

## Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 52(1) (2020) 67-70 DOI: 10.22060/mej.2018.14482.5868

# Numerical and Experimental Analysis of Damage Evolution and Martensitic Transformation in AISI 304 Austenitic Stainless Steel at Cryogenic Temperature

S. S. Kazemi, M. Homayoun Fard, M. Ganjiani\*, N. Soltani

Department of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

ABSTRACT: In this research, properties of ductile damage evolution and martensitic phase transformation in an AISI 304 stainless steel at cryogenic temperature has been studied experimentally and numerically. Simple loading-unloading tension tests for specimens floating in liquid nitrogen have been performed. Accordingly, the cryogenic chamber has been designed and constructed to plunge the tensile test samples into the liquid nitrogen. From simple loading-unloading tension tests, the graph of force-deformation and the evolution of damage parameter during elastic unloadings have been determined. Afterwards, the x-ray diffraction tests have been performed on the stretched sample tests to evaluate the evolution of martensite phase in the resultant biphase material. In the numerical analysis, combining the phase transformation model of Garion and Skoczen and isotropic damage model of Lemaitre, a constitutive model for monotonic loadings has been introduced. The Garion and Skoczen model has been developed based on the assumption of small strains (under 0.2) for cryogenic condition. Furthermore, the hardening law for the biphase material has been obtained from the Mori-Tanaka homogenization. The numerical analysis in this study was carried out implementing the combined constitutive model by means of a user-defined material model subroutine in Abaqus/Standard. Finally, comparing the numerical simulation with the experimental data, parameters of the model has been calibrated.

### **Review History:**

Received: 22 May. 2018 Revised:11 Sep. 2018 Accepted: 10 Nov. 2018 Available Online: 20 Nov. 2018

#### **Keywords:**

Cryogenic temperature Ductile damage Austenitic stainless steel Tensile test Numerical analysis.

#### **1-Introduction**

Structural Materials, such as austenitic stainless steels, preserve their ductility even at cryogenic temperatures. Prediction of the behavior of these materials is important due to their wide and sensitive application in this range of temperature. Two main phenomena observed in plastic behavior of austenitic stainless steels at cryogenic temperatures are  $\gamma \rightarrow \alpha'$  straininduced martensitic phase transformation and the evolution of ductile damage [1].

Until now, some models have been introduced to predict the behavior of stainless steels at cryogenic temperature. Garion and Skoczen [2] have developed the first model for phase transformation particularly in cryogenic temperature. In this model, assuming a linear phase transformation kinetic model, a model for hardening of plastic behavior of bi-phase material based on the Mori-Tanaka homogenization scheme have been developed.

Although many researches have been developed on the phase transformation and damage evolution separately, a few works were dedicated to study both phenomena. Most of these studies, engaged with the behavior of materials at cryogenics, have developed the model by Garion and Skoczen [2] (GS model) accompanied with different continuum damage models. Some of these works are [1, 3-6]. In addition, two different constitutive models have been developed to consider the effect

\*Corresponding author's email: ganjiani@ut.ac.ir

of strain rate on damage evolution and phase transformation [7, 8].

In the present paper, experimental and numerical analysis of damage evolution and martensite transformation of AISI 304 stainless steels at cryogenic temperature (77 K) has been represented. Isotropic continuum damage model of Lemaitre [9] in conjunction with the (GS model) have been applied. Loading-Unloading tensile tests and X-Ray Diffraction (XRD) method have been used in experiments to evaluate damage and martensite respectively. Numerical analysis has been performed in Abaqus/Standard, using a User-defined MATerial model (UMAT) code. Comparing the numerical and experimental results, parameters of the model have been determined.

#### 2- Governing Equations

In this section, governing equations of the coupled model of damage evolution and martensitic transformation are represented briefly.

Garion and Skoczen [2] proposed a simplified evolution law for the volume fraction of martensite as follow:

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

where  $p_{\xi}$  represents the threshold plastic strain for phase transformation,  $\xi_L$  is the martensite content limit and H is the Heaviside function. Material parameter A generally depends on temperature and stress state. Also,  $\dot{p}$  denotes the accumulated



Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

Table 1. Values of the parameters of the model

Parameter	Value	How to determine	Parameter	Value	How to determine
Ε	213.7 GPa	Directly from experiments	$p_{\xi}$	0.017	Directly from experiments
$\sigma_y$	595 MPa	Directly from experiments	$\xi_L$	0.74	Directly from experiments
Co	2345 GPa	Directly from experiments	h	0.4	Calibrating the numerical with experimental results
Α	4.095	Directly from experiments	S'	1 MPa	Calibrating the numerical with experimental results

plastic strain rate.

Considering isothermal condition, the general constitutive relation can be described as Eq. (2):

$$\boldsymbol{\sigma} = (1 - D) \mathbb{E} : (\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}_p - \boldsymbol{\varepsilon}_{bs}) \tag{2}$$

where  $\sigma$  denotes the stress tensor, *D* the scalar damage variable, *E* the fourth-order elasticity tensor,  $\varepsilon$  the total strain tensor,  $\varepsilon_p$  the plastic strain tensor and  $\varepsilon_{bs}$  denotes the, so called, Bain strain tensor which can be expressed in terms of relative volume change  $\Delta v$  of the crystal due to phase transformation as  $\varepsilon_{bs} = \frac{1}{3} \Delta VI$ .

The Von Mises yield surface, coupled with damage through effective stress concept, has been used to describe the plastic behavior:

$$f_{y} = J_{2}(\tilde{\mathbf{\sigma}}) - \sigma_{y} - \tilde{R} \text{ where } \tilde{R} = R/(1-D)$$
(3)

The rate of damage development with plastic deformation in the model of Lemaitre [9] could be expressed as:

$$\dot{D} = \frac{\sigma_{eq}^2}{2ES'(1-D)^2} \dot{p} \text{ where } D = 1 - \frac{E(D)}{E_0}$$
(4)

where S' is a material constant and  $\sigma_{eq}$  is the von Mises equivalent stress. E(D) represents the change of the Young modulus as the result of damage growth

Also, the evolution of isotropic hardening in the plastic behavior of biphase material based on the Mori-Tanaka homogenization method is presented by Garion and Skoczen [2]:

$$dR = C_m dp = 2(\mu_{MT} - \mu_{ta})dp \tag{5}$$

Where the  $\mu_{ta}$  is shear modulus defined in Eq. (6)

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

$$E_t = \frac{EC}{E+C}; \ C = C_0(1+h\xi)$$
(6)

and  $\mu_{MT}$  is the homogenized modulus which is calculated by following equations [2]:

In Eq. (6),  $C_0$  is the initial hardening parameter and h represents the increase in hardening of austenite due to harder martensite content.  $C_0$  can be obtained from stress-strain curve



#### Fig. 1. Comparison of the numerical and experimental results for plastic behavior of AISI 304 stainless steel at cryogenic temperature

of the material as the slope of the curve at the point of triggering the phase transformation.

$$\mu_{m} = \frac{E}{2(1+\nu)}; \quad k_{m} = \frac{E}{3(1-2\nu)}$$

$$2\mu_{MT} + 2\mu^{*} = \left[\frac{1-\xi}{2(\mu_{ta}+\mu^{*})} + \frac{\xi}{2(\mu_{m}+\mu^{*})}\right]^{-1} \quad (7)$$

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

#### **3- Experimental Test Procedure**

The tensile tests have been performed at temperature 77K. In the present work, the specimens have been immersed in liquid nitrogen for at least 60s considering the ISO 6892-3 standard. A three-layered cryogenic chamber has been used in which the outer layer is made of AISI 304 stainless steel, the inner layer of PolyVinyl Chloride (PVC) and the middle layer is filled with polyurethane as a great insulation. The grip velocity is assumed as 0.75 mm/s in accordance with the ISO 6892-3 standard. Six levels of deformation (3, 4, 6, 8, 10, and 12 mm) have been specified to assess the martensite transformation and damage evolution. At each level of deformation, samples were unloaded and removed from the nitrogen bath in order to evaluate the damage parameter and to perform the X-Ray Diffraction test evaluating the amount of martensite formed in the sample.

#### 4- Results and Discussion

In this section, numerical analysis has been performed implementing the constitutive model, represented in section 2, as a UMAT code in Abaqus/Standard. This analysis is used accompanied by experimental results to calibrate the parameters of the model. Some parameters of the model can be extracted from experimental results directly and other parameters should be obtained comparing numerical and experimental results. In Table 1, the value of these parameters has been specified. Using these parameters, the numerical response of represented constitutive model in comparison with experimental results has been shown in Fig. 1. It can be seen that the constitutive model represents a good agreement with experimental data.

#### **5-** Conclusions

A simplified constitutive model of plastic strain-induced phase transformation coupled with damage growth was presented for AISI 304 austenitic stainless steel at cryogenic temperature (77 K). Phase transformation model of Garion and Skoczen [2] and isotropic damage model of [9] was implemented in the constitutive equations. The model was developed on the basis of rate-independent small strain plasticity. In addition, experiments performed in order to identify the parameters in the model at cryogenic temperature (77K). The results show that the model can predict the plastic behavior of the material in monotonic loadings effectively.

#### References

- [1] C. Garion, B. Skoczen, Combined model of straininduced phase transformation and orthotropic damage in ductile materials at cryogenic temperatures, Int J Damage Mech, 12(4) (2003) 331-356.
- [2] C. Garion, B. Skoczen, Modeling of Plastic Strain-Induced Martensitic Transformation for Cryogenic Applications, J Appl Mech, 69(6) (2002) 755-762.
- [3] H. Egner, B. Skoczeń, Ductile damage development in two-phase metallic materials applied at cryogenic temperatures, Int J Plast, 26(4) (2010) 488-506.
- [4] H. Egner, B. Skoczeń, M. Ryś, Constitutive and numerical modeling of coupled dissipative phenomena in 316L stainless steel at cryogenic temperatures, Int J Plast, 64 (2015) 113-133.
- [5] M. Ryś, Modeling of Damage Evolution and Martensitic Transformation in Austenitic Steel at Cryogenic Temperature, in: Archive of Mechanical Engineering, 2015, pp. 523.
- [6] H. Egner, M. Ryś, Total energy equivalence in constitutive modeling of multidissipative materials, Int J Damage Mech, 26(3) (2017) 417-446.
- [7] 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.
- [8] C.-S. Lee, B.-M. Yoo, M.-H. Kim, J.-M. Lee, Viscoplastic 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.
- [9] J. Lemaitre, A continuous damage mechanics model for ductile fracture, Transactions of the ASME. Journal of Engineering Materials and Technology, 107(1) (1985) 83-89.

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۲، شماره ۱، سال ۱۳۹۹، صفحات ۲۶۵ تا ۲۷۸ DOI: 10.22060/mej.2018.14482.5868



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

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

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 شده است. برای این منظور، محفظهی فوق سرد برای قرار گرفتن قطعهی آزمون کشش در نیتروژن مایع، طراحی و ساخته شده آرمون کشش داد 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 آرمون، مقدار توسعهی فاز مارتنزیت در مادهی دو فازی حاصل، مشخص گردد. در تحلیل عددی، با ترکیب مدل تبدیل فاز گاریون و آرمون، مقدار توسعهی فاز مارتنزیت در مادهی دو فازی حاصل، مشخص گردد. در تحلیل عددی، با ترکیب مدل تبدیل فاز گاریون و اسب نرم اسکوزن و مدل آسیب همسانگرد لمیتره، یک مدل ترکیبی برای حالت بارگذاری یکنواخت ارائه شده است. مدل تبدیل فاز گاریون و اسب نرم آزمون، مقدار توسعهی فاز مارتنزیت در مادهی دو فازی حاصل، مشخص گردد. در تحلیل عددی، با ترکیب مدل تبدیل فاز گاریون و اسب نرم مدی اسکوزن و مدل آسیب همسانگرد لمیتره، یک مدل ترکیبی برای حالت بارگذاری یکنواخت ارائه شده است. مدل تبدیل فاز گاریون و اسب نرم آزمون مشره آنون سختشوندگی در مادهی دو فازی به کمک همگنسازی موری-تاناکا استخراج شده است. در این پژوهش، تحلیل عددی به آزمون کشش بر میل ماقایسهی شبیهسازی عددی با نتایج تجربی، پارامترهای مدل کالیبره شده است.

دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۰۱ بازنگری: ۱۳۹۷/۰۶/۲۰ ارائه آنلاین: ۱۳۹۷/۰۸/۲۹ کلمات کلیدی: تصای فوق سرد آسیب نرم پلاستیک آزمون کشش

۱ – مقدمه

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 می گیرند [۱]. منظور از آسیب نرم، آسیبی است که به دلیل کرنش پلاستیک در ماده رخ می دهد [۲].

پیش بینی 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 می شود. لذا علی رغم فعالیتهای زیادی که در این زمینه صورت گرفته است، همچنان

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

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 سختشوندگیِ 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

تا کنون مدلهایی برای پیش بینی رفتار مواد فولادی در دمای فوق سرد

نقاط ابهام زیادی در پیش بینی رفتار این مواد وجود دارد.

(Creative Commons License) حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس أفرینندگی مردمی (Creative Commons License) که یک این در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

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 مدلسازی 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 توسعه ی 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 محاسبه ی 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 میتوان پارامترها را تعیین کرد؛ حال آن که ماهیت توسعه ی آسیب وابسته به بارگذاری است و سینتیک توسعه ی آسیب نمی تواند تنها تابع نوع ماده باشد.

در سال ۲۰۱۲ لی و همکاران [۱۲] مدلی ویسکوپلاستیک برای بررسی رشد ترکِ فولادهای آستنیتی در دمای فوق سرد ارائه کردند. این مدل نیز هر دو پدیده ی تبدیل فاز مارتنزیتی ناشی از کرنش پلاستیک و توسعه ی 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 شدهاند.

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 مهمترین 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 شدهاند.

اورتوین و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۱۶ مدل آسیب همسانگرد لیمیتره [۲] را همراه با مدل تبدیل فاز گاریون –اسکوزن به کار گرفته و توسعه ی آسیب در مساله ی پیچش چرخشی میله های گرد را بررسی کردند. در این مطالعه جزئیات استخراج روابط نشان داده شده و آزمایش های بسیاری نیز برای تعیین پارامترها و تعیین محتوی مارتنزیت انجام گرفته است. توسعه ی آسیب و نیز اثر مارتنزیت بر افزایش سخت شوندگی 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 ساختاریِ ترکیبِ تبدیل فاز کرنش–محرک 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 توسعه ی 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

اثر سختشوندگی سینماتیکی، مدل تبدیل فاز گاریون و اسکوزن [۳] اصلاح گردیده و با مدل توسعه ی 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 توسعه ی 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 توسعه ی آسیب نرم و تبدیل فاز مارتنزیتی ناشی از کرنش پلاستیک به طور همزمان، به صورت خلاصه توضیح داده می شود. روابط سینماتیک تبدیل فاز مارتنزیتی ناشی از کرنش پلاستیک و معادلات ساختاری برای حالت آسیب اسکالر بیان می گردد. فولادهای رده ی ۳۰۰ در دمای اتاق در فاز  $\gamma$  آستنیت با وجوه مرکزپر<sup>۱</sup> هستند. این فاز می تواند به فازهای  $\alpha$  فریت تتراگونال مرکزپر<sup>۲</sup> و یا فاز هگزاگونال  $\beta$  تبدیل شود. فاز  $\beta$  را می توان فاز واسطه ی میان تبدیل  $\alpha \leftarrow \gamma$  دانست [۱۸]. این فاز تا کرنش های حدودا ۲ تا ۱۵درصد تشکیل شده و در ادامه نسبت حجمی آن کاهش می یابد [۱۹]. در نتیجه عموماً فاز مارتنزیت را بصورت بی سی سی در نظر می گیرند.



Fig. 1. Evolution of volume fraction of martensite ( $\xi$ ) as a function of plastic strain

رفتار تبدیل فاز  $\gamma \to \alpha$  توسط اولسن و کوهن [۴] توضیح داده شده است. رشد کسر حجمی مارتنزیت ( $\ddot{z}$ ) بر حسب کرنش پلاستیک که به صورت نمودار سیگموئید<sup>۲</sup> میباشد، در شکل ۱ نشان داده شده است. گاریون و اسکوزن [۳] برای دماهای فوق سرد با خطی فرض کردنِ بخشِ منحنیِ نمودار تبدیل فاز، رابطه (۱) را ارائه دادهاند:

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

که  $p_{\xi}$  نشان دهندهی آستانهی کرنش پلاستیک (برای شروع تبدیل فازی)،  $p_{\xi}$  نشان دهندهی آستانهی کرنش پلاستیک (برای شروع تبدیل فازی)،  $J_{\lambda}$  سطح اشباع کسر حجمی مارتنزیت و H تابع هوی ساید<sup>†</sup> است. پارامتر ماده A عمدتاً به دما T و تانسور تنش  $\sigma$  وابسته است؛ همچنین  $\dot{p}$  نشان دهنده نرخ انباشت کرنش پلاستیک است و به صورت رابطه (۲) تعریف می شود:

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

که در آن <sub>e</sub> 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:

$$\boldsymbol{\sigma} = (1 - D) \mathbb{E} : (\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}_p - \boldsymbol{\varepsilon}_{bs}) \tag{(7)}$$

که در آن  $\sigma$  بیان گر تانسور تنش، D بیان گر آسیب اسکالر،  $\mathbb{E}$  تانسور مرتبه مرتبه ی چهارم الاستیسیته،  $\mathcal{E}$  تانسور کرنش مجموع،  $\mathcal{E}_p$  تانسور کرنش پلاستیک و  $\mathcal{E}_b$  بیانگر تانسور کرنش بین میباشد که با ترم حجم نسبی  $\mathcal{V}$  و به صورت رابطه (۴) بیان می گردد [۳]:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{bs} = \frac{1}{3} \triangle \boldsymbol{\nu} \boldsymbol{I} \tag{(f)}$$

که

1 Face Centered Cubic (FCC)

<sup>3</sup> Sigmoid

<sup>4</sup> Heaviside

<sup>5</sup> Bain Strain

<sup>2</sup> Body-Centered Cubic (BCC)

Table 1. Chemical composition of AISI 304 steel sample

جدول 1: تركيب شيميايي نمونه فولاد آستنيتي AISI ۳۰۴

درصد وزنی	عنصر	درصد وزنی	عنصر
۰/۰۴	С	٠/• ١	Al
٠/۴٩	Si	•/٢•	Со
١/٠	Mn	۰/۰۳	Си
۰/۰۳۶	Р	•/• ١	Nb
• / • • Y	S	•/١١	V
۱۸/۰	Cr	• / • • ۶	W
٨/۵	Ni	•/•۴	Ν



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

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

$$\Delta v = \frac{V_m - V_a}{V_a} \tag{(a)}$$

که  $W_a$  و  $V_a$  به ترتیب حجم مخصوص اشغال شده توسط آستنیت و مارتنزیت میباشد. مقدار  $V_{\Delta}$  با توجه به ترکیب عناصر ماده، در حدود ۲۰/۰ تا ۵۰/۰ میباشد [۱۰]. همچنین در مکانیک آسیب پیوسته ابتدا می بایست حالت آسیب با متغیرهای آسیب مناسب تعریف شده، سپس رفتار مکانیکی مادهی آسیب دیده و سپس نرخ توسعه ی آسیب نرم توصیف گردد. با توجه به این که رشد خللها در درون ماده موجب کاهش سختی ماده می گردد، متغیر آسیب را مطابق رابطه (۶) می توان به صورت تغییر مدول الاستیسیته مدل کرد [۲]:

$$D = 1 - \frac{E(D)}{E_0} \tag{8}$$

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 می شود:

$$f_{y} = J_{2}(\tilde{\mathbf{\sigma}}) - \sigma_{y} - \tilde{R} \tag{Y}$$

که در رابطه ی بالا  $\ddot{R}$  ، متغیر سختی ایزوتروپیک موثر است که به صورت زیر تعریف می شود:

$$\tilde{R} = R / (1 - D) \tag{A}$$

رشد حفرهها در مقیاسهای میکروسکوپیک، مزوسکوپیک و ماکروسکوپیک در فرایندهای شکست مواد که منجر به تضعیف خواص مکانیکی آنها میشود آسیب نامیده میشود [۲۰]. مکانیک آسیب پیوسته، توسعه یآسیب در مقیاسهای مزوسکوپیک و ماکروسکوپیک را در چارچوب مکانیک محیطهای پیوسته دنبال میکند. به منظور بحث در مورد اثرات ناپیوستگیهای میکروسکوپیک در مواد (مثلا، حفرهها و ناخالصیها) با استفاده از مکانیک محیطهای پیوسته، ابتدا می ایست اثرات مکانیکی ریزساختار همگن شده و به صورت یک میدان پیوسته ی ماکروسکوپی در ماده بیان شود. برای این منظور ناحیه ی کوچکی در اطراف نقطه ی مادی در نظر گرفته و فرض میشود که ماده ی ناپیوسته در این ناحیه به صورت آماری همگن بوده و حالت میشود که ماده ی ناپیوسته در این ناحیه به صورت آماری همگن بوده و حالت میشود که ماده ی ناپیوسته در این ناحیه به صورت آماری همگن بوده و حالت میشود که ماده در این ناحیه با میانگین آماری متغیرهای مکانیکی در آن بیان می گردد. به کوچکترین اندازه ی این ناحیه المان حجمی نماینده<sup>۱</sup> گفته میشود. نمونه ی اروی ای در مساله ی رفتار پلاستیک مواد نرم با در نظر گرفتن تبدیل نمونه ی اروی ای در مساله ی رفتار پلاستیک مواد نرم با در نظر گرفتن تبدیل

معادلات ساختاری و رشد در مکانیک آسیب با استفاده از مفاهیم تنشِ (و یا سایر متغیرهای حالت) موثر بیان میشوند. در این جا مادهی آسیب دیده با یک مادهی معادل مجازیِ 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

<sup>1</sup> Representative volume element (RVE)

Table 2. Dimentions of test sample in mm

مقدار	پارامتر
$\Delta \cdot \pm \cdot / 1$	طول سنجه - $G$
$17/2 \pm \cdot/7$	<i>W</i> - عرض
۱٢/۵	- حداقل شعاع فيلت R
۲۰۰	- حداقل طول کل
۵۷	A - حداقل طول قسمت موازی
۵۰	$^{\prime}$ - طول قسمت داخل فک $^{\prime}$

جدول ۲: ابعاد قطعه آزمون به میلیمتر

$$\dot{D} = \frac{\sigma_{eq}^2}{2ES'(1-D)^2} \dot{p} \tag{17}$$

که در رابطهٔ فوق dD / dp = dD ، شیب نمودار آسیب بر حسب کرنش پلاستیک میباشد. از معادلات رابطه (۱۴)، برای مدلسازی آسیب فولاد در شبیه سازی 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 می گردد:

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

که در آن  $\mu_{ta}$  مدول برشی است که به صورت رابطه (۱۵) بیان می شود:

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

$$E_t = \frac{EC}{E+C}; \quad C = C_0(1+h\xi)$$
(10)

و  $\mu_{\scriptscriptstyle MT}$  مدول همگن شده می باشد که به کمک معادلات زیر محاسبه  $\mu_{\scriptscriptstyle MT}$ 

$$\mu_{m} = \frac{E}{2(1+\nu)}; \quad k_{m} = \frac{E}{3(1-2\nu)}$$

$$2\mu_{MT} + 2\mu^{*} = \left[\frac{1-\xi}{2(\mu_{ta}+\mu^{*})} + \frac{\xi}{2(\mu_{m}+\mu^{*})}\right]^{-1} \quad (18)$$

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





$$\tilde{\sigma} = \frac{dF}{d\tilde{A}} = \frac{\sigma}{1 - D} \tag{9}$$

$$\dot{D} = \frac{\partial F_D(Y, p, D, ...)}{\partial Y} \dot{p}(1 - D) \tag{(1)}$$

که  $F_{\rm D}$  تابع پتانسیل اتلاف، p کرنش پلاستیک، Y نرخ آزادسازی انرژی کرنش الاستیک در واحد حجم و در حالت تنش ثابت در نظر گرفته می شود. این تعریف در رابطه (۱۱) بیان شده است:

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

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

$$F_D = \frac{Y^2}{2S(1-D)} \tag{17}$$

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:

می گردد:



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

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 ۱۲میلیمتر کشیده میشوند. سپس مدتی در همان حالت نگه داشته و در نهایت باربرداری میشوند. این آزمایشها در دمای فوق سردِ 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.

#### ۳- ۱- مشخصات دستگاه کشش و قطعهی نمونه

مشخصات قطعهی نمونه با توجه به استاندارد 09 – E 8M [۲۱] مطابق شکل ۳ و جدول ۲ انتخاب گردید.

ضخامت قطعههای نمونه آزمون کشش نیز برابر ۰/۵ میلیمتر در نظر گرفته شد.

دستگاهی که در این پژوهش از آن استفاده شد، GOTECHAI – 7000M است. است. این دستگاه قادر است تا میزان ۲۰ کیلو نیوتن نیرو به قطعه وارد کند. گسترهی نرخ حرکت فک متحرک بالای دستگاه از ۰/۰۰۱ تا ۱۰۰۰ میلیمتر بر دقیقه میباشد. تصویر این دستگاه در شکل ۴ آمده است.

#### Table 3. AISI 304 stainless steel properties at 77 K

جدول ۳: خواص فولاد۳۰۴ AISI در دمای ۷۷ کلوین

مدول يانگ	تنش تسليم	سختي اوليه	ضريب پواسون
E	$\sigma_y$	$C_0$	V
rir/v GPa	۵۹۴ MPa	ттға MPa	•/۲٨



*GOTECHAI* – 7000*M* شکل ک: دستگاه آزمون کشش مدل Fig. 4. GOTECH AI-7000M tensile test machine

در رابطه (۱۳)،  $C_0$  پارامتر سختی اولیه و h بیان گرافزایش 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.



Fig. 5. Cryogenic chamber for tensile test



Fig. 7. Damage paremeter against plastic strain curve for two tests at  $77~{\rm K}$ 

### ۳– ۲– شرایط آزمون

برای تعیین نرخ کرنش که به عنوان ورودی به دستگاه داده می شود، از استاندارد 3–ISO 6892 استفاده شده است [۲۲]. طبق این استاندارد، نرخ جابجایی تخمینی فک برابر ۰/۷۵ میلی متر بر دقیقه در نظر گرفته شد.

نحوهی 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. لایهی بیرونی از جنس فولادضدزنگ 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 اولیهٔ ماده E، تنش تسلیم σy 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 میلی متر، مطابق شکل ۶ بدست می آیند.

با توجه به شکل ۶، مقادیر مدول یانگ، تنش تسلیم و سختی اولیه که به

ترتیب شیب اولیه نمودار، مقدار قسمت افقی و شیب اولیه شروع سخت شوندگی نمودار تنش – کرنش می باشند، به صورت جدول ۳ بدست آمدهاند. این مقادیر، میانگین دادههای بدست آمده از دو مجموعه آزمون کشش تک محوره می باشد. همچنین برای تعیین مقدار ضریب پواسون <sup>۲</sup> در ماده در دمای فوق سرد، از آنجا که با انجام یک نوع آزمون تعیین این پارامتر امکان پذیر نمی باشد، 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 ۲۸/۰۰=۷ 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 ندیدهٔ ابتدایی و به کمک رابطه (۸)، پارامتر آسیب بر حسب کرنشهای پلاستیک مختلف بدست می آید.

در نهایت نمودار پارامتر آسیب بر حسب کرنش پلاستیک مطابق شکل ۷ بدست میآید.

### ۳- ۴- نتایج آزمون پراش پرتوی ایکس

به منظور محاسبهٔ درصد حجمی مارتنزیت در کرنشهای مختلف، آزمون پراش پرتوی ایکس صورت گرفت. طیف سنجی پراش پرتو ایکس، یک تکنیک سريع آناليزي است كه براي تشخيص نوع مواد و همچنين فاز و خصوصيات 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 آزمون ها در نمودارهای شکل ۸ آمده است. محور عمودی این نمودار بر حسب شدت بازتاب پرتوی ایکس از قطعه و محور افقی بیانگر دو برابر زاویهٔ دریافت کننده پرتو نسبت به افق میباشد. در این نمودار قلههایی وجود دارد که نشانگر یک فاز خاص در ماده می باشد. نوع فازهای موجود در ماده و صفحهٔ مربوط به هر کدام از این فازها به کمک نرمافزار اکسپرت های اسکور کمشخص گردیده است که فاز  $\gamma - FCC$  نشانگر فاز مکعبی وجه مرکز پر آستنیتی و فاز  $BCC - \alpha'$  نشانگر فاز مارتنزیت در قطعهٔ فولادی نوع ۳۰۴ است. سه رقمی که در پرانتز و روبروی نوع هر فاز نوشته شده است، بیان گر صفحهای است که فاز مورد نظر در آن قرار گرفتهاست. در ادامه، از این صفحات برای بدست آوردن کسر حجمی مارتنزیت استفاده خواهد شد. با توجه

<sup>1</sup> Poisson Ratio

<sup>2</sup> X' Pert HighScore



شکل۸: 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

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:

$$\zeta = \frac{I'_{(211)\alpha}}{I'_{(211)\alpha} + 0.65(I'_{(311)\gamma} + I'_{(220)\gamma})}$$
(1Y)

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

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 می اشد.

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:

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

#### **جدول ٥:** مقادیر پارامترهای شبیهسازی عددی با توجه به نتایج تجربی

مقدار	پارامتر
τι۳/Υ MPa	Ε
•/۲٨	N
۵۹۴ MPa	$\sigma_y$
ttfa MPa	$C_{0}$
۴/• ۹۵	A
•/• \Y	$p_{\xi}$
٠/٧۴	$\zeta_L$

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

#### جدول ٦: ثوابت بدست آمده از برازش نتایج عددی و تجربی

مقدار	پارامتر
ı∕∙ MPa	S
• /۴	h

### بیه سازی تبدیل فاز مارتنزیتی $(\gamma ightarrow lpha')$ ناشی از کرنش -۲ -۴

برای شبیه سازی 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، ساده سازی بر روی مدل اسکوزن انجام گرفته است؛ بدین صورت که سختی سینماتیکی در آن صفر در نظر گرفته شده است. رابطهٔ سینتیکی استفاده شده، مطابق رابطه (۱) می باشد.

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

۱ – فرض میشود که تأثیر نرخ کرنش *ج* برای نرخ دمایی ۴ تا ۷۷ کلوین ناچیز است. (پلاستیسیتهٔ مستقل از نرخ کرنش) ۲ – کرنش پلاستیک داخل ماده *ج* از ۰/۲ تجاوز نمی کند. (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 £:** مقادیر اساسی دادههای نمودار کسر حجمی مارتنزیت بر حسب کرنش پلاستیک

A	$p_{\xi}$	$\xi_{\scriptscriptstyle L}$
۴/• ۹۵	•/• \Y	٠/٧۴

### ٤- مدلسازی عددی و مقایسهٔ نتایج

در این قسمت به شبیه سازی رفتار فولادهای آستنیتی در دمای فوق سرد پرداخته می شود. فولاد انتخاب شده در این پژوهش از نوع فولاد آستنیتی نوع ۳۰۴ می باشد. منظور از دمای فوق سرد در این پژوهش، دمای نیتروژن مایع یعنی ۲۷ کلوین (۱۹۶– درجه سلسیوس) می باشد و شبیه سازی های صورت گرفته، مطابق با این دما می باشد. برای شبیه سازی 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 و دیگری برای تبدیل فاز مارتنزیتی مدل است که قادر است به صورت همزمان، دو پدیده را پیش بینی نماید. در نهایت با برازش منحنی بدست آمده از نتایج عددی با داده های تجربی بدست آمده از آزمون های 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. سینتیک توسعهی آسیب نرم در این سه مدل مطابق رابطه (۱۳) میباشد.



شکل + ۱: الگوریتم استفاده شده در شبیهسازیهای عددی

Fig. 10. Algoritm of numerical simulation

اطلاعات بيشتر به مرجع [٢۵] مراجعه شود.).

الگوریتم استفاده شده در شبیهسازی عددی که از ترکیب مدل رشد مارتنزیتی و توسعهٔ آسیب بدست می آید، مطابق شکل ۱۰ می باشد.

با توجه به الگوریتم شکل ۱۰، مشاهده می شود که در شبیه سازی عددی، نیاز به تعیین ورودی هایی است که این ورودی ها بر اساس آزمون های تجربی

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





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

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

برای شبیه سازی عددی، از نرم افزار آباکوس استفاده گردیده است. المان استفاده شده برای شبیهسازی، یک المان سهبعدی ۱×۱×۱ میلیمتر مکعبی میباشد. سطح تسلیم به صورت سطح فون میسز در نظر گرفته و با وارد کردن ورودیهای بدست آمده از نتایج تجربی و اجرای کد یومت در نرمافزار آباکوس، شبیه سازی 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 ۲۰۱۰ 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







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

شبیه سازی های عددی و منحنی های تجربی تنش – کرنش، آسیب – کرنش و کسر حجمی مارتنزیت – کرنش بدست آمده است، مطابق جدول ۶ می باشد. با توجه به ثابت های بدست آمده در جدول ۶۰ نتایج مقایسهٔ نمودارهای تنش – کرنش، کسر حجمی مارتنزیت بر حسب کرنش پلاستیک و آسیب بر حسب کرنش پلاستیک به ترتیب در نمودارهای شکل های ۱۱ تا ۱۳ آورده شده است.

که در جدول ۶۶ h پارامتر تأثیر کسر حجمی مارتنزیت بر سخت شوندگی ایزوتروپیک می باشد. همانطور که در بخش مدل سازی عددی بیان گردید، به دلیل محدودیت هایی که شبیه سازی عددی دارد، این مدل تنها تا کرنش ۲/۲ اعتبار دارد. به همین علت شکل های ۱۱ تا ۳۱ تا این کرنش رسم شدهاند.

در کنار هم رسم شدهاست. با توجه به این نمودار، مشاهده می شود که رفتار ماده در ناحیه پلاستیک ابتدا به صورت خط افقی است و در حدود کرنش ۸۰/۰۰، شروع به بالا رفتن می کند. علت این پدیـده همان سختی ایزوتروپیک در ماده است که بخشی از این سختی به دلیل رشد مارتنزیتی در ماده اتفاق می افتد. سختی ایزوتروپیک ناشی از تبدیل فاز مارتنزیتی به دلیل ساختار بسیار سخت آن است. این سختی از کرنش ۸۰/۰ به بعد به میزان قابل توجهی در ماده رشد می کند؛ ولی قبل این کرنش، ماده تقریبا مقاومتی از خود نشان نمی دهد و در ناحیه پلاستیک کامل قرار دارد. همچنین با توجه به شکل ۱۱، مقدار خطا به صورتی انجام گرفته است که ناحیه الاستیک به صورت ناگهانی به ناحیه پلاستیک تبدیل می شود؛ در حالیکه در واقعیت نمودار به صورت تدریجی به ناحیه پلاستیک می رود و نمودار هیچگونه نقطه تیزی نخواهد داشت؛ در نتیجه

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 تقریب زده می شود. در ناحیه اول، کسر حجمی مارتنزیت صفر در نظر گرفته می شود و نمودار خط افقی 0 = y است. در ناحیه دوم، منحنی تجربی با یک خط تقریب زده می شود که طول از مبدا آن همان پارامتر  $P_{z}$  است. در نهایت ناحیه سوم نیز با یک خط افقی که مقدار آن برابر J = y است، تقریب زده می شود.

### ٥- نتيجه گيرى

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–یلاستیک 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 تاثیر خواهد بود. برای بررسی کارآیی این مدل و بدست آوردن ثوابت آن، از نتایج تجربی استفاده شد و با برازش منحنی های عددی با نتایج تجربی، این ثوابت تعیین گردید. آزمون های 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 كرنش يلاستيك فولاد ضد زنگ آستنيتي استخراج گرديد. براي 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

می کند که این موضوع، موجب افزایش استحکام فولاد ضدزنگ در دمای فوق سرد می شود.

 ثابتهای بدست آمده، به عنوان ورودیهای شبیه سازی عددی مورد استفاده قرار گرفت. برای انجام شبیه سازی، کد یومت نوشته شده در نرمافزار آباکوس اجرا گردید و با وارد کردن خواص بدست آمده از نتایج تجربی به عنوان ورودیهای شبیه سازی 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

• این مدن برای حالف ایرونروپیک و در برای دستی ، ۲۰۰۰ عنویی و ترسیکی کوچک کارآیی دارد و می توان از کد آن برای اجرا در نرمافزارهای المان محدودی مختلف استفاده نمود.

### ٦- فهرست علائم

### علائم انگلیسی

0 . ,		
V <sub>c</sub>	$V_{c}$	سرعت حرکت فک دستگاه، mm/min
$E_{0}$	Eo	مدول يانگ ماده آسيب نديده، GPa
$\sigma_y$	$\sigma_y$	تنش تسلیم مادہ، MPa
D	D	متغير آسيب ماده
$C_{\theta}$	$C_{\ell}$	شيب اوليهٔ شروع سختی ايزوتروپيک، MPa
h	h	پارامتر تأثیر کسر حجمی مارتنزیت بر سخت شوندگی
$E_D$	$E_L$	مدول يانگ ماده آسيب ديده، MPa
$f(\alpha')$	f(	کسر حجمی مارتنزیت در ماده
M	М	شیب ناحیه میانی نمودار کسر حجمی مارتنزیت بر
		حسب کرنش پلاستیک
$p_{\xi}$	$p_{\xi}$	طول از مبدأ نمودار كسر حجمى مارتنزيت بر حسب
		كرنش پلاستيك
$\xi_{\scriptscriptstyle L}$	$\xi_L$	حد نهایی کسر حجمی مارتنزیت در ماده
لائم يوناني		
ε	Е	كرنش
$\sigma$	$\sigma$	تنش، MPa
γ	γ	فاز آستنيت
ά	ά	فاز مارتنزیت
V	V	ضريب پواسون
برنويسها		
D	D	حالت آسيب ديده
L	L	حالت اشباع
ξ	ξ	مربوط به کسر حجمی مارتنزیت

### منابع

- 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

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 straininduced 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