

# تردی هیدروژنی در فولاد 2.25 Cr-1Mo با ریز ساختارهای

## فریتی-بینایتی و مارتنزیتی

### (مقاله کوتاه پژوهشی)

علیرضا عبدالملکی

پژوهشکده حفاظت صنعتی و محیط زیست، پژوهشگاه صنعت نفت

### چکیده

و مارتنزیتی، به صورت مصنوعی، شرایط تردی هیدروژنی فراهم شد و سپس با روشهای خاصی چون آزمایشهای شکستهای همراه با تاخیر و کشش با سرعت بسیار کم، اقدام به شناسایی این پدیده شد. نتایج حاکی از آن است که، فولاد با ریز ساختار مارتنزیتی به شدت نسبت به تردی هیدروژنی حساس بوده و در زمانهای بسیار کم دچار شکست می شود، در حالی که فولاد فریتی-بینایتی، حتی در بالاترین غلظت هیدروژن و بدترین شرایط نیز، نسبت به پدیده تردی هیدروژنی حساس نمی باشد. نتیجه مهم دیگر اینکه چنانچه فولاد فوق با ریز ساختار مارتنزیتی پس از شارژ هیدروژن، مدتی در دمای محیط باقی بماند، میزان هیدروژن آن به حدی کاهش می یابد که دیگر نسبت به تردی هیدروژنی حساس نمی باشد. در این مقاله، شرح آزمایشات، بررسی ها و نتایج اخذ شده به تفصیل ارائه می شود.

نفوذ هیدروژن به داخل فولادها پدیده ای بسیار متداول در صنایع نفت و گاز و پتروشیمی است که موجب خسارات فراوانی به صورت های مختلفی چون تردی هیدروژنی (HE)، ترکهای ناشی از هیدروژن (HIC)، ترکهای ناشی از هیدروژن های جهت دار شده بر اثر تنش (SOHIC)، ترک دار شدن تنشی هیدروژنی (HSC) و تاولهای هیدروژنی (HB) می شود. از بین این خسارات، تردی هیدروژنی پدیده ای است که علائم ظاهری و ماکروسکوپی نداشته و با بسیاری از روشهای متداول از قبیل متالوگرافی، کشش معمولی، سختی سنجی و ... قابل شناسایی نمی باشد. بروز این پدیده در فولاد های با استحکام بالا، موجب تردی آلیاژی شده و نهایتاً شکستهای ناگهانی را به دنبال خواهد داشت. در این مقاله در شرایط آزمایشگاهی بر روی فولاد 2.25 Cr-1Mo با ریز ساختار فریتی-بینایتی (تمپر شده)

## Hydrogen Embrittlement on 2.25Cr-1Mo Steel With Ferritic-Bainitic & Martensitic Microstructures

A. R. Abdolmaleki

Research Institute of Petroleum Industry (RIPI)

P.O.Box : 18745-4193, Tehran, Iran

[Abdolmalekiar@ripi.ir](mailto:Abdolmalekiar@ripi.ir)

### ABSTRACT

In this paper, effect of hydrogen diffusion on 2.25Cr-1Mo steel with ferritic-bainitic and martensitic microstructure has been investigated. Hydrogen embrittlement of this steel was investigated by doing experimental such as delayed fracture and slow strain rate tests. Result of this research was showed that the steel with martensitic microstructure strongly affected by hydrogen diffusion and

was embrittled. But same steel with ferritic-bainitic microstructure, even at high level of hydrogen diffusion, has not show any embrittlement. Other experiments showed that, if martensitic microstructure steel will be remained on ambient temperature for above one week, effect of hydrogen diffusion will be disappear. In this paper

steel will be discussion.

## مقدمه

اتم هیدروژن با داشتن شعاع اتمی در حدود  $0.32/\text{آنگستروم}$ ، کوچکترین اتم بوده و به راحتی می تواند به داخل شبکه کریستالی فلزات نفوذ کند. نفوذ اتم هیدروژن به داخل فلزات و آلیاژهای مختلف سبب اثر سو، برخواص مکانیکی آلیاژها می شود و مسائل و مشکلات عدیده ای را در صنایع امروزی به وجود می آورد. صنایع نفت و گاز و پتروشیمی، با در نظر گرفتن فرایندهای متنوع شیمیایی، هر ساله با موارد مختلف بروز خوردگی، از جمله پدیده نفوذ هیدروژن اتمی مواجه می باشند. این پدیده ها سبب وارد شدن خسارات بسیار زیادی از نظر مالی و یا جانی می شوند.

بر اثر نفوذ هیدروژن اتمی به داخل ساختمان بلوری فولادها، برحسب شرایط مختلفی چون درجه حرارت و استحکام فولاد، پدیده های مختلفی به وجود می آید که همگی آنها سبب تضعیف خواص مکانیکی فولاد می شوند. خسارات وارد شده به فولاد به دو دسته تقسیم می شوند [۱]:

- خسارات هیدروژنی دمای پایین<sup>۱</sup> (کمتر از  $200^{\circ}\text{C}$ )
- خسارات هیدروژنی دمای بالا<sup>۲</sup> (بالتر از  $200^{\circ}\text{C}$ )

در خسارات هیدروژنی دمای بالا، بر اثر واکنش کربن فولاد با هیدروژن نفوذ کرده، گاز متان تشکیل شده و در حفزات فولاد تجمع پیدا می کند و سبب ایجاد تاولهای هیدروژنی می شوند. عیب به وجود آمده به صورت دائمی بوده و غیر قابل برگشت می باشد. در خسارات هیدروژنی دمای پایین، ممکن است پدیده های مختلفی چون  $\text{HE}^3 - \text{HIC}^4 - \text{SOHIC}^5 - \text{SSC}^6$  و  $\text{HSC}^7$  رخ دهد که هر یک مکانیزم خاص مربوط به خود را داشته و برای شناخت آنها می بایست به منابع مختلف مراجعه کرد. پدیده تردی هیدروژنی (HE) که در این مقاله مورد بررسی قرار می گیرد، معمولاً سبب کاهش داکتیلیته فولاد می شود که با روشهای غیر مخرب قابل

hydrogen embrittlement of 2.25 Cr-1Mo شناسایی نبوده و می بایست از روشهای مخرب برای شناسایی آن استفاده کرد. تئوری های مختلفی در خصوص مکانیزم ایجاد پدیده تردی هیدروژنی ارائه شده است، اما تئوری واکنش متقابل هیدروژن و نابه جانی بسیار قوی تر از بقیه تئوری ها بوده و براساس بیشتر مراجع به واقعیت نزدیک تر می باشد که در اینجا مختصری از این تئوری ارائه می شود.

تئوری "واکنش متقابل هیدروژن و نابه جایی" در سال ۱۹۵۶ توسط آقایان Vaughan و Morton ارائه شد [۲]. این مکانیزم با استفاده از تئوری تشکیل اتمسفر از نوع Cottrell در اطراف نا به جایی ارائه شده است. مطابق تئوری Cottrell بر اثر واکنش یکسری اتم های ریز با نا به جایی ها امکان حرکت آنها کم شده و کار سختی میکروسکوپی به وجود خواهد آمد که در کل سبب عدم تغییر شکل پلاستیک در آلیاژ خواهد شد. گفته می شود که فولادهایی که دارای استحکام نسبتاً بالایی بوده (بیش از  $800\text{ MPa}$ ) و یا دارای سختی بیش از HRC ۲۳ هستند، در برابر بروز پدیده تردی هیدروژنی حساس هستند. هر چقدر استحکام آنها بالاتر رود، این حساسیت بیشتر می شود. در فولادهایی که استحکام آنها کمتر از  $800\text{ MPa}$  می باشد، معمولاً نوع دیگری از خسارت هیدروژنی به نام تاول هیدروژنی به وجود می آید [۱ و ۳].

## روش تحقیق

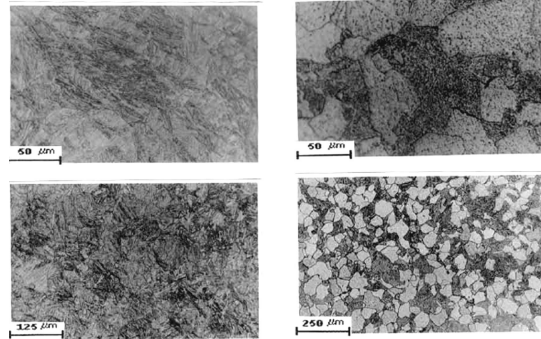
### مواد و نمونه سازی

به منظور تهیه آلیاژ مناسب برای انجام این تحقیق از فولاد کم آلیاژ 2.25 Cr-1Mo مطابق با استاندارد ASTM A387 استفاده شد. این فولاد نسبت به عملیات حرارتی بسیار حساس بوده و می توان استحکام هایی از  $500$  تا  $1500\text{ MPa}$  را برحسب روش عملیات حرارتی به دست آورد. این فولاد در صنایع نفت کاربرد بسیار زیادی داشته و در ساخت بدنه راکتورها و مبدل های دما و فشار بالای هیدروژن از آن استفاده می شود.

نمونه های لازم برای انجام آزمایش ضربه مطابق با استاندارد ASTM E23 به صورت شاریپی با شیار V تهیه شدند. همچنین برای ساخت نمونه های کششی صاف از استاندارد ASTM E8

- 1- Low Temperature Hydrogen Attack
- 2- High Temperature Hydrogen Attack
- 3- Hydrogen Embrittlement
- 4- Hydrogen Induced Cracking
- 5- Stress Oriented Hydrogen Induced Cracking
- 6- Sulfide Stress Cracking
- 7- Hydrogen Stress Cracking

نمونه هایی با قطر ۶ و طول سنجه ۳۰ میلی متر مورد تراشکاری قرار گرفت. برای ساخت نمونه های شکست همراه با تاخیر، نمونه های کششی شیاردار، مطابق نمودار ۱ یک و با استفاده از استاندارد BS 2832-1993 ساخته شدند [۴].



ریز ساختار مارتنزیتی

ریز ساختار فریتی - بینابیتی

### نمودار ۱- ریز ساختار فولاد در حالت فریتی - بینابیتی (تمپر شده) و حالت مارتنزیتی

### آنالیز شیمیایی

فولاد کم آلیاژ مورد استفاده در این تحقیق به روش کوانتومتری مورد آنالیز قرار گرفت که نتایج حاصل در جدول ۱ درج شده است.

### عملیات حرارتی

به دلیل آنکه فولاد مورد بررسی در حالت دریافتی دارای ریز ساختار فریتی بینابیتی تمپر شده بود، لذا برای رسیدن به ریز ساختار مارتنزیتی لازم بود که عملیات حرارتی خاصی بر روی آن صورت گیرد. با استفاده از دیاگرام (T.T.T) شرایط این نوع عملیات حرارتی استخراج شد [۵]. فولاد فوق در دمای  $930^{\circ}\text{C}$  به مدت سه ساعت در محیط نیتروژن آستنیته شد و سپس در روغن کوئچ شد. ریز ساختار حاصل شامل مارتنزیت کم کربن بود که در قسمت بعد تشریح می شود.

### سختی سنجی

به منظور اندازه گیری عدد سختی نمونه ها در حالت دریافتی، از روش راکول نوع B و در حالت کوئچ شده از روش راکول نوع C استفاده شد. نتایج حاصل در جدول ۲ درج شده است.

جدول ۱- آنالیز شیمیایی فولاد مورد تحقیق

نام عنصر	درصد وزنی	نام عنصر	درصد وزنی
C	۰/۱۵۷	Cu	۰/۸۴۱
Si	۰/۳۵	W	۰/۰۱۶
S	۰/۰۱۲	Ti	۰/۰۰۲
P	۰/۰۲۸	Sn	۰/۰۱۴
Mn	۰/۵۱	Co	۰/۰۱۵
Ni	۰/۲۳	Al	۰/۰۰۴
Cr	۲/۴	As	۰/۰۱۶
Mo	۱/۰۱	Fe	پایه

جدول ۲- نتایج سختی سنجی فولاد باریز ساختار فریتی - بینابیتی و مارتنزیتی

مشخصات سختی	متوسط عدد سختی	محدوده پراکندگی عدد سختی	تعداد نقاط سختی سنجی
نوع فولاد ریزساختار فریتی - بینابیتی تمپر شده	۸۲/۴ HRB	۸۰-۸۵/۳	۱۰

۸	۳۶-۳۷/۸	۳۶/۵ HRC	مارتنزیتی
---	---------	----------	-----------

نکته: سختی HRB ۸۴/۲ معادل ۱۶۳ ویکرز و HRC ۳۶/۵ معادل ۳۶۰ ویکرز می باشد.

و پنج نمونه دیگر بدون نفوذ هیدروژن مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج حاصل در جدول ۳ درج شده است.

### آزمایش کششی

آزمایش کشش نمونه های شیاردار و نمونه های صاف در حالت بدون هیدروژن و هیدروژن دار توسط دستگاه کشش INSTRON مدل 6027 صورت گرفت. روش انجام آزمایش دقیقاً مطابق با استاندارد ASTM E8 بود و نتایج حاصل در جدول چهار درج شده است. (برای هر حالت سه آزمایش کشش صورت گرفت که در جدول چهار میانگین آنها

### متالوگرافی

برای بررسی ریز ساختار فولاد در حالت دریافتی و در حالت کوئنچ شده، چند نمونه ها انتخاب شدند. این نمونه ها ابتدا مانع شده و سپس مورد عملیات صیقل کاری و پرداخت کاری مکانیکی قرار گرفتند. برای اچ کردن نمونه ها نیز از محلول نیتال ۲ درصد استفاده شد. ریز ساختار نمونه ها در هر دو حالت فریتی - بینایتی و مارتنزیتی در نمودار ۱ نشان داده شده است.

### شارژ هیدروژن

برای ایجاد تردی هیدروژنی در نمونه های مختلف آزمایشی، از روش الکتروشیمیایی استفاده شد. در این روش یک سل الکتروشیمیایی تهیه شد و نمونه به قطب منفی آن متصل شد. در این سل الکتروشیمیایی اتم های هیدروژن تولید شده به طرف کاتد رفته و در آن نفوذ می کنند. مشخصات سل الکتروشیمیایی به قرار زیر می باشد [۵].

الکترولیت: محلول یک نرمال  $H_2SO_4$  همراه با  $0.25 \text{ gr/lit}$   
ترکیب  $AS_2O_3$

آند: پلاتین توری شکل

کاتد: نمونه فولادی مورد نظر برای تردی هیدروژنی

جریان: حدود ۲۰۰ آمپر بر متر مربع

زمان شارژ: یک ساعت

بر اساس مراجع مختلف تحت شرایط فوق حدود ۴ ppm هیدروژن در فولادهای کرم - مولیبدنی نفوذ خواهد کرد که این مقدار در حد اشباع فولاد فوق الذکر خواهد بود [۳].

### آزمایش ضربه

برای انجام آزمایش ضربه، از نمونه های مارتنزیتی تعداد ده نمونه ساخته شد. در پنج نمونه شارژ هیدروژن صورت گرفت

جدول شماره ۳- نتایج آزمایش ضربه دمای محیط نمونه های مارتنزیتی

Lateral Expansion $\left(\frac{A}{W}\right)$	A (mm)	W (mm)	انرژی شکست (ژول)	مشخصات آزمایش	
				نوع نمونه	
۱/۰۷	۱۰/۷	۱۰	۶۴/۷	۱	بدون هیدروژن
۱/۰۵	۱۰/۶	۱۰/۰۴	۶۴/۲	۲	
۱/۰۶	۱۰/۶۵	۱۰/۰۳	۶۵/۳	۳	
۱/۰۶	۱۰/۶	۱۰	۶۶	۴	
۱/۰۶	۱۰/۶۳	۱۰/۰۲	۶۸/۱	۵	
۱/۰۲۶	۱۰/۳۷	۱۰/۱	۵۷/۱	۱	با هیدروژن
۱/۰۳۸	۱۰/۳۸	۱۰	۵۶/۷	۲	
۱/۰۳۶	۱۰/۳۷	۹۹/۹	۵۲	۳	
۱/۰۳۹	۱۰/۳۹	۱۰	۵۵/۳	۴	
۱/۰۳۰	۱۰/۳۷	۱۰/۰۲	۵۶	۵	

هیدروژن دار که مدتی در دمای محیط قرار گرفته بودند نیز صورت گرفت. کلیه نتایج به دست آمده در جدول ۴ نشان داده شده است.

گزارش شده است) در جدول ۵ نتایج آزمایش کشش با سرعت کم نشان داده شده است. در این آزمایش ها سرعت کشش نمونه ها تا لحظه شکست برابر ۰/۵ N/Sec بوده است.

### بحث و بررسی نتایج

مطابق سختی سنجی صورت گرفته، متوسط سختی نمونه های فریتی - بینیتی در حدود ۱۶۳ ویکرز و نمونه های مارتنزیتی ۳۶۰ ویکرز می باشد. بر اساس مراجع مختلف فولادهایی که سختی آنها کمتر از ۲۵۰ ویکرز باشد، نسبت به تردی هیدروژنی حساس نبوده و نفوذ هیدروژن در آنها موجب ایجاد پدیده تاول یا ترک هیدروژنی می شود. در فولادهایی با استحکام بالاتر (سختی بالاتر) معمولاً پدیده تاول هیدروژنی صورت نمی گیرد زیرا، امکان تبدیل اتمهای هیدروژن به ملکول هیدروژن وجود ندارد. در این فولادها اتم های هیدروژن در اطراف نا به جایی ها تجمع کرده و مانع از حرکت آنها می شوند در نتیجه سبب کاهش داکتیلیته فولاد می شوند. کاهش میزان داکتیلیته در این فولادها رابطه مستقیم با میزان هیدروژن فولاد دارد. فولاد های کرم - مولیبدنی به کار رفته در ساخت بدنه راکتورها و مبدلهای حرارتی صنایع نفت معمولاً باریز ساختار فریتی - بینیتی می باشند که در دمای ۶۹۰C به مدت حدود ۳۰ ساعت تحت عملیات حرارتی

### آزمایش شکست با تاخیر

این آزمایش برای اولین بار در سال ۱۹۹۳ توسط موسسه استاندارد انگلستان تحت شماره BS2832 به صورت استاندارد در آمده است [۳].

توسط انجام این آزمایش وجود پدیده تردی هیدروژنی در فولادها مورد بررسی قرار می گیرد. روش آزمایش بدین گونه است که، بر روی نمونه کششی شیاردار استاندارد، ابتدا شارژ هیدروژن صورت می گیرد و سپس این نمونه تحت تنش یک بعدی معادل ۷۵ درصد استحکام کششی خود در حالت بدون هیدروژن قرار می گیرد. چنانچه مقاومت نمونه از مرز ۲۰۰ ساعت بگذرد، هیچ گونه تردی هیدروژن در آن وجود نخواهد داشت و چنانچه تردی هیدروژن در نمونه وجود داشته باشد، نمونه قبل از ۲۰۰ ساعت خواهد شکست.

در این تحقیق نمونه های شیاردار پس از شارژ هیدروژن مورد آزمایش قرار گرفتند. تنش اعمالی به نمونه های فریتی - بینیتی و نمونه های مارتنزیتی به ترتیب برابر ۵۸۸ و ۱۴۵۵ MPa بود. آزمایش شکست همراه با تاخیر بر روی نمونه های مارتنزیتی

قرار گرفته اند و سختی آنها نیز بین ۱۵۰ تا ۱۷۰ ویکروز می باشد.

در آزمایشات ضربه انجام شده بر روی نمونه های مارتنزیتی هیدروژن دار و بدون هیدروژن که نتایج آن در جدول ۳ نشان

**جدول ۴- نتایج آزمایش شکست همراه با تاخیر برای نمونه های هیدروژن دار**

نوع نمونه	استحکام کششی (MPa)	میزان تنش اعمالی (MPa)	زمان شکست نمونه ها (ساعت)
فرتی - بینایی	۷۸۵	۵۸۸	>۲۳۵
مارتنزیتی با زمان دشارژ صفر	۱۹۴۰	۱۴۵۵	صفر
مارتنزیتی با زمان دشارژ ۱۴۸ ساعت	۱۹۴۰	۱۴۵۵	۳/۴۷
مارتنزیتی با زمان دشارژ ۲۹۶ ساعت	۱۹۴۰	۱۴۵۵	>۲۵۰

بالا بوده و بنابراین می توان گفت که اکثر نا به جایی ها توسط اتم های هیدروژن احاطه شده اند و توانایی حرکت بسیار محدودی دارند. به همین دلیل است که داکتیلیته فولادهای مارتنزیتی هیدروژن دار کمتر از داکتیلیته فولاد مارتنزیتی بدون هیدروژن می باشد.

نتایج آزمایش کشش نمونه های مختلف در جدول ۵ و ۶ آمده است. اگر بخواهیم اثر نفوذ هیدروژن را بر روی خواص کششی بررسی کنیم، خواهیم دید که با نفوذ هیدروژن به داخل نمونه های مارتنزیتی، استحکام کششی از ۱۲۷۵ به ۷۳۰ MPa کاهش یافته است، یعنی اینکه استحکام کششی در حدود ۵۷ درصد کاهش نشان می دهد. همچنین کرنش پلاستیکی نمونه های مارتنزیتی از ۱۲ درصد به حدود ۰/۵ درصد رسیده است. بنابراین می توان گفت که نفوذ هیدروژن

اثر جذب هیدروژن به میزان حدوداً ۴ تا ۵ ppm، مقدار ۱۰J نمونه های مارتنزیتی اشباع از هیدروژن دارای مقاومت به ضربه ای در حدود ۵۵/۴J هستند. یعنی این که بر از مقاومت به ضربه نمونه های مارتنزیتی کاسته شده است. در نتایج حاصله از آزمایش ضربه عاملی به نام Lateral Expansion و یا انبساط ابعاد جانبی در نمونه های هیدروژن دار، بین ۲/۶ تا ۴ درصد است در حالی که، برای نمونه های بدون هیدروژن این عامل در حدود ۵ تا ۷ درصد می باشد. به عبارت دیگر نفوذ هیدروژن به داخل نمونه های مارتنزیتی سبب کاهش داکتیلیته ابعاد جانبی نمونه در آزمایش ضربه شده است.

بر اساس مراجع مختلف، معمولاً تردی هیدروژنی توسط آزمایش ضربه قابل شناسایی نمی باشد و گفته می شود که برای شناسایی این پدیده می بایست سرعت کرنش بسیار کند باشد تا هیدروژن بتواند اثر مخرب خود (یعنی مهاجرت به طرف نا به جایی ها و قفل کردن آنها) را نشان دهد. در نمونه های مارتنزیتی مورد تحقیق میزان

هیدروژن موجود در آلیاژ در حد اشباع می باشد (حدود ۴ تا ۵ ppm) مقدار هیدروژن فوق برای فولاد های مارتنزیتی نسبتاً

**جدول ۵- نتایج آزمایش کشش با سرعت ۰/۵ N/Sec در دمای محیط برای نمونه های شیاردار مارتنزیتی**

خواص کششی نوع نمونه	استحکام تسلیم قراردادی (MPa)	استحکام کششی (MPa)	کرنش پلاستیک در انتهای آزمایش (%)	زمان آزمایش (دقیقه)
بدون هیدروژن	۱۲۴۶	۱۲۷۱	۱۲/۲	۴۲۳۶
با هیدروژن	۱۲۲۷	۱۲۸۱	۹/۷	۴۲۷۰

جدول ۶- نتایج آزمایش کشش دمای محیط نمونه های مختلف با سرعت ۲ min/min

خواص کششی نوع نمونه	استحکام تسلیم قراردادی ۰/۲% proof stress (MPa)	استحکام کشش نهایی (MPa)	کرنش پلاستیک در انتهای آزمایش (%)		
				شیدار	بدون شیار
بدون هیدروژن	۵۷۰	۷۸۵	۵	شیدار	بدون هیدروژن
فریتی + بینایی	۳۰۵	۵۳۵	۳۱	بدون شیار	فریتی + بینایی
بدون هیدروژن	۱۹۱۵	۱۹۴۰	۰/۲	شیدار	بدون هیدروژن
مارتنزیتی	۸۰۰	۱۲۷۵	۱۲	بدون شیار	مارتنزیتی
نمونه های حاوی هیدروژن (صاف)	۵۴۰	۶۴۲	۰/۷	فریتی بینایی	نمونه های حاوی هیدروژن (صاف)
	۷۰۷	۷۳۰	۰/۵	مارتنزیتی	مارتنزیتی

مقدار بسیار زیادی تنش باقیمانده می باشد، نفوذ هیدروژن سبب افزایش تنش داخلی شده، لذا با نیروی کمتری می تواند شکسته شود. یکی از مهمترین آزمایشات مربوط به تردی هیدروژنی فولادها، آزمایش شکست همراه با تأخیر می باشد. در این آزمایش، در دمای محیط به نمونه ۷۵ درصد تنش کششی آلیاژ، نیرو اعمال می شود. در صورتی که آلیاژ دارای هیدروژن نباشد، قاعدتاً می بایست مقاومت نمونه تا بی نهایت ادامه داشته باشد، اما از آن جایی که هیدروژن هایی که سبب بروز پدیده تردی هیدروژنی می شوند، به صورت متحرک بوده و توانایی حرکت در ریز ساختار آلیاژ را دارند و بر اساس تئوری های اثبات شده، حلالیت هیدروژن در نمونه های تنش دار بیش از نمونه های بدون تنش می باشد، لذا در نمونه های آزمایش شده هنگامی که ۷۵ درصد استحکام کششی به نمونه ها نیرو اعمال می شود، تنش ایجاد شده در ته شیار بیش از سایر نقاط نمونه می باشد و ظاهراً هیدروژن تمایل بسیار به مهاجرت به طرف مناطق پرتنش دارد. در هنگام آزمایش، غلظت هیدروژن در سراسر نمونه کششی شیاردار تقریباً یکسان است،

به داخل نمونه مارتنزیتی سبب تضعیف استحکام و داکتیلیته خواهد شد. نتایج نشان می دهد که اثر نفوذ هیدروژن بر خواص کششی نمونه های فریتی - بینایی، بگونه ای است که استحکام کششی ۲۰ درصد افزایش یافته در حالی که استحکام تسلیم حدود ۷۷ درصد افزایش را نشان می دهد. همچنین داکتیلیته این نمونه ها بر اثر نفوذ هیدروژن شدید کاهش یافته است (از ۳۰ درصد به کمتر از یک درصد رسیده است) می توان گفت که بر اثر نفوذ هیدروژن، داکتیلیته هر دو نمونه مارتنزیتی و نمونه فریتی - بینایی به مقدار بسیار زیادی کاهش نشان می دهد. اثر نفوذ هیدروژن بر میزان استحکام دو نمونه مارتنزیتی و نمونه فریتی - بینایی بر عکس یکدیگر می باشد. به عبارت دیگر، وجود هیدروژن در نمونه نسبتاً نرم سبب افزایش استحکام شده در حالی که در نمونه های سخت، سبب کاهش شدید استحکام خواهد شد. شاید بتوان این پدیده را چنین توجیه کرد که وجود هیدروژن در نمونه نرم سبب ایجاد کار سختی شده در نتیجه استحکام کششی مقداری افزایش می یابد در حالی که در نمونه سخت (مارتنزیتی) که خود دارای

اما پس از مدتی هیدروژن به طرف شیار، حرکت کرده و غلظت آن در ته شیار افزایش می یابد، افزایش تدریجی غلظت هیدروژن در ته شیار، سبب ایجاد میکروترکهایی می شود که در نهایت پس از سپری شدن مدتی منجر به شکست نمونه می شود. به همین دلیل است که به این نوع شکست، شکست های همراه با تاخیر (Delayed Fracture) می گویند. در بعضی مراجع نسبتاً قدیمی به این آزمایش، خستگی ایستا (Static Fatigue) نیز گفته شده است.

در جدول ۶ نتایج آزمایش شکست همراه با تاخیر بر روی نمونه های هیدروژن دیده می شود که فولاد با ریز ساختار فریتی - بینایتی بیش از ۲۳۵ ساعت نیروی اعمالی را تحمل کرده است. براساس استاندارد BS 2832 در نمونه های فریتی - بینایتی تردی هیدروژنی بروز نکرده است. در حالی که نمونه های مارتنزیتی هیچ گونه مقاومتی از خود نشان نداده اند و بلافاصله پس از اعمال نیروی معادل ۷۵ درصد استحکام کششی، منجر به شکست شده اند. چنین به نظر می رسد که در نمونه های مارتنزیتی، نفوذ مقادیر بسیار کم هیدروژن می تواند سبب ایجاد تردی هیدروژنی شود در حالی که در فولاد فریتی - بینایتی که استحکام آن کمتر از ۸۰۰ MPa می باشد، تردی هیدروژنی براحتی بروز نمی کند. چنانچه این نتیجه را با داکتیلیته آزمایش کشش نمونه های هیدروژن دار مقایسه کنیم، می بینیم که در نتایج، تضاد وجود دارد. در آزمایش کشش، نفوذ هیدروژن سبب کاهش شدید داکتیلیته شده است، در حالی که در آزمایش شکست همراه با تاخیر نمونه های فریتی - بینایتی هیچ گونه اثری از تردی هیدروژنی دیده نمی شود. علت این اختلاف را شاید بتوان چنین توجیه کرد که کل زمان انجام آزمایش کشش در حدود چند دقیقه است، در حالی که زمان آزمایش شکست همراه با تاخیر بسیار بسیار طولانی تر است و در این مدت هیدروژن اشباع می تواند از نمونه خارج شود. با کم شدن میزان هیدروژن در فولاد فریتی - بینایتی زمان شکست افزایش یافته و چنانچه هیدروژن از مقدار مشخصی کمتر شود دیگر شکست رخ نمی دهد.

در بررسی به عمل آمده بر روی شدن هیدروژن از فولاد با ریز ساختار مارتنزیتی، دیده می شود که چنانچه پس از شارژ هیدروژن، نمونه ها مدتی در دمای محیط و در هوا قرار گیرند،

هیدروژن نمونه ها کاهش می یابد. کاهش میزان هیدروژن سبب افزایش مقاومت نمونه ها در آزمایش شکست همراه با تاخیر خواهد شد. در جدول ۴ دیده می شود که پس از ۱۴۸ ساعت نگهداری نمونه هیدروژن دار در دمای محیط، زمان مقاومت نمونه به ۳/۴۷ ساعت رسیده است. چنانچه مدت زمان بیشتری نمونه ها در دماهای محیط نگهداری شوند، ممکن است که کل هیدروژن فولاد خارج شود و مقاومت نمونه ها در آزمایش صورت گرفته بر روی نمونه هایی که پس از شارژ هیدروژن، مدت دو هفته در دمای محیط نگهداری شده بودند، نمونه ها توانستند بیش از ۲۵۰ ساعت، بدون هیچ گونه مشکلی مقاومت کنند. مشاهده می شود که هیدروژن موجود در فولاد در دمای محیط می تواند از نمونه خارج شود و پس از دو هفته نگهداری می توان گفت که مقدار هیدروژن به حدی کاهش یافته که دیگر تردی هیدروژنی نمی تواند به وجود آید.

### نتیجه گیری

با توجه به کلیه آزمایشات و بررسی های صورت گرفته بر روی نمونه های فولاد کم آلیاژ 2.25 Cr-1Mo با دو ریز ساختار فریتی - بینایتی و مارتنزیتی می توان نتایج ذیل را به صورت فهرست وار ارائه کرد:

۱- وجود شیار در نمونه های کششی با ریز ساختار فریتی - بینایتی و مارتنزیتی، سبب افزایش استحکام تسلیم و استحکام کششی شده، ولی داکتیلیته به شدت کاهش می یابد.

۲- با نفوذ هیدروژن در نمونه های مارتنزیتی، هم داکتیلیته و هم استحکام کششی نمونه های صاف به شدت کاهش می یابد. در این بررسی ها، استحکام کششی حدود ۴۵ درصد و داکتیلیته حدود ۹۹ درصد کاهش یافته است.

۳- در نمونه های فریتی - بینایتی، با نفوذ هیدروژن، استحکام کششی نمونه های صاف در حدود ۲۰ درصد افزایش یافته در حالی که داکتیلیته حدود ۹۹ درصد کاهش می یابد.

۴- در آزمایش کشش با سرعت کم نمونه های مارتنزیتی حاوی هیدروژن، تغییرات قابل توجهی در استحکام تسلیم و یا کششی مشاهده نشد. ولی داکتیلیته در حدود ۲۰ درصد کاهش



یافته است .

، به طوری که هیچ گونه شکستی در آزمایش شکست همراه با تاخیر رخ نمی دهد.

۱۱- شناسایی پدیده تردی هیدروژنی برای قطعاتی که مدت بیش از دو هفته در دمای محیط نگهداری شده باشند ، توسط استاندارد BS 2832-1993 امکان پذیر نمی باشد.

### پیشنهادات

براساس تحقیق فوق ، مشاهده شد که امکان خروج هیدروژن از فولاد 2.25Cr-1Mo در دمای محیط وجود دارد و چنانچه آلیاژ به مدت بیش از دو هفته در دمای محیط قرار گیرد، در آزمایش شکست همراه با تاخیر، هیچ گونه شکستی رخ نمی دهد. بنابراین لازم به نظر می رسد که تحقیقی در رابطه با سیتیک خروج هیدروژن در شرایط محیطی برای آلیاژهای مختلف صورت گیرد. ضمناً اندازه گیری میزان هیدروژن در آزمایشات بسیار ضروری است، لذا پیشنهاد می شود که در تحقیق های آتی، میزان هیدروژن به طور دقیق تعیین شود.

۵-مقاومت به ضربه نمونه های مارتنزیتی هیدروژن دار در حدود ۱۵ درصد کمتر از نمونه های بدون هیدروژن می باشد.

۶- نمونه های مارتنزیتی اشباع شده از هیدروژن ، هیچ گونه مقاومتی از خود در آزمایش شکست همراه با تاخیر نشان نمی دهند.

۷- نمونه های فریتی - بینابینی حتی با وجود اشباع از هیدروژن ، مقاومت بسیار خوبی از خود در آزمایش شکست همراه با تاخیر نشان می دهند.

۸- نگهداری نمونه های اشباع شده از هیدروژن در شرایط محیطی ، سبب خروج مقداری از هیدروژن خواهد شد.

۹- نگهداری نمونه مارتنزیتی اشباع شده از هیدروژن در دمای محیط به مدت یک هفته سبب افزایش مقاومت آلیاژ در آزمایش شکست همراه با تاخیر به میزان ۳/۴۷ ساعت خواهد شد.

۱۰- نگهداری نمونه مارتنزیتی اشباع از هیدروژن به مدت بیش از دو هفته در دمای محیط ، سبب خروج کامل هیدروژن شده

### منابع

- [1] D.F.Timmins , “ Solution to hydrogen attack in steels “, published by ASM International, 1997 .
- [2] P.Cotterill ”Hydrogen Embrittlement of Metals “, by, Pergamon press, 1973.
- [3] D.Warren , “ Hydrogen Effect on Steels” Material performance , January 1987 , pp. 38-48.
- [4] Standard No.BS 2832-, “ Hydrogen Embrittlement in steels , Notch specimen Tension, 1993.
- [5] A. Schrader & A. Rose”DE ferri Metallographia “ , by, max-planck Institue fur Eisenforschung , publ. Verlag Stahleisen M.B.H,Dusseldorf , 1975.
- [6] M.I Luppo , J.Ovejero-Garcia , “ Errect of delta ferrite on hydrogen Embrittlement of Austenitic Staninless Steel Welds”, Corrosion, pp 87-93, 1999.

