



## پیش‌بینی رفتار ماکرومکانیکی فولادهای دوفازی با استفاده از مدل‌سازی میکرومکانیکی ریزساختار واقعی

علی چلوئی دارابی<sup>۱</sup>، حمیدرضا چمنی<sup>۲</sup>، مجید رضا آیت‌اللهی<sup>۳\*</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

<sup>۲</sup> دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

<sup>۳</sup> استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۴/۱۶؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۳/۱۱/۲۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۱/۳۰

### چکیده

در این مقاله رفتار ماکرومکانیکی فولادهای دوفازی با استفاده از مدل‌سازی میکرومکانیکی پیش‌بینی شده است. به منظور ساخت فولاد دوفازی با درصد‌های مختلف فاز مارتنزیت، فولاد C-Mn تحت عملیات حرارتی مختلف قرار گرفته و سپس در آب کوئنچ شده است. پس از آن با استفاده از متالوگرافی و تصویربرداری میکروسکوپ نوری، ریز ساختارهای واقعی فولادهای دوفازی بدست آمده است. با استفاده از کد پردازش تصویر نوشته شده در نرم‌افزار Matlab ریز ساختارهای واقعی پردازش شده و سپس با استفاده از کد اجزا محدود نوشته شده در نرم‌افزار Ansys، سلول واحد دو بعدی مدل شده است. در ادامه، با استفاده از تئوری نابجایی و ترکیب شیمیایی موضعی فازهای فریت و مارتنزیت، منحنی تنش-کرنش واقعی این فازها استخراج شده است. نتایج مدل‌سازی میکرومکانیکی دو بعدی سلول واحد با شرایط مرزی پرپودیک تحت بارگذاری کشش تک محوره انجام شده با نتایج آزمایش تجربی مقایسه شده است. در این بررسی نشان داده می‌شود که مدل میکرومکانیکی دو بعدی در درصد فاز مارتنزیت‌های پایین قابلیت پیش‌بینی استحکام و رفتار نرم‌شوندگی فولادهای دوفازی را دارد. علاوه بر آن از مدل میکرومکانیکی دو بعدی به منظور ارزیابی پیشرفت موضعی شدن کرنش نیز می‌توان استفاده نمود.

**کلمات کلیدی:** فولاد دوفازی؛ مدل‌سازی میکرومکانیکی؛ رفتار مکانیکی؛ شرط مرزی پرپودیک.

## Predicting macromechanical behavior of dual phase steels based on actual micromechanical modeling

A. Cheloe Darabi<sup>1</sup>, H.R. Chamani<sup>2</sup>, M. R. Ayatollahi<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup> MSc. Student, School of Mech. Eng., Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Ph.D. Student, School of Mech. Eng., Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

<sup>3</sup> Prof, School of Mech. Eng., Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

### Abstract

In this paper the macromechanical behavior of dual phase steel based on actual microstructure has been predicted. In order to prepare dual phase steels (DP) of different percent phase combinations, a low carbon steel (C-Mn) was subjected to intercritical annealing treatment (ICT) and quenched in water. Then, the actual microstructures of dual phase steels were obtained by metallographic analysis and optical microscopy. A 2D representative volume element (RVE) was generated by finite element code Ansys on the basis of actual microstructure which was obtained by image processing code in Matlab software. The individual single-phase flow curves were obtained based on the dislocation theory and the local chemical composition of constituent. The results of 2D micromechanical RVE models under periodic boundary conditions and tension loading were compared with the experimental results. It is shown that the 2D micromechanical model can predict both strength and ductility for low volume fraction of martensite in dual phase steels. The 2D micromechanical modeling may then be used to portray the local strain evolution of the individual phases in the DP microstructures.

**Keywords:** Dual phase steel; micromechanical modeling; mechanical behavior; periodic boundary condition.

## ۱- مقدمه

فولادهای دوفازی از گروه فولادهای پراستحکام به شمار آمده که امروزه در صنعت خودروسازی مورد توجه قرار گرفته‌اند. این نوع فولادها به وسیله عملیات حرارتی فولادهای کم کربن بدست می‌آیند. فولادهای دوفازی متشکل از یک ریزساختار دوفازی هستند که فاز سخت مارتنزیت درون زمینه فریتی پراکنده شده است. از دهه گذشته پیشرفت قابل ملاحظه‌ای در بهبود خواص مکانیکی فولادهای دوفازی صورت گرفته است [۱]. خواص ماکروسکوپی فولادهای دوفازی به پارامترهای مختلفی از قبیل خواص مکانیکی فازهای فریت و مارتنزیت، درصد حجمی و چیدمان فازهای مارتنزیت و همچنین اندازه دانه فاز فریت بستگی دارد [۲]. در گذشته از روش‌های مختلفی برای تحلیل رفتار مکانیکی فولادهای دوفازی استفاده شده است [۳-۶]، اما این روش‌ها بر اساس فرض تغییرشکل یکنواخت ماده می‌باشند و رفتار فازها را به صورت مجزا در نظر نمی‌گیرد که این فرض منجر به نادیده گرفتن تنش‌های محلی می‌شود. همچنین باعث کاهش درک مکانیزم تغییر شکل در مواد چند فازی می‌شود.

اخیراً محققان زیادی به پیش‌بینی رفتار تنش-کرنش فولاد دوفازی با استفاده از روش میکرومکانیکی پرداخته‌اند [۷] و [۸]. پاول<sup>۱</sup> [۷] برای پیش‌بینی رفتار مکانیکی فولاد دوفازی DP600 (فولاد دوفازی با استحکام نهایی ۶۰۰ مگاپاسکال) و بررسی کرنش شکست آن از مدل میکرومکانیکی کرنش صفحه‌ای با توزیع تصادفی فاز مارتنزیت در زمینه فریتی استفاده نمود. سان<sup>۲</sup> و همکارانش [۸] یک مدل میکرومکانیکی دوبعدی با ساختار واقعی برای پیش‌بینی رفتار ماکرومکانیکی فولاد دوفازی DP980 پیشنهاد دادند. اگر چه ایشان از شرایط مرزی مبتنی بر سلول واحد استفاده نکرده‌اند ولی مدل ارائه شده در پیش‌بینی مودهای شکست و رفتار نرم‌شوندگی فولادهای دوفازی همراه با تغییر شکل‌های پلاستیک، نسبتاً موفق بوده است. العباسی<sup>۳</sup> [۹] از مدل تقارن محوری به منظور بررسی رفتار میکرومکانیکی فولادهای دوفازی با درصد مارتنزیت مختلف استفاده نمود و نشان داد که این مدل توانایی ذاتی این را دارد که با افزایش درصد مارتنزیت، تغییرات کرنش پلاستیک را به خوبی نشان دهد. العباسی فرض نمود ذرات مارتنزیت به صورت ذرات کروی در داخل فاز فریت بصورت پراکنده پخش شده‌اند.

کدخداپور و همکارانش [۱۰]، با فرض آنکه خواص سطح‌مشترک دو فاز فریت و مارتنزیت متفاوت با خواص این دو فاز

می‌باشند به بررسی مدل تقارن محوری همراه با مدل‌سازی سطح مشترک این دوفاز به صورت لایه‌چینی‌هایی با خواص مختلف پرداختند. آن‌ها نشان دادند که نتایج مدل‌سازی مدل تقارن محوری با سطح مشترک به صورت یک لایه با حالت ۱۰ لایه تفاوت چندانی نمی‌کنند و تمامی مدل‌های دارای سطح مشترک، با نتایج تجربی مطابقت خوبی دارند. اما مدل ساده تقارن محوری (بدون در نظر گرفتن تأثیر سطح مشترک) با مدل‌های ارائه شده، تفاوت زیادی دارد، به طوری که مدل تقارن محوری ساده، نمی‌تواند به خوبی رفتار ماکرومکانیکی را پیش‌بینی کند.

رضانی و همکارانش [۱۱] به بررسی گسترده‌ای بر روی مدل‌سازی دوبعدی میکرومکانیکی فولاد دوفازی پرداخته‌اند. آن‌ها دو نوع توزیع مارتنزیت، به صورت لایه‌ای و پراکنده را معرفی نمودند. بررسی‌های ایشان نشان داد که رفتار ماکرومکانیکی فولادهای دوفازی با این دو توزیع فاز مارتنزیت، تفاوت بسیار ناچیزی با یکدیگر دارند که این امر نشان دهنده آن است که توزیع فاز مارتنزیت تأثیر ناچیزی بر روی رفتار ماکرومکانیکی فولادهای دوفازی دارد. کالکاگنوتو<sup>۴</sup> و همکارانش [۱۲]، با انجام عملیات حرارتی مختلف، فولادهایی دوفازی با اندازه دانه‌های متفاوت با درصد مارتنزیت ثابت بدست آوردند. سپس به وسیله EBSD به بررسی رفتار میکرومکانیکی فولادهای دوفازی پرداختند. آن‌ها نشان دادند که تغییرات اندازه دانه فریت تأثیر زیادی بر روی تنش تسلیم و تنش نهایی ماده دارد این در حالی است که، تأثیر آن بر روی درصد ازدیاد طول نهایی ماده بسیار کم‌تر است.

به دلیل سادگی مدل‌سازی و کاهش هزینه‌های محاسباتی، بیشتر بررسی‌های صورت گرفته بر روی مدل‌های میکرومکانیکی فولادهای دوفازی به صورت تقارن محوری و یا دوبعدی با چیدمان فازی دلخواه بوده است. بیشتر محققان نشان داده‌اند که مدل میکرومکانیکی دوبعدی به خوبی می‌تواند رفتار ماکرومکانیکی فولادهای دوفازی با یک ترکیب شیمیایی خاص را پیش‌بینی نماید. اما این سوال مطرح می‌شود که آیا از روش میکرومکانیکی با سلول واحد دوبعدی می‌توان برای بررسی خواص مکانیکی فولادهای دو فازی با کسر حجمی‌های مختلف فاز مارتنزیت استفاده شود. برای پاسخ گویی به این سوال، در این مقاله به بررسی میکرومکانیکی دو بعدی فولاد دوفازی با درصد‌های فاز مارتنزیت ۱۴٪، ۲۵٪، ۳۳٪ و ۴۵٪ پرداخته شده است. به این منظور، مدل‌های میکرومکانیکی دوبعدی با استفاده از نرم‌افزار تجاری Ansys بر اساس ریز ساختار واقعی که به وسیله کد پردازش تصویر در نرم‌افزار Matlab پردازش شده است، مدل شده‌اند و به ازای درصد مارتنزیت‌های مختلف با نتایج تجربی مقایسه شده‌اند.

<sup>1</sup> Paul<sup>2</sup> Sun<sup>3</sup> Al-Abbasi<sup>4</sup> Calcagnotto

## ۲- مطالعات آزمایشگاهی

## ۲-۱- عملیات حرارتی

ترکیب شیمیایی فولاد C-Mn مورد استفاده در این مقاله، در جدول ۱ نشان داده شده است که این ماده به پیشنهاد مرجع [۱۳] انتخاب شده است. در عملیات حرارتی صورت گرفته، ابتدا به منظور ریز کردن اندازه دانه‌های اولیه فریت نمونه‌ها در دمای ۹۲۰ درجه سانتی‌گراد و مدت زمان ۱۵ دقیقه تحت حرارت قرار گرفته‌اند و سپس از کوره خارج شده و در دمای اتاق سرد شده‌اند. سپس با توجه به دماهای میان بحرانی ۷۲۱،۲ و ۸۳۱،۴ درجه سانتی‌گراد، نمونه‌ها در دماهای ۷۶۰ و ۸۱۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب در مدت زمان‌های ۱۰ و ۱۵ دقیقه در کوره مقاومتی با دقت  $\pm 5$  درجه سانتی‌گراد حرارت داده شده‌اند. پس از مدت زمان مقرر نمونه‌ها به صورت یکنواخت و سریع در آب با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد سرد شده‌اند.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فولاد بکار رفته بر حسب درصد وزنی

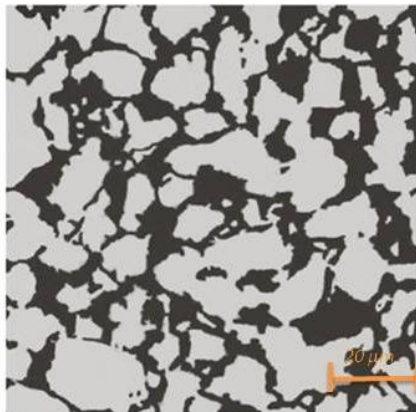
[۱۳]						
عنصر	C	Mn	Si	Cu	Mo	Cr
درصد وزنی	۰/۲	۱/۱	۰/۲۴	۰/۱۲	۰/۰۴۶	۰/۱۸

## ۲-۲- متالوگرافی

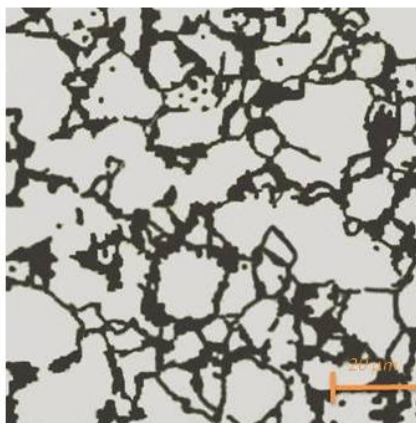
برای مطالعه ریز ساختار فولادهای بدست آمده، نمونه‌های مناسب برای متالوگرافی تهیه شده و پس از مانع کردن تمامی نمونه‌ها، به ترتیب با سنباده‌های شماره ۸۰، ۸۰، ۱۸۰، ۲۴۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ سنباده زده شده‌اند. سپس عملیات پولیش با استفاده از پودر آلومینا با دانه‌بندی ۳ میکرومتر به صورت دستی انجام شده است. در نهایت از محلول نایتال ۲٪ جهت اچ کردن نمونه‌ها، استفاده گردید [۱۸].

با استفاده از میکروسکوپ نوری مطالعات کمی و کیفی بر روی ساختار نمونه‌ها صورت گرفت و با استفاده از نرم‌افزار Clemex بررسی درصد فازی نمونه‌ها از روی تصاویر ریز ساختار بدست آمده به وسیله میکروسکوپ نوری پرداخته شد. با میانگین‌گیری نتایج درصد فازها از ۱۰ تصویر با بزرگنمایی‌های ۴۰X و ۱۰۰X برای هر عملیات حرارتی، درصد حجمی فاز مارتنزیت مشخص شده است. در دو عملیات حرارتی صورت گرفته، مقادیر درصد حجمی مارتنزیت ۲۵٪ و ۳۳٪ می‌باشند، که ریز ساختارهای آن در شکل ۱ نشان داده شده است. قسمت‌های سفید رنگ نشان‌دهنده فاز فریت و قسمت‌های سیاه رنگ نشان‌دهنده فاز مارتنزیت هستند.

در شکل ۲ ریز ساختار فولاد دوفازی DP980 با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داده شده است. در این تصویر فازهای مارتنزیت به صورت برجسته دیده می‌شوند.

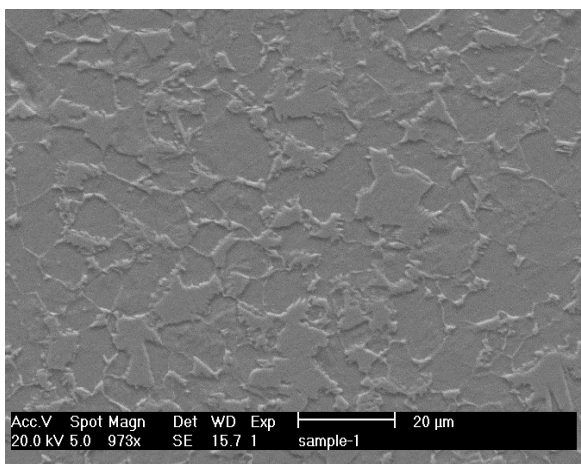


(الف)



(ب)

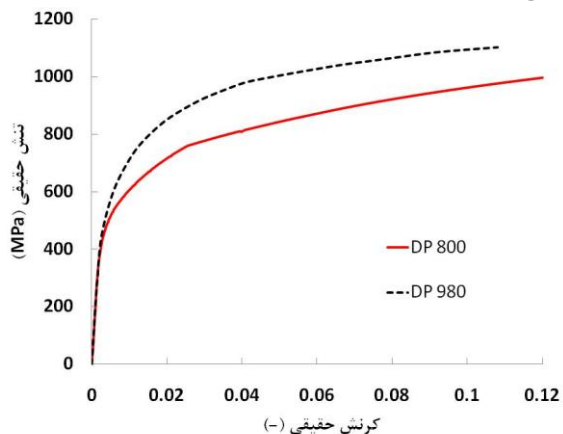
شکل ۱- ریزساختارهای فولاد دوفازی عملیات حرارتی شده، (الف) با ۳۳٪ فاز مارتنزیت، (ب) با ۲۵٪ فاز مارتنزیت



شکل ۲- ریز ساختار فولاد دوفازی DP980 (با ۳۳٪ فاز مارتنزیت) با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی.

## ۳-۲- آزمایش کشش

برای اعتبارسنجی مدل‌های میکرومکانیکی نیاز به پاسخ ماکرومکانیکی مواد می‌باشد که به طور رایج از نمونه کششی تخت یا نمونه تقارن محوری برای تعیین این منحنی استفاده می‌شود. در این پژوهش، از نمونه کششی تخت بدون شیار با طول ۱۴۰ میلی‌متر، عرض ۲۰ میلی‌متر و ضخامت ۳ میلی‌متر برای انجام آزمایش کشش استفاده شد. نمونه‌ها به وسیله دستگاه آزمایش کشش STM-150 با نرخ کرنش  $1.6 \times 10^{-4} \text{ (s}^{-1}\text{)}$  تحت بار کششی قرار گرفته‌اند، برای اندازه‌گیری کرنش از اکستنسومتر با اندازه سنجه ۵۰،۵ میلی‌متر و با دقت ۱ میکرومتر استفاده شده است، اندازه‌گیری نیرو توسط نیرو سنج‌های نصب شده روی دستگاه با دقت ۰،۱ نیوتن صورت گرفته است. برای هر عملیات حرارتی چهار مرتبه آزمایش کشش تکرار شده است که منحنی تنش حقیقی-کرنش حقیقی آن‌ها که میانگین چهار آزمایش کشش می‌باشد، در شکل ۳ نشان داده شده است که این منحنی‌ها با استفاده از قانون توانی لودویک [۱۴] برون‌یابی شده‌اند. در جدول ۲ نیز خواص مکانیکی این دو فولاد گزارش شده است.



شکل ۳- منحنی تنش حقیقی - کرنش واقعی فولادهای، DP980 با ۳۳٪ فاز مارتنزیت و DP800 با ۲۵٪ فاز مارتنزیت.

جدول ۲- خواص مکانیکی فولادهای دوفازی DP800 و DP980

نوع فولاد	درصد مارتنزیت (%)	استحکام کششی نهایی (MPa)	تنش تسلیم (MPa)	حداکثر ازدیاد طول (%)
DP800	۲۵	۸۷۴	۵۵۱	۱۰،۸
DP980	۳۳	۹۸۵	۵۱۷	۱۳،۴

## ۳- روش مدل‌سازی میکرومکانیکی

## ۳-۱- سلول واحد

مواد در ابعاد ماکرو به طور کلی رفتار یکنواختی را از خود نشان می‌دهند، درحالی‌که در ابعاد میکرومکانیکی، استحکام و شکل‌پذیری فولادهای دوفازی، رفتار غیر همگنی را از خود نشان می‌دهند. فرضیات همگن بودن رفتار مواد و پیوستگی ساختار ماده تنها در ابعاد ماکرو معتبر است. در بررسی‌های میکرومکانیکی مواد، یک سلول واحد در ماده معمولاً به سه مدل قابل بررسی می‌باشند، که عبارتند از: حالت تقارن محوری، کرنش صفحه‌ای و سه‌بعدی. در فولادهای دوفازی به دلیل چیدمان بسیار پیچیده فازها، محققان محدودی به مدل‌سازی میکرومکانیکی پرداخته‌اند و عمده آن‌ها با چیدمانی دلخواه رفتار ماده را بررسی کرده‌اند.

## ۳-۲- شرایط مرزی

در این مقاله از شرط مرزی پربودیک برای سلول واحد استفاده شده است که این نوع شرط مرزی، نیازمند قیدهای بسیار زیادی می‌باشد. در شکل ۴ تغییر شکل شماتیک ماده تحت شرط مرزی پربودیک نشان داده شده است. رابطه (۱) بیانگر شرط مرزی پربودیک در مرزهای سلول واحد می‌باشد [۱۵].

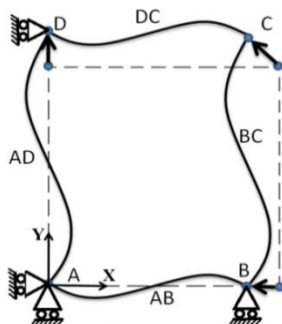
$$u_{DC}(X) = u_{AB}(X) + u_D \quad (1)$$

$$u_{BC}(Y) = u_{AD}(Y) + u_B$$

نقطه A به طور کامل ثابت فرض شده است و (X و Y) مختصات محلی می‌باشند که برای نشان دادن نقاط همگن بر روی دو سطح، از رابطه (۲) استفاده می‌شود [۱۵].

$$u_C = u_D + u_B \quad (2)$$

در صورت استفاده از این شرط مرزی در یک سلول واحد همانند شکل ۴، کافی است بارگذاری به صورت جابجایی بر نقطه C اعمال شود.



شکل ۴- تغییر شکل سلول واحد تحت شرط مرزی پربودیک و بارگذاری کششی [۱۵].

## ۳-۳- رفتار مکانیکی مواد

بررسی‌های بسیار زیادی درباره اندازه‌گیری خواص مکانیکی هر یک از فازهای فولاد دو فازی صورت گرفته است. در این پژوهش، از تئوری کرنش سختی بر اساس نابجایی رودریگز<sup>۱</sup> و همکارانش [۱۶]، برای پیش‌بینی منحنی تنش-کرنش فازهای فریت و مارتنزیت استفاده شده است. در این تئوری از درصد وزنی ترکیب شیمیایی هر یک از فازهای فریت و مارتنزیت استفاده می‌شود. در این روش به واسطه رابطه تجربی ارائه‌شده، منحنی تنش-کرنش هر فاز تخمین زده می‌شود که به صورت رابطه (۳) می‌باشد [۱۶].

$$\sigma = \sigma_0 + \Delta\sigma + \alpha M \mu + \sqrt{b} \sqrt{\frac{1 - \exp(-M.K.\epsilon)}{K.L}} \quad (3)$$

$\sigma_0$  تنش پیرلز<sup>۲</sup> می‌باشد، که در این روش به وسیله رابطه تجربی (۴) که وابسته به ترکیب شیمیایی فولاد می‌باشد، بدست می‌آید [۱۶].

$$\sigma_0 = 77 + 80(\%Mn) + 750(\%P) + 80(\%Cu) + 60(\%Si) + 45(\%Ni) + 11(\%Mo) + 60(\%Cr) + 500(N_{SS}) \quad (4)$$

که  $N_{SS}$  محلول جامد نیتروژن می‌باشد. مابقی عبارات فوق نشان دهنده درصد وزنی هر یک از عناصر شیمیایی می‌باشند. در معادله ۳، عبارت  $\Delta\sigma$  استحکام تخمین زده شده برای هر یک از فازهای فریت و مارتنزیت است که به ترتیب در روابط (۵) و (۶) بیان شده‌اند [۱۶]. همچنین

$$\Delta\sigma(MPa) = 5000 \times (\%C_{SS}^f) \quad (5)$$

$$\Delta\sigma(MPa) = 3065 \times (\%C_{SS}^m) - 161 \quad (6)$$

که  $\%C_{SS}^f$  و  $\%C_{SS}^m$  به ترتیب مربوط به درصد وزنی عنصر کربن در فازهای فریت و مارتنزیت هستند [۱۶].

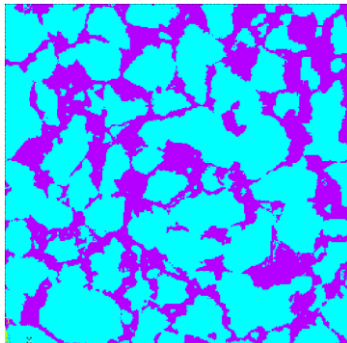
جمله سوم، اثرهای مجموع استحکام‌های ناشی از نابجایی است و  $\alpha$  یک ثابت مادی می‌باشد.  $M$  ضریب تیلور،  $\mu$  مدول برشی،  $b$  بردار برگر،  $L$  اندازه متوسط مسیر نابجایی و  $K$  ضریب برازش است که این مقدار برای فاز مارتنزیت با توجه به مراجع [۱۰] و [۱۶] ثابت در نظر گرفته می‌شود و برای فاز فریت رابطه عکس با اندازه دانه فریت دارد. در مرجع [۹] از یک خواص فریت و مارتنزیت برای درصد‌های مختلف مارتنزیت استفاده شده است. در این مقاله نیز برای هر یک از فازهای فریت و مارتنزیت فولادهای دو فازی DP980 و DP800 خواصی مجزا تعریف شده است که در جدول ۳، عبارات معادله ۳، برای هر چهار منحنی ورودی نشان داده شده است.

جدول ۳- عبارات رابطه تجربی منحنی تنش-کرنش

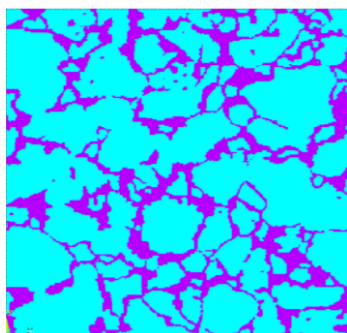
فولاد	فاز	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\alpha$ [16]	M [16]	b (m) [16]	K
DP980	فریت	۱۷۵	۰/۳۳	۳	$۲,۵ \times ۱۰^{-۱۰}$	۱
	مارتنزیت	۱۴۲۳	۰/۳۳	۳	$۲,۵ \times ۱۰^{-۱۰}$	۴۱
DP800	فریت	۱۵۶	۰/۳۳	۳	$۲,۵ \times ۱۰^{-۱۰}$	۰/۶۷
	مارتنزیت	۲۱۲۴	۰/۳۳	۳	$۲,۵ \times ۱۰^{-۱۰}$	۴۱

## ۳-۴- مدل‌سازی میکرومکانیکی دوبعدی

تصویر ریزساختار بدست آمده به وسیله میکروسکوپ نوری پردازش تصویر شده و پس از پردازش تصویر، با استفاده از یک کد واسط که در نرم افزار Ansys نوشته شده است، مدل میکرومکانیکی دو بعدی سلول واحد فولاد دو فازی تهیه شده است. برای شبکه بندی سلول واحد از امان کرنش صفحه ای PLANE182 استفاده شده است. هر سلول واحد دارای ابعاد  $۸۰ \times ۸۰$  میکرومتر و مجموعاً دارای  $۹۰۰۰۰$  امان می‌باشد. در شکل ۵ تصویر مدل اجزا محدود سلول واحد دو بعدی برای فولادهای دو فازی DP980 و DP800 نشان داده شده است. مطابق با شکل ۴، از شرط مرزی پرئودیک در مرزهای سلول واحد استفاده شده است و بارگذاری به صورت جابجایی در نقطه C (شکل ۴)، با نرخ مشابه آزمایش کشش صورت گرفته است.



(الف)



(ب)

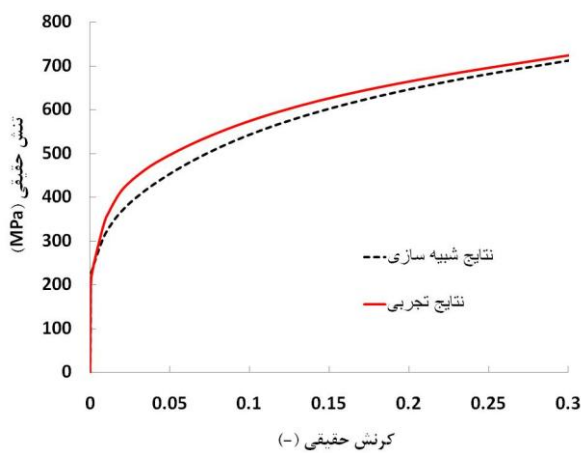
شکل ۵- مدل‌های میکرومکانیکی دوبعدی (الف) ریز ساختار DP980 (ب) ریز ساختار DP800 (با ۳۳٪ فاز مارتنزیت)، (ب) ریز ساختار DP800 (با ۲۵٪ فاز مارتنزیت).

## ۴- نتایج مدل‌سازی و تحلیل

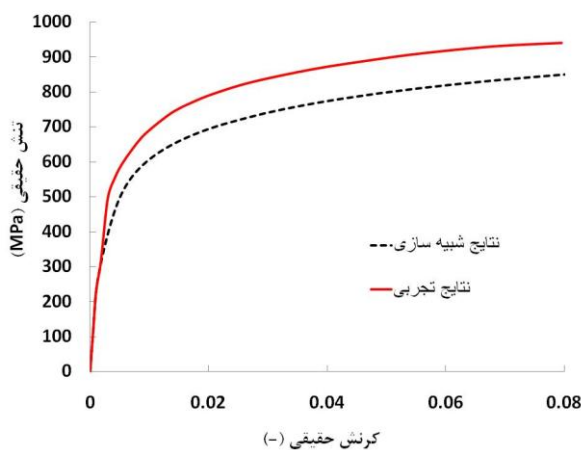
<sup>1</sup> Rodriguez  
<sup>2</sup> peierls

مارتنزیت ۱۴٪ و ۴۵٪ با ریز ساختارهای ارائه شده در مراجع [۹] و [۱۷]، پرداخته شده است.

همان‌طور که، از نتایج تحلیل‌ها مشاهده می‌شود، مدل میکرومکانیکی دوبعدی فولادهای دوفازی با درصد فاز مارتنزیت ۴۵٪، ۳۳٪، ۲۵٪ و ۱۴٪ نسبت به کرنش شکست که از آزمایش تجربی بدست آمده است، به ترتیب دارای ۱۰،۲٪، ۱۳،۹٪، ۸،۲٪ و ۱،۷٪ اختلاف هستند. در شکل ۹ توزیع تنش فون میسر در ریز ساختار فولاد DP980 با بزرگنمایی ۲ نشان داده شده است، که مشاهده می‌شود در سطح مشترک دو فاز مقادیر تنش بیشتری نسبت به فاز فریت وجود دارد.



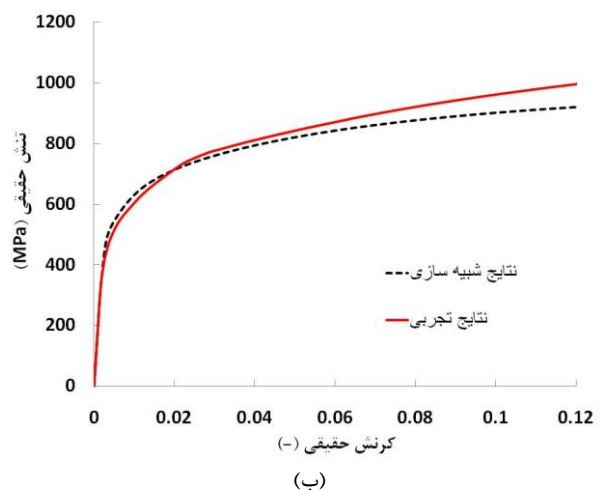
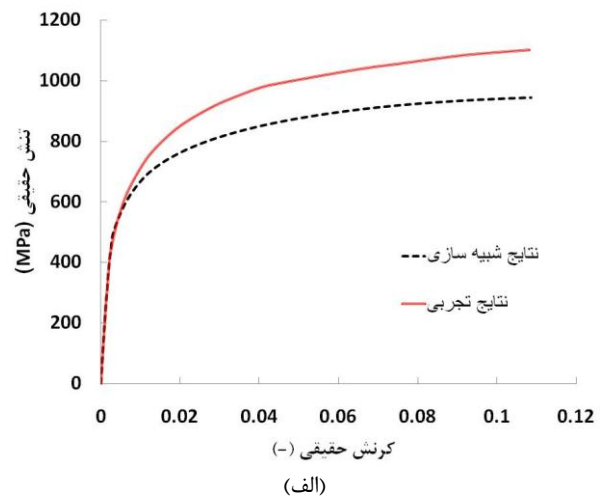
شکل ۷- مقایسه نتایج مدل سازی میکرومکانیکی دوبعدی با نتایج تجربی فولاد دوفازی با ۱۴٪ فاز مارتنزیت.



شکل ۸- مقایسه نتایج مدل سازی میکرومکانیکی دوبعدی با نتایج تجربی فولاد دوفازی با ۴۵٪ فاز مارتنزیت.

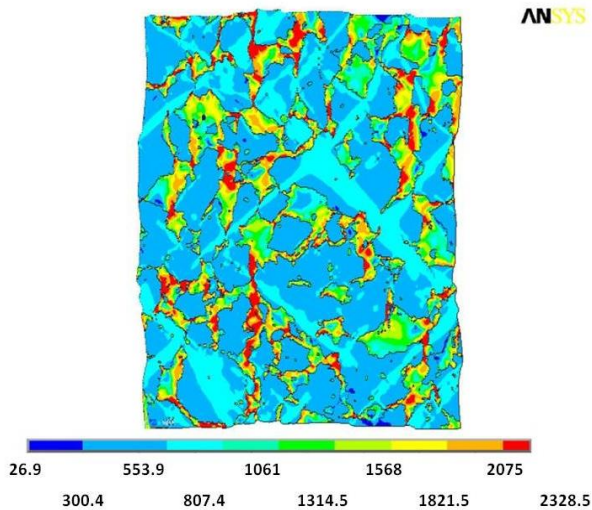
این ریز ساختار از فولادی با استحکام نهایی ۹۸۴ مگا پاسکال است در نتیجه در تحلیل‌های ماکرومکانیکی، بیشترین مقدار تنشی که مدل‌های ماکرومکانیکی نشان می‌دهد، مقدار ۹۸۴ مگا پاسکال می‌باشد. اما همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، این مقدار

در شکل ۶ نتایج مدل سازی میکرومکانیکی دوبعدی با نتایج تجربی برای فولاد DP980 (شکل الف) و DP800 (شکل ب) مقایسه شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، اختلاف بین نتایج مدل سازی میکرومکانیکی دوبعدی و نتایج تجربی برای درصد مارتنزیت ۳۳٪ (فولاد DP980) زیاد می‌باشد در حالی که برای درصد مارتنزیت ۲۵٪ (فولاد DP800) این اختلاف کمتر است. در نتیجه، دقت مدل‌های میکرومکانیکی دوبعدی در پیش‌بینی رفتار فولادهای دوفازی، وابسته به درصد فاز مارتنزیت، متفاوت می‌باشند.

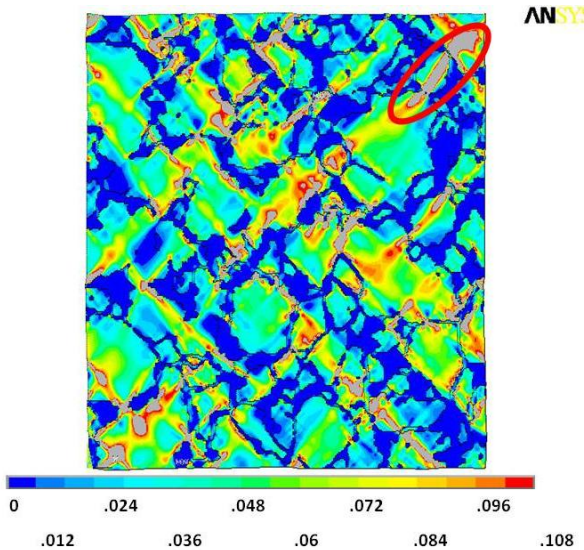


شکل ۶- مقایسه نتایج مدل سازی میکرومکانیکی دوبعدی با نتایج تجربی، الف) فولاد DP980 (با ۳۳٪ فاز مارتنزیت) و ب) DP800 (با ۲۵٪ فاز مارتنزیت).

با توجه به متفاوت بودن اختلاف میان مدل‌های دوبعدی و نتایج تجربی، نیازمند بررسی‌های بیشتری برای درصد مارتنزیت‌های دیگر می‌باشد. در شکل ۷ و ۸ به بررسی اختلاف میان مدل‌های دوبعدی و نتایج تجربی برای فولادهای دوفازی با درصد فاز



شکل ۹: توزیع تنش فون میسز در مدل میکرومکانیکی دو بعدی فولاد دوفازی DP980 (با ۳۳٪ فاز مارتنزیت).



شکل ۱۰: توزیع کرنش پلاستیک معادل در مدل میکرومکانیکی دوبعدی فولاد دوفازی DP980 (با ۳۳٪ فاز مارتنزیت).

#### ۶- فهرست علائم

$b$	بردار برگر (mm)
$L$	اندازه متوسط مسیر نابجایی (mm)
$K$	پارامتر بهبود دهنده ( $m^{-1}$ )
$M$	ضریب تیلور
علایم یونانی	
$\Delta\sigma$	استحکام تخمین زده شده برای فازها (MPa)
$\sigma_0$	تنش پیرلز (MPa)
$\mu$	مدول برشی (MPa)

در بررسی‌های میکرومکانیکی به دلیل تعریف رفتار مکانیکی مجزا برای هر یک از فازها، بیشترین مقدار تنش مربوط به فاز مستحکم‌تر (فاز مارتنزیت) با استحکام نهایی ۲۳۲۸ مگا پاسکال، می‌باشد. در شکل ۱۰ توزیع کرنش پلاستیک در ماده نشان داده شده است. همچنین باندهای برشی ناشی از حداکثر کرنش پلاستیک معادل ایجاد شده، مشخص شده‌اند. در مدل دوبعدی به دلیل فرض حالت کرنش صفحه‌ای، این باندها در عمق ماده یکسان می‌باشند. در نتیجه باندها زودتر به یکدیگر می‌رسند و این موضوع باعث کاهش استحکام پیش‌بینی شده‌ی فولاد دوفازی توسط مدل میکرومکانیکی دو بعدی می‌باشد در این شکل نیز، نشان داده شده است که باندهای برشی از فصل مشترک بین فازهای فریت و مارتنزیت عبور می‌کنند. همچنین در مدل‌سازی صورت گرفته سطح مشترک دو فاز فریت و مارتنزیت به صورت اتصال کامل در نظر گرفته شده است. در واقعیت این ناحیه دارای استحکام بیشتری از فاز فریت و کمتری از فاز مارتنزیت می‌باشد. در حالی که در مدل‌سازی صورت گرفته، این ناحیه به عنوان فاز فریت در نظر گرفته شده است و این امر نیز در کاهش استحکام پیش‌بینی شده توسط مدل‌های میکرومکانیکی نسبت به مدل ماکرومکانیکی تاثیرگذار می‌باشد.

#### ۵- نتیجه‌گیری

از مقایسه رفتار فولادهای دوفازی مشاهده می‌شود که با افزایش درصد فاز مارتنزیت استحکام ماده به دلیل افزایش فاز مستحکم‌تر، افزایش می‌یابد و همچنین میزان شکل‌پذیری آن به دلیل کاهش فاز نرم‌تر (فاز فریت) کاهش می‌یابد.

نتایج حاکی از آن است که مدل‌های دوبعدی میکرومکانیکی رفتار متفاوتی را از خود نشان می‌دهند. برای فولادهای دوفازی بررسی شده با درصد فاز مارتنزیت ۴۵٪، ۳۳٪، ۲۵٪ و ۱۴٪، با کاهش درصد فاز مارتنزیت، میزان خطای مدل‌های دوبعدی از ۱۳٫۹٪ تا ۱٫۷٪ کاهش یافته و می‌توان از این مدل برای پیش‌بینی رفتار فولادهای دوفازی با درصد فاز مارتنزیت پایین استفاده نمود. این ویژگی به محققین کمک می‌کند که تنها با داشتن ریز ساختار ماده و خواص فازها، رفتار ماکرومکانیکی فولاد را پیش‌بینی نمایند. علاوه بر آن، به دلیل مدل‌سازی واقعی ریز ساختارها، با استفاده از این مدل می‌توان رفتار محلی تنش و کرنش را بررسی نمود. در این پژوهش نشان داده شده است که باندهای برشی ناشی از اختلاف میان استحکام دو فاز فریت و مارتنزیت، از سطح مشترک دوفازی فریت و مارتنزیت عبور کرده و این سطوح به عنوان نواحی بحرانی شناخته می‌شود.

- [10] Kadkhodapour J, Schmauder S, Raabe D, Ziaei-Rad S, Weber U, Calcagnotto M (2011) Experimental and numerical study on geometrically necessary dislocations and non-homogeneous mechanical properties of the ferrite phase in dual phase steels. *Acta Mat* 59(11): 4387-4394.
- [11] Ramazani A, Mukherjee K, Prahl U, Bleck W (2012) Modelling the effect of microstructural banding on the flow curve behaviour of dual-phase (DP) steels. *Comput Mater Sci* 52(1): 46-54.
- [12] Calcagnotto M, Adachi Y, Ponge D, Raabe D (2011) Deformation and fracture mechanisms in fine-and ultrafine-grained ferrite/martensite dual-phase steels and the effect of aging. *Acta Mat* 59(2): 658-670.
- [13] Anazadeh Sayed A, Kheirandish S (2012) Affect of the tempering temperature on the microstructure and mechanical properties of dual phase steels. *Mat sci eng:A* 532: 21-25.
- [14] Ludwik P (1909) *Elemente der technologischen Mechanik*: J. Springer. USA, 32.
- [15] Böhm HJ (1998) A short introduction to basic aspects of continuum micromechanics. Vienna Uni Tech. Cdl-fmd Report 3.
- [16] Rodriguez RM, Gutiérrez I (2003) Unified formulation to predict the tensile curves of steels with different microstructures. *Mat Sci Forum* 426-432: 4525-4530.
- [17] Sodjit S, Uthaisangsuk V (2012) Microstructure based prediction of strain hardening behavior of dual phase steels. *Mat Des* 41: 370-379.

[۱۸] خیراندیش ش، اسدی اسدآباد م (۱۳۹۲) فولادهای دوفازی. انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.

یک ثابت مادی

$\alpha$

بالانویس‌ها

فاز فریت

$f$

فاز مارتنزیت

$m$

## ۷- مراجع

- [1] Rashid M.S (1976) GM 980 X- A Unique High Strength Sheet Steel with Superior Formability. SAE Technical Paper 760206, Soc Auto Eng Cong, Detroit: 938-949.
- [2] Kim NJ, Nakagawa AH, Nakagawa AH (1986) Effective grain size of dual-phase steel. *Mat Sci and Eng* 83(1): 145-149.
- [3] Tarigopula V, Hopperstad O, Langseth M, Clausen A (2008) Elastic-plastic behaviour of dual-phase, high-strength steel under strain-path changes. *Euro J of Mech-A/Solids* 27(5):764-782.
- [4] Luo M, Wierzbicki T (2010) Numerical failure analysis of a stretch-bending test on dual-phase steel sheets using a phenomenological fracture model. *Int J of Solids and Structures* 47(22): 3084-3102.
- [5] Qin J, Chen R, Wen X, Lin Y, Liang M, Lu F (2013) Mechanical behaviour of dual-phase high-strength steel under high strain rate tensile loading. *Mat Sci Eng: A* 586: 62-70 .
- [6] Cadoni E, Dotta M, Forni D, Tesio N, Albertini C (2013) Mechanical behaviour of quenched and self-tempered reinforcing steel in tension under high strain rate. *Mat Des* 49: 657-66.
- [7] Paul SK, (2012) Micromechanics based modeling of Dual Phase steels: Prediction of ductility and failure modes. *Comput Mater Sci* 56:34-42.
- [8] Sun X, Choi KS, Liu WN, Khaleel MA (2009) Predicting failure modes and ductility of dual phase steels using plastic strain localization. *Int J Plast* 25(10):1888-1909.
- [9] Al-Abbasi F, Nemes J (2003) Micromechanical modeling of dual phase steels. *Int J Mech Sci* 45(9): 1449-1465.