

Application of Image Processing to Study Fracture Surface of API X70 Steel Under Charpy Impact Test

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Samadieh Labbaf H.¹,
Hashemi S. H.^{2*}

How to cite this article

Samadieh Labbaf H, Hashemi S H. Application of image processing to study fracture surface of API X70 steel under Charpy impact test. Modares Mechanical Engineering. 2022;22(11):677-686.

¹ Mechanical Engineering Department, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.
shhashemi@birjand.ac.ir

Article History

Received: May 17, 2022

Accepted: August 10, 2022

ePublished: November 05, 2022

ABSTRACT

The Charpy impact test is an experimental method for determining a material's dynamic properties at different temperatures to investigate tested materials' ductile to brittle transition behavior. The percentages of ductile and brittle fractures can be evaluated based on the fracture area of Charpy specimen (according to API E23 standard) by visual techniques, which do not provide exact percentages of these fractures. In this study, a method is proposed to calculate the exact percentage of ductile fractures using image processing, which makes it possible to quantitatively examine different parts of the fracture surface with high accuracy. All steps of image processing are described for eleven Charpy standard specimens of API X70 steel, tested at temperatures between +20 to -80 °C with a temperature increment of 10 °C. In this research, converting a qualitative image of a fracture surface to a quantitative matrix is described for the first time. Prediction of the shape of ductile and brittle parts of the fracture surface at temperatures between +20 and -80 °C is one of the results of this study. The percentages of ductile fractures using image processing for temperatures of +20, 0, -20, -40, -60 and -80 °C were obtained as 100, 100, 86, 53, 36 and 0, respectively. The transition temperature was -45 °C for this steel, corresponding to 50% ductile fracture.

Keywords Charpy Impact Test, API X70 Steel, Image Processing, Ductile and Brittle Fracture Surface.

CITATION LINKS

1- Thermo-Mechanical Processing of Metallic Materials. 2- Irradiation effect on impact fracture behavior of A508-3 steel in ductile-to-brittle transition range. 3- Ductile to brittle transition of an A508 steel characterized by Charpy impact test: Part II: modeling of the Charpy transition curve. 4- On the relation of microstructure and impact toughness characteristics of DSAW steel of grade API X70. 5- Fracture toughness analysis in transition temperature region of API X70 pipeline steels. 6- Analysis of fracture toughness in the transition temperature region of API X70 pipeline steels rolled in two-phase region. 7- Apportion of Charpy energy in API 5L grade X70 pipeline steel. 8- Influences of titanium and manganese on high strength low alloy SAW weld metal properties. 9- Design based on ductile-brittle transition temperature for API 5L X65 steel used for dense CO2 transport. 10- Role of constraint on ductile brittle transition temperature of pipe steel X65. 11- Impact characterization of line pipe steels by means of standard, sub-size and miniaturized Charpy specimens. 12- Fractographic Analysis of Welded Joint Surfaces. 13- Two step ductile to brittle transition behavior on ferrite+ pearlite structure steel sheet. 14- Influence of stress concentrator shape and testing temperature on impact bending fracture of 17Mn1Si pipe steel. 15- Fracture appearance of steels in transition: experimental observations and measurements. 16- A New Fracture Analysis Technique for Charpy Impact Test Using Image Processing. 17- Prediction of density and sulfur content level of high-sulfur coal based on image processing. 18- A novel system developed based on image processing techniques for dynamical measurement of tire-surface contact area. 19- Egg volume estimation based on image processing and computer vision. 20- API Specifications 5L, Specifications for line pipe. 21- ASTM E23, Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. 22- Comparison of fracture area of drop weight tear test and Charpy specimen ... 23- Mechanical Properties of Thermally Aged Cast Stainless Steels ...

کاربرد پردازش تصویر برای بررسی سطح شکست فولاد API X70 در آزمایش ضربه شاری

حسین صمدیه لباف^۱، سید حجت هاشمی^{۱*}

^۱ مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

چکیده

آزمایش ضربه شاری یک روش تجربی برای بررسی رفتار شکست دینامیکی مواد و مصالح مهندسی است که در دماهای مختلف بمنظور بررسی رفتار انتقال نرم به ترد مواد انجام می‌شود. محاسبه درصد شکست نرم و ترد سطح شکست نمونه شاری با استفاده از روش‌های چشمی و مقایسه‌ای (طبق استاندارد ASTM E23) انجام می‌شود که مقادیر دقیق شکست نرم و ترد را گزارش نمی‌کند. در این تحقیق، روشی برای محاسبه میزان دقیق درصد شکست نرم با استفاده از پردازش تصویر ارائه شده است که امکان بررسی قسمت‌های مختلف سطح شکست را به صورت کمی با دقت بالا فراهم می‌کند. مراحل پردازش تصویر برای سطح شکست یازده نمونه استاندارد شاری از فولاد API X70 آزمایش شده در دمای ۲۰+ تا ۸۰- درجه سلسیوس و با فاصله دمایی ده درجه شرح داده می‌شود. در این تحقیق برای اولین بار تبدیل تصویر کیفی سطح شکست شاری به یک ماتریس کمی از مقدار درصد شکست ترد انجام شده است. تصاویر سطح شکست در یک قالب یکسان، شبکه‌بندی شده و هر تصویر با بیان یک ماتریس، کمی‌سازی می‌شود. امکان پیش‌بینی شکل قسمت‌های نرم و ترد سطح شکست، بین دماهای ۲۰+ تا ۸۰- درجه سلسیوس که داده تجربی از آن موجود نیست، از نتایج این تحقیق است. مقدار شکست نرم با استفاده از پردازش تصویر برای دماهای ۲۰+، ۰، ۲۰-، ۴۰-، ۶۰- و ۸۰- درجه سلسیوس به ترتیب ۱۰۰، ۱۰۰، ۸۶، ۵۳، ۳۶ و ۰ درصد گزارش شده است. دمای انتقال برای فولاد آزمایش شده منطبق با شکست نرم ۵۰ درصد، ۴۵- درجه سلسیوس بدست آمد.

کلیدواژه‌ها: آزمایش ضربه شاری، فولاد API X70، پردازش تصویر، سطح شکست نرم و ترد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۱۹

* نویسنده مسئول: shhashemi@birjand.ac.ir

۱- مقدمه

گاز طبیعی یکی از منابع مهم انرژی در جهان برای مصارف صنعتی و خانگی به شمار می‌رود. با صرفه‌ترین روش جهت انتقال گاز طبیعی از محل تولید به بازار مصرف در حجم بالا، استفاده از لوله‌های قطور فولادی است. تا قبل از دهه ۱۹۷۰ این لوله‌ها با استفاده از فولادهای نورد گرم و نرمالیزه شده و پس از آن با استفاده از روش‌های کنترل ترمومکانیکال (Thermo-Mechanical Control Process (TMCP ساخته شده‌اند^[۱]. لوله API X70 یکی از پرکاربردترین لوله‌ها در صنعت نفت و گاز ایران است. اهمیت شکست ترد و همین‌طور بررسی و شناخت رفتار انتقال این فولاد برای اولین بار در ایران، در این تحقیق گزارش شده است.

آزمایش ضربه شاری برای تعیین خواص چقرمگی شکست مواد به کار می‌رود. در این آزمایش مقدار انرژی جذب شده حین فرایند شکست برای نمونه شاری اندازه‌گیری می‌شود. می‌توان با تغییر مقدار دمای نمونه‌های آزمایش، مقدار انرژی شکست نمونه‌ها را برای هر دما محاسبه نمود. به علاوه می‌توان مقدار شکست ترد و نرم در دماهای مختلف را برای هر ماده گزارش کرد^[۲،۳].

الگوی گسترش شکست، ظاهر سطح شکست و سرعت رشد ترک به مقدار چقرمگی فولاد بستگی دارد. اگر لوله دارای چقرمگی مناسب باشد، فرایند شکست در آن کنترل شده و به سرعت متوقف خواهد شد^[۴]. به همین منظور آزمایش ضربه شاری برای تعیین مقدار چقرمگی مواد و تعیین درصد شکست نرم از سطح شکست از اهمیت بالایی برخوردار است.

شین و همکاران^[۵] چقرمگی شکست در ناحیه دمای انتقال برای دو نوع فولاد API X70 با فرایند نورد ترمومکانیکال متفاوت را بررسی کردند. آن‌ها در تحقیق دیگری ارتباط ریزساختار و مشخصات ضربه شاری فولادهای API X70 و API X80 با ساختار آلیاژی متفاوت و شرایط نورد گرم مختلف، را در محدوده دمایی ۲۰+ تا ۱۹۶- درجه سلسیوس بررسی کردند^[۶]. هاشمی^[۷] انرژی شکست شاری فولاد API X70 توسط آزمایش ضربه شاری مجهز شده برای فولاد پایه، ناحیه‌ی جوش و ناحیه‌ی متأثر از حرارت در دمای محیط گزارش کرده است. در این تحقیق به کمک نتایج آزمایش شاری مجهز شده انرژی‌های شروع و رشد ترک برای هر ناحیه از فولاد محاسبه شده است. بیدختی و همکارانش^[۸] تأثیر تیتانیوم و منگنز را بر استحکام فلز جوش در جوش کاری SAW بر نمونه‌های شاری از فولاد API X70 در دو دمای ۱۰- و ۳۰- درجه سلسیوس مطالعه کردند. هاشمی و همکارانش^[۴] در تحقیقی سه نمونه شاری از فولاد API X70 از نواحی فولاد پایه، ناحیه‌ی جوش و ناحیه‌ی متأثر از حرارت را در دمای اتاق آزمایش کردند. بیشترین انرژی شکست مربوط به فلز پایه و کمترین انرژی مربوط به فلز جوش گزارش شد. در بررسی میکروسکوپی به دلیل سختی بیشتر در ناحیه جوش، فلز جوش تعداد حفره بیشتر و کوچک‌تر از خود نشان داد. کپلی و همکاران^[۹] تحقیقی پیرامون دمای انتقال فولاد API X65 مورد استفاده در انتقال گاز CO2 با استفاده از نمونه‌های شاری در دمای ۲۰+ تا ۱۹۶- درجه سلسیوس انجام داده‌اند. در این تحقیق با محاسبه دمای انتقال ۹۴- درجه سلسیوس و به دلیل کمتر بودن از مقدار ۸۰- درجه سلسیوس، لوله در محدوده ایمن کاری قرار دارد. پلاوینیچ^[۱۰] و همکاران اثر شیارهای مختلف نمونه شاری را بر دمای انتقال فولاد API X65 بررسی کرده‌اند. لوکان و همکاران^[۱۱] به ارزیابی مشخصات شکست نمونه‌های شاری فولاد گرید API در قالب یک گزارش علمی پرداختند. نمونه‌های با اندازه استاندارد و کوچک‌تر از آن در یک گستره دمایی برای آزمایش شاری انتخاب شده‌اند. در این تحقیق مقادیر انرژی شاری و درصد شکست

یازده نمونه شاری از فولاد API X70 در دماهای ۲۰+ تا ۸۰- درجه سلسیوس (با فاصله دمایی ده درجه) مورد بررسی قرار می‌گیرد. تصویربرداری ماکروسکوپی و پردازش تصویر روی آن امکان تفکیک قسمت‌های نرم و ترد را فراهم می‌کند. امکان شبکه‌بندی و کمی‌سازی سطح شکست نرم و ترد و همین‌طور پیش‌بینی سطح شکست ترد در یک دمای خاص، برای اولین بار در این تحقیق گزارش می‌شود.

۲- معرفی ماده مورد آزمایش و روش تحقیق

ماده استفاده شده در این تحقیق لوله فولادی از جنس API X70 است. قطر خارجی لوله ۱۴۲۲ میلی‌متر و ضخامت آن ۱۹/۸ میلی‌متر است. این لوله به وسیله جوشکاری زیر پودری و به روش ماریپیج تولید شده است. فولاد API X70 تولید شرکت پوسکو (POSCO) کره جنوبی است. لوله ساخته شده از این فولاد ساخته شرکت لوله و تجهیزات سدید است.

این فولاد، یک فولاد کم آلیاژ پر استحکام (High Strength Low Alloy (HSLA)) می‌باشد. این فولادها توسط عملیات ترمومکانیکی که شامل نورد کنترل شده و سرد کردن سریع است، ساخته می‌شوند. ریز ساختار فولاد استفاده شده در این تحقیق دارای دانه‌های بسیار ریز از فریت و بینیت سوزنی است. ریزدانه‌های موجود در فلز پایه حاصل فرایند ترمومکانیکال است. میانگین اندازه دانه‌های فریتی $3 - 7 \mu m$ است. آخال‌های موجود در ریز ساختار این فولاد تقریباً کروی هستند [4].

۲-۱- مشخصات مکانیکی و شیمیایی فولاد

در فرایند تولید فولاد عناصر آلیاژی را نمی‌توان به مقدار زیاد آن اضافه کرد، زیرا افزایش عناصر آلیاژی باعث کاهش قابلیت جوشکاری فولاد می‌شود. در ترکیب آلیاژی فولاد مقدار کربن در فولاد پایین نگه داشته می‌شود و فقط منگنز بیشتری در ترکیب آن اضافه می‌شود تا چقرمگی فولاد بهبود یابد. مقدار درصد وزنی کربن و کربن معادل (Ce) فولاد مورد آزمایش در این تحقیق به ترتیب ۰/۰۵ و ۰/۳۲ است [4]. مطابق استاندارد API 5L برای این فولاد، حداکثر مقدار درصد وزنی کربن و کربن معادل (Ce) به ترتیب ۰/۲۴ و ۰/۴۳ تعیین شده است [20].

محدوده مشخصات مکانیکی مجاز تعریف شده برای فولاد API X70 طبق استاندارد API 5L 2007 در جدول ۱ آمده است. مشخصات مکانیکی فولاد API X70 که در این تحقیق بررسی می‌شود، در دو جهت محیطی و طولی مطابق جدول ۲ است.

جدول ۱) مشخصات مکانیکی مجاز فولاد API X70 مطابق استاندارد [20].

حداکثر تنش	حداکثر تنش	حداکثر تنش	حداکثر تنش	گراید فولاد
نهایی (MPa)	نهایی (MPa)	تسلیم (MPa)	تسلیم (MPa)	
۷۵۸	۵۶۵	۶۲۱	۴۸۳	API X70 steel

برشی و انبساط جانبی در هر دما برای نمونه‌ها گزارش شده است. مکسوتی [12] به بررسی شکست نمونه‌های استاندارد شاری ساخته شده از لوله API X65 با قطر ۸۱۳ میلی‌متر و ضخامت ۱۲ میلی‌متر در نواحی فلز جوش، متأثر از حرارت و فلز پایه در سه دمای ۲۰+، ۰ و ۲۰- درجه سلسیوس پرداخته است. در این تحقیق مقادیر درصد شکست نرم و انبساط جانبی برای هر نمونه گزارش شده است. کاواتا و اومزاو [13] رفتار انتقال تردی به نرمی صفحه فولادی دو فاز فریت-پرلیت را به کمک نمونه‌های شاری بررسی کردند. در این تحقیق دمای انتقال که همراه با افت زیاد انرژی شاری است، بین دماهای ۸۰- و ۱۰۰- درجه سلسیوس گزارش شده است. همین‌طور نمای ماکروسکوپی نمونه‌ها و مقدار درصد شکست ترد در هر دما بررسی شده است. پانین و همکاران [14] اثر تغییرات دما و نوع شیار را بر شکست نمونه شاری فولاد 17Mn1Si بررسی کردند. در این تحقیق برای سه نوع شیار U و V و I بر روی نمونه استاندارد شاری در دماهای ۶۰-، ۴۰-، ۲۰-، ۰ و ۲۰+ درجه سلسیوس، آزمایش شاری انجام شد. همین‌طور نمای ماکروسکوپی و میکروسکوپی از سطح شکست نمونه‌ها به صورت کیفی برای هر نمونه بررسی شده است. مکوان و همکاران [15] به بررسی ظاهر شکست در ناحیه انتقال چند نوع فولاد پرداختند. آن‌ها با انتخاب چند نوع فولاد و انجام آزمایش ضربه شاری مجهز شده بر روی آن‌ها، نمودار نیرو-جابجایی و درصد شکست نرم برای هر دما را گزارش کرده‌اند. پردازش تصویر کاربردهای فراوان در علوم گوناگون برای مقاصد مختلف پیدا کرده است. پارک و همکاران [16] به بررسی نحوه محاسبه درصد شکست نرم نمونه شاری پرداخته‌اند. آن‌ها از طریق پردازش تصویر یک روش خودکار برای محاسبه درصد شکست نرم ارائه نموده‌اند. زیو و دنگ‌یانگ [17] در تحقیقی مقدار چگالی زغال‌سنگ و همین‌طور مقدار گوگرد آن را به کمک روش پردازش تصویر پیش‌بینی کردند. این دو مقدار در کیفیت زغال‌سنگ تأثیر به سزایی دارد. آن‌ها در این تحقیق ۴۲ نوع رنگ و محتوای بافتی از تصاویر زغال‌سنگ را استخراج کردند. به کمک ارایه یک مدل حاصل از پردازش تصویر، چگالی زغال‌سنگ و مقدار گوگرد آن پیش‌بینی شده است. درفشپور و همکاران [18] سطح تماس یک تایلر ماشین با سطح جاده در حال حرکت دینامیکی را بررسی نمودند. آن‌ها با قرار دادن تایلر ماشین در یک جعبه شیشه‌ای و پاشش رنگ سفید در ناحیه تماس تایلر با سطح، از ناحیه تماس فیلم‌برداری کردند. در این تحقیق از پردازش تصویر عکس‌های گرفته شده برای بررسی ناحیه تماس تایلر با جاده استفاده شده است. آکیندا و همکاران [19] به کمک پردازش تصویر، حجم تخم‌مرغ‌های خط تولید را پیش‌بینی کردند. آن‌ها به کمک پردازش تصویر توانستند تخم‌مرغ‌های تولید را از نظر حجمی تقسیم‌بندی و جداسازی کنند. این تحقیق نقش مهمی در کیفیت و سرعت خط تولید ایفا کرد. در تحقیق حاضر سطح شکست

جدول ۲) مشخصات مکانیکی فولاد API X70 [4].

X70 API	E (GPa)	YS (MPa)	TS (MPa)	YS/TS	Elongation in 50mm
محیطی	۱۹۱	۵۲۸	۶۰۳	۰/۸۸	۱۶/۴
طولی	۲۲۲	۵۷۰	۶۱۹	۰/۹۲	۱۳/۸

۲-۲- ساخت نمونه و انجام آزمایش شارپی

برای تعیین خواص شکست فولاد API X70 و انجام آزمایش شارپی، نمونه‌های استاندارد شارپی از لوله فولادی استخراج می‌شود. در این تحقیق از نمونه استاندارد آزمایش شارپی مطابق شکل ۱ استفاده شده است.

نمونه‌ها در راستای محیطی و با شیار در جهت طولی از لوله مطابق شکل ۲ استخراج شده است [22]. آزمایش ضربه شارپی توسط ماشین ضربه با ظرفیت ۷۵۰ ژول (در آزمایشگاه کنترل کیفیت شرکت لوله سازی اهواز) انجام شد. سرعت پاندول این ماشین حین اصابت با نمونه آزمایشگاهی ۵/۵ متر بر ثانیه است. جهت کنترل دمای نمونه‌ها از سردکننده با محیط سرد الکل و نمایشگر دمای دیجیتال با دقت ۰/۱ درجه سلسیوس استفاده شده است.

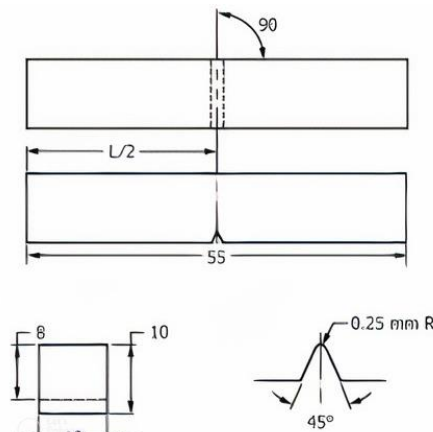
طبق استاندارد ASTM E23 برای محیط سرد با واسط مایع نمونه‌ها باید ۵ دقیقه (یا به ازای هر میلی متر ضخامت ۳۰ ثانیه) در محفظه سرد کننده قرار گیرد تا با محیط کاملاً هم دما شود. همچنین مدت زمان قرار دادن نمونه از محیط سرد تا ماشین ضربه حداکثر ۵ ثانیه است. در این تحقیق نمونه‌ها در دمای ۲۰+ تا ۸۰- درجه سلسیوس با فاصله ده درجه مورد آزمایش قرار گرفته است. در هر دما سه نمونه شارپی، آزمایش می‌شود. به این ترتیب در مجموع ۳۳ نمونه در این تحقیق آزمایش شده‌اند.

۳- تصویربرداری ماکروسکوپی

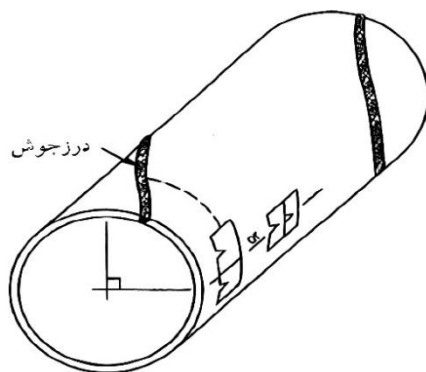
نمونه‌های استاندارد شارپی در دمای ۲۰+ تا ۸۰- درجه سلسیوس و با فاصله دمایی ده درجه در دستگاه ضربه شارپی آزمایش شده‌اند. نمونه‌ها تا دمای ۶۰- درجه سلسیوس پس از قرار گرفتن داخل دستگاه ضربه شارپی و انجام آزمایش، به دو قسمت جدا تقسیم نشده‌اند. برای جدا کردن دو قسمت شکسته شده از هم، نمونه‌ها درون نیتروژن مایع قرار می‌گیرند و با یک ضربه آرام کامل از هم جدا می‌شوند. نتایج انرژی شکست شارپی نمونه‌های شارپی در جدول ۳ گزارش شده است.

در این تحقیق در هر دما سه آزمایش انجام شده است. برای انتخاب نمونه مناسب برای تصویربرداری، نمونه‌ای که میزان انرژی شکست آن به میانگین انرژی شکست سه نمونه نزدیک‌تر باشد، انتخاب شده است. به دلیل تعداد بالای نمونه‌ها و لزوم جداسازی آن‌ها برای تصویربرداری از روش حک لیزر برای شماره گذاری نمونه‌ها استفاده شده است. این شماره گذاری در سطح جانبی نمونه‌ها و توسط دستگاه حک لیزر انجام می‌شود. از

مزایای این روش می‌توان به امکان شماره گذاری در ابعاد کوچک و از بین رفتن آن حین تماس فیزیکی اشاره کرد.



شکل ۱) اندازه نمونه‌ی استاندارد شارپی مورد استفاده در این تحقیق [21]



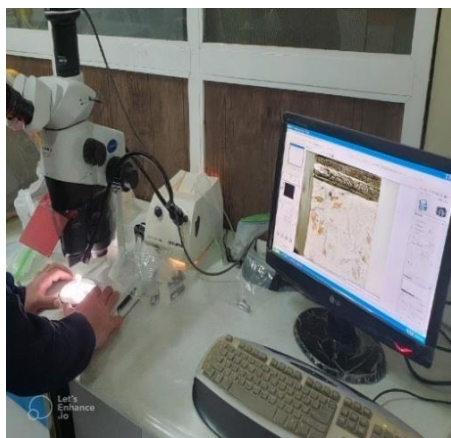
شکل ۲) موقعیت استخراج نمونه‌های استاندارد شارپی از لوله API X70 با درز جوش مارپیچ [22]

جدول ۳) نتایج انرژی شکست نمونه‌های شارپی این تحقیق برای هر دما [22].

انرژی شکست شارپی (ژول)	دما (درجه سلسیوس)	انرژی شکست شارپی (ژول)	دما (درجه سلسیوس)	انرژی شکست شارپی (ژول)	دما (درجه سلسیوس)	انرژی شکست شارپی (ژول)	دما (درجه سلسیوس)
۲۴۶	-۴۰	۲۷۹	-۴۰	۲۴۶	+۲۰	۲۷۹	+۲۰
۲۰۲	-۵۰	۲۹۷	-۵۰	۲۰۲	+۱۰	۲۹۷	+۱۰
۲۱۳	-۶۰	۲۸۹	-۶۰	۲۱۳	۰	۲۸۹	۰
۱۹۸	-۷۰	۲۸۰	-۷۰	۱۹۸	-۱۰	۲۸۰	-۱۰
۶	-۸۰	۲۵۷	-۸۰	۶	-۲۰	۲۵۷	-۲۰
۲۶۰		۲۶۰		۲۶۰	-۳۰	۲۶۰	-۳۰

برای بررسی سطح شکست نمونه‌ها به صورت ماکروسکوپی و تحلیل دقیق سطح شکست به صورت کمی، تصویربرداری دیجیتالی از سطح شکست نمونه‌ها انجام می‌شود. این تصویربرداری باید با کیفیت و دقت بالا انجام شود تا زمینه برای بررسی دقیق و کمی سطوح حاصل شود. میزان شدت نور در تصویربرداری برای همه

کاربری از پیش تعریف شده در این نرم افزار امکان پردازش تصویر را میسر می کند.



شکل ۳) اتصال میکروسکوپ به کامپیوتر و نمایش نرم افزار اختصاصی میکروسکوپ



شکل ۴) تصویر سطح دو قسمت شکسته شده در دمای ۲۰+ درجه سلسیوس

۳-۱-۲- فیلتراسیون بای لترال (Bilateral)

برای تغییرات یک تصویر به حالت مطلوب از فیلترها استفاده می شود. عملیات فیلتراسیون روی یک تصویر باعث تغییر در مدل آر جی بی پیکسل های تصویر و رسیدن به حالت مطلوب می شود. فیلتر بای لترال برای نزدیک کردن شدت نور پیکسل های همسایه به همدیگر و در نهایت یکنواخت تر شدن تصویر استفاده می شود. مات شدن تصویر و همگرایی بیشتر پیکسل های تصویر به همدیگر نتیجه اعمال این فیلتر است. نرم افزار برنامه نویسی پایتون (Python) امکان برنامه نویسی برای پردازش تصویر را فراهم می کند. در این نرم افزار با کدنویسی و استفاده از کتابخانه آن می توان این فیلتر را روی تصاویر اعمال نمود.

۳-۱-۳- فیلتراسیون محدوده (Range filter)

برای جداسازی مرز نواحی مختلف تصویر از همدیگر استفاده می شود. به طوری که با اعمال این فیلتر در نرم افزار دیجیمایزر (Digimizer) می توان قسمت های مختلف را از هم تفکیک کرد. این قسمت ها شامل مرز ناحیه دور سطح شکست و جداسازی مرز ناحیه شکست ترد و نرم است. با اعمال این فیلتر بر روی تصویر قسمت هایی که به صورت نقطه نقطه ظاهر می شوند، سطح شکست ترد را نشان می دهند که از سطح شکست نرم تفکیک داده می شود.

نمونه ها به صورت یکسان است تا شرایط برای مقایسه بین نمونه ها در شرایط یکسان تصویربرداری فراهم شود.

در این تحقیق برای تصویربرداری ماکروسکوپیک از سطح شکست از میکروسکوپ Olympus SZX16 ساخت ژاپن استفاده شده است. این میکروسکوپ قابلیت تصویربرداری از نمونه ها به صورت ماکروسکوپیک با کیفیت و دقت بالا را فراهم می کند. لنز مورد استفاده در این میکروسکوپ Olympus U-TV0.63X است. دو چراغ نوری برای نوردهی به سطح نمونه وجود دارد که برای یکسان بودن شرایط نور، موقعیت مکانی این چراغ ها در همه تصویربرداری ها ثابت در نظر گرفته شده است. این میکروسکوپ به کمک نرم افزار مخصوص خود به کامپیوتر متصل است که امکان مشاهده و ذخیره سازی تصویرها را فراهم می کند. با جابجایی اهرم های میکروسکوپ امکان جابجایی لنز و تنظیم فوکوس دستگاه میسر می شود (شکل ۳).

برای کالیبره کردن اندازه تصویرها باید میزان مقیاس بزرگنمایی در میکروسکوپ را در نرم افزار کامپیوتری وارد نمود. این کار به کمک عدد خوانده شده از روی اهرم تنظیم بزرگنمایی میکروسکوپ انجام می شود. مقدار بزرگنمایی خوانده شده از روی میکروسکوپ را در نرم افزار کامپیوتری در قسمت مقیاس وارد می شود تا اندازه تصویرها کاملاً کالیبره شده باشد. با کالیبره کردن تصویرها امکان اندازه گیری طول و مساحت از تصاویر سطوح شکست و مقایسه آن ها فراهم می شود.

تصاویر از دو طرف سطح شکست نمونه های شاری گرفته می شود. به این ترتیب برای هر نمونه در یک دمای خاص دو تصویر ماکرو (شکل ۴) توسط میکروسکوپ گرفته می شود. در انتها تصاویر نام گذاری و ذخیره سازی می شود.

۳-۱-۳- پردازش تصویر

۳-۱-۱- مدل رنگ آر جی بی (RGB)

برای معرفی و نمایش یک تصویر رنگی به کار گرفته می شود. در این مدل، تمام رنگ ها از ترکیب سه رنگ تشکیل می شود. این سه رنگ عبارت هستند از قرمز (RED) سبز (GREEN) آبی (BLUE) که به آن آر جی بی (RGB) اطلاق می شود. با ترکیب رنگ های یاد شده که به آن ها ابتدایی (Primary) می گویند، رنگ های دیگر یا ثانویه (Secondary) ایجاد می شود. در این مدل به هر رنگ از عدد ۰ تا ۲۵۵ مقدار داده می شود. به طوریکه سه عدد ۰ نمایش رنگ سیاه و سه عدد ۲۵۵ نمایش رنگ سفید است. بقیه رنگ ها از تغییر مقدار این سه عدد حاصل می شود.

برای پردازش تصویرهای دیجیتالی از سطوح شکست، نرم افزارهای متعددی وجود دارد که هر کدام ویژگی ها و مزایای مخصوص به خود دارد. نرم افزار تصویر جی (ImageJ) یک نرم افزار تخصصی برای پردازش تصویر در علوم مختلف است. رابط های

انتخاب شده، تصویر به یک تصویر سیاه و سفید (صفر و یک) تبدیل می‌شود.

۳-۲- مراحل پردازش تصویر

برای پردازش تصاویر سطح شکست، تصویر گرفته شده توسط میکروسکوپ وارد نرم‌افزار پایتون شده و از فیلتر بای‌لترال عبور کرده سپس خروجی آن وارد نرم‌افزار دیجیمایزر می‌شود. در دیجیمایزر ابتدا تبدیل به تصویر خاکستری شده و در ادامه از فیلتر محدوده گذرانده می‌شود. سطوح شکست ترد به صورت نقطه نقطه نمایان می‌شود که امکان تفکیک آن از سطوح شکست نرم حاصل می‌شود. با حذف خطوط شکست نرم از تصویر، می‌توان تصویری بدست آورد که فقط سطح‌های شکست ترد در آن نمایان است. با وارد کردن این تصویر به نرم‌افزار تصویر جی و انجام عملگر باینری می‌توان یک تصویر باینری از سطح شکست ترد و نرم بدست آورد. با اندازه‌گیری تعداد پیکسل‌های سطح شکست ترد، مقدار شکست ترد محاسبه می‌شود. مساحت کل سطح شکست هم به کمک ابزار اندازه‌گیری در نرم‌افزار تصویر جی قابل اندازه‌گیری است. از اختلاف کل سطح و سطح شکست ترد، مقدار شکست نرم بدست می‌آید. از تقسیم مقدار شکست نرم به کل سطح شکست، درصد شکست نرم گزارش می‌شود.

۴- بحث و بررسی نتایج

جدول ۴ نتایج تصویربرداری و مراحل پردازش تصاویر برای پنج نمونه آزمایش شده در دماهای ۰، -۲۰، -۴۰، -۶۰ و -۸۰ درجه سلسیوس را به صورت نمای گرافیکی نشان می‌دهد. نتایج کمی

۳-۱-۴- عملگر تصویر خاکستری (Grey image)

هر پیکسل از یک تصویر رنگی شامل سه رنگ قرمز و سبز و آبی (مدل آر جی بی) است. که میزان شدت نور از ۰ تا ۲۵۵ در هر سه رنگ می‌تواند تغییر کند. از میانگین این سه عدد، عددی حاصل می‌شود که اگر برای هر پیکسل جایگزین آن سه مقدار شود، تمامی پیکسل‌های تصویر فقط مقدار ۰ تا ۲۵۵ می‌گیرند. این عمل بر روی تصویر را خاکستری کردن تصویر گفته می‌شود. تصویر حاصل شده دارای پیکسل‌هایی از مقدار ۰ تا ۲۵۵ است که امکان مقایسه پیکسل‌ها با همدیگر را میسر می‌کند.

۳-۱-۵- تصویر ماسک شده (Mask image)

با جدا کردن یک رمز خاص بسته از تصویر اصلی، و تغییر مقدار شدت نور به آن صفر (سیاه) تصویری حاصل می‌شود که به آن تصویر ماسک شده گفته می‌شود. در این تحقیق با جدا سازی رمز کل سطح شکست نمونه شارپی از یک تصویر کلی یک ماسک شده حاصل می‌شود.

۳-۱-۶- عملگر تصویر باینری (Threshold یا Binary image)

برای انتخاب و جداسازی پیکسل‌هایی از تصویر که میزان شدت نور در یک محدوده خاص دارند، از عملگر تصویر باینری استفاده می‌شود. بعد از خاکستری کردن تصویر، تمامی پیکسل‌های تصویر از ۰ تا ۲۵۵ مقدار به خود می‌گیرند. با استفاده از این عملگر و انتخاب یک محدوده شدت نور، تمامی پیکسل‌هایی که در محدوده انتخابی قرار می‌گیرند به رنگ سفید (مقدار یک) و بقیه که در خارج محدوده قرار دارند به رنگ سیاه (مقدار صفر) در می‌آیند. به این ترتیب با توجه به دامنه محدودسازی خاص

جدول ۴) نمای گرافیکی از مراحل پردازش تصویر در دمای ۰ تا -۸۰ درجه سلسیوس برای فولاد API X70.

نام	دما	تصویر اصلی	Bilateral filter	Gray image	Range filter	حذف نواحی نرم از سطح	Mask image	Binary image
c.1	۰							
e.1	-۲۰							
g.3	-۴۰							
i.2	-۶۰							
s.3	-۸۰							

جدول ۵) مقدار درصد شکست نرم و ترد بدست آمده از پردازش تصویر برای نمونه‌های شاری در دمای ۲۰+ تا ۸۰- درجه سلسیوس.

درصد شکست نرم	درصد شکست ترد	مساحت سطح شکست ترد (میلی‌متر مربع)	مساحت کل سطح شکست (میلی‌متر مربع)	دما (درجه سلسیوس)	نام نمونه
۱۰۰	۰	۰	۶۶/۸	۲۰+	a.3
۱۰۰	۰	۰	۷۹/۴	۱۰+	b.1
۱۰۰	۰	۰	۸۰/۸	۰	c.1
۹۲/۸	۷/۲	۵/۲	۷۱/۹	۱۰-	d.3
۸۶/۵	۱۳/۵	۱۱/۱	۸۲	۲۰-	e.1
۵۳/۲	۴۶/۸	۳۸/۴	۸۲/۱	۳۰-	f.3
۵۲/۶	۴۷/۴	۳۹/۷	۸۳/۷	۴۰-	g.3
۴۵/۸	۵۴/۲	۴۵/۹	۸۴/۶	۵۰-	h.1
۳۶/۵	۶۳/۵	۵۶/۶	۸۹/۱	۶۰-	i.2
۲۴/۵	۷۵/۵	۶۰/۴	۸۰	۷۰-	j.3
۰	۱۰۰	۸۰/۲	۸۰/۲	۸۰-	s.3

از سطح شکست شاری این فولاد مقادیر K_0 , B , C و D را به ترتیب ۰، ۵۰، ۵۰ و ۱۰ گزارش کرده‌اند.

نمودار تانژانت‌های پربولیک برازش شده، امکان پیش‌بینی مقدار درصد شکست نرم در دماهایی که آزمایش در آن انجام نشده را میسر می‌کند. به عنوان مثال برای دماهای ۵۰- و ۶۰- درجه سلسیوس (که در این تحقیق داده تجربی برای آن موجود نمی‌باشد) مقدار شکست نرم طبق رابطه تانژانت‌های پربولیک به ترتیب ۳۷/۸ و ۲۶/۹ درصد پیش‌بینی می‌شود.

در این تحقیق برای بررسی دقیق‌تر سطح شکست و امکان پیش‌بینی شکل نواحی نرم و ترد، تصاویر دیجیتالی گرفته شده از سطوح شکست شبکه‌بندی شده است. برای یکسان‌سازی و امکان مقایسه تصاویر با هم، همه تصاویر در یک قالب مستطیلی یکسان قرار داده شده است.

این قالب یکسان، مستطیل با ابعاد ۴۵ در ۴۰ سانتی‌متر و با رزولوشن ۳۸ پیکسل در هر سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. با تعریف این قالب، نسبت ابعادی همه تصاویر توسط نرم‌افزار رایانه‌ای به یک فرم یکسان تبدیل می‌شود. برای هر تصویر، شبکه‌بندی توسط ۹ خط عمودی و ۸ خط افقی انجام شده است. به این ترتیب هر تصویر به یک جدول مشبک ۱۰ در ۹ (۹۰ شبکه مربعی) تبدیل می‌شود. شبکه‌بندی این قالب ثابت و همین‌طور تعداد و مکان خطوط شبکه‌ها کدنویسی شده است.

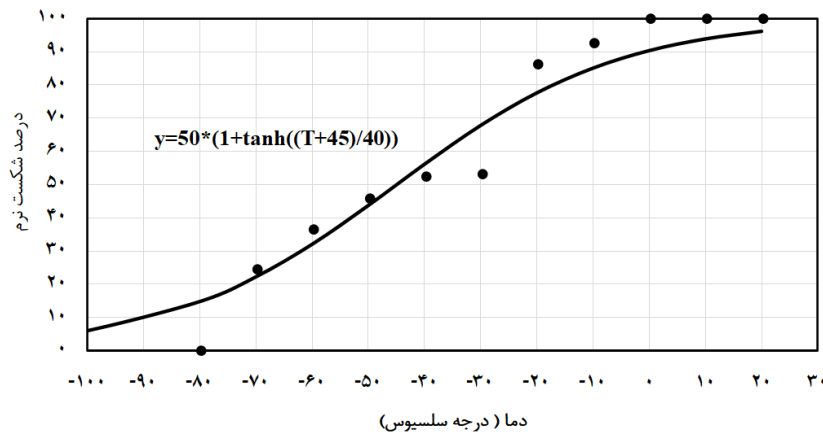
با انجام شبکه‌بندی روی تصاویر باینری از سطوح شکست (دمای ۲۰+ تا ۸۰- درجه سلسیوس) یازده تصویر مشبک برای یازده نمونه آزمایش شده حاصل می‌شود. قسمت‌هایی از تصویر باینری سطح شکست، که سفید رنگ هستند معرف شکست ترد و قسمت‌های سیاه رنگ، شکست نرم را نشان می‌دهند. به این ترتیب در یک تصویر مشبک ۹۰ تایی تعدادی از شبکه‌های مربعی به صورت کامل سفید هستند، که شکست ترد را نشان می‌دهند. شبکه‌هایی که کامل سیاه رنگ هستند به صورت تمام نرم ظاهر می‌شوند. همین‌طور شبکه‌هایی که قسمتی سفید و قسمتی

بدست آمده از مقدار درصد شکست نرم و ترد برای یازده نمونه آزمایش شده در این تحقیق مطابق جدول ۵ است.

نمودار درصد شکست نرم بر حسب دما در شکل ۵ آمده است. نتایج حاصل شده از پردازش تصویر (قسمت‌های نرم و ترد) به کمک تصاویر میکروسکوپ الکترونی از قسمت‌های مختلف سطح شکست در هر دما صحت‌سنجی شده است. تصاویر میکروسکوپ الکترونی از قسمت‌های ترد، الگوهای شکست تورقی (Cleavage Fracture) و در قسمت‌های نرم به صورت شکست حفره‌ای (Dimple Fracture) دیده شد. محل نواحی شکست نرم و ترد در تصاویر میکروسکوپ الکترونی منطبق بر نتایج حاصل از پردازش تصویر بود. محدوده دمای بین صفر تا ۸۰- درجه سلسیوس، ناحیه انتقال رفتار نرم به ترد برای این فولاد است. برای برازش منحنی بر روی داده‌های شکل ۵ از رابطه (۱) استفاده شده است [23]:

$$C_v = K_0 + B \left[1 + \tanh \left(\frac{T - C}{D} \right) \right] \quad (1)$$

در رابطه (۱)، C_v مقدار درصد شکست نرم و T دما را نشان می‌دهد. K_0 مقدار شکست نرم در سطح پایین منحنی (مقدار ۰)، B نصف فاصله بالا و پایین منحنی (مقدار ۵۰)، C دمای انتقال (مقدار ۴۵- منطبق بر شکست نرم ۵۰ درصد) و D نصف پهنای دمای تغییر رفتار (مقدار ۴۰) از ضرایب این نمودار است. نمودار تانژانت‌های پربولیک برازش شده بر روی داده‌ها در شکل ۵ به عنوان اولین بار برای این فولاد در ایران گزارش شده است. این نمودار رفتار این فولاد در سه ناحیه بالایی (دماهای بالاتر از ۰ درجه سلسیوس) و گذار (دماهای بین ۰ تا ۸۰- درجه سلسیوس) و پایین (دماهای پایین‌تر از ۸۰- درجه سلسیوس) را نشان می‌دهد. مقدار ضریب تعیین R^2 برای این نمودار برازش شده ۰/۹۵۴ بدست آمد. چون مقدار این ضریب به عدد یک نزدیک است، همبستگی خوبی را بین نمودار برازش شده و داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد. خوانین و هاشمی [22] در بررسی چشمی از مقادیر درصد شکست نرم



شکل ۵) نمودار درصد شکست نرم نمونه‌های شاپی بر حسب دما و برازش نمودار تانژانت‌هایپربولیک روی داده‌های آزمایشگاهی.

اعداد داخل این شبکه به عنوان یک ماتریس ۱۰ در ۹ معرف رفتار کمی مقدار شکست ترد در دمای ۳۰- درجه سلسیوس است. حال می‌توان هر تصویر سطح شکست را به کمک این ماتریس، کم‌سازی کرد. ترسیم این ماتریس دو بعدی به کمک نرم‌افزار اکسل به صورت‌های گوناگون امکان‌پذیر است. با ترسیم این ماتریس می‌توان شکل دو بعدی از سطح شکست نرم و ترد را نشان داد. شکل ۸ ترسیم شماتیک سه‌بعدی از ماتریس بدست آمده در دمای ۳۰- درجه سلسیوس را نشان می‌دهد.

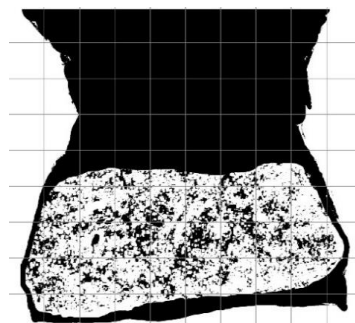
کم‌سازی نواحی نرم و ترد سطح شکست، امکان پیش‌بینی شکل نواحی نرم و ترد یک سطح شکست در یک دمای خاص را میسر می‌کند. مطابق شکل ۵، در ناحیه انتقال (۰ تا ۸۰- درجه سلسیوس) رفتار تانژانت‌هایپربولیک تغییرات مقدار درصد شکست نرم بر حساب دما به رفتار خطی بسیار نزدیک است بنابراین در این ناحیه از میان‌یابی خطی استفاده می‌شود. به عنوان مثال برای پیش‌بینی شکل نواحی نرم و ترد در دمای ۵۵- درجه سلسیوس، می‌توان از میان‌یابی خطی ماتریس‌های دو بعدی در دمای ۵۰- و ۶۰- درجه سلسیوس استفاده کرد. ابتدا با کدنویسی داخل نرم‌افزار اکسل (Excel) می‌توان درایه‌های دو ماتریس را میان‌یابی کرد سپس ماتریس حاصل شده را می‌توان به عنوان یک حدس در دمای ۵۵- درجه سلسیوس معرفی نمود. به کمک ابزار ترسیم سه‌بعدی پیش‌بینی وضعیت ناحیه ترد در دمای ۵۵- درجه سلسیوس مطابق شکل ۹ است.

کم‌سازی قسمت‌های نرم و ترد در یک سطح شکست به صورت یک ماتریس عددی یکی از دستاوردهای مهم در این تحقیق است. تبدیل یک تصویر کیفی رنگی از سطح شکست و تبدیل آن به یک ماتریس عددی فرایندی است که برای اولین بار در این تحقیق انجام شده است. این فرایند از تصویربرداری دیجیتال از سطح شکست شروع می‌شود. در ادامه با انجام پردازش تصویر (که مراحل مختلف آن در این تحقیق اشاره شده است) به یک تصویر باینری تبدیل می‌شود.

سیاه رنگ است، به صورت ترکیبی به ترتیب نمایانگر شکست ترد و نرم هستند.

شکل ۶ تصویر باینری از سطح شکست در دمای ۳۰- درجه سلسیوس را نشان می‌دهد که فرایند شبکه‌بندی روی آن انجام شده است. این کدنویسی توسط عملگر فانکشن (Function) در نرم‌افزار فتوشاپ به صورت خودکار برای هر تصویر انجام می‌شود. برای کم‌سازی تصاویر، شبکه‌های کامل سفید رنگ (شکست ترد) را به صورت مربع‌های ۱ در ۱ با مساحت برابر ۱ در نظر گرفته شده است. شبکه‌های کامل سیاه رنگ را مربع‌های ۰ در ۰ با مساحت ۰ فرض می‌شوند. برای شبکه‌هایی که ترکیب رنگ سیاه و سفید دارند، مساحت ناحیه سفید (مقدار مساحت بین ۰ تا ۱) معرف آن شبکه تصویر است. مساحت ناحیه سفید برای این گونه شبکه‌ها (سیاه و سفید) به کمک پردازش تصویر بدست می‌آید. پردازش تصویر (محاسبه مساحت) به کمک نرم‌افزار تصویر جی و با کالبره کردن تصاویر انجام می‌شود. به این ترتیب برای هر تصویر ۹۰ مقدار عددی که همه اعداد ۰، ۱ و یا عددی بین ۰ تا ۱ هستند، حاصل می‌شود.

هر تصویر را می‌توان به صورت یک ماتریس ۱۰ در ۹ بیان کرد. درایه‌های این ماتریس اعدادی از ۰ تا ۱ را هستند. شکل ۷ مقادیر حاصل شده از مساحت شکست ترد برای هر شبکه در دمای ۳۰- درجه سلسیوس را نشان می‌دهد.



شکل ۶) تصویر باینری شبکه‌بندی شده در قالب ثابت در دمای ۳۰- درجه سلسیوس.

۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰	۰/۱۲	۰/۴۳	۰/۴۷	۰/۴۶	۰/۳۵	۰/۳۷	۰/۶۲	۰/۲۷	۰
۰/۰۵	۰/۹۶	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰/۸۹	۰/۰۲
۰/۳۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰/۳۵
۰/۴۷	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰/۹۴	۰/۷۳	۰/۱۰
۰/۱۲	۰/۵۹	۰/۵۷	۰/۳۸	۰/۱۸	۰/۰۸	۰/۰۳	۰	۰	۰

شکل ۷) مقادیر درصد شکست ترد در هر شبکه از قالب تعریف شده در دمای ۳۰- درجه سلسیوس.

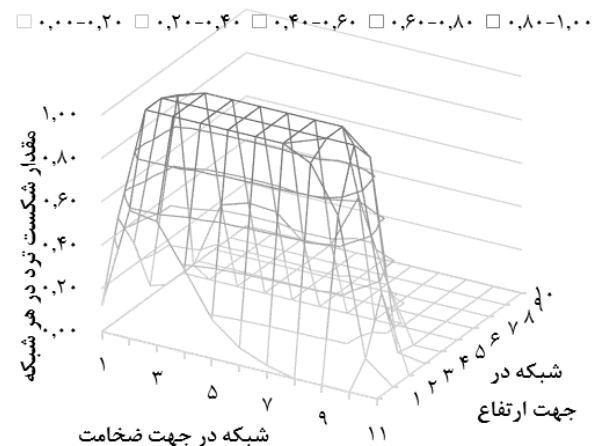
سازی و پیش‌بینی شکل سطح شکست را می‌توان بر روی فولادهای دیگر نیز گسترش داد.

۵- نتیجه‌گیری

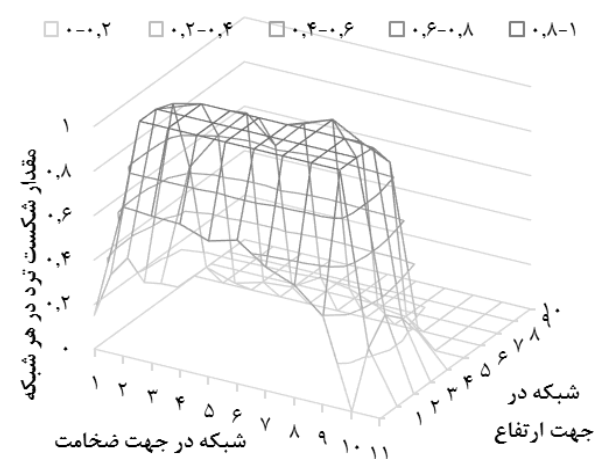
در این تحقیق سطح شکست یازده نمونه شاری فولاد API X70 در بازه دمایی ۲۰+ تا ۸۰- درجه سلسیوس (با فاصله دمای ده درجه) بررسی گردید. تصویربرداری ماکروسکوپی و در ادامه انجام مراحل پردازش تصویر، امکان جداسازی سطح شکست ترد و نرم را حاصل نمود. مقدار شکست نرم با استفاده از پردازش تصویر برای دماهای ۲۰+، ۰، ۲۰-، ۴۰-، ۶۰- و ۸۰- درجه سلسیوس به ترتیب ۱۰۰، ۱۰۰، ۸۶، ۵۳، ۳۶ و ۰ درصد گزارش شد. دمای انتقال منطبق با شکست نرم ۵۰ درصد، ۴۵- درجه سلسیوس برای این فولاد بدست آمد. نمودار درصد شکست نرم بر حسب دما برای اولین بار برای این فولاد ترسیم شد. نمودار تائزانت‌های پیرولیک برازش شده روی نتایج امکان پیش‌بینی درصد شکست نرم برای دماهای بین ۲۰+ تا ۸۰- درجه سلسیوس را فراهم نمود. به عنوان مثال برای دمای ۵۵- و ۶۵- درجه سلسیوس، مقدار شکست نرم به ترتیب ۳۷/۸ و ۲۶/۹ درصد پیش‌بینی شد. کم‌سازی و ترسیم یک تصویر کیفی توسط شبکه‌بندی سطح شکست در یک قالب ثابت، به عنوان یک کار جدید در این تحقیق انجام شد. امکان پیش‌بینی و ترسیم شکل سطح شکست نرم و ترد در هر دما به کمک میان‌یابی دو شبکه مشخص از نتایج دیگر این تحقیق است. به عنوان مثال شکل سطح شکست ترد برای دمای ۵۵- درجه سلسیوس در این تحقیق پیش‌بینی و ترسیم شد.

تشکر و قدردانی: از شرکت لوله و تجهیزات سدید به لحاظ در اختیار قرار دادن فولاد API X70 قدردانی می‌شود.

تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیر ایرانی منتشر نشده است.



شکل ۸) ترسیم سه‌بعدی مقدار درصد شکست ترد در دمای ۳۰- درجه سلسیوس.



شکل ۹) پیش‌بینی سه‌بعدی مقدار درصد شکست ترد در دمای ۵۵- درجه سلسیوس.

با انجام شبکه‌بندی و تبدیل شبکه‌ها به مقدار عددی، یک ماتریس حاصل می‌شود که معرف مقدار شکست نرم و ترد برای سطح شکست است. همین‌طور پیش‌بینی شکل سطح شکست نرم و ترد در یک دمای خاص بین ۲۰+ تا ۸۰- درجه سلسیوس (که برای آن داده آزمایشگاهی وجود ندارد)، کاری است که برای اولین بار در این تحقیق گزارش شده است. فرایند کمّی-

- 12- Rr M. Fractographic Analysis of Welded Joint Surfaces. Machines. Technologies. Materials.. 2016;10(12):34-7.
- 13- Kawata H, Umezawa O. Two step ductile to brittle transition behavior on ferrite+ pearlite structure steel sheet. ISIJ International. 2017:ISIJINT-2017.
- 14- Panin S V, Vlasov I V, Maruschak P O, Moiseenko D D, Berto F & Vinogradov A. Influence of stress concentrator shape and testing temperature on impact bending fracture of 17Mn1Si pipe steel. Advances in Materials Science and Engineering, 2017; 2017: 1-12.
- 15- McCowan CN, Lucon E, Santoyo RL. Fracture appearance of steels in transition: experimental observations and measurements. Journal of Testing and Evaluation. 2018;47(2):1009-22.
- 16- Park TC, Kim BS, Son JH, Yeo YK. A New Fracture Analysis Technique for Charpy Impact Test Using Image Processing. Korean Journal of Metals and Materials. 2021;59(1):61-6.
- 17- Qi Z, Dou D. Prediction of density and sulfur content level of high-sulfur coal based on image processing. Powder Technology. 2022;407:117669.
- 18- Derafshpour S, Valizadeh M, Mardani A, Saray MT. A novel system developed based on image processing techniques for dynamical measurement of tire-surface contact area. Measurement. 2019; 139:270-6.
- 19- Okinda C, Sun Y, Nyalala I, Korohou T, Opiyo S, Wang J, Shen M. Egg volume estimation based on image processing and computer vision. Journal of Food Engineering. 2020; 283:110041.
- 20- API Specifications 5L, Specifications for line pipe, Forty Fourth Edition, American Petroleum Institute, 2007.
- 21- ASTM E23, Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials, Published May 2003.
- 22- Khavanin H & Hashemi S H. Comparison of fracture area of drop weight tear test and Charpy specimen in thermomechanical steel. Journal of Mechanical Engineering Transaction of ISME, 2014; 16(3): 67-78. (in Persian)
- 23- Chopra O K & Shack W J. Mechanical Properties of Thermally Aged Cast Stainless Steels from Shippingport Reactor Components. Argonne National Laboratory, 1995.

تعارض منافع: (نمونه) در این مقاله از برخی نتایج حاصل از رساله دکتری نویسنده مسئول استفاده شده است. هیچ تعارض منافع دیگری برای اظهار وجود ندارد.

فهرست علائم

E	مدول یانگ (GPa)
YS	تنش تسلیم (MPa)
TS	تنش نهایی (MPa)

منابع

- 1- Verlinden B, Driver Ju, Samajdar In. Thermo-Mechanical Processing of Metallic Materials. First Edition, 2007.
- 2- Zhou Z, Tong Z, Qian G, Zhong W, Wang C, Yang W, Berto F. Irradiation effect on impact fracture behavior of A508-3 steel in ductile-to-brittle transition range. Engineering Failure Analysis. 2019; 97:836-43.
- 3- Tanguy B, Besson J, Piques R, Pineau A. Ductile to brittle transition of an A508 steel characterized by Charpy impact test: Part II: modeling of the Charpy transition curve. Engineering fracture mechanics. 2005; 72(3):413-34.
- 4- 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.
- 5- Shin SY, Hwang B, Kim S, Lee S. Fracture toughness analysis in transition temperature region of API X70 pipeline steels. Materials Science and Engineering: A. 2006; 429(1-2):196-204.
- 6- Shin SY, Gong G, Kim S, Lee S. Analysis of fracture toughness in the transition temperature region of API X70 pipeline steels rolled in two-phase region. Metallurgical and Materials Transactions A. 2007; 38(5):1012-21.
- 7- Hashemi SH. Apportion of Charpy energy in API 5L grade X70 pipeline steel. International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2008; 85(12):879-84.
- 8- Beidokhti B, Koukabi AH, Dolati A. Influences of titanium and manganese on high strength low alloy SAW weld metal properties. Materials Characterization. 2009; 60(3):225-33.
- 9- Capelle J, Furtado J, Azari Z, Jallais S, Pluvinage G. Design based on ductile-brittle transition temperature for API 5L X65 steel used for dense CO2 transport. Engineering Fracture Mechanics. 2013;110:270-80.
- 10- Pluvinage G, Amara MB, Capelle J, Azari Z. Role of constraint on ductile brittle transition temperature of pipe steel X65. Procedia materials science. 2014 1;3:1560-5.
- 11- Lucon E, McCowan CN, Santoyo RL. Impact characterization of line pipe steels by means of standard, sub-size and miniaturized Charpy specimens. NIST Tech. Note. 1865;2015:1-56.