحکام نهایی با توجه به سختی ارایه شد که این روابط به دست آمده منطقی است و می‌توان برای استفاده در خطوط لوله مورد استفاده قرار گیرد.
- رابطه تجربی استحکام نهایی بر حسب استحکام تسلیم ارایه شد.

تشکر و قدردانی: نویسندگان این مقاله مراتب تشکر و قدردانی خود را از آقای دکتر سیدحجت هاشمی (دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه بیرجند) به دلیل راهنمایی‌های مفید و از مدیر محترم، رییس بازرسی فنی و معاونت عملیات خطوط لوله منطقه ۲ عملیات انتقال گاز ایران بابت حمایت از این پروژه ابراز می‌نمایند.

تأییدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری (به طور کامل یا بخشی از آن) به چاپ نرسیده است. ضمناً محتویات ادبی مقاله منتج از فعالیت علمی خود نویسندگان بوده و صحت و اعتبار نتایج و متن مقاله برعهده نویسندگان مقاله است.

تعارض منافع: مقاله حاضر هیچگونه تعارض منافعی با پایان‌نامه، رساله و طرح پژوهشی ندارد.

سهم نویسندگان: حمیدرضا حاجی‌باقری (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۵٪)؛ علی حیدری (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۳۰٪)؛ رسول امینی (نویسنده سوم)، پژوهشگر کمکی (۱۵٪)

منابع مالی: منابع مالی این تحقیق از شرکت انتقال گاز ایران تامین شده است.

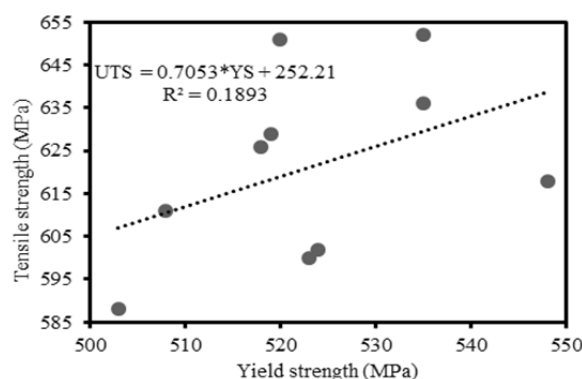
منابع

- Leighty W, Holloway J, Merer R, Somerday B, San Marchi C, Keith G, et al. Compressorless hydrogen

۳-۸- رابطه بین استحکام نهایی و استحکام تسلیم

در این تحقیق روابط بین سختی و تنش تسلیم و نهایی استخراج شد که یک رابطه مشابه در جدول ۲ و ۳ استاندارد ASTM A370 است [31]. رابطه بین تنش تسلیم و تنش نهایی در آن جدول موجود نیست. در نمودار ۸، استحکام تسلیم در برابر استحکام نهایی اندازه‌گیری شده مشاهده می‌شود که میزان پراکندگی آن $R^2 = 0.1893$ است و رابطه ۱۴ بین استحکام نهایی و استحکام تسلیم استخراج می‌شود.

$$UTS = 0.7053 * YS + 252.21 \quad (14)$$



نمودار ۸) نمودار خطی بین استحکام تسلیم و استحکام نهایی فلز پایه فولاد API X70

۴- بحث

با توجه به جدول ۳، حداقل، حداکثر و متوسط استحکام تسلیم فلز پایه ۵۰۳، ۵۴۸ و ۵۲۳/۳ MPa (با انحراف معیار ۱۳/۳ ± و ۳٪ تابع چگالی احتمال) برای API X70 است. میانگین از یاد طولی فلز پایه اندازه‌گیری شده، ۲۴/۸۹ ± ۳/۶ بود و نسبت استحکام تسلیم به استحکام نهایی برای فلز پایه ۰/۸۵ ± ۰/۰۳ به دست آمد.

همان طور که انتظار می‌رفت، جوش دارای استحکام نهایی (۶۳۰/۸ MPa ± ۲۷/۹) بالاتری نسبت به فلز پایه (۶۲۱/۳ MPa ± ۲۱/۵) دارد. با تجزیه و تحلیل آماری از تمام داده‌های تجربی اندازه‌گیری شده، مقادیر با گرید X70 همخوانی دارد.

با توجه به جدول ۴، میانگین سختی جوش، منطقه ۱ متاثر از حرارت، منطقه ۲ متاثر از حرارت و فلز پایه به ترتیب ۲۰۷/۶ HV10 ± ۱۲/۸، ۱۹۶/۱ HV10 ± ۱۴/۲، ۱۹۶/۱ HV10 ± ۹/۳ و ۱۹۹/۳ HV10 ± ۱۱/۳ و تابع چگالی احتمال به ترتیب ۳/۱، ۲/۸، ۴/۳ و ۳/۵٪ به دست آمد. با تجزیه و تحلیل آماری داده‌های تمام سختی‌ها می‌توان نتیجه گرفت که میزان حد استاندارد API 5L (۳۴۵ HV10) را پوشش می‌دهد. در سختی فلز جوش بالاترین رده سختی (۲۰۷/۶ HV10) و استحکام نهایی (۶۳۰/۸ HV10) در نمودار ۵ مشاهده می‌شود و نسبت میانگین سختی فلز جوش به میانگین سختی فلز پایه، ۱۰۴٪ است. و نسبت میانگین استحکام نهایی جوش به میانگین استحکام نهایی فلز پایه ۱۰۲٪ است که سختی و استحکام نهایی در جوش نسبت به فلز پایه بیشتر است.

مقدار سختی در منطقه ۱ متاثر از حرارت (۱۹۶/۱ HV10) و در منطقه ۲ متاثر از حرارت (۱۹۹/۳ HV10) است که میانگین آنها کمی کمتر از فلز پایه (۱۹۸/۷ HV10) و در فلز جوش (۲۰۷/۶ HV10) است که این به ریزساختارهای منطقه ذوب نسبت داده می‌شود. حین جوشکاری منطقه متاثر از حرارت ذوب نمی‌شود که ریزساختارها و

- Materials Engineering and Performance. 2008;17(6):888-893.
- 17- Hwang B, Kim YM, Lee S, Kim NJ, Ahn SS. Correlation of microstructure and fracture properties of API X70 pipeline steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2005;36(3):725-739.
- 18- Hashemi SH, Mohammadyani D, Pouranvari M, Mousavizadeh SM. On the relation of microstructure and impact toughness characteristics of DSAW steel of grade API X70. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2009;32(1):33-40.
- 19- Hashemi SH, Sedghi S, Soleymani V, Mohammadyani D. CTOA levels of welded joint in API X70 pipe steel. *Engineering Fracture Mechanics*. 2012;82:46-59.
- 20- Hashemi SH. Apportion of charpy energy in API 5L grade X70 pipeline steel. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2008;85(12):879-884.
- 21- Dehghan Manshadi A, Dippenaar RJ. The behavior of precipitates during hot-deformation of low-manganese, titanium-added pipeline steels. *Metallurgical and Materials Transactions A Physical Metallurgy and Materials Science*. 2010;41(13):3291-3296.
- 22- Schambron T, Phillips AW, O'brien DM, Burg J, Pereloma EV, Killmore CC, et al. Thermomechanical processing of pipeline steels with a reduced Mn content. *ISIJ International*. 2009;49(2):284-292.
- 23- ASTM. ASTM E415-15: standard test method for analysis of carbon and low-alloy steel by spark atomic emission spectrometry [Internet]. West Conshohocken PA: ASTM International; 2015 [cited 2018 July 1]. Available from: <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/E415-15.htm>
- 24- ASTM. ASTM E3-11: Standard guide for preparation of metallographic specimens [Internet]. West Conshohocken PA: ASTM International; 2011 [cited 2018 July 1]. Available from: <https://wenku.baidu.com/view/b7ac1006a6c30c2259019eb2.html>
- 25- ASTM. ASTM E407-07: Standard practice for microetching metals and alloys [Internet]. West Conshohocken PA: ASTM International; 2015 [cited 2018 July 1]. Available from: <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/E407-07R15.htm>
- 26- ASTM. ASTM E92-82: Standard test method for vickers hardness of metallic materials [Internet]. West Conshohocken PA: ASTM International; 2003 [cited 2018 July 1]. Available from: <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/E92-82R03.htm>
- 27- ASTM. ASTM E23: Standard test method for notched bar impact testing of metallic materials -- E-Learning Course [Internet]. West Conshohocken PA: ASTM International; 2009 [cited 2018 July 1]. Available from: <https://www.astm.org/TRAIN/filtrex40.cgi?+P+ID+224+traindetail.frm>
- 28- Mohtadi Bonab M, Eskandari M, Karimdadashi R, Szpunar JA. Effect of different microstructural parameters on hydrogen induced cracking in an API X70 pipeline steel. *Metals and Materials International*. 2017;23(4):726-735.
- 29- Zhang X, Gao H. A study of impact toughness of intercritically reheated coarse-grain heat affected zone of two type X80 grade pipeline steel. *WSE2011*. 2011:101-104.
- 30- Du Pont JN, Michael JR, Newbury BD. Welding transmission pipelines deliver large-scale stranded renewable energy at competitive cost. 16th World Hydrogen Energy Conference (WHEC 16), Lyon, France, 13-16 June 2006. Lyon: WHEC 16; 2006.
- 2- Han Y, Shi J, Xu L, Cao WQ, Dong H. Effects of Ti addition and reheating quenching on grain refinement and mechanical properties in low carbon medium manganese martensitic steel. *Materials & Design*. 2012;34:427-434.
- 3- Hajibagheri HR, Heidari A, Amini R. An experimental investigation of the nature of longitudinal cracks in oil and gas transmission pipelines. *Journal of Alloys and Compounds*. 2018;741:1121-1129.
- 4- Verlinden B, Driver J, Samajdar I, Doherty RD. Thermo-mechanical processing of metallic materials. 11th Volume. Amsterdam: Elsevier; 2007.
- 5- Rakhsh Khorshid M, Hashemi SH, Monajatizadeh H. The use of hot torsion testing for determination of critical temperatures of API X65 steel. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;14(13):291-296. [Persian]
- 6- Gladman T. The physical metallurgy of microalloyed steels. 615th Volume. Michigan: Institute of Materials; 1997.
- 7- Calvo J, Collins L, Yue S. Design of microalloyed steel hot rolling schedules by torsion testing: Average schedule vs. real schedule. *ISIJ International*. 2010;50(8):1193-1199.
- 8- Calvo J, Jung IH, Elwazri AM, Bai D, Yue S. Influence of the chemical composition on transformation behaviour of low carbon microalloyed steels. *Materials Science and Engineering A*. 2009;520(1-2):90-96.
- 9- American Petroleum Institute. API 5L-14, Standard specification for line pipe [Internet]. Washington DC: The American Petroleum Institute; 2014 [cited 2018 July 1]. Available from: <http://nimaazmoon.com/download/api/API-5L-2013.pdf>
- 10- Rakhsh Khorshid M, Hashemi SH. Investigation of cooling rate on continuous cooling transformation behavior of API X65 pipeline steel. *Modares Mechanical Engineering*. 2013;13(8):57-67. [Persian]
- 11- Reip CP, Shanmugam S, Misra RDK. High strength microalloyed CMn (V-Nb-Ti) and CMn (V-Nb) pipeline steels processed through CSP thin-slab technology: Microstructure, precipitation and mechanical properties. *Materials Science and Engineering A*. 2006;424(1-2):307-317.
- 12- Kiefner JF, Trench CJ. Oil pipeline characteristics and risk factors: Illustrations from the decade of construction [Internet]. Washington D C: American Petroleum Institute; 2001 [cited 2018 July 1]. Available from: <https://www.api.org/~media/Files/Oil-and-Natural-Gas/PPTS/Other-Files/decadefinal.pdf>
- 13- Sharma SK, Maheshwari S. A review on welding of high strength oil and gas pipeline steels. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2017;38:203-217.
- 14- Zhu Z, Kuzmikova L, Li H, Barbaro F. The effect of chemical composition on microstructure and properties of intercritically reheated coarse-grained heat-affected zone in X70 steels. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2014;45(1):229-235.
- 15- Hashemi SH. Strength-hardness statistical correlation in API X65 steel. *Materials Science and Engineering A*. 2011;528(3):1648-1655.
- 16- Pavlina EJ, Van Tyne CJ. Correlation of yield strength and tensile strength with hardness for steels. *Journal of*

International Organization for Standardization; 2005 [cited 2018 July 1]. Available from: <https://www.iso.org/standard/37746.html>

34- Birch K. Measurement good practice No. 36: Estimating uncertainties in testing, an intermediate guide to estimating and reporting uncertainty of measurement in testing [Internet]. Teddington: British Measurement and Testing Association; 2003 [cited 2018 July 1]. Available from: <https://www.sicyon.com/resources/library/pdf/GPG36.pdf>

metallurgy of alloy HR-160. INIS. 1999;30(41):30047132.

31- ASTM. ASTM A370-17a: Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products [Internet]. West Conshohocken PA: ASTM International; 2017 [cited 2018 July 1]. Available from: <https://www.astm.org/Standards/A370>

32- Budynas RG, Keith Nisbett J. Shigley's mechanical engineering design. New York City: Mc Graw-Hill; 2008.

33- ISO. ISO 6507-1: Metallic materials -- vickers hardness test -- part 1: Test method [Internet]. Geneva: