



## بررسی تجربی و تحلیل تأثیر تردی هیدروژنی و تنش پسماند بر خواص مکانیکی فولاد GTD ۴۵۰

سپیده نصرتی<sup>۱</sup>، اسماعیل پورسعیدی<sup>۱\*</sup>، امین داداشی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران  
<sup>۲</sup> دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۲۰  
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۳/۰۹  
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۱۰  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۳/۱۳

### کلمات کلیدی:

تردی هیدروژنی  
تنش پسماند  
خواص مکانیکی  
تست کشش  
فولاد جی-تی-دی ۴۵۰

**خلاصه:** موضوع مقاله حاضر، مطالعه تجربی اثرات تردی هیدروژنی به همراه تنش پسماند بر روی خواص مکانیکی آلیاژ جی-تی-دی ۴۵۰ است. بدین منظور از محلول ۰/۵ مولار سولفوریک اسید برای ایجاد تردی هیدروژنی یک و دوساعته و از روش دندانگذاری با سطح استوانه‌ای برای ایجاد تنش پسماند استفاده شد. بر اساس یافته‌های آزمایشگاهی، تغییرات انعطاف‌پذیری و درصد کاهش سطح مقطع شکست، نسبت به شرایط مینا در چهار سطح آزمایش صورت پذیرفته به ترتیب در محدوده ۴۲/۶۹٪ تا ۷۴/۶۸٪ و ۱۱/۷۸٪ تا ۳۹/۵۸٪ به دست آمد. نتایج تحلیل آماری مشارکت تنش پسماند و تردی هیدروژنی در انعطاف‌پذیری را به ترتیب معادل ۱/۱۵٪ و ۶۷/۰۵٪ برآورد کرده است. برای تنش پسماند مربوط به نیروی پنج کیلو نیوتنی، با افزایش مدت زمان شارژ هیدروژنی به دو ساعت، مقدار چقرمگی ۶۰/۵۴٪ کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده گردید که حداکثر تغییرات در تنش تسلیم نسبت به شرایط مینا، ۱/۶۸٪ است که در نمونه با تردی هیدروژنی یک‌ساعته و تنش پسماند ناشی از نیروی نه کیلو نیوتنی ایجاد شده است. در حالت مینا گلوبی شدن با کرنش زیاد و کاهش ۳۶ درصدی سطح مقطع شکست رخ داد؛ اما در شرایط شارژ دوساعته، شکست با حداقل گلوبی شدن، کرنش کم و کاهش اندک سطح مقطع، به میزان ۲۱/۷۵٪ صورت گرفت.

### ۱- مقدمه

به سه گروه عمده تردی هیدروژنی محیطی<sup>۱</sup>، تردی هیدروژنی داخلی<sup>۲</sup> و تردی هیدروژنی واکنشی<sup>۳</sup> طبقه‌بندی می‌شود [۱]. در حالت کلی تردی هیدروژنی محیطی زمانی رخ می‌دهد که ماده در معرض محیط گاز هیدروژن با فشار بالا قرار گیرد. در تردی هیدروژنی داخلی لزومی به وجود گاز هیدروژن با فشار بالا نیست بلکه هیدروژن نفوذی حاصل از یک فرآیند الکتروشیمیایی مانند خوردگی یا شارژ کاتدی در یک محیط مرطوب است. برخلاف تردی هیدروژنی محیطی و تردی هیدروژنی داخلی، در تردی هیدروژنی واکنشی به دلیل انجام واکنش شیمیایی با هیدروژن، یک آسیب برگشت‌ناپذیر رخ می‌دهد. این آسیب می‌تواند بدون حضور هرگونه تنش خارجی رخ دهد. جنگ و همکاران [۲] به مطالعه تردی هیدروژنی و شکست بر

خوردگی در توربین‌ها و کمپرسورها معمولاً به علت وجود رطوبت و نمک‌ها ایجاد می‌شود. در محلول‌های خورنده طی واکنش الکتروشیمیایی هیدروژن آزاد شده و با نفوذ هیدروژن به داخل فلز، تردی هیدروژنی ایجاد می‌شود. نتیجه این واقعه از دست دادن انعطاف‌پذیری فلز و افزایش استحکام آن است. شکست مواد فلزی در اثر پدیده تردی هیدروژنی اغلب غیر قابل پیش‌بینی و گاه فاجعه‌بار است؛ زیرا در این پدیده، برای وقوع شکست، اعمال نیروی خارجی نیاز نیست و وجود تنش‌های پسماند می‌تواند به‌عنوان منبع اعمال تنش عمل کند. برای این که بتوان اثرات هیدروژن نفوذی را در محیط آزمایشگاهی بررسی کرد، نمونه مورد مطالعه تحت شارژ هیدروژنی قرار می‌گیرد. تردی هیدروژنی از منظر اندرکنش میان فلز و هیدروژن

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: epsaeidi@znu.ac.ir

1 Hydrogen Environmental Embrittlement (HEE)  
2 Internal Hydrogen Embrittlement (IHE)  
3 Hydrogen Reaction Embrittlement (HRE)



ترک مهم بوده و در فرایند اس-سی-سی یکدیگر را تحت تأثیر قرار می‌دهند. دو علت اصلی از پدیده ترک خوردگی محیطی<sup>۸</sup> شامل: تردی هیدروژنی و ترک خوردگی تنشی توسط سندالز و همکاران [۶] مدل‌سازی شد. علاوه بر این، یک شبیه‌سازی کامپیوتری از صفحه فلزی صاف با تنش مکانیکی و ترک خوردگی به علت تردی هیدروژنی و خوردگی توسط لی و همکاران [۷] انجام گرفت. در این مقاله رفتار مقاومت مواد، کرنش پلاستیکی و سرعت رشد ترک در اثر تردی هیدروژنی و خوردگی بررسی شده است. ال می و همکاران [۸] یک مدل تحلیلی برای ارزیابی مدت زمان شروع ترک خوردگی خستگی بر روی فولاد ضدزنگ مارتنزیتی در سیکل خستگی (بین ۱۰۵ تا ۱۰۷ سیکل) ارائه دادند. بر اساس اندازه‌گیری‌های الکتروشیمیایی در آزمایش‌های خستگی خوردگی در محلول آبی سدیم کلرید، مکانیزم شروع خستگی خوردگی شناسایی شد. نتایج تجربی با مدل پیشنهاد شده با توجه به پارامترهای مواد مکانیکی و الکتروشیمیایی مقایسه شده است. کاپل و همکاران [۹] به بررسی قابلیت جذب هیدروژن در اجزای جوش فولاد ایکس ۵۲<sup>۹</sup> پرداختند. فاکتور مورد بررسی در شارژ هیدروژنی، اثر زمان شارژ بر روی غلظت هیدروژن در فلز پایه، فلز جوش و ناحیه تحت اثر دما<sup>۱۰</sup> بود. هیدروژن‌دهی به نمونه‌ها از روش الکتروشیمیایی صورت گرفت. جهت انجام تست سطح نمونه‌ها با دی‌الکترونیک پوشانده شد و فقط سطحی با قطر ۵ میلی‌متر بدون پوشش باقی ماند که در معرض محلول پی-اچ-ان-اس<sup>۱۱</sup> قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده نشان داد که قابلیت جذب هیدروژن به ترتیب در سه بخش، ناحیه تحت اثر دما، فلز پایه و جوش کاهش یافت. کاپل و همکاران [۱۰] به بررسی توانایی جذب هیدروژن در سه نوع فولاد از دسته ای-پی-آی<sup>۱۲</sup>: ایکس ۵۲، ایکس ۷۰ و ایکس ۱۰۰ پرداختند. پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش را می‌توان زمان شارژ کاتدی هیدروژن و تنش اعمالی بر روی نمونه‌ها عنوان کرد. آن‌ها با تعریف پارامتری که نسبت هیدروژن جذب شده به هیدروژن تولیدی را بیان می‌کند، نشان دادند که تغییرات این نسبت با زمان برای هر آلیاژ دارای یک نقطه بیشینه است. یین و همکاران [۱۱] به بررسی تأثیر چگالی جریان بر روی مشخصات سطح و مقاومت به خوردگی در فولاد

پایه‌ی هیدروژن پرداختند. آن‌ها رفتار الکتروشیمیایی شارژ هیدروژنی آلیاژ آل-۸۰۹۰ را در نمونه‌هایی با جهت‌گیری‌های مختلف، بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که شارژ هیدروژنی باعث کاهش انعطاف‌پذیری و مقاومت آلیاژ آل-۸۰۹۰ در برابر شکست می‌شود. آزمایش‌های انجام‌شده نشان داد که نمونه‌ها با جهت‌گیری تی-اس بالاترین حساسیت به انباشته شدن هیدروژن در مرزخانه‌ها و ایجاد و رشد ترک در امتداد مرزخانه‌ها را دارند. علاوه بر این نشان داده شد با افزایش مدت‌زمان پیرسازی در این آلیاژ، شکست به دلیل تردی هیدروژنی و ترک‌های هیدروژنی کاهش می‌یابد. در آلومینیوم یک جای خالی می‌تواند بیش از ۱۲ اتم هیدروژن را در خود جای دهد. جاهای خالی همسایه همدیگر را دفع می‌کنند که اگر در یک صفحه‌ی لغزش باشند، می‌توانند ترک‌های ریز ایجاد کرده و در نهایت باعث گسیختگی شوند. لو و ککسیراس [۳] نشان دادند که جاهای خالی<sup>۲</sup> اتمی می‌توانند با هیدروژن ترکیب شده و یک نقش اساسی در تردی هیدروژنی در مواد جامد انعطاف‌پذیر ایفا کنند. اُه و همکاران [۴] در یک مطالعه عددی به بررسی مسئله انتقال و جابجایی هیدروژن پرداختند. آن‌ها نشان دادند که تنش هیدرواستاتیکی و کرنش پلاستیکی جزء پارامترهای مهم در انتقال هیدروژن محسوب می‌شوند؛ که حاکی از کویل بودن انتقال هیدروژن با تغییر شکل الاستیک - پلاستیک است. لی و همکاران [۵] یک تحلیل جامع از نرخ رشد ترک خوردگی تنشی<sup>۳</sup> ارائه کردند. در کار آن‌ها دو روش مکانیکی، انحلال آنودی<sup>۴</sup> (ای-دی) و تردی هیدروژنی برای محاسبه سرعت رشد اس-سی-سی<sup>۵</sup> در آلیاژ ای-ای<sup>۵</sup> -۷۰۵۰-تی-۶<sup>۶</sup> برای شکستن سطح در یک محیط آبی در نظر گرفته شد. برای انحلال آنودی، شکل اصلاح‌شده معادله نرنست-پلانک<sup>۷</sup> با تأثیر حباب‌های هیدروژنی و رسوب‌ها استفاده شده است. برای تردی هیدروژنی نیز یک فرم ساده از معادله سرعت رشد ترک، مشتق شده و انتشار هیدروژن برای به‌دست آوردن توزیع اتم‌های هیدروژن در نزدیکی ترک در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که هر دو پارامتر ای-دی و تردی هیدروژنی برای پیش‌بینی سرعت رشد

1 AL8090

2 Vacancies

3 Stress Corrosion Cracking (SCC)

4 Anodic Dissolution (AD)

5 SCC

6 AA 7050-T6

7 Nernst-Planck

8 Assisted cracking phenomenon

9 X52

10 Heat affected zone

11 pH NS4

12 API

پرداختند و نتیجه گرفتند که این تنش باعث سرعت بخشیدن به نفوذ هیدروژن و توزیع بیشتر آن می‌شود. تُنگ و همکاران [۱۶] به بررسی تأثیر هیدروژن بر روی خواص مکانیکی ورق‌های زیرکالوی-۴<sup>۴</sup> پرداختند. مشاهده شد در تمام نمونه‌های هیدروژن‌دهی شده با دمای بالای ۴۰۰°C شکست نرم اتفاق افتاد. زمانی که دما از ۲۵°C به ۴۰۰°C می‌رسد، استحکام حدود ۷۰٪ کاهش می‌یابد. به‌علاوه نتیجه‌گیری شد که تأثیر هیدروژن بر روی کاهش سطح مقطع<sup>۵</sup>، بیشتر از تأثیر آن بر روی استحکام است. شنگ و همکاران [۱۷] در مقاله‌ای به بررسی تأثیر روش برش، بر روی تردی هیدروژنی فولاد ام-ان تی-دبلیو-آی-پی<sup>۶</sup> پرداختند. تهیه نمونه‌ها با روش‌های ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی<sup>۷</sup>، برش لیزری<sup>۸</sup>، برش با واترجت<sup>۹</sup> و بلنکینگ<sup>۱۰</sup> صورت گرفت. مشاهده شد نمونه‌ی با شارژ هیدروژنی و برش داده‌شده با لیزر به میزان ۶۲٪ در آزمون کشش، افزایش طول داد. نمونه با شارژ هیدروژنی که با روش بلنکینگ تهیه شده بود با ۳۰٪ افزایش طول، کمترین تغییر طول را نشان داد. حساسیت بالای نمونه‌های برش داده‌شده با روش بلنکینگ به تردی هیدروژنی به دلایل چگالی بالای نابعایی‌ها ناشی از پلاستیسیته محلی ایجادشده توسط هیدروژن و تنش پسماند ایجادشده حین برش است.

توجه به مطالعات پیشین، اهمیت بررسی خواص مکانیکی مواد در شرایطی که امکان نفوذ هیدروژن و تردی هیدروژنی وجود دارد را نشان می‌دهد. در مقاله حاضر، آلیاژ جی-تی-دی<sup>۱۱</sup> ۴۵۰ به عنوان فولاد زنگ نزن مارتنزیتی<sup>۱۲</sup> با استحکام بالا و مقاومت به خوردگی نسبتاً زیاد که در ساخت پره کمپرسورها کاربرد دارد، در شرایط ترک‌خوردگی با تردی هیدروژنی داخلی قرار گرفته است. همچنین در کنار تردی هیدروژنی، نمونه‌های استاندارد مورد بررسی، با روش دندانه‌گذاری تحت تنش پسماند واقع شده‌اند. بر این اساس، خواص مکانیکی آلیاژ به‌صورت تابعی از تردی هیدروژنی و تنش پسماند مورد ارزیابی قرار گرفته است. نمونه‌ها بعد از ایجاد تنش پسماند، در شرایط شارژ هیدروژنی قرار گرفته و سپس تست کشش بر روی آن‌ها انجام

۴۴۵ جی-۱-ام<sup>۱</sup> پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش چگالی جریان میزان جذب هیدروژن در فولاد افزایش یافته و افزایش چگالی جریان سبب ایجاد تاول هیدروژنی و بزرگ‌تر شدن اندازه تاول‌های ایجادشده در سطح می‌شود. همچنین ارتباط خاصی بین محل ایجاد حفره‌های خوردگی و تاول‌های هیدروژنی از نتایج تجربی این بررسی مشاهده نشد. کارنو و همکاران [۱۲] به ارائه مدلی برای محاسبه تأثیر صافی سطح بر روی غلظت هیدروژن در فولادهای کم‌کربن پرداختند. در این مدل‌سازی از قانون دوم فیک استفاده شد و پس از تشکیل معادله، برای حل از روش تفاضل محدود<sup>۲</sup> استفاده گردید. مشاهده شد نتایج حل عددی و تجربی بر هم منطبق هستند که بیانگر این واقعیت است که با افزایش صافی سطح، غلظت هیدروژن در فولاد کاهش می‌یابد. بولزونی [۱۳] به مطالعه شارژ هیدروژنی در فولادهای کم‌آلیاژ ایکس ۶۵ و اف ۲۲ پرداخت. برای اندازه‌گیری میزان هیدروژن در نمونه‌های شارژ هیدروژنی شده از دو روش حمام گلیسرول و آنالیزور هیدروژن ال-ای-سی-ا<sup>۳</sup> استفاده شد. تاکاکوا و همکاران [۱۴] به بررسی ارتباط بین هیدروژن و تنش سطحی در فولاد ضدزنگ آستنیتی پرداختند. برای ایجاد تنش پسماند مختلف، با استفاده از چندین دیسک سمباده، صافی سطح متفاوتی بر روی نمونه‌ها ایجاد شد. پس از شارژ هیدروژنی، میزان هیدروژن جذب شده با روش آنالیز دفع گرمایی<sup>۳</sup> به‌دست آمده است. نتایج نشان می‌دهد که جذب هیدروژن در نمونه با تنش پسماند اولیه (کششی یا فشاری) سبب کاهش مقادیر تنش پسماند با زمان می‌شود؛ به‌طوری‌که در مقادیر پایین تنش پسماند کششی با اشباع شدن نفوذ هیدروژن و جایگیری اتم‌های هیدروژن داخل شبکه فلزی، تنش پسماند فشاری در نمونه ایجاد می‌شود. همچنین در نمونه با تنش پسماند فشاری با گذشت زمان، مقادیر تنش پسماند فشاری افزایش می‌یابد. مقایسه میزان تغییرات تنش پسماند در دو حالت قبل و بعد از شارژ هیدروژنی نشان می‌دهد که میزان نفوذ هیدروژن در نمونه با تنش پسماند کششی بیشتر از نمونه با تنش پسماند فشاری است؛ به عبارت دیگر، حضور تنش پسماند کششی سبب جذب بیش‌تر هیدروژن در مقایسه با تنش پسماند فشاری می‌گردد. جیانگ و همکاران [۱۵] به بررسی عددی تأثیر تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری بر روی توزیع هیدروژن

4 Zircaloy-4

5 Reduction of area

6 high-Mn TWIP

7 Electrical discharge machining

8 Laser cutting

9 Abrasive waterjet cutting

10 Blanking

11 GTD450

12 Martensitic stainless steel

1 445J1M

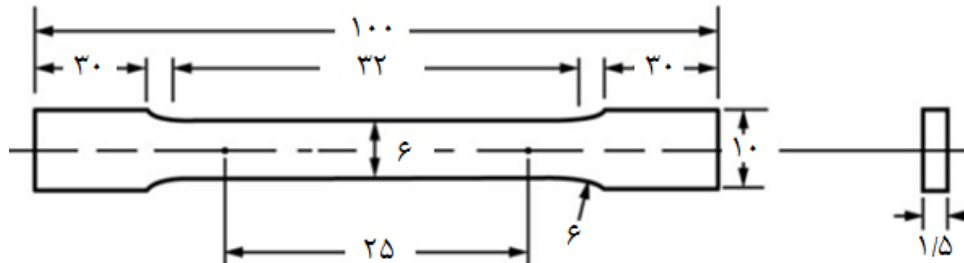
2 Finite differences method

3 Thermal desorption analysis

جدول ۱. ترکیب شیمیایی فولاد AISI Custom450 [۱۹].

Table 1. Chemical composition of AISI Custom450 steel [19].

عنصر	C	Mn	Si	P	Co	Cr	Ni	Mo	Cu	Nb	V	Fe
درصد (%)	۰/۰۲۷	۰/۶	۰/۲۴۵	۰/۰۱۶۶	۰/۰۶۰۴	۱۵/۱۷	۶/۴۳	۰/۷۹	۱/۴۸	۰/۳۵	۰/۰۸	تعدلی



شکل ۱. طرحواره نمونه استاندارد آزمایش کشش.

Fig. 1. A schematic of Standard sample of tensile test.

این روش سطح نمونه‌ها از سمباده ۸۰ تا سمباده ۳۰۰۰، به طوری که سطوحی براق و آینه‌ای حاصل شود، پلیش شد. بر روی هر نمونه سه دندان‌گذاری<sup>۵</sup>، یکی در وسط و دو مورد در طرفین، به فاصله ۵ میلی‌متر از مرکز انجام گرفت. برای دندان‌گذاری از دستگاه کشش سنتام مدل اس-تی-ام-۲۵۰ و یک شفت هارد کروم<sup>۶</sup> به قطر ۶ میلی‌متر استفاده گردید. تنش پسماند حاصل از این دندان‌گذاری در دو سطح ۵ کیلو نیوتن و ۹ کیلو نیوتن با سرعت ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه، بر روی نمونه‌ها اعمال شده‌اند. به منظور اعمال تردی هیدروژنی از روش الکتروشیمیایی برای پیش‌شارژ نمونه‌ها در محلول ۰/۵ مولار سولفوریک اسید<sup>۷</sup> در دمای محیط استفاده شد. مدار و سل شارژ هیدروژنی مورد استفاده در شکل ۲ نشان داده شده است. در این سل، نمونه به عنوان کاتد و الکترود گرافیتی به عنوان آند انتخاب شد. در این آزمایش با کاهش مولکول‌های آب، هیدروژن بر روی سطح نمونه تولید می‌شود. در بسیاری از پدیده‌های متالورژیکی مانند خوردگی و تردی هیدروژنی اندرکنش میان سطح فلز و محیط پیرامون آن شکل می‌گیرد. عامل تردی هیدروژنی ایجاد یون هیدروژن بر روی سطح فلز و نفوذ آن به داخل ماده است؛ اما علاوه بر این اتفاق با به هم پیوستن اتم‌های هیدروژن مولکول هیدروژن تشکیل شده و با ایجاد حباب از سطح فلز جدا و با بزرگ شدن از محلول خارج می‌شود [۱۰].

شد. بر این اساس، تغییرات خواص مکانیکی نمونه شامل تنش تسلیم، تنش نهایی، انعطاف‌پذیری و کاهش سطح مقطع شکست و چقرمگی، برحسب تغییرات تنش پسماند و تردی هیدروژنی گزارش شده است.

## ۲- انتخاب و آماده‌سازی نمونه

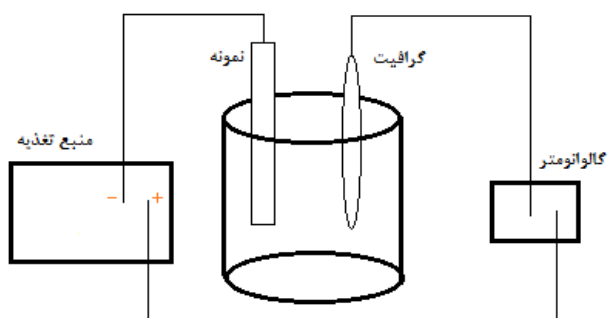
نمونه‌های استاندارد آزمایش کشش تهیه شده در این پژوهش از جنس فولاد ای-آی-اس-آی کاستم<sup>۱</sup> ۴۵۰ است؛ که از ریشه پره کمپرسور، با استفاده از روش وایرکات<sup>۲</sup> تهیه شده‌اند. این فولاد از گروه فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی تمپر شده با استحکام بالا و مقاومت به خوردگی نسبتاً زیاد است. ترکیب شیمیایی این فولاد در جدول ۱ آورده شده است.

این فولاد مربوط به خانواده فولادهای ضدزنگ رسوب‌سختی شونده<sup>۳</sup> است؛ که در دمای K۱۳۱۱ به مدت ۳۰ دقیقه عملیات حرارتی شده و سپس در آب سریع سرد می‌شوند. سپس عملیات پیرسختی در بازه دمایی K۷۵۵ تا K۸۹۳ به مدت چهار ساعت بر روی آن‌ها انجام می‌شود. نمونه استاندارد آزمایش کشش، از نوع تخت بر اساس استاندارد ای-اس-تی-ام ای<sup>۴</sup> [۱۸] است. ابعاد نمونه انتخاب شده در شکل ۱ برحسب میلی‌متر آورده شده‌اند.

برای آماده‌سازی سطح از روش پلیش مکانیکی استفاده شد. در

5 Indentation  
6 Hard chrome  
7 Sulfuric acid (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)

1 AISI Custom450  
2 Wire Cut  
3 Precipitation hardening stainless steel  
4 ASTM E8



ب



الف

شکل ۲. مدار و سل شارژ هیدروژنی مورد استفاده. الف) مدار واقعی ب) طرحواره مدار.  
**Fig. 2. Hydrogen charging circuit and cell. a) Real circuit b) Schematic circuit.**



شکل ۳. نمونه آماده شده جهت انجام شارژ هیدروژنی.  
**Fig. 3. Sample prepared for hydrogen charging.**

نمونه‌ها بلافاصله پس از شارژ هیدروژنی تحت آزمایش کشش، با سرعت  $3 \text{ mm/min}$  قرار گرفتند. به منظور اندازه‌گیری میزان جابجایی نسبی طول مشخصه نمونه در حین آزمایش، از اکستنسومتر<sup>۴</sup> تک‌محوری استفاده گردید. اکستنسومتر به ابتدا و انتهای طول مشخصه که در نمونه استاندارد مورد آزمایش،  $25$  میلی‌متر است، متصل و در حین آزمایش کشش، تغییرات طول مشخصه ثبت شد. برای محاسبه میزان هیدروژن جذب شده به نمونه‌ها از روش اکسیداسیون الکتروشیمیایی هیدروژن استفاده شد. سل و مدار دشارژ هیدروژن در شکل ۴ آورده شده است.

ابتدا کل سطح دو نمونه با چسب و لاک پوشانده شد (شکل ۵) و تنها سطحی به مساحت  $0.18 \text{ cm}^2$ ، در مرکز نمونه، بدون پوشش ماند تا در معرض محلول قرار بگیرد. سپس یکی از نمونه‌ها ابتدا در

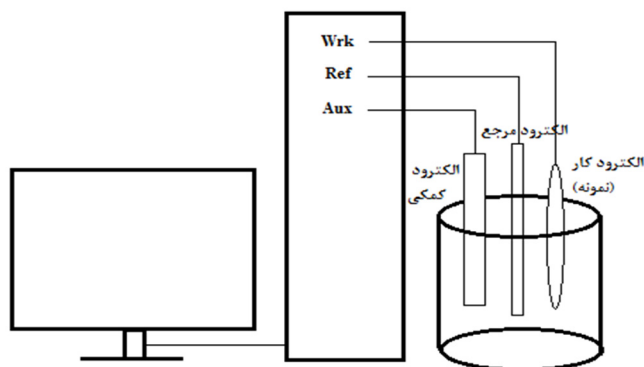
وجود برخی عناصر در محیط الکترولیت می‌تواند این دو واکنش را تحت تأثیر قرار دهد. طبق پژوهش‌های انجام شده وجود برخی عناصر مانند  $P, Sb, Sn, As, Pb, S$  و  $Se$  در الکترولیت، با کاهش ثابت نرخ ترکیب مجدد<sup>۱</sup>، نرخ تشکیل مولکول هیدروژن از اتم هیدروژن را کم می‌کنند. در نتیجه هیدروژن نفوذی بیشتر و تردی هیدروژنی نیز افزایش می‌یابد [۲۰]؛ بنابراین، برای جلوگیری از به هم پیوستن اتم‌های هیدروژن و تشکیل مولکول هیدروژن، به میزان  $0.25 \text{ g/l}$  تری‌اکسید آرسنیک<sup>۲</sup> به محلول اضافه شد [۲۱].

فرآیند شارژ هیدروژنی از یک وجه نمونه انجام می‌گیرد. به همین دلیل مطابق شکل ۳ همه سطوحی که داخل محلول شارژ قرار می‌گیرند، به‌جز ناحیه طول مشخصه<sup>۳</sup>، با لاک و چسب پوشانده شد.

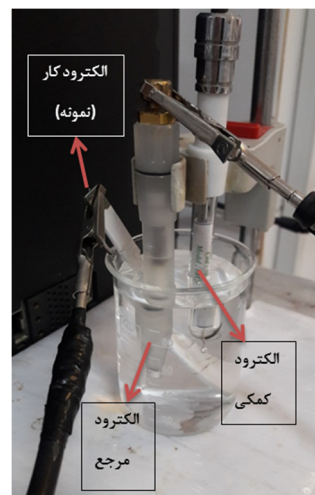
1 Recombination rate constant  
 2 Arsenic trioxide ( $As_2O_3$ )  
 3 Gage length

4 Extensometer





ب



الف

شکل ۴. سلول و مدار دشارژ هیدروژن. الف) سلول واقعی ب) طرحواره مدار.

Fig. 4. Hydrogen discharge cell and circuit. a) Real cell b) Schematic circuit.



شکل ۵. نمونه آماده شده برای شارژ و دشارژ هیدروژنی.

Fig. 5. Sample prepared for hydrogen charging and discharging.

بر روی سطح نمونه از رابطه (۱) استفاده می شود.

$$Q_H^{ev} = \int_0^{\tau_{exp}} I_{cath}(\tau) d\tau \quad (1)$$

مقدار هیدروژن جذب شده توسط فلز در آزمایش دشارژ هیدروژنی<sup>۱</sup> تحت پلاریزاسیون آندی<sup>۲</sup> از رابطه (۲) به دست می آید:

$$Q_H^{abs} = \int_0^{\tau_{dis}} [I_H(\tau) - I_{ref}(\tau)] d\tau \quad (2)$$

در روابط (۱) و (۲) پتانسیل ثابت فرض شده است. همچنین  $I_{cath}(\tau)$  نشان دهنده جریان پلاریزاسیون کاتدی است. در رابطه (۲)  $I_H(\tau)$  جریان پلاریزاسیون آندی برای نمونه ای است که قبلاً شارژ هیدروژنی شده و  $I_{ref}(\tau)$  جریان پلاریزاسیون آندی برای نمونه ی

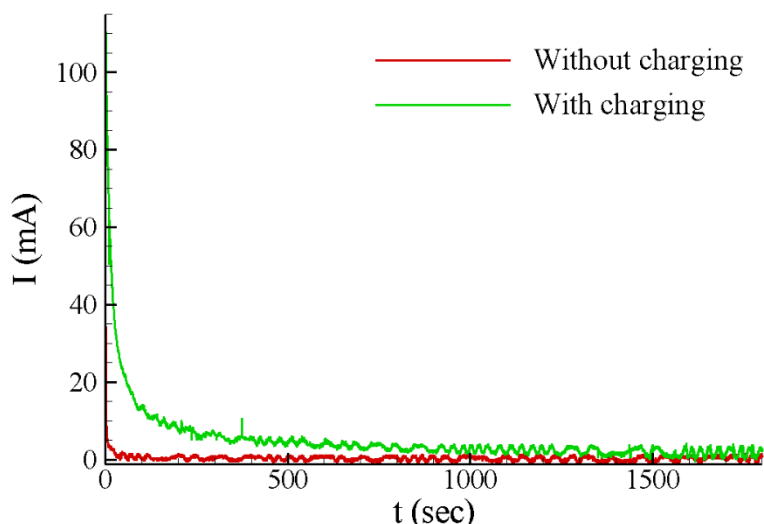
محلول معرفی شده برای پیش شارژ، به مدت ۳۰ دقیقه، تحت شارژ هیدروژنی با دانسیته جریان  $165 \mu A/cm^2$  قرار گرفت. بلافاصله پس از شارژ، نمونه به سل دشارژ منتقل شده و به عنوان الکتروود کاری بسته شد. عملیات دشارژ در محلول  $0.2$  مولار سدیم هیدروکسید به مدت ۱۸۰۰ ثانیه و تحت پتانسیل آندی ثابت  $168 mV(SCE)$  انجام گرفت. بار دیگر این روند برای نمونه دوم ولی بدون پیش شارژ تکرار گردید. نمودار جریان پلاریزاسیون (شکل ۶) برحسب زمان از طریق دستگاه متصل به کامپیوتر به دست آمد.

### ۳- محاسبه میزان هیدروژن جذب شده

دو پارامتر مهم تأثیرگذار بر شارژ هیدروژنی زمان شارژ و چگالی جریان در مدار شارژ است. این دو فاکتور رابطه ی مستقیم با میزان غلظت هیدروژن دارند و با افزایش هرکدام میزان هیدروژن حل شده در فولاد افزایش می یابد [۲۲]. برای محاسبه میزان هیدروژن تولید شده

1 Hydrogen discharging

2 Anodic polarization



شکل ۶. نمودار جریان پلاریزاسیون بر حسب زمان برای دو نمونه شارژ شده و بدون شارژ.  
 Fig. 6. Diagram of polarization current over time for two charged and uncharged samples.

جدول ۲. مقادیر هیدروژن برای نمونه‌های با ۳۰ دقیقه، ۱ ساعت و ۲ ساعت شارژ هیدروژنی.

Table 2. Hydrogen values for samples with 30 minutes, 1 hour and 2 hours of hydrogen charge.

$C_H \left( \frac{\text{mol}}{\text{cm}^3} \right)$	$Q_H^{abs} \text{ (mA}\times\text{s)}$	مدت زمان شارژ/دشارژ هیدروژنی
$3/27 \times 10^{-6}$	۸/۵	۳۰ دقیقه
$9/44 \times 10^{-6}$	۲۴/۶	۱ ساعت
$16/77 \times 10^{-6}$	۴۳/۷	۲ ساعت

#### ۴- مقدمات تحلیل آماری و تعریف پارامترها

در این مقاله سهم مشارکت  $P$  هرکدام از متغیرهای مستقل بر روی متغیرهای وابسته به کمک تحلیل آماری محاسبه خواهد شد. به عبارت دیگر، سهم مشارکت دو پارامتر تردی هیدروژنی و تنش پسماند بر هرکدام از متغیرهای وابسته شامل تنش تسلیم، تنش نهایی، انعطاف‌پذیری، کاهش سطح مقطع شکست، چقرمگی و سختی، گزارش می‌شود. بدین منظور فرض کنید  $P_{H,R}$  سهم مشارکت تردی هیدروژنی و  $P_{res,R}$  سهم مشارکت تنش پسماند بر متغیر وابسته دلخواه  $R$  باشد. برای محاسبه سهم مشارکت  $P_{H,R}$  و  $P_{res,R}$  از روابط (۴) و (۵) استفاده می‌شود [۲۳]:

$$P_{H,R} = \frac{S_{H,R}}{S_{T,R}} \times 100 \quad (4)$$

$$P_{res,R} = \frac{S_{res,R}}{S_{T,R}} \times 100 \quad (5)$$

بدون هیدروژن است.

میزان غلظت<sup>۱</sup> هیدروژن از رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

$$C_H = \frac{Q_H^{abs}}{zFV} \quad (3)$$

در این رابطه  $z$  تعداد الکترون‌های شرکت‌کننده در واکنش،  $F$  ثابت فارادی و برابر با  $96487 \text{ C/mol}$  و  $V$  حجم مؤثر نمونه بر حسب سانتی‌متر مکعب (حاصل ضرب سطح در تماس با محلول در ضخامت نمونه) است [۹]. با محاسبه مساحت بین دو نمودار به وسیله کد متلب،  $Q_H^{abs}$ ، برابر با  $8/52 \text{ mA}\cdot\text{s}$  به دست آمد. همچنین از طریق رابطه (۳) میزان هیدروژن  $3/27 \times 10^{-6} \text{ mol/cm}^3$  محاسبه شد. در جدول ۲ مقادیر هیدروژن برای نمونه‌های با ۳۰ دقیقه، ۱ ساعت و ۲ ساعت شارژ هیدروژنی شده، آورده شده است.

1 Concentration

$$CF = \frac{\left( \sum_{i=1}^{N_{H,1}} R_{H,1} + \sum_{i=1}^{N_{H,2}} R_{H,2} \right)^2}{N_{H,1} + N_{H,2}} \quad (10)$$

برای محاسبه مقدار  $CF$  می‌توان از رابطه (۱۱) نیز استفاده کرد:

$$CF = \frac{\left( \sum_{i=1}^{N_{res,1}} R_{res,1} + \sum_{i=1}^{N_{res,2}} R_{res,2} \right)^2}{N_{res,1} + N_{res,2}} \quad (11)$$

آخرین پارامتری که برای محاسبه سهم مشارکت نیاز است، واریانس کل است. برای محاسبه آن، رابطه (۱۲) ارائه شده است [۲۳].

$$S_{T,R} = \sum_{i=1}^{N_{res,1}} R_{res,1}^2 + \sum_{i=1}^{N_{res,2}} R_{res,2}^2 - CF \quad (12)$$

پارامترهای انعطاف‌پذیری  $L$ ، کاهش سطح مقطع شکست  $A$  و چقرمگی  $U_T$  به ترتیب در روابط (۱۳)، (۱۴) و (۱۵) آورده شده است.

$$L = \frac{l_f - l_0}{l_0} \quad (13)$$

$$A = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \quad (14)$$

$$U_T = \int \sigma d\varepsilon \quad (15)$$

که در آن‌ها  $d$ ،  $A$ ،  $\sigma$  و  $\varepsilon$  به ترتیب طول نمونه، سطح مقطع نمونه، تنش و کرنش می‌باشند. همچنین به‌منظور محاسبه مقدار درصد اختلاف هر پارامتر با مقدار متناظر در حالت مبنا  $e$ ، مقدار اختلاف هر پارامتر با مقدار متناظر در حالت مبنا  $d$ ، انحراف استاندارد  $S$  و خطای استاندارد میانگین  $S_e$  در هر آزمایش به ترتیب از روابط (۱۶) تا (۱۸) استفاده شده است.

$$e = \frac{\bar{R} - \bar{R}_b}{\bar{R}_b} \times 100 \quad (16)$$

$$d = \bar{R} - \bar{R}_b \quad (17)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (R_i - \bar{R})^2}{(N-1)}} \quad (18)$$

در روابط (۴) و (۵)،  $S_{H,R}$  و  $S_{res,R}$  به ترتیب واریانس کل پارامترهای تردی هیدروژنی و تنش پسماند به ازای متغیر دلخواه  $R$  هستند. برای محاسبه مقادیر  $S_H$  و  $S_{res}$  از روابط (۶) و (۷) استفاده می‌شود [۲۳].

$$S_{H,R} = \frac{R_{H,1}^2}{N_{H,1}} + \frac{R_{H,2}^2}{N_{H,2}} - CF \quad (6)$$

$$S_{res,R} = \frac{R_{res,1}^2}{N_{res,1}} + \frac{R_{res,2}^2}{N_{res,2}} - CF \quad (7)$$

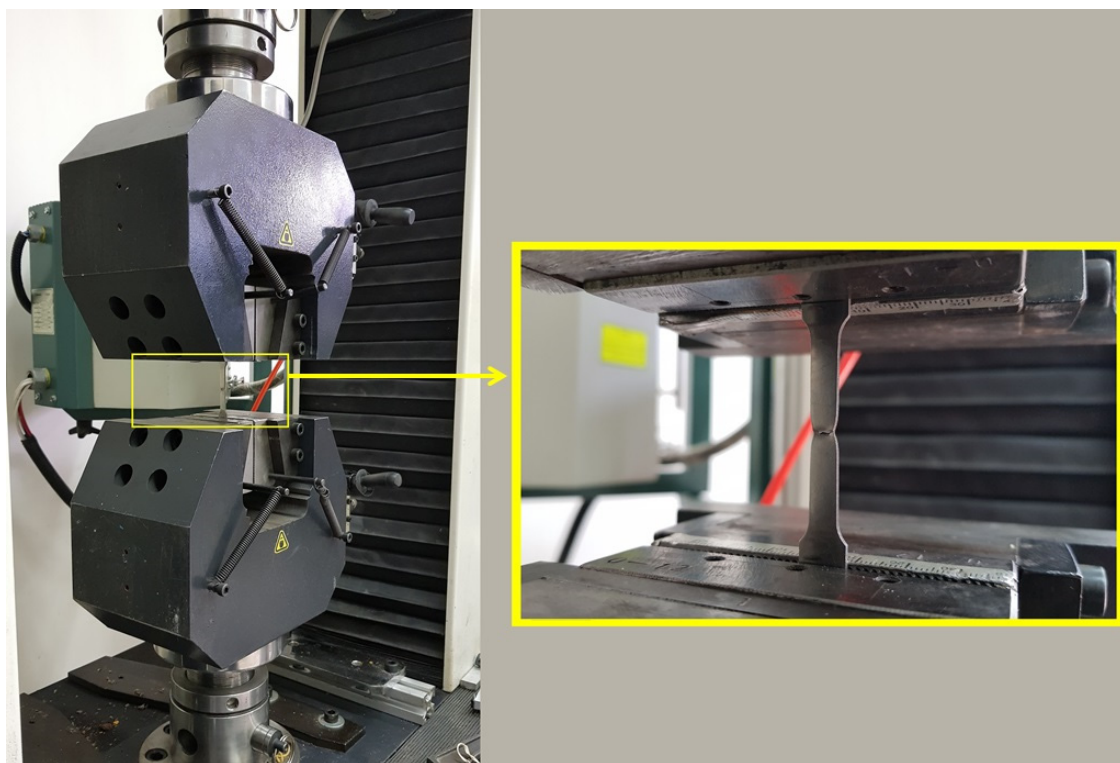
در روابط بالا، زیرنویس ۱ و ۲ به ترتیب سطوح ۱ و ۲ را برای دو پارامتر تردی هیدروژنی و تنش پسماند نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که تردی هیدروژنی در دو سطح شارژ یک‌ساعته و شارژ دوساعته و تنش پسماند در دو سطح مرتبط با دو نیروی ۵ و ۹ کیلو نیوتنی تنظیم شده‌اند. در روابط (۶) و (۷)، پارامترهای  $R_H$  و  $R_{res}$  به ترتیب مربع مجموع مقادیر متغیر وابسته  $R$  به ازای مقادیر ثابت تردی هیدروژنی و تنش پسماند است؛ که به‌صورت روابط (۸) و (۹) محاسبه می‌شوند [۲۳]:

$$R_{H,1}^2 = \left( \sum_{i=1}^{N_{H,1}} R_{H,1} \right)^2, R_{H,2}^2 = \left( \sum_{i=1}^{N_{H,2}} R_{H,2} \right)^2 \quad (8)$$

$$R_{res,1}^2 = \left( \sum_{i=1}^{N_{res,1}} R_{res,1} \right)^2, R_{res,2}^2 = \left( \sum_{i=1}^{N_{res,2}} R_{res,2} \right)^2 \quad (9)$$

همچنین تعداد کل آزمایش‌ها به ازای سطح ۱ تردی هیدروژنی و دو سطح تنش پسماند (با احتساب تعداد کل تکرارها) با  $N_{H,1}$  و تعداد کل آزمایش‌ها به ازای سطح ۲ تردی هیدروژنی و دو سطح تنش پسماند (با احتساب تعداد کل تکرارها) با  $N_{H,2}$  نشان داده شده است. به‌طور مشابه تعداد کل آزمایش‌ها به ازای سطح ۱ تنش پسماند و دو سطح تردی هیدروژنی (با احتساب تعداد کل تکرارها) با  $N_{res,1}$  و تعداد کل آزمایش‌ها به ازای سطح ۲ تنش پسماند و دو سطح تردی هیدروژنی (با احتساب تعداد کل تکرارها) با  $N_{res,2}$  نشان داده شده است. در روابط (۶) و (۷)، پارامتر  $CF$ ، فاکتور تصحیح بوده که به‌صورت رابطه (۱۰) تعریف می‌شود [۲۳]:





شکل ۷. نمایش آزمون کشش در دستگاه SANTAM STM-250  
 Fig. 7. Picture of tensile test on SANTAM STM-250

#### ۵-۱- تنش تسلیم

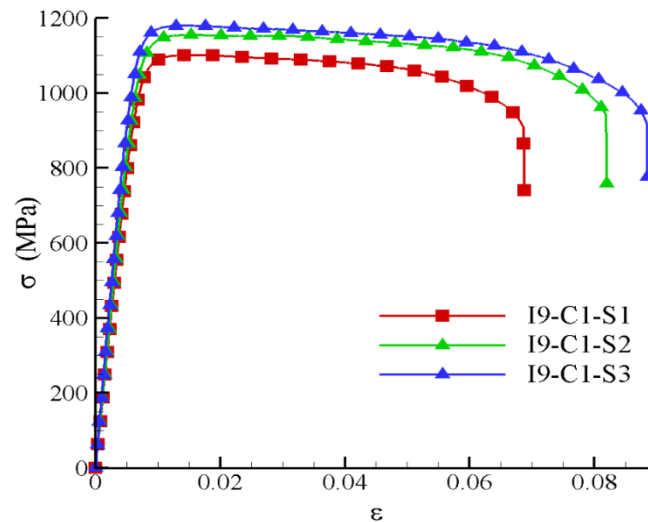
همان‌طور که اشاره شد، آزمایش‌ها در دو سطح به ازای متغیرهای مستقل (تردی هیدروژنی و تنش پسماند) طراحی شده‌اند. همچنین هر آزمایش سه بار تکرار خواهد شد. از سوی دیگر و با توجه به وجود یک آزمایش مبنا مربوط به نمونه بدون شارژ هیدروژنی و تنش پسماند صفر، تعداد کل آزمایش‌ها ۱۵ مورد خواهد بود. به‌منظور تسهیل در نام‌گذاری آزمایش‌ها، از عبارت Iq-Cm-Nn استفاده شده است. در این روش نام‌گذاری، حرف q مقدار نیروی اعمالی (کیلو نیوتن)، m زمان (ساعت) شارژ هیدروژنی و حرف n مرتبه تکرار آزمایش را نشان می‌دهد. آزمایش کشش نمونه در آزمایشگاه «اندازه‌گیری و تحلیل تنش‌های پسماند» دانشگاه زنجان، توسط دستگاه سنتام مدل اس-تی-ام-۲۵۰ مطابق شکل ۷ انجام شده است. همچنین اندازه‌گیری جابجایی طول سنجه نمونه استاندارد در حین آزمایش به‌وسیله اکستنسومتر صورت پذیرفته است. ذکر این نکته ضروری است که سطح مقطع نمونه بعد از دندان‌گذاری اندازه‌گیری مجدد شده و مقدار تنش مهندسی بر اساس سطح مقطع تغییر یافته محاسبه شده است. به عنوان مثال، در آزمایش I۵-C۲-N۲ (آزمایش مربوط به تنش

$$S_e = \frac{S}{\sqrt{N}} \quad (19)$$

در روابط (۱۶) تا (۱۹) مقدار متوسط پارامتر  $R$  بعد از  $N$  بار تکرار است. همچنین  $\bar{R}_b$  مقدار متوسط کمیت  $R$  در شرایط مبنا است.

#### ۵- نتایج

در این قسمت به بررسی اثرات تردی هیدروژنی و تنش پسماند بر روی خواص مکانیکی تست کشش مربوط به نمونه جی-تی-دی-۴۵۰ پرداخته می‌شود. طراحی آزمایش‌ها به‌گونه‌ای است که هرکدام از پارامترهای مستقل شامل تردی هیدروژنی و تنش پسماند در دو سطح تعریف شده‌اند. به عبارت دیگر، فرآیند شارژ هیدروژنی در دو گروه شارژ یک‌ساعته و شارژ دوساعته و تنش پسماند در دو گروه توسط نیروهای ۵ کیلو نیوتنی و ۹ کیلو نیوتنی ایجاد شده‌اند. خواص مکانیکی مورد بررسی شامل تنش تسلیم، تنش نهایی، انعطاف‌پذیری، کاهش سطح مقطع شکست و چقرمگی است.



شکل ۸. نمودار تنش بر حسب کرنش در شرایط I۹-C۱ برای سه تکرار S۱، S۲ و S۳  
**Fig. 8. Stress diagram in terms of strain in I9-C1 conditions for three repetitions S1, S2 and S3.**

از این رو، در هر بخش مقدار انحراف استاندارد  $S$  و خطای استاندارد میانگین  $S_e$  برای هر پارامتر در هر آزمایش به طور مشخص گزارش خواهد شد. به عنوان مثال در آزمایش I۹-C۱ (شکل ۸)، انحراف استاندارد برای تنش تسلیم  $S=0.43$  و خطای استاندارد میانگین  $S_e=0.24/0.87$  به دست آمده است. با مقایسه مقدار خطای استاندارد میانگین با میزان تغییرات تنش تسلیم در این آزمایش نسبت به حالت مینا  $d=-16/49$ ، مشاهده می شود که تغییرات ثبت شده در این آزمایش در محدوده خطا قرار گرفته و قابل استناد نیست.

برای محاسبه مقدار تنش تسلیم، خطی از نقطه  $(0, 0.002)$  با شیبی برابر با مدول الاستیسیته (قابل محاسبه توسط شیب نمودار تنش-کرنش) ترسیم شده است. محل برخورد این خط با نمودار تنش-کرنش، مقدار تنش تسلیم را مشخص خواهد کرد. جدول ۳ مقدار تنش تسلیم را برای حالت مینا و به ازای ۳ تکرار و مقدار متوسط آن گزارش می کند. مطابق با این جدول مقدار متوسط تنش تسلیم برای نمونه اولیه  $1086.06 \text{ MPa}$  با  $13/33$  واحد انحراف استاندارد به همراه  $7/70$  واحد خطای استاندارد میانگین به دست آمده است. همچنین جدول ۴ مقادیر تنش تسلیم در هر تکرار  $\sigma_{y_i}$ ، مقدار متوسط تنش تسلیم  $\bar{\sigma}_y$ ، درصد اختلاف مقدار متوسط با مقدار متوسط حالت مینا  $\epsilon$ ، اختلاف مقدار متوسط با مقدار متوسط حالت مینا  $d$ ، انحراف استاندارد  $S$  و خطای استاندارد میانگین  $S_e$  را برای چهار آزمایش I۵-C۱، I۵-C۲، I۹-C۱ و I۹-C۲ گزارش کرده است.

پسماند ناشی از نیروی ۵ کیلو نیوتنی، شارژ هیدروژنی دوساعته و تکرار دوم) مساحت سطح مقطع نمونه از مقدار  $6 \times 1/5 \text{ mm}^2$  به میزان  $6 \times 1/32 \text{ mm}^2$  در محل دندانه گذاری کاهش یافته است.

نتایج مربوط به تغییرات تنش تسلیم بر حسب کرنش برای حالت I۹-C۱ و برای سه تکرار در شکل ۸ آورده شده است. بر این اساس مشاهده می شود که میان نتایج سه آزمایش در شرایط مشابه تطابق کامل وجود ندارد. این موضوع را می توان به عوامل ایجاد خطا در حین آماده سازی نمونه و انجام آزمایش کشش نسبت داد. آماده سازی نمونه در محلول شارژ در سه آزمایش مختلف کاملاً مشابه نخواهند بود، چراکه میزان جذب هیدروژن توسط نمونه علاوه بر میزان غلظت محلول، به سطحی از نمونه که با محلول در تماس است، بستگی دارد. میزان غلظت محلول در تمام آزمایش ها یکسان در نظر گرفته شده است؛ اما سطحی از نمونه که در معرض محلول قرار دارد، می تواند اندکی تغییر کند. دلیل تغییر این سطح، جدا شدن چسب از سطح روی نمونه به علت خیس شدن آن است. همچنین دقت دستگاه تست کشش در ثبت کرنش ها توسط اکستنسومتر و نیز احتمال سُرخوردن نمونه از فک های دستگاه می تواند منشأ تولید خطا باشد.

اطلاعات استخراج شده از نمودار تنش-کرنش می تواند هر یک از پارامترهای تنش تسلیم  $\sigma_y$ ، تنش نهایی  $\sigma_{us}$ ، درصد انعطاف پذیری  $L$  و چقرمگی  $U_T$  باشد. مقدار خطای ایجاد شده مرتبط با هر کدام از این پارامترها نسبت به مقدار متوسط سه آزمایش، یکسان نیست.

جدول ۳. مقادیر تنش تسلیم در هر تکرار  $\sigma_{y,i}$ ، مقدار متوسط تنش تسلیم  $\bar{\sigma}_y$ ، انحراف استاندارد  $S$  و خطای میانگین استاندارد  $S_e$  در آزمایش مینا.

**Table 3. The values of yield stress in each repetition  $\sigma_{y,i}$ , the mean value of yield stress  $\bar{\sigma}_y$ , the standard deviation  $S$  and the mean standard error of  $S_e$  in the baseline experiment.**

I-C						نام آزمایش
$\sigma_{y,1}$	$\sigma_{y,2}$	$\sigma_{y,3}$	$\bar{\sigma}_y$	$S$	$S_e$	متغیر
۱۰۸۹/۱۱	۱۰۹۷/۶	۱۰۷۱/۴۷	۱۰۸۶/۰۶	۱۳/۳۳	۷/۷۰	تنش تسلیم (MPa)

جدول ۴. مقادیر تنش تسلیم در هر تکرار  $\sigma_{y,i}$ ، مقدار متوسط تنش تسلیم  $\bar{\sigma}_y$ ، درصد اختلاف مقدار متوسط با حالت مینا  $e\%$ ، انحراف استاندارد  $S$  اختلاف مقدار متوسط با مقدار متوسط حالت مینا  $d$  و خطای استاندارد میانگین  $S_e$  در چهار آزمایش I۵-C۱، I۵-C۲، I۹-C۱ و I۹-C۲

**Table 4. The values of yield stress in each repetition  $\sigma_{y,i}$ , the mean value of yield stress  $\bar{\sigma}_y$ , the percentage difference between the mean value and the base state  $e\%$ , the standard deviation  $S$  the difference between the mean value and the base state  $d$  and the mean standard error  $S_e$  in four experiments I5-C1, I5-C2, I9-C1 and I9-C2.**

I۵-C۱								نام آزمایش
$\sigma_{y,1}$	$\sigma_{y,2}$	$\sigma_{y,3}$	$\bar{\sigma}_y$	$e\%$	$d$	$S$	$S_e$	متغیر
۱۰۶۷/۱۵	۱۱۲۲/۷	۱۰۳۸/۵۹	۱۰۷۶/۱۵	-۰/۹۱	-۹/۹۱	۴۲/۷۷	۲۴/۶۹	تنش تسلیم (MPa)
I۵-C۲								نام آزمایش
$\sigma_{y,1}$	$\sigma_{y,2}$	$\sigma_{y,3}$	$\bar{\sigma}_y$	$e\%$	$d$	$S$	$S_e$	متغیر
۱۰۲۷/۸	۱۰۷۶/۴۳	۱۱۰۴/۴۸	۱۰۶۹/۵۷	-۱/۵۲	-۱۶/۴۹	۳۸/۷۹	۲۲/۴۰	تنش تسلیم (MPa)
I۹-C۱								نام آزمایش
$\sigma_{y,1}$	$\sigma_{y,2}$	$\sigma_{y,3}$	$\bar{\sigma}_y$	$e\%$	$d$	$S$	$S_e$	متغیر
۱۰۵۶/۸۴	۱۱۱۵/۰۴	۱۱۴۰/۹۷	۱۱۰۴/۲۸	۱/۶۸	۱۸/۲۲	۴۳/۰۸	۲۴/۸۷	تنش تسلیم (MPa)
I۹-C۲								نام آزمایش
$\sigma_{y,1}$	$\sigma_{y,2}$	$\sigma_{y,3}$	$\bar{\sigma}_y$	$e\%$	$d$	$S$	$S_e$	متغیر
۱۱۲۳/۹۴	۱۰۲۰/۹	۱۱۲۹/۶۵	۱۰۹۱/۵۰	۰/۵	۵/۴۴	۶۱/۲۱	۳۵/۳۴	تنش تسلیم (MPa)

پارامتر تنش پسماند و تردی هیدروژنی بر تنش تسلیم نشان می‌دهد که سهم مشارکت تنش پسماند  $P_{res} = ۰.۹/۳۷$  است که در مقایسه با سهم تردی هیدروژنی  $P_H = ۰.۱/۴$  مقدار قابل توجهی دارد. لازم به ذکر است که مقادیر گزارش شده تحت عنوان سهم مشارکت تردی هیدروژنی و تنش پسماند در بازه تغییرات اعمال شده در مقاله حاضر، محاسبه شده است. ناچیز بودن سهم تردی هیدروژنی بر روی تنش تسلیم و مدول الاستیسیته توسط سازمان ناسا صحت نتایج این پژوهش را تأیید می‌کند [۱].

با مقایسه مقادیر متوسط تنش تسلیم در چهار سطح I۵(C۱, C۲) و I۹(C۱, C۲) با مقادیر متوسط در حالت مینا، اختلاف معناداری مشاهده نمی‌شود؛ چراکه بیشینه اختلاف میان نتایج چهار سطح مورد اشاره با حالت مینا در حدود ۱/۶۸٪ است. لازم به ذکر است که این میزان تغییرات نیز در دامنه خطای استاندارد میانگین قرار داشته و قابل استناد نخواهد بود. از سوی دیگر، انحراف استاندارد نیز در محدوده  $۳۸/۶۱ < S < ۷۹/۲۱$  قرار دارد که حاکی از پراکندگی کم داده‌ها نسبت به مقدار متوسط است. بررسی سهم مشارکت و

جدول ۵. مقادیر تنش نهایی در هر تکرار  $\sigma_{uts,i}$ ، مقدار متوسط تنش نهایی  $\bar{\sigma}_{uts}$ ، درصد اختلاف مقدار متوسط با حالت مبنا  $e\%$ ، انحراف استاندارد  $S$ ، اختلاف مقدار متوسط با متوسط حالت مبنا  $d$  و خطای استاندارد میانگین  $S_e$  در چهار آزمایش I۵-C۱، I۵-C۲، I۹-C۱ و I۹-C۲  
**Table 5. The values of the ultimate stress in each repetition  $\sigma_{uts,i}$ ، the mean value of the ultimate stress, the percentage difference between the mean value and the base state  $e\%$ ، the standard deviation  $S$ ، the difference between the mean value and the base state  $d$  and the mean standard error  $S_e$  in four experiments I5-C1, I5 -C2, I9-C1 and I9-C2.**

نام آزمایش							
I۵-C۱							
متغیر	$S_e$	$S$	$d$	$e\%$	$\bar{\sigma}_{uts}$	$\sigma_{uts \ ۱}$	$\sigma_{uts \ ۲}$
تنش نهایی (MPa)	۲۲/۴۸	۳۸/۹۴	-۱۸/۶۸	-۱/۶۵	۱۱۱۴/۸۷	۱۰۷۵/۸۸	۱۱۵۳/۷۵
نام آزمایش							
I۵-C۲							
متغیر	$S_e$	$S$	$d$	$e\%$	$\bar{\sigma}_{uts}$	$\sigma_{uts \ ۱}$	$\sigma_{uts \ ۲}$
تنش نهایی (MPa)	۲۷/۶۴	۴۷/۸۸	-۳۰/۵۷	-۲/۷۰	۱۱۰۲/۹۸	۱۱۲۸/۲۸	۱۱۳۲/۹۱
نام آزمایش							
I۹-C۱							
متغیر	$S_e$	$S$	$d$	$e\%$	$\bar{\sigma}_{uts}$	$\sigma_{uts \ ۱}$	$\sigma_{uts \ ۲}$
تنش نهایی (MPa)	۲۳/۲۰	۴۰/۱۸	۱۱/۶۹	۱/۰۳	۱۱۴۵/۲۴	۱۱۷۹/۵۴	۱۱۵۵/۱۶
نام آزمایش							
I۹-C۲							
متغیر	$S_e$	$S$	$d$	$e\%$	$\bar{\sigma}_{uts}$	$\sigma_{uts \ ۱}$	$\sigma_{uts \ ۲}$
تنش نهایی (MPa)	۳۲/۳۹	۵۶/۱۱	-۲۵/۲۳	-۲/۲۳	۱۱۰۸/۳۲	۱۱۲۸/۵	۱۰۴۴/۹۱

### ۵-۲- تنش نهایی

نیز سهم مشارکت تنش پسماند در تنش نهایی را  $P_{res} = ۰.۴۷$  و سهم مشارکت تردی هیدروژنی را  $P_H = ۰.۸۷۸$  تخمین می‌زند. به‌طور مشابه با حالت قبل، درصد مشارکت خطا در تنش نهایی زیاد و در حدود  $۰.۸۶/۵۲$  به‌دست آمده است. این مقدار از سهم خطا، به دلیل تغییرات اندک تنش نهایی در شرایط آزمایش، رخ داده است.

### ۵-۳- انعطاف‌پذیری و کاهش سطح مقطع شکست

طبق تعریف، انعطاف‌پذیری نسبت تغییر طول نمونه به طول اولیه آن است. بر این اساس و با افزایش تردی، مقدار انعطاف‌پذیری نمونه می‌تواند کاهش یابد. این موضوع، در نتایج آزمایشگاهی نیز قابل مشاهده است. مقادیر انعطاف‌پذیری در حالت مبنا و در سه تکرار محاسبه و مقدار متوسط انعطاف‌پذیری  $۰.۱۶/۳۹$  به همراه  $۰/۸۸$  انحراف استاندارد به دست آمد. جدول ۶ مقادیر انعطاف‌پذیری را در چهار حالت آزمایشگاهی مجزا نشان می‌دهد. بر این اساس مقدار متوسط انعطاف‌پذیری در حالت I۵-C۱،  $۰.۹/۳۹$  با میزان

طبق تعریف، تنش نهایی بیشینه تنشی است که جسم در آزمون کشش تجربه می‌کند. مقادیر تنش نهایی برای حالت مبنا I۰-C۰ برای سه تکرار محاسبه شد. مقدار متوسط تنش نهایی برای حالت مبنا در حدود  $۱۱۳۳/۵۸$  MPa با انحراف استاندارد در حدود  $۳۶/۱۱$  به دست آمد. مشابه قسمت ۵-۱ نتایج مربوط به تنش نهایی در چهار آزمایش و در سه تکرار در جدول ۵ آورده شده است. انحراف استاندارد، درصد اختلاف مقدار متوسط با مقدار متوسط حالت مبنا و خطای استاندارد میانگین  $S_e$  به ترتیب در محدوده  $۳۸/۵۶ < S < ۹۴/۱۱$ ،  $۰.۳/۷ < e < ۱/۲$  و  $۲۲/۳۲ < S_e < ۴۸/۳۹$  محاسبه شده است؛ که پراکندگی اندک نتایج نسبت به مقدار میانگین و اختلاف کم نسبت به شرایط مبنا را نشان می‌دهد. در این حالت نیز مقایسه مقادیر  $S_e$  و  $d$  نشان دهنده قرارگیری تغییرات تنش نهایی در محدوده خطای اندازه‌گیری بوده و بنابراین تغییرات تنش نهایی برحسب تردی هیدروژنی و تنش پسماند قابل گزارش نیست. نتایج تحلیل آماری

جدول ۶. مقادیر انعطاف پذیری در هر تکرار  $L_r$ ، مقدار متوسط انعطاف پذیری  $\bar{L}$ ، درصد اختلاف مقدار متوسط با حالت مبنا  $e\%$ ، انحراف استاندارد  $S$ ، اختلاف مقدار متوسط با مقدار متوسط حالت مبنا  $d$  و خطای استاندارد میانگین  $S_e$  در چهار آزمایش  $I5-C1$ ،  $I5-C2$ ،  $I9-C1$  و  $I9-C2$

**Table 6. The values of the flexibility in each repetition  $L_r$ , the mean value of the flexibility  $\bar{L}$ , the percentage difference between the mean value and the base state  $e\%$ , the standard deviation  $S$ , the difference between the mean value and the base state  $d$  and the mean standard error  $S_e$  in four experiments  $I5-C1$ ,  $I5-C2$ ,  $I9-C1$  and  $I9-C2$ .**

		I5-C1						نام آزمایش
$L_1$	$L_r$	$L_r$	$\bar{L}$	$e\%$	$d$	$S$	$S_e$	متغیر
۹	۱۱/۰۸	۸/۱	۹/۳۹	-۴۲/۶۹	-۶/۹۹	۱/۵۳	۰/۸۸	انعطاف پذیری
		I5-C2						نام آزمایش
$L_1$	$L_r$	$L_r$	$\bar{L}$	$e\%$	$d$	$S$	$S_e$	متغیر
۴/۹۳	۳/۲۳	۴/۲۸	۴/۱۵	-۷۴/۶۸	-۱۲/۲۳	۰/۸۶	۰/۵۰	انعطاف پذیری
		I9-C1						نام آزمایش
$L_1$	$L_r$	$L_r$	$\bar{L}$	$e\%$	$d$	$S$	$S_e$	متغیر
۶/۸۸	۸/۲	۸/۸۵	۷/۹۸	-۵۱/۳۱	-۸/۴۰	۱/۰۰	۰/۵۸	انعطاف پذیری
		I9-C2						نام آزمایش
$L_1$	$L_r$	$L_r$	$\bar{L}$	$e\%$	$d$	$S$	$S_e$	متغیر
۵/۴۶	۴/۹۲	۳/۸۴	۴/۷۴	-۷۱/۰۸	-۱۱/۶۴	۰/۸۲	۰/۴۸	انعطاف پذیری

در مقایسه با سهم تنش پسماند نسبت داد. به منظور بررسی کمی سهم مشارکت دو پارامتر مورد اشاره در انعطاف پذیری، نتایج تحلیل آماری گزارش می شود. بر این اساس، سهم مشارکت تنش پسماند در انعطاف پذیری معادل ۱/۱۵٪ و سهم مشارکت تردی هیدروژنی معادل ۶۷/۰۵٪ محاسبه شده است. لازم به ذکر است که مقایسه اختلاف مقدار متوسط انعطاف پذیری با مقدار متوسط آن در شرایط مبنا  $d$ ، با میزان خطای استاندارد میانگین  $S_e$ ، حاکی از اندک بودن خطای اندازه گیری انعطاف پذیری در آزمایش های انجام گرفته می باشد. سهم مشارکت بالای تردی هیدروژنی و سهم مشارکت پایین تنش پسماند در تغییرات انعطاف پذیری در تطابق کامل با توضیحات ارائه شده در پاراگراف بالا است. به طوری که در تردی هیدروژنی پایین ( $I5-C1$ ) و ( $I9-C1$ )، سهم تنش پسماند در انعطاف پذیری قابل مشاهده است، اما با افزایش تردی هیدروژنی ( $I5-C2$  و  $I9-C2$ ) سهم تنش پسماند در انعطاف پذیری در مقایسه با سهم تردی هیدروژنی، قابل صرف نظر کردن است.

به موازات بررسی انعطاف پذیری نمونه، کاهش سطح مقطع شکست در شرایط مبنا و چهار آزمایش  $I5-C1$ ،  $I5-C2$ ،  $I9-C1$  و  $I9-C2$  گزارش می شود. متوسط درصد کاهش سطح مقطع شکست

انحراف استاندارد ۱/۵۳ به دست آمده است. این میزان در مقایسه با حالت استاندارد، ۴۲/۶۹٪ کاهش نشان می دهد. این کاهش در مقدار انعطاف پذیری با توجه به افزایش تردی هیدروژنی توجیه پذیر است. همچنین مطابق با نتایج گزارش شده در جدول ۶، با افزایش مدت زمان شارژ از یک ساعت به دو ساعت و افزایش مضاعف تردی هیدروژنی، مقدار متوسط انعطاف پذیری معادل ۴/۱۵٪ به همراه ۰/۸۶ انحراف استاندارد، به دست آمده است. این میزان نسبت به حالت مبنا، ۷۴/۶۸٪ کاهش را نشان می دهد. به طور مشابه در  $I9-C1$  و  $I9-C2$  با افزایش مقدار تردی هیدروژنی، میزان انعطاف پذیری کاهش یافته است.

نکته دیگر قابل استخراج از نتایج جدول ۶، تأثیر تنش پسماند بر انعطاف پذیری است. با مقایسه دو حالت  $I5-C1$  و  $I9-C1$  مشاهده می شود که میزان انعطاف پذیری از ۹/۳۹٪ به ۷/۹۸٪ کاهش یافته است. به عبارت دیگر، با افزایش سطح تنش پسماند از نیروی ۵ کیلو نیوتن به ۹ کیلو نیوتن، مقدار انعطاف پذیری به میزان ۱۵٪ کاهش یافته است؛ اما مقایسه مقادیر انعطاف پذیری در دو حالت  $I5-C2$  و  $I9-C2$ ، تغییر معناداری را در مقادیر آن نشان نمی دهد. این عدم تغییر را می توان به سهم بالای تردی هیدروژنی در انعطاف پذیری

جدول ۷. مقادیر سطح مقطع شکست در هر تکرار  $A_i$ ، مقدار متوسط سطح مقطع شکست  $\bar{A}$ ، درصد اختلاف مقدار متوسط با حالت مبنا  $e\%$  و انحراف استاندارد  $S$ ، اختلاف مقدار متوسط با مقدار متوسط حالت مبنا  $d$  و خطای استاندارد میانگین  $S_e$  در چهار آزمایش I۵-C۱، I۵-C۲، I۹-C۱ و I۹-C۲

**Table 7. The values of the failure cross section in each repetition  $A_i$ , the mean value  $\bar{A}$ , the percentage difference between the mean value and the base state  $e\%$ , the standard deviation  $S$ , the difference between the mean value and the base state  $d$  and the mean standard error  $S_e$  in four experiments I5-C1, I5-C2, I9-C1 and I9-C2.**

I۵-C۱								نام آزمایش
$A_1$	$A_2$	$A_3$	$\bar{A}$	$e\%$	$d$	$S$	$S_e$	متغیر
۳۸/۵۲	۳۰/۸۲	۲۵/۹۵	۳۱/۷۶	-۱۱/۷۸	-۴/۲۴	۶/۳۴	۳/۳۶	درصد کاهش سطح مقطع
I۵-C۲								نام آزمایش
$A_1$	$A_2$	$A_3$	$\bar{A}$	$e\%$	$d$	$S$	$S_e$	متغیر
۲۷/۴۲	۱۶/۷۸	۲۱/۱۱	۲۱/۷۷	-۳۹/۵۳	-۱۴/۲۳	۵/۳۵	۳/۰۹	درصد کاهش سطح مقطع
I۹-C۱								نام آزمایش
$A_1$	$A_2$	$A_3$	$\bar{A}$	$e\%$	$d$	$S$	$S_e$	متغیر
۳۲/۶۳	۲۹/۵۴	۳۲/۱۳	۳۱/۴۳	-۱۲/۶۹	-۴/۵۷	۱/۶۶	۰/۹۶	درصد کاهش سطح مقطع
I۹-C۲								نام آزمایش
$A_1$	$A_2$	$A_3$	$\bar{A}$	$e\%$	$d$	$S$	$S_e$	متغیر
۲۵/۵۶	۲۳/۵۲	۱۶/۱۷	۲۱/۷۵	-۳۹/۵۸	-۱۴/۲۵	۴/۹۴	۲/۸۵	درصد کاهش سطح مقطع

پسماند بر روی درصد کاهش سطح مقطع شکست را نشان می‌دهد. به‌طوری‌که مقدار این پارامتر از حدود ۳۱/۷۶٪ به ۳۱/۴۳٪ تغییر کرده است. لازم به توضیح است که این میزان از تغییرات با توجه به خطاهای موجود در اندازه‌گیری چندان قابل‌اعتنا نیست. مشابه همین نتیجه در مقایسه نتایج میان دو آزمایش I۵-C۲ و I۹-C۲، به‌دست آمده است. مقایسه مقادیر  $d$  و  $S_e$  در جدول ۷ نشان می‌دهد که تنها در آزمایش I۵-C۱ مقدار تغییرات سطح مقطع شکست با خطای اندازه‌گیری اختلاف کمی دارد و در سایر آزمایش‌ها خطای اندازه‌گیری در مقایسه با تغییرات سطح مقطع شکست بسیار کوچکتر است.

چهار نمونه شکسته شده در آزمایش‌های I۵-C۰-N۱، I۵-C۲-N۱، I۹-C۰-N۱ و I۹-C۲-N۱ به ترتیب در شکل‌های ۹-الف تا ۹-د نشان داده شده‌اند. مقایسه شکل‌های ۹-الف و ۹-ب، به‌روشنی دو تفاوت مهم را در محل شکست نشان داده است. نکته اول،

در حالت مبنا در حدود ۳۶٪ با ۳/۱۱ انحراف استاندارد محاسبه شده است. لازم به ذکر است که مساحت محاسبه شده، مساحت تصویر مقطع شکست در راستای محور کشش بوده است. همچنین جدول ۷ مقادیر درصد کاهش سطح مقطع شکست را در چهار آزمایش I۵-C۱، I۵-C۲، I۹-C۱ و I۹-C۲ نشان می‌دهد.

بر این اساس مشاهده می‌شود که این پارامتر در شرایط I۵-C۱، در حدود ۳۱/۷۶٪ و در شرایط I۵-C۲، در حدود ۳۹/۵۳٪ است. مقایسه هرکدام از این مقادیر با حالت مبنا، به ترتیب ۱۱/۷۸٪ و ۳۹/۵۳٪ افزایش را نشان می‌دهد. این افزایش که به دلیل افزایش تردی نمونه رخ داده، با کاهش انعطاف‌پذیری نمونه، هم‌زمان بوده است. شرایط مشابهی نیز برای دو آزمایش I۹-C۱ و I۹-C۲ وجود دارد، به‌طوری‌که با افزایش زمان شارژ نمونه و افزایش تردی آن، درصد کاهش سطح مقطع شکست، افزایش یافته است. مقایسه نتایج میان دو آزمایش I۵-C۱ و I۹-C۱، تأثیرگذاری اندک تنش

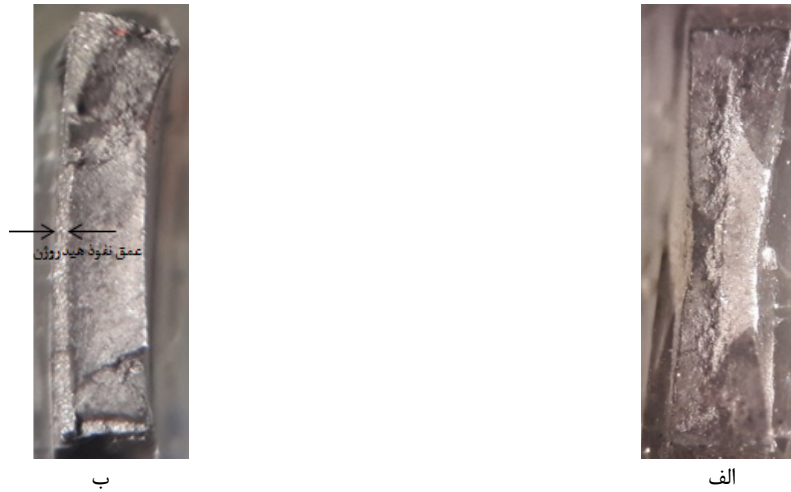




شکل ۹. نمایش چهار نمونه شکسته شده در آزمایش‌های الف) I5-C0-N1، ب) I5-C2-N1، ج) I9-C0-N1 و د) I9-C2-N1. **Fig. 9. Representation of four broken samples in experiments a) I5-C0-N1, b) I5-C2-N1, c) I9-C0-N1 and d) I9-C2-N1.**

ناچیزی مشاهده می‌شود. شکل (۱۰-ب) سطح مقطع شکست در حالت I9-C2-N1 را با بزرگنمایی ۳۶۰ نشان می‌دهد. بر این اساس مشاهده می‌شود که بعد از شکست، مقطع دچار گلوپی شدن بسیار ناچیزی می‌شود. نکته مهم دیگر، تمایز سطح مقطع شکست میان سمت چپ و راست نمونه است؛ که به صورت باریکه‌ای عمودی در سمت چپ تصویر مشخص است. این تمایز به دلیل اختلاف در نحوه شکست نمونه در این مقطع است؛ به طوری که با نفوذ هیدروژن به نمونه، شکست در آن به صورت ترد رخ داده و این موضوع سبب ایجاد اختلاف میان سمت چپ و راست شکل شده است. به عبارت دیگر، بخشی از مقطع که از سمت چپ تصویر متمایز شده، ضخامتی را نشان می‌دهد که هیدروژن به آن نفوذ کرده است. عمق نفوذ هیدروژن در شکل

رخ دادن پدیده گلوپی شدن در محل شکست برای شرایط بدون شارژ هیدروژنی است. این موضوع در شکل ۱۰-الف نیز نمایش داده شده است. در این شکل سطح مقطع شکست برای حالت I5-C0-N1 با بزرگنمایی ۳۶۰ نشان داده شده است. مطابق این شکل، شکست نرم پس از تغییر شکل و گلوپی شدن اتفاق افتاده است و وجود اختلاف رنگ در آن به دلیل اختلاف در ارتفاع سطح مقطع شکست است. این در حالی است که در آزمایش I5-C2-N1 به دلیل شارژ دوساعتی و افزایش تردی نمونه، پدیده شکست با حداقل گلوپی شدن، کرنش کم و کاهش اندک سطح مقطع شکست همراه بوده است. در شکست نرم تغییر شکل پلاستیک اتفاق می‌افتد در صورتی که در شکست ترد یا اصلاً تغییر شکل پلاستیک به وجود نمی‌آید و یا این که به مقدار



شکل ۱۰. نمایش سطح مقطع شکست با بزرگنمایی ۶۰x در دو حالت: الف) I5-C0-N1، ب) I9-C2-N1.

Fig. 10. Failure cross section with x60 magnification in two conditions: a) I5-C0-N1, b) I9-C2-N1.

جدول ۸. مقادیر چقرمگی در هر تکرار  $U_{Ti}$ ، مقدار متوسط چقرمگی  $\bar{U}_T$ ، درصد اختلاف مقدار متوسط با حالت مبنا  $e\%$ ، انحراف استاندارد  $S$ ، اختلاف مقدار متوسط با مقدار متوسط حالت مبنا  $d$  و خطای استاندارد میانگین  $S_e$  در چهار آزمایش I5-C1، I5-C2، I9-C1 و I9-C2

Table 8. The values of the toughness in each repetition  $U_{Ti}$ , the mean value  $\bar{U}_T$ , the percentage difference between the mean value and the base state  $e\%$ , the standard deviation  $S$ , the difference between the mean value and the base state  $d$  and the mean standard error  $S_e$  in four experiments I5-C1, I5-C2, I9-C1 and I9-C2.

I5-C1								نام آزمایش
$U_{T,1}$	$U_{T,2}$	$U_{T,3}$	$\bar{U}_T$	$e\%$	$d$	$S$	$S_e$	متغیر
۹۵/۸۵	۱۴۴/۳۲	۷۰/۳۴	۱۰۳/۵۰	-۳۰/۸۶	-۴۶/۲۰	۳۷/۵۸	۲۱/۷۰	چقرمگی ( $J/cm^2$ )
I5-C2								نام آزمایش
$U_{T,1}$	$U_{T,2}$	$U_{T,3}$	$\bar{U}_T$	$e\%$	$d$	$S$	$S_e$	متغیر
۴۶/۲۹	۳۲/۳۳	۴۳/۸۹	۴۰/۸۴	-۷۲/۷۲	-۱۰۸/۸۶	۷/۴۶	۴/۳۱	چقرمگی ( $J/cm^2$ )
I9-C1								نام آزمایش
$U_{T,1}$	$U_{T,2}$	$U_{T,3}$	$\bar{U}_T$	$e\%$	$d$	$S$	$S_e$	متغیر
۶۹/۴۴	۸۷/۶۸	۸۳/۶۶	۸۰/۲۶	-۴۶/۳۸	-۶۹/۴۴	۹/۵۸	۵/۵۳	چقرمگی ( $J/cm^2$ )
I9-C2								نام آزمایش
$U_{T,1}$	$U_{T,2}$	$U_{T,3}$	$\bar{U}_T$	$e\%$	$d$	$S$	$S_e$	متغیر
۵۶/۶۷	۴۱/۶۷	۳۳/۸۷	۴۴/۰۷	-۷۰/۵۶	-۱۰۵/۶۳	۱۱/۵۹	۶/۶۹	چقرمگی ( $J/cm^2$ )

در مقطع شکست قابل مشاهده نیست. مقایسه شکل های ۹-ج و ۹-د نیز نتایج مشابهی را نشان می دهد.

#### ۴-۵- چقرمگی

چهارمین خاصیت مکانیکی مورد مطالعه در این تحقیق، مقدار چقرمگی  $U_T$  نمونه است. مقدار چقرمگی توسط انتگرال زیر منحنی

۱۰-ب با علامت پیکان نشان داده شده است. با توجه به این شکل مشاهده می شود که هیدروژن در حدود ۱۰ درصد ضخامت قطعه نفوذ کرده است. نکته دوم در رابطه با شکل ۹-ب، ایجاد ترک های متعدد و قابل مشاهده در آزمایش I5-C2-N1 است (این مورد با رسم دایره در شکل نشان داده شده است). حضور این ترک ها ناشی از تردی زیاد نمونه بوده است، چراکه در آزمایش I5-C0-N1 ایجاد و رشد ترک

حاصل از بار ۵ یا ۹ کیلو نیوتنی تأثیری روی چقرمگی نخواهد داشت و نقش غالب را شارژ هیدروژنی بازی می‌کند.

### ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله خواص مکانیکی تست کشش برای نمونه استاندارد جی-تی-دی-۴۵۰ با در نظر گرفتن دو پارامتر تردی هیدروژنی و تنش پسماند به‌صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، نمونه‌ها در دو دسته شارژ هیدروژنی یک‌ساعته و دوساعته قرار گرفتند. همچنین در هر سطح از شارژ هیدروژنی، دو سطح از تنش پسماند ایجاد گردید. برای ایجاد تنش پسماند از روش دندان‌گذاری و اعمال نیروی ثابت ۵ و ۹ کیلو نیوتنی، استفاده شد. نتایج به‌دست آمده در خصوص خواص مکانیکی شامل تنش تسلیم، تنش نهایی، انعطاف‌پذیری، کاهش سطح مقطع شکست و چقرمگی است. خلاصه نتایج به‌دست‌آمده به قرار زیر است:

۱- با مقایسه مقادیر متوسط تنش تسلیم در چهار سطح  $I_9(C_1, C_2)$ ،  $I_5(C_1, C_2)$  با مقادیر متوسط در حالت مبنا، اختلاف معناداری مشاهده نمی‌شود؛ چراکه میزان تغییرات ثبت شده از مقادیر خطای استاندارد میانگین کمتر بوده است. بررسی سهم مشارکت دو پارامتر تنش پسماند و تردی هیدروژنی بر تنش تسلیم نشان می‌دهد که سهم مشارکت تنش پسماند  $P_{res} = 9/37\%$  است که در مقایسه با سهم تردی هیدروژنی  $P_H = 1/4\%$  مقدار قابل توجهی دارد. به عبارت دیگر می‌توان از نقش تردی هیدروژنی در مقایسه با سهم تنش پسماند در تغییرات تنش تسلیم صرف نظر کرد.

۲- تحلیل نتایج مربوط به تنش نهایی نشان می‌دهد که انحراف استاندارد و درصد اختلاف از مقدار متوسط مبنا به ترتیب در محدوده  $56/11 > S > 38/94$  و  $2/7 > e > 1/3$  است. به عبارت دیگر می‌توان نتیجه گرفت که در شرایط آزمایش تنش پسماند و تردی هیدروژنی تأثیر اندکی بر تنش نهایی گذاشته‌اند. نتایج تحلیل آماری نیز سهم مشارکت تنش پسماند در تنش نهایی را  $P_{res} = 4/7\%$  و سهم مشارکت تردی هیدروژنی را  $P_H = 8/78\%$  تخمین می‌زند.

۳- مقدار متوسط انعطاف‌پذیری در حالت  $I_5-C_1$ ، معادل  $9/39\%$  به‌دست آمده است که  $42/69\%$  کمتر از حالت مبنا است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که با افزایش مدت‌زمان شارژ از یک ساعت به دو ساعت، مقدار متوسط انعطاف‌پذیری به  $4/15\%$  کاهش

تنش- کرنش به‌دست می‌آید. مقدار متوسط چقرمگی نمونه در شرایط بدون حضور تنش پسماند و بدون اعمال شارژ هیدروژنی در حدود  $149/69 \text{ J/cm}^2$  به‌دست آمده است. توجه به این نکته ضروری است که مقدار متوسط به‌دست آمده دارای  $12/10$  واحد انحراف نسبت به حالت استاندارد است. جدول ۸ مقادیر چقرمگی را در چهار آزمایش  $I_5-C_1$ ،  $I_5-C_2$ ،  $I_9-C_1$  و  $I_9-C_2$  به همراه مقادیر متوسط و انحراف استاندارد نشان می‌دهد. بر این اساس مشاهده می‌شود که در شرایط  $I_5-C_1$  مقدار متوسط چقرمگی به  $103/5 \text{ J/cm}^2$  رسیده است. این مقدار نسبت به شرایط مبنا در حدود  $30/86\%$  کاهش را تجربه کرده است. این کاهش با افزایش تردی هیدروژنی در آزمایش  $I_5-C_2$  مقدار بیشتری را به خود اختصاص داده است؛ به‌طوری‌که مقدار چقرمگی در شرایط  $I_5-C_2$  به  $40/84 \text{ J/cm}^2$  رسیده است که نسبت به شرایط مبنا  $72/72\%$  کاهش داشته است. مقایسه نتایج میان دو آزمایش  $I_5-C_1$  و  $I_5-C_2$  به‌وضوح تأثیر تردی هیدروژنی بر کاهش چقرمگی نمونه را نشان می‌دهد.

در ادامه این قسمت به بررسی اثرات تنش پسماند بر چقرمگی نمونه پرداخته می‌شود. با مقایسه مقادیر چقرمگی متوسط در دو حالت  $I_5-C_1$  و  $I_9-C_1$  مشاهده می‌شود که مقدار چقرمگی از  $103/5 \text{ J/cm}^2$  به  $80/26 \text{ J/cm}^2$  کاهش یافته است. به‌عبارت دیگر با افزایش نیروی ایجاد تنش پسماند از ۵ کیلو نیوتن به ۹ کیلو نیوتن، مقدار چقرمگی  $22/45$  درصد کاهش یافته است. با انجام مقایسه مشابه میان چقرمگی نمونه میان دو آزمایش  $I_5-C_2$  و  $I_9-C_2$  مشاهده می‌شود که مقدار چقرمگی از  $40/84 \text{ J/cm}^2$  به  $44/07$  افزایش یافته است. با توجه به پراکندگی داده‌های آزمایشگاهی و وجود خطای اندازه‌گیری، افزایش  $7/9$  درصدی مقدار چقرمگی در این شرایط قابل اعتنا نیست و به نوعی ناشی از خطای آزمایش است (به مقادیر  $d$  و  $S_e$  در این دو آزمایش دقت شود). به عبارت دیگر می‌توان چنین نتیجه گرفت که در شارژ هیدروژنی یک‌ساعته، افزایش تنش پسماند سبب کاهش چقرمگی ولی در شارژ هیدروژنی دوساعته، افزایش تنش پسماند تأثیری بر چقرمگی نخواهد داشت. علت این مسئله نفوذ هیدروژن در جاهای خالی و در مناطق جلو نابجایی‌ها می‌باشد. از طرف دیگر، عامل تغییر شکل در فلزات حرکت نابجایی‌ها می‌باشد. بنابراین در حالتی که دو ساعت شارژ هیدروژنی صورت می‌گیرد، عملاً جلو حرکت نابجایی‌ها گرفته می‌شود و تنش پسماند

تعداد الکترون شرکت کننده در واکنش	$Z$
<b>علائم یونانی</b>	
کرنش	$\epsilon$
تنش، MPa	$\sigma$
زمان، s	$\tau$
<b>زیر نویس</b>	
کاتد	<i>cath</i>
دشارژ	<i>dis</i>
معرض شارژ	<i>exp</i>
حالت نهایی	<i>f</i>
هیدروژن	<i>H</i>
حالت مرجع	<i>ref</i>
تنش پسماند	<i>res</i>
حالت مبنا	<i>0</i>
<b>بالا نویس</b>	
جذب هیدروژن	<i>abs</i>
تولید هیدروژن	<i>ev</i>

### مراجع

- [1] S. Woods, J.A. Lee, Hydrogen Embrittlement, (2016).
- [2] W. Jang, S. Kim, K. Shin, Hydrogen-assisted deformation and fracture behaviors of Al 8090, Metallurgical and Materials Transactions A, 33(6) (2002) 1755-1763.
- [3] G. Lu, E. Kaxiras, Hydrogen embrittlement of aluminum: the crucial role of vacancies, Physical review letters, 94(15) (2005) 155501.
- [4] C.-S. Oh, Y.-J. Kim, K.-B. Yoon, Coupled analysis of hydrogen transport using ABAQUS, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, 4(7) (2010) 908-917.
- [5] D. Lee, Y. Huang, J. Achenbach, A comprehensive analysis of the growth rate of stress corrosion cracks, Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 471(2178) (2015) 20140703.
- [6] E. Cendales, F. Orjuela, O. Chamarraví, Computational modeling of the mechanism of hydrogen embrittlement (HE) and stress corrosion cracking (SCC) in metals, in: Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing,

می‌یابد. همچنین سهم مشارکت تنش پسماند در انعطاف پذیری معادل ۱/۱۵٪ و سهم مشارکت تردی هیدروژنی معادل ۶۷/۰۵٪ محاسبه شده است.

۴- نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهند که درصد کاهش سطح مقطع شکست در شرایط I۵-C۱، در حدود ۳۱/۷۶٪ و در شرایط I۵-C۲، در حدود ۲۱/۷۷٪ است. این افزایش سطح مقطع شکست، با کاهش انعطاف پذیری نمونه، هم‌زمان بوده است. شرایط مشابهی نیز برای دو آزمایش I۹-C۱ و I۹-C۲ وجود دارد.

۵- نتایج نشان می‌دهد که افزایش تردی سبب کاهش چقرمگی نمونه می‌شود؛ به طوری که در شرایط I۵-C۱ و I۵-C۲ مقدار متوسط چقرمگی به ترتیب  $۱۰۳/۵ \text{ J/cm}^2$  و  $۴۰/۸۴ \text{ J/cm}^2$  محاسبه شده است. همچنین مشاهده می‌شود که در تردی هیدروژنی پایین، افزایش تنش پسماند سبب کاهش چقرمگی و در تردی بالا، تنش پسماند تأثیر قابل توجهی بر چقرمگی نخواهد داشت. مقدار سهم مشارکت تردی هیدروژنی در چقرمگی حدود ۶۷/۰۵ درصد و سهم مشارکت تنش پسماند در حدود ۱/۱۵ درصد تخمین زده شده است.

### فهرست علائم

#### علائم انگلیسی

کاهش سطح مقطع	<i>A</i>
غلظت	<i>C</i>
فاکتور تصحیح	<i>CF</i>
درصد اختلاف هر پارامتر با مقدار متناظر حالت مبنا	<i>e</i>
ثابت فارادی، C/mol	<i>F</i>
جریان پلاریزاسیون، mA	<i>I</i>
طول نمونه، m	<i>l</i>
انعطاف پذیری	<i>L</i>
تعداد کل آزمایش	<i>N</i>
سهم مشارکت	<i>P</i>
میزان هیدروژن تولید یا جذب شده روی سطح نمونه، mA.S	<i>Q</i>
واریانس کل، اختلاف استاندارد	<i>S</i>
چقرمگی، $\text{J/cm}^2$	<i>U_T</i>
حجم مؤثر نمونه، $\text{cm}^3$	<i>v</i>

- [15] X. Chang, Y. Yan-sheng, Y. Lin-na, L. Tao, C. Sha, T. Shaolei, W. Jiang, J. Gong, J. Tang, H. Chen, 3-D finite element analysis of the effect of welding residual stress on hydrogen diffusion in hydrogen contained environment, *金属学报英文版*, 20(5) (2009) 347-354.
- [16] H.-M. Tung, T.-C. Chen, C.-C. Tseng, Effects of hydrogen contents on the mechanical properties of Zircaloy-4 sheets, *Materials Science and Engineering: A*, 659 (2016) 172-178.
- [17] Z. Sheng, C. Altenbach, U. Prah, D. Zander, W. Bleck, Effect of cutting method on hydrogen embrittlement of high-Mn TWIP steel, *Materials Science and Engineering: A*, 744 (2019) 10-20.
- [18] E. ASTM, Standard test methods for tension testing of metallic materials, Annual book of ASTM standards. ASTM, (2001).
- [19] A. Salarvand, Investigation of the effects of multi-layer hard coatings on the fatigue corrosion behavior of Custom 450 steel, PhD Thesis, Zanjan University, Zanjan, 2016 (In persian).
- [20] B. Berkowitz, J. Burton, C. Helms, R. Polizzotti, Hydrogen dissociation poisons and hydrogen embrittlement, *Scripta Metallurgica*, 10(10) (1976) 871-873.
- [21] M. Mohtadi-Bonab, J. Szpunar, L. Collins, R. Stankievich, Evaluation of hydrogen induced cracking behavior of API X70 pipeline steel at different heat treatments, *International journal of hydrogen energy*, 39(11) (2014) 6076-6088.
- [22] M. Yan, Y. Weng, Study on hydrogen absorption of pipeline steel under cathodic charging, *Corrosion science*, 48(2) (2006) 432-444.
- [23] R.K. Roy, Design of experiments using the Taguchi approach: 16 steps to product and process improvement, John Wiley & Sons, 2001.
- 2016, pp. 012067.
- [7] H. Lee, S. Kang, J. Choi, M. Kim, An extended finite element method-based representative model for primary water stress corrosion cracking of a control rod driving mechanism penetration nozzle, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 41(1) (2018) 138-145.
- [8] M. El May, N. Saintier, T. Palin-Luc, O. Devos, O. Brucelle, Modelling of corrosion fatigue crack initiation on martensitic stainless steel in high cycle fatigue regime, *Corrosion Science*, 133 (2018) 397-405.
- [9] J. Capelle, I. Dmytrakh, Z. Azari, G. Pluvinage, Evaluation of electrochemical hydrogen absorption in welded pipe with steel API X52, *international journal of hydrogen energy*, 38(33) (2013) 14356-14363.
- [10] J. Capelle, I. Dmytrakh, G. Pluvinage, Comparative assessment of electrochemical hydrogen absorption by pipeline steels with different strength, *Corrosion Science*, 52(5) (2010) 1554-1559.
- [11] L. Yin, Y. Liu, N. Dai, S. Qian, Y. Wan, J. Wu, J. Li, Y. Jiang, Effect of hydrogen charging conditions on hydrogen blisters and pitting susceptibility of 445J1M ferritic stainless steel, *Journal of The Electrochemical Society*, 165(16) (2018) C1007-C1016.
- [12] J. Carreno, I. Uribe, J. Carrillo, Modelling of roughness effect on hydrogen permeation in a low carbon steel, *Revista de metalurgia*, (2003) 213-218.
- [13] F. Bolzoni, P. Fassina, G. Fumagalli, L. Lazzari, G. Re, Hydrogen charging of carbon and low alloy steel by electrochemical methods, in: *EUROCORR 2010, From the Earth's Depths to Space Heights*, 2010, pp. 1-16.
- [14] O. Takakuwa, Y. Mano, H. Soyama, The Interaction between Hydrogen and Surface Stress in Stainless Steel, *International Journal of Materials and Metallurgical Engineering*, 8(12) (2014) 1391-1395.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. Nosrati, E. Poursaeidi, A. Dadashi, *Experimental Study of Effects of Hydrogen Embrittlement and Residual Stress on Mechanical Properties of GTD450, Amirkabir J. Mech Eng.*, 53(12) (2022) 5659-5678.

DOI: [10.22060/mej.2021.19459.7032](https://doi.org/10.22060/mej.2021.19459.7032)



