



## تحلیل میکرومکانیک مدل خرابی فولادهای دوفازی تحت بارگذاری کششی با استفاده از المان‌های حجمی نماینده دوبعدی و سه‌بعدی

بهنام انبارلویی<sup>۱</sup>، مجید حسینی<sup>۲</sup>، حسین حسینی تودشکی<sup>۳\*</sup>

<sup>۱</sup>دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران  
<sup>۲</sup>دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت:

بازنگری:

پذیرش:

ارائه آنلاین:

### کلمات کلیدی:

فولاد دوفازی

نمودار تنش کرنش

المان نماینده حجمی سه‌بعدی

میکروساختار

المان محدود

**چکیده:** فولادهای دوفازی از دو فاز نرم فریت و فاز سخت مارتنزیت که در فاز فریت پراکنده شده است، تشکیل شده‌اند. در گذشته محققین به تحلیل سازوکار شکست فولادهای دوفازی پرداخته‌اند و نمونه‌های تحت کشش تک‌محوره را با استفاده از المان حجمی نماینده دوبعدی مدل کرده‌اند. با توجه به اینکه در المان حجمی نماینده دوبعدی فرضیات ساده‌کننده‌ای انجام می‌شود، برای تحلیل دقیق‌تر سازوکارهای شکست، تحلیل‌های سه‌بعدی المان حجمی نماینده می‌توانند مورد توجه باشند. در این تحقیق به مقایسه رفتار میکرومکانیکی و سازوکارهای خرابی و شکست نمونه‌هایی، با نسبت ضخامت به عرض متفاوت با استفاده از المان حجمی نماینده دوبعدی و سه‌بعدی با استفاده از روش المان‌های محدود پرداخته شده است. در این پژوهش آزمایش‌ها در سه مرحله شروع گلوئی شدن، پس از گلوئی شدن و شکست نهایی تحت کشش تک‌محوره انجام شده است و از عکس‌های متالوگرافی و میکروسکوپ الکترونی نیز برای بررسی الگوی تغییر شکل و سازوکار شکست استفاده شده است. همچنین با توجه به شکل تقریبی کروی حفره‌ها که در نتایج تجربی مشاهده شده و مقایسه آن با نتایج عددی به دست آمده از المان حجمی نماینده سه‌بعدی، محلی شدن تنش هیدرواستاتیکی به‌عنوان نشان‌دهنده محل شکل‌گیری حفره‌ها در حالت سه‌بعدی در نظر گرفته شده است.

### ۱- مقدمه

فولادهای دوفازی در دهه ۱۹۷۰ توسعه داده شده‌اند. در دهه‌های اخیر صنعت و به‌طور ویژه صنایع وابسته به خودروسازی نیاز به فولادهایی پیدا کردند که بدون کاهش قابلیت شکل‌پذیری و افزایش قیمت، دارای استحکام بالایی نسبت به فولادهای سنتی باشند [۱]. فولادهای دوفازی از دو فاز فریت (فاز زمینه ماده) و فاز مارتنزیت که در فاز فریت پراکنده شده است، تشکیل شده‌اند. با توجه به میکروساختار فولادهای دوفازی می‌توان برای بررسی رفتار آن‌ها از مدل‌های موجود برای کامپوزیت‌ها بهره برد که در آن یک بستر نرم فریتی با دانه‌های سخت مارتنزیتی با درصد حجمی ۵ تا ۳۰ درصد ترکیب شده است [۲].

در این ماده در مرز دانه‌ها، بین دو فاز فریت و مارتنزیت، حفره‌ها آغاز شده و در فاز فریت منتشر می‌شوند [۳]. با وجود پژوهش‌هایی که روی فولاد دوفازی در حالت سه‌بعدی انجام شده است، بررسی سازوکار شکست و تغییر شکل با استفاده از المان حجمی نماینده سه‌بعدی در این فولادها مورد توجه محققین می‌باشد و بررسی رفتار میکرومکانیکی در این نوع فولادها در سال‌های اخیر موضوع بسیاری از تحقیقات بوده است [۴-۶]. برای دست یافتن به این مهم در این تحقیق به مطالعه بر روی میکروساختار فولاد دوفازی پرداخته شده است.

آزمایش‌ها و تحقیق‌های عددی زیادی بر روی فولاد دوفازی صورت گرفته است که بسیاری از آن‌ها با استفاده از مدل‌سازی المان نماینده دوبعدی بوده‌اند. در ابتدا به معرفی پژوهش‌های دوبعدی پرداخته می‌شود. قدیگی [۷] و تاسان و همکاران [۸] به‌وسیله آزمایش‌ها و نتایج تجربی توزیع کرنش را در فولادهای چندفازی نشان دادند. سپس کدخداپور و همکاران [۹] با مطالعه بر روی الگوی تغییر شکل میکرو ساختار فولاد دوفازی در حالت دوبعدی، دریافته‌اند که خرابی تحت بارگذاری کششی تک‌محوره در فولادهای دوفازی به دلیل محلی شدن و تمرکز کرنش‌های برشی رخ می‌دهد. کدخداپور و همکاران [۱۰] از دو روش عددی و تجربی برای به دست آوردن سازوکار ایجاد حفره و رشد آن تا تخریب ماده استفاده کردند و دریافته‌اند که جدایش در محل مرز دانه فازهای مارتنزیت و فریت باعث ایجاد حفره‌های کروی می‌شود. دلیل به وجود آمدن این حفره‌های دایروی شکل را می‌توان تنش هیدرو استاتیکی بالا دانست. پاول و همکاران [۱۱] نیز با شبیه‌سازی دوبعدی میکروساختار فولاد دوفازی بیان کردند شکست در فولاد دوفازی به دلیل ناسازگاری کرنش‌ها در فاز سخت مارتنزیت و فاز نرم فریت است و همچنین مود اصلی خرابی در آن، مود خرابی برشی است. سان و همکاران [۱۲] نیز گزارش کرده‌اند که تمرکز کرنش در حالت پلاستیک به خاطر ناسازگاری در تغییر شکل فازهای فریت و مارتنزیت است و آن‌ها نیز مود خرابی برشی را به‌عنوان مود اصلی خرابی معرفی کرده‌اند.

آزمایش در سه بارگذاری (۱- گلوبی شدن ۲- بعد از گلوبی شدن ۳- در نقطه شکست نهایی) متوقف شده تا الگوی شکست و رفتار مکانیکی به دست بیاید.

برای به دست آوردن الگوی تغییر شکل و همچنین ایجاد حفره‌ها، رشد و روند تغییر آن‌ها از عکس‌های تهیه شده توسط اسکن میکروسکوپ الکترونی<sup>۳</sup> و متالوگرافی استفاده شده است و همچنین اثرات در نظر گرفتن تغییر شکل بزرگ و کوچک در شبیه‌سازی و مقدار درصد حجمی مارتنزیت بر رفتار مکانیکی فولاد دوفازی و همچنین حساسیت نتایج به تعداد المان‌ها از طریق تحلیل المان محدود بررسی شده است.

برای شبیه‌سازی میکروساختار فولاد دوفازی در حالت سه‌بعدی، از عکس‌های متالوگرافی استفاده شده است. در این تحقیق پس از انجام آزمایش‌ها، در مقاطع مختلف آزمایش و عکس‌های میکروساختاری، حفره‌های کروی شکل دیده شده‌اند که می‌توان تنش هیدرواستاتیکی منفی ایجاد شده در میکروساختار را عامل ایجاد حفره دانست. همچنین الگوی تغییر شکل و شکست در تحلیل المان محدود نیز این نکته را تایید کرده و نشان می‌دهد که علت تشکیل حفره‌ها تنش هیدرواستاتیکی منفی می‌باشد، زیرا حفره‌ها به صورت کروی در محل مرز دانه فاز مارتنزیت و فریت به وجود آمده و با زیاد شدن نیروی خارجی رشد می‌نمایند. در نتیجه با توجه به نتایج تجربی و عددی، می‌توان تنش هیدرواستاتیکی منفی را به عنوان نشان‌دهنده محل ایجاد حفره در نظر گرفت.

## ۲- آزمایش‌ها و نتایج تجربی

در این مقاله از فولادهای دوفازی که توسط شرکت اس‌اس‌ای بی<sup>۴</sup> تولید شده‌اند استفاده شده است و نمونه‌های آزمایش با استفاده از استاندارد [ASTM E 466-82] ساخته شده‌اند. برای بررسی توزیع تنش سه‌بعدی در مقطع آزمایش نمونه‌های تجربی به گونه‌ای ساخته شده‌اند که نسبت عرض و ضخامت آن‌ها در مقطع آزمایش ۰/۸ باشد. شکل ۱ ابعاد مقطع نمونه تجربی ساخته شده را نشان می‌دهد. عرض نمونه ۲/۵ میلی‌متر و ضخامت آن ۲ میلی‌متر است.

آزمایش کشش تک‌محوره با استفاده از دستگاه دار تک<sup>۵</sup> با ظرفیت نیروی ۵۰ کیلو نیوتن انجام شده است و داده‌هایی که از آن به دست می‌آید به صورت نیرو در مقابل جابجایی گزارش می‌شود. فرایند آزمایش توسط یک دوربین دیجیتال و پردازش تصویر ثبت شده است و برای به دست آوردن مقدار تنش و کرنش در طول آزمایش از آن استفاده شده است.

هر مرحله از آزمایش برای اطمینان از قابل قبول بودن نتایج تجربی، آزمون سه بار انجام شده است (شکل ۱). همچنین برای بررسی رفتار ماده در مقیاس میکرو، نمونه آزمایش تحت یک نیروی کششی تک‌محوره قرار گرفته و آزمایش در سه مرحله بارگذاری (۱- گلوبی شدن ۲- بعد از گلوبی شدن

حسینی تودشکی و همکاران [۱۳] با استفاده از روش المان محدود توسعه یافته به مطالعه بر روی رفتار تنش-کرنش یک آلومینیوم دوفازی در حالت دوبعدی پرداخته و دریافته‌اند که تا حدودی می‌توان شروع و رشد خرابی‌ها را با استفاده از روش المان محدود توسعه یافته پیش‌بینی کرد. سیریناکرن و همکاران [۱۴] نیز به بررسی تغییر شکل محلی و شروع ترک در فولادهای دوفازی با مدل‌سازی دوبعدی پرداختند. در بعضی از تحقیقات به عدم تطابق نتایج تحلیل دوبعدی با نتایج تجربی پرداخته شده است. تامسر و همکاران [۱۵] نشان دادند منحنی تنش-کرنش که از یک مدل دوبعدی با کرنش صفحه‌ای به دست آمده بود به خوبی نتایج تجربی را پیش‌بینی نکرده و با آن تطابق ندارد و همچنین آیت‌اللهی و همکاران [۱۶] با مقایسه مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی به این نتیجه رسیدند که مدل سه‌بعدی سازوکار شکست را بهتر نشان داده و قابلیت اطمینان بیشتری دارد. در نتیجه نیاز به مدل‌سازی سه‌بعدی میکرو ساختاری بیش از پیش محسوس می‌باشد.

حال به پژوهش‌هایی که در زمینه بررسی فولاد دوفازی با مدل‌سازی سه‌بعدی میکرو ساختاری انجام گرفته است، پرداخته خواهد شد. اوهااتا و همکاران [۴] از دو روش عددی و تجربی به این نتیجه رسیدند که بیشتر حفره‌هایی که در مرز میان فازها قرار گرفته در ارتباط با تمرکز تنش در این نواحی بوده و همچنین مشاهده کردند که علت اصلی خرابی در این نوع فولاد، تنش برشی بین فازها است.

بلک و همکاران [۱۷] نیز بر روی فولاد دوفازی و تریپ ۶۰۰<sup>۱</sup> مطالعه کردند و در آزمایش‌های تجربی دو مود شکست را به صورت هم‌زمان مشاهده کردند. آن‌ها دریافته‌اند که دلیل ایجاد میکرو ترک جدایش بین فریت و مارتنزیت است و در شروع میکرو ترک، سهم هر مود خرابی به مقدار تنش یا نوع وارد شدن نیرو، کسر حجمی فاز مارتنزیت و عوامل دیگری وابسته است. رضائی و همکاران [۵] بر روی چهار نوع مختلف فولادهای دوفازی (دی پی<sup>۲</sup> ۵۰۰، دی پی ۶۰۰، دی پی ۸۰۰ و دی پی ۱۰۰۰) برای به دست آوردن رابطه بین تنش‌های دوبعدی و سه‌بعدی تحقیقاتی انجام داده‌اند و با معرفی یک ضریب، رابطه‌ای بین تنش‌های دوبعدی و سه‌بعدی معرفی کردند. پاول [۶] با پخش تصادفی دانه‌های مارتنزیت در فاز فریت به این نتیجه رسیده است که نمودار تنش-کرنش فولاد دوفازی در دو حالت دوبعدی و سه‌بعدی به مقدار زیادی شبیه به هم هستند. به طور کلی در هیچ کدام از مطالعات گذشته به عاملی که علت اصلی آغاز حفره‌ها در فولاد دوفازی در حالت سه‌بعدی باشد اشاره نکرده‌اند. از این رو این پژوهش، برای پی بردن به دلیل اصلی آغاز حفره‌ها در حالت سه‌بعدی صورت گرفته است.

هدف از پژوهش حاضر، تحلیل‌های تجربی و عددی رفتار میکرو مکانیکی و سازوکار شکست برای فولادهای دوفازی با مدل‌سازی المان حجمی نماینده سه‌بعدی تحت کشش تک‌محوره می‌باشد. برای این منظور نمونه‌های آزمایش تحت یک نیروی کششی تک‌محوره قرار داده شده‌اند و

3 Scanning Electron Microscope (SEM)

4 SSAB

5 DARTEC

1 TRIP 600

2 DP

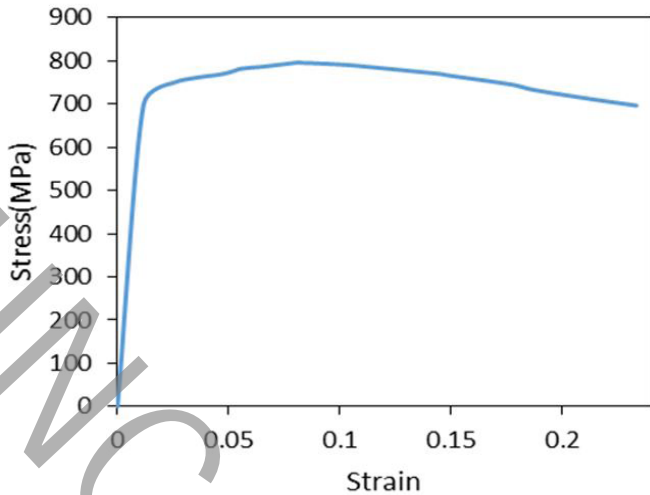


Fig. 2.

شکل ۲: رفتار تنش-کرنش مهندسی فولاد دوفازی.

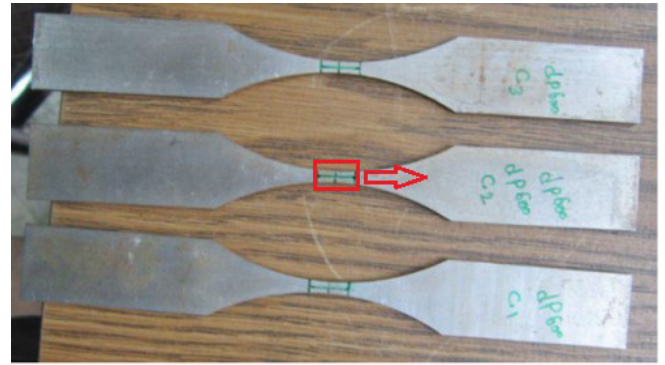
و دارای یک کسر حجمی تقریبی ۲۸/۵ درصد است. در حالت نمونه‌های با نسبت ضخامت به عرض ۰/۲ مشاهده شده بود که فاز مارتنزیت دچار کشیدگی و از یاد طول شدید می‌شدند [۲] اما نتایج تجربی حاصل از این پژوهش این‌گونه نیست و مشاهده می‌شود که فاز مارتنزیت بسیار کم‌تر دچار کشیدگی می‌شود. از عکس‌های میکروسکوپ الکترونی برای بررسی الگوی تغییر شکل و شکست نمونه در سطوح میکرو ساختاری استفاده شده است. همان‌طور که در شکل ۴ الف نشان داده شده است الگوی تغییر شکل نشان داده شده در عکس‌های میکروسکوپ الکترونی و آنچه در عکس‌های متالوگرافی دیده شد باهم یکسان هستند. در نتایج تجربی برای نمونه با نسبت ضخامت به عرض ۰/۸ همان‌طور که در شکل ۴ الف (سه تصویر اول عکس‌های میکروسکوپ الکترونی برای نمونه با نسبت ضخامت به عرض ۰/۸ با دقت‌های متفاوت می‌باشد) نشان داده شده است بیشتر حفره‌های ایجاد شده به فرم کروی هستند.

ایجاد حفره‌های کروی حاکی از این اصل است که هر سه تنش  $\sigma_x$ ،  $\sigma_y$  و  $\sigma_z$  در شکل‌گیری این حفره‌ها نقش داشته‌اند و تقریباً از هر سه جهت این حفره‌ها به صورت یکسان رشد کرده و فرم کروی را به خود گرفته‌اند. با توجه به شکل کروی حفره‌ها می‌توان دلیل به وجود آمدن این حفره‌ها را تنش هیدرواستاتیک دانست و در نقاطی که مقادیر تنش هیدرواستاتیکی زیاد می‌شود احتمال رخ دادن حفره‌ها بیش‌تر می‌باشد در صورتی که در نمونه با نسبت ضخامت به عرض ۰/۲ دلیل ایجاد حفره‌ها تنش برشی گزارش شده است (شکل ۴ ب) [۲].

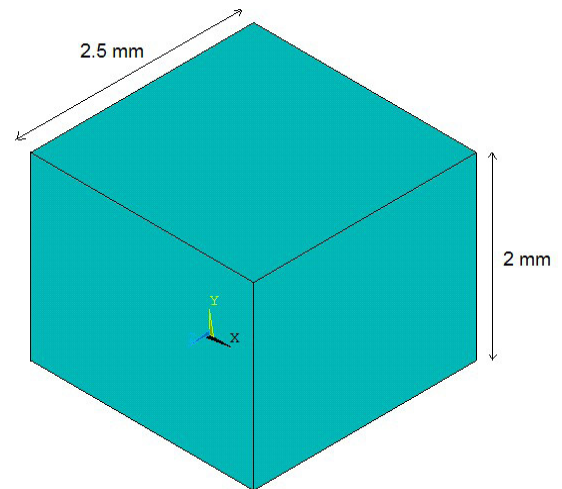
### ۳- نتایج عددی

#### ۳-۱- رفتار مادی فازها

برای تعریف رفتار مکانیکی هر یک از فازها از نمودارهای شکل ۵ استفاده شده است و با استفاده از آن‌ها ویژگی مادی برای هر دو فاز



(الف)



(ب)

Fig. 1.

شکل ۱: (الف) نمونه‌های آزمایش: نمونه‌های با نسبت ضخامت به عرض ۰/۸ (ب) هندسه و ابعاد قطعه در مقطع مورد مطالعه نمونه‌های تجربی.

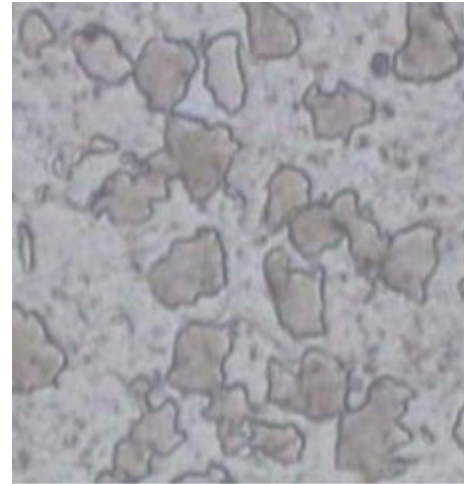
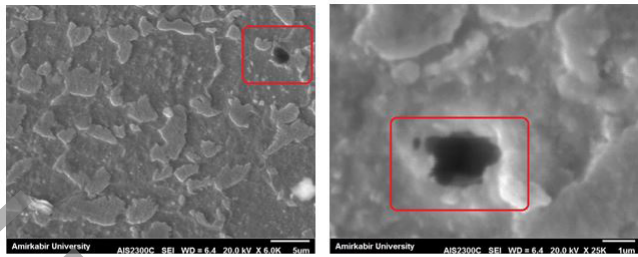
۳- در نقطه شکست نهایی (انجام شده است تا الگوی شکست و رفتار مکانیکی به دست آید.

اولین نقطه توقف آزمایش در کرنش ۲۰ درصد و وقفه دوم برای بررسی رفتار، پس از گلویی شدن ماده که در آن کرنش‌ها و تنش‌ها در میکروساختار ماده به شدت موضعی می‌شوند، در کرنش ۲۸ درصد انجام شده است. همچنین نمونه دیگری مورد آزمایش قرار گرفته است که در آن شکست نهایی رخ داده و کرنش آن ۳۲ درصد بوده است. این نکته قابل ذکر است که در بارگذاری‌های مختلف آزمایش کشش، برای بررسی میکروسکوپی از نمونه جلا داده شده و تصاویر متالوگرافی و اسکن میکروسکوپ الکترونی استفاده شده است.

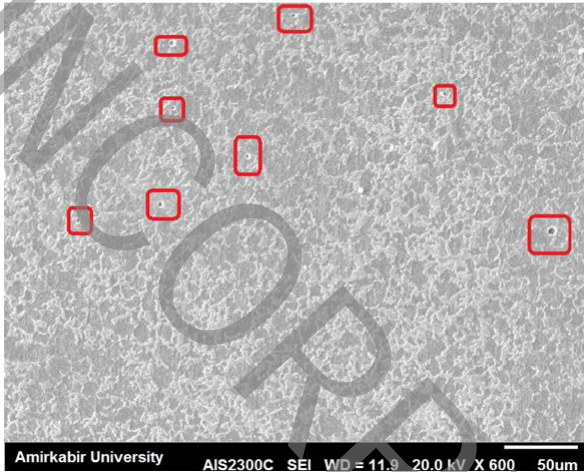
نمودار تنش و کرنش مهندسی به دست آمده برای فولاد دوفازی از کشش تک‌محوره، در شکل ۲ آمده است.

عکس متالوگرافی از میکروساختار فولاد دوفازی در نقطه گلویی در شکل ۳ نشان داده شده است. الگویی که در شکل وجود دارد نشان می‌دهد که فاز مارتنزیت به طور نامنظم در فاز فریت پخش شده است

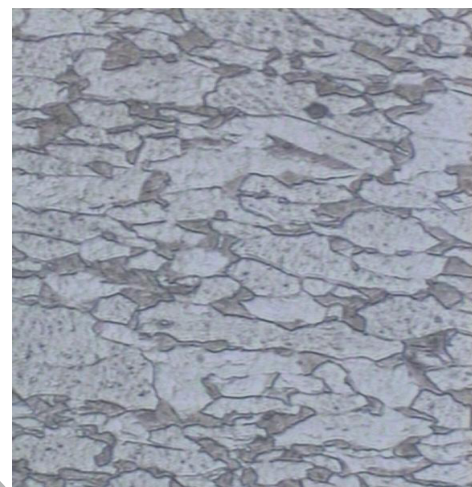




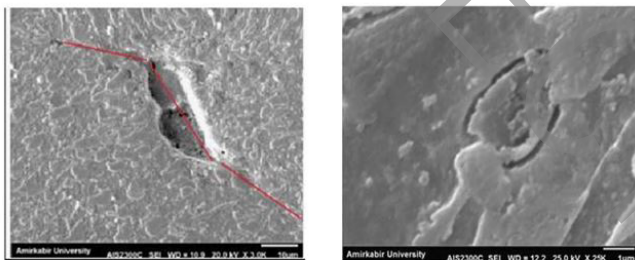
(الف)



(الف)

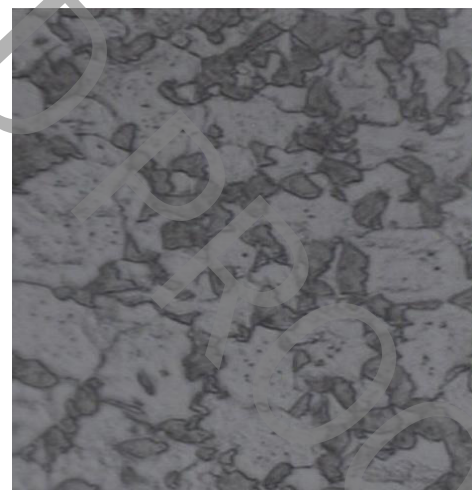


(ب)



(ب)

Fig. 4.



(ج)

Fig. 3.

شکل ۴: الگوی به وجود آمدن حفره و تغییر شکل فاز مارتزیت (الف) در نمونه با نسبت ضخامت به عرض  $0.8/1$  با استفاده از عکس‌های میکروسکوپ الکترونی و (ب) در نمونه با نسبت ضخامت به عرض  $0.2/1$  [۲].

تعریف شده است و دو ماده با دو رفتار متفاوت در کنار هم قرار داده شده‌اند که در بررسی با روش المان محدود، این خصوصیات به ماده نسبت داده می‌شود [۲].

### ۳-۲- شبیه‌سازی

برای این که بتوان یک شبیه‌سازی دقیق برای حالت سه‌بعدی انجام داد باید تصاویر سه‌بعدی از نمونه واقعی و طرز قرار گرفتن فازها در کنار هم و درصد حجمی فازها در دسترس باشد تا مورد استفاده قرار گیرد. اما با توجه به در اختیار نبودن تصاویر سه‌بعدی از تصاویر دوبعدی استفاده شده است و فرض می‌شود در بعد دیگر نیز پراکندگی

شکل ۳: تصاویر متالوگرافی در نقطه گلویی شدن (الف) قبل از وارد کردن نیرو (ب) بعد از وارد کردن نیرو در نمونه با نسبت ضخامت به عرض  $0.2/1$  [۲] (ج) بعد از وارد کردن نیرو در نمونه با نسبت ضخامت به عرض  $0.8/1$

مارتنزیتی از آن جدا شده در نظر گرفته و فاز مارتنزیت از روی تصاویر دوبعدی به صورت اشکال مختلف با در نظر داشتن درصد حجمی فاز مارتنزیت در بستر فریتی قرار داده شده اند، به گونه ای که با ترکیب این دو فاز باهم یک مکعب کامل تشکیل می شود که به عنوان المان حجمی نماینده از آن استفاده شده است. شکل ۶ روند شبیه سازی در نرم افزار را نشان می دهد و در شکل های بعدی به توضیح بهتری از المان حجمی نماینده پرداخته شده است. در شکل ۷ اجزای تشکیل دهنده

فازها به همین صورت باشد. حال با در نظر گرفتن این نکته که درصد حجمی هر یک از فازها نیز با توجه به تصویر دوبعدی تعیین شده است، شبیه سازی سه بعدی انجام شده است.

برای شبیه سازی فولاد دوفازی و تحلیل المان محدود، با توجه به درصد حجمی هر فاز، فازها کنار هم قرار گرفته و به هم متصل می شوند که باهم یک مکعب کامل (المان نماینده حجمی) را تشکیل دهند. برای این کار بستر فریتی را به صورت یک مکعب که بخش های

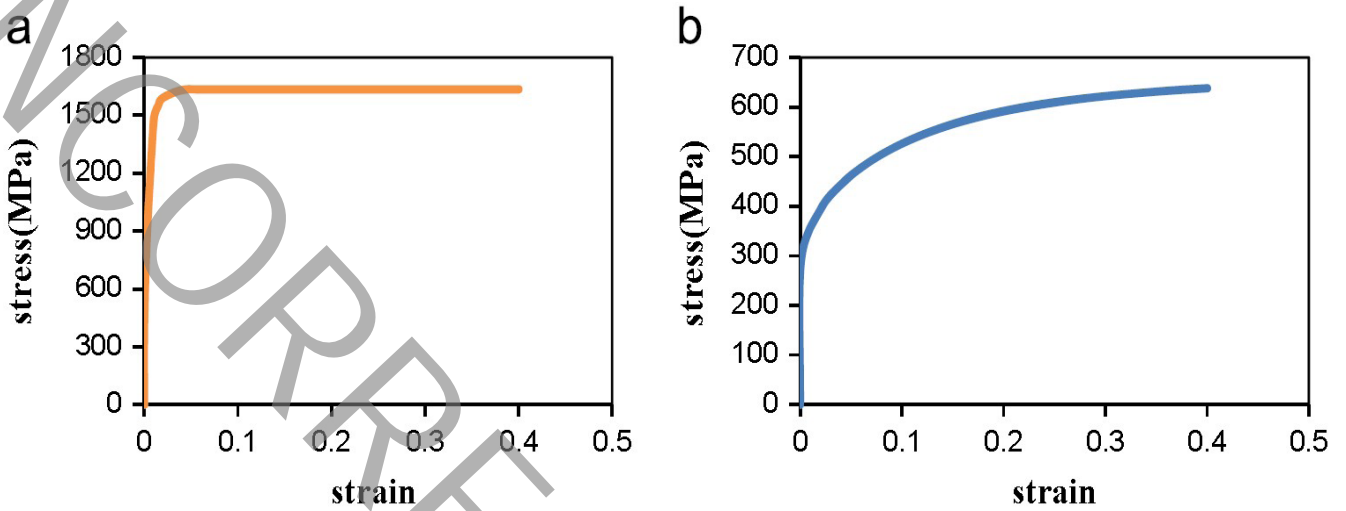


Fig. 5.

شکل ۵: رفتار تنش-کرنش برای المان (الف) مارتنزیت و (ب) فریت [۲].

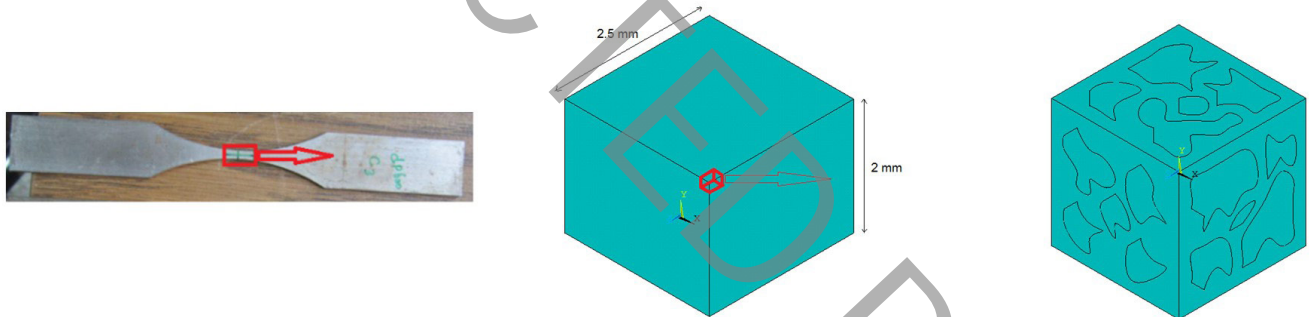


Fig. 6.

شکل ۶: روند شبیه سازی در المان محدود (الف) نمونه واقعی (ب) قسمت گلوبی نمونه آزمایش (ج) المان حجمی نماینده.

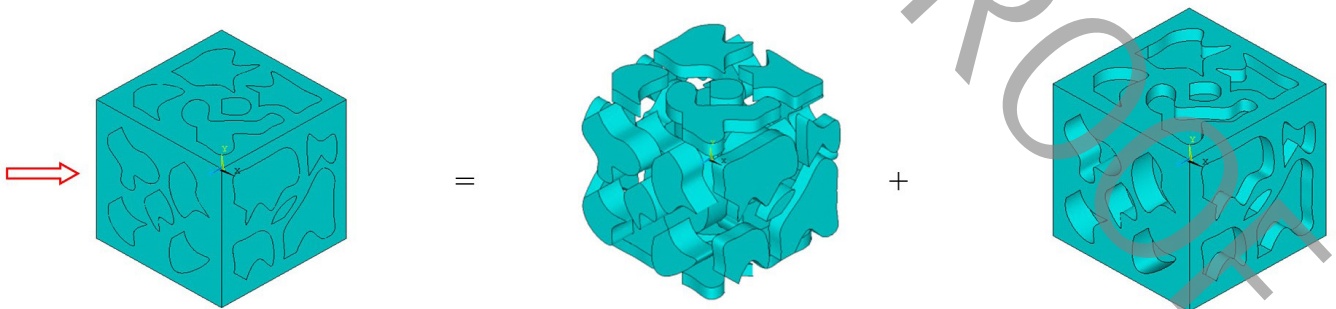


Fig. 7.

شکل ۷: اجزای تشکیل دهنده نمونه المان محدود (الف) المان حجمی نماینده (ب) فاز مارتنزیت (ج) فاز فریت.

تکیه‌گاهی وجود دارد که در جهت  $z$  ثابت شده است و نود واقع در  $y=0$  و  $x=0$  در جهت  $y$  و  $x$  بسته شده است.

اما برای مش‌بندی این نمونه در المان محدود از المان‌های آجری با مش نامنظم استفاده شده و ۴۷۷۳۸ المان در آن به‌کاررفته است (شکل ۱۰).

این المان نماینده حجمی به‌صورت جداگانه و در شکل ۸ برش‌هایی از دو فاز مارتنزیت و فریت برای روشن‌تر شدن مدل‌سازی آورده شده است.

### ۳-۳- شرایط مرزی و مش‌بندی

شرایط مرزی اعمال شده به این نمونه همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود به نودهای واقع در صفحه  $Z=1$  بار به‌صورت جابجایی اعمال شده است و نودهای واقع در صفحات  $x=0$  و  $x=1$  و  $y=0$  شرایط مرزی متقارن اعمال شده است و همچنین تمام نودهای واقع در صفحه  $y=1$  با هم در جهت  $y$  حرکت می‌کنند به‌گونه‌ای که در صفحه اعوجاجی به وجود نمی‌آید و کاملاً صاف باقی می‌ماند (شرایط کوپلینگ) و دلیل آن نیز برقرار بودن شرط تکرارپذیری برای نمونه است. برای نودهای واقع در صفحه  $z=0$  شرایط

### ۴- بحث و نتیجه‌گیری از نتایج تجربی و عددی

۴-۱- بررسی اثر فرض تغییر شکل‌های بزرگ و کوچک در خواص مکانیکی در این بخش از فولاد دوفازی با کسر حجمی ۲۸٪ مارتنزیت برای تحلیل المان محدود استفاده شده است. و در شکل ۱۱ نتایج حاصل از حل با استفاده از تئوری‌های تغییر شکل بزرگ و کوچک با نتایج تجربی مقایسه شده‌اند. همان‌طور که در نمودار قابل مشاهده است در تئوری تغییر شکل کوچک، با افزایش مقدار کرنش مقدار تنش نیز پیوسته افزایش می‌یابد و به‌عبارت‌دیگر

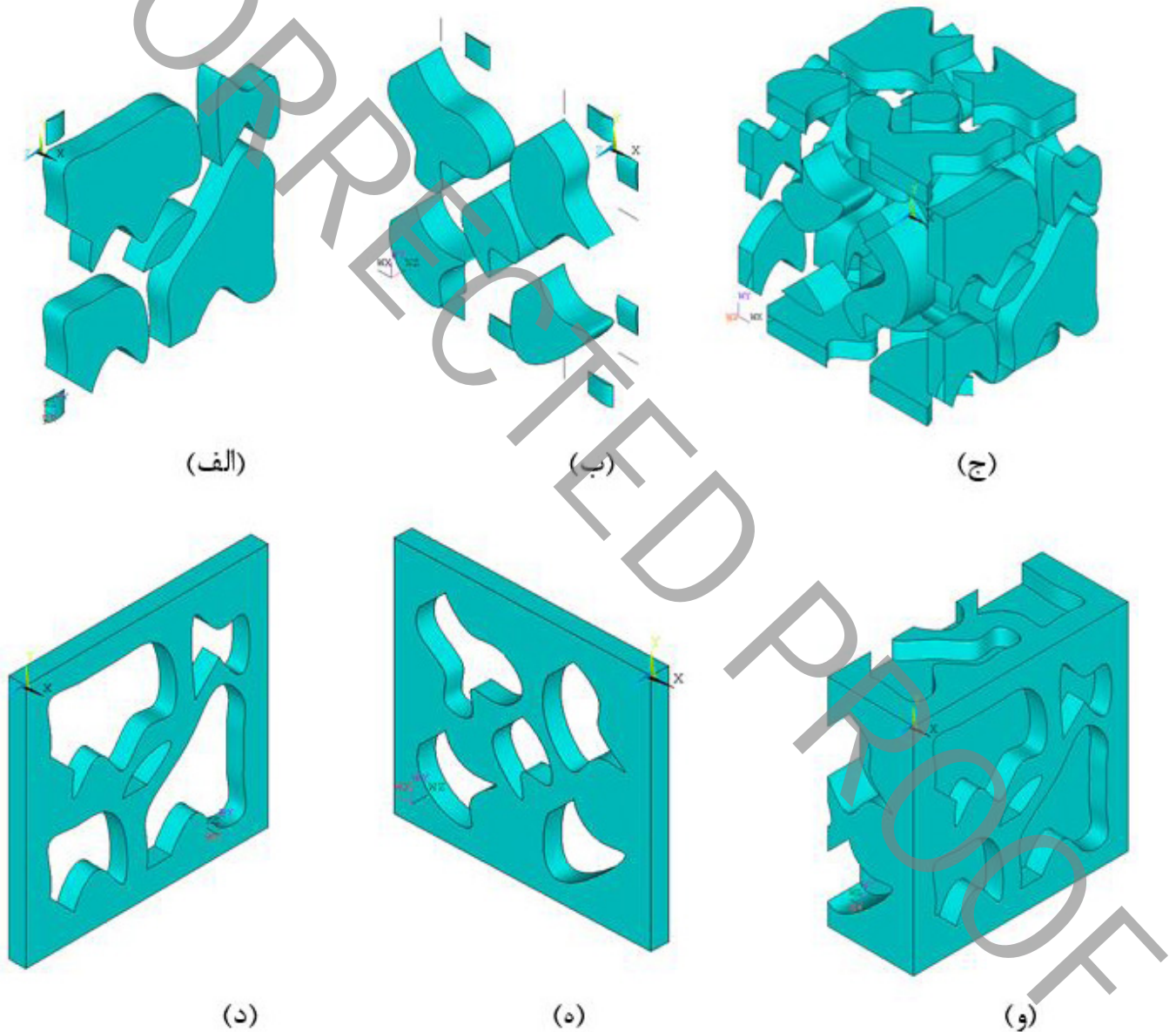


Fig. 8.

شکل ۸: بخش‌های المان نماینده: الف، ب و ج) فاز مارتنزیت برش خورده، د، ه و و) فاز فریت برش خورده.



۴-۲- تأثیر اندازه مش‌ها

برای اینکه بهترین مش برای تحلیل المان محدود انتخاب شود تأثیر آن بر مدلی با کسر حجمی ۲۸٪ مارتنزیت مورد بررسی قرار گرفته است. پیش‌بینی رفتار تنش-کرنش با تعداد المان‌های مختلف در شکل ۱۲ نشان داده شده است. تعداد المان‌های استفاده شده در مش بندی ۱۶۳۹۴، ۵۶۶۱۶ و ۴۷۷۳۸ هستند.

همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است نتایج حاصل از حل با مش‌های با تعداد المان‌های متفاوت، تفاوت چندانی باهم ندارند و تقریباً روی هم قرار گرفته‌اند که این نشان می‌دهد مدل هندسی مرز دانه‌ها، با هر دو نوع مش درشت و ریز، قابل مش زنی است یا به عبارتی دیگر حتی مش‌های درشت نیز انحنای مرزها و لبه‌ها را به درستی پوشش می‌دهند و می‌توان از

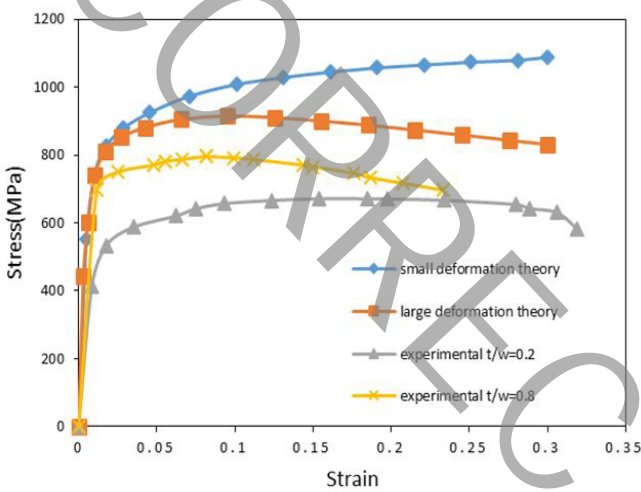


Fig. 11.

شکل ۱۱: مقایسه رفتار تنش-کرنش پیش‌بینی شده با حل به وسیله تئوری‌های تغییر شکل کوچک و بزرگ با نتایج تجربی.

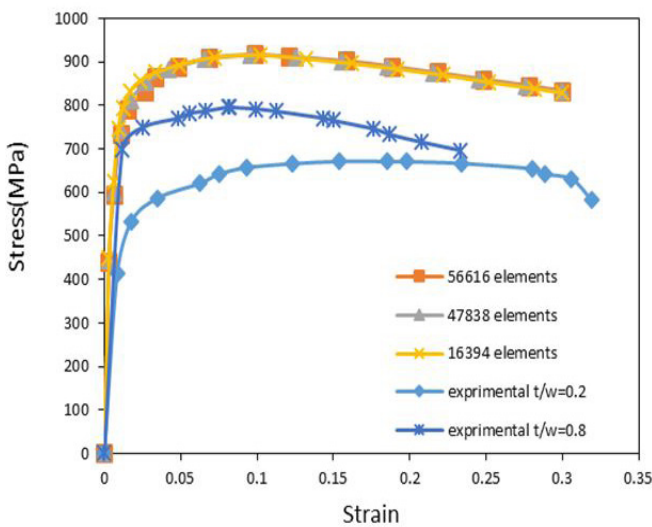


Fig. 12.

شکل ۱۲: مقایسه رفتار تنش-کرنش حل شده با مش‌های مختلف با نتایج تجربی.

با افزایش مقدار کرنش، فولاد پیوسته سخت‌تر می‌شود و همواره کرنش سختی مشاهده می‌شود، اما در تئوری تغییر شکل بزرگ با افزایش مقدار کرنش از کرنش ۹/۵٪ به بعد مقدار تنش کاهش می‌یابد. پدیده نرم شدن به این دلیل است که در کرنش‌های بالاتر تغییر شکلی که در فریت اتفاق افتاده به دلیل تغییر شکل‌ها و چرخش‌های بزرگ المان‌ها نمی‌تواند به‌طور کامل به فاز مارتنزیت منتقل شود، بنابراین فاز فریت نقش اصلی را در رفتار ماده ایفا می‌کند [۲] و نرم شدن در رفتار کلی ماده قابل مشاهده است.

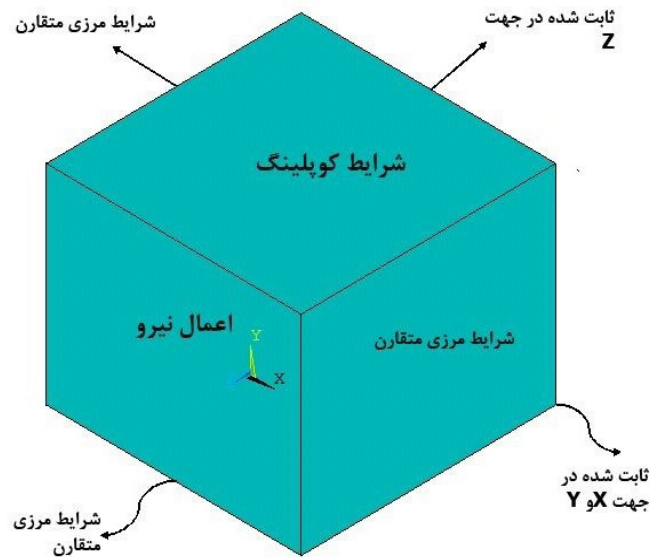


Fig. 9.

شکل ۹: شرایط مرزی.

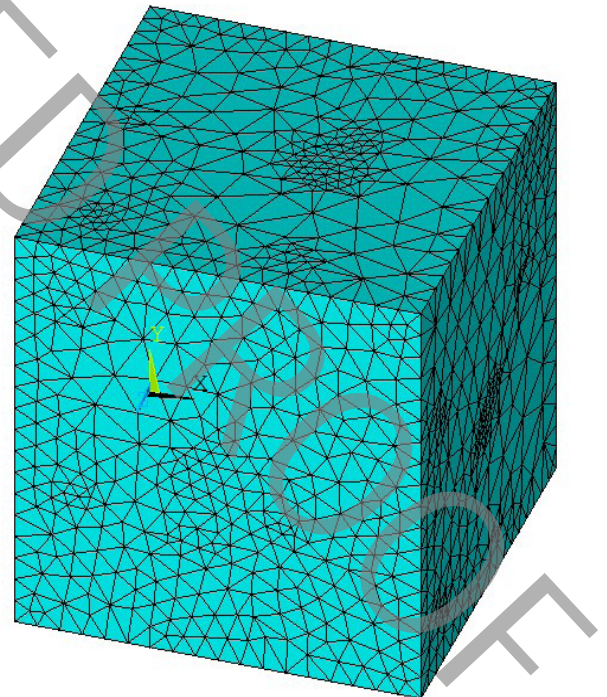


Fig. 10.

شکل ۱۰: المان حجمی و مش استفاده شده برای مدل المان محدود.

این نوع مش‌ها نیز البته با توجه به این که اندازه مش‌ها به‌گونه‌ای باشد که نتایج تغییر خاصی نداشته باشند استفاده کرد.

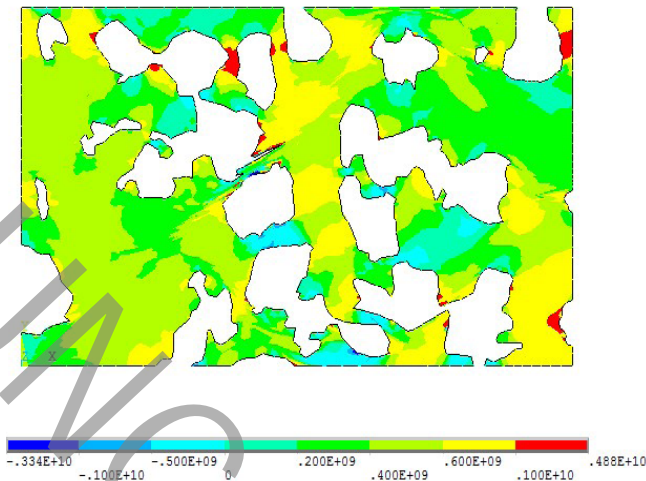
#### ۴-۳- تأثیر کسر حجمی مارتنزیت روی خصوصیات مکانیکی

برای مشاهده تأثیر کسر حجمی بر رفتار مکانیکی فولاد دوفازی، ۳ نمونه با درصد حجمی مختلف شبیه‌سازی شده است که درصد حجمی آن‌ها به ترتیب ۲۲، ۲۸ و ۳۱ درصد فاز مارتنزیت توزیع شده در فاز فریت می‌باشد. کرنش مهندسی اعمال شده بر هر یک از نمونه‌ها  $0.3$  می‌باشد و پیش‌بینی رفتار تنش کرنش فولاد دوفازی از سه المان حجمی نماینده مختلف در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

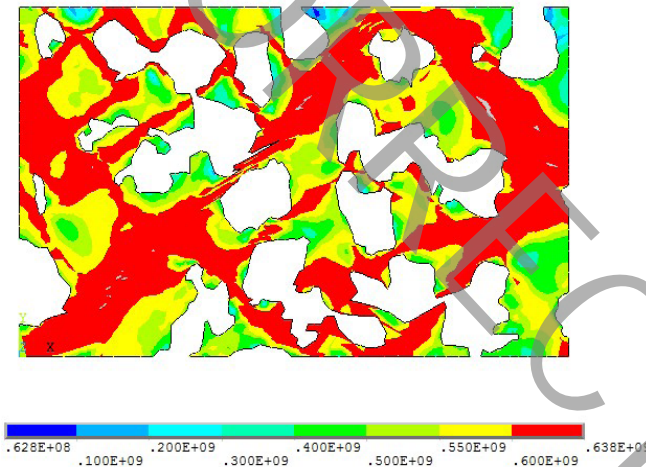
این نمونه‌ها با کسرهای حجمی مختلف با نمونه تجربی مقایسه شده‌اند که از این شکل می‌توان دریافت که هر چه درصد حجمی فاز مارتنزیت بیشتر باشد مقادیر تنش بیشتری در نمونه شبیه‌سازی شده رخ می‌دهد و سختی در نمودار تنش و کرنش بیش‌تر قابل مشاهده است. همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد در کرنش‌هایی با مقدار بالا، بستر فریت به‌عنوان فاکتور اصلی رفتار تنش کرنش محسوب شده که این واقعیت وابسته به تغییر شکل و انتقال بین مارتنزیت و فریت است.

#### ۵- الگوی تغییر شکل در میکروساختار

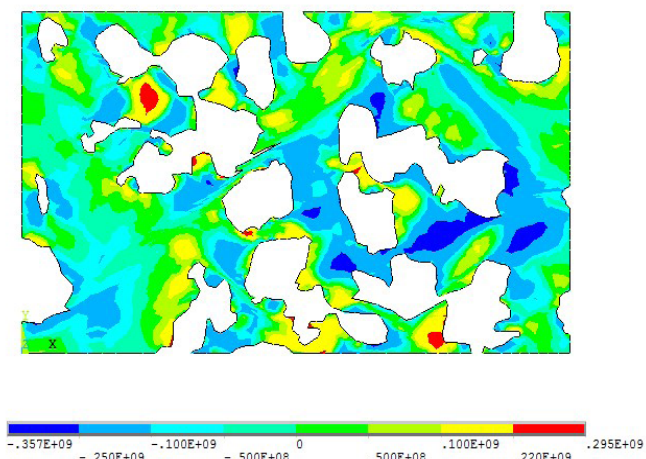
در اینجا الگوی تغییر شکل برای فولاد دوفازی در حالت دوبعدی و سه‌بعدی مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور باید ابتدا عامل اصلی ایجاد و رشد حفره را جستجو کرد و سپس بتوان الگوی تغییر شکل را بررسی کرد. حسینی و همکاران [۲] همان‌طور که در شکل ۱۴ نشان داده شده است، عامل اصلی ایجاد و رشد حفره در حالت دوبعدی را تنش‌های برشی دانستند اما برای بررسی در حالت سه‌بعدی روند تغییرات در تنش وان میز و تنش برشی و تنش هیدرواستاتیک در طول مراحل بارگذاری آورده شده است. با بررسی شکل ۱۵ مشاهده می‌شود که با بررسی تنش هیدرواستاتیک می‌توان



(الف)



(ب)



(ج)

Fig. 13.

شکل ۱۴: الگوی تغییر شکل در المان نماینده دوبعدی، در کرنش  $0.3$  (الف) تنش هیدرواستاتیک (ب) وان میز (ج) تنش برشی [۲].

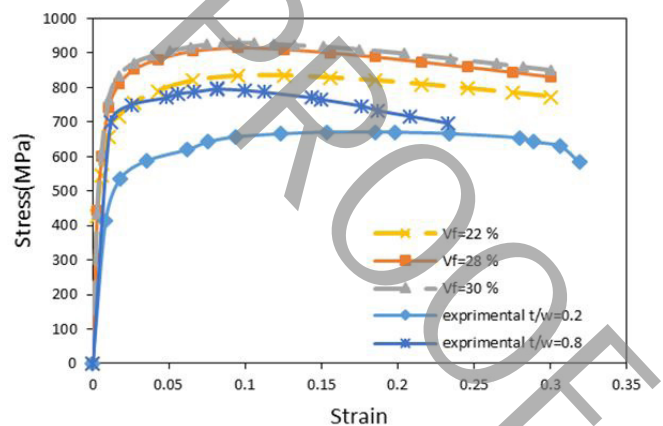


Fig. 13.

شکل ۱۳: مقایسه رفتار تنش-کرنش نمونه‌ها با درصد حجمی مارتنزیت مختلف با نتایج تجربی.



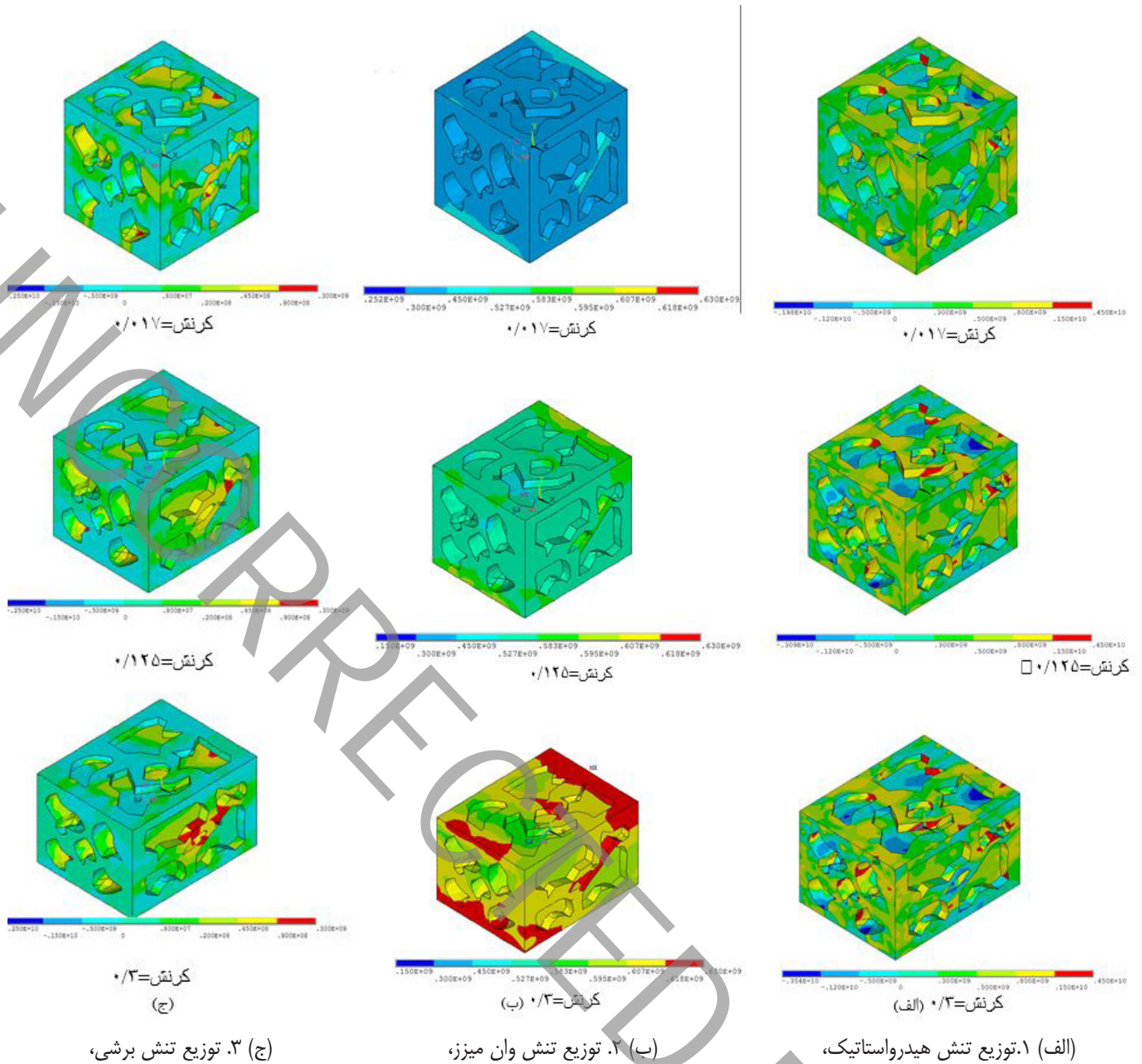


Fig. 15.

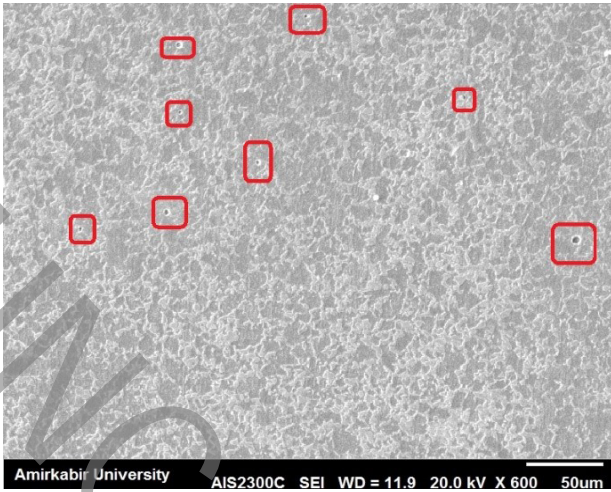
شکل ۱۵: الگوی تغییر شکل با مقادیر کرنش‌های متفاوت در نمونه با نسبت ضخامت به عرض ۸/۰، توزیع تنش‌های وان میزز، تنش برشی، تنش هیدرواستاتیک (الف) کرنش: ۰/۰۱۷ + (ب) کرنش: ۰/۰۱۲۵ + (ج) کرنش: ۰/۰۳.

آن و در نهایت شکست در حالت دوبعدی، تمرکز تنش‌های برشی است (شکل ۱۶) [۲]. اما برای حالت سه‌بعدی همان‌طور که در شکل ۱۷ نشان داده شده است، حفره‌هایی در مرز بین فازهای فریت و مارتنزیت دیده می‌شود که این حفره‌ها با افزایش تنش اعمالی رشد کرده و باعث شکست در قطعه می‌شوند. اما این حفره‌ها به صورت کروی رشد می‌کنند یعنی مقدار تنش در سه جهت  $x$ ،  $y$  و  $z$  بر روی حفره‌ها به میزان قابل توجهی بوده و موجب رشد آن‌ها در سه جهت به شکل کروی شده است و در نتیجه می‌توان تنش هیدرو استاتیک را که در بخش‌های قبلی نیز به دلیل نوع حفره‌ها به آن اشاره شده بود به‌عنوان عامل اصلی شکست در فولاد دوفازی در نظر گرفت.

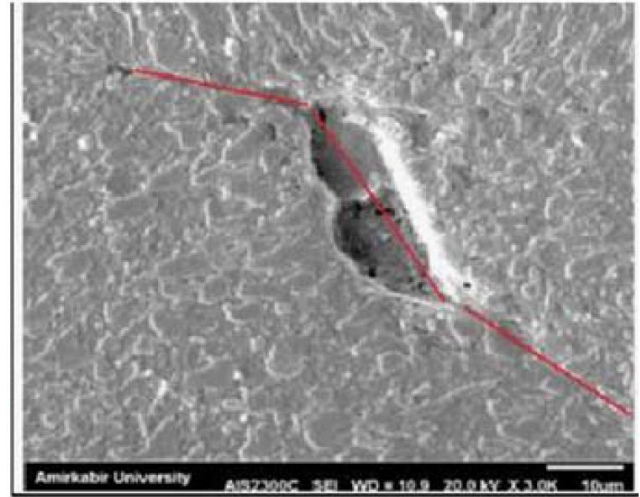
مکان شکل‌گیری حفره‌ها در میکروساختار ماده را بررسی کرد. همچنین این نتیجه مطابق حفره‌های کروی دیده‌شده در عکس‌های میکروسکوپی الکترونی نیز هستند. در نتیجه می‌توان تنش هیدرو استاتیک را به‌عنوان عامل اصلی ایجاد و رشد حفره‌ها در فولاد دوفازی در حالت سه‌بعدی در نظر گرفت و برای بررسی الگوی تغییر شکل باید تنش هیدرو استاتیک را مورد مطالعه قرار داد که امری متفاوت با آن چیزی است که در حالت دوبعدی رخ داده است.

## ۶- الگوی شکست

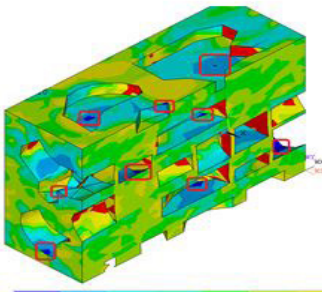
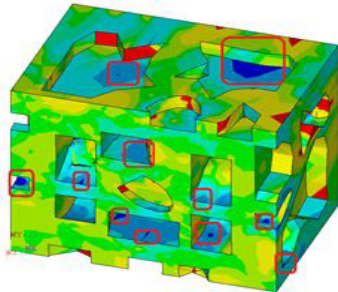
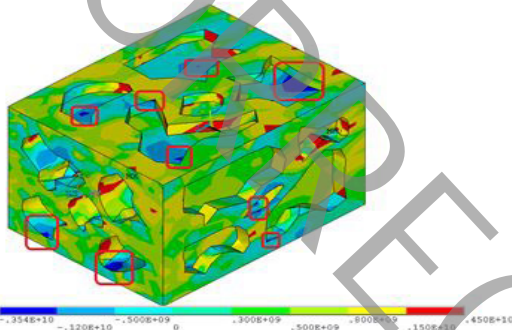
همان‌طور که در بخش‌های پیش‌گفته شد عامل اصلی ایجاد حفره و رشد



(الف)



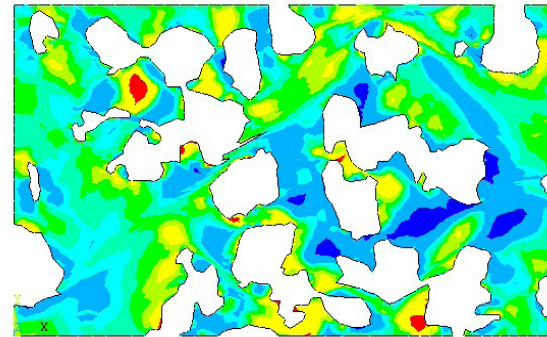
(الف)



(ب)

Fig. 17.

شکل ۱۷: شکل ۱۷ تشکیل حفره‌ها (الف) تصاویر میکروسکوپ الکترونی (ب) بخش‌های مدل المان محدود.



(ب)

Fig. 16.

شکل ۱۶: تشکیل حفره‌ها (الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی (ب) مدل المان محدود [۲].

## ۷- نتیجه‌گیری

در این تحقیق سازوکار شکست و رفتار مکانیکی فولاد به صورت تجربی و عددی با استفاده از مدل سازی یک المان حجمی نماینده سه بعدی بررسی شد. مطالعه آزمایشگاهی در سه مرحله انجام گرفت و تصاویر متالوگرافی و میکروسکوپ الکترونی به دست آمده نیز برای تحلیل سازوکار شکست و الگوی تغییر شکل مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین تأثیر عواملی مانند اندازه مش و در نظر گرفتن مدل تغییر شکل‌های مختلف بر رفتار مکانیکی، نیز مورد مطالعه قرار گرفت. همان طور که در تصاویر میکروسکوپ الکترونی و تحلیل‌های المان محدود انجام شده در این مطالعه مشخص شده است، حفره‌ها در مرز بین فازها قرار گرفته و به فرم کروی بوده لذا می‌توان محلی شدن تنش هیدرواستاتیکی را به عنوان نشان‌دهنده محل آغاز حفره‌های فولادهای دوفازی در حالت سه بعدی در نظر گرفت.



- experimental observation." *Computational Materials Science* 94 (2014): 106-113.
- [10] Kadkhodapour, J., et al. "Experimental and numerical study on geometrically necessary dislocations and non-homogeneous mechanical properties of the ferrite phase in dual phase steels." *Acta Materialia* 59.11 (2011): 4387-4394.
- [11] Paul, Surajit Kumar, and Abhay Kumar. "Micromechanics based modeling to predict flow behavior and plastic strain localization of dual phase steels." *Computational Materials Science* 63 (2012): 66-74.
- [12] Sun, Xin, et al. "Predicting failure modes and ductility of dual phase steels using plastic strain localization." *International Journal of Plasticity* 25.10 (2009): 1888-1909.
- [13] Hosseini-Toudeshky, H., and M. Jamalian. "Simulation of micromechanical damage to obtain mechanical properties of bimodal Al using XFEM." *Mechanics of Materials* 89 (2015): 229-240.
- [14] Sirinakorn, T., S. Wongwises, and V. Uthaisangsuk. "A study of local deformation and damage of dual phase steel." *Materials & Design* 64 (2014): 729-742.
- [15] Thomser, Corinna, and W. Bleck. *Modelling of the mechanical properties of Dual Phase steels based on microstructure*. Shaker Verlag GmbH, 2009.
- [16] Ayatollahi, M. R., et al. "3D Micromechanical Modeling of Failure and Damage Evolution in Dual Phase Steel Based on a Real 2D Microstructure." *Acta Mechanica Solida Sinica* 29.1 (2016): 95-110.
- [17] Uthaisangsuk, V., U. Pohl, and W. Bleck. "Modelling of damage and failure in multiphase high strength DP and TRIP steels." *Engineering Fracture Mechanics* 78.3 (2011): 469-486.
- [1] Rashid, M. S. "Dual phase steels." *Annual Review of Materials Science* 11.1 (1981): 245-266.
- [2] Hosseini-Toudeshky, Hossein, et al. "Microstructural deformation pattern and mechanical behavior analyses of DP600 dual phase steel." *Materials Science and Engineering: A* 600 (2014): 108-121.
- [3] Hosseini-Toudeshky, H., B. Anbarlooie, and J. Kadkhodapour. "Micromechanics stress-strain behavior prediction of dual phase steel considering plasticity and grain boundaries debonding." *Materials & Design* 68 (2015): 167-176.
- [4] Ohata, Mitsuru, et al. "3D-Simulation of ductile failure in two-phase structural steel with heterogeneous microstructure." *Engineering Fracture Mechanics* 77.2 (2010): 277-284.
- [5] Ramazani, A., et al. "Characterization and modelling of failure initiation in DP steel." *Computational materials science* 75 (2013): 35-44.
- [6] Paul, Surajit Kumar. "Real microstructure based micromechanical model to simulate microstructural level deformation behavior and failure initiation in DP 590 steel." *Materials & Design* 44 (2013): 397-406.
- [7] Ghadbeigi, H., et al. "Local plastic strain evolution in a high strength dual-phase steel." *Materials Science and Engineering: A* 527.18 (2010): 5026-5032.
- [8] Tasan, C. C., J. P. M. Hoefnagels, and M. G. D. Geers. "Microstructural banding effects clarified through micrographic digital image correlation." *Scripta Materialia* 62.11 (2010): 835-838.
- [9] Kadkhodapour, J., et al. "Simulation of shear failure in dual phase steels using localization criteria and