

## Research Paper

### Study of changes in the strength and hardness of H13 steel during short-term creep

Zohair Sarajan<sup>1</sup>, \*Said Nategh<sup>2</sup>, Hamidreza Najafi<sup>3</sup>

1- Ph.D. Candidate, Department of Materials Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2- Professor, Department of Materials Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

3- Assistant professor, Department of Materials Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

**Citation:** Sarajan Z, Nategh S, Najafi H. Study of changes in the strength and hardness of H13 steel during short-term creep. Metallurgical Engineering 2018; 21(2):149-167 <http://dx.doi.org/10.22076/me.2018.75276.1158>

**doi** : <http://dx.doi.org/10.22076/me.2018.75276.1158>

## ABSTRACT

Changes in strength and hardness of alloys are the main factor affecting the strain rate during creep. Thus measuring these properties and studying their correlations to creep resistance is an important issue. In the current study, the relationship between hardness and creep resistance for H13 steel was investigated during short-term creep. Creep fracture and 1% creep ductility tests were carried out at 500-600 °C and stress of 872-926.5 MPa. Hardness test was carried out on all specimens and tensile test was performed on 1% creep ductility specimens at room temperature. The stress power of 4.5 indicated that dislocation creep was the dominant mechanism. The creep activation energy was lower than the activation energy of the self diffusion of alpha iron (109 kJ/mol), which indicated the role of stress in the apparent activation energy of this alloy. A linear relationship has been observed between hardness variation ratio and creep life ratio, although the slopes for the head and gage were slightly different. This linear relationship makes it possible to more accurately predict the life of H13 steel in creep condition.

**Keywords:** Creep, H13 steel, Yield strength, Hardness, Modulus of Elasticity.

■.....■

\* *Corresponding Author:*

Said Nategh, PhD

Address: Department of Materials Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Tel: +98 (21) 44868482

E-mail: [s.nategh@srbiau.ac.ir](mailto:s.nategh@srbiau.ac.ir)

## بررسی تغییر خواص استحکامی و سختی فولاد H13 طی خزش کوتاه مدت

زهیر سراجان<sup>۱</sup>، سعید ناطق<sup>۲</sup>، حمیدرضا نجفی دژده منفرد<sup>۲</sup>

- ۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.  
 ۲- استاد، گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.  
 ۳- استادیار، گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

### چکیده

تغییر در خواص استحکامی و سختی آلیاژها عامل اصلی در تغییر نرخ کرنش طی خزش است. بنابراین، اندازه گیری این خواص و مطالعه ارتباط آنها با مقاومت خزشی دارای اهمیت می باشد. در این پژوهش، ارتباط بین داده های سختی و مقاومت به خزش فولاد H13 طی خزش کوتاه مدت مورد مطالعه قرار گرفته است. آزمون های خزش تا شکست و نیز کرنش ۱٪ در بازه دمایی ۶۰۰-۵۰۰ °C و تنش ۹۲۶/۵-۸۷۲ MPa انجام شد. سختی سنجی بر روی کلیه نمونه ها و آزمون کشش بر روی نمونه های خزش با کرنش ۱٪ و در دمای محیط صورت پذیرفت. بر پایه نتایج، میانگین توان خزشی ۵/۴ در تمام بازه های تنش و دمایی مبین غالب بودن مکانیزم خزش نابجانی بود. انرژی فعال سازی خزش این فولاد نیز کم تر از انرژی فعال سازی نفوذ در خود آهن آلفا (برابر ۱۰۹ کیلوژول بر مول) بود که بیانگر نقش تنش در انرژی فعال سازی ظاهری این آلیاژ بود. همچنین، ارتباط خطی بین نسبت تغییرات سختی به نسبت عمر خزشی این آلیاژ مشاهده شد، هر چند که شیب آن برای دو بخش سر و گیج نمونه های خزش مقداری تفاوت از خود نشان داد. چنین ارتباطی، بررسی مقاومت خزشی و تخمین دقیقتر عمر باقیمانده فولاد H13 را امکان پذیر می سازد.

واژه های کلیدی: خزش، فولاد H13، استحکام تسلیم، سختی، مدول الاستیک.

### ۱. مقدمه

مقاومت خزشی یکی از عوامل مهم در طراحی و بازرسی قطعات ساخته شده از آلیاژهای دما بالا می باشد. تعیین مقاومت خزشی هم از نظر استانداردهای ایمنی و هم از نظر ملاحظات اقتصادی و تعویض به موقع قطعات حساس با عمر باقیمانده کم حائز اهمیت است. به عبارتی تعیین این پارامتر با استفاده از انواع روش ها و مکانیزم های متالورژیکی می تواند برای پیش بینی عمر باقیمانده قطعات تحت شرایط دما و تنش بالا مورد استفاده قرار گیرد. گاهی به واسطه محدودیت زمانی در انجام آزمون های طولانی مدت خزش، از معادلات تجربی جهت تخمین عمر آلیاژ استفاده می شود. از آنجایی که معیار تخمین عمر در این نوع معادلات معمولاً نقطه تسلیم آلیاژ بوده و استحکام تسلیم نیز در حین خزش تغییر می کند، نتایج حاصل از این معادلات همخوانی مناسب با مقادیر تجربی را دارا نبوده و هیچ کدام از این فرمول ها ۱۰۰ درصد عمر خزشی را پیش بینی نمی کند. تابعی از زمان و دما و تنش اعمالی، میزان کرنش قطعه حین خزش تغییر کرده و موجب تغییر در خواص استحکامی و سختی می گردد. آزمون های خزش

کوتاه مدت برای غلبه بر این محدودیت ها و به منظور بررسی تغییر خواص استحکامی و سختی مورد استفاده قرار می گیرد. از آنجایی که سختی سنجی می تواند به صورت در جا، غیر مخرب و سریع انجام شود، این روش همواره برای تعیین مقاومت خزشی و تخمین عمر باقیمانده مد نظر می باشد. در آزمون های خزش کوتاه مدت عموماً شاخص نرخ کرنش مطرح بوده و مشاهده می شود که با کاهش تنش، نرخ کرنش نیز کم شده و با کاهش دما عمر قطعه تا شکست ۲ افزایش می یابد. گاهی نیز کرنش ۱٪ طی خزش به عنوان شاخص تعیین مقاومت خزشی آلیاژ مورد استفاده قرار می گیرد. فولاد H13 در گروه فولادهای کربن متوسط کم آلیاژ قرار گرفته و به واسطه خواصی چون مقاومت به دما و تنش بالا، مقاومت به خوردگی داغ و مقاومت به سایش مورد استفاده قرار می گیرد. مقاومت این فولاد در دمای بالا ناشی از حضور کروم بوده زیرا این عنصر با تشکیل فاز کاربیدی پس از عملیات حرارتی، باعث بهبود خواص استحکامی و سختی قطعات می شود.

- ریزساختار این فولاد شامل فاز کاربیدی، جل نشده، در زمینه  
 1. Insitue  
 2. Creep Rupture Life

\* نویسنده مسئول:  
 دکتر سعید ناطق

نشانی: تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مواد.  
 تلفن: ۴۴۸۶۸۴۸۲ (۲۱) ۹۸+

پست الکترونیکی: s.nategh@srbiau.ac.ir

**جدول ۱. مشخصات استاندارد فولاد انتخابی برای تحقیق حاضر [۹]**

استاندارد JIS	استاندارد AISI	شماره استاندارد DIN	مشخصه فولاد Symbol
SKD61	H13	۱/۲۳۴۴	X40CrMoV51

**جدول ۲. ترکیب اسمی آلیاژ منتخب به همراه آنالیز نمونه آلیاژ خریداری شده**

ترکیب	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
اسمی	۰/۳۷ - ۰/۴۳	۰/۸ - ۱/۲	۰/۳ - ۰/۵	۴/۸ - ۵/۵	۱/۲ - ۱/۵	۰/۹ - ۱/۱
آلیاژ خریداری	۰/۴۰۵	۰/۸۵۷	۰/۳۷۷	۴/۹۲	۱/۳۱	۰/۹۳۴

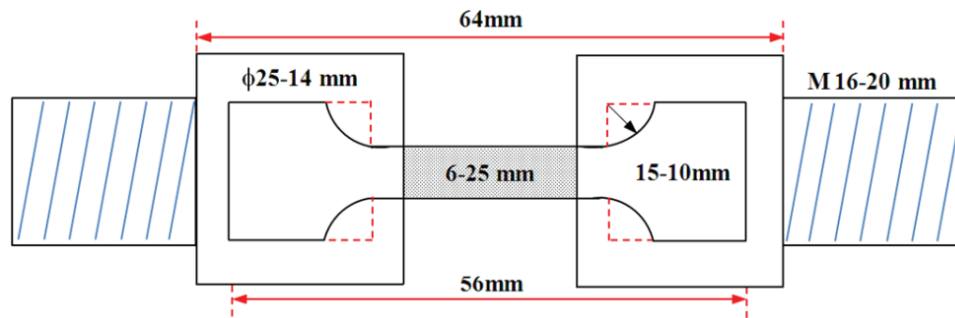
فريتی می‌باشد [۱-۶]. مهم‌ترین مسئله در فولادهای گرمکار، کاهش استحکام و سختی آنها طی کار بوده که عملاً موجب کاهش عمر مفید قطعات ساخته شده از این جنس می‌شود. از این رو در فولادهای مقاوم به خزش، حفظ استحکام و شناخت مکانیزم‌های استحکام بخشی مهم بوده و همواره در تحقیقات مورد بررسی قرار می‌گیرد. کاهش استحکام تابعی از تغییرات ریزساختاری است که حین خزش اتفاق می‌افتد [۷-۹]. آزمون خزشی کوتاه مدت بر روی فولادهای گرمکار معمولاً در بازه دمایی °C ۶۰۰-۵۰۰ و تنش بالاتر از ۷۵۰-۴۰۰ MPa انجام می‌شود. مکانیزم حاکم بر تغییر شکل پلاستیک فولادهای کروم، مولیبدن و وانادیم، خزش نابجائی<sup>۳</sup> بوده و عامل اصلی نرم شدن قطعه زمان، بازیابی دینامیکی<sup>۴</sup> طی خزش در دما و تنش بالا می‌باشد [۱۰]. سختی به عنوان یکی از معیارهای سیلان ماده بوده و سختی سنجی آزمون مکانیکی با ارزش برای مطالعه رفتار الاستیک و پلاستیک آلیاژها محسوب می‌شود. هر چند مقدار سختی دارای معانی و تعبیر مختلفی از جمله مقاومت در برابر نفوذ و یا تنش فشاری متوسط بوده ولی نقطه مشترک همه این تعاریف، تنش لازم برای سیلان پلاستیک ماده<sup>۵</sup> می‌باشد [۱۱، ۱۲]. اگر چه روش‌های مختلفی برای افزایش استحکام بخشی آلیاژها مورد استفاده قرار می‌گیرد ولی استحکام بخشی فولادهای گرمکار معمولاً توسط عملیات حرارتی آنیل، کوئنچ و تمپر انجام می‌شود. این سیکل عملیات حرارتی به واسطه ایجاد یکنواختی در ساختار باعث افزایش مقاومت خزشی آلیاژ می‌شود. تغییرات ساختاری حاصل از بازیابی دینامیکی عامل اصلی در کاهش مقاومت خزشی به ویژه در دما و تنش‌های بالا می‌باشد. کرنش بیشتر و افزایش نرخ کرنش طی خزش از جمله عوامل کاهش عمر قطعه طی خزش در تنش‌های بالا می‌باشد [۱۳-۱۵]. سیکل عملیات حرارتی مذکور به منظور استحکام بخشی فولاد H13 نیز استفاده می‌شود [۱۶، ۱۷]. نتایج یکسری از تحقیقات نشان

## ۲. مواد و روش تحقیق

### مواد

مشخصات فولاد H13 در چند استاندارد مطرح دیگر به

3. Dislocation Creep
4. Dynamic Recovery
5. Plastic Flow Stress



شکل ۱. نقشه شماتیک نمونه و آداپتور. واحدها بر حسب میلیمتر بوده، رقم سمت راست طول، رقم سمت چپ قطر یا عرض و R شعاع انحنا می باشد.

قابلیت برنامه ریزی و مجهز به اتمسفر محافظ گاز آرگون که در مجتمع آزمایشگاهی گروه مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد یزد مستقر است انجام گرفت. با توجه به قابلیت برنامه ریزی این کوره و یکنواختی کامل در شرایط عملیات حرارتی، کلیه نمونه‌ها به صورت تکی و جداگانه تحت عملیات آستنیت، کوئنچ و تمپر قرار گرفتند. هر چند زمان بیشتری صرف شده ولی اطمینان از یکنواختی عملیات حرارتی مذکور این امر را توجیه می نماید. دمای شروع مارتنزیت یا Ms در این آلیاژ ۲۹۳ °C بوده که با استفاده از فرمول‌های تجربی به ازای آستنیت کردن فولاد در منطقه تک فاز محاسبه شد [۳].

$$M_s (^{\circ}C) = 512 - 453(\%C) - 16.9 (\%Ni) + 15 (\%Cr) - 9.5 (\%Mo) + 217 (\%C)^2 - 71.5 (\%C)(\%Mn) - 67.6(\%C)(\%Cr)$$

$$M_s (^{\circ}C) = 512 - 453(0.405) - 16.9 (0.132) + 15 (4.92) - 9.5 (1.31) + 217 (0.405)^2 - 71.5 (0.405)(0.377) - 7.6(0.405)(4.92) = 278 \pm 15 \approx 293 ^{\circ}C$$

دمای شروع تشکیل آستنیت طی گرم کردن ( $A_{c1}$ ) و دمای تکمیل شکل‌گیری آستنیت طی گرم کردن ( $A_{c3}$ ) در آلیاژ H13 با استفاده از فرمول‌های تجربی به صورت زیر محاسبه شد :

$$A_{c3} (^{\circ}C) = 910 - 203(\%C)^{1/2} - 15.2(\%Ni) + 44.7(\%Si) + 104(\%V) + 31.5(\%Mo) + 13.1(\%W)$$

$$A_{c3} (^{\circ}C) = 910 - 203(0.405)^{1/2} - 15.2(0.132) + 44.7(0.857) + 104(0.934) + 31.5(1.31) + 13.1(0.0431) = 956 ^{\circ}C$$

$$A_{c1} (^{\circ}C) = 723 - 10.7 (\%Mn) - 16.9 (\%Ni) + 29.1(\%Si) + 16.9 (\%Cr) + 290 (\%As) + 6.38 (\%W)$$

$$A_{c1} (^{\circ}C) = 723 - 10.7 (0.377) - 16.9 (0.132) + 29.1(0.857) + 16.9 (4.92) + 290 (0.0461) + 6.38 (0.0431) = 838 ^{\circ}C$$

شرح جدول ۱ ارائه می‌شود. ترکیب اسمی آلیاژ منتخب به همراه آنالیز نمونه خریداری شده در جدول ۲ ارائه شده است. آنالیز این نمونه فولاد در مرکز تحقیقات گروه مهندسی مواد دانشگاه آزاد اسلامی واحد یزد انجام شد.

#### آماده سازی نمونه

فولاد H13 در داخل کشور صرفاً به صورت مقطع گرد با حداقل قطر ۱۰۰ میلی متر موجود بود. به منظور تهیه نمونه‌های آزمون خزش و کشش به ترتیب با استانداردهای ASTM E8 و ASTM D6992، در ابتدا صفحاتی به ضخامت ۲/۵ میلیمتر بریده شده و سپس طی یک مرحله سنگ زنی مغناطیسی به ضخامت ۲ میلی متر رسانده شدند. در ادامه تعداد صفحات مورد نظر روی هم قرار گرفته و بعد از محکم شدن، تحت برش و ایرکات قرار گرفته تا بر اساس نقشه استاندارد ASTM نمونه‌های مورد نیاز بریده شوند. با توجه به حساسیت نمونه‌های خزش و به منظور رعایت دقت ابعادی در تهیه این نمونه‌ها، عملیات و ایرکات به صورت یکجا و همزمان بر روی مجموعه ورقه‌ها صورت گرفت. در پایان به منظور رساندن ضخامت به ۱/۵ میلی متر، مرحله دوم عملیات سنگ زنی مغناطیسی بر روی نمونه‌های تهیه شده انجام شد. مجموعه این مراحل ماشینکاری به منظور دستیابی به بالاترین دقت ابعادی ممکن طراحی و اجرا شد. بر اساس استاندارد ASTM E8 طول و عرض منطقه گیج به ترتیب ۲۵ و ۶ میلی متر، پنهان منطقه گریپ حداقل ۱۰ میلی متر (در این تحقیق ۱۵ میلی متر) و ضخامت ۱/۵ میلیمتر در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است به منظور استفاده از دستگاه خزش و کشش دانشکده مهندسی مواد واحد علوم و تحقیقات تهران، فک رابط (آداپتور) نیز طراحی گردید. در شکل ۱ نقشه شماتیک نمونه و آداپتور ارائه شده است.

#### عملیات حرارتی

دمای آستنیت و تمپر به ترتیب ۱۰۵۰ °C و ۵۰۰ °C انتخاب شد. عملیات حرارتی نمونه‌ها با استفاده از کوره اکسایون با

**جدول ۳.** مشخصات تجهیزات مورد استفاده برای آزمون‌های مکانیکی

تجهیزات	نوع آزمایش	دقت مورد نیاز	مشخصات دستگاه
خزش	- آزمون خزش تا شکست - آزمون خزش بدون شکست	- حداکثر دمای لازم $600^{\circ}\text{C}$ - نرخ کرنش کمتر از $10^{-2}$ mm/min	- خزش سنتام مدل SCT-300
کشش سرد	- تعیین استحکام تسلیم	- نرخ کرنش کمتر از $10^{-2}$ mm/min	- کشش یونیورسال مدل GT-7001-LC
سختی سنج	- اندازه‌گیری سختی ویکرز	- دقت $\pm 5$ ویکرز	- سختی یونیورسال Wolpert مدل 722631

**جدول ۴.** مفاهیم انتخابی در کد گذاری نمونه‌ها در تحقیق حاضر

حروف انتخابی برای نامگذاری	عبارت انگلیسی	مفهوم کد انتخابی
TCR	Tempered Creep Rupture sample	آستنیته در دمای $1050^{\circ}\text{C}$ ، کوئنچ در روغن، تمپر در دمای $500^{\circ}\text{C}$ و سپس تحت عملیات خزش تا شکست
TCD	Tempered Creep Ductility sample	آستنیته در دمای $1050^{\circ}\text{C}$ ، کوئنچ در روغن، تمپر در دمای $500^{\circ}\text{C}$ و سپس تحت عملیات خزش با کرنش خزشی ۱٪
TCT (TCR00)	Tempered and Cold Tensioned sample	صرفاً آستنیته در دمای $1050^{\circ}\text{C}$ ، کوئنچ در روغن و تمپر در دمای $500^{\circ}\text{C}$ (بدون عملیات خزش)
UTCD	Universal tension of Tempered Creep Ductility sample	آستنیته در دمای $1050^{\circ}\text{C}$ ، کوئنچ در روغن، تمپر در دمای $500^{\circ}\text{C}$ خزش با کرنش خزشی ۱٪ و آزمون کششی سرد
UM	Universal tension of Martensitic sample	صرفاً آستنیته در دمای $1050^{\circ}\text{C}$ ، کوئنچ در روغن و آزمون کششی سرد

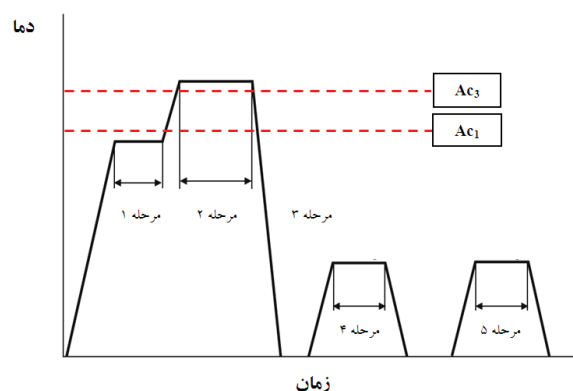
مرحله ۴: تمپر کردن دفعه اول در دمای  $500^{\circ}\text{C}$   
 مرحله ۵: تمپر کردن دفعه دوم در دمای  $500^{\circ}\text{C}$  (مجموع زمان تمپر مرحله اول و دوم ۱۲۰ دقیقه)  
 آزمون‌های مکانیکی شامل خزش کوتاه مدت، کشش و سختی می‌باشند. مشخصات دستگاه‌های مورد استفاده به صورت کامل در جدول ۳ ارائه شده است.

#### کدگذاری نمونه‌ها

برای نامگذاری نمونه‌ها و دقت در انتخاب شرایط آزمایش، از حروف و اعداد برای کد گذاری کلیه نمونه‌ها در این تحقیق استفاده شد. شماره‌های دو تایی در سمت راست هر کد بیانگر میزان تنش و درجه حرارت بکار رفته در آن آزمون خزش می‌باشد. مفاهیم انتخابی در کد گذاری نمونه‌ها در جدول ۴ ارائه شده است.

#### آزمون خزش

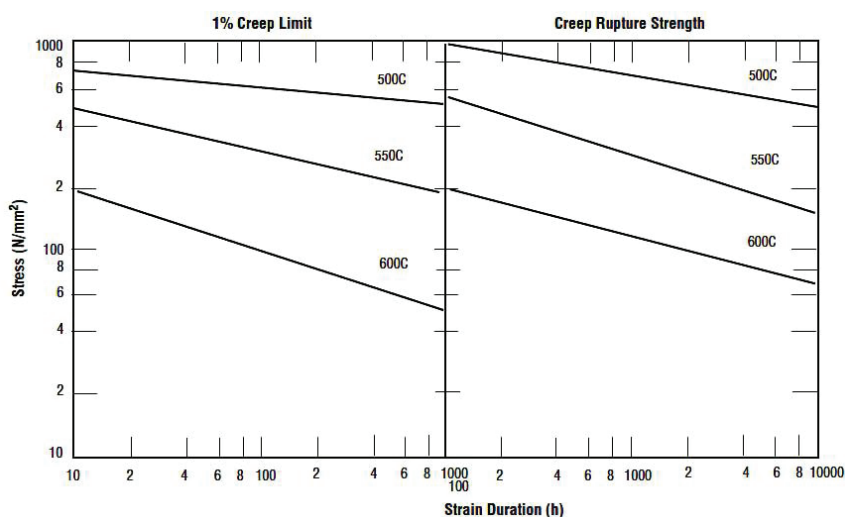
آزمون خزش کوتاه مدت طبق استاندارد ASTM-E139 در دماهای  $500^{\circ}\text{C}$ ،  $550^{\circ}\text{C}$  و  $600^{\circ}\text{C}$  و تنش‌های ۸۷۲-۹۲۶/۵ MPa انجام شد. این آزمون به دو طریق خزش تا شکست (با سری نمونه‌های TCR) و خزش با کرنش ۱٪ (با سری نمونه‌های TCD)


**شکل ۲.** مراحل اجرای عملیات حرارتی آستنیته کردن، کوئنچ و تمپر بر روی در فولاد H13 [۹].

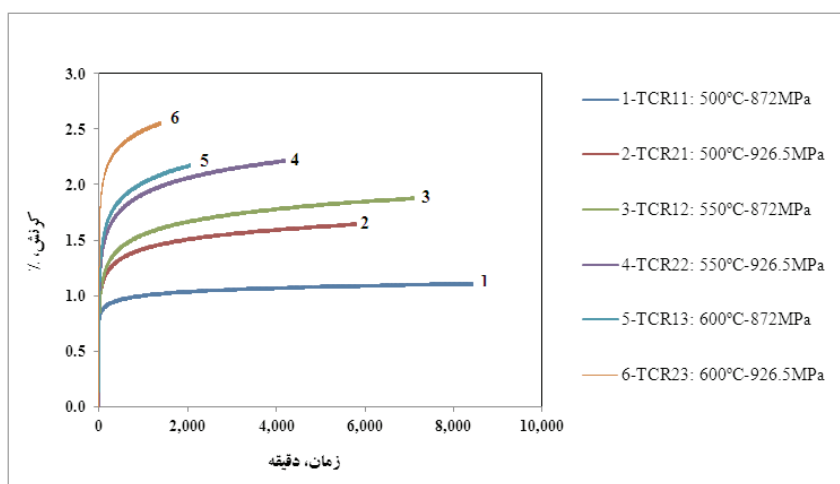
مراحل اجرای عملیات حرارتی آستنیته کردن، کوئنچ و تمپر در شکل ۲ نشان داده می‌شود. مجموعه این عملیات طی ۵ مرحله به شرح زیر انجام شد:

- مرحله ۱: گرم کردن اولیه نمونه تا دمای  $800^{\circ}\text{C}$  - زمان نگهداری در این دما، ۲۰ دقیقه
- مرحله ۲: آستنیته کردن نمونه در دمای  $1050^{\circ}\text{C}$  - زمان نگهداری در این دما، ۶۰ دقیقه
- مرحله ۳: کوئنچ در روغن با دمای  $25^{\circ}\text{C}$

6. Accelerated Tensile Creep



شکل ۳. خواص خزشی فولاد H13 با سختی ۴۴-۴۶. نمودار سمت راست مربوط به شکست و نمودار سمت چپ مربوط به کرنش خزشی ۱٪ این فولاد در دماهای ۵۰۰، ۵۵۰ و ۶۰۰ می‌باشد [۹].



شکل ۴. انطباق منحنی‌های خزش تا شکست نمونه‌های TCR11 الی TCR23 در بازه دمای ۶۰۰-۵۰۰ و تنش ۹۲۶/۵ - ۸۷۲ MPa بدون نمایش منطقه III

سری نمونه‌های UTCD حاصل از آن آزمون، برای سختی سنجی طبق استاندارد ASTM E92-82 در دمای محیط مورد استفاده قرار گرفتند. سختی سنجی با روش ویکرز صورت گرفت تا امکان ثبت تغییرات اندک سختی طی خزش فراهم گردد. روش ویکرز برای تعیین سختی مواد سخت تا نرم مناسب بوده و به خوبی هر گونه تغییر در سختی طی خزش آلیاژ منتخب را اندازه گیری می‌نماید.

### ۳. نتایج و بحث

#### نتایج

#### آزمون خزش تا شکست

شکل ۴ منحنی‌های خزش تا شکست نمونه‌های TCR11 الی TCR23 در بازه دمای ۶۰۰-۵۰۰ و تنش ۹۲۶/۵ - ۸۷۲

به ترتیب برای تعیین زمان و کرنش در خزشی تا شکست و کرنش خزشی ۱٪ طراحی و اجرا گردید. برای این منظور از نمودار مرجع شکل ۳ مربوط به خواص خزشی فولاد H13 با سختی ۴۴-۴۶ راکول C استفاده شد [۳]. در انتهای هر آزمون و پس از خنک شدن محفظه کوره دستگاه خزش، نمونه‌ها از داخل فک خارج شدند. آزمون‌های خزش توسط دستگاه مستقر در آزمایشگاه خواص مکانیکی مواد در مجموعه آزمایشگاهی دانشکده مواد و متالورژی علوم و تحقیقات انجام شدند.

#### آزمون کشش و سختی

آزمون‌های کشش با استفاده از سری نمونه‌های TCD انجام شدند. در ابتدا آزمون کشش طبق استاندارد ASTM-E8 و برای تعیین استحکام تسلیم در دمای اتاق انجام شده سپس

**جدول ۵.** شرایط خزش فولاد H13 در آزمون خزش تا شکست

ردیف	کد نمونه	حداکثر نرخ خزش $S^{-1}$	کرنش تا شکست (%)	زمان شکست (دقیقه)
۶	TCR23	$4.24 \times 10^{-04}$	۳۵/۱۴	۱۳۸۰
۵	TCR13	$1.26 \times 10^{-04}$	۱۵/۴۶	۲۰۴۰
۴	TCR22	$4.19 \times 10^{-05}$	۱۰/۷۱	۴۲۶۰
۳	TCR12	$2.02 \times 10^{-05}$	۹/۰۰	۷۴۴۰
۲	TCR21	$1.46 \times 10^{-05}$	۵/۰۰	۵۷۰۰
۱	TCR11	$1.37 \times 10^{-05}$	۷/۱۴	۸۷۰۰

**جدول ۶.** توان خزشی فولاد H13 در دماهای ۵۰۰، ۵۵۰ و ۶۰۰ و بازه تنش ۸۷۲-۹۲۶/۵ MPa

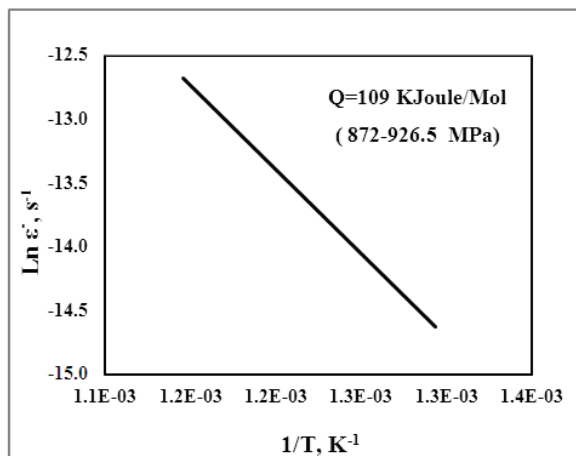
مکانیزم خزش	ضریب ثابت خزش پایدار $A(S^{-1})$	n	متوسط نرخ خزش پایدار $\dot{\epsilon}(S^{-1})$	دما (°C)	تنش (MPa)
خزش نابجائی	$6.5 \times 10^{-55}$	۴۵/۵	$3.66 \times 10^{-06}$	۶۰۰	۸۷۲-۹۲۶/۵
	$8.9 \times 10^{-55}$	۳۹/۵	$1.52 \times 10^{-06}$	۵۵۰	
	$4.1 \times 10^{-55}$	۳۷/۵	$5.24 \times 10^{-07}$	۵۰۰	

کرنش ۱٪ طی خزش کاهش یافته که بر روی کارکرد قطعه تاثیر می‌گذارد. منطقه سوم خزش با تغییر فرم پلاستیک زیاد طی مدت زمان بسیار کوتاه منجر به شکست نمونه‌ها شده که در این نمودار انطباقی نمایش داده نشده است.

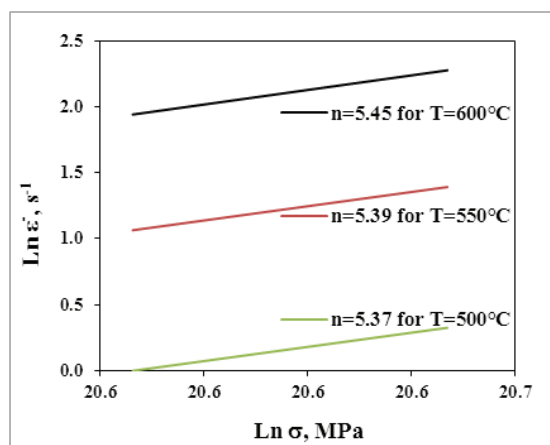
جدول ۵ به طور خلاصه شرایط خزش فولاد H13 در آزمون خزش تا شکست را نشان می‌دهد. از ردیف ۱ الی ۶، دما و تنش به ترتیب از ۵۰۰ °C و ۸۷۲ MPa تا ۶۰۰ °C و ۹۲۶/۵ MPa افزایش یافته است. زمان و کرنش تا شکست به ترتیب از ۸۷۰۰ دقیقه و ۱۴/۷ درصد تا ۱۳۸۰ دقیقه و ۳۵/۱۴ درصد تغییر کرده است. بیشترین نرخ کرنش مربوط سرعت خزش پایدار معادل  $4.24 \times 10^{-04}$  بر ثانیه در دمای ۶۰۰ °C و تنش ۹۲۶/۵ MPa می‌باشد. تحت این شرایط، کوتاه‌ترین زمان شکست ۱۳۸۰ دقیقه و بالاترین میزان کرنش معادل ۳۵/۱۴ درصد است. با استفاده از سری آزمون‌های خزش تا شکست، تغییرات زمان و کرنش خزشی ۱٪ به ترتیب از ۱۶۸۰ دقیقه و ۱/۰۲۸ درصد تا ۵۹۰ دقیقه و ۲/۴۰ درصد تعیین گردید. در این جدول جزئیات خزش تا شکست نمونه‌ها به منظور امکان بررسی تغییر میزان کرنش تا شکست نهایی تابعی از نرخ کرنش طی خزش ارائه شده است. نرخ کرنش بیشتر که در دما و تنش بالاتر ایجاد شده موجب افزایش میزان کرنش گردیده است. از طرفی نتایج بیانگر آن است که افزایش نرخ کرنش تحت شرایط مذکور با کاهش زمان شکست همراه می‌باشد. به عبارتی، با کاهش دما و تنش، طول عمر نمونه‌ها طی خزش افزایش یافته و کرنش کمتری نیز در آنها ایجاد می‌شود. لازم به ذکر است که در این تحقیق، زمان رسیدن به کرنش ۱٪ برای طراحی سری آزمون‌های خزش بدون شکست مورد استفاده قرار گرفت.

را نشان می‌دهد. حداقل نرخ کرنش مربوط به خزش پایدار در این نمونه‌ها بین  $1.02 \times 10^{-05}$  الی  $16.78 \times 10^{-05}$  است. حداکثر نرخ کرنش مربوط به میزان کرنش تا شکست بین  $1.46 \times 10^{-05}$  الی  $2.24 \times 10^{-04}$  می‌باشد. زمان شکست این نمونه‌ها بین ۸۷۰۰ الی ۱۳۸۰ دقیقه و میزان کرنش تا شکست بین ۵/۰۰ الی ۳۵/۱۴ درصد است. میزان کرنش خزشی ۱٪<sup>v</sup> و زمان رسیدن به این کرنش به ترتیب بین ۱/۰۲۸ الی ۲/۴۰ درصد و بین ۱۶۸۰ الی ۵۹۰ دقیقه می‌باشد. مجموعه نمونه‌های خزش پس از آستنیته در دمای ۱۰۵۰ °C، کونچ در محیط روغن و سپس تمپر در دمای ۵۰۰ °C تهیه شده‌اند. هدف از انجام این آزمون تعیین زمان رسیدن تا منطقه سوم خزش و نیز محاسبه حداکثر نرخ کرنش در منطقه دوم خزش بود. در منطقه اول خزش که مربوط به کرنش الاستیک اولیه نمونه در شروع آزمایش بوده با افزایش تنش اعمالی، مقدار کرنش الاستیک نیز افزایش نشان می‌دهد. در تمام نمونه‌ها مشاهده می‌شود که نرخ کرنش در مرحله اول خزش زیاد بوده و پس از ورود به منطقه دوم از میزان آن کاسته می‌شود. به عبارتی در منطقه دوم، شرایط خزش پایدار حاکم بوده است. لازم به ذکر است که به ازای دما و تنش پائین‌تر، منطقه دوم خزش زمان بیشتری را به خود اختصاص داده یا به عبارتی، با افزایش دما و تنش زمان خزش پایدار کوتاه‌تر شده است. از آنجایی که افزایش دما و تنش موجب افزایش نرخ کرنش در منطقه دوم و کاهش زمان خزش پایدار در نمونه‌ها شده می‌توان چنین بیان نمود که با افزایش نرخ کرنش، طول عمر خزشی نمونه‌ها کمتر شده و سریعتر به منطقه سوم خزش وارد می‌شوند. از طرفی تحت شرایط مذکور، زمان رسیدن به

7. -1% Creep ductility



شکل ۶. نمودار لگاریتمی سرعت خزش مرحله دوم بر حسب  $1/T$ ، برای تعیین انرژی فعال سازی در بازه تنش  $۸۷۲ - ۹۲۶/۵$  MPa و دماهای  $۵۰۰$ ،  $۵۵۰$  و  $۶۰۰$  °C



شکل ۵. نمودار لگاریتمی سرعت خزش مرحله دوم بر حسب لگاریتم تنش برای تعیین توان خزشی در دماهای  $۵۰۰$ ،  $۵۵۰$  و  $۶۰۰$  °C و بازه تنش  $۸۷۲ - ۹۲۶/۵$  MPa

جدول ۷. انرژی فعال سازی فولاد H13 در بازه تنش  $۸۷۲ - ۹۲۶/۵$  MPa و دماهای  $۵۰۰$ ،  $۵۵۰$  و  $۶۰۰$  °C

تنش (MPa)	دما (°C)	متوسط نرخ خزش پایدار $\dot{\epsilon}$ ( $s^{-1}$ )	n	انرژی فعال سازی Q (KJoule/Mol)
۸۷۲-۹۲۶/۵	۶۰۰	$3.66 \times 10^{-06}$	۴۵/۵	۱۰۹
	۵۵۰	$1.52 \times 10^{-06}$	۳۹/۵	
	۵۰۰	$5.24 \times 10^{-07}$	۳۷/۵	

در بازه دمایی  $۵۰۰ - ۶۰۰$  °C و تنش  $۸۷۲ - ۹۲۶/۵$  MPa با محاسبه شیب منحنی شکل ۶ مقدار انرژی فعال سازی این فولاد  $۱۰۹$  کیلوژول بر مول تعیین گردید. از آنجایی که انرژی فعال سازی تابعی از تنش اعمالی نیز می باشد لذا این مقدار از انرژی ناشی از تنش بالائی است که در حین خزش بر نمونه ها اعمال شده است. با افزایش تنش نوع تعامل بین نابجائی ها با هم و با موانع ریزساختاری تغییر می کند، لذا ثابت بودن انرژی فعال سازی در این بازه تنش نشان دهنده عدم تغییر رفتار نابجائی ها در شرایط دما و تنش اعمالی حاضر می باشد. اندازه گیری انرژی فعال سازی لازم بوده چرا که ثبت تغییرات آن نسبت به تنش برای مطالعه رفتار خزشی آلیاژ در دما و تنش مختلف مفید می باشد.

#### آزمون خزش تا کرنش ۱%

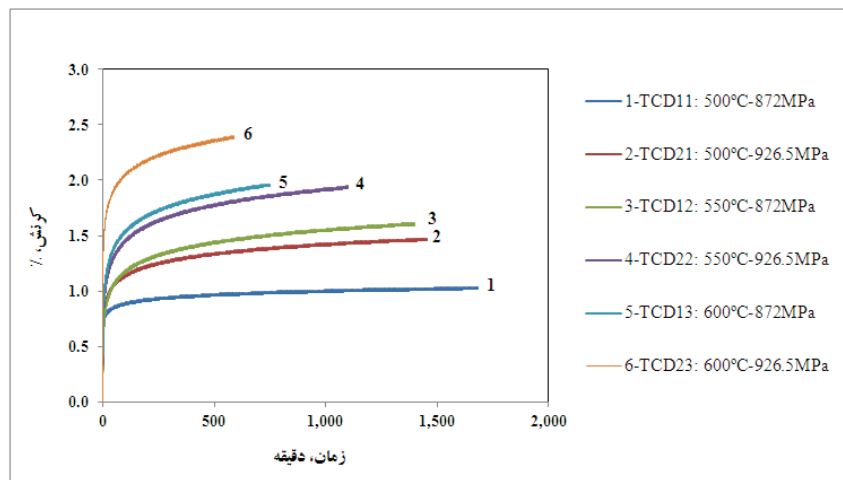
شکل ۷ منحنی های خزش نمونه های TCD11 الی TCD23 در بازه دمای  $۵۰۰ - ۶۰۰$  °C و تنش  $۸۷۲ - ۹۲۶/۵$  MPa را نشان می دهد. زمان خزش در این آزمایش ها بر اساس زمان کرنش خزشی ۱% محاسبه شده از آزمون خزشی شکست TCR11 الی TCR23 در نظر گرفته شده است. حداقل نرخ کرنش در منطقه خزش پایدار این نمونه ها بین  $1.02 \times 10^{-5} S^{-1}$  الی  $16.78 \times 10^{-5} S^{-1}$  می باشد. زمان آزمایش بر روی این نمونه ها

با رسم نمودار لگاریتم سرعت خزش مرحله دوم بر حسب لگاریتم تنش در دماهای مختلف و محاسبه شیب منحنی های حاصله، مقدار توان خزشی یا n که بیانگر مکانیزم حاکم بر خزش بوده مشخص گردید. توان خزشی فولاد منتخب در جدول ۶ و شکل ۵ ارائه شده است.

در بازه دمایی  $۵۰۰$ ،  $۵۵۰$  و  $۶۰۰$  °C شیب منحنی به ترتیب  $۵/۳۷$ ،  $۵/۳۹$  و  $۵/۴۵$  بدست آمده که مقدار متوسط آن  $۵/۴۰$  می باشد. این موضوع بیانگر آن است که در محدوده دما و تنش مذکور، مکانیزم حاکم خزش نابجائی بوده و تغییری در آن مکانیزم هم ایجاد نشده است. نتیجه حاصل نشان دهنده اهمیت آماده سازی یکنواخت نمونه ها برای خزش می باشد زیرا هر گونه تفاوتی در ریزساختار نمونه ها، بر تحرک نابجائی ها و مکانیزم خزش تاثیر خواهد گذاشت. به عبارتی هر گونه تغییرات ریزساختاری حاصل از عملیات حرارتی و یا کرنش در این نمونه ها که منجر به افزایش تحرک نابجائی ها شود کاهش استحکام را به همراه خواهد داشت.

با ترسیم مقادیر سرعت خزشی مرحله دوم بر حسب  $1/T$  (T بر حسب درجه کلوین) منحنی هایی بدست آمد که در آن شیب هر خط مقدار  $Q/R$  را مشخص می کند. با محاسبه این شیب و مساوی قرار دادن آن با  $Q/R$ ، یا انرژی فعال سازی فولاد منتخب محاسبه گردید که در جدول ۷ و شکل ۶ ارائه شده است.





شکل ۷. انطباق منحنی‌های خزش نمونه‌های TCD11 الی TCD23 در بازه دمایی ۶۰۰ - ۵۰۰ °C و تنش ۹۲۶/۵ - ۸۷۲ MPa بدون ایجاد شکست در نمونه. زمان خزش در این آزمایش بر اساس زمان کرنش خزشی ۱٪ محاسبه شده از آزمون‌های خزشی شکست TCR11 الی TCR23 لحاظ گردیده است.

جدول ۸. شرایط خزش فولاد H13 در آزمون خزش بدون شکست

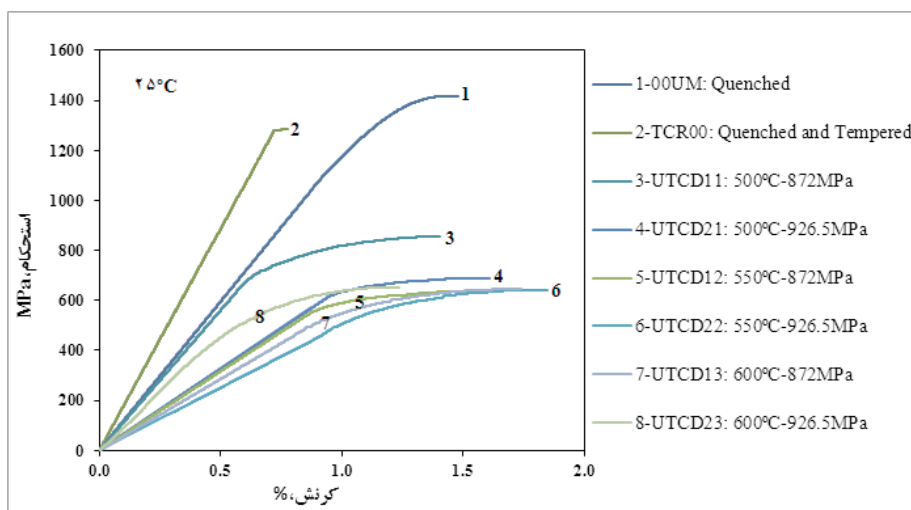
ردیف	کد نمونه	حداقل نرخ خزش $S^{-1}$	کرنش خزشی ۱٪ (%)	زمان کرنش خزشی ۱٪ (دقیقه)
۶	TCD23	$6.78 \times 10^{-05}$	۴۰۰/۲	۵۹۰
۵	TCD13	$4.41 \times 10^{-05}$	۹۷۲/۱	۷۴۶
۴	TCD22	$2.95 \times 10^{-05}$	۹۴/۱	۱۰۹۶
۳	TCD12	$1.91 \times 10^{-05}$	۶۰۸/۱	۱۴۰۰
۲	TCD21	$1.86 \times 10^{-05}$	۴۴۸/۱	۱۴۵۰
۱	TCD11	$1.02 \times 10^{-05}$	۰۲۸/۱	۱۶۸۰

آن صرف شده یا به عبارتی، با افزایش نرخ کرنش، قطعه در زمان کوتاه‌تری به کرنش ۱٪ می‌رسد. با توجه به لزوم عدم وقوع شکست طی خزش قطعات صنعتی در دما و تنش بالا، کرنش ۱٪ در طراحی چنین قطعاتی دارای اهمیت بوده و به همین علت در تحقیق حاضر لحاظ شده است.

جدول ۸ شرایط خزش فولاد H13 در آزمون خزش بدون شکست را به طور خلاصه نشان می‌دهد.

از ردیف ۱ الی ۶، دما و تنش به ترتیب از ۵۰۰ °C و ۸۷۲ MPa تا ۶۰۰ °C و ۹۲۶/۵ MPa افزایش یافته است. بیشترین نرخ کرنش برابر  $6.78 \times 10^{-05}$  بر ثانیه در دمای ۶۰۰ °C و ۹۲۶/۵ MPa می‌باشد. تحت شرایط مذکور کمترین زمان کرنش خزشی ۱٪ ۵۹۰ دقیقه و بالاترین میزان کرنش خزشی ۱٪ معادل ۲/۴۰۰ درصد است. کمترین نرخ کرنش برابر  $1.02 \times 10^{-05}$  بر ثانیه و در دمای ۵۰۰ °C و ۸۷۲ MPa می‌باشد. تحت شرایط مذکور بیشترین زمان خزشی ۱٪ معادل ۱۶۸۰ دقیقه و کمترین میزان کرنش خزشی ۱٪

بین ۱۶۸۰ الی ۵۹۰ دقیقه و میزان کرنش الاستیک حاصله بین ۱/۰۲۸ الی ۲/۴۰۰ درصد است. تفاوت مشهود شامل کاهش زمان تا کرنش خزشی ۱٪، افزایش میزان کرنش الاستیک اولیه و همچنین کرنش منطقه اول خزش می‌باشد. مجموعه نمونه‌های این بخش از آزمون‌های خزش پس از آستنیته در دمای ۱۰۵۰ °C، کوئنچ در محیط روغن و سپس تمپر در دمای ۵۰۰ °C تهیه شده‌اند. هدف از انجام آنها اعمال دما و تنش تا رسیدن به کرنش ۱٪ طی خزش بود. در این نمونه‌ها نیز منطقه اول خزش که مربوط به کرنش الاستیک اولیه در شروع آزمایش بوده با افزایش تنش اعمالی مقدار کرنش الاستیک بیشتری از خود نشان می‌دهد. زمان بر اساس نتایج حاصل از آزمون خزش تا شکست تا رسیدن به کرنش ۱٪ محاسبه و لحاظ گردید. به ازای دما و تنش بالاتر، کرنش ۱٪ طی خزش افزایش و زمان رسیدن به آن کاهش یافته است. این بدان معنی است که با کاهش دما و تنش، میزان کرنش مذکور کاهش یافته و زمان بیشتری برای رسیدن به



شکل ۸. انطباق منحنی‌های تنش - کرنش مهندسی نمونه‌های 00UM، TCR00 و نمونه‌های UTCD11 الی UTCD23 در دمای محیط. نمونه‌های TCD11 الی TCD23 محصول آزمون خزش بدون شکست با توجه به زمان کرنش خزشی ۱٪ نمونه‌ها در بازه دمای ۶۰۰-۵۰۰ °C و تنش ۹۲۶/۵ - ۸۷۲ MPa می‌باشند.

شده برای این آزمون شامل نمونه‌های آستنیت‌ه و کوئنچ شده، آستنیت‌ه، کوئنچ و تمپر شده و نمونه‌های آستنیت‌ه، کوئنچ و تمپر شده است که تحت خزش بدون شکست تهیه شده‌اند. عملیات آستنیت‌ه در دمای ۱۰۵۰ °C، کوئنچ در محیط روغن و سپس تمپر در دمای ۵۰۰ °C انجام شده‌اند. با استفاده از منحنی‌های تنش - کرنش، استحکام تسلیم، مدول الاستیک و استحکام کشش نهایی این نمونه اندازه‌گیری شده است. با افزایش دما و تنش طی آزمون خزش و بیشتر شدن نرخ کرنش، استحکام تسلیم نمونه‌ها سیر نزولی از خود نشان می‌دهد. این امر به علت استحاله‌های ساختاری است که تحت تمپر و نیز بازیابی دینامیکی اتفاق می‌افتد. از طرفی با افزایش نرخ کرنش در نمونه‌های خزش بدون شکست، استحکام نهایی نیز سیر نزولی از خود نشان می‌دهد. هرچند در این شرایط دما و تنش، کرنش الاستیک با کاهش همراه می‌باشد ولی در برخی از نمونه‌ها تابعی از شرایط خزش اعمالی، مقداری افزایش نیز از خود نشان می‌دهند. این در حالی است که مدول الاستیک نیز با افزایش نرخ کرنش طی خزش نمونه‌ها کاهش یافته هرچند که در شرایط دما و تنش خاص، مقداری افزایش نیز نشان می‌دهد. مجموع نتایج آزمون کشش بیانگر آنست که طی خزش روند کلی خواص استحکامی آلیاژ رو به کاهش بوده که این امر به ویژه در خصوص استحکام تسلیم، به مفهوم افزایش سیلان ماده و کاهش عمر قطعه طی خزش می‌باشد. لذا کنترل و ثبت تغییرات خواص استحکامی در کنار مقدار سختی در تخمین دقیقتر عمر خزشی آلیاژ لازم می‌باشد.

جدول ۹ به طور خلاصه نتایج آزمون کشش بر روی نمونه‌های حاصل از آزمون‌های بدون شکست را نشان می‌دهد. بارزترین تغییرات در نتایج آزمون کشش، کاهش مدول الاستیک و افزایش میزان کرنش نهایی نمونه در بازه

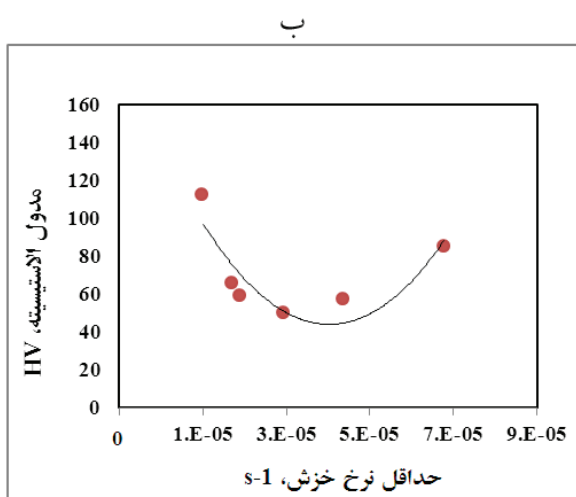
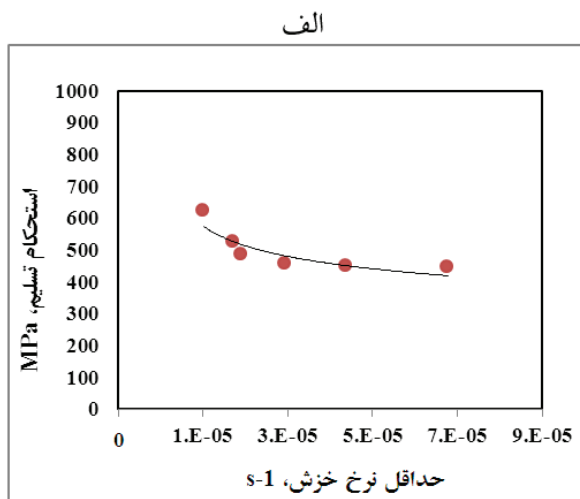
معادل ۱/۰۲۸ درصد است. جدول ۸ جزئیات خزش بدون شکست و خزش تا کرنش ۱٪ را ارائه می‌نماید. این آزمون به منظور بررسی نمونه‌ها تا کرنش ۱٪ تابعی از نرخ کرنش طی خزش ارائه شده است. نرخ کرنش بیشتر که در دما و تنش بالاتر ایجاد شده موجب کاهش زمان رسیدن به کرنش ۱٪ گردیده است. این نتایج همچنین نشان می‌دهند که افزایش نرخ کرنش با افزایش میزان کرنش خزشی ۱٪ همراه می‌باشد. نتایج حاصل بیانگر آن هستند که با کاهش دما و تنش طول عمر نمونه‌ها طی خزش با شاخص کرنش ۱٪ افزایش می‌یابد.

### آزمون کشش

شکل ۸ منحنی تنش - کرنش مهندسی نمونه‌های 00UM، TCR00 و نمونه‌های UTCD11 الی UTCD23 در دمای محیط را نشان می‌دهد. نمونه‌های TCD11 الی TCD23 محصول آزمون خزش بدون شکست با توجه به زمان کرنش خزشی ۱٪ نمونه‌ها در بازه دمای ۶۰۰-۵۰۰ °C و تنش ۹۲۶/۵ - ۸۷۲ MPa می‌باشند. زمان آزمایش خزش بدون شکست بر روی این نمونه‌ها بین ۱۶۸۰ الی ۵۹۰ دقیقه و میزان کرنش حاصله بین ۱/۰۲۸ الی ۲/۴۰ درصد می‌باشد (نمونه‌های TCD11 الی TCD23). استحکام تسلیم، مدول الاستیک و استحکام کشش نهایی این نمونه با استفاده از نمودار تنش - کرنش آنها اندازه‌گیری شده است. بازه تغییرات استحکام تسلیم و استحکام کششی در این نمونه‌ها به ترتیب بین ۴۴۵-۱۲۷۸ MPa و ۶۵۰-۱۲۸۵ MPa می‌باشد. حداکثر و حداقل مدول الاستیک آنها به ترتیب  $177 \times 10^3$  MPa و  $50 \times 10^3$  MPa است. حداکثر و حداقل کرنش الاستیک به ترتیب ۱۰/۹ و ۲۴/۵ و کرنش شکست آنها به ترتیب معادل  $(10^{-3} \times 17/62)$  و ۱۲/۴۰ می‌باشد. مجموعه نمونه‌های تهیه

جدول ۹. نتایج آزمون کشش بر روی نمونه‌های خزش بدون شکست

نمونه	استحکام تسلیم (MPa)	مدول یانگ (MPa $\times 10^3$ )	کرنش الاستیک ( $\times 10^{-1}$ %)	استحکام نهایی (MPa)	کرنش شکست ( $\times 10^{-1}$ %)
UTCD23	۴۴۵	۸۵	۵/۲۴	۶۵۰	۱۲/۴۰
UTCD 13	۴۵۰	۵۷	۷/۸۹	۶۴۴	۱۷/۴۳
UTCD 22	۴۵۵	۵۰	۹/۱۰	۶۴۱	۱۷/۶۲
UTCD 12	۴۸۵	۵۸	۸/۳۶	۶۴۵	۱۶/۳۵
UTCD 21	۵۲۰	۶۵	۸/۰۰	۶۸۷	۱۶/۰۸
UTCD 11	۶۲۰	۱۱۲	۵/۵۴	۸۵۶	۱۴/۰۳
TCR00	۱۲۷۸	۱۷۷	۷/۲۲	۱۲۸۵	۷/۷۸
00UM	۱۱۱۰	۱۱۹	۹/۳۳	۱۴۱۶	۱۴/۷۸



شکل ۹. الف) نمودار استحکام تسلیم (ب) نمودار مدول الاستیک بر حسب حداقل نرخ کرنش طی خزش در نمونه‌های UTCD

خاصی از دما و تنش و افزایش آن در بازه دیگری از دما و تنش می‌باشد. نتایج بیانگر کاهش پیوسته استحکام تسلیم و کاهش استحکام کششی نهایی در بازه‌ای از دما و تنش است. در این جدول نتایج مربوط به نمونه اولیه آستنیت در دمای  $1050^{\circ}\text{C}$  و کوئنچ در روغن، نمونه شاهد آستنیت در دمای  $1050^{\circ}\text{C}$  و کوئنچ در روغن و تمپر شده در دمای  $500^{\circ}\text{C}$  نیز ارائه شده است.

شکل ۹- الف نمودار استحکام تسلیم بر حسب حداقل نرخ کرنش طی خزش نمونه‌های UTCD را نشان می‌دهد. بیشترین استحکام تسلیم در نمونه‌های خزش بدون شکست با دمای  $500^{\circ}\text{C}$  و تنش  $872\text{ MPa}$  مشاهده شده و معادل  $620\text{ MPa}$  می‌باشد. کمترین استحکام تسلیم در نمونه‌های خزش بدون شکست مربوط به نمونه‌های خزشی تحت دمای  $600^{\circ}\text{C}$  و تنش  $926/5\text{ MPa}$  بوده و معادل  $445\text{ MPa}$  است. استحکام نمونه‌های عملیات حرارتی شده قبل از خزش معادل  $1278\text{ MPa}$  می‌باشد. شکل ۹- ب نمودار مدول الاستیک بر حسب حداقل نرخ کرنش طی خزش در نمونه‌های UTCD را نشان می‌دهد. بیشترین مدول الاستیک در نمونه‌های خزش بدون شکست با دمای  $500^{\circ}\text{C}$  و تنش  $872\text{ MPa}$  بوده و معادل  $112 \times 10^3\text{ MPa}$  می‌باشد. کمترین مدول الاستیک در نمونه‌های خزش بدون شکست مربوط به نمونه‌های خزشی تحت دمای  $550^{\circ}\text{C}$  و تنش  $926/5\text{ MPa}$  بوده و معادل  $50 \times 10^3\text{ MPa}$  است. مدول الاستیک نمونه‌های عملیات حرارتی شده قبل از خزش معادل  $177 \times 10^3\text{ MPa}$  می‌باشد. با افزایش دما میزان مدول الاستیک مجدداً افزایش یافته و به  $600^{\circ}\text{C}$  و تنش‌های  $872\text{ MPa}$  و  $926/5$  به ترتیب معادل  $85 \times 10^3$  و  $57 \times 10^3\text{ MPa}$  می‌باشد. این سری از نمونه‌ها در ابتدا تحت آستنیت در دمای  $1050^{\circ}\text{C}$ ، کوئنچ در روغن و سپس تمپر در دمای  $500^{\circ}\text{C}$  قرار گرفته و سپس آزمون‌های خزش بدون شکست و تا کرنش ۱٪ بر روی آنها انجام شده است. مهمترین عوامل در این بخش، استحکام تسلیم و مدول

جدول ۱۰. نتایج آزمون سختی بر روی نمونه‌های خزش بدون شکست و خزش تا شکست

نمونه	سختی گیج (HV)	سختی سر (HV)	نمونه	سختی گیج (HV)	سختی سر (HV)
TCR23	۱۸۰	۲۷۱	TCD23	۲۵۷	۳۰۷
TCR13	۲۱۷	۲۷۲	TCD 13	۲۶۰	۳۱۲
TCR22	۲۱۹	۲۷۳	TCD 22	۲۶۳	۳۱۵
TCR12	۲۳۶	۲۷۸	TCD 12	۲۸۰	۳۳۲
TCR21	۲۵۰	۲۸۵	TCD 21	۳۰۰	۳۵۰
TCR11	۳۰۵	۳۱۴	TCD 11	۳۶۲	۴۰۰
TCR00	۶۴۴	۶۴۴			
00UM	۵۴۹	۵۴۹			

TCD (خزش بدون شکست) نسبت به نمونه‌های TCR (خزش تا شکست) بسیار کمتر است. در نمونه‌های خزش بدون شکست نیز بیشترین میزان کاهش سختی به ازای بالاترین نرخ کرنش تحت دمای  $600^{\circ}\text{C}$  و تنش  $926/5\text{ MPa}$  می‌باشد. در سری نمونه‌های TCD، به ازای دمای  $500^{\circ}\text{C}$  و تنش  $872\text{ MPa}$ ، سختی گیج و سر به ترتیب  $362$  و  $400$  ویکرز است. به ازای دمای  $600^{\circ}\text{C}$  و تنش  $926/5\text{ MPa}$ ، سختی گیج و سر به ترتیب  $257$  و  $307$  ویکرز می‌باشد. سختی اولیه نمونه‌های عملیات حرارتی شده قبل از خزش معادل  $644$  ویکرز است. در این بخش برای مطالعه تغییرات سختی، مجموعه‌ای از نمونه‌های خزش تا شکست و خزش بدون شکست استفاده شد. افزایش دما و تنش طی خزش بر روی میزان سختی در هر دو قسمت سر و گیج تاثیر گذاشته است. هرچند در قسمت سر، عامل اصلی دمای اعمالی بوده و اثر کمتری از کرنش در آن بخش مشاهده می‌شود ولی در قسمت گیج، تاثیر توام دمای بالا و کرنش حاصل از تنش بالا، به صورت مشهودی باعث تغییر در خواص به ویژه سختی شده است. به ازای دمای و تنش بالاتر از میزان سختی نمونه کاسته شده ولی کاهش سختی در قسمت گیج در مقایسه با سر نمونه بیشتر می‌باشد.

شکل ۱۰- الف نمودار سختی در مقیاس ویکرز بر حسب نرخ کرنش در نمونه‌های TCR را نشان می‌دهد. به ازای دمای  $600^{\circ}\text{C}$  و تنش  $926/5\text{ MPa}$  بیشترین نرخ خزشی معادل  $6.78 \times 10^{-5}$  بر ثانیه مشاهده می‌شود. به ازای دمای  $500^{\circ}\text{C}$  و تنش  $872\text{ MPa}$  کمترین نرخ خزشی معادل  $1.02 \times 10^{-5}$  بر ثانیه مشاهده می‌شود. در هر دو بخش گیج و سر با افزایش نرخ کرنش، میزان سختی کاهش یافته است. مقدار متوسط سختی گیج نسبت به بخش سر نمونه کمتر بوده و با افزایش نرخ خزش، گیج کاهش سختی بیشتری نسبت به سر را نشان می‌دهد. بیشترین میزان کاهش سختی به ازای خزش تحت دمای  $600^{\circ}\text{C}$  و تنش  $926/5\text{ MPa}$  می‌باشد. به ازای کمترین

الاستیک بوده که تابعی از نرخ کرنش طی آزمون خزش مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. هر چند افزایش نرخ کرنش تابعی از دما و تنش بالاتر با کاهش استحکام تسلیم همراه بوده ولی گاهی حسب دما و تنش خاص، افزایش جزئی نشان داده است. این پدیده در ارتباط با تغییرات ساختاری است که با گذشت زمان خزش ناشی از تمپر و یا بازیابی دینامیکی ظاهر می‌شوند. در خصوص مدول الاستیک نیز شرایط مشابهی حاکم بوده به صورتی که مدول الاستیک با افزایش نرخ کرنش طی خزش کاهش یافته هر چند در محدوده هائی از دما و تنش، مختصری افزایش داشته است. این نتایج مبین آن هستند که با افزایش نرخ کرنش طی خزش در دما و تنش‌های بالاتر، رفتار استحکامی به گونه‌ای تغییر می‌کند که تضعیف خواص استحکامی و افزایش سیلان ماده را به همراه خواهد داشت. به عبارتی تخمین دقیقتر عمر باقیمانده خزشی می‌تواند با استفاده از ثبت و کنترل تغییر خواص استحکامی انجام شود.

### سختی سنجی

جدول ۱۰ نتایج سختی در مقیاس ویکرز در دو بخش گیج و سر در نمونه‌های خزش سری TCR و TCD را نشان می‌دهد. دما و تنش اعمالی به ترتیب از  $500^{\circ}\text{C}$  و  $872\text{ MPa}$  تا  $600^{\circ}\text{C}$  و  $926/5\text{ MPa}$  افزایش یافته است. در هر دو بخش گیج و سر با افزایش دما و تنش میزان سختی کاهش یافته است. مقدار متوسط سختی گیج نسبت به بخش سر نمونه کمتر بوده و با افزایش دما و تنش، گیج کاهش بیشتری در سختی نسبت به سر نشان می‌دهد. بیشترین میزان کاهش سختی به ازای دمای  $600^{\circ}\text{C}$  و تنش  $926/5\text{ MPa}$  می‌باشد. در سری نمونه‌های TCR (خزش تا شکست) به ازای دمای  $500^{\circ}\text{C}$  و تنش  $872\text{ MPa}$ ، سختی گیج و سر به ترتیب  $305$  و  $314$  ویکرز است. به ازای دمای  $600^{\circ}\text{C}$  و تنش  $926/5\text{ MPa}$ ، سختی گیج و سر به ترتیب  $180$  و  $271$  ویکرز می‌باشد. لازم به ذکر است تغییرات سختی در بخش سر نمونه‌های

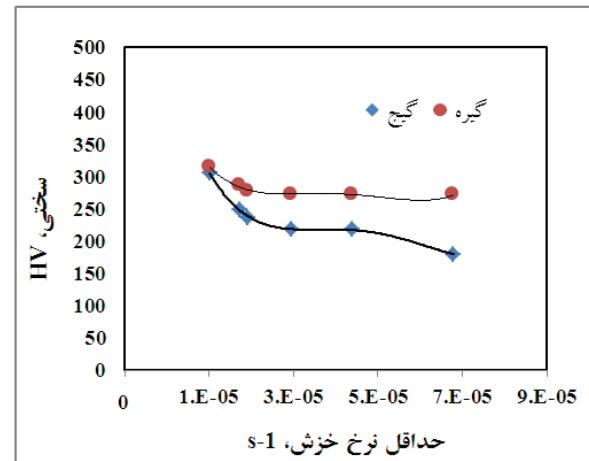
ازای بیشترین میزان نرخ کرنش معادل  $6.78 \times 10^{-05}$  بر ثانیه، سختی گیج و سر به ترتیب ۲۵۷ و ۳۰۷ ویکرز می‌باشد. تفاوت عمده بین سر و گیج نمونه‌ها، در میزان کرنش حاصل از خزش می‌باشد. منطقه گیج که عملاً منطقه اصلی تغییر طول نمونه خزش می‌باشد بالاترین میزان کرنش و نیز نرخ کرنش را دارا می‌باشد. البته مقادیر مذکور تابعی از دما و تنش بوده و بالاترین حدود خود را به ازای دما و تنش بیشتر نشان می‌دهند. بررسی تغییرات سختی تابعی از نرخ کرنش طی خزش این نمونه‌ها، مبین آن است که تغییرات سختی در همه محدوده‌ها یکسان نبوده و بسته به نرخ کرنش تفاوت‌هایی را دارا می‌باشد. تفاوت در میزان کرنش و نرخ کرنش بین نمونه‌های خزش بدون شکست و با کرنش ۱٪ طی آزمون خزش نیز بر روی پروفیل تغییرات سختی تاثیر می‌گذارد. به صورتی که در نمونه‌های خزش بدون شکست که دارای نرخ کرنش پائین‌تری می‌باشند سختی به میزان کمتری کاهش یافته است. به عبارتی بیشترین میزان کاهش در سختی در نمونه‌های خزش تا شکست مشاهده شده که عملاً دارای نرخ کرنش بالاتری بوده‌اند.

#### ارتباط سختی و استحکام تسلیم و نهایی

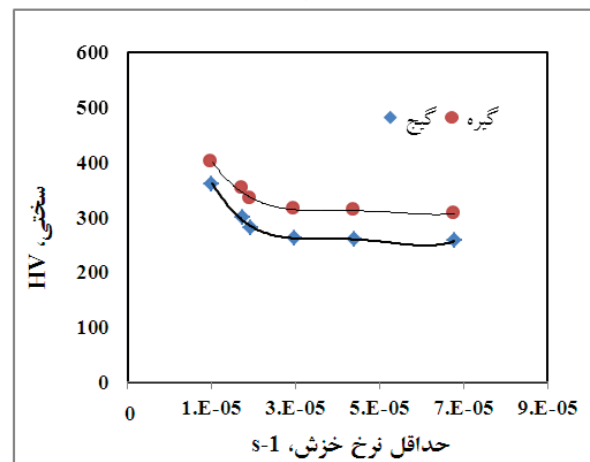
شکل ۱۱- الف نمودار استحکام تسلیم بر حسب سختی در سری نمونه‌های UTCD را نشان می‌دهد. بیشترین میزان کاهش استحکام تسلیم مربوط به خزش در دمای  $600^\circ\text{C}$  و تنش  $926/5 \text{ MPa}$  بوده و مقدار استحکام تسلیم آن نمونه برابر با  $445 \text{ MPa}$  می‌باشد. کمترین میزان کاهش استحکام تسلیم مربوط به خزش در دمای  $500^\circ\text{C}$  و تنش  $872 \text{ MPa}$  بوده و مقدار استحکام تسلیم آن نمونه برابر با  $620 \text{ MPa}$  می‌باشد. استحکام تسلیم نمونه شاهد قبل از آزمایش خزش برابر با  $1278 \text{ MPa}$  است.

شکل ۱۱- ب نمودار استحکام تسلیم و استحکام نهایی نسبت به سختی در نمونه‌های UTCD را نشان می‌دهد. بیشترین استحکام کششی نهایی مربوط به خزش در دمای  $500^\circ\text{C}$  و تنش  $872 \text{ MPa}$  و معادل  $856 \text{ MPa}$  است. کمترین استحکام کششی نهایی مربوط به خزش تحت در دمای  $550^\circ\text{C}$  و تنش  $926/5 \text{ MPa}$  و معادل  $641 \text{ MPa}$  می‌باشد. با افزایش بیشتر دما و تنش، استحکام کششی نهایی مقداری افزایش از خود نشان داده به صورتیکه نمونه خزش در دمای  $600^\circ\text{C}$  و تنش  $926/5 \text{ MPa}$  استحکام کششی نهایی معادل  $650 \text{ MPa}$  را نشان می‌دهد. استحکام کششی نهایی نمونه شاهد قبل از خزش معادل  $1285 \text{ MPa}$  است. استحکام تسلیم با استفاده از نمونه‌های بدون شکست و به ازای کرنش ۱٪ اندازه‌گیری شد. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش نرخ کرنش تابعی از افزایش دما و تنش، سختی کاهش یافته و بیشترین تغییرات در منطقه گیج مشاهده می‌شود. مطالعه تغییرات استحکام تسلیم نسبت به تغییرات سختی در هر

الف



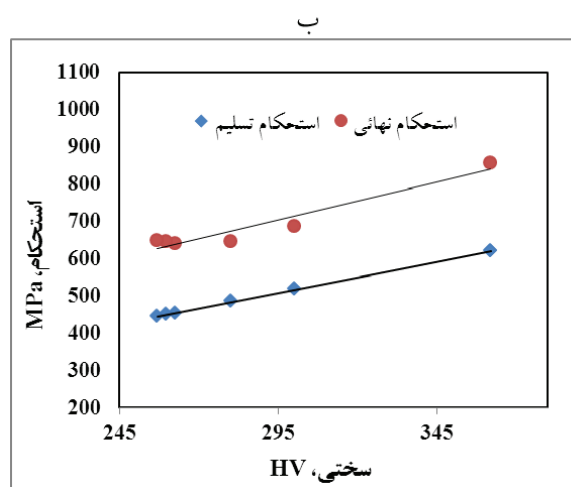
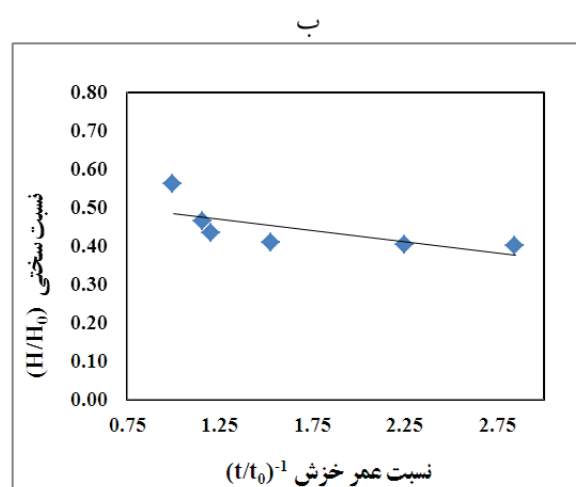
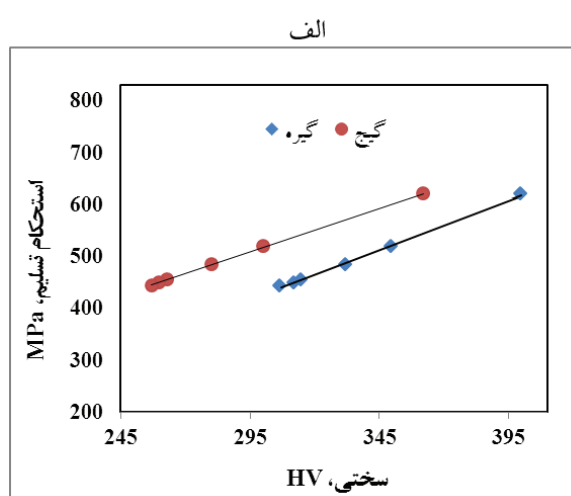
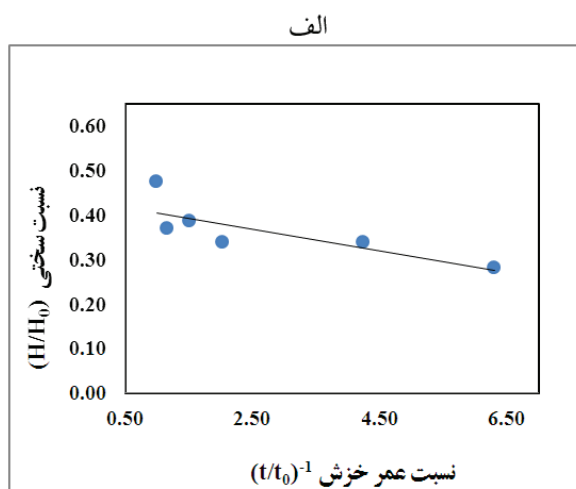
ب



شکل ۱۰. نمودار سختی بر حسب نرخ کرنش طی خزش (الف) در نمونه‌های TCR (ب) در نمونه‌های UTCD

میزان نرخ کرنش معادل  $1.02 \times 10^{-05}$  بر ثانیه، سختی گیج و سر به ترتیب ۳۰۵ و ۳۱۴ ویکرز است. به ازای بیشترین میزان نرخ کرنش معادل  $6.78 \times 10^{-05}$  بر ثانیه، سختی گیج و سر به ترتیب ۱۸۰ و ۲۷۱ ویکرز می‌باشد.

شکل ۱۰- ب نمودار سختی در مقیاس ویکرز بر حسب نرخ کرنش طی خزش در نمونه‌های TCD را نشان می‌دهد. در هر دو بخش گیج و سر با افزایش نرخ کرنش میزان سختی کاهش یافته است. مقدار متوسط سختی گیج نسبت به بخش سر نمونه کمتر بوده و با افزایش نرخ خزش، کاهش سختی بیشتری در گیج نسبت بهسر مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است تغییرات سختی در بخش سر در سری نمونه‌های خزش بدون شکست بسیار کمتر است. بیشترین میزان کاهش سختی تحت دمای  $600^\circ\text{C}$  و تنش  $926/5 \text{ MPa}$  می‌باشد. به ازای کمترین میزان نرخ کرنش معادل  $1.02 \times 10^{-05}$  بر ثانیه، سختی گیج و سر به ترتیب ۳۶۲ و ۴۰۰ ویکرز است. به



شکل ۱۲. نمودار نسبت سختی بر حسب نسبت عمر خزشی (الف) در نمونه‌های TCR (ب) در نمونه‌های TCD

شکل ۱۱. نمودار استحکام تسلیم بر حسب سختی در نمونه‌های UTCD. (ب) نمودار استحکام نهایی و استحکام تسلیم بر حسب سختی بخش گیج در نمونه‌های UTCD

### ارتباط سختی و عمر خزشی

شکل ۱۲- الف نمودار نسبت سختی بر حسب نسبت عمر خزشی در نمونه‌های TCR را نشان می‌دهد.  $t$  حداکثر زمان خزش تا شکست این سری از نمونه‌ها و مربوط به دمای  $500^\circ\text{C}$  و تنش  $872\text{ MPa}$  بوده و معادل  $8700$  دقیقه می‌باشد. بیشترین زمان خزش تا شکست  $8700$  دقیقه و کمترین آن معادل  $1380$  دقیقه تحت دمای  $600^\circ\text{C}$  و تنش  $926/5\text{ MPa}$  است. با افزایش دما و تنش طی خزش، نرخ کرنش افزایش یافته و افت بیشتری در سختی نمونه‌ها مشاهده می‌شود. حداقل میزان سختی در این سری از نمونه‌ها مربوط به دمای  $600^\circ\text{C}$  و تنش  $926/5\text{ MPa}$  بوده و معادل  $180$  ویکرز می‌باشد. لازم به ذکر است نسبت سختی بر مبنای سختی منطقه گیج محاسبه شده است.

شکل ۱۲- ب نمودار نسبت سختی بر حسب نسبت عمر خزشی در نمونه‌های TCD را نشان می‌دهد.  $t_0$  حداقل زمان

دو قسمت سر و گیج نمونه‌ها، بیانگر یک ارتباط خطی بین استحکام تسلیم و سختی در این فولاد می‌باشد. چنین رفتاری می‌تواند برای تخمین عمر خزشی در این فولاد مورد استفاده قرار گیرد. همانطور که در شکل ۱۱- الف مشاهده می‌شود شیب تغییرات استحکام نسبت به سختی، در منطقه گیج و سر نمونه‌های خزشی کمی با هم متفاوت بوده که ناشی از تفاوت عمده مکانیزم‌های کاهش استحکام در این دو بخش می‌باشد. طبق نتایج ارائه شده در شکل ۱۱- الف، میزان انحراف داده‌ها برای نمودار استحکام تسلیم نسبت به استحکام نهایی کمتر بوده که این موضوع عامل مهمی در انتخاب و بکارگیری استحکام تسلیم در طراحی قطعات دما بالا می‌باشد. همچنین انحراف داده‌ها در نمودار استحکام تسلیم نسبت به سختی در بخش گیج در مقایسه با سر نمونه‌ها کمتر بوده، لذا استفاده از این نمودار در تخمین عمر خزشی این آلیاژ دارای جایگاه خاصی خواهد بود.

مقدار وانادیم کمتر که پس از آستنیت در دمای °C ۱۰۵۰ و تمپر در دمای °C ۶۰۰ تحت خزش در دمای °C ۵۴۰-۶۰۰ و تنش MPa ۵۰۰-۳۵۰ قرار گرفته توان خزشی بین ۵-۴/۹ گزارش شده است. بررسی‌های به عمل آمده در این تحقیق نشان می‌دهد در محدوده دمایی و تنش مذکور، مکانیزم غالب در خزش این آلیاژ از نوع خزش نابجائی بوده است [۲۷]. در شرایط خزش نابجائی، حرکت نابجایی‌ها هنگام برخورد به یک مانع کند شده که این پدیده می‌تواند باعث صعود نابجائی شده و یا به تشکیل سلول نابجائی و یا مرزفرعی منجر گردد. در مکانیزم صعود، مقدار نابجایی در واحد حجم و سطح تغییر نکرده و در این شرایط انرژی فعال سازی به نفوذ خودی<sup>۹</sup> نزدیک است. در توان خزشی بالاتر و در حدود ۹، در نمونه تعداد زیادی حلقه‌های Frank-Reed دیده شده و به ازای توان خزشی حدود ۱۳ که در سوپر آلیاژها مشاهده می‌شود، نابجایی در برخورد به یک مانع شروع به تغییر صفحه لغزش می‌نماید. [۲۴].

مقدار انرژی فعال‌سازی مربوط به مکانیزم حاکم بر خزشی فولاد منتخب در دماهای °C ۵۰۰، ۵۵۰ و ۶۰۰ و بازه تنش MPa ۹۲۶/۵-۸۷۲ معادل ۱۰۹ کیلوژول بر مول تعیین گردید. هرچند انرژی فعال‌سازی تابع ترکیب آلیاژ بوده ولی گزارش‌های ارائه شده در تحقیقات قبلی حاکی از آن است که دامنه تنش اعمالی نیز می‌تواند بر مقدار آن تاثیر بگذارد. به عنوان مثال در تحقیقی گزارش شده است که انرژی فعال‌سازی نمونه‌ای از فولاد H13 در بازه تنش MPa ۱۵۰-۱۰۰-۶۸۰، ۵۰۰- کیلوژول بر مول بوده است [۲]. یا در تحقیق دیگری انرژی فعال‌سازی ظاهری نمونه‌ای از فولاد H13 تحت تنش MPa ۲۰۰، ۳۶۱/۴ کیلوژول بر مول گزارش شده است [۲۸]. لازم به ذکر است میزان تنش بکار رفته در این تحقیق بیش از چهار برابر تنش اعمالی در مقایسه با شرایط آزمایش در تحقیقات قبلی بوده و کاهش چشمگیر انرژی فعال‌سازی تا ۱۰۹ کیلوژول بر مول را نشان می‌دهد. انرژی فعال‌سازی برای نفوذ اتم‌های خودی<sup>۱۰</sup> در آهن گاما ۳۳۰ - ۳۱۲ کیلوژول بر مول می‌باشد. حضور عناصری مانند Mn, Mo, Nb, Ti و Si (در کمترین مقدار) باعث افزایش انرژی فعال‌سازی برای نفوذ اتم‌های خودی می‌شود. عناصری مانند C, V و Cr (به ازای مقادیر برابر یا بیشتر از ۳ درصد) انرژی مذکور را کاهش می‌دهند. لازم به ذکر است سینتیک اکثر واکنش‌های مهم استحاله فازی در آستنیت (رشد دانه، تبلور مجدد و استحاله آستنیت - فریت) به میزان قابل توجهی توسط نرخ انتقال اتم‌های آهن در مرزدانه و فصل مشترک بین فازها کنترل می‌شود [۲۹]. انرژی فعال‌سازی به میزان قابل توجهی بیشتر از انرژی لازم برای نفوذ اتم‌های خودی  $Q_{SD}$  و یا انرژی لازم برای نفوذ در شبکه<sup>۱۱</sup> می‌باشد. انرژی فعال‌سازی می‌تواند

کرنش خزشی ۱% این سری از نمونه‌ها و مربوط به دمای °C ۵۰۰ و تنش MPa ۸۷۲ بوده و معادل ۱۶۸۰ دقیقه می‌باشد. بیشترین زمان کرنش خزشی ۱% ۱۶۸۰ دقیقه و کمترین آن معادل ۵۹۰ دقیقه مربوط به دمای °C ۶۰۰ و تنش MPa ۹۲۶/۵ است. با افزایش دما و تنش طی خزش و در نتیجه افزایش نرخ خزش، افت بیشتری در سختی نمونه‌ها مشاهده می‌شود. حداقل میزان سختی در این سری از نمونه‌ها مربوط به دمای °C ۶۰۰ و تنش MPa ۹۲۶/۵ بوده و معادل ۲۵۷ ویکرز می‌باشد. با افزایش دما و تنش طی آزمون‌های خزش مقدار کرنش و همچنین نرخ کرنش حاصله افزایش می‌یابد. این موضوع از دو دیدگاه حائز اهمیت بوده، اول آنکه تحت چنین شرایطی طول عمر قطعه تا شکست و نیز کرنش ۱% کاهش یافته و دوم اینکه خواص مکانیکی از جمله استحکام تسلیم و سختی کاهش می‌یابد. هر چند تغییر سختی در هر دو بخش سر و گیج نمونه‌های خزش اتفاق می‌افتد ولی کاهش سختی در منطقه گیج به علت تاثیر مکانیزم بازیابی دینامیکی حاصل از کرنش، دارای اهمیت بیشتری می‌باشد. لذا چنین به نظر می‌رسد که بررسی تغییرات سختی در منطقه گیج نسبت به تغییرات عمر خزشی قطعه می‌تواند نقش موثری در تخمین عمر باقیمانده خزشی داشته باشد (شکل ۱۲). نتایج همچنین نشان می‌دهد که تقریباً ارتباط خطی بین این نسبت‌ها وجود داشته و چنین امکانی وجود دارد که با اندازه‌گیری سختی نمونه‌ها در فواصل مختلف زمانی، بتوان عمر باقیمانده خزشی قطعه را تخمین زد. نکته حائز اهمیت آن است که رابطه خطی مذکور در بازه زمانی وسیعی طی آزمون خزش و کرنش ۱% مشاهده می‌شود. هر چند که بررسی تغییرات عواملی دیگری چون استحکام تسلیم نیز می‌تواند مفید باشد ولی از آنجایی که سختی به صورت درجا<sup>۸</sup>، غیر مخرب و سریع قابل اندازه‌گیری است اهمیت چنین مطالعه‌ای روشن تر می‌شود. لازم به ذکر است چون سختی به تنهایی برای تحلیل عمر باقیمانده خزشی کافی نیست، لذا مطالعه تغییر عوامل دیگری چون استحکام تسلیم، استحکام کششی و نیز مدول الاستیک نیز صورت پذیرفت.

### تحلیل نتایج

#### توان و انرژی فعال‌سازی خزش

توان خزشی فولاد منتخب در دماهای °C ۵۰۰، ۵۵۰ و ۶۰۰ و بازه تنش MPa ۹۲۶/۵-۸۷۲ به ترتیب ۳۷/۵، ۳۹/۵ و ۴۵/۵ تعیین گردید. مقدار میانگین توان خزشی این فولاد معادل ۴/۵ می‌باشد. ارتباط مهمی بین محدوده دما و تنش و نوع مکانیزم تغییر شکل پلاستیک وجود دارد. همان گونه که در تحقیقات قبلی گزارش شده است طی خزش در تنش‌های بالا، خزش نابجائی مکانیزم غالب بوده که در آن توان خزشی بیشتر از ۴ الی ۵ مشاهده می‌شود. در نمونه فولادی از این گروه با

9. Self diffusion

10. The self-diffusion activation energy

11. Activation energy for lattice diffusion

8. In situ

برابر انرژی فعال سازی تابع تنش<sup>۱۲</sup> مربوط به آرامترین مکانیزم کنترلی حاکم بر خزش باشد. انرژی فعال سازی ظاهری<sup>۱۳</sup> که به صورت  $\left[\frac{\partial \ln \dot{\epsilon}_s}{\partial \left(-\frac{1}{RT}\right)}\right]$  تعریف می شود تابع تنش بوده و کاهش چشمگیری را طی افزایش تنش از خود نشان می دهد [۲۸].

### استحکام تسلیم و نهایی

بازه تغییرات استحکام تسلیم و نهایی در نمونه های TCD11 الی TCD23 به ترتیب بین ۴۴۵-۱۲۷۸ MPa و ۶۵۰-۱۲۸۵ MPa می باشد. بیشترین استحکام تسلیم در نمونه های خزش بدون شکست در دمای ۵۰۰ °C و تنش ۸۷۲ MPa، معادل ۶۲۰ MPa مشاهده می شود. کمترین استحکام تسلیم در نمونه های خزش بدون شکست در دمای ۶۰۰ °C و تنش ۹۲۶/۵ MPa بوده و معادل ۴۴۵ MPa است. استحکام اولیه نمونه های عملیات حرارتی شده قبل از خزش معادل ۱۲۷۸ MPa می باشد. دما تاثیر بسزائی بر خواص استحکامی آلیاژها می گذارد از این رو در تحقیقات قبلی نیز گزارش های در خصوص تغییر استحکام تسلیم و استحکام نهایی تابعی از دماهای مختلف ارائه شده است. همان گونه که در تحقیق دیگری گزارش شده در نمونه فولادی از این گروه با مقدار وانادیم کمتر که پس از آستنیت در دمای ۱۰۵۰ °C و تمپر در دمای ۶۰۰ °C مستقیماً تحت آزمون کشش در بازه دمای ۶۰۰-۲۰ °C قرار گرفته به ازای حداقل نرخ کرنش، استحکام تسلیم حدود ۷۰۰ MPa گزارش شده است. لازم به ذکر است که در این تحقیق، تغییرات استحکام تسلیم صرفاً تابعی از دمای آزمون کشش گزارش شده بدون اینکه نمونه گیری از خزش منقطع انجام شده و تاثیر تنش بررسی گردیده باشد. استحکام تسلیم این آلیاژ در دمای محیط حدود ۱۲۵۰ MPa گزارش شده است [۲۷]. در فولادهای مقاوم به خزش، حفظ استحکام و شناخت مکانیزم های استحکام بخشی بسیار مهم بوده، به عبارتی کاهش استحکام که به منزله کاهش عمر مفید آنها می باشد از جمله مسائل مهم در مورد فولادهای گرمکار می باشد. کاهش استحکام تابعی از تغییرات ریزساختاری از جمله تغییر در ترکیب محلول های جامد، تشکیل و رشد فازهای رسوبی و بازیابی دینامیکی به صورت ویژه در دما و تنش بالا اتفاق می افتد [۳۰-۳۲].

### مدول الاستیک

بیشترین مدول الاستیک در نمونه های خزش بدون شکست با دمای ۵۰۰ °C و تنش ۸۷۲ MPa، معادل  $112 \times 10^3$  MPa مشاهده می شود. کمترین مدول الاستیک در نمونه های خزش بدون شکست در دمای ۵۵۰ °C و تنش ۹۲۶/۵ MPa بوده و معادل  $50 \times 10^3$  MPa است. مدول الاستیک نمونه های عملیات حرارتی شده قبل از خزش معادل  $117 \times 10^3$  MPa

می باشد. با افزایش دما و به ازای ۶۰۰ °C، میزان مدول الاستیک مجدداً افزایش یافته و به ازای تنش ۸۷۲ MPa و ۹۲۶/۵ به ترتیب معادل  $57 \times 10^3$  و  $85 \times 10^3$  می باشد. یکی از اثرات مهم خزش، تاثیر بر مدول الاستیک آلیاژ بوده که تابعی از شرایط عملیات حرارتی اولیه و نیز نرخ کرنش طی آزمون کشش مقداری متفاوت می باشد. همان گونه که در تحقیقات قبلی گزارش شده در نمونه فولادی از این گروه که پس از آستنیت در دمای ۱۰۵۰ °C و تمپر در دمای حدود ۶۰۰ °C مستقیماً تحت آزمون کشش در دمای حدود ۶۵۰ °C قرار گرفته به ازای نرخ کرنش معادل  $5.0 \times 10^3$  بر ثانیه، مدول الاستیک حدود  $120 \times 10^3$  MPa گزارش شده است. بررسی های به عمل آمده در این تحقیق تغییرات مدول الاستیک را صرفاً تابعی از دمای آزمون کشش و بدون نمونه گیری از خزش منقطع و بررسی تاثیر تنش گزارش نموده است [۳]. مدول الاستیک توسط نیروی اتصال بین اتم ها تعیین می شود. در تحقیقات دیگری چنین گزارش شده است که تشکیل پیوند قوی تر باعث افزایش نیروی اتصال بین اتمی و نیز شیب تغییرات نیرو در فاصله پیوند اتمی  $r_0(dF/dr)$  شده و با افزایش مدول الاستیک همراه می باشد. از طرفی پیوندهای اتمی قوی تر دارای انرژی پتانسیل منفی تر بوده لذا مشاهده می شود که مدول الاستیک با انرژی پیوند بین اتم های مجاور در ساختار کریستالی مرتبط می باشد. به عبارتی مطالعه تغییرات انرژی پتانسیل در مقیاس اتمی درک بهتری از مکانیزم تغییر مدول الاستیک ارائه می نماید [۳۳]. انرژی پیوند بین اتم ها، تابعی از عدد همسایگی و فاصله بین اتمی است. از دیدگاه ترمودینامیکی و بر اساس نظریه Herring، انرژی پیوند در ساختار کریستالوگرافی مواد با عدد همسایگی مرتبط می باشد. در کریستالی با Z عدد همسایگی و  $N_0$  اتم، تعداد جفت های اتمی برابر با  $\frac{1}{2}ZN_0$  بوده و انرژی پیوند  $(\Sigma)$  تابعی از گرمای تصعید  $(H_s \Delta)$  طبق رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\Sigma = \Delta H_s / \left(\frac{1}{2}ZN_0\right)$$

به عنوان مثال در شبکه fcc فاز آستنیت، انرژی پیوند Fe-Fe، Fe-Cr و Fe-Mn به ترتیب برابر  $1/242$ ،  $0/834$  و  $0/759$  الکترون ولت می باشند. پیوند اتمی که در فلزات عمدتاً از نوع فلزی بوده نوع ساختار سلول واحد، تراکم و فاصله متوسط اتمی و انرژی پیوند را تعیین می کند [۳۳]. نتایج تحقیق دیگری در این خصوص نشان می دهد که خروج عناصر از محلول جامد ضمن تغییر ابعاد سلول واحد در ساختار کریستالی، به علت کاهش انرژی پیوند در سیستم آلیاژی موجب کاهش مدول الاستیک می شود. در دماهای بالا، با افزایش انرژی جنبشی و فعالیت بیشتر اتم ها، نیروی کمتری برای فاصله گرفتن اتم های مجاور لازم بوده که

12. Stress-dependent activation energy

13. Apparent activation energy



کرنش کم بوده و تمام استحاله‌های فازی در آن صرفاً ناشی از عملیات تمپر با گذشت زمان بوده است. عمده کرنش ناشی از خزش در بخش میانی گیج و تابعی از تعامل نابجائی‌ها و بازیابی دینامیکی صورت پذیرفته است. اینچنین روند کاهش در سختی به واسطه مکانیزم بازیابی دینامیکی هم در آزمونهای طولانی مدت<sup>۱۴</sup> و هم در آزمون‌های کوتاه مدت خزش گزارش شده‌اند. در آزمون‌های طولانی مدت خزش که به ازای دما و تنش کمتر انجام می‌شود این نوع تغییرات در سختی، ناشی از تاثیر کمتر دما بوده و به صورت پیوسته و ملایم مشاهده می‌شود [۳۷-۳۹].

### سختی و تخمین عمر باقیمانده خزش

حین خزش تغییراتی در ساختار آلیاژ اتفاق می‌افتد که باعث تغییر در خواص استحکامی و سختی و در نتیجه تغییر در نرخ کرنش می‌شود. اندازه‌گیری این خواص در سری نمونه‌های TCR (خزش تا شکست) و سری نمونه‌های TCD (خزش با کرنش ۱٪) و مطالعه ارتباط آنها با عمر خزشی قطعه در آزمون‌های خزش کوتاه مدت، هدف اصلی در این تحقیق می‌باشد. بکارگیری خواص استحکامی در کنار اندازه‌گیری سختی می‌تواند مطابقت بهتری با مقادیر تجربی و تخمین دقیقتری برای عمر باقیمانده خزشی را فراهم نماید. تغییر دما و تنش در آزمون‌های خزش باعث تغییر در نرخ کرنش شده و این امر عامل اصلی در تغییر خواص استحکامی از جمله استحکام تسلیم، استحکام نهایی، مدول الاستیک و نیز سختی می‌باشد. نکته حائز اهمیت آن است که نسبت تغییرات سختی که تابعی از میزان کرنش در فاصله بین سر و گیج نمونه‌های خزش تغییر می‌کند با نسبت عمر خزشی در این آلیاژ یک رابطه خطی نشان می‌دهد. از آنجایی که متغیر سختی به تنهایی برای تحلیل این تغییرات کافی نیست، در این تحقیق به غیر از سختی، استحکام تسلیم و مدول الاستیک نیز برای بیان دقیق تر این نوع تغییرات مورد استفاده قرار گرفت. به عبارتی با مطالعه دقیق تغییرات سختی و با توجه به تغییرات خواص استحکامی می‌توان تخمین عمر باقیمانده خزشی در فولاد H13 را انجام داد. ارتباط نزدیکی بین مقاومت خزشی و عمر باقیمانده با تغییرات ریزساختاری و خواص استحکامی وجود دارد. در طیف تحقیقات قبلی تلاش شده ارتباط هر یک از این عوامل با مقاومت خزشی آلیاژها مورد بررسی قرار گیرد و نتایج آن برای تخمین دقیقتر عمر باقیمانده خزشی آلیاژها بکار گرفته شود. در تحقیقی از این گروه، تغییرات سختی کنار آزمون‌هایی چون مطالعات ریزساختاری و کنترل خواص مکانیکی از جمله استحکام تسلیم و چقرمگی بررسی گردیده است [۴۰]. در تحقیقات دیگری از پارامتر لارسون میلر به همراه سختی استفاده شده است. گاهی نیز تغییرات سختی به صورت نمودار سختی - زمان خزش مورد بررسی قرار گرفته

همین امر باعث کاهش مدول الاستیک در دماهای بالاتر می‌شود [۳۴]. طبق تئوری Born، تغییر شکل یا دفرمگی شبکه کریستالوگرافی ناشی از هر فرآیندی منجر به کاهش مدول الاستیک شده و کاهش دفرمگی موجب افزایش مدول الاستیک می‌گردد. تحقیقات دیگری که به بررسی ترمودینامیکی در این خصوص پرداخته گزارش می‌دهد که تداوم تشکیل فازهای کاربیدی و به هم پیوستگی آنها در قالب نظم کم دامنه ترمودینامیکی، باعث تعادل بیشتر در سیستم آلیاژی و کاهش دفرمگی شبکه کریستالی و در نهایت افزایش محدود مدول الاستیک می‌گردد. از دیگر عوامل کاهش دهنده مدول الاستیک، تشکیل حفره در زمینه فلزی طی خزش اعلام شده است [۳۶،۳۵].

### سختی

در سری نمونه‌های TCR (خزش تا شکست) به ازای دمای °C ۵۰۰ و تنش ۸۷۲ MPa، سختی گیج و سر به ترتیب ۳۰۵ و ۳۱۴ ویکرز است. به ازای دمای °C ۶۰۰ و تنش ۹۲۶/۵ MPa، سختی گیج و سر به ترتیب ۱۸۰ و ۲۷۱ ویکرز می‌باشد. در سری نمونه‌های TCD (خزش بدون شکست) به ازای دمای °C ۵۰۰ و تنش ۸۷۲ MPa، سختی گیج و سر به ترتیب ۳۶۲ و ۴۰۰ ویکرز است. به ازای دمای °C ۶۰۰ و تنش ۹۲۶/۵ MPa، سختی گیج و سر به ترتیب ۲۵۷ و ۳۰۷ ویکرز می‌باشد. سختی اولیه نمونه‌های عملیات حرارتی شده قبل از خزش معادل ۶۴۴ ویکرز است. مقدار سختی با شرایط عملیات حرارتی اولیه و میزان تغییر شکل پلاستیک در آلیاژها دارای ارتباط نزدیکی می‌باشد. طبق گزارش تحقیقات قبلی در نمونه فولادی از این گروه پس از آستنیت‌ه در دمای حدود °C ۱۰۵۰ و کوئنچ در روغن، سختی حدود ۶۲۰-۶۱۰ ویکرز گزارش شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد با افزایش بیشتر دمای آستنیت‌ه تا حدود °C ۱۱۲۰ و کوئنچ در روغن، سختی تا حدود ۶۶۰-۶۵۰ ویکرز افزایش یافته است. در نمونه فولادی این تحقیق، پس از آستنیت‌ه در دمای حدود °C ۱۰۵۰، کوئنچ در روغن و تمپر در دمای °C ۵۵۰، سختی تا ۶۴۰ ویکرز افزایش نشان می‌دهد. در دمای °C ۶۰۰، میزان سختی کاهش یافته و حدود ۵۱۰ ویکرز را می‌باشد. گزارش ارائه شده در این تحقیق حاکی از آن است که با افزایش دما و یا زمان تمپر، سیر کاهش سختی ادامه داشته و تا حدود ۳۰۰-۲۵۰ می‌رسد. لازم به ذکر است بررسی‌های به عمل آمده در این تحقیق، تغییرات سختی را صرفاً تابعی از دما و زمان عملیات تمپر ارائه شده بدون اینکه نمونه‌گیری از خزش منقطع انجام داده باشد و تاثیر تنش را بررسی کرده باشد [۳]. قابل ذکر است که در تحقیق حاضر، نمونه‌ها پس از عملیات حرارتی تحت خزش در دما و تنش‌های مختلف قرار گرفته و میزان کاهش سختی در هر دو بخش سر و گیج نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. در قسمت سر نمونه، میزان

14. Long-term Creep

که هر دو فاکتور عملیات حرارتی اولیه نمونه‌ها و نرخ کرنش بر تغییر مدول الاستیک این آلیاژ طی خزش تاثیر می‌گذارند.

۵- در نمونه‌های خزش تا شکست به ازای دمای  $500^{\circ}\text{C}$  و تنش  $872\text{ MPa}$ ، سختی گیج و سر به ترتیب  $305$  و  $314$  ویکرز است. به ازای دمای  $600^{\circ}\text{C}$  و تنش  $926/5\text{ MPa}$ ، سختی گیج و سر به ترتیب  $180$  و  $271$  ویکرز می‌باشد. در نمونه‌های خزش بدون شکست در شرایط دما و تنش مشابه، مقدار سختی بالاتری مشاهده شد. نکته حائز اهمیت آن است که در این آلیاژ نسبت تغییرات سختی با نسبت عمر خزشی یک رابطه خطی را نشان می‌دهد. خواص استحکامی در کنار تغییرات سختی می‌تواند امکان بررسی مقاومت خزشی و تخمین دقیقتر عمر باقیمانده فولاد H13 را فراهم سازد.

است. همچنین نمودار تغییرات سختی با زمان خزش به ازای دماهای مختلف به صورت یک رابطه غیر خطی برای تخمین عمر حقیقی قطعه استفاده شده است. در یکسری از تحقیقات نیز تغییرات سختی به صورت نمودار سختی - نسبت عمر خزشی  $\frac{t}{t_r}$  مورد مطالعه قرار گرفته است [۴۲،۴۱].

#### ۴. نتیجه گیری

در این تحقیق آزمون‌های مکانیکی شامل کشش و سختی بر روی نمونه‌های خزشی فولاد H13 انجام شد تا تغییر خواص استحکامی و سختی طی خزش کوتاه مدت و ارتباط آن با مقاومت خزشی مورد بررسی قرار گیرد. نمونه‌ها پس از عملیات حرارتی آنیل، کوئنچ و تمپر، در دما و تنش‌های مختلف تحت آزمون خزش قرار گرفته و در نهایت بر روی نمونه‌های حاصله، آزمون‌های کشش و سختی انجام گرفت. نتایج اصلی در این تحقیق عبارتند از:

۱- میانگین توان خزشی فولاد H13 در دماهای  $500^{\circ}\text{C}$ ،  $550$  و  $600$  و بازه تنش  $872-926/5\text{ MPa}$  معادل  $4/5$  می‌باشد. این موضوع بیانگر آن است که در بازه دما و تنش مذکور، مکانیزم غالب خزش نابجائی بوده و هر نوع تغییر ساختاری که بر تحرک نابجائی تاثیر گذارد موجب تغییر مقاومت خزشی و عمر باقیمانده نمونه‌ها خواهد شد.

۲- مقدار انرژی فعال‌سازی فولاد منتخب در دماهای  $500$ ،  $550$  و  $600$  و بازه تنش  $872-926/5\text{ MPa}$  معادل  $109$  کیلوژول بر مول تعیین گردید. این مقدار انرژی در مقایسه با انرژی فعال سازی برای نفوذ اتم‌های خودی در آهن آلفا کمتر بوده که بیانگر نقش تنش در مقدار انرژی فعال‌سازی ظاهری این آلیاژ می‌باشد. بازه تنش اعمالی در تحقیق حاضر بیش از  $4$  برابر تنش اعمالی در تحقیقات قبلی بوده و کاهش چشمگیر انرژی فعال سازی را در مقایسه با نتایج آنها نشان می‌دهد.

۳- بیشترین استحکام تسلیم در نمونه‌های خزش بدون شکست با دمای  $500^{\circ}\text{C}$  و تنش  $872\text{ MPa}$ ، معادل  $620\text{ MPa}$  مشاهده می‌شود. کمترین استحکام تسلیم در نمونه‌های خزش بدون شکست مربوط به نمونه‌های خزشی تحت دمای  $600^{\circ}\text{C}$  و تنش  $926/5\text{ MPa}$  بوده و معادل  $445\text{ MPa}$  است. این موضوع بیانگر تاثیر دما بر تغییر خواص استحکامی این آلیاژ بوده ضمن اینکه استفاده از نمونه‌های خزش منقطع تاثیر تنش بر بازیابی دینامیکی و کاهش استحکام تسلیم را نشان می‌دهد.

۴- بیشترین مدول الاستیک در نمونه‌های خزش بدون شکست با دمای  $500^{\circ}\text{C}$  و تنش  $872\text{ MPa}$ ، معادل  $112 \times 10^3\text{ MPa}$  مشاهده می‌شود. با افزایش دما و تنش، نرخ کرنش طی خزش افزایش یافته و مدول الاستیک کاهش می‌یابد هر چند که در بازه‌ای از دما و تنش، مختصری افزایش نیز نشان می‌دهد. نتایج بیانگر آن است

## References

- [1] A. Eser, C. Broeckmann and C. Simsir, Multiscale modeling of tempering of AISI H13 hot-work tool steel: Prediction of microstructure evolution and coupling with mechanical properties. *Computational Materials Science* 113 (2016) 292-300
- [2] W. Zleppnig et al, Influence of the structure and of the Temperature Field on the Formation and Propagation of Thermal Fatigue Cracks. *Fracture Control of Engineering Structures-ECF 6* (1986) 139-147.
- [3] J. C. Benedyk, Aerospace and high performance alloys database. *Ferrous* (2008) 1-135.
- [4] T. Ueda and T. Matsuo, Studies on the Torsional Creep Strength of 5% Cr Hot Work Die Steel and Mo-High Speed Steel. *Journal of the Society of Materials Science* 14(146) (1965) 879-885.
- [5] W. R. Prudente et al, Microstructural evolution under tempering heat treatment in AISI H13 hot-work tool steel. *International journal of engineering research and applications* 7 (4) (2017) 67-71.
- [6] Y. Guanghua et al, Effect of heat treatment on mechanical properties of H13 steel. *Metal Science and Heat Treatment* 52 (7-8) (2010) 393-395.
- [7] J. Hald and L. Korcakova, Precipitate stability in creep resistant ferritic steels-Experimental investigations and modeling. *The Iron and Steel Institute of Japan International* 43 (2003) 420-427.
- [8] Y. Kadoya, B. E. Dyson, and M. McLean, Microstructural stability during creep of Moor W-bearing 12Cr steels. *Metallurgical and Materials Transactions A* 33 (2002) 2549-2557.
- [9] Y. Qin, G. Gotz, and W. Blum, Subgrain structure during annealing and creep of the cast martensitic Cr-steel G-X12CrMoWVNbN 10-1-1. *Metallurgical and Materials Transactions A* 341 (2003) 211-215.
- [10] H. Wurmbauer et al, Short-term creep behavior of a Cr Mo V hot-work tool steel. *International Journal of Materials Research* 100 (2009) 1066-1073.
- [11] G. E. Dieter. *Mechanical Metallurgy*. 3rd ed., Mc Graw-Hill Book Co., New York 1986.
- [12] V. B. John. *Testing of Materials*, 1992, Macmillan Education LTD, London 1992.
- [13] F. Abe, Creep rates and strengthening mechanisms in tungsten-strengthened 9Cr steels. *Materials Science and Engineering A* 319-321 (2001) 770-773.
- [14] P. J. Ennis et al, Microstructural stability and creep rupture strength of the martensitic steel P92 for advanced power plant. *Acta Materialia* 45 (1997) 4901-4907.
- [15] K. Maruyama, K. Sawada, and J. Koike, Strengthening mechanisms of creep resistant tempered martensitic steel. *ISIJ International* 41 (2001) 641-653.
- [16] S.Z. Qamar, Effect of heat treatment on mechanical properties of H11 tool steel. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* 35 (2) (2009) 115-120.
- [17] J. Gu, J. Li and Y. Chen, Microstructure and Strengthening-Toughening Mechanism of Nitrogen-Alloyed 4Cr5Mo2V Hot-Working Die Steel. *Metals* 7 (2017) 1-14.
- [18] H. Ghassemi-Armaki et al, Static recovery of tempered lath martensite microstructures during long-term aging in 9-12% Cr heat resistant steels. *Materials Letters* 63 (2009) 2423-2425.
- [19] M. Mikami, Effects of Dislocation Substructure on Creep Deformation Behavior in 0.2%C-9%Cr Steel. *The Iron and Steel Institute of Japan International* 56 (10) (2016) 1840-1846.
- [20] A. Mehmanparast et al, Creep crack growth rate predictions in 316H steel using stress dependent creep ductility. *Materials at High Temperatures* 31 (1) (2014) 84-94.
- [21] T. Sourmail, Precipitation in creep resistant austenitic stainless steels. *Materials Science and Technology* 17 (2001) 1-14.
- [22] M. Taneike, F. Abe, and K. Sawada, Creep strengthening of steel at high temperatures using Nano-sized carbonitride dispersions. *Nature* 424 (2003) 294-296.
- [23] R. C. Thomson and H. K. D. H. Bhadeshia, Carbide precipitation in 12Cr1MoV power plant steel. *Metallurgical Transactions A-Physical Metallurgy and Materials Science* 23 (1992) 1171-1179.
- [24] M. Kassner. *Fundamentals of Creep in Metals and Alloys*. 3rd ed., Elsevier, London 2015.
- [25] A. Dronhofer et al, On the nature of internal interfaces in tempered martensite ferritic steels. *Zeitschrift fur Metallkunde* 94 (2003) 511-520.
- [26] C. Scheu et al, Requirements for microstructural investigations of steels used in modern power plants. *Zeitschrift fur Metallkunde* 96 (2005) 653-659.
- [27] H. Wurmbauer et al, Short-term creep behavior of chromium rich hot-work tool steels. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 41 (1) (2010) 18-28.
- [28] H. Berns, C. Broeckmann and H. F. Hinz, Creep of High Speed Steels Part1- Experimental Investigations. 6th International Tooling Conference, Karlstad, Sweden (2002) 453-476.
- [29] A. A. Vasilyev et al, Effect of Alloying on the Self-Diffusion Activation Energy in  $\gamma$ -Iron. *Physics of the Solid State* 53 (11) (2011) 2194-2200.
- [30] T. A. Tchizhik, and A. A. Tchizhik, Optimization of the heat treatment for steam and gas turbine parts manufactured from 9-12% Cr steels. *Journal of Materials Processing Technology* 77 (1998) 226-232.
- [31] H. M. Tawancy and L. Al-Hdhami, Failure of refurbished turbine blades in a power station by improper heat treatment. *Engineering Failure Analysis* 16 (3) (2009) 810-815.
- [32] F. R. N. Nabarro and H. L. De Villiers. *The physics of creep: creep and creep-resistant alloys*, Taylor & Francis, London 1995.
- [33] D. A. Padmavathi, Potential Energy Curves & Material Properties. *Materials Sciences and Applications* (2011) 97-104.
- [34] F. Abe, T. U. Kern, and R. Viswanathan, *Creep-resistant steels*. Woodhead Publishing, CRC Press, New York 2008.
- [35] A. I. Medved and A. E. Bryukhanov, The Variation of Young's Modulus and the Hardness with Tempering of some Quenched Chromium Steels. *Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka Metallov* 9 (1969) 35-38.
- [36] K. Sawada et al, Elastic properties of heat resistant steels after long-term creep exposure. *Materials at High Temperatures* 25 (3) (2008) 179-185.
- [37] G. Eggeler, N. Nilsvang, and B. Ilshner, Microstructural changes in a 12-percent chromium steel during creep. *Steel Research* 58 (1987) 97-103.
- [38] G. Eggeler, Microstructural parameters for creep damage quantification. *Acta Metallurgica et Materialia* 39 (1991) 221-231.
- [39] K. Sawada et al, Contribution of microstructural factors to hardness change during creep exposure in Mod.9Cr-1Mo steel. *The Iron and Steel Institute of Japan International* 45 (2005) 1934-1939.
- [40] G. Bakic et al, Material characterization of the main steam gate valve made of X20CrMoV 12.1 steel after long term service. *Procedia Materials Science* 3 (2014) 1512-1517.
- [41] K. Sankhala et al, Study of microstructure degradation of boiler tubes due to creep for remaining life analysis. *Int. Journal of Engineering Research and Applications* 4(7) (2014) 93-99.
- [42] C. Panait et al, Study of the microstructure of the Grade 91 steel after more than 100,000h of creep exposure at 600°C. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 87 (2010) 1-14.