



## استفاده از آزمون پیچش گرم جهت تعیین تجربی دماهای بحرانی فولاد ایکس شصت و پنج

مسعود رخش خورشید<sup>1</sup>، سید حجت هاشمی<sup>2\*</sup>، حسین مناجاتی زاده<sup>3</sup>

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند

2- استادیار، مهندسی مکانیک، گروه پژوهشی مطالعات لوله و صنایع وابسته دانشگاه بیرجند، بیرجند

3- استادیار، مهندسی مواد، دانشگاه رو، کانادا

\* بیرجند، صندوق پستی: 97175/615/birjand.ac.ir@shhashemi

### چکیده

تعیین دمای عدم تبلور مجدد ( $T_{nr}$ ) و دماهای شروع و پایان استحاله آستنیت ( $A_{r3}$  و  $A_{r1}$ ) به منظور طراحی عملیات ترمومکانیکی مناسب برای تولید فولادهای ای بی آی اهمیت زیادی دارد. در این پژوهش، از آزمون پیچش گرم با زمان بندی میانگین و پیچش با سرمایش پیوسته پس از آزمون پیچش گرم با زمان بندی واقعی برای تعیین دماهای بحرانی عملیات ترمومکانیکی فولاد ایکس 65 برای اولین بار در داخل کشور استفاده شد. این فولاد وارداتی بوده و کاربردهای گسترده ای در خطوط قطور و پرفشار انتقال گاز طبیعی و شبکه های انتقال نفت ایران دارد. نتایج نشان داد که زمان بندی میانگین برای تعیین دمای  $T_{nr}$  روش مناسبی است؛ در حالی که پیچش با سرمایش پیوسته برای تعیین دماهای  $A_{r3}$  و  $A_{r1}$  مناسب است. نتایج بدست آمده با روابط تجربی براتو و اوچی (با هدف بررسی قابلیت اعتماد این روابط) برای تعیین دماهای  $T_{nr}$  و  $A_{r3}$  مقایسه گردید. مقدار خطای نسبی 4 درصد برای هر دو رابطه به دست آمد که نشان دهنده لزوم انجام آزمایشات تجربی برای تعیین دماهای بحرانی عملیات ترمومکانیکی می باشد. با توجه کمبود داده های تجربی می توان از نتایج پژوهش حاضر جهت طراحی عملیات ترمومکانیکی بهینه در داخل کشور (با انتخاب محدوده دمایی مناسب جهت انجام مراحل نورد خشن و پرداخت) استفاده کرد.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 16 بهمن 1392  
پذیرش: 02 خرداد 1393  
ارائه در سایت: 19 مهر 1393  
کلید واژگان:  
دماهای استحاله آستنیت به فریت  
دمای عدم تبلور مجدد  
زمان بندی میانگین  
پیچش با سرمایش پیوسته  
فولاد خط لوله انتقال گاز

## The use of hot torsion testing for determination of critical temperatures of API X65 steel

Masoud Rakhshkhorshid<sup>1</sup>, Seyyed Hozjat Hashemi<sup>2\*</sup>, Hosein Monajatizadeh<sup>3</sup>

1-Department of Mechanical Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran

2-Research Group for Pipeline Studies and Related Industries, University of Birjand, Birjand, Iran

3-Department of Materials Engineering, University of Rue, Montreal, Canada

\*P.O.B. 97175/615, Birjand, Iran shhashemi@birjand.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 05 February 2014  
Accepted 23 May 2014  
Available Online 11 October 2014

#### Keywords:

Austenite to ferrite transformation temperatures  
Non-recrystallization temperature  
Average schedule  
Continuous cooling torsion test  
Gas transportation pipeline steel

### ABSTRACT

Thermo-mechanical control processing is used to produce API pipeline steels. To design a proper thermo-mechanical cycle, it is necessary to determine the critical temperatures including non-recrystallization temperature ( $T_{nr}$ ) and austenite to ferrite transformation start and finish temperatures ( $A_{r3}$  and  $A_{r1}$ ). In this research, average schedule and continuous cooling torsion after a real schedule were used to determine critical temperatures of API X65 steel for the first time in Iran. This steel is imported from abroad and is extensively used in Iran for large diameter, high-pressure gas transportation pipelines and for oil transmission networks. It was found that the average schedule was a proper method to determine  $T_{nr}$ ; while, continuous cooling torsion was proper to determine  $A_{r3}$  and  $A_{r1}$ . The obtained results were compared with Boratto and Ouchi experimental relations (with the purpose of evaluating the reliability of these relations) for determination of  $T_{nr}$  and  $A_{r3}$  critical temperatures. The obtained 4 percent relative error from both relations showed the need for conducting the experimental studies. Regarding the lack of experimental data, the obtained results can be used to design the optimum thermo-mechanical control process (through the selection of proper temperature ranges for rough and finish rolling stages) in domestic manufacturing of the test steel.

### 1- مقدمه

لوله های پرفشار انتقال گاز ایران به کار می رود [1، 2]. مشخصات این فولاد توسط مؤسسه نفت آمریکا<sup>3</sup>، استاندارد شده است [3]. تولید این فولاد توسط عملیات کنترل شده ترمومکانیکی<sup>4</sup> موجب تغییر ریزساختار آن از فریت-

فولاد ای بی آی ایکس 65<sup>1</sup> (با حداقل استحکام تسلیم 65 کیلوپوند بر اینچ مربع) یک فولاد پراستحکام کم آلیاژ<sup>2</sup> است که به طور گسترده در ساخت

3- American Petroleum Institute (API)

4- Thermo-mechanical Control processing (TMCP)

1- API X65

2- High Strength Low Alloy (HSLA)

Please cite this article using:

M. Rakhshkhorshid, S.H. Hashemi, H. Monajatizadeh, The use of hot torsion testing for determination of critical temperatures of API X65 steel, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 13, pp. 291-296, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

کشور، کلیه آزمایشات پیچش گرم در آزمایشگاه کارگرم دانشگاه مگ گیل در کشور کانادا انجام شده است. با توسعه کارخانه‌های تولید فولاد در داخل کشور می‌توان از نتایج پژوهش حاضر جهت طراحی عملیات ترمومکانیکی بهینه (با انتخاب محدوده دمایی مناسب مراحل نورد خشن و پرداخت) برای این فولاد استفاده کرد. با توجه به کمبود داده‌های تجربی در این زمینه در داخل کشور، اهمیت نتایج تحقیق حاضر مشخص می‌شود.

## 2- مواد و روش تحقیق

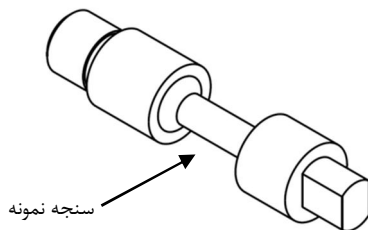
ترکیب شیمیایی فولاد مورد مطالعه که به روش کوانتومتری تعیین شده در جدول 1 ارائه شده است [2].

نمونه‌های آزمون پیچش گرم با طول و قطر سنجه به ترتیب برابر با 22/23 و 6/35 میلی‌متر [13] از لوله ساخته شده در مقیاس صنعتی (فولاد توسط شرکت پوسکوی کره جنوبی تولید شده است) جدا شد (شکل 1).

از دستگاه پیچش گرم مجهز به کامپیوتر که بر روی بستر یک دستگاه تراش سوار شده است، استفاده شد (آزمایشگاه کارگرم، دانشگاه مگ گیل، کانادا). در این دستگاه گشتاور مورد نیاز توسط یک موتور هیدرولیک با قابلیت اعمال گشتاور حداکثر 100 نیوتون‌متر در سرعت‌های مختلف تا 628 دور بر دقیقه تأمین و از نرم افزار تست استار<sup>4</sup> برای کنترل موتور هیدرولیکی استفاده می‌شود. بار اعمال شده توسط یک گشتاور سنج<sup>5</sup> و مقدار پیچش توسط یک مبدل دورانی<sup>6</sup> سنجیده می‌شود. حرارت توسط یک کوره تابشی با قابلیت گرم کردن تا دمای 1400 درجه سانتی‌گراد تأمین می‌شود. یک ترموکوپل به مرکز قطعه کار متصل می‌شود و کنترلر میکری استار<sup>7</sup> امکان کنترل تغییرات دما در حین انجام عملیات ترمومکانیکی را فراهم می‌آورد. تصویر دستگاه در شکل 2 نشان داده شده است [13].

جدول 1 ترکیب شیمیایی فولاد ایکس 65 [2].

Nb	Si	Ti	S	P	Mn	C
0/047	0/201	0/015	0/002	0/008	1/45	0/072
-	Al	Cu	Ni	V	Mo	Cr
-	0/023	0/008	0/009	0/05	0/24	0/174



شکل 1 هندسه نمونه‌های آزمون پیچش گرم.



شکل 2 دستگاه پیچش گرم مجهز به رایانه [13].

پرلیتی به فریت سوزنی می‌شود [4]. وجود ریزساختار فریت سوزنی در این فولاد سبب ترکیب مناسبی از استحکام و چقرمگی بالا می‌باشد [5، 6].

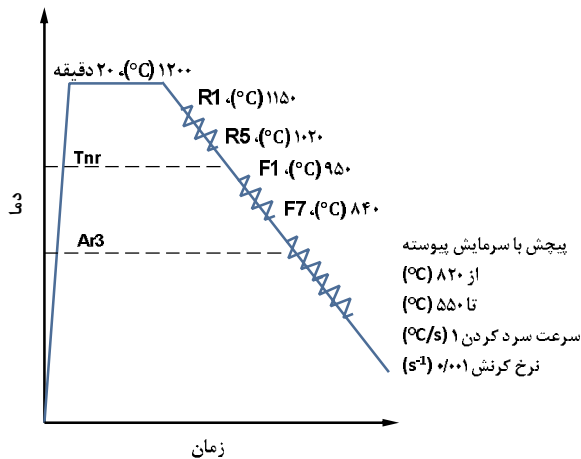
عملیات ترمومکانیکی، شامل نورد کنترل شده و سرد کردن سریع است. نورد کنترل شده در دو مرحله نورد خشن و نورد پرداخت انجام می‌شود. نورد خشن (ولیه)، در دمایی بالاتر از دمای عدم تبلور مجدد ( $T_{nr}$ ) انجام می‌گیرد. هدف از این مرحله دست‌یابی به ریزساختار ریزدانه‌ای از آستنیت تبلور مجدد یافته است. نورد پرداخت (نورد نهایی) در دمایی زیر دمای عدم تبلور مجدد و بالای دمای  $A_{r3}$  (دمای شروع تبدیل فاز آستنیت به فریت) انجام می‌گیرد تا ریزساختار آستنیت کشیده شده<sup>1</sup> به دست آید. در این ریزساختار با افزایش نسبت مرز به حجم دانه و تشکیل باندهای تغییر شکل، مکان‌های جوانه‌زنی فریت افزایش یافته و امکان ریز دانه شدن فولاد فراهم می‌شود. با سرد کردن سریع از بالای خط  $A_{r3}$  تا دمای کلاف پیچی، دانه‌های ریزتری حاصل می‌شود [4، 7-9]. بنابراین، همانطور که در منابع دیگر نیز بیان شده است [6، 10]، تعیین دماهای بحرانی اساس طراحی عملیات کنترل شده ترمومکانیکی برای دستیابی به ریزساختار فریت سوزنی است برای فولادی با ترکیب شیمیایی معین است و برای فولادسازان از اهمیت بالایی برخوردار است.

به منظور تعیین دماهای بحرانی از شبیه‌سازی فرایند نورد توسط آزمون پیچش گرم با زمان‌بندی میانگین استفاده می‌شود. در این روش زمان‌بندی، در هر عبور نورد، نرخ کرنش، زمان بین‌عبور<sup>2</sup> و سرعت سرد شدن ثابت در نظر گرفته می‌شود. در شکل 1 زمان‌بندی میانگین متداول که در مقالات متعدد استفاده شده، نشان داده شده است [10-12]. علاوه بر این، پیشنهاد شده است که زمان‌بندی واقعی به همراه پیچش با سرمایه‌ی پیوسته (با نرخ کرنش پایین) می‌تواند برای تعیین دقیق‌تر دماهای بحرانی  $A_{r1}$  و  $A_{r3}$  استفاده شود [10، 11، 13]. لازم به ذکر است که بطور کلی، آزمون پیچش گرم جهت شبیه‌سازی آزمایشگاهی عملیات نورد به منظور بررسی اثر پارامترهایی نظیر سرعت سرد کردن، زمان بین عبور، دمای نورد نهایی بر ریزساختار و خواص مکانیکی فولاد بکار می‌رود. در حقیقت قابلیت اعمال کرنش‌های بالا (بالاتر از یک) مهمترین ویژگی آزمون پیچش گرم است که آن را برای شبیه‌سازی آزمایشگاهی عملیات نورد مناسب می‌سازد. در این آزمون، بر خلاف آزمون‌های کشش و فشار امکان اعمال کرنش‌های بالا قبل از رسیدن به ناپایداری پلاستیک وجود دارد. گرچه، طی آزمون پیچش گرم تغییر شکل از نوع برشی ساده است و طی نورد گرم تغییر شکل برش و فشار بطور همزمان اعمال می‌شود؛ ولی نشان داده شده است که آزمون پیچش گرم می‌تواند به عنوان یک ابزار قابل اعتماد برای شبیه‌سازی نورد گرم استفاده شود [11].

در پژوهش حاضر (که در ادامه مطالعات انجام شده توسط نویسندگان به منظور توسعه دانش فنی تولید فولاد ای‌پی‌ای ایکس 65 در داخل کشور [1، 2، 9، 12، 14 و 15] انجام شده است)، از آزمون پیچش گرم با دو زمان‌بندی میانگین و زمان‌بندی واقعی به همراه پیچش با سرمایه‌ی پیوسته<sup>3</sup> برای تعیین دماهای بحرانی عملیات ترمومکانیکی (شامل  $T_{nr}$ ،  $A_{r3}$  و  $A_{r1}$ ) استفاده شده است. علاوه بر این، نتایج بدست آمده با روابط تجربی موجود (با هدف بررسی قابلیت اعتماد این روابط) برای تعیین دماهای  $T_{nr}$  و  $A_{r3}$  مقایسه گردیده است. فولاد مورد استفاده در تحقیق حاضر (تهیه شده توسط شرکت پوسکوی کره جنوبی) وارداتی است و در خطوط پرفشار انتقال گاز ایران استفاده می‌شود. باید یاد آور شد که به علت عدم امکان انجام آزمون‌های پیچش گرم در داخل

4- TestStart  
5- Torque cell  
6- Rotary transducer  
7- Micristar

1- Pancaked Austenite  
2- Inter-pass time  
3- Continuous cooling torsion



شکل 4 چرخه ترمومکانیکی انجام آزمون پیچش گرم با زمان بندی واقعی به همراه پیچش با سرمایش پیوسته.

جدول 2 مراحل نورد شبیه سازی شده برای تبدیل تختالی با ضخامت اولیه 220 میلی متر به ورقی با ضخامت نهایی 14/3 میلی متر.

عبور	کرنش	دما (°C)	نرخ کرنش (1/s)	زمان بین عبور (s)
1R	0/30	1150	2	10
2R	0/29	1120	2	10
3R	0/26	1085	2	10
4R	0/26	1050	2	10
5R	0/26	1020	2	100
1F	0/36	950	2	4
2F	0/32	935	2	4
3F	0/29	915	1	4
4F	0/24	900	1	4
5F	0/22	880	1	4
6F	0/19	860	1	4
7F	0/16	840	1	-

اطمینان حاصل شود [11].

### 3- نتایج و بحث

#### 3-1- نتایج آزمون پیچش گرم با زمان بندی میانگین

با توجه به نتایج گشتاور-زاویه، پیچش حاصل از آزمون پیچش گرم با زمان بندی میانگین می توان تنش معادل-کرنش معادل را از روابط 1 و 2 بدست آورد [13]:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{3} \tau (3 + m + n) / (2\pi r^3) \quad (1)$$

$$\varepsilon_{eq} = (r\phi) / L(\sqrt{3}) \quad (2)$$

که در روابط فوق  $\tau$  گشتاور اندازه گیری شده توسط گشتاور سنج و  $\phi$  زاویه پیچش اندازه گیری شده توسط مبدل دورانی می باشد. علاوه بر این،  $L$  و  $r$  طول و شعاع سنجه (شکل 1) و  $m$  و  $n$  نیز ثابت های آزمایش و به ترتیب برابر 0/17 و 0/13 می باشند.  $\sigma_{eq}$  و  $\varepsilon_{eq}$  نیز به ترتیب تنش و کرنش معادل

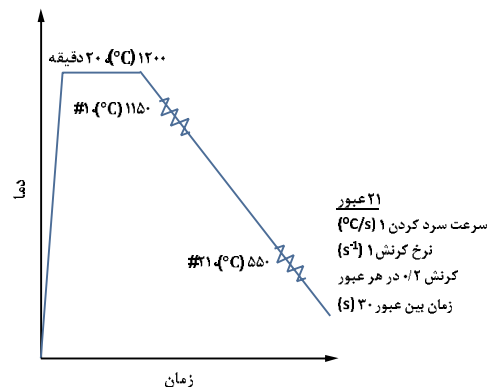
همانطور که در مقدمه بیان شد برای تعیین دماهای بحرانی عملیات ترمومکانیکی می توان از آزمون پیچش گرم با زمان بندی میانگین و با پیچش با سرمایش پیوسته پس از انجام آزمون پیچش گرم با زمان بندی واقعی استفاده کرد. در اینجا برای تعیین دماهای بحرانی از هر دو روش استفاده شده است. در زمان بندی میانگین، مقدار نرخ کرنش، زمان بین عبور و سرعت سرد شدن در هر عبور نورد، ثابت در نظر گرفته می شود. زمان بندی میانگین متداول استفاده شده برای تعیین دماهای بحرانی در شکل 3 نشان داده شده است [10-13].

همانطور که در شکل 3 مشاهده می شود، ابتدا نمونه در دمای 1200 درجه سانتی گراد به مدت 20 دقیقه آستنیته شده است. این دما کمی بالاتر از دمای انحلال Nb(C, N) برای فولاد مورد مطالعه (که از رابطه ایروین [16] برابر 1160 درجه سانتی گراد محاسبه شده است) انتخاب شده است [10]. آزمون در 21 عبور با سرعت سرد کردن ثابت 1°C/s، نرخ کرنش 1 بر ثانیه، کرنش 0/2 در هر عبور و زمان بین عبور یکسان 30 ثانیه انجام شده است [11].

همانطور که قبلاً بیان شد، در تحقیق حاضر، علاوه بر زمان بندی میانگین، از پیچش با سرمایش پیوسته (با نرخ کرنش پایین) پس از انجام زمان بندی واقعی نیز برای تعیین دماهای بحرانی استفاده شده است (شکل 4). در این روش پس از اعمال تغییر شکل در دو ناحیه بالاتر و پایین تر از دمای عدم تبلور مجدد، نمونه در شرایط سرمایش پیوسته با نرخ کرنش پایین پیچانده می شود. دمای شروع پیچش سرمایش پیوسته برابر 820 درجه سانتی گراد (کمی پایین تر از دمای نورد نهایی) و دمای پایان آن برابر 550 درجه سانتی گراد در نظر گرفته شده است (شکل 4).

همانطور که در شکل 4 مشاهده می شود، شبیه سازی نورد کنترل شده در پنج مرحله نورد خشن و هفت مرحله نورد پرداخت انجام و پس از آن پیچش با سرمایش پیوسته با نرخ کرنش پایین (0/0015 بر ثانیه) و سرعت سرد کردن 1°C/s انجام شده است. جزئیات مراحل انجام نورد شبیه سازی شده برای تبدیل تختالی با ضخامت اولیه 220 میلی متر به ورقی با ضخامت نهایی 14/3 میلی متر (شامل مقدار کرنش، دمای انجام نورد، نرخ کرنش و زمان بین عبور) در جدول 2 ارائه شده است.

در شبیه سازی نورد واقعی، زمان بین عبورهای نورد در نورد خشن بیشتر (حدود 10 ثانیه تا امکان تبلور مجدد استاتیکی فراهم شود) و در نورد پرداخت کمتر (4 ثانیه) در نظر گرفته شده است. زمان بین عبور نوردهای خشن و پرداخت نسبت به این زمان ها خیلی بالاتر (در حدود 100 ثانیه در نظر گرفته شده است) تا از پایین آمدن دمای ورق به دمایی زیر دمای  $T_{nr}$



شکل 3 چرخه ترمومکانیکی رایج انجام آزمون پیچش گرم با زمان بندی میانگین برای تعیین دماهای بحرانی [10-13].

(شکل 7). همانطور که در شکل 7 نشان داده شده است، تغییر MFS نسبت به  $1000/T$  را می توان به 4 ناحیه تقسیم کرد.

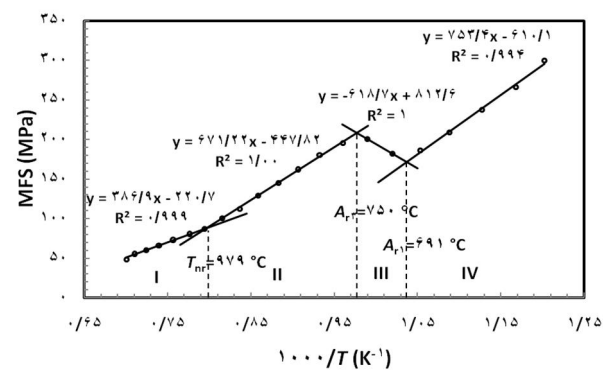
در ناحیه I، افزایش تنش با کاهش دما قابل مشاهده است. با کاهش دما در ناحیه II نیز تنش ها افزایش می یابند، ولی شیب MFS نسبت به  $1000/T$  در این ناحیه (پایین تر از دمای  $T_{nr}$ ) بیشتر است. از نظر متالورژیکی، در دماهای بالاتر از  $T_{nr}$ ، در زمان های بین عبور تبلور مجدد استاتیکی روی می دهد که منجر به کار نرمی می شود. در دماهای پایین تر از  $T_{nr}$ ، با تشکیل رسوبات مرزهای دانه های آستنیت قفل می شود و از کار نرمی به علت تبلور مجدد استاتیکی جلوگیری می شود. کاهش تنش با افزایش دما در ناحیه III، به استحاله آستنیت به فریت مربوط می شود. افزایش تنش با کاهش دما در ناحیه IV نشان می دهد که استحاله پایان یافته و کارسختی فاز جدید شروع شده است [13-10].

همانطور که در شکل 7 نشان داده شده است، از تحلیل رگرسیون برای برازش خطی استفاده و مختصات نقاط تلاقی خطوط برازش شده (دماهای  $A_{r1}$  و  $A_{r3}$ ،  $T_{nr}$ ) محاسبه شده است. با توجه به نتایج زمان بندی میانگین، مقادیر 750، 691 و 979 درجه سانتی گراد، به ترتیب، برای دماهای  $A_{r3}$ ،  $T_{nr}$  و  $A_{r1}$  بدست آمد.

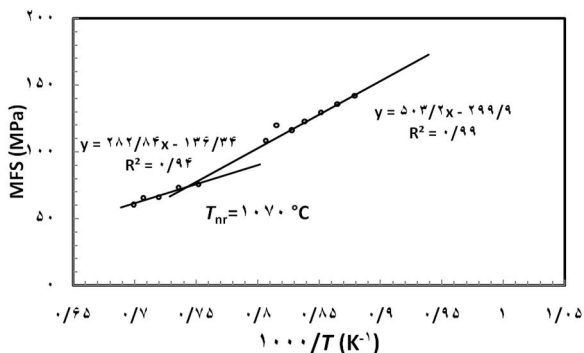
2-3- مقایسه نتایج آزمون پیچش با سرمایش پیوسته پس از پیچش گرم با زمان بندی واقعی و مقایسه با نتایج زمان بندی میانگین

نتایج آزمون پیچش گرم با زمان بندی واقعی به همراه پیچش با سرمایش پیوسته به شکل تغییرات تغییر MFS نسبت به  $1000/T$  و تغییرات تنش با کاهش درجه حرارت به ترتیب در شکل های 8 و 9 نشان داده شده است.

همانطور که در شکل 9 نشان داده شده است مقدار  $T_{nr}$  برابر 1070 درجه سانتی گراد بدست آمده است. مقدار بدست آمده برای  $T_{nr}$  در این روش



شکل 7 ترسیم تنش سیلان متوسط نسبت به  $1000/T$  برای تعیین دماهای بحرانی.



شکل 8 تغییرات تنش سیلان متوسط نسبت به  $1000/T$  در زمان بندی واقعی.

محاسبه شده می باشند. این روابط برای دستگاه آزمایشگاهی حاضر و نمونه های با هندسه و ابعاد نشان داده شده در شکل 1 توسعه داده شده اند [10-13]. نمودارهای تنش- کرنش حاصل از آزمون پیچش گرم با زمان بندی میانگین (که مطابق زمان بندی نشان داده شده در شکل 3 انجام شده است) در شکل 5 نشان داده شده است.

از این نتایج (منحنی های تنش-کرنش) می توان برای رسم تنش سیلان متوسط (MFS) نسبت به  $1000/T$  (دمای شبیه سازی هر یک از مراحل نورد با آزمون پیچش گرم بر حسب درجه کلون است) استفاده کرد. تنش سیلان متوسط از رابطه 3 بدست می آید [10-13]:

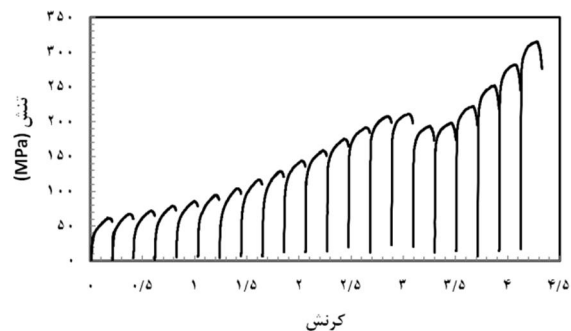
$$MFS = \frac{1}{\epsilon_b - \epsilon_a} \int_{\epsilon_a}^{\epsilon_b} \sigma_{eq} d\epsilon_{eq} \quad (3)$$

در رابطه 3 کمیت های  $\epsilon_a$  و  $\epsilon_b$  به ترتیب مقادیر کرنش در شروع و پایان هر عبور نورد (مطابق شکل 6) می باشد.

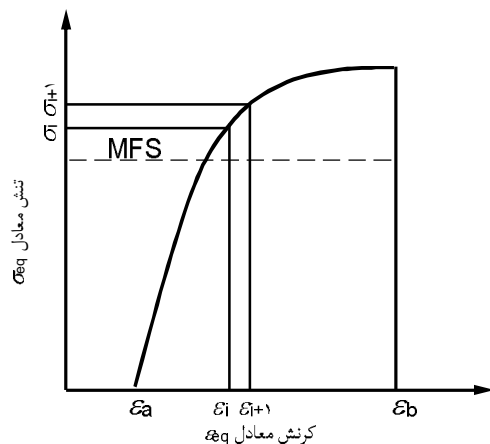
از طرفی، با توجه به شکل 6 می توان انتگرال (رابطه 3) را بصورت عددی حل کرد و مساحت زیر نمودار را با مجموع زیر تخمین زد:

$$\int_{\epsilon_a}^{\epsilon_b} \sigma_{eq} d\epsilon_{eq} = \sum_{i=0}^N \frac{\sigma_{i+1} + \sigma_i}{2} (\sigma_{i+1} - \sigma_i) \quad (4)$$

که  $N$  تعداد بازه های تقسیم بندی فاصله  $\epsilon_a$  تا  $\epsilon_b$  است. بر همین مبنا تنش سیلان متوسط (MFS) برای منحنی های تنش-کرنش بدست آمده از زمان بندی میانگین (شکل 5) محاسبه و نسبت به  $1000/T$  رسم شد



شکل 5 نمودارهای تنش-کرنش حاصل از آزمون پیچش گرم با زمان بندی میانگین.



شکل 6 منحنی تنش معادل-کرنش معادل برای محاسبه تنش سیلان متوسط در هر عبور.

عملیات ترمومکانیکی (شامل  $A_{r1}$  و  $A_{r3}$ ،  $T_{nr}$ ) فولاد خط لوله ای پی آی ایکس 65 استفاده شد. نتایج را می توان در موارد زیر جمع بندی کرد:

1. از نمودارهای تنش- کرنش حاصل از آزمون پیچش گرم با زمان بندی میانگین برای ترسیم نمودار تنش سیلان متوسط نسبت به  $1000/T$  استفاده شد. با تفسیر نمودار حاصل و استفاده از تحلیل رگرسیون دماهای بحرانی  $A_{r1}$  و  $A_{r3}$ ،  $T_{nr}$  به ترتیب برابر 750، 979 و 691 درجه سانتی گراد بدست آمد.

2. از نتایج آزمون پیچش گرم با زمان بندی واقعی به همراه پیچش با سرمایش پیوسته به شکل تغییرات تنش سیلان متوسط نسبت به  $1000/T$  و تغییرات تنش با کاهش درجه حرارت (طی سرمایش پیوسته) برای تعیین دماهای بحرانی استفاده شد و دماهای بحرانی  $T_{nr}$ ،  $A_{r1}$  و  $A_{r3}$  به ترتیب برابر 1070، 720 و 634 درجه سانتی گراد بدست آمد.

3. نشان داده شد که زمان بندی میانگین برای تعیین دمای  $T_{nr}$  روش مناسبی است؛ در حالی که، پیچش با سرمایش پیوسته برای تعیین دماهای  $A_{r1}$  و  $A_{r3}$  مناسب است. بنابراین، با توجه به آزمایشات انجام شده دماهای بحرانی  $T_{nr}$ ،  $A_{r1}$  و  $A_{r3}$  فولاد مورد مطالعه به ترتیب برابر 979، 720 و 634 درجه سانتی گراد می باشد.

4. از روابط براتو و اوچی برای تخمین دماهای  $T_{nr}$  و  $A_{r3}$  استفاده شد و مقدار خطای نسبی 4 درصد برای این دو رابطه بدست آمد که نشان دهنده لزوم و اهمیت انجام آزمایشات تجربی برای تعیین دماهای بحرانی عملیات ترمومکانیکی است.

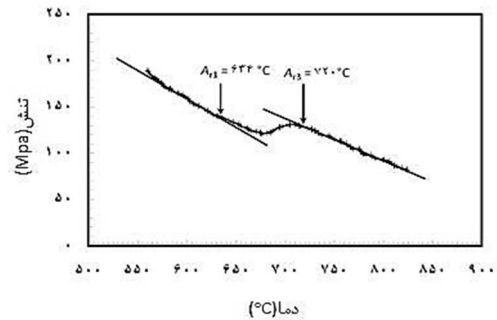
5. با توجه به کمبود داده های تجربی برای فولاد مورد آزمایش، از نتایج پژوهش حاضر می توان برای طراحی عملیات ترمومکانیکی بهینه در داخل کشور (با انتخاب محدوده دمایی مناسب جهت انجام مراحل نورد خشن و پرداخت) برای این فولاد استفاده کرد.

#### 5- تشکر و قدردانی

از شرکت لوله و تجهیزات سدید به لحاظ در اختیار قرار دادن فولاد و همکاری در انجام آنالیز شیمیایی فولاد ای پی آی ایکس 65 قدردانی می گردد.

#### 6- مراجع

- [1] S.H. Hashemi, Strength-hardness statistical correlation in API X65 steel, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 528, pp. 1648-1655, 2011.
- [2] S.H. Hashemi, D. Mohammadyani, Characterisation of weldment hardness, impact energy and microstructure in API X65 steel, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 98, pp. 8-15, 2012.
- [3] *API Specifications 5L, Specifications for Line Pipe*, 44th Edition, USA, American Petroleum Institute, 2007.
- [4] B. Verlinden, J. Driver, I. Samajdar, R.D. Doherty, *Thermo-Mechanical Processing of Metallic Materials*, First ed., London, Elsevier Ltd., 2007.
- [5] M.C. Zhao, K. Yang, F.R. Xiao, Y.Y. Shan, Continuous cooling transformation of undeformed and deformed low carbon pipeline steels, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 355, pp. 126-136, 2003.
- [6] M.C. Zhao, K. Yang, Y. Shan, The effects of thermo-mechanical control process on microstructures and mechanical properties of a commercial pipeline steel, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 335, pp. 14-20, 2002.
- [7] P. Korczak, Modeling of Steel Microstructure Evolution During Thermomechanical Rolling Of Plate for Conveying Pipes, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 153-154, pp. 432-435, 2004.
- [8] S.H. Mousavi Anijdan, S. Yue, The necessity of dynamic precipitation for the occurrence of no-recrystallization temperature in nb-microalloyed steel, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 528, pp. 803-807, 2011.
- [9] M. Rakshkhorshid, S.H. Hashemi, Investigation of cooling rate on continuous cooling transformation behavior of API X65 pipeline steel, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 8, pp. 57-67, 2013. (In Persian)



شکل 9 تغییرات تنش با کاهش درجه حرارت طی پیچش با سرمایش پیوسته.

از مقدار بدست آمده از زمان بندی میانگین (979 درجه سانتی گراد) بالاتر است. البته با مشاهده موقعیت دمای 1070 درجه سانتی گراد که بین عبورهای سوم و چهارم قرار گرفته است و با توجه به اینکه از عبور سوم تا عبور چهارم اختلاف چندانی در MFS مشاهده نمی شود، می توان نتیجه گرفت که زمان بندی واقعی روش مناسبی برای تعیین دمای  $T_{nr}$  نیست. نتیجه به دست آمده با مطالعه انجام شده توسط کالوو و دیگران [11] مطابقت دارد.

علاوه بر این، نتایج پیچش با سرمایش پیوسته (شکل 9) نشان می دهد که در ناحیه آستنیتی تنش سیلان با کاهش دما افزایش می یابد. با شروع استحاله آستنیت تنش سیلان افت می کند و پس از پایان استحاله مجدداً روند خطی افزایش تنش سیلان با کاهش دما قابل مشاهده است. بر همین مبنا دو دمای  $A_{r1}$  و  $A_{r3}$  به ترتیب برابر 720 و 634 درجه سانتی گراد محاسبه شده اند. از آنجا که در این آزمون (پیش از انجام پیچش با سرمایش پیوسته) نمونه آزمایشگاهی کرنش هایی مطابق شرایط واقعی را تجربه می کند و تغییرات تنش با کاهش دما بصورت پیوسته ثبت شده است؛ مقادیر بدست آمده برای دماهای  $A_{r1}$  و  $A_{r3}$  نسبت به نتایج بدست آمده از آزمون پیچش گرم با زمان بندی میانگین از اعتبار بیشتری برخوردار است. در مورد اثر کرنش اعمال شده بر دماهای  $A_{r1}$  و  $A_{r3}$  در جای دیگر بحث شده است [17].

#### 3-3- مقایسه نتایج بدست آمده با روابط تجربی موجود

از روابط تجربی توسعه داده شده توسط براتو و دیگران [18] و اوچی و دیگران [19] می توان به ترتیب برای تخمین دماهای  $T_{nr}$  و  $A_{r3}$  استفاده کرد:

$$T_{nr}(^{\circ}\text{C}) = 887 + 464\%C + 6445\%Nb - 644\%Nb^{1/2} + 732\%V - 230\%V^{1/2} + 890\%Ti + 363\%Al - 357\%Si \quad (5)$$

$$A_{r3}(^{\circ}\text{C}) = 910 - 310\%C - 80\%Mn - 20\%Cu - 15\%Cr - 80\%Mo - 0.35(t-8) \quad (6)$$

که در رابطه فوق  $t$  ضخامت ورق است. با استفاده از این روابط، مقدار دماهای  $T_{nr}$  و  $A_{r3}$  برای فولاد مورد مطالعه به ترتیب برابر 1020 و 750 درجه سانتی گراد محاسبه شد. با توجه به مقادیر بدست آمده از آزمایشات (یعنی مقادیر 979 و 720 درجه سانتی گراد برای دماهای  $T_{nr}$  و  $A_{r3}$ )، مقدار خطای نسبی در تخمین این دو دما از روابط براتو و اوچی برابر 4 درصد محاسبه شد.

#### 4- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر، از آزمون پیچش گرم با زمان بندی میانگین و پیچش با سرمایش پیوسته پس از زمان بندی واقعی برای تعیین دماهای بحرانی

- [15] S.H. Hashemi, M. Rakhshkhorshid, ANN model for investigation the effect of chemical composition on hardness and impact energy in API X65 microalloyed steel, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 4, pp. 156-163, 2012. (In Persian)
- [16] K.J. Irvine, F.B. Pickering, Gladman T., Grain refined C-Mn steels, *Journal of the Iron and Steel Institute*, Vol. 205, pp. 161-182, 1967.
- [17] F.R. Xiao, B. Liao, Y.Y. Shan, G.Y. Qiao, Y. Zhong, C. Zhang, K. Yang, Challenge of Mechanical properties of an acicular ferrite pipeline steel, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 431, pp. 41-52, 2006.
- [18] F. Boratto, R. Barbosa, S. Yue, J.J. Jonas, The influence of chemical composition on the recrystallization behavior of microalloyed steel, *THERMEC88 Conference Proceedings*, Tokyo, Japan, pp. 51-61, 1988.
- [19] C. Ouchi, T. Sampei, I. Kozasu, The Effect of hot rolling condition and chemical composition on the onset temperature of gamma-alpha transformation after hot rolling, *Trans ISIJ (Iron and Steel Inst. Japan)* Vol. 22, pp. 214-222, 1982.
- [10] J. Calvo, I.-H. Jung, A.M. Elwazri, D. Bai, S. Yue, Influence of the Chemical Composition on Transformation Behaviour of Low Carbon Microalloyed Steels, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 520, pp. 90-96, 2009.
- [11] J. Calvo, L. Collins, S. Yue, Design of Microalloyed Steel Hot Rolling Schedules by Torsion Testing: Average Schedule vs. Real Schedule, *ISIJ International* Vol. 50, No. 8, pp. 1193-1199, 2010.
- [12] M. Rakhshkhorshid, *Analysis of Manufacturing Processes and Mechanical Properties Relationship in Iran High Pressure Gas Transportation Pipelines of Grade API X65*, PhD Thesis, University of Birjand, 2013. (In Persian)
- [13] S.H. Mousavi Anijdan, *The Effect of Cool Deformation on the Microstructural Evolution and Flow Strength of Microalloyed Steels*, PhD Thesis, Montréal, McGill University, 2010.
- [14] S.H. Hashemi, M. Rakhshkhorshid, Investigation of chemical composition influence on mechanical properties of API X65 microalloyed steel, *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, Vol. 23, No. 2, pp. 47-64, 2012. (In Persian)