



## Investigation of the micromechanical behavior of ferritic-martensitic steel under complex loading

A. Cheloee Darabi<sup>a</sup>, A. Pourkamali Anaraki<sup>a\*</sup>, J. Kadkhodapour<sup>a</sup>, S. Schmauder<sup>b</sup>

A. Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran

B. Institute for Materials Testing, Materials Science and Strength of Materials, University of Stuttgart, Pfaffenwaldring 32, 70569, Stuttgart, Germany

**ABSTRACT:** In this paper, the mechanical behavior of dual phase steel has been investigated in the macro and micro scales as experimentally and numerically. In order to study the influence of stress states on the mechanical behavior and fracture strain of DP600, four different specimens were tested under different stress states. Afterward, the obtained microstructure images by light microscope, were utilized to generate a 3D representative volume element based on the real microstructure. The microstructure images were converted to a 3D RVE model by image processing and finite element codes in Matlab and Abaqus commercial software, respectively. Then, the ability of the micro mechanical model to predict the macro mechanical behavior was evaluated under different stress states. The results demonstrate the micro mechanical model is able to predict the macro mechanical flow curve under different stress states except for shear. Finally, the influence of stress states on the stress to strain partitioning rate and the local plastic strain at fracture point were assessed. The results show stress-strain partitioning and local plastic strain are strongly dependent on stress state.

### Review History:

Received: Jul. 28, 2020

Revised: Nov. 05, 2020

Accepted: Dec. 24, 2020

Available Online: Jan. 04, 2021

### Keywords:

Dual phase steel

Micromechanical modeling

Stress state

Stress-strain partitioning

Plastic strain localization.

### 1- Introduction

Dual-Phase (DP) steels are utilized in the automotive industry as one of the main types of steel. DP steel contains two different phases i.e., martensite and ferrite phases, which the mechanical behaviors of these steels are dependent on the microstructural features of their phases [1]. Several researchers have evaluated the damage evolution in DP steels experimentally [2-3]. They studied the influence of microstructural features (martensite phase volume fraction, grain size, chemical composition) on micro-mechanical behavior. Recently, the micromechanical simulations have been adopted to assess the influence of microstructural parameters on the macro-mechanical behavior of dual-phase steels [4-5]. In this model, a Representative Volume Elements (RVE) have been utilized to evaluate the deformation patterns of phases during different loading conditions. Darabi et al. [4] proposed a 2D and 3D RVEs, based on real microstructure to predict the evolution of strain localization in phases. Several researchers have tried to predict the macro-flow curve by micro-mechanical model and a good agreement was observed between the obtained flow curves from the 3D RVE model and tensile experimental results [1, 4-5]. Few studies have been performed on micro-mechanical modeling under complex loadings and the ability of micromechanical model to predict the stress-strain curves under different stress states has not been evaluated.

\*Corresponding author's email: ali\_pourkamali@sru.ac.ir

In this paper, the mechanical behavior of DP600 steels will be analyzed under different stress-states and the results will be compared with the experimental tests. Then, the fracture strain will be presented based stress states parameters. Finally, the effect of stress states parameters on stress-strain partitioning will be analyzed during loadings.

### 2- Experiments

In this study, four different specimens with different stress states were considered to evaluate the effect of stress states on stress-strain curve according to DIN EN ISO 6892. Fig. 1 shows the specimens with different stress triaxiality and Lode angle parameters. All the specimens were tested using a universal testing machine (MTS Sintech 65/G) at the strain rate of 0.01 mm/s.

### 3- Micromechanical Model

a 3D RVE was generated statistically in the out-of-plane direction. In this approach, the first layer of the model was generated by an image processing code on the basis of actual microstructure. Afterwards, random distributions of martensite phase were generated by an image processing code. Finally, a python code was adopted to convert the generated layers to a 3D micromechanical model. In this model, the volume fraction of martensite phase remains constant. For



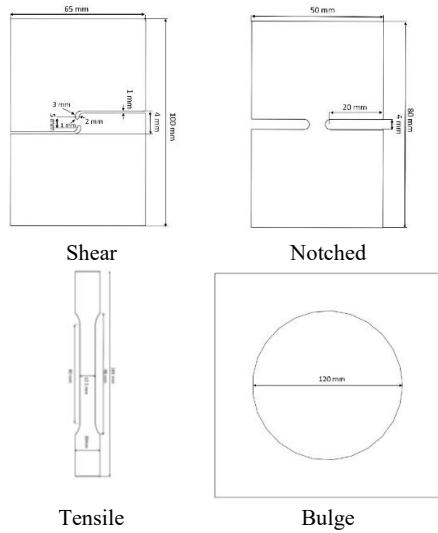


Fig. 1. Geometries of specimens under different stress states.

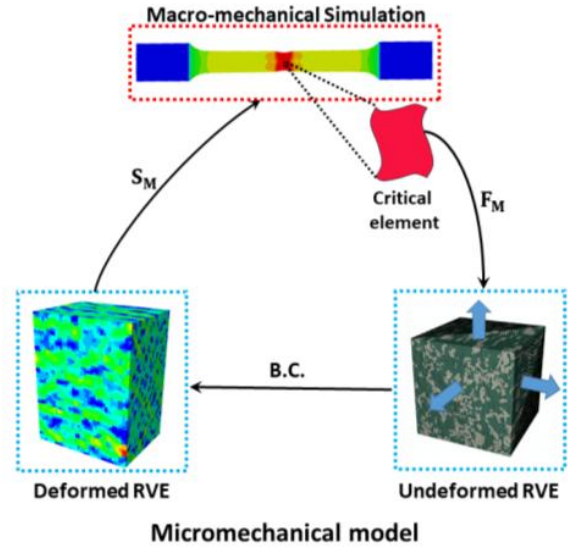


Fig. 2. The scheme of the boundary conditions extraction from macro to microscale simulation.

all specimens, the loading conditions were extracted from the deformation of the critical macro-mechanical element which is illustrated in Fig. 2.

#### 4- Result and Discussion

The generated RVE was used to investigate the macro stress-strain curves of DP600 under complex loading and without the consideration of a damage model. Fig. 3 shows a comparison pattern with micro-simulation, macro simulation and tensile experimental results, which shows the micromechanical model is able to predict the tensile test. Therefore, this approach will be used for further investigation under different loading conditions. The results indicate that the 3D RVE has acceptable results for tensile, notched tensile

and bulge boundary conditions. However, these models are found to not accurately predict experimental stress-strain curves under shear loading.

The influence of triaxiality and Lode angle parameters on stress-strain partitioning coefficient is demonstrated in Fig. 4 for at fracture point and strain=0.2. The same pattern was observed for both strain points. The results show, the stress-strain partitioning coefficient varies relative to stress states parameters as a quadratic function. The minimum value of stress-strain partitioning coefficient happens Lode angle zero and as the Lode angle increases or decreases the coefficient increases. Further, the maximum value of the coefficient occurs at triaxiality 0.33 and as the triaxiality increases or decreases the coefficient decreases.

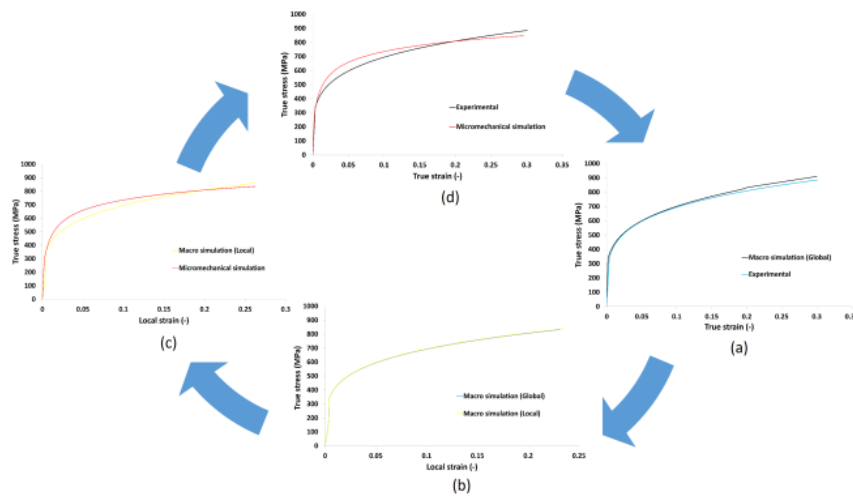
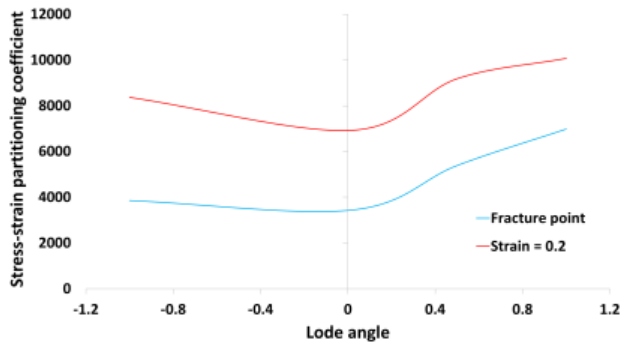
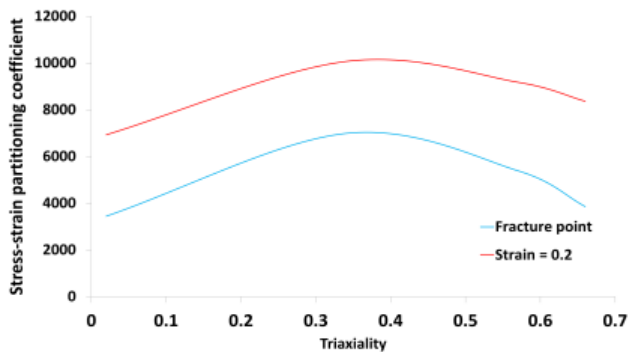


Fig. 3. Comparing the experimental stress-strain curve with the micromechanical results.



(a)



(b)

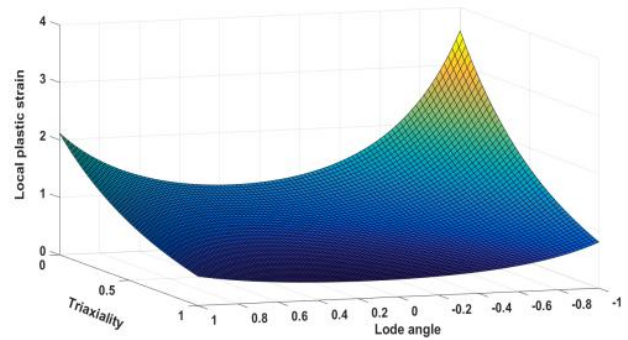
**Fig. 4. The changes of stress-strain partitioning coefficient to (a) Lode angle and (b) triaxiality**

Fig. 5 shows the local plastic strain surface at fracture point based on triaxiality and Lode angle. As reported already by Bai and Wierzbicki [6] which the local plastic strain has a parabolic behavior in the Lode angle parameter direction and exponential equation in the stress triaxiality direction.

### 5- Conclusions

According to the results, the main conclusions of this study are as follows:

- The 3D micromechanical model with random distribution is able to predict the macro flow curves under different stress states except shear loading.
- Local fracture strain is dependent on triaxiality and Lode



**Fig. 5: Local fracture strain surface based on triaxiality and Lode angle**

angle parameters, and the fracture locus can be shown as parabolic surface

- Stress-strain partitioning coefficient depends on stress states parameters, it means that the ferrite and martensite phases have different role under different stress states.

### References

- [1] A. Ramazani, K. Mukherjee, U. Prah, W. Bleck, Modelling the effect of microstructural banding on the flow curve behaviour of dual-phase (DP) steels, *Computational Materials Science*, 52 (2012) 46-54.
- [2] J. Kadkhodapour, A. Butz, S. Ziaei Rad, Mechanisms of void formation during tensile testing in a commercial, dual-phase steel, *Acta Materialia*, 59 (2011) 2575-2588.
- [3] H. Ghadbeigi, C. Pinna, S. Celotto, Failure mechanisms in DP600 steel: Initiation, evolution and fracture, *Materials Science & Eng. A*, 588 (2013) 420-431.
- [4] A. C. Darabi, H.R. Chamani, J. Kadkhodapour, A. P. Anaraki, A. Alaie, M. R. Ayatollahi, Micromechanical analysis of two heat-treated DP steels: DP800 and DP980, *Mechanics of Materials*, 110 (2017) 68-83.
- [5] X. Sun, K.S. Choi, W.N. Liu, M.A. Khaleel, Predicting failure modes and ductility of dual phase steels using plastic strain localization. *International Journal of Plasticity*, 25 (2009) 1888-1909.
- [6] Y. Bai, T. Wierzbicki, A new model of metal plasticity and fracture with pressure and lode dependence. *Int. J. Plast.*, 24 (2008) 1071-1096.

#### HOW TO CITE THIS ARTICLE

A. Cheloe Darabi A. Pourkamali Anaraki, J. Kadkhodapour, S. Schmauder, . Investigation of the micromechanical behavior of ferritic-martensitic steel under complex loading ,Amirkabir J. Mech. Eng., 53 (6) (2021) 873-876.

DOI: [10.22060/mej.2021.18782.6889](https://doi.org/10.22060/mej.2021.18782.6889)







## بررسی رفتار میکرومکانیکی فولاد فریتی-مارتنزیتی تحت بارگذاری‌های پیچیده

علی چلوئی دارابی<sup>۱</sup>، علی پورکمالی انارکی<sup>۱\*</sup>، جواد کدخداپور<sup>۱</sup>، زگفرید اشمودر<sup>۲</sup>

۱- دانشکده مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران  
۲- دانشگاه اشتوتگارت، اشتوتگارت، آلمان

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۰۷  
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۸/۱۵  
پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۰۴  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۱۰/۱۵

### کلمات کلیدی:

فولاد دوفازی  
مدلسازی میکرومکانیکی  
حالت تنش  
سه‌بندی تنش- کرنش  
محلی سازی کرنش پلاستیک.

**خلاصه:** در این مقاله رفتار مکانیکی فولاد دوفازی فریتی-مارتنزیتی با استفاده از روش‌های عددی و آزمایشگاهی در ابعاد ماکرو و میکرو مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور بررسی اثر حالت تنش بر رفتار شکست ماده، چهار نمونه آزمایشگاهی تحت حالت‌های مختلف تنش تست شده‌اند. پس از تصویربرداری از ریزساختار ماده با استفاده از میکروسکوپ‌های نوری، با استفاده از کد پردازش تصویر و کد اجزاء محدود نوشته‌شده به ترتیب در نرم‌افزارهای تجاری متلب و آباکوس، سلول واحد سه‌بعدی براساس ساختار واقعی ماده، مدل شده است. سپس توانایی مدل میکرومکانیکی پیشنهادشده، با مقایسه نتایج مدلسازی عددی با رفتار ماکرومکانیکی بدست‌آمده از آزمون‌های تجربی تحت حالت‌های مختلف تنش، مورد ارزیابی قرار گرفته شد. نتایج نشان می‌دهد که مدل میکرومکانیکی قابلیت پیش‌بینی منحنی تنش-کرنش تحت حالت‌های مختلف تنش، به غیر از حالت برش، را دارد. در نهایت با استفاده از مدل میکرومکانیک پیشنهادشده، به بررسی اثر پارامترهای حالت تنش بر روی نسبت سه‌بندی تنش-کرنش و کرنش محلی پلاستیک در لحظه شکست پرداخته شد که نتایج نشان می‌دهد که این مقادیر کاملاً وابسته به ضرایب حالت تنش می‌باشند.

### ۱- مقدمه

فولادهای دوفازی<sup>۱</sup> یکی از پرکاربردترین فولادهای با استحکام بالا می‌باشند که به دلیل قابلیت شکل‌دهی مناسب در کنار استحکام بالا مورد توجه صنایع خودروسازی قرار گرفته‌اند. این فولادها متشکل از فاز نرم (فاز فریت<sup>۲</sup>) و فاز سخت (فاز مارتنزیت<sup>۳</sup>) می‌باشند. قرارگیری این دوفاز در کنار یکدیگر منجر به استحکام بالا و شکل‌پذیری مناسب شده است که به ترتیب به دلیل حضور فازهای مارتنزیت و فریت می‌باشند [۱-۲]. به عبارت دیگر، این رفتار منحصربه‌فرد فولادهای دوفازی به دلیل تعامل پیچیده فازهای فریت و مارتنزیت در ابعاد میکرو باشد.

دست‌یافتن به یک طراحی با خواص بهینه در سازه‌های ساخته‌شده از فولادهای چندفازی، مستلزم داشتن دانش کافی در خصوص فازهای تشکیل‌دهنده و تاثیر هر یک از فازها بر رفتار این فولادها

می‌باشد. بدین منظور محققان مختلفی به بررسی میکرومکانیکی بر روی فولادهای دوفازی نمودند که بتوانند اثر پارامترهای مختلف ریزساختاری بر رفتار مکانیکی این فولادها را بررسی نمایند. چندین محقق، به معرفی مفاهیم مدل‌سازی میکرومکانیکی دوبعدی براساس تصاویر ریزساختاری با استفاده از نرم‌افزارهای اجزاء محدود پرداخته‌اند [۳-۵]. عسگری و همکارانش [۵] از نرم‌افزار اووف<sup>۴</sup>-۲ به منظور تولید مدل میکرومکانیکی دوبعدی براساس ریزساختار واقعی استفاده نمودند. رضانی و همکارانش [۶] با استفاده از تصاویر بدست‌آمده از میکروسکوپ نوری، سلول واحدی براساس ساختار واقعی ارائه نمودند. آنها نشان دادند که با استفاده از مدل پیشنهادشده می‌توان اثر چیدمان فازها بر منحنی تنش-کرنش ماده را به صورت عددی بررسی نمود. روش‌های مدل‌سازی میکرومکانیکی دوبعدی علاوه بر فولادهای دوفازی، به طور گسترده برای مواد چندفازی نیز بکار گرفته شده است. ژیا<sup>۵</sup> و وانگ<sup>۶</sup> [۷] به مطالعه بر روی اثر هر یک از

- 1 Dual phase steel
- 2 Ferrite
- 3 Martensite

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ali\_pourkamali@sru.ac.ir

- 4 OOF2
- 5 Xia
- 6 Wang



مدل شش ضلعی<sup>۱۲</sup> خود را معرفی کرد که پس از آن چندین محقق، از آن مدل برای مواد ناهمگن استفاده نموده‌اند. هانگ<sup>۱۳</sup> و کینلوچ<sup>۱۴</sup> [۱۳] و دانیلسون<sup>۱۵</sup> و همکارانش [۱۴] به مقایسه مدل‌های تقارن محوری و کرنش صفحه‌ای پرداختند که نشان داده شده‌است که مدل کرنش صفحه‌ای در درصد حجمی مارتنزیت<sup>۱۶</sup> بالا، قادر به پیش‌بینی دقیق رفتار منحنی تنش-کرنش ماکرومکانیک فولاد دوفازی نخواهند بود.

العباسی<sup>۱۷</sup> و همکارانش [۱۵] از مدل تقارن محوری به منظور بررسی رفتار میکرومکانیکی فولادهای دوفازی با درصد مارتنزیت مختلف استفاده نمودند و نشان داد که این مدل توانایی پیش‌بینی تغییرات کرنش پلاستیک برحسب درصد حجمی فاز مارتنزیت را دارد. العباسی فرض نمود فازهای مارتنزیت به صورت کروی یا استوانه‌ای شکل در داخل فاز فریت پراکنده شده‌اند. مطالعات العباسی نشان داد که با افزایش درصد مارتنزیت، مدل‌های ارائه‌شده کرنش صفحه‌ای و تقارن محوری رفتار بسیار متفاوتی را از خود نشان می‌دهند. در حالت کرنش صفحه‌ای، کرنش سخت‌شوندگی بیش از حد پیش‌بینی شده است درحالی‌که در مدل تقارن محوری این رفتار مشاهده نمی‌شود. العباسی و همکارانش [۱۵] نشان دادند که هر دو مدل کرنش صفحه‌ای و تقارن محوری، برای درصد حجمی مارتنزیت پایین، رفتار تنش و کرنش مشابه‌ای را پیش‌بینی می‌کنند.

یانگ<sup>۱۸</sup> و گرانگ<sup>۱۹</sup> [۱۶] با استفاده از یک سلول واحد سه‌بعدی ساده و با توزیع تصادفی فازهای سخت و نرم به بررسی رفتار مکانیکی ماده دوفازی مورد نظر پرداختند. آنها همچنین در این بررسی، با استفاده از مدل ارائه‌شده، اثر درصد حجمی فاز سخت بر رفتار ماده را بررسی نمودند. کداخداپور و همکارانش [۱۷] با فرض آنکه خواص سطح مشترک بین دو فاز فریت و مارتنزیت متفاوت با خواص هر یک از دو فاز می‌باشد، به بررسی مدل تقارن محوری همراه با مدل‌سازی سطح مشترک این دوفاز به صورت لایه‌چینی‌هایی با خواص مختلف پرداختند. رضانی و همکارانش [۳] به بررسی اثر توزیع فاز مارتنزیت

اجزای تشکیل‌دهنده کامپوزیت‌ها بر رفتار مکانیکی آن‌ها پرداخته‌اند که نشان دادند، رفتار سفت‌شوندگی این نوع از مواد ناشی از رشد و انتشار باندهای برشی<sup>۱</sup> محلی است.

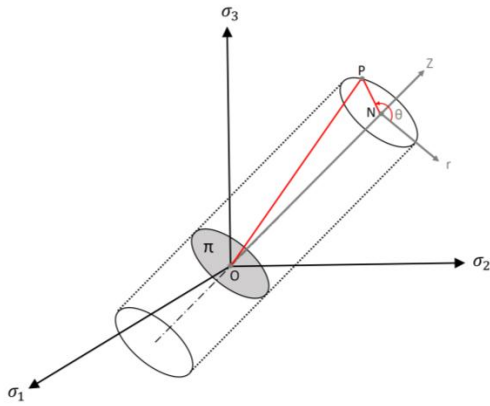
لیم<sup>۲</sup> و همکارانش [۸] مدلی را بر اساس نابجایی<sup>۳</sup> و با در نظر گرفتن اثرات دانه‌ها و مرز دانه‌ها، به منظور مدل‌سازی تغییر شکل پلی کریستال<sup>۴</sup> فازها ارائه نمودند. پائول<sup>۵</sup> [۹] برای پیش‌بینی رفتار فولاد دی‌پی<sup>۶</sup> ۶۰۰ و بررسی کرنش پلاستیک محلی<sup>۷</sup> در فولادهای دوفازی، از مدل‌های میکرومکانیکی دوبعدی کرنش صفحه‌ای و سه‌بعدی استفاده نمود، که فازهای مارتنزیت به صورت تصادفی در آن پخش شده‌اند. پائول برای مدل‌های خود از شرایط مرزی رایج در مدل‌های میکرومکانیکی استفاده نکرد، با این حال نشان داد که این مدل‌ها می‌توانند رفتار ماکرومکانیکی فولاد دوفازی تحت حالت کشش را به خوبی پیش‌بینی نمایند.

کیم<sup>۸</sup> و همکارانش [۱۰] با استفاده از مدل‌سازی واقعی ریزساختار، به بررسی تأثیر ریزساختار در عملیات شکل‌دهی با استفاده از دو ریزساختار متفاوت پرداختند. آنها مشاهده کردند که نتایج تجربی و عددی هر دو نشان‌دهنده تأثیر ریزساختار بر عملیات شکل‌دهی می‌باشد. سان<sup>۹</sup> و همکارانش [۱۱] از مدل میکرومکانیکی دوبعدی با ساختار واقعی برای پیش‌بینی رفتار ماکرومکانیکی فولاد دوفازی دی‌پی ۹۸۰ استفاده نمودند. اگر چه آنها از شرایط مرزی مبتنی بر سلول واحد استفاده نکرده‌اند ولی مدل ارائه‌شده در پیش‌بینی مودهای شکست و رفتار نرم‌شوندگی فولادهای دوفازی همراه با تغییر شکل‌های پلاستیک، نسبتاً موفق بوده است. با این حال، تامسر<sup>۱۰</sup> نشان داد که منحنی‌های تنش-کرنش پیش‌بینی‌شده به وسیله مدل‌های میکرومکانیک دوبعدی، مقادیر کمتری را پیش‌بینی می‌کنند [۴].

به منظور بهبود نتایج مدل‌سازی عددی، مدل‌های میکرومکانیکی سه‌بعدی توسط چندین محقق ارائه گردید. از این رو تورگارد<sup>۱۱</sup> [۱۲]

- 1 Shear bands
- 2 Lim
- 3 Dislocation
- 4 Polycrystal
- 5 Paul
- 6 DP
- 7 Local plastic strain
- 8 Kim
- 9 Sun
- 10 Thomser
- 11 Tvergaard

- 12 Stacked hexagonal array
- 13 Huang
- 14 Kinloch
- 15 Danielsson
- 16 Martensite volume fraction
- 17 Al-Abbasi
- 18 Iung
- 19 Grange



شکل ۱. بردارهای تنش ( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ) در فضای های-وسترگارد و مختصات استوانه‌ای ( $r, \theta, z$ ).  
**Fig. 1. Stress vector ( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ) in Haigh-Westergaard space and cylindrical coordinates ( $r, \theta, z$ ).**

در طول بارگذاری ارزیابی داده شده است. همچنین اثر پارامترهای حالت تنش بر میزان کرنش پلاستیک معادل محلی در فاز فریت در لحظه شکست هر یک از نمونه‌ها بررسی شده و نتایج به صورت یک رویه سه‌بعدی نشان داده است.

## ۲- حالت تنش

در مختصات فضایی، موقعیت تنش را می‌توان با شش مولفه تنش ( $\sigma_{ij}$ ) بیان نمود و یا با تبدیل نمودن آن‌ها به تنش‌های اصلی، موقعیت منحصره‌فرد یک تنش را با سه مؤلفه تنش‌های اصلی  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  نشان داد. در شکل ۱ راستای تنش‌های اصلی در مختصات کارترین نشان داده شده است. حال اگر موقعیت تنش را از سیستم مختصات کارترین به سیستم استوانه‌ای ( $r, \theta, z$ )، که در شکل ۱ نشان داده شده است تبدیل نماییم، محور  $z$ ، محور هیدرواستاتیک نامیده می‌شود، راستایی که همه تنش‌های اصلی برابر هستند. صفحه‌ای که از میان مبدأ  $O$  گذشته و عمود بر محور  $z$  است، صفحه  $\pi$  نامیده می‌شود [۲۱].

با فرض آنکه نقطه  $P$ ، موقعیت تنش مورد نظر باشد، بردار، نشان‌دهنده بردار تنش معادل می‌باشد که در سیستم مختصات استوانه‌ای بردار تنش  $\overline{OP}$  می‌تواند با دو مولفه  $\overline{ON}$  (مولفه هیدرواستاتیک) و  $\overline{NP}$  (مولفه انحرافی) نشان داد که اندازه بردار  $\overline{ON}$  به صورت رابطه (۱)، با تنش هیدرواستاتیک رابطه خطی دارد [۲۱].

$$|\overline{ON}| = \sqrt{3}\sigma_m \quad (1)$$

بر رفتار مکانیکی فولاد دوفازی با استفاده از مدل‌سازی دوبعدی میکرومکانیکی پرداختند. آن‌ها در این مطالعه، دو نوع توزیع فاز مارتنزیت، به صورت لایه‌ای و پراکنده را بررسی نمودند. بررسی‌های آن‌ها نشان داد که رفتار ماکرومکانیکی فولادهای دوفازی با این دو نوع توزیع فاز مارتنزیت، تفاوت بسیار ناچیزی با یکدیگر دارند، که این امر نشان‌دهنده آن است که توزیع فاز مارتنزیت تأثیر ناچیزی بر روی رفتار سخت‌شوندگی فولادهای دوفازی دارد.

اوتایسانسوک<sup>۱</sup> [۱۸] یک مدل سلول واحد سه‌بعدی واقعی گرفته‌شده از یک تصویر نوری را مدل نمود. برای این هدف او تصاویر نوری از فولاد دوفازی تا عمق ۶ میکرومتر را تصویربرداری نمود و با یک مدل سلول واحد سه‌بعدی با استفاده از المان‌های آجری سه‌بعدی با ۸ گره، مدلسازی نمود. او همچنین از این مدل برای مدل‌سازی میکرومکانیکی فولادهای سه‌فازی استفاده نمود. چلوئی و همکاران [۱۹-۲۰] یک مدل سه‌بعدی با استفاده از توزیع آماری فازهای مارتنزیت در راستای عمق مدل سه‌بعدی، با در نظر گرفتن اندازه دانه و درصد حجم مارتنزیت را پیشنهاد دادند. آن‌ها همچنین به بررسی آزمایشگاهی چگونگی شکل‌گیری و رشد باندهای برشی در فولادهای دوفازی با استفاده از آزمون‌های در لحظه<sup>۲</sup> پرداختند. در این بررسی نمونه‌های تست کشش ساده تحت بار قرار گرفته و سپس برای بررسی تصاویر میکروسکوپی درون دستگاه اس‌ای‌ام<sup>۳</sup> قرار گرفته است. نتایج بدست‌آمده با مدل‌های میکرومکانیکی دوبعدی و سه‌بعدی مقایسه شده‌اند.

تاکنون بررسی‌های صورت‌گرفته در ابعاد میکرو، مربوط به بارگذاری کشش تک محوری بوده است و توانایی مدل میکرومکانیکی بر پیش‌بینی ماده تحت حالت‌های مختلف تنش بررسی نشده است. در این مقاله آزمون‌های تجربی تحت حالت‌های مختلف تنش انجام شده است و سپس سعی شده است که با استفاده از مدل میکرومکانیکی ارتباطی بین مدلسازی در ابعاد میکرو و ماکرو و نتایج آزمون تجربی استخراج شود و توانایی مدل عددی میکرومکانیک در پیش‌بینی نتایج تجربی ارزیابی شود. سپس به بررسی نسبت سهم‌بندی تنش و کرنش در بین فازها در حالت‌های مختلف تنش پرداخته شده است و تغییرات این مولفه نسبت به پارامترهای زاویه لود و سهم‌محوری تنش

1 Uthaisangsuk  
 2 In-situ  
 3 SEM

جدول ۱. ترکیب شیمیایی فولاد تجاری دی پی ۶۰۰ بر حسب درصد وزنی

Table 1. Chemical compositions of commercial DP600 based on mass content

Fe	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Al	Mo	Cu	عنصر
۹۷/۴۸۴	۰/۰۸۶	۱/۸۲	۰/۲۱	۰/۰۱	۰/۰۰۳	۰/۳	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۰۱	۰/۰۱۶	درصد وزنی

صورت مولفه‌ای بدون بعد لود ( $\xi$ ) تعریف شده است که در این مقاله مشابه مرجع [۲۱]، مولفه لود به صورت رابطه (۴) در نظر گرفته شده است.

$$\xi = \frac{27 J_3}{2 \sigma^3} = \frac{3\sqrt{3} J_3}{2 J_2^{3/2}} = \cos(3\theta) \quad (4)$$

که مولفه‌های  $J_2$  و  $J_3$  به ترتیب نامتغیرهای دوم و سوم تنش انحرافی می‌باشند.

به طور کلی با استفاده از سه مولفه  $\sigma_{eq}$ ،  $\eta$  و  $\zeta$  می‌توان موقعیت منحصر به فرد یک نقطه مادی تنش در فضا را توصیف نمود. در این توصیف، تنش معادل، نشان‌دهنده اندازه بردار تنش و پارامتر سه‌محوری تنش  $\eta$  مربوط به نامتغیرهای تنش  $I_1$  و  $I_2$  می‌باشند. همچنین پارامتر زاویه لود  $\xi$  به وسیله پارامترهای  $I_2$  و  $I_3$  فرمول‌بندی شده‌اند که جهت بردار ثابت تنش را در فضای‌های وسترگارد<sup>۴</sup> توصیف می‌کند.

### ۳- آزمون‌های تجربی

در این مقاله به منظور بررسی رفتار شکست تحت حالت‌های مختلف تنش از فولاد دوفازی فریتی-مارتنزیتی با استحکام بالا استفاده شده است. این فولاد با نام تجاری دی پی ۶۰۰ به صورت ورق بوده و دارای ضخامت ۱/۵ میلی‌متر می‌باشد. ترکیب شیمیایی فولاد مورد

که مولفه  $\sigma_m$ ، تنش هیدرواستاتیک است و اندازه بردار  $\overline{NP}$  با تنش معادل رابطه خطی دارد به صورت زیر تعریف می‌شود.

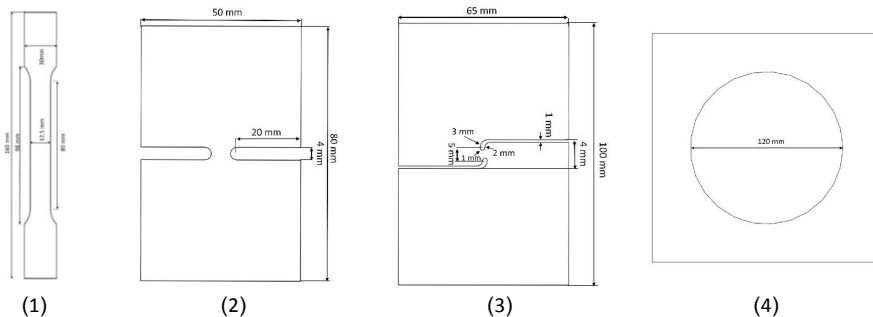
$$|NP| = \sqrt{\frac{2}{3}} \sigma_{eq} \quad (2)$$

که  $\sigma_{eq}$ ، تنش معادل فون میسز<sup>۱</sup> است.

بسیاری از محققان مولفه‌ای بدون بعد را به صورت نسبت تنش هیدرواستاتیک به تنش معادل به صورت رابطه (۳)، به عنوان مولفه سه‌محوری<sup>۲</sup> تنش تعریف نموده‌اند که امکان مقایسه پارامتری در بین حالت‌های مختلف تنش را فراهم می‌کند. با داشتن مقدار تنش معادل و پارامتر بدون بعد سه‌محوری تنش، می‌توان موقعیت صفحه عمود بر تنش هیدرواستاتیک را مشخص نمود.

$$\eta = \frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} \quad (3)$$

سومین مولفه که باعث ایجاد تمایز حالت تنش در برش، کشش و فشار در صفحه  $\pi$  می‌شود، مولفه بدون بعد زاویه لود<sup>۳</sup> ( $\theta$ ) می‌باشد که تعاریف متفاوتی برای آن توسط محققان بیان شده است. در مراجع [۲۲-۲۴] زاویه بین محور  $\sigma_1 = -\sigma_3$  و موقعیت تنش، جهت مثبت زاویه لود تعریف شده است. در مراجع [۲۵-۲۸] زاویه لود در راستای محور  $\sigma_1$  مثبت در نظر گرفته شده است که در این مقاله نیز استفاده شده است. مولفه لود توسط محققان به صورت زاویه لود ( $\theta$ ) و یا به



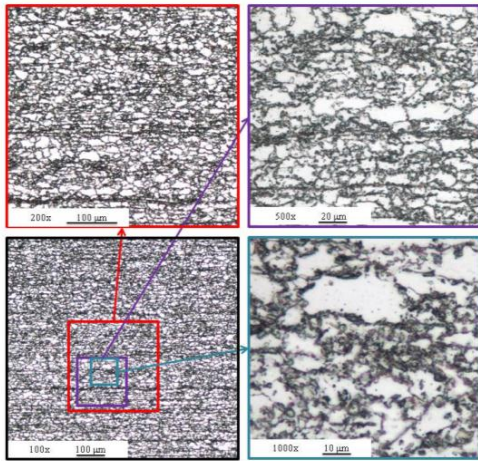
شکل ۲. هندسه نمونه‌های آزمون تجربی تحت حالت‌های مختلف تنش، (۱) کشش، (۲) ناچ‌دار، (۳) برش و (۴) بالج

Fig.2. Geometries of specimens under different stress states, (1) tensile, (2) notched, (3) shear and (4) bulge

- 1 Von mises
- 2 Triaxiality
- 3 Lode angle

4 Haigh-Westergaard





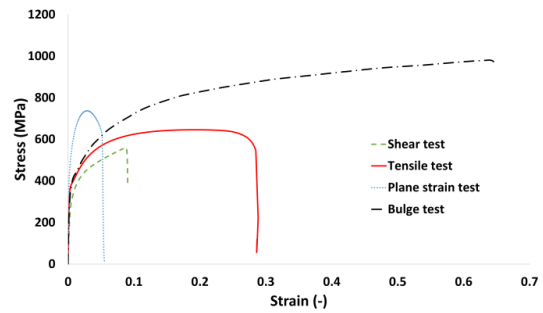
شکل ۴. تصاویر ریزساختاری فولاد دی پی ۶۰۰ با بزرگنمایی‌های مختلف  
**Fig. 4. Microstructures of DP600 steel with different magnifications**

نشان‌دهنده فاز مارتنزیت می‌باشند. سپس از نرم‌افزار تجاری متلب<sup>۳</sup> به منظور محاسبه درصد سطحی هر یک از تصاویر ریزساختاری استفاده گردید. در این روش، با استفاده از مقادیر ارجحی بی هر یک از رنگ‌ها در تکنیک‌های پردازش تصویر، تصاویر پردازش شده و با مطابقت نتایج پردازش تصویر با تصاویر اصلی ریزساختار، مقدار درصد حجمی در هر یک از تصاویر محاسبه گردید. به منظور افزایش دقت محاسبه درصد سطحی مارتنزیت، این فرآیند برای ۲۰ تصویر با بزرگنمایی‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفت و در نهایت مقدار میانگین درصد حجمی ۳۳٪ برای فاز مارتنزیت بدست آمد.

#### ۴- مدل‌سازی عددی

##### ۴-۱- محاسبه مولفه‌های حالت تنش

از آنجایی که مولفه‌های حالت تنش (لود و سه محوری تنش) در طول بارگذاری متغیر می‌باشند، بای و ویرزیبکی [۲۸-۲۹] از روش میانگین وزنی به منظور محاسبه مقدار میانگین هر یک مولفه‌های حالت تنش استفاده نمودند. آن‌ها با استفاده از شبیه‌سازی ماکرومکانیک به بررسی تاریخچه تنش در طول براگذاری پرداختند و سپس با استفاده از روش میانگین وزنی، مقادیر میانگین هر یک از مولفه‌های تنش را محاسبه نمود. نتایج ارائه شده در مراجع [۲۸-۲۹]، نشان می‌دهد که روش بکارگرفته شده دارای دقت قابل قبولی می‌باشند. بای و ویرزیبکی [۲۸-۲۹] مفهوم مولفه‌های میانگین سه محوری تنش و میانگین زاویه



شکل ۳. منحنی‌های تنش- کرنش بدست آمده از آزمون تجربی  
**Fig. 3. the obtained stress-strain curves from expermental tests**

استفاده در این مقاله، در جدول ۱ نشان داده شده است.

#### ۳-۱- آزمون‌های مکانیکی

به منظور بررسی رفتار تنش-کرنش تحت حالت‌های مختلف تنش، ۴ نمونه تست کشش تحت حالت‌های مختلف تنش طبق استاندارد دین ایزو ۶۸۹۲ تهیه گردیده و در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. نمونه‌ها با استفاده از دستگاه تست کشش ام‌تی‌اس ۶۵/ج مربوط به شرکت آلمانی سینتک<sup>۱</sup> و با نرخ کرنش ۰/۰۱ (میلیمتر بر ثانیه) تحت بارکششی قرار گرفته‌اند. برای اندازه‌گیری کرنش از کرنش‌سنج<sup>۲</sup> با اندازه سنجه ۲۵ میلی‌متر و با دقت ۰/۵ میکرومتر استفاده شده است. آزمایش بر روی هر یک از هندسه‌ها ۶ مرتبه تکرار شده است و مقادیر میانگین منحنی تنش و کرنش مهندسی در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. حداکثر مقادیر خطای تکرار برای آزمون‌های کشش، ناچ‌دار، برش و بالچ به ترتیب ۳٪، ۳/۵٪، ۴٪ و ۳/۸٪ می‌باشند.

#### ۳-۲- متالوگرافی

به منظور مدل‌سازی ریزساختاری ماده با استفاده از مدل‌های میکرومکانیکی، نیاز است مطالعات دقیقی بر روی چیدمان و درصد حجمی فازهای تشکیل‌دهنده صورت گیرد. در این بخش با استفاده از میکروسکوپ نوری تصاویری با بزرگنمایی‌های مختلف از سطح ماده استخراج شده است. در شکل ۴ تصاویر ریزساختاری فولاد مورد استفاده در این مقاله با بزرگنمایی‌های مختلف نشان داده شده است که فازهای سفید رنگ نشان‌دهنده فاز فریت و فازهای سیاه رنگ

1 Sintech  
 2 Extensometer

3 Matlab

**جدول ۲. مقادیر میانگین مولفه‌های حالت تنش در نمونه‌های مختلف**  
**Table 2. The average value of stress states parameters for different specimens**

نمونه	سه محوری تنش میانگین ( $\xi_{av}$ )	سه محوری تنش میانگین ( $\eta_{av}$ )
کشش	۰/۹۹۵	۰/۳۴۰
برش	۰/۰۲۰	۰/۰۱۵
ناچ‌دار	۰/۵۰۰	۰/۵۷۰
بالج	-۰/۹۹۴	۰/۶۵۸

لود به ترتیب به صورت رابطه (۵) و رابطه (۶) بیان نمودند.

$$\eta_{av} = \frac{1}{\epsilon_f} \int_0^{\bar{\epsilon}_f} \eta(\bar{\epsilon}_p) d\bar{\epsilon}_f \quad (5)$$

$$\xi_{av} = \frac{1}{\epsilon_f} \int_0^{\bar{\epsilon}_f} \xi(\bar{\epsilon}_p) d\bar{\epsilon}_f \quad (6)$$

که  $\epsilon_p$  و  $\epsilon_f$  به ترتیب مقادیر کرنش پلاستیک محلی در هر نمو حل و در لحظه شکست می‌باشند [۲۸-۲۹]. در این مقاله از مولفه‌های میانگین حالت تنش استفاده شده است که مقادیر هر یک از مولفه‌های سه‌محوری تنش و لود با استفاده از شبیه‌سازی عددی ماکرومکانیک و رابطه (۳) و رابطه (۴) در هر نمو حل محاسبه گردیده و سپس با استفاده از رابطه (۵) و رابطه (۶) مقادیر میانگین این مولفه‌ها بدست‌آمده که در جدول ۲ نشان داده شده‌اند.

#### ۲-۴-۲- مدل‌سازی میکرومکانیکی

##### ۲-۴-۱- المان حجمی نماینده

فولادهای دوفازی دارای ساختارهای فریتی-مارتنزیتی می‌باشند و به همین دلیل در مطالعات رفتاری این فولاد در ابعاد میکرو، دیگر فرض همگن بودن رفتار ماده معتبر نمی‌باشد. در تحلیل‌های میکرومکانیک، یک المان حجمی نماینده براساس ریزساختار واقعی ماده، باید دارای خصوصیات ریزساختاری مشابهی (مانند: درصد حجمی فازها، شکل و اندازه فازها و نوع پراکندگی فازها) با فولاد مورد نظر باشد. بدین ترتیب، المان حجمی نماینده مورد نظر در این مقاله، باید بتواند مشخصات ظاهری و درصد حجمی فازها که در شکل ۴ نشان داده شده است را پوشش دهد.

##### ۲-۴-۲- مدل‌سازی میکرومکانیکی سه‌بعدی

در روش مدل‌سازی میکرومکانیکی مورد استفاده در این مقاله، ابتدا

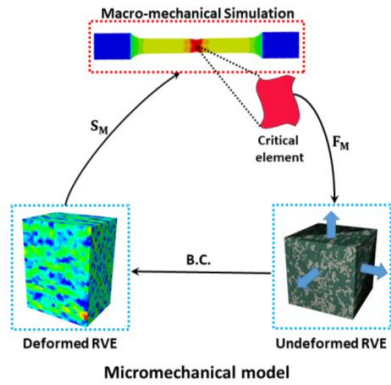
تصاویر ریزساختاری بدست آمده در بخش ۲-۳، با استفاده از کد پردازش تصویر، براساس مقادیر ارجحی‌بی هر یک از رنگ‌ها، در نرم‌افزار متلب پردازش می‌گردد. در این روش ابتدا مقادیر ارجحی‌بی رنگ هر یک از پیکسل‌های موجود در عکس بدست‌آمده و سپس مقدار ارجحی‌بی صفر (رنگ سیاه) برای فاز مارتنزیت و مقدار ارجحی‌بی ۲۵۵ (رنگ سفید) برای فاز فریت در نظر گرفته می‌شود. همچنین با تعریف مولفه حد آستانه، رنگ‌های مابین این دو عدد با توجه به کنترل درصد سطحی فاز مارتنزیت، به یکی از فازها تبدیل می‌گردد. سپس خروجی پردازش تصویر به صورت عددهای صفر و ۲۵۵ با استفاده از کد پایتون رابط در نرم‌افزار آباکوس<sup>۱</sup> تبدیل به مدل میکرومکانیکی سه بعدی گردیده است. در این روش هر یک از اعداد نماینده یک المان می‌باشد که اعداد صفر و ۲۵۵ به ترتیب نماینده المان‌هایی با خواص مارتنزیت و فریت می‌باشند. به دلیل عدم دسترسی به تصاویر در راستای عمق ماده، همانند مراجع [۱۹-۲۰]، از روش تولید ریزساختارهای مصنوعی به صورت توزیع رندم فازهای مارتنزیت استفاده شده است. در این روش، با استفاده از ریزساختار اولیه و با در نظر گرفتن اندازه میانگین فازها، ریز ساختار به بخش‌های مختلف تقسیم شده و در راستای عمق اروی‌ای<sup>۲</sup> به صورت رندم پخش می‌شود. در این روش به دلیل استفاده از ریزساختار اولیه، درصد سطحی تمامی لایه‌ها ثابت بوده و در نهایت درصد حجمی کل مدل با درصد سطحی ریزساختار اولیه برابر می‌باشد. در نهایت به اتصال کامل لایه‌های ایجادشده مدل سه‌بعدی با توزیع رندم تولید می‌شود.

##### ۲-۴-۳- خواص فازها

تاکنون مطالعات بسیاری به منظور محاسبه خواص فازهای فولادهای چندفازی صورت گرفته است. یکی از پرکاربردین تئوری‌های محاسبه خواص فازهای فولاد، تئوری کرنش سختی براساس نابجایی می‌باشد که در قالب یک رابطه تجربی توسط رودریگز<sup>۳</sup> و همکارانش [۳۰] ارائه شده است. در این مطالعه، به منظور محاسبه منحنی تنش-کرنش هر یک از فازهای فریت و مارتنزیت، از رابطه تجربی زیر استفاده شده است.

$$\sigma = \sigma_0 + \Delta\sigma + \alpha.M.\mu.\sqrt{b}.\sqrt{\frac{1 - \exp(-M.k.\epsilon)}{k.L}} \quad (7)$$

- 1 Abaqus
- 2 RVE
- 3 Rodriguez



شکل ۶. تصویر شماتیک استخراج شرایط مرزی از شبیه‌سازی ماکرو به میکرو  
**Fig. 6. Schematic of the extraction of boundary condition from macro to micro simulation**

هر مدول برشی،  $b$  بردار برگر،  $L$  اندازه متوسط مسیر نابجایی و  $k$  ضریب بهبود است. مقادیر پارامترهای  $L$  و  $k$  به ترتیب دارای رابطه مستقیم و عکس با اندازه دانه فریت هستند و برای فاز مارتنزیت این دو پارامتر دارای مقادیر ثابتی هستند [۳۱] در جدول ۳، مقادیر پارامترهای مورد نیاز در رابطه (۷) برای محاسبه منحنی تنش-کرنش هر یک از فازهای فریت و مارتنزیت نشان داده شده است. در شکل ۵ منحنی بدست‌آمده با استفاده از رابطه تجربی رودریگز و مولفه‌های بدست‌آمده در جدول ۳ نشان داده می‌شود.

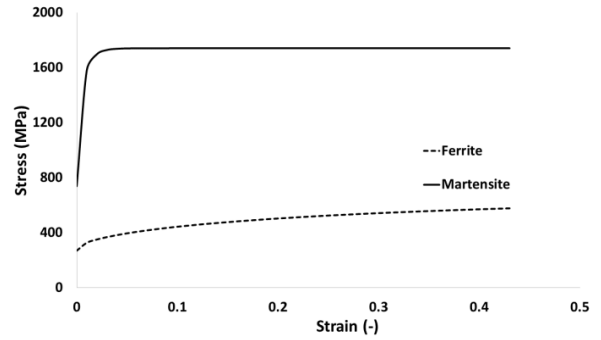
#### ۴-۲-۴- شرایط مرزی

هر سلول واحد، نماینده‌ی المانی از مدل ماکرو در حالت بارگذاری مورد نظر است. به عبارتی، شرایط مرزی مدل میکرومکانیک با استفاده از تغییر شکل اعمالی به المان بحرانی در طول بارگذاری در مدل ماکرومکانیک بدست می‌آید. در شکل ۶ تصویر شماتیک ارتباط مدل ماکرو و میکرو نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، میزان گرادیان تغییر شکل المان بحرانی در مدل ماکرومکانیک ( $F_M$ ) محاسبه شده و سپس شرایط مرزی وارد به آرویی، به صورت رابطه ۱۱ محاسبه می‌شود که توسط کوزنتسوا<sup>۲</sup>

جدول ۳. مقادیر مولفه‌های رابطه تجربی رودریگز

**Table 3. The parameters of Rodriguez empercial relationship**

$\sigma_0$ (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\alpha$ [۳۱] (-)	$M$ (-)[۳۱]	$b$ (m) [۳۱]	$\mu$ (MPa) [۳۱]	$L$ (m) [۳۱]	$k$ (-) [۳۱]	فاز
۲۴۵/۲۱	۲۵	۰/۳۳	۳	$۲/۵ \times 10^{-۱۰}$	۸۰۰۰۰	$۱۰ \times 10^{-۶}$	۱	فریت
۲۶۱/۰۹	۴۷۴/۹۹	۰/۳۳	۳	$۲/۵ \times 10^{-۱۰}$	۸۰۰۰۰	$۸ \times 10^{-۸}$	۴۱	مارتنزیت



شکل ۵. منحنی تنش-کرنش ناحیه پلاستیک فازهای فریت و مارتنزیت  
**Fig. 5. Flow curves for ferrite and martensite phases**

که  $\sigma$  تنش پیرلز<sup>۱</sup> است که وابسته به ترکیبات شیمیایی بوده و با استفاده از رابطه تجربی زیر بدست می‌آید.

$$\sigma_0 = 77 + 80 \cdot (\% \text{Mn}) + 750 \cdot (\% \text{p}) + 80 \cdot (\% \text{Cu}) + 60 \cdot (\% \text{Si}) + 45 \cdot (\% \text{Ni}) + 11 \cdot (\% \text{Mo}) + 60 \cdot (\% \text{Cr}) + 5000 \cdot (N_{ss}) \quad (۸)$$

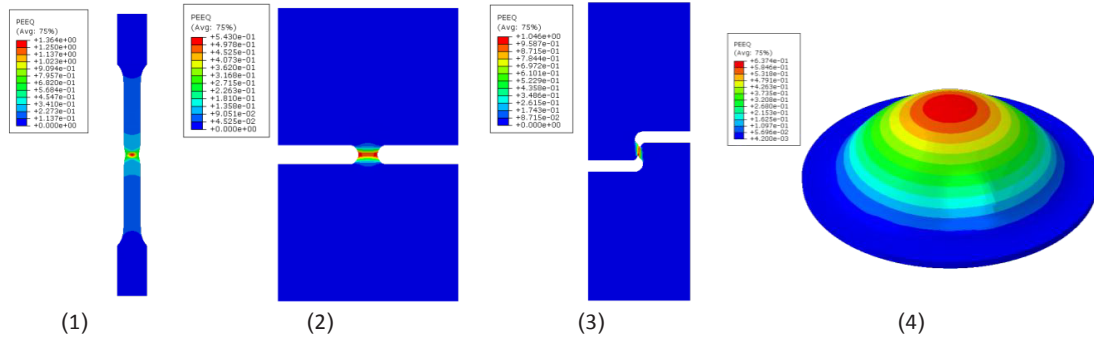
که در آن  $N_{ss}$  محلول جامد نیتروژن است و دیگر پارامترها نشان‌دهنده درصد وزنی هر یک از عناصر شیمیایی موجود در فولاد دوفازی می‌باشند. پارامتر  $\Delta\sigma$  در رابطه (۷)، معرف استحکام تخمین‌زده شده برای فازهای فریت و مارتنزیت می‌باشد که به ترتیب به صورت رابطه (۹) و رابطه (۱۰) تعریف می‌شوند [۳۰].

$$\Delta\sigma(\text{MPa}) = 5000 \times (\% C_{ss}^f) \quad (۹)$$

$$\Delta\sigma(\text{MPa}) = 3065 \times (\% C_{ss}^m) - 161 \quad (۱۰)$$

که  $\% C_{ss}^f$  و  $\% C_{ss}^m$  به ترتیب درصد وزنی کربن در هر یک از فازهای فریت و مارتنزیت می‌باشند.

عبارت سوم در رابطه (۷)، مربوط به اثر استحکام ناشی از نابجایی است که در این رابطه،  $\alpha$  یک ثابت مادی می‌باشد.  $M$  ضریب تیلور،



شکل ۷. توزیع کرنش معادل محلی در لحظه شکست در هندسه‌های مختلف: (۱) کشش، (۲) ناچ‌دار، (۳) برش، و (۴) بالج

Fig. 7. The distribution of local equivalent plastic strain at fracture point in different specimens, (1) tensile, (2) notched, (3) shear, and (4) bulge

ارتباطی بین تانسور تنش  $(S_M)$  و کرنش  $(F_M)$  در ابعاد ماکرو با مقادیر تانسور تنش  $(S_m)$  و کرنش  $(F_m)$  در ابعاد میکرو تعریف نمود. بدین منظور، در این مقاله از روش همگن‌سازی حجمی مرتبه اول استفاده شده است که اولین بار توسط هیل [۳۴] پیشنهاد شد. رابطه (۱۲) و رابطه (۱۳) به ترتیب روش محاسبه مقادیر تانسور تنش  $(S_M)$  و کرنش  $(F_M)$  همگن‌شده در آروی‌ای را نشان می‌دهند. در این روابط مقدار تانسور تنش و کرنش همگن شده برابر است با میزان میانگین حجمی تانسور تنش و کرنش آروی‌ای در طول بارگذاری.

$$S_M = \frac{1}{V_{tot}} \int_{V_{tot}} S_m dV_0 \quad (12)$$

$$F_M = \frac{1}{V_{tot}} \int_{V_{tot}} F_m dV_0 \quad (13)$$

[۳۲] اثبات گردید. در این رابطه بردار موقعیت لحظه‌ای گره‌ها  $(\vec{X})$  نسبت به گرادیان تغییر شکل ماکرو و بردار موقعیت اولیه گره‌ها  $(\vec{X}_0)$  بیان می‌شود. بدین منظور، در این مقاله، با استفاده از مدل اجزاء محدود ماکرو، میزان گرادیان تغییر شکل  $(F_M)$ ، بر روی المان مورد نظر از مدل ماکرو استخراج گردید و سپس شرایط مرزی طبق رابطه ۱۱ برای مدل میکرومکانیک تحت بارگذاری‌های مختلف محاسبه می‌شود.

$$\vec{x} = F_M \cdot \vec{X}_0 \quad (11)$$

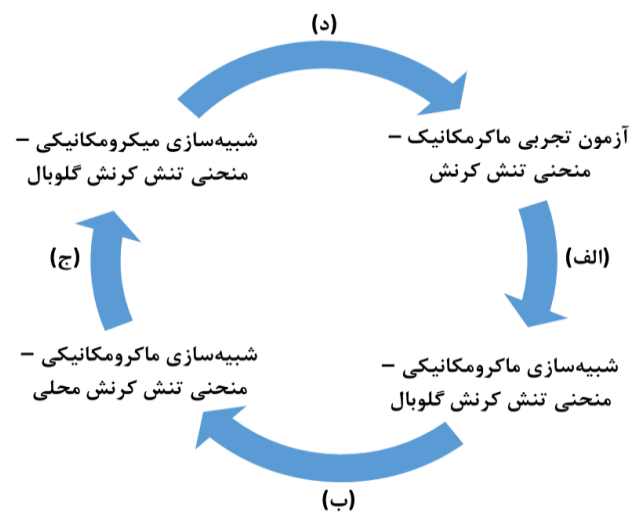
در شکل ۷ توزیع کرنش معادل در لحظه‌ی شکست تحت بارگذاری‌های مختلف نشان داده شده است که در مرجع [۳۳] صحت شبیه‌سازی با استفاده از آزمون تجربی آرامیس<sup>۱</sup> ارزیابی شده است. مقادیر کمی کرنش پلاستیک معادل محلی در ناحیه بحرانی در جدول ۴ نشان داده شده است که از نتایج تغییر شکل در مدل ماکرو، در محاسبه شرایط مرزی مدل میکرومکانیک استفاده خواهد شد.

#### ۴-۲-۵- همگن‌سازی

به منظور مقایسه نتایج مدل میکرو با نتایج مدل ماکرو، می‌بایست جدول ۴. مقادیر کرنش پلاستیک معادل شکست محلی

Table 4. The values of equivalent plastic strain at fracture point

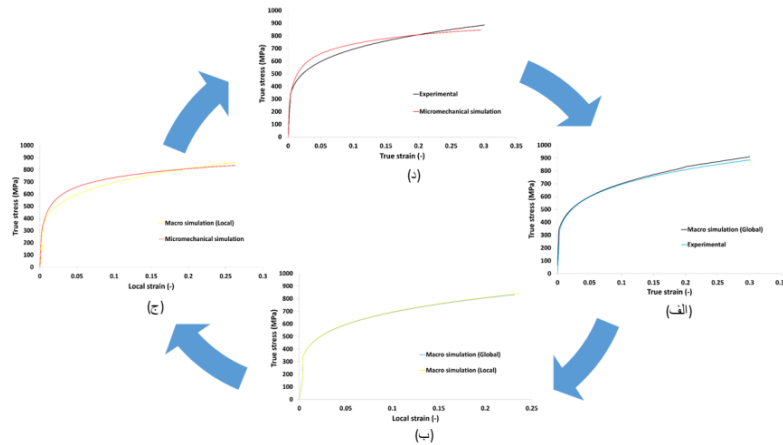
مقدار کرنش شکست محلی	نمونه آزمایشگاهی
۱/۴۰	کشش
۱/۰۵	برش
۰/۵۴	ناچ‌دار
۰/۶۶	بالج



شکل ۸. شماتیک ارتباط آزمون تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی در ابعاد مختلف

Fig. 8. Schematic of the relation between experiment and simulation in different scales

1 ARAMIS



شکل ۹. مقایسه نتایج آزمون تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی در ابعاد مختلف، (الف) مقایسه بین نتایج آزمون تجربی و نتایج گلوبال مدلسازی ماکرومکانیک، (ب) مقایسه بین نتایج نتایج گلوبال مدلسازی ماکرومکانیک و نتایج محلی مدلسازی ماکرومکانیک، (ج) مقایسه بین نتایج محلی مدلسازی ماکرومکانیک و نتایج ماکرومکانیک و نتایج همگن‌شده مدلسازی ماکرومکانیک، (د) مقایسه بین نتایج همگن‌شده مدلسازی ماکرومکانیک و نتایج آزمون تجربی.

**Fig. 9. Comparison on experimental results and simulation in different scales, (a) the comparison between experimental results and global macro model, (b) the comparison between global macro model and local macro model, (c) the comparison between local macro model and homogenized micro model, and (d) the comparison between homogenized micro model and experimental results**

می‌باشد. که  $V_0$ ،  $V_{tot}$  به ترتیب حجم کل سلول واحد و حجم هر المان در هر

نمو حل می‌باشند.

## ۵- نتایج و بحث

در شکل ۱۰ نتایج منحنی تنش-کرنش حقیقی آزمون تجربی تحت حالت‌های مختلف تنش با نتایج شبیه‌سازی میکرومکانیکی مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهند که مدل میکرومکانیکی به خوبی قادر است منحنی تنش کرنش حقیقی تحت حالت‌های مختلف تنش به غیر از تحت بارگذاری برشی را پیش‌بینی نماید. در شبیه‌سازی‌های صورت گرفته در این مقاله از مدل تسلیم فون میسر استفاده شده است. در مدل فون میسر از اثر تنش هیدرواستاتیک بر روی تسلیم صرف‌نظر شده است و تنش‌های انحرافی به عنوان علت تسلیم ماده معرفی می‌شوند، به همین دلیل این تابع تسلیم نمی‌تواند رفتار تسلیم ماده در مدل میکرومکانیکی تحت برش خالص را به خوبی پیش‌بینی نماید و تنش تسلیم پایین‌تری را برای ماده پیش‌بینی می‌نماید.

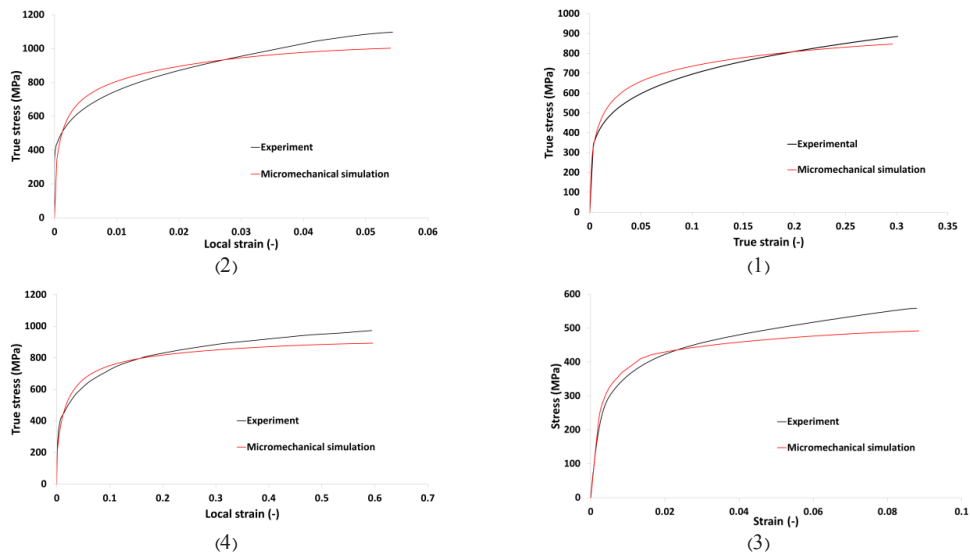
در مواد چند فازی، ترکیب فازها منجر به رفتار پیچیده ماده در میزان سهم هر یک از فازها از تنش و کرنش اعمالی می‌شود. محققان به منظور بررسی میزان سهم تنش و کرنش بین فازها در طول بارگذاری مکانیکی و حرارتی، مولفه نسبت سهم‌بندی تنش و کرنش را معرفی نموده‌اند که به صورت رابطه (۱۴) بیان می‌شود [۳۵] طبق این رابطه هرچه میزان این نسبت بیشتر باشد دو فاز تشکیل‌دهنده ماده

در این مقاله ابتدا سعی بر آن است که توانایی پیش‌بینی رفتار ماکرومکانیکی فولادهای دوفازی با استفاده از مدل میکرومکانیکی تحت حالت‌های بارگذاری مختلف، ارزیابی شود. در شکل ۸ شماتیک چگونگی ارتباط نتایج آزمایشگاهی با مدلسازی‌های عددی در ابعاد ماکرو و میکرو در چهار مرحله الف تا د نشان داده شده است. با کامل شدن حلقه ارتباط بین منحنی‌های تنش و کرنش بدست‌آمده، می‌توان نتایج همگن‌شده مدلسازی میکرومکانیکی را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه نمود. در شکل ۹ نتایج مقایسه‌های الف تا د نامبرده شده در شکل ۸، برای نمونه کششی نشان داده می‌شود. در جدول ۵ مقادیر خطا در مقایسه‌های الف تا د برای نمونه کشش برحسب مقادیر تنش نهایی پیش‌بینی‌شده، نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که ارتباط بسیار خوبی بین نتایج آزمون تجربی و نتایج شبیه‌سازی عددی در ابعاد میکرو و ماکرو برقرار است و تاییدکننده مقایسه نتایج مدلسازی میکرومکانیک با آزمون تجربی

**جدول ۵. میزان خطای مقایسه‌های الف تا د نشان‌داده‌شده در شکل ۹**

**Table 5. The value of error in different comparisons in Fig. 9**

مقایسه	الف	ب	ج	د
میزان خطا (%)	۲/۷	۰/۲	۴/۰	۴/۳



شکل ۱۰. مقایسه نتایج منحنی تنش- کرنش حقیق آزمون تجربی با مدل میکرومکانیکی تحت حالت‌های مختلف تنش، (۱) کشش، (۲) ناچ‌دار، (۳) برش و (۴) بالج.

Fig. 10. Comparison of the obtained stress-strain from experiments with the micro-mechanical model under different stress states, (1) tensile, (2) notched, (3) shear, and (4) bulge

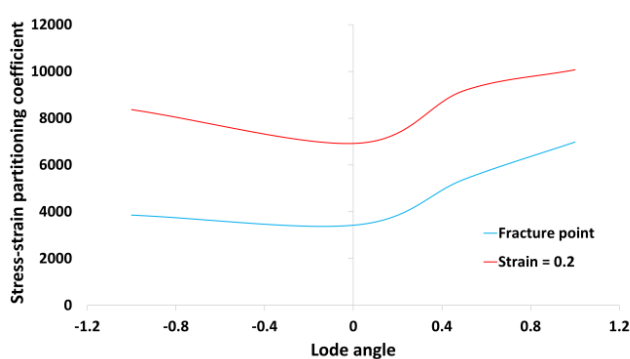
از دید سهم‌بندی کرنش، سهم مشابه‌تری خواهند داشت و هرچه این نسبت کمتر شود اختلاف این دوفاز در میزان سهم‌بندی کرنش بیشتر خواهد شد.

استفاده می‌گردد. در شکل ۱۱ و شکل ۱۲ نسبت سهم‌بندی تنش به کرنش، به ترتیب نسبت به پارامترهای سه‌محوری تنش و زاویه لود نشان داده شده است. نسبت‌های سهم‌بندی در دو نقطه کرنش ۰/۲ و در لحظه شکست مطالعه شده است. نتایج نشان می‌دهد الگوی تغییرات نسبت سهم‌بندی تنش به کرنش در مقادیر مختلف کرنش اعمالی به صورت تقریباً مشابه است. اما با افزایش بارگذاری میزان نسبت سهم‌بندی کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده افزایش اختلاف میان سهم هر یک از فازها از کرنش اعمالی می‌باشد. به عبارت دیگر با افزایش بارگذاری اختلاف سهم کرنش بین دو فاز افزایش می‌یابد. شکل ۱۱ نشان می‌دهد که مولفه سهم‌بندی نسبت به سه‌محوری تنش یک تابع درجه دو منفی می‌باشد که بیشترین میزان در حالت

از دید سهم‌بندی کرنش، سهم مشابه‌تری خواهند داشت و هرچه این نسبت کمتر شود اختلاف این دوفاز در میزان سهم‌بندی کرنش بیشتر خواهد شد.

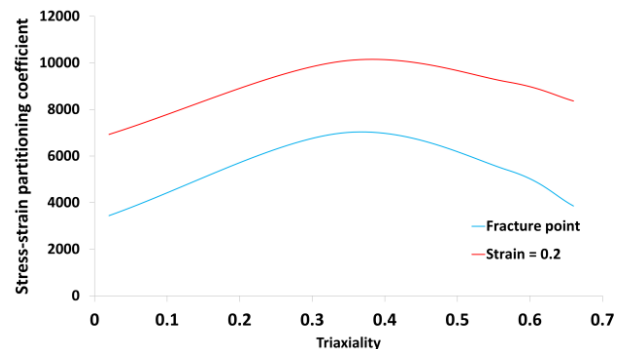
$$q = \frac{|S^m - S^f|}{|\varepsilon^m - \varepsilon^f|} \quad (14)$$

که مولفه‌های  $S$  و  $\varepsilon$  به ترتیب مربوط به مقادیر همگن تنش و کرنش در هر یک از فازهای فریت و مارتنزیت می‌باشند. با توجه به اثبات توانایی مدل میکرومکانیکی سه‌بعدی در پیش‌بینی رفتار ماکرومکانیکی ماده تحت حالت‌های مختلف تنش، در ادامه از این مدل به منظور بررسی میزان سهم‌بندی تنش و کرنش در حالت‌های مختلف بارگذاری



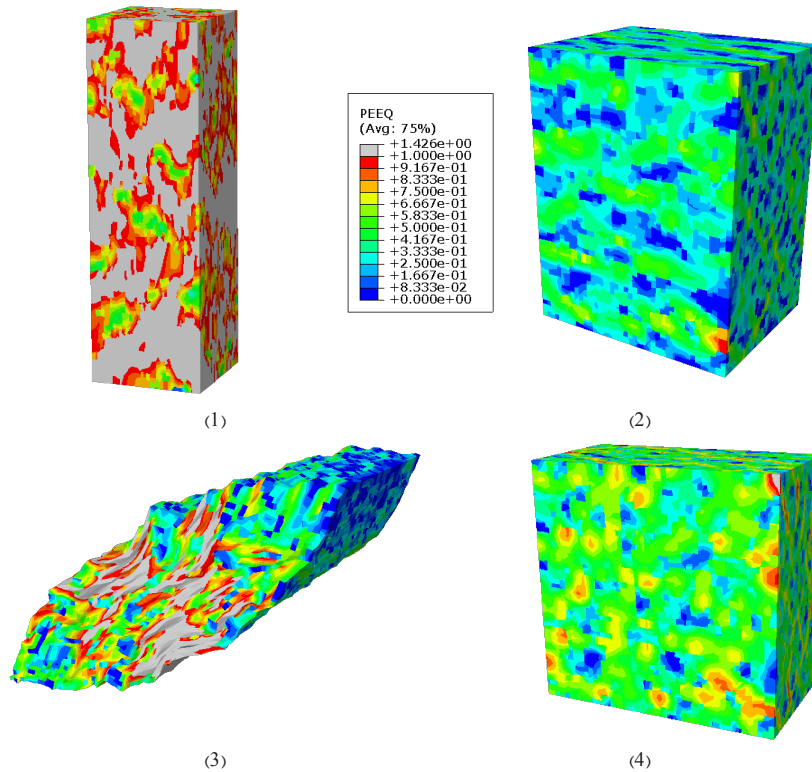
شکل ۱۲. تغییرات نسبت سهم‌بندی تنش و کرنش نسبت به زاویه لود

Fig. 12. The changes of stress-strain partitioning coefficient to Lode angle



شکل ۱۱. تغییرات نسبت سهم‌بندی تنش و کرنش نسبت به سه‌محوری تنش

Fig. 11. The changes of stress-strain partitioning coefficient to triaxiality



شکل ۱۳. توزیع کرنش پلاستیک معادل در حالت‌های مختلف بارگذاری در لحظه شکست، (۱) کشش، (۲) ناچ‌دار، (۳) برش، و (۴) بالج  
**Fig. 13. The distribution of equivalent plastic strain under different stress states at fracture point, (1) tensile, (2) notched, (3) shear, and (4) bulge**

تحت حالت‌های مختلف تنش یکسان نیست و کاملاً وابسته به حالت تنش می‌باشد.

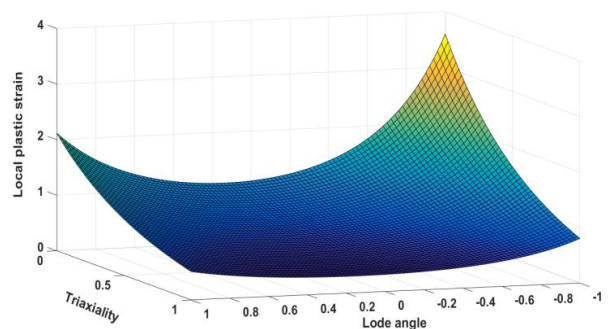
$$\bar{\varepsilon}_f = \left[ \frac{1}{2} (D_1 e^{-D_2 \eta} + D_5 e^{-D_6 \eta}) - D_3 e^{-D_4 \eta} \right] \bar{\theta}^2 + \frac{1}{2} (D_1 e^{-D_2 \eta} + D_5 e^{-D_6 \eta}) \bar{\theta} + D_3 e^{-D_4 \eta} \quad (15)$$

که  $\bar{\varepsilon}_f$  کرنش محلی در لحظه شکست و  $\bar{\theta}$  و  $\eta$  به ترتیب مولفه‌های زاویه لود و سهم‌محوری تنش می‌باشند. پارامترهای  $D_1$ ،  $D_2$ ،  $D_3$ ،  $D_4$ ،  $D_5$  و  $D_6$  پارامترهای مادی می‌باشند.

در شکل ۱۳ میزان توزیع کرنش در لحظه شکست برای هر یک از بارگذاری‌ها نشان داده شده است که مشابه نتایج بای و پیرزبیکي [۲۸-۲۹]، مقادیر متفاوتی از کرنش محلی برای هر یک از بارگذاری‌ها مشاهده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که میزان تحمل کرنش پلاستیک معادل در حالت کشش نسبت مابقی حالت‌های تنش بیشتر است و بعد از آن بارگذاری برشی، دومحوری و نمونه ناچ‌دار به ترتیب دارای کمترین میزان تحمل کرنش پلاستیک معادل در لحظه شکست

کشش و با افزایش و کاهش سهم‌محوری تنش، میزان آن کاهش خواهد یافت. شکل ۱۲ نشان می‌دهد که کمترین میزان سهم‌بندی در حالت برش (زاویه لود = ۰) می‌باشد و با کاهش و افزایش زاویه لود میزان سهم‌بندی تنش افزایش می‌یابد.

بای و پیرزبیکي [۲۸] نشان دادند که طبق رابطه ۱۵ کرنش شکست محلی به واسطه رابطه سخت‌شوندگی وابسته به مولفه‌های حالت تنش می‌باشد. طبق این رابطه، مقادیر کرنش محلی در لحظه شکست



شکل ۱۴. منحنی کرنش پلاستیک معادل در لحظه شکست نسبت به پارامترهای حالت تنش  
**Fig. 14. Local fracture strain surface based on triaxiality and Lode angle parameters**

می‌باشند.

در شکل ۱۴ میزان کرنش پلاستیک ماده در لحظه شکست براساس زاویه لود و سه محورگی تنش نشان داده شده است. همانطور که بای و ویرزیکی [۲۸-۲۹] بیان نمودند، میزان کرنش پلاستیک معادل نسبت به سه‌محوری تنش به صورت نمایی تغییر می‌کند. همچنین میزان تغییرات کرنش پلاستیک معادل نسبت به زاویه لود دارای تغییراتی به صورت یک تابع چندجمله‌ای غیرمتقارن می‌باشد.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله رفتار ماکرومکانیکی و میکرومکانیکی فولاد دوفازی با نام تجاری دی‌پی ۶۰۰ به صورت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا به منظور مطالعه اثر حالت تنش بر روی کرنش شکست و منحنی تنش-کرنش، چهار نمونه آزمایشگاهی با هندسه‌های مختلف، مورد بررسی قرار گرفت. سپس توانایی مدل میکرومکانیکی در پیش‌بینی رفتار مواد در ابعاد ماکرو مورد ارزیابی قرار گرفت. در انتها با استفاده از مدل میکرومکانیکی، سهم‌بندی تنش و کرنش هر یک از فازهای تشکیل‌دهنده، تحت حالت‌های بارگذاری مختلف بررسی گردید.

از مطالعات صورت‌گرفته در این مقاله نتیجه‌گیری‌های زیر استخراج گردید:

- مدل میکرومکانیکی سه‌بعدی با توزیع فاز مارتنزیت رندم توانایی پیش‌بینی منحنی تنش کرنش حقیقی تحت حالت تنش‌های مختلف تنش را دارد و تنها در حالت بارگذاری برشی به دلیل عدم توانایی مدل تسلیم فون میسر در پیش‌بینی تنش تسلیم حالت بارگذاری برشی، ماده زودتر دچار تسلیم می‌شود.
- مدل میکرومکانیکی نسبت به نتایج ماکرومکانیکی ارائه‌شده در مرجع [۳۳] دقت کمتری در پیش‌بینی نتایج آزمایشگاهی دارد که می‌توان دلیل آن را فرضیات صورت‌گرفته در مدل میکرومکانیکی در نظر گرفت.
- نسبت سهم‌بندی تنش و کرنش در طول بارگذاری ثابت نمی‌باشد و با افزایش بارگذاری میزان نسبت سهم‌بندی کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده افزایش اختلاف میان سهم‌بندی هر یک از فازها از کرنش اعمالی می‌باشد.
- نسبت سهم‌بندی تنش و کرنش کاملاً وابسته با مولفه‌های

حالت تنش می‌باشد و این مولفه نسبت به سه‌محوری تنش به صورت یک تابع درجه دو منفی تغییر می‌کند و بیشتر میزان در حالت کشش روی می‌دهد. همچنین این مولفه نسبت به زاویه لود به صورت یک تابع چند جمله‌ای می‌باشد که کمترین میزان را حالت برشی رخ می‌دهد.

- میزان توزیع کرنش معادل در لحظه شکست برای بارگذاری‌های متفاوت یکسان نمی‌باشد و با تغییر نوع بارگذاری میزان کرنش پلاستیک در لحظه شکست تغییر می‌کند که نسبت به سه‌محوری تنش به صورت نمایی و نسبت به زاویه لود دارای تغییراتی به صورت یک تابع چندجمله‌ای غیرمتقارن می‌باشد.

## تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از بنیاد تحقیقات آلمان<sup>۱</sup> برای حمایت مالی این پروژه در دانشگاه اشتوتگارت (۷۴۶/SCHM ۱۶۶-۱) با عنوان بررسی میکرومکانیکی تغییرشکل و سناریو آسیب در فولادهای دوفازی با استفاده از روش‌های عددی و آزمایشگاهی، تقدیر و تشکر می‌نمایند.

## ۷- فهرست علائم

### علائم انگلیسی

$J_3$	نامتغیر سوم تنش انحرافی <sup>۳</sup> (MPa)
$J_2$	نامتغیر دوم تنش انحرافی <sup>۲</sup> (MPa)
$I_1$	نامتغیر اول تنش (MPa)
$V_m$	درصد حجمی فاز مارتنزیت (-)
$C\%$	درصد جرمی کربن (-)
$M$	مولفه تیلور (-)
$b$	بردار برگر (m)
$L$	اندازه متوسط مسیر نابجایی (m)
$K$	نسبت بهبود (-)
$S_M$	مقدار تنش همگن‌شده سلول واحد
$S_m$	مقدار تنش محلی در سلول واحد

### علائم یونانی

$\sigma_m$	تنش هیدرواستاتیک (MPa)
$\sigma_{eq}$	تنش معادل (MPa)
$\eta$	سه‌محوری تنش (-)
$\zeta$	زاویه لود (-)
$\varepsilon_p$	کرنش پلاستیک معادل (-)
$\varepsilon_f$	کرنش شکست (-)
$\mu$	مدول برشی (MPa)

### بالانویس

$f$	فاز فریت
$m$	فاز مارتنزیت



- [15] F. M. Al-Abbasi and J. A. Nemes, Micromechanical modeling of dual phase steels, *Int. J. Mech. Sci.*, 45(9) (2003) 1449-1465.
- [16] T. Iung and M. Grange, Mechanical behaviour of two-phase materials investigated by the finite element method: necessity of three-dimensional modeling, *Mater. Sci. Eng. A*, 201(1-2) (1995) L8-L11.
- [17] J. Kadkhodapour, S. Schmauder, D. Raabe, S. Ziaei-Rad, U. Weber, and M. Calcagnotto, Experimental and numerical study on geometrically necessary dislocations and non-homogeneous mechanical properties of the ferrite phase in dual phase steels, *Acta Mater.*, 59(11) (2011) 4387-4394.
- [18] V. Uthaisangskuk and W. Bleck, Microstructure based formability modelling of multiphase steels, *Shaker Verlag*, (2009).
- [19] M. R. Ayatollahi, A. C. Darabi, H. R. Chamani, and J. Kadkhodapour, 3D Micromechanical Modeling of Failure and Damage Evolution in Dual Phase Steel Based on a Real 2D Microstructure, *Acta Mech. Solida Sin.*, 29(1) (2016) 95-110.
- [20] A. C. Darabi, H. R. Chamani, J. Kadkhodapour, A. P. Anaraki, A. Alaie, and M. R. Ayatollahi, Micromechanical analysis of two heat-treated dual phase steels: DP800 and DP980, *Mech. Mater.*, 110 (2017) 68-83.
- [21] M. Basaran and D. Weichert, Stress state dependent damage modeling with a focus on the lode angle influence, no. RWTH-CONV-142999. Lehrstuhl und Institut für Allgemeine Mechanik, (2011).
- [22] R.O. Davis and A.P.S. Selvadurai. *Plasticity and Geomechanics*. Cambridge Univ Pr, (2002).
- [23] L. Xue, Ductile fracture modeling - theory, experimental investigation and numerical Verification, PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, (2007).
- [24] X. Gao, G. Zhang, and C. Roe, A study on the effect of the stress state on ductile fracture. *Int. J. Damage Mech.*, 19(1) (2010) 75.
- [25] W.F. Chen, D.J. Han, and DJ Han. *Plasticity for Structural Engineers*. J Ross Pub, (2007).
- [26] N.S. Ottosen and M. Ristinmaa. *The Mechanics of Constitutive Modeling*. Elsevier Science Ltd, (2005).
- [27] M. Yu. *Generalized Plasticity*. Springer Verlag, (2006).
- [28] Y. Bai, T. Wierzbicki, A new model of metal plasticity and fracture with pressure and lode dependence. *Int. J. Plast.* 24 (2008) 1071-1096.
- [29] Y. Bai, T. Wierzbicki, Application of extended Mohr-Coulomb criterion to ductile fracture, *International Journal of Fracture* 161 (2010) 1-2.
- [30] R.-M. Rodriguez, I. Gutiérrez, Unified Formulation to Predict the Tensile Curves of Steels with Different Microstructures, *Mater. Sci. Forum* 426-432 (2003) 4525-4530.
- [31] V. Uthaisangskuk, S. Muenstermann, U. Prah, W. Bleck, [1] T. Furukawa, M. Tanino, H. Morikawa, M. ENDO, Effects of composition and processing factors on the mechanical properties of as-hot-rolled dual-phase steels, *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan* 24 (1984) 113-121.
- [2] N. Fonstein, *Automotive Steels: Design, Metallurgy, Processing and Applications* explores, 7-Dual-phase steels, (2017) 169-216.
- [3] A. Ramazani, K. Mukherjee, U. Prah, and W. Bleck, Modelling the effect of microstructural banding on the flow curve behaviour of dual-phase (DP) steels, *Comput. Mater. Sci.*, 52(1) (2012) 46-54.
- [4] C. Thomser and W. Bleck, Modelling of the mechanical properties of Dual Phase steels based on microstructure, *Shaker Verlag GmbH*, (2009).
- [5] S. A. Asgari, P. D. Hodgson, C. Yang, and B. F. Rolfe, Modeling of advanced high strength steels with the realistic microstructure-strength relationships, *Comput. Mater. Sci.*, 45(4) (2009) 860-866.
- [6] A. Ramazani, K. Mukherjee, H. Quade, U. Prah, and W. Bleck, Correlation between 2D and 3D flow curve modelling of DP steels using a microstructure-based RVE approach, *Mater. Sci. Eng. A*, 560 (2013) 129-139.
- [7] S. H. Xia and J. T. Wang, A micromechanical model of toughening behavior in the dual-phase composite, *Int. J. Plast.*, 26(10) (2010) 1442-1460.
- [8] H. Lim, M. G. Lee, J. H. Kim, B. L. Adams, and R. H. Wagoner, Simulation of polycrystal deformation with grain and grain boundary effects, *Int. J. Plast.*, 27( 9) (2011) 1328-1354.
- [9] S. K. Paul, Micromechanics based modeling of Dual Phase steels: Prediction of ductility and failure modes, *Comput. Mater. Sci.*, 56 (2012) 34-42.
- [10] J. H. Kim, M.-G. Lee, D. Kim, D. K. Matlock, and R. H. Wagoner, Hole-expansion formability of dual-phase steels using representative volume element approach with boundary-smoothing technique, *Mater. Sci. Eng. A*, 527(27) (2010) 7353-7363.
- [11] X. Sun, K. S. Choi, W. N. Liu, and M. A. Khaleel, Predicting failure modes and ductility of dual phase steels using plastic strain localization, *Int. J. Plast.*, 25(10) (2009) 1888-1909.
- [12] V. Tvergaard, Influence of voids on shear band instabilities under plane strain conditions, *Int. J. Fract.*, 17(4) (1981) 389-407.
- [13] Y. Huang and A. J. Kinloch, Modelling of the toughening mechanisms in rubber-modified epoxy polymers, *J. Mater. Sci.*, 27(10) (1992) 2753-2762.
- [14] M. Danielsson, D. M. Parks, and M. C. Boyce, Three-dimensional micromechanical modeling of voided polymeric materials, *J. Mech. Phys. Solids*, 50(2) (2002) 351-379.

- behavior and damage scenario of DP600 and DP980 steels, *Mechanics of Materials* 143 (2020).
- [34] R. Hill, Elastic properties of reinforced solids: some theoretical principles, *J. Mech. Phys. Solids*, 11 (1963) 357-372.
- [35] Y. Zhao, X. Lia, W. Zhanga, R.D.K Misra, Z, Liua, Strain Partitioning and Softening Mechanisms of  $\delta/\gamma$  in Lean Duplex Stainless Steels during Hot Deformation, *Steel Research International* 91 (2019).
- H.-P. Schmitz, T. Pretorius, A study of micro crack formation in multiphase steel using representative volume element and damage mechanics, *Computational Materials Science* 50 (2011) 225-1232.
- [32] V. Kouznetsova, V, Computational homogenization for the multi-scale analysis of multi-phase materials, Thesis: Eindhoven University of Technology, The Netherlands (2002).
- [33] A. Ch. Darabi, V. Guski, A. Butz, J. Kadkhodapour, S. Schmauder, A comparative study on mechanical

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

A. Cheloe Darabi, A. Pourkamali Anaraki, J. Kadkhodapour, S. Schmauder Investigation of the micromechanical behavior of ferritic-martensitic steel under complex loading, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 53(6)(2021) 3689 -3702.

DOI: [10.22060/mej.2021.18782.6889](https://doi.org/10.22060/mej.2021.18782.6889)

