



کالیبراسیون مدل ترکیبی آسیب نرم و تبدیل فاز مارتنزیتی ناشی از کرنش پلاستیک در فولاد ضد زنگ آستنیتی ۳۰۴ در دمای فوق سرد به کمک آزمون‌های تجربی

سید سعید کاظمی، میلاد همایون فرد، مهدی گنجیانی* و ناصر سلطانی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۰۱
بازنگری: ۱۳۹۷/۰۶/۲۰
پذیرش: ۱۳۹۷/۰۸/۱۹
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷/۰۸/۲۹

کلمات کلیدی:

دمای فوق سرد
آسیب نرم
تبدیل فاز مارتنزیتی ناشی از کرنش پلاستیک
آزمون کشش
تحلیل عددی

خلاصه: در این پژوهش، خواص توسعه‌ی آسیب نرم و تبدیل فاز مارتنزیتی در فولاد ضدزنگ ۳۰۴ و در دمای فوق سرد، به صورت عددی و تجربی بررسی شده است. آزمون کشش ساده به صورت بارگذاری-باربرداری برای قطعه‌ی غوطه‌ور در نیتروژن مایع، انجام شده است. برای این منظور، محفظه‌ی فوق سرد برای قرار گرفتن قطعه‌ی آزمون کشش در نیتروژن مایع، طراحی و ساخته شده است. به کمک آزمون‌های کشش ساده به صورت بارگذاری-باربرداری، نمودارهای نیرو-جابجایی و توسعه‌ی پارامتر آسیب در حین باربرداری الاستیک، بدست آمده است. سپس قطعات کشیده شده، تحت آزمون پراش پرتوی ایکس قرار گرفته‌اند تا به کمک این آزمون، مقدار توسعه‌ی فاز مارتنزیت در ماده‌ی دو فازی حاصل، مشخص گردد. در تحلیل عددی، با ترکیب مدل تبدیل فاز گاریون و اسکوزن و مدل آسیب همسانگرد لمیتره، یک مدل ترکیبی برای حالت بارگذاری یکنواخت ارائه شده است. مدل تبدیل فاز گاریون به اسکوزن که برای شرایط فوق سرد تعریف شده، بر اساس فرض کرنش‌های کوچک (کمتر از ۰/۲) توسعه یافته است. علاوه بر این، قانون سخت‌شوندگی در ماده‌ی دو فازی به کمک همگن‌سازی موری-تاناکا استخراج شده است. در این پژوهش، تحلیل عددی به کمک اجرای کد زیرروال کاربر مدل ماده در نرم‌افزار آباکوس استاندارد برای این مدل ساختاری ترکیبی، انجام شده است. در نهایت، با مقایسه‌ی شبیه‌سازی عددی با نتایج تجربی، پارامترهای مدل کالیبره شده است.

۱- مقدمه

نقاط ابهام زیادی در پیش‌بینی رفتار این مواد وجود دارد. تا کنون مدل‌هایی برای پیش‌بینی رفتار مواد فولادی در دمای فوق سرد ارائه شده است. در سال ۲۰۰۲ اولین مدل تبدیل فاز که به طور خاص برای کاربرد در دمای فوق سرد طراحی شده بود توسط گاریون و اسکوزن [۳] ارائه گردید. در این مدل سعی گردیده است تا تعداد پارامترهای مورد نیاز با توجه به دشواری انجام آزمایش در دمای فوق سرد تا حد ممکن کاهش یابد. در این مدل با خطی فرض کردن رابطه‌ی سینتیک تبدیل فاز اولسن و کوهن [۴]، مدل سخت‌شوندگی پلاستیک ماده‌ی دو فازی بر اساس روش همگن‌سازی موری-تاناکا توسعه یافته و از تقریب خطی برای افزایش ضریب سخت‌شوندگی سینماتیک آستنیت نسبت به کسر حجمی مارتنزیت استفاده شده است. اثر هر دو سخت‌شوندگی همسانگرد و سینماتیک لحاظ شده و مدل با فرض کرنش‌های کوچک ارائه گردیده است. نتایج عددی مدل ساختاری با نتایج تجربی ایواموتو و همکاران [۵] مقایسه شده و پارامترهای مدل تعیین گردیده‌اند. در سال ۲۰۰۳ گاریون و اسکوزن [۶] مدل ساختاری پیشین خود را ارتقا

مواد پرکاربرد در دمای فوق سرد همانند فولادهای ضد زنگ، حتی در گستره‌ی دمایی خیلی پایین، در حدود صفر کلوین، نرمی خود را حفظ می‌کنند. معمولاً به گستره‌ی دمایی ۰ تا ۱۰۰ کلوین، دمای فوق سرد گفته می‌شود. فولادهای آستنیتی در دمای فوق سرد، تحت سه پدیده‌ی مهم تبدیل فاز مارتنزیتی ناشی از کرنش، توسعه‌ی آسیب نرم و دندانه دار شدن ناحیه تسلیم قرار می‌گیرند [۱]. منظور از آسیب نرم، آسیبی است که به دلیل کرنش پلاستیک در ماده رخ می‌دهد [۲].

پیش‌بینی رفتار این مواد در دمای فوق سرد، به دلیل کاربردهای فراوان و حساسیت بالای استفاده‌ی آن‌ها در این گستره‌ی دمایی، از اهمیت بالایی برخوردار است؛ اما به دلیل وابستگی زیاد خواص به دما و کرنش پلاستیک، باعث عدم قطعیت در برخی محدوده‌های دمایی و یا کرنشی می‌شود. لذا علی‌رغم فعالیت‌های زیادی که در این زمینه صورت گرفته است، همچنان

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ganjiani@ut.ac.ir

داده و مدلی بر اساس ترکیب تبدیل فاز و آسیب ارتوتروپیک ارائه دادند. برای تبدیل فاز همچنان از همان مدل سابق استفاده شده است اما برای مدل سازی آسیب، تنها آسیب در ماتریس آستنیتی لحاظ شده و یک مدل آسیب نرم جدید ارائه گردیده است. این مدل آسیب نرم با تعمیم مدل سینتیک آسیب نرم همسانگرد لیمیتره [۲] به حالت تانسوری به دست آمده است و تنها با استفاده از مفهوم تنش موثر در معادلات ساختاری وارد شده است.

در سال ۲۰۰۶ گاریون و همکاران [۷] کارهای آزمایشگاهی را در مورد مدل تبدیل فازی که پیشتر عنوان گردید انجام دادند. در این مطالعه با استفاده از روش نفوذپذیری مغناطیسی برای فولاد ۳۱۶ روابط مربوط به کسر حجمی مارتنزیت و نفوذپذیری مغناطیسی و همچنین پارامترهای ساختاری مدل در دماهای ۴/۲ و ۷۷ کلوین به دست آورده شدند.

در سال ۲۰۰۹ لی و همکاران [۸] مدل ساختاری متفاوتی برای رفتار پلاستیک فولادهای آستنیتی در دمای فوق سرد ارائه دادند. در این مدل نیز تلاش شده است که هر دو پدیدهی تبدیل فاز ناشی از کرنش پلاستیک و توسعهی آسیب نرم به صورت همزمان لحاظ شوند. در این مدل از فرض سینماتیک کرنشهای کوچک استفاده شده است و اثر نرخ کرنش نیز در نظر گرفته شده است. در این مدل از مدل کرنش خزشی بودنر [۹] برای مدل سازی کرنش پلاستیک تحت آسیب استفاده شده و تنها بخش حجمی کرنش تبدیل فاز در مدل ارائه گردیده است. برای محاسبهی محتوی مارتنزیت از مدل سینتیک تومیتا و ایواموتو [۱۰] استفاده شده است. در این مدل اثر تبدیل فاز و وجود مارتنزیت در آسیب و نیز اثر تبدیل فاز در افزایش سختشوندگی لحاظ نشده است. برای به دست آوردن پارامترهای ماده آزمایشهایی انجام گرفته و بخش دیگری از پارامترهای مدل از دادههای موجود برای مدل بودنر برگرفته شده است.

اگنر و اسکوزن [۱۱] در سال ۲۰۱۰ اصلاحاتی در مدل آسیب نرم به کار گرفته شده در مدل گاریون و اسکوزن [۶] انجام دادند. آنها روابط مربوط به رشد پارامترهای آسیب را اصلاح کرده و همچنین تاثیر آسیب را در سختشوندگیهای همسانگرد و سینماتیکی نیز اعمال کردند. با این حال در هر دو مدل ادعا شده است که با یک آزمایش کشش ساده در جهات مختلف می توان پارامترها را تعیین کرد؛ حال آن که ماهیت توسعهی آسیب وابسته به بارگذاری است و سینتیک توسعهی آسیب نمی تواند تنها تابع نوع ماده باشد.

در سال ۲۰۱۲ لی و همکاران [۱۲] مدلی ویسکوپلاستیک برای بررسی رشد ترک فولادهای آستنیتی در دمای فوق سرد ارائه کردند. این مدل نیز هر دو پدیدهی تبدیل فاز مارتنزیتی ناشی از کرنش پلاستیک و توسعهی آسیب نرم

را لحاظ کرده است. در حقیقت نسبت حجمی مارتنزیت با استفاده از مدل تومیتا و ایواموتو [۱۰] محاسبه و در پارامتر سختشوندگی مدل ویسکوپلاستیک بودنر-پارتوم [۹] وارد شده است. برای آسیب نیز از مدل آسیب خزشی بودنر و چان [۹] استفاده شده است. نتایج حاصل با آزمایش رشد ترک در دمای ۸۳ کلوین مقایسه شده اند.

اورتوین و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۱۴ مدل تبدیل فاز گاریون و اسکوزن [۳] را در مورد مسالهی پیچش میلهی گرد به کار گرفتند. در این مطالعه، مدل سه بعدی در مسالهی پیچش یک بعدی اعمال شد. همچنین با فرضهای ساده کننده یک رابطهی تحلیلی بسته برای تنش-کرنش و کوپل-زاویه ی پیچش ارائه شده است. اما مهم ترین بخش این مطالعه انجام آزمایشهای متعددی شامل تست پیچش در دماهای ۷۷ و ۲۹۳ کلوین، اندازه گیری میکروسختی، مشاهده میکروساختار و اندازه گیری محتوی مارتنزیت در سطح مقطع میله است. همهی پارامترهای مدل با استفاده از نتایج آزمایش کالیبره شده و سپس نتایج نظری و تجربی با هم مقایسه شده اند.

اورتوین و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۱۶ مدل آسیب همسانگرد لیمیتره [۲] را همراه با مدل تبدیل فاز گاریون-اسکوزن به کار گرفته و توسعهی آسیب در مسالهی پیچش چرخشی میلههای گرد را بررسی کردند. در این مطالعه جزئیات استخراج روابط نشان داده شده و آزمایشهای بسیاری نیز برای تعیین پارامترها و تعیین محتوی مارتنزیت انجام گرفته است. توسعهی آسیب و نیز اثر مارتنزیت بر افزایش سختشوندگی نیز به صورت کیفی بررسی و تحلیل شده است. همچنین یک حل تحلیلی یک بعدی ارائه گردیده است که تا حدود زیادی با نتایج مدل سه بعدی تطابق دارد.

در سال ۲۰۱۷، اگنر و ریس [۱۵] فرض برابری انرژی را که پیش تر در مورد مادهی آسیب دیده به کار گرفته شده بود به سایر پدیدههای اتلافی (نظیر تبدیل فاز) تعمیم دادند. همچنین به عنوان یک مثال، مدل ساختاری ترکیب تبدیل فاز کرنش-محرك و آسیب را بر این اساس توسعه دادند. در این مدل نیز قانون جریان با یک ضریب پلاستیسته اعمال گردیده است.

در سال ۲۰۱۷، ریس و اسکوزن [۱۶] مدل ترکیبی تبدیل فاز-آسیب دیگری نیز ارائه دادند که در آن اثر آسیب ناشی از تشعشع و آسیب ترد نیز در مدل ارائه گردیده است. در این مدل تعداد پارامترهای آسیب زیاد بوده و روش محاسبهی تجربی آنها ارائه نگردیده است.

در این مقاله با ارائه مدل ترکیبی توسعهی آسیب نرم و تبدیل فاز مارتنزیتی ناشی از کرنش پلاستیک، رفتار فولاد ضد زنگ آستنیتی نوع ۳۰۴ در دمای فوق سرد پیش بینی شده است. با توجه به بررسی بارگذاری یکنواخت، با حذف

رفتار تبدیل فاز $\alpha' \rightarrow \gamma$ توسط اولسن و کوهن [۴] توضیح داده شده است. رشد کسر حجمی مارتنزیت (ξ) بر حسب کرنش پلاستیک که به صورت نمودار سیگموئید^۳ می‌باشد، در شکل ۱ نشان داده شده است. گاریون و اسکوزن [۳] برای دماهای فوق سرد با خطی فرض کردن بخش منحنی نمودار تبدیل فاز، رابطه (۱) را ارائه داده‌اند:

$$\dot{\xi} = A(T, \dot{\varepsilon}_p, \sigma) \dot{p} H((p - p_\xi)(\xi_L - \xi)) \quad (1)$$

که p_ξ نشان دهنده‌ی آستانه‌ی کرنش پلاستیک (برای شروع تبدیل فاز) است، ξ_L سطح اشباع کسر حجمی مارتنزیت و H تابع هوی ساید^۴ است. پارامتر ماده A عمدتاً به دما T و تانسور تنش σ وابسته است؛ همچنین \dot{p} نشان دهنده نرخ انباشت کرنش پلاستیک است و به صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود:

$$\dot{p} = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\varepsilon}_p : \dot{\varepsilon}_p} \quad (2)$$

که در آن $\dot{\varepsilon}_p$ تانسور مرتبه دوم نرخ کرنش پلاستیک می‌باشد. با در نظر گرفتن شرایط هم دما، رابطه‌ی ساختاری عمومی برای ماده را می‌توان به صورت رابطه (۳) بیان نمود:

$$\sigma = (1 - D) \mathbb{E} : (\varepsilon - \varepsilon_p - \varepsilon_{bs}) \quad (3)$$

که در آن σ بیانگر تانسور تنش، D بیانگر آسیب اسکالر، \mathbb{E} تانسور مرتبه‌ی چهارم الاستیسیته، ε تانسور کرنش مجموع، ε_p تانسور کرنش پلاستیک و ε_{bs} بیانگر تانسور کرنش بین^۵ می‌باشد که با ترم حجم نسبی Δv و به صورت رابطه (۴) بیان می‌گردد [۳]:

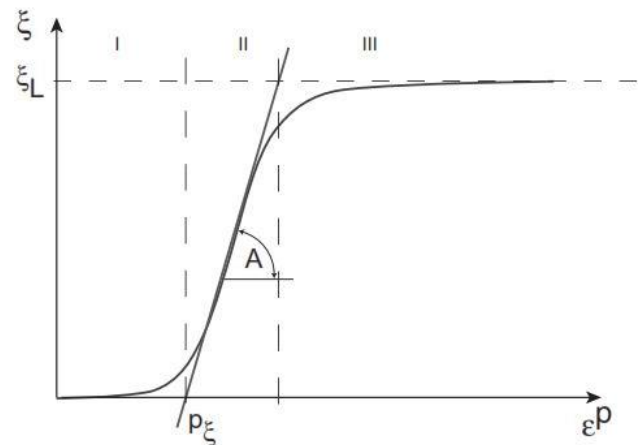
$$\varepsilon_{bs} = \frac{1}{3} \Delta v \mathbf{I} \quad (4)$$

که

اثر سخت‌شوندگی سینماتیکی، مدل تبدیل فاز گاریون و اسکوزن [۳] اصلاح گردیده و با مدل توسعه‌ی آسیب لیمیتره و کابوک [۱۷] ترکیب گردیده است. با این کار تعداد پارامترهای مدل کاهش یافته و تمام پارامترها با استفاده از نتایج تجربی تعیین گردیده‌اند. از آزمون کشش تک محوره در دمای فوق سرد و آزمون پراش پرتوی ایکس استفاده شده است تا به ترتیب توسعه‌ی آسیب نرم و تبدیل فاز مارتنزیتی ناشی از کرنش در فولاد تعیین و مدل ارائه شده کالیبره گردد.

۲- معادلات حاکم بر مسئله

در این قسمت، روابط حاکم بر ماده تحت توسعه‌ی آسیب نرم و تبدیل فاز مارتنزیتی ناشی از کرنش پلاستیک به طور همزمان، به صورت خلاصه توضیح داده می‌شود. روابط سینماتیکی تبدیل فاز مارتنزیتی ناشی از کرنش پلاستیک و معادلات ساختاری برای حالت آسیب اسکالر بیان می‌گردد. فولادهای رده‌ی ۳۰۰ در دمای اتاق در فاز γ آستنیت با وجوه مرکزپر^۱ هستند. این فاز می‌تواند به فازهای α' فریت تتراگونال مرکزپر^۲ یا فاز هگزاگونال ε تبدیل شود. فاز ε را می‌توان فاز واسطه‌ی میان تبدیل $\alpha' \rightarrow \gamma$ دانست [۱۸]. این فاز تا کرنش‌های حدوداً ۷ تا ۱۵ درصد تشکیل شده و در ادامه نسبت حجمی آن کاهش می‌یابد [۱۹]. در نتیجه عموماً فاز مارتنزیت را بصورت بی‌سی‌سی در نظر می‌گیرند.



شکل ۱: رشد کسر حجمی مارتنزیت (ξ) بر حسب کرنش پلاستیک

Fig. 1. Evolution of volume fraction of martensite (ξ) as a function of plastic strain

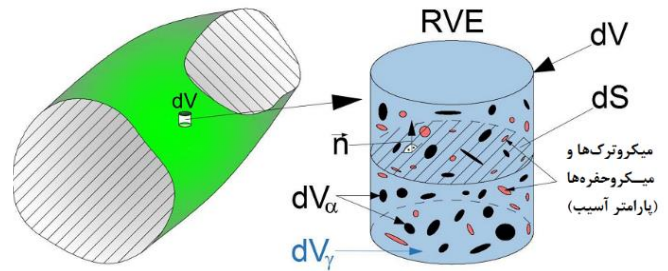
- 3 Sigmoid
- 4 Heaviside
- 5 Bain Strain

- 1 Face Centered Cubic (FCC)
- 2 Body-Centered Cubic (BCC)

Table 1. Chemical composition of AISI 304 steel sample

جدول ۱: ترکیب شیمیایی نمونه فولاد آستنیتی ۳۰۴ AISI

عنصر	درصد وزنی	عنصر	درصد وزنی
Al	۰/۰۱	C	۰/۰۴
Co	۰/۲۰	Si	۰/۴۹
Cu	۰/۰۳	Mn	۱/۰
Nb	۰/۰۱	P	۰/۰۳۶
V	۰/۱۱	S	۰/۰۰۷
W	۰/۰۰۶	Cr	۱۸/۰
N	۰/۰۴	Ni	۸/۵



شکل ۲: المان حجمی نماینده‌ی مساله‌ی تبدیل فاز و آسیب [۱۴]

Fig. 2. Representative volume element for phase transformation and damage problem

$$\Delta v = \frac{V_m - V_a}{V_a} \quad (5)$$

که V_m و V_a به ترتیب حجم مخصوص اشغال شده توسط آستنیت و مارتنزیت می‌باشد. مقدار Δv با توجه به ترکیب عناصر ماده، در حدود ۰/۰۲ تا ۰/۰۵ می‌باشد [۱۰]. همچنین در مکانیک آسیب پیوسته ابتدا می‌بایست حالت آسیب با متغیرهای آسیب مناسب تعریف شده، سپس رفتار مکانیکی ماده‌ی آسیب‌دیده و سپس نرخ توسعه‌ی آسیب نرم توصیف گردد. با توجه به این که رشد خلل‌ها در درون ماده موجب کاهش سختی ماده می‌گردد، متغیر آسیب را مطابق رابطه (۶) می‌توان به صورت تغییر مدول الاستیسیته مدل کرد [۲]:

$$D = 1 - \frac{E(D)}{E_0} \quad (6)$$

برای تعیین رفتار پلاستیک در ماده، سطح تسلیم فون میسز با توجه به مفهوم تنش موثر در نظر گرفته شد. در این پژوهش، پاسخ ماده در حالت بارگذاری یکنواخت بررسی شده است؛ در نتیجه فقط متغیر سختی ایزوتروپیک در نظر گرفته شد و از سختی سینماتیکی صرف نظر شد. بنابراین شرط تسلیم به صورت رابطه (۷) بیان می‌شود:

$$f_y = J_2(\vec{\sigma}) - \sigma_y - \tilde{R} \quad (7)$$

که در رابطه‌ی بالا \tilde{R} ، متغیر سختی ایزوتروپیک موثر است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\tilde{R} = R / (1 - D) \quad (8)$$

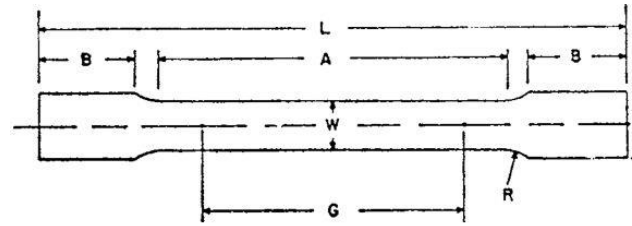
رشد حفره‌ها در مقیاس‌های میکروسکوپی، مزوسکوپی و ماکروسکوپی در فرایندهای شکست مواد که منجر به تضعیف خواص مکانیکی آن‌ها می‌شود آسیب نامیده می‌شود [۲۰]. مکانیک آسیب پیوسته، توسعه‌ی آسیب در مقیاس‌های مزوسکوپی و ماکروسکوپی را در چارچوب مکانیک محیط‌های پیوسته دنبال می‌کند. به منظور بحث در مورد اثرات ناپیوستگی‌های میکروسکوپی در مواد (مثلاً، حفره‌ها و ناخالصی‌ها) با استفاده از مکانیک محیط‌های پیوسته، ابتدا می‌بایست اثرات مکانیکی ریزساختار همگن شده و به صورت یک میدان پیوسته‌ی ماکروسکوپی در ماده بیان شود. برای این منظور ناحیه‌ی کوچکی در اطراف نقطه‌ی مادی در نظر گرفته و فرض می‌شود که ماده‌ی ناپیوسته در این ناحیه به صورت آماری همگن بوده و حالت مکانیکی ماده در این ناحیه با میانگین آماری متغیرهای مکانیکی در آن بیان می‌گردد. به کوچکترین اندازه‌ی این ناحیه المان حجمی نماینده گفته می‌شود. نمونه‌ی اروی‌ای در مساله‌ی رفتار پلاستیک مواد نرم با در نظر گرفتن تبدیل فاز مارتنزیتی ناشی از کرنش پلاستیک در شکل ۲ نشان داده شده است.

معادلات ساختاری و رشد در مکانیک آسیب با استفاده از مفاهیم تنش (و یا سایر متغیرهای حالت) موثر بیان می‌شوند. در این جا ماده‌ی آسیب دیده با یک ماده‌ی معادل مجازی بدون آسیب از نظر مکانیکی معادل فرض می‌شود. قید مکانیکی می‌تواند با فرض‌های برابری کرنش، انرژی کل و متمم انرژی کرنشی میان ماده‌ی آسیب دیده و ماده‌ی مجازی بدون آسیب اعمال شود. برای مثال با فرض برابری کرنش، تنش موثر را می‌توان برای متغیرهای آسیب

Table 2. Dimensions of test sample in mm

جدول ۲: ابعاد قطعه آزمون به میلی‌متر

پارامتر	مقدار
G - طول سنجه	50 ± 0.1
W - عرض	$12/5 \pm 0.2$
R - حداقل شعاع فیلت	۱۲/۵
L - حداقل طول کل	۲۰۰
A - حداقل طول قسمت موازی	۵۷
B - طول قسمت داخل فک ^۱	۵۰



شکل ۳: نمونه‌ی استاندارد آزمون کشش

Fig. 3. Standard tensile test sample

$$\dot{D} = \frac{\sigma_{eq}^2}{2ES'(1-D)^2} \dot{p} \quad (13)$$

که در رابطه فوق $\dot{D} = dD / dp$ ، شیب نمودار آسیب بر حسب کرنش پلاستیک می‌باشد. از معادلات رابطه (۱۴)، برای مدل‌سازی آسیب فولاد در شبیه‌سازی عددی استفاده خواهد شد. همچنین رشد سختی ایزوتروپیک در رفتار پلاستیک ماده دو فازی، بر اساس روش همگن سازی موری-تاناکا، توسط گاریون و اسکوزن [۳] بیان می‌گردد:

$$dR = C_m dp = 2(\mu_{MT} - \mu_{ta}) dp \quad (14)$$

که در آن μ_{ta} مدول برشی است که به صورت رابطه (۱۵) بیان می‌شود:

$$\mu_{ta} = \frac{E_t}{2(1+\nu)}; k_{ta} = \frac{E_t}{3(1-2\nu)}; \quad (15)$$

$$E_t = \frac{EC}{E+C}; C = C_0(1+h\xi)$$

و μ_{MT} مدول همگن‌شده می‌باشد که به کمک معادلات زیر محاسبه

می‌گردد:

$$\mu_m = \frac{E}{2(1+\nu)}; k_m = \frac{E}{3(1-2\nu)}$$

$$2\mu_{MT} + 2\mu^* = \left[\frac{1-\xi}{2(\mu_{ta} + \mu^*)} + \frac{\xi}{2(\mu_m + \mu^*)} \right]^{-1} \quad (16)$$

$$2\mu^* = \frac{\mu_{ta}(9k_{ta} + 8\mu_{ta})}{3(k_{ta} + 2\mu_{ta})}; k^* = \frac{4}{3}\mu_{ta}$$

با توجه به روابط (۷) و (۸) به صورت رابطه (۹) تعریف کرد:

$$\tilde{\sigma} = \frac{dF}{d\tilde{A}} = \frac{\sigma}{1-D} \quad (9)$$

برای مرتبط کردن نرخ توسعه‌ی آسیب به کرنش پلاستیک، لمیتره و کابوک [۱۷] رابطه (۱۰) را معرفی کرده‌اند:

$$\dot{D} = \frac{\partial F_D(Y, p, D, \dots)}{\partial Y} \dot{p}(1-D) \quad (10)$$

که F_D تابع پتانسیل اتلاف، p کرنش پلاستیک، Y نرخ آزادسازی انرژی کرنش الاستیک در واحد حجم و در حالت تنش ثابت در نظر گرفته می‌شود. این تعریف در رابطه (۱۱) بیان شده است:

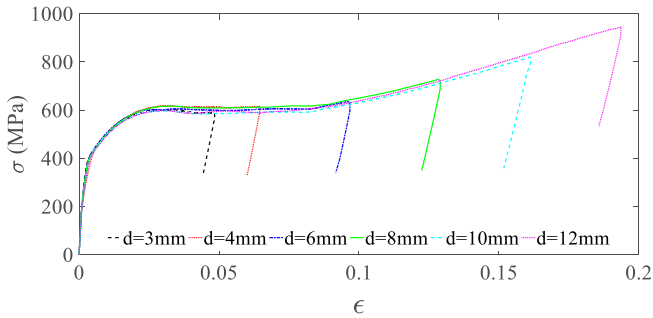
$$Y = \frac{1}{2} \frac{\sigma_{i,j} d\epsilon_{i,j}^e}{dD} \Big|_{\sigma=cte.} \quad (11)$$

در ادامه، تابع پتانسیل اتلاف برای مدل لمیتره [۲] به صورت رابطه (۱۲)

معرفی می‌گردند:

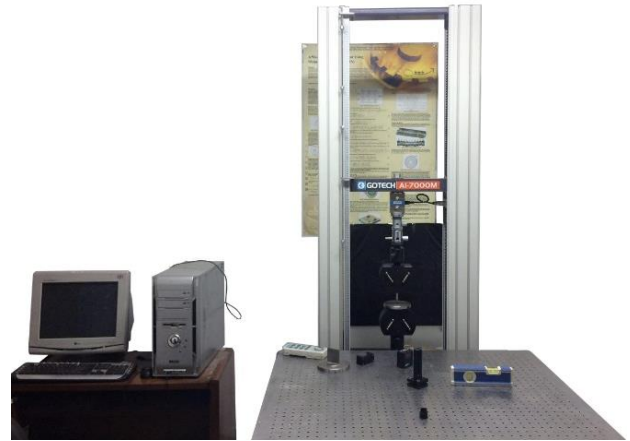
$$F_D = \frac{Y^2}{2S(1-D)} \quad (12)$$

که S پارامتر ماده می‌باشد و می‌بایست با برازش منحنی نمودار عددی با نقاط بدست آمده از آزمون‌های تجربی تعیین گردند. با جایگذاری رابطه (۱۲) در رابطه (۱۰)، نرخ توسعه‌ی آسیب نرم بر حسب کرنش پلاستیک برای مدل لمیتره به صورت رابطه (۱۳) بدست خواهد آمد:



شکل ۶: نمودار تنش-کرنش حاصل از آزمون کشش برای فولاد AISI ۳۰۴ در دمای ۷۷ کلوین

Fig. 6. Stress versus Strain curve from tensile tests for AISI 304 stainless steel at 77 K



شکل ۴: دستگاه آزمون کشش مدل GOTECHAI – 7000M

Fig. 4. GOTECH AI-7000M tensile test machine

ترکیب شیمیایی فولاد به کار رفته در این پژوهش، مطابق جدول ۱ بدست آمده است. این آزمون‌ها به صورت کشش تک‌محوره می‌باشد و نمونه‌ها به ازای جابجایی‌های فک ۳، ۴، ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ میلی‌متر کشیده می‌شوند. سپس مدتی در همان حالت نگه داشته و در نهایت باربرداری می‌شوند. این آزمایش‌ها در دمای فوق سرد ۷۷ کلوین صورت گرفته‌اند. در نهایت برای بدست آوردن میزان مارتنزیت در هر کرنش، قطعه‌ها تحت آزمون پراش پرتوی ایکس قرار می‌گیرند. برای اطمینان از صحت نتایج تجربی، هر آزمون دو مرتبه انجام شده است.

در رابطه C_0 ، (13) پارامتر سختی اولیه و h بیان‌گر افزایش سختی فاز آستنیت به دلیل به وجود آمدن فاز مارتنزیت در ماده است. C_0 را می‌توان به کمک شیب منحنی تنش-کرنش در نقطه شروع سختی ایزوتروپیک بدست آورد.

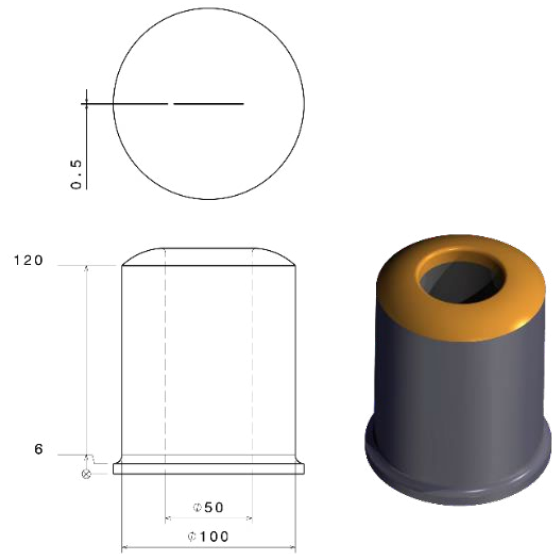
۳- روند آزمون‌ها و نتایج تجربی

در این قسمت، آزمون‌های تجربی برای بدست آوردن تبدیل فاز ناشی از کرنش پلاستیک و توسعه آسیب در فولاد ضدزنگ آستنیتی ۳۰۴ انجام شد.

۳-۱- مشخصات دستگاه کشش و قطعه‌ی نمونه

مشخصات قطعه‌ی نمونه با توجه به استاندارد $E 8M - 09$ [۲۱] مطابق شکل ۳ و جدول ۲ انتخاب گردید. ضخامت قطعه‌های نمونه آزمون کشش نیز برابر 0.5 میلی‌متر در نظر گرفته شد.

دستگاهی که در این پژوهش از آن استفاده شد، $GOTECHAI - 7000M$ است. این دستگاه قادر است تا میزان ۲۰ کیلو نیوتن نیرو به قطعه وارد کند. گستره‌ی نرخ حرکت فک متحرک بالای دستگاه از 0.001 تا 1000 میلی‌متر بر دقیقه می‌باشد. تصویر این دستگاه در شکل ۴ آمده است.



شکل ۵: محفظه فوق سرد آزمون کشش

Fig. 5. Cryogenic chamber for tensile test

Table 3. AISI 304 stainless steel properties at 77 K

جدول ۳: خواص فولاد AISI ۳۰۴ در دمای ۷۷ کلوین

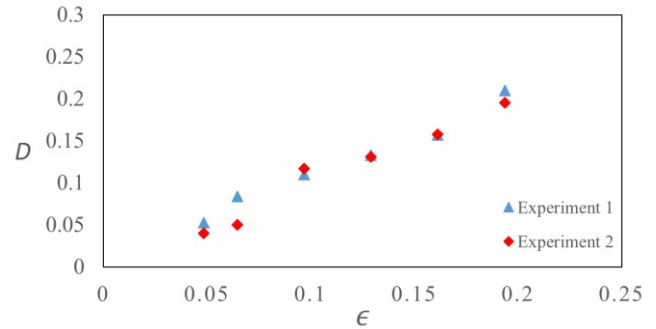
ضریب پواسون	سختی اولیه	تنش تسلیم	مدول یانگ
ν	C_0	σ_y	E
۰/۲۸	۲۳۴۵ MPa	۵۹۴ MPa	۲۱۳/۷ GPa

ترتیب شیب اولیه نمودار، مقدار قسمت افقی و شیب اولیه شروع سخت‌شوندگی نمودار تنش- کرنش می‌باشند، به صورت جدول ۳ بدست آمده‌اند. این مقادیر، میانگین داده‌های بدست آمده از دو مجموعه آزمون کشش تک محوره می‌باشد. همچنین برای تعیین مقدار ضریب پواسون^۱ در ماده در دمای فوق سرد، از آنجا که با انجام یک نوع آزمون تعیین این پارامتر امکان‌پذیر نمی‌باشد، با توجه به مرجع [۲۳]، انتخاب شد. بر طبق جداول موجود در این مرجع برای فولاد ضدزنگ ۳۰۴ و در دمای ۷۷ کلوین، مقدار ضریب پواسون مقدار $\nu=0/28$ تعیین گردید.

برای بدست آوردن پارامتر آسیب بر حسب کرنش پلاستیک، ابتدا شیب باربرداری در کرنش‌های مختلف محاسبه شده است. این شیب برابر مدول یانگ ماده در حالت آسیب دیده است. سپس با داشتن مدول یانگ ماده در حالت آسیب دیده و آسیب ندیده ابتدایی و به کمک رابطه (۸)، پارامتر آسیب بر حسب کرنش‌های پلاستیک مختلف بدست می‌آید. در نهایت نمودار پارامتر آسیب بر حسب کرنش پلاستیک مطابق شکل ۷ بدست می‌آید.

۳-۴- نتایج آزمون پراش پرتوی ایکس

به منظور محاسبه درصد حجمی مارتزیت در کرنش‌های مختلف، آزمون پراش پرتوی ایکس صورت گرفت. طیف سنجی پراش پرتو ایکس، یک تکنیک سریع آنالیزی است که برای تشخیص نوع مواد و همچنین فاز و خصوصیات کریستالی آن به کار می‌رود. این آزمون برای قطعات کشیده شده در دمای اتاق صورت گرفته است. برای این منظور قطعه کوچکی از وسط قطعات آزمون جدا گردید و پس از آماده سازی آن، آزمون پراش پرتوی ایکس صورت پذیرفت. نتایج حاصل از این آزمون‌ها در نمودارهای شکل ۸ آمده است. محور عمودی این نمودار بر حسب شدت بازتاب پرتوی ایکس از قطعه و محور افقی بیانگر دو برابر زاویه دریافت کننده پرتو نسبت به افق می‌باشد. در این نمودار قله‌هایی وجود دارد که نشانگر یک فاز خاص در ماده می‌باشد. نوع فازهای موجود در ماده و صفحه مربوط به هر کدام از این فازها به کمک نرم‌افزار اکسپرت های اسکور^۲ مشخص گردیده است که فاز $FCC - \gamma$ نشانگر فاز مکعبی وجه مرکز پر آستنیتی و فاز $BCC - \alpha'$ نشانگر فاز مارتزیت در قطعه فولادی نوع ۳۰۴ است. سه رقمی که در پرانتز و روبروی نوع هر فاز نوشته شده است، بیانگر صفحه‌ای است که فاز مورد نظر در آن قرار گرفته است. در ادامه، از این صفحات برای بدست آوردن کسر حجمی مارتزیت استفاده خواهد شد. با توجه



شکل ۷: نمودار پارامتر آسیب بر حسب کرنش پلاستیک برای دو آزمون در دمای ۷۷ کلوین

Fig. 7. Damage parameter against plastic strain curve for two tests at 77 K

۳-۲- شرایط آزمون

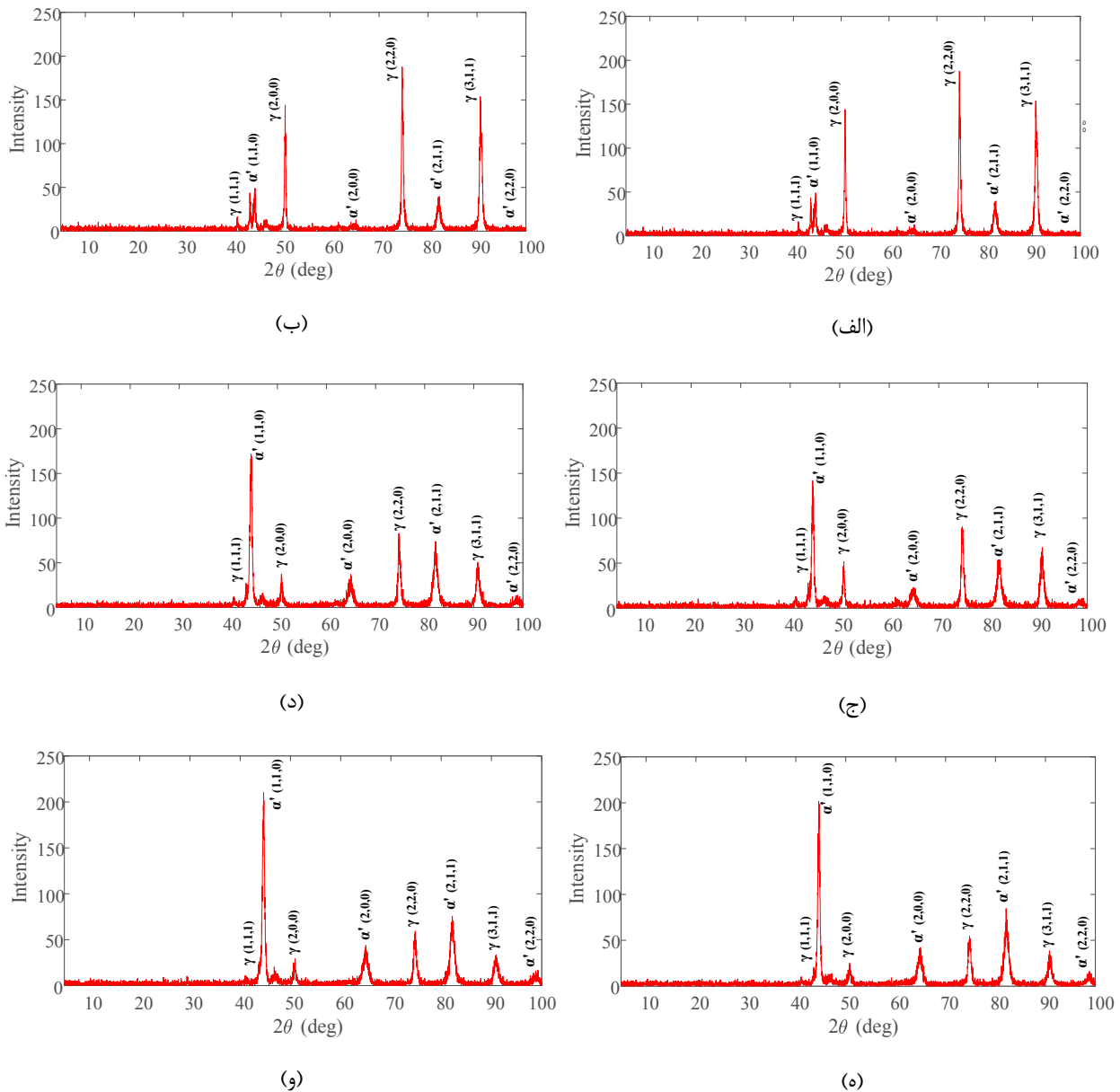
برای تعیین نرخ کرنش که به عنوان ورودی به دستگاه داده می‌شود، از استاندارد ISO 6892-3 استفاده شده است [۲۲]. طبق این استاندارد، نرخ جابجایی تخمینی فک برابر $0/75$ میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شد. نحوه سرد کردن نمونه، تأثیر زیادی در زمان و میزان انتقال حرارت به آن دارد و ممکن است تأثیر قابل توجهی در نتایج آزمون نیز داشته باشد. برای سرد کردن، نمونه در نیتروژن مایع شناور شده است. برای قرار دادن قطعه در نیتروژن مایع، محفظه‌ای مطابق شکل ۵ طراحی و ساخته گردید تا قطعه در طول آزمون درون آن قرار بگیرد. این محفظه استوانه‌ای شکل دارای ۲ لایه است. لایه بیرونی از جنس فولاد ضدزنگ ۳۰۴ و لایه داخلی از جنس پی وی سی می‌باشد. بین دو لایه نیز از فوم پولی یورتان که عایق بسیار خوبی است، پر شده است. حداقل زمان غوطه‌ور شدن برای هم‌دما شدن قطعه با دمای نیتروژن مایع، با توجه به استاندارد ذکر شده، برابر ۶۰ ثانیه در نظر گرفته شده است.

۳-۳- نتایج آزمون کشش

هدف از این آزمون، بدست آوردن منحنی تنش-کرنش است که حاوی اطلاعاتی در مورد تغییر شکل الاستیک-پلاستیک و خواص آسیب ماده است. برای بدست آوردن پارامتر آسیب، باربرداری صورت گرفت. برای بدست آوردن پارامترهایی نظیر مدول یانگ اولیه ماده E، تنش تسلیم σ_y و متغیر آسیب D نیاز به داشتن نمودار تنش-کرنش است و در نهایت نمودارهای تنش-کرنش مهندسی فولاد آستنیتی نوع ۳۰۴ در دمای فوق سرد ۷۷ کلوین در جابجایی‌های ۳، ۴، ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ میلی‌متر، مطابق شکل ۶ بدست می‌آیند. با توجه به شکل ۶ مقادیر مدول یانگ، تنش تسلیم و سختی اولیه که به

1 Poisson Ratio

2 X' Pert HighScore



شکل ۸: نمودار پراش پرتوی ایکس فولاد AISI ۳۰۴ در جابجایی‌های (الف) ۳ میلی‌متر (ب) ۴ میلی‌متر (ج) ۶ میلی‌متر (د) ۸ میلی‌متر (ه) ۱۰ میلی‌متر (و) ۱۲ میلی‌متر

Fig. 8. XRD curves for AISI 304 stainless steel for displacement of (a) 3 mm (b) 4mm (c) 6 mm (d) 8 mm (e) 10 mm (f) 12 mm

جلوی هر قله مشخص گردیده است. بر طبق این رابطه، مقدار کسر حجمی مارتنزیت را می‌توان بدست آورد.

با توجه به رابطه (۱۷)، نمودار کسر حجمی مارتنزیت بر اساس کرنش پلاستیک، برای جابجایی‌های مختلف و برای هر دو آزمون، به صورت شکل ۹ بدست آمده است. در این شکل، محور افقی مقدار کرنش پلاستیک و محور افقی، کسر حجمی مارتنزیت در قطعه کشیده شده می‌باشد.

با توجه به نمودار شکل ۹، میانگین پارامترهای تبدیل فاز مارتنزیتی ناشی از کرنش که در شکل ۱ ذکر گردید، به صورت جدول ۴ خواهند شد:

به نمودارهای پراش پرتوی ایکس و رابطه (۱۷) که در مرجع [۲۴] ارائه شده است، کسر حجمی مارتنزیت در هر ۶ حالت جابجایی به سادگی مطابق رابطه (۱۷) قابل محاسبه می‌باشد:

$$\zeta = \frac{I'_{(211)\alpha}}{I'_{(211)\alpha} + 0.65(I'_{(311)\gamma} + I'_{(220)\gamma})} \quad (17)$$

که در رابطه بالا I' شدت پرتوی ایکس بازگشتی از قطعه نمونه می‌باشد. همچنین صفحه فاز مورد نظر و نوع فاز موجود در فولاد ضد زنگ آستنیتی، در

Table 5. Parameter values of numerical simulation obtained from experimental results

جدول ۵: مقادیر پارامترهای شبیه‌سازی عددی با توجه به نتایج تجربی

مقدار	پارامتر
۲۱۳/۷ MPa	E
۰/۲۸	N
۵۹۴ MPa	σ_y
۲۳۴۵ MPa	C_0
۴/۰۹۵	A
۰/۰۱۷	P_ξ
۰/۷۴	ξ_L

Table 6. Obtained constants from fitting of numerical and experimental results

جدول ۶: ثوابت بدست آمده از برازش نتایج عددی و تجربی

مقدار	پارامتر
۱/۰ MPa	S
۰/۴	h

۴-۲- شبیه‌سازی تبدیل فاز مارتنزیتی ($\gamma \rightarrow \alpha'$) ناشی از کرنش

برای شبیه‌سازی تبدیل فاز مارتنزیتی ناشی از کرنش پلاستیک در فولادها در دمای فوق سرد، از مدل ارائه شده توسط اسکوزن [۳] در حالت سه بعدی و ایزوتروپیک استفاده شده است. با توجه به غیر چرخه‌ای بودن بارگذاری، ساده‌سازی بر روی مدل اسکوزن انجام گرفته است؛ بدین صورت که سختی سینماتیکی در آن صفر در نظر گرفته شده است. رابطه سینماتیکی استفاده شده، مطابق رابطه (۱) می‌باشد.

در این شبیه‌سازی فرض‌های زیر توسط اسکوزن و همکار در نظر گرفته شده است:

- ۱- فرض می‌شود که تأثیر نرخ کرنش $\dot{\epsilon}_p$ برای نرخ دمایی ۴ تا ۷۷ کلوین ناچیز است. (پلاستیسیته مستقل از نرخ کرنش)
- ۲- کرنش پلاستیک داخل ماده ϵ_p از ۰/۲ تجاوز نمی‌کند. (فرض کرنش‌های کوچک)
- ۳- ماده دو فازی ناهمگن از قانون جریان مرتبط پیروی می‌کند (برای

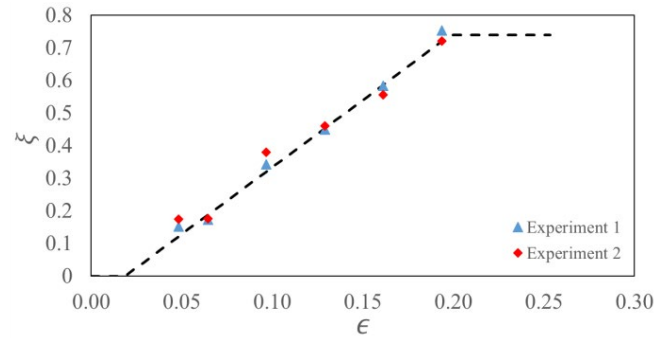


Fig. 9. Volume fraction of martensite versus plastic strain curve

شکل ۹: نمودار کسر حجمی مارتنزیت بر حسب کرنش پلاستیک

Table 4. Principal values of volume fraction of martensite versus plastic strain curve data

جدول ۴: مقادیر اساسی داده‌های نمودار کسر حجمی مارتنزیت بر حسب کرنش پلاستیک

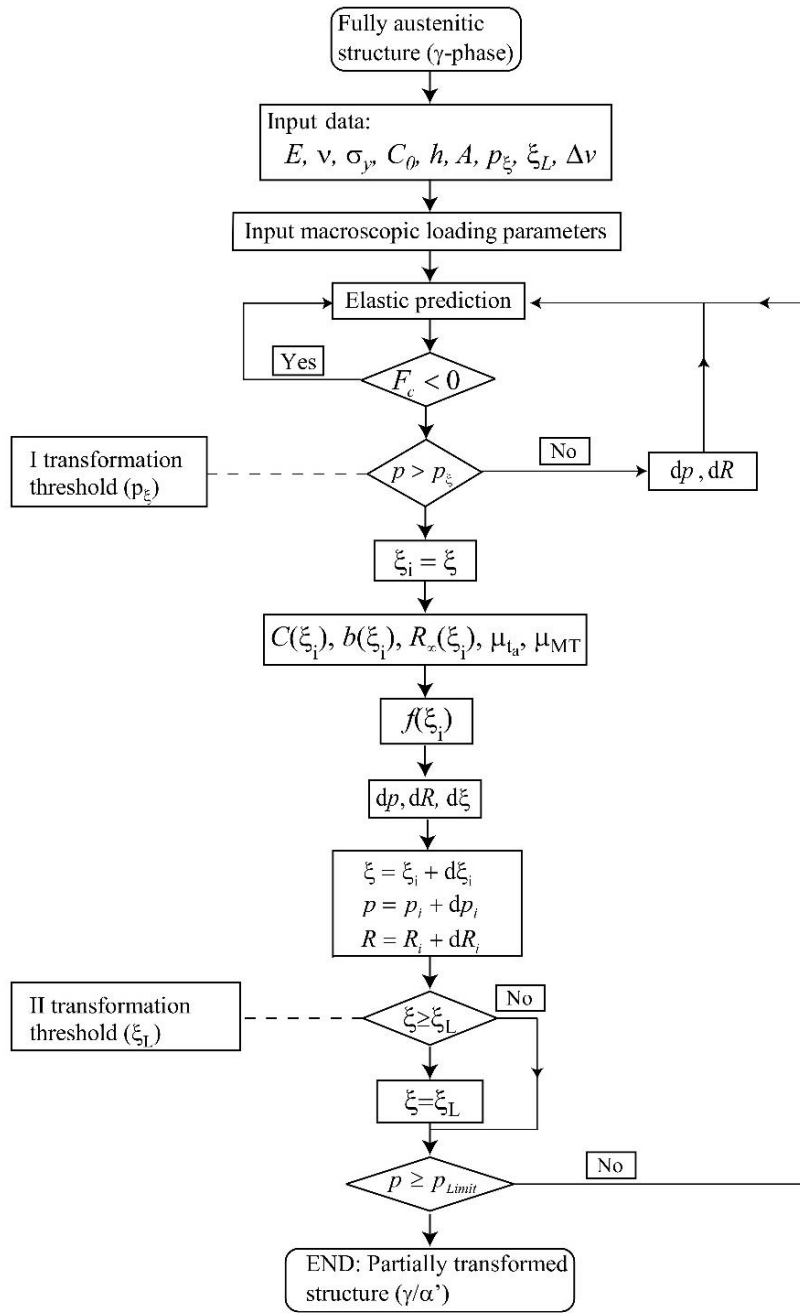
A	P_ξ	ξ_L
۴/۰۹۵	۰/۰۱۷	۰/۷۴

۴- مدل‌سازی عددی و مقایسه نتایج

در این قسمت به شبیه‌سازی رفتار فولادهای آستنیتی در دمای فوق سرد پرداخته می‌شود. فولاد انتخاب شده در این پژوهش از نوع فولاد آستنیتی نوع ۳۰۴ می‌باشد. منظور از دمای فوق سرد در این پژوهش، دمای نیتروژن مایع یعنی ۷۷ کلوین (۱۹۶- درجه سلسیوس) می‌باشد و شبیه‌سازی‌های صورت گرفته، مطابق با این دما می‌باشد. برای شبیه‌سازی عددی رفتار فولادهای آستنیتی در دمای فوق سرد، لازم است تا دو نوع مدل عددی که یکی برای توضیح آسیب ناشی از کرنش پلاستیک و دیگری برای تبدیل فاز مارتنزیتی ناشی از کرنش پلاستیک است، انتخاب شوند. مدل نهایی ترکیب این دو نوع مدل است که قادر است به صورت همزمان، دو پدیده را پیش‌بینی نماید. در نهایت با برازش منحنی بدست آمده از نتایج عددی با داده‌های تجربی بدست آمده از آزمون‌های صورت گرفته، ضرایب این مدل بدست خواهد آمد.

۴-۱- شبیه‌سازی رفتار آسیب نرم

برای شبیه‌سازی‌های رفتار آسیب نرم در فولادها در دمای فوق سرد، از مدل ارائه شده توسط لمیتره [۲] در حالت سه بعدی و ایزوتروپیک استفاده شده است. سینماتیکی توسعه‌ی آسیب نرم در این سه مدل مطابق رابطه (۱۳) می‌باشد.



شکل ۱۰: الگوریتم استفاده شده در شبیه‌سازی‌های عددی

Fig. 10. Algorithm of numerical simulation

مشخص می‌شوند. مقادیر این پارامترها با توجه به آزمون‌های تجربی مطابق جدول ۵ در نظر گرفته شده است.

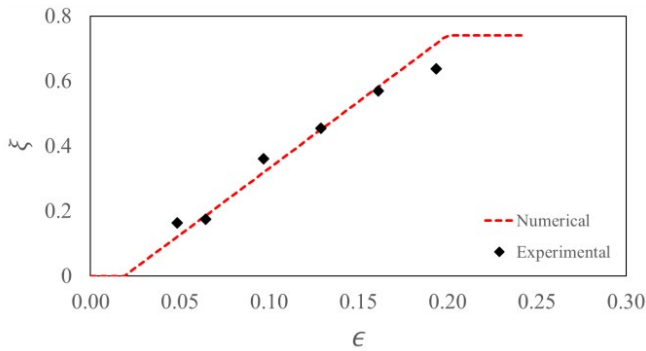
۴-۳- مقایسه نتایج شبیه‌سازی و نتایج تجربی

در این قسمت به بررسی و مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی با نتایج تجربی

اطلاعات بیشتر به مرجع [۲۵] مراجعه شود).

الگوریتم استفاده شده در شبیه‌سازی عددی که از ترکیب مدل رشد مارتنزیتی و توسعه آسیب بدست می‌آید، مطابق شکل ۱۰ می‌باشد.

با توجه به الگوریتم شکل ۱۰، مشاهده می‌شود که در شبیه‌سازی عددی، نیاز به تعیین ورودی‌هایی است که این ورودی‌ها بر اساس آزمون‌های تجربی



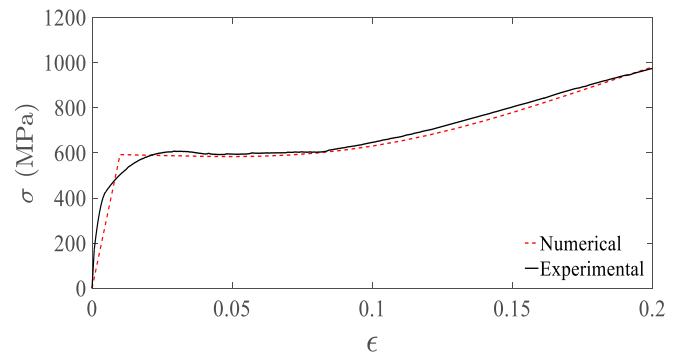
شکل ۱۳: مقایسه نمودار کسر حجمی مارتنزیت بر حسب کرنش پلاستیک در حالت‌های عددی و تجربی

Fig. 13. Comparison of volume fraction of martensite versus plastic strain curve for numerical and experimental results

شبیه‌سازی‌های عددی و منحنی‌های تجربی تنش-کرنش، آسیب-کرنش و کسر حجمی مارتنزیت-کرنش بدست آمده است، مطابق جدول ۶ می‌باشد. با توجه به ثابت‌های بدست آمده در جدول ۶ نتایج مقایسه نمودارهای تنش-کرنش، کسر حجمی مارتنزیت بر حسب کرنش پلاستیک و آسیب بر حسب کرنش پلاستیک به ترتیب در نمودارهای شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ آورده شده است.

که در جدول ۶، پارامتر تأثیر کسر حجمی مارتنزیت بر سخت شونده‌گی ایزوتروپیک می‌باشد. همانطور که در بخش مدل‌سازی عددی بیان گردید، به دلیل محدودیت‌هایی که شبیه‌سازی عددی دارد، این مدل تنها تا کرنش ۰/۲ اعتبار دارد. به همین علت شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ تا این کرنش رسم شده‌اند.

در شکل ۱۱، نمودار تنش-کرنش مهندسی در دو حالت عددی و تجربی در کنار هم رسم شده‌است. با توجه به این نمودار، مشاهده می‌شود که رفتار ماده در ناحیه پلاستیک ابتدا به صورت خط افقی است و در حدود کرنش ۰/۰۸، شروع به بالا رفتن می‌کند. علت این پدیده همان سختی ایزوتروپیک در ماده است که بخشی از این سختی به دلیل رشد مارتنزیتی در ماده اتفاق می‌افتد. سختی ایزوتروپیک ناشی از تبدیل فاز مارتنزیتی به دلیل ساختار بسیار سخت آن است. این سختی از کرنش ۰/۰۸ به بعد به میزان قابل توجهی در ماده رشد می‌کند؛ ولی قبل این کرنش، ماده تقریباً مقاومتی از خود نشان نمی‌دهد و در ناحیه پلاستیک کامل قرار دارد. همچنین با توجه به شکل ۱۱، مقدار خطا در ناحیه ابتدایی بیشتر از سایر نقاط است؛ چرا که در حالت عددی، مدل‌سازی به صورتی انجام گرفته است که ناحیه الاستیک به صورت ناگهانی به ناحیه پلاستیک تبدیل می‌شود؛ در حالیکه در واقعیت نمودار به صورت تدریجی به ناحیه پلاستیک می‌رود و نمودار هیچگونه نقطه تیزی نخواهد داشت؛ در نتیجه

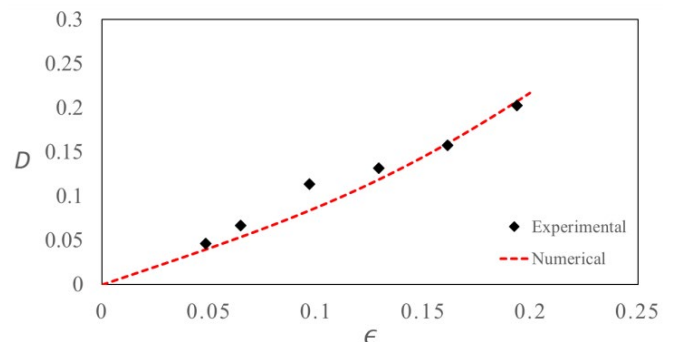


شکل ۱۱: مقایسه نمودار تنش-کرنش در حالت‌های عددی و تجربی

Fig. 11. Comparison of stress-strain curve for numerical and experimental results

بدست آمده پرداخته می‌شود تا به کمک آن، کارایی این روش‌ها در تحلیل رفتار فولادهای آستنیتی و در دمای فوق سرد بررسی شود.

برای شبیه‌سازی عددی، از نرم افزار آباکوس استفاده گردیده است. المان استفاده شده برای شبیه‌سازی، یک المان سه‌بعدی $1 \times 1 \times 1$ میلی‌متر مکعبی می‌باشد. سطح تسلیم به صورت سطح فون میسر در نظر گرفته و با وارد کردن ورودی‌های بدست آمده از نتایج تجربی و اجرای کد یومت در نرم‌افزار آباکوس، شبیه‌سازی آسیب-پلاستیک و رشد مارتنزیتی صورت گرفته است. خواص آسیب-پلاستیک و رشد مارتنزیتی شبیه‌سازی، که به عنوان ورودی‌های کد تعریف می‌گردند، در جدول ۵ توضیح داده شده‌است. در این شبیه‌سازی، دوره زمانی حل برابر $0/01$ ثانیه در نظر گرفته شد و به دلیل انتخاب شکل به عنوان یک المان، از شبکه‌بندی واحد استفاده گردید؛ بدین معنی که کل شکل یک المان در نظر گرفته می‌شود. در نهایت، ثوابت روابط (۷) که به کمک برازش



شکل ۱۲: مقایسه نمودار آسیب بر حسب کرنش پلاستیک در حالت‌های عددی و تجربی

Fig. 12. Comparison of damage versus plastic strain curve for numerical and experimental results

می‌کند که این موضوع، موجب افزایش استحکام فولاد ضدزنگ در دمای فوق سرد می‌شود.

- ثابت‌های بدست آمده، به عنوان ورودی‌های شبیه‌سازی عددی مورد استفاده قرار گرفت. برای انجام شبیه‌سازی، کد یومت نوشته شده در نرم‌افزار آباکوس اجرا گردید و با وارد کردن خواص بدست آمده از نتایج تجربی به عنوان ورودی‌های شبیه‌سازی و در نهایت برازش آن با نتایج تجربی، ثوابت مدل ترکیبی بدست آمد.
- این مدل برای حالت ایزوتروپیک و در بازه دمایی ۴ تا ۷۷ کلوین و کرنش‌های کوچک کارایی دارد و می‌توان از کد آن برای اجرا در نرم‌افزارهای المان محدودی مختلف استفاده نمود.

۶- فهرست علائم

علائم انگلیسی	
سرعت حرکت فک دستگاه، mm/min	v_c
مدول یانگ ماده آسیب ندیده، GPa	E_0
تنش تسلیم ماده، MPa	σ_y
متغیر آسیب ماده	D
شیب اولیه شروع سختی ایزوتروپیک، MPa	C_0
پارامتر تأثیر کسر حجمی مارتنزیت بر سخت شوندگی	h
مدول یانگ ماده آسیب دیده، MPa	E_D
کسر حجمی مارتنزیت در ماده	$f(\alpha')$
شیب ناحیه میانی نمودار کسر حجمی مارتنزیت بر حسب کرنش پلاستیک	M
طول از مبدأ نمودار کسر حجمی مارتنزیت بر حسب کرنش پلاستیک	p_ξ
حد نهایی کسر حجمی مارتنزیت در ماده	ξ_L
علائم یونانی	
کرنش	ϵ
تنش، MPa	σ
فاز آستنیت	γ
فاز مارتنزیت	α'
ضریب پواسون	ν
زیرنویس‌ها	
حالت آسیب دیده	D
حالت اشباع	L
مربوط به کسر حجمی مارتنزیت	ξ

منابع

- [1] B.e.T. Skoczeń, Compensation systems for low temperature applications, Springer, Berlin ; New York, 2004.
- [2] J. Lemaitre, A continuous damage mechanics model for ductile fracture, Transactions of the ASME. Journal of

در این نقطه، اختلاف قابل مشاهده‌ای بین نتایج عددی و تجربی وجود دارد. در نمودار شکل ۱۲، نتایج تجربی و عددی مقادیر آسیب بر حسب کرنش پلاستیک در کنار یکدیگر رسم شده‌اند. این نکته قابل ذکر است که نقاط تجربی، میانگین داده‌های دو آزمون تجربی می‌باشند.

در نمودار شکل ۱۳، نتایج تجربی و عددی مقادیر کسر حجمی مارتنزیت بر حسب کرنش پلاستیک در کنار یکدیگر رسم شده‌اند. در نمودار عددی، نمودار تجربی به سه ناحیه خطی تقرب زده می‌شود. در ناحیه اول، کسر حجمی مارتنزیت صفر در نظر گرفته می‌شود و نمودار خط افقی $\gamma = 0$ است. در ناحیه دوم، منحنی تجربی با یک خط تقرب زده می‌شود که طول از مبدأ آن همان پارامتر P_ξ است. در نهایت ناحیه سوم نیز با یک خط افقی که مقدار آن برابر $\xi_L = \gamma$ است، تقرب زده می‌شود.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، مدل ترکیبی آسیب-پلاستیک و رشد مارتنزیتی برای فولاد آستنیتی ۳۰۴ معرفی گردید. این مدل ترکیبی متشکل از دو مدل مجزا بوده است؛ یکی مدل آسیب-پلاستیک لمیتره برای مواد نرم و دیگری مدل تبدیل فاز مارتنزیتی ناشی از کرنش پلاستیک در حالت ایزوتروپیک که توسط اسکوزن و همکار معرفی گردیده بود. در این مدل فرض شده است که این مدل برای کرنش‌های کوچک (کمتر از ۰/۲) کاربرد دارد و نرخ کرنش نیز در نتایج بی تأثیر خواهد بود. برای بررسی کارایی این مدل و بدست آوردن ثوابت آن، از نتایج تجربی استفاده شد و با برازش منحنی‌های عددی با نتایج تجربی، این ثوابت تعیین گردید. آزمون‌های تجربی شامل دو قسمت مختلف بوده است؛ آزمون اول، کشش تک محوره در دمای ۷۷ کلوین بوده است که در ۶ کرنش مختلف صورت گرفت و به کمک نتایج آن، خواص ماده و پارامتر آسیب در آن بدست آمدند. آزمون دوم، پراش پرتوی ایکس بوده است که به کمک آن، فازهای درون ماده تعیین گشتند و مقدار کسر حجمی مارتنزیت در کرنش‌های مختلف بدست آمد. توسط این آزمون، خواص تبدیل فاز مارتنزیتی ناشی از کرنش پلاستیک فولاد ضد زنگ آستنیتی استخراج گردید. برای فولاد ضد زنگ ۳۰۴ نتایج زیر بدست آمد:

- این فولاد در برابر تبدیل فاز مارتنزیتی خود به خودی ناشی از کاهش دما تا ۷۷ کلوین مقاوم است.
- تبدیل فاز مارتنزیت ناشی از کرنش پلاستیک در دمای اتاق نیز رخ می‌دهد؛ ولی این پدیده در دمای فوق سرد بسیار سریع‌تر و بیشتر اتفاق می‌افتد.
- در کرنش حدودی ۰/۰۸، سختی ایزوتروپیک در ماده شروع به افزایش

- damage model for austenitic stainless steel and its application to the crack propagation problem at cryogenic temperatures, *Int J Damage Mech*, 22(1) (2012) 95-115.
- [13] R. Ortwein, B. Skoczeń, J.P. Tock, Micromechanics based constitutive modeling of martensitic transformation in metastable materials subjected to torsion at cryogenic temperatures, *Int J Plast*, 59 (2014) 152-179.
- [14] R. Ortwein, M. Ryś, B. Skoczeń, Damage evolution in a stainless steel bar undergoing phase transformation under torsion at cryogenic temperatures, *Int J Damage Mech*, 25(7) (2016) 967-1016.
- [15] H. Egner, M. Ryś, Total energy equivalence in constitutive modeling of multidissipative materials, *Int J Damage Mech*, 26(3) (2017) 417-446.
- [16] M. Ryś, B. Skoczeń, Coupled constitutive model of damage affected two-phase continuum, *Mechanics of Materials*, 115 (2017) 1-15.
- [17] J. Lemaitre, J.-L. Chaboche, Aspect phénoménologique de la rupture par endommagement, *J Méc Appl*, 2(3) (1978).
- [18] H.P. Reed, Martensitic Transformations in Fe-Cr-Ni Stainless Steels, in: R.P. Reed, T. Horiuchi (Eds.) *Austenitic Steels at Low Temperatures*, Springer US, Boston, MA, 1983, pp. 41-67.
- [19] A.A. Lebedev, V.V. Kosarchuk, Influence of phase transformations on the mechanical properties of austenitic stainless steels, *Int J Plast*, 16(7-8) (2000) 749-767.
- [20] S. Murakami, *Continuum damage mechanics: a continuum mechanics approach to the analysis of damage and fracture*, Springer Science & Business Media, 2012.
- [21] A.A.S.f. Testing, Materials, Standard test methods for tension testing of metallic materials, ASTM international, 2009.
- Engineering Materials and Technology*, 107(1) (1985) 83-89.
- [3] C. Garion, B. Skoczen, Modeling of Plastic Strain-Induced Martensitic Transformation for Cryogenic Applications, *J Appl Mech*, 69(6) (2002) 755-762.
- [4] G. Olson, M. Cohen, Kinetics of strain-induced martensitic nucleation, *Metall Mater Trans A*, 6(4) (1975) 791-795.
- [5] T. Iwamoto, T. Tsuta, Y. Tomita, Investigation on deformation mode dependence of strain-induced martensitic transformation in trip steels and modelling of transformation kinetics, *Int J Mech Sci*, 40(2) (1998) 173-182.
- [6] C. Garion, B. Skoczen, Combined model of strain-induced phase transformation and orthotropic damage in ductile materials at cryogenic temperatures, *Int J Damage Mech*, 12(4) (2003) 331-356.
- [7] C. Garion, B. Skoczeń, S. Sgobba, Constitutive modelling and identification of parameters of the plastic strain-induced martensitic transformation in 316L stainless steel at cryogenic temperatures, *Int J Plast*, 22(7) (2006) 1234-1264.
- [8] K.J. Lee, M.S. Chun, M.H. Kim, J.M. Lee, A new constitutive model of austenitic stainless steel for cryogenic applications, *Comput Mater Sci*, 46(4) (2009) 1152-1162.
- [9] S.R. Bodner, *Unified plasticity for engineering applications*, Springer Science & Business Media, 2001.
- [10] Y. Tomita, T. Iwamoto, Constitutive modeling of TRIP steel and its application to the improvement of mechanical properties, *Int J Mech Sci*, 37(12) (1995) 1295-1305.
- [11] H. Egner, B. Skoczeń, Ductile damage development in two-phase metallic materials applied at cryogenic temperatures, *Int J Plast*, 26(4) (2010) 488-506.
- [12] C.-S. Lee, B.-M. Yoo, M.-H. Kim, J.-M. Lee, Viscoplastic

- during annealing of plastically deformed AISI 304 austenitic stainless steel: martensite reversion, grain refinement, recrystallization, and grain growth, *Metall Mater Trans A*, 47(8) (2016) 4210-4216.
- [25] D.R. Bland, The associated flow rule of plasticity, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 6(1) (1957) 71-78.
- [22] E. ISO, 6892-1. *Metallic materials-Tensile testing-Part 3: Method of test at low temperature*, International Organization for Standardization, (2015).
- [23] H. Ledbetter, Stainless-steel elastic constants at low temperatures, *J Appl Phys*, 52(3) (1981) 1587-1589.
- [24] M. Naghizadeh, H. Mirzadeh, Microstructural evolutions