





دانشگاه صنعتی شاهرود  
دانشکده مهندسی مکانیک

گرایش ساخت و تولید  
پایان نامه کارشناسی ارشد

تحلیل تجربی تنش و کرنش در فرایندهای شکل دهی ورقهای فلزی با استفاده از  
پردازش تصاویر دیجیتال

امید ارجمند

استاد راهنما  
دکتر مهدی گردویی

استاد مشاور  
دکتر حسین خسروی

شهریور ۱۳۹۴



مدیریت تحصیلات تکمیلی  
فرم شماره (۶)

باسمه تعالی

شماره:  
تاریخ:  
ویرایش:

فرم صورت جلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) نتیجه ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای امید ارجمند به شماره دانشجویی ۹۱۲۵۸۵۴ رشته مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید تحت عنوان:  
تحلیل تجربی تنش و کرنش در فرایندهای شکل‌دهی ورق‌های فلزی با استفاده از پردازش تصاویر دیجیتال که در تاریخ ۱۳۹۴/۶/۳۰ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

قبول (با درجه: بسیار) امتیاز (۱۸٫۳۶)  دفاع مجدد  مردود

۲- بسیار خوب (۱۸ - ۱۸/۹۹)

۱- عالی (۲۰ - ۱۹)

۴- قابل قبول (۱۴ - ۱۵/۹۹)

۳- خوب (۱۶ - ۱۷/۹۹)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	استادیار	دکتر مهدی گردویی	۱- استاد راهنما
	استادیار	دکتر حسین خسروی	۲-استاد مشاور
	استادیار	دکتر محمد باقر نظری	۲- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی
	استادیار	دکتر سید هادی قادری	۳- استاد ممتحن
	استادیار	دکتر سید وحید حسینی	۴- استاد ممتحن

رئیس دانشکده:  
امضاء

تقدیم نامہ

تقدیم بہ

مادر م

سنگ صبوری کہ الغبای زندگی بہ من آموخت

## سپاس‌گزاری

بالتحمید حضرت حق (جل جلاله) که توان انجام این پایان‌نامه را به من اعطا فرمود و سلام بر ره‌پویان راه علم و دانش؛ بر خود لازم

می‌دانم تا از تمامی کسانی که مراد انجام آن یاری فرمودند، تشکر و قدردانی لازم را بجا آورم.

در ابتدا، از اساتذگران قدر و معلم اخلاقم جناب آقایان دکتر کردویی و همچنین جناب آقای دکتر خسروی کمال تشکر دارم. در پایان

از جناب آقای دکتر قادری، آقای دکتر قطعی، آقای دکتر مجرباقر نظری، مهندس سجاد ایزدپناه، حسن غفوریان نصرتی، علی‌رضا

سعادت‌فر، ابراهیم کشاورزبان و تمامی افرادی که در انجام این پایان‌نامه اینجانب را صمیمانه کمک کردند، کمال تشکر و قدردانی را

دارم.

## تعهد نامه

اینجانب امید ارجمند دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مکانیک ساخت و تولید دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود

نویسنده پایان نامه امید ارجمند تحت راهنمایی دکتر مهدی گردویی متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University Of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده ( یا بافتهای آنها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است

### تاریخ

### امضای دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است ) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

## چکیده

همبستگی بدون شک دستیابی به یک محصول بدون نقص در فرایندهای شکل‌دهی فلزات منوط به در اختیار داشتن معیار قابل استناد از حدود شکل‌دهی می‌باشد. در این پایان‌نامه با هدف استخراج منحنی‌های حد شکل‌دهی (FLD) برای ورق آلومینیومی AA6061-O از روش همبستگی تصاویر دیجیتال (DIC) استفاده شد. برای این منظور تعداد ۵ آزمون کشش درون صفحه‌ای به کمک دستگاه کشش و ۵ آزمون کشش برون صفحه‌ای به کمک قالب کشش سنبه سرکروی طراحی و آزمون‌ها تا رسیدن به آستانه‌ی گلوبی اجرا گردید. خواص مکانیکی ماده‌ی اولیه با اجرای آزمون‌های مناسب به دست آمد. کالیبراسیون متغیرهای مؤثر در روش DIC شامل: شعاع لکه، فاصله بین لکه‌ها و شعاع کرنش برای انتخاب مقادیر بهینه انجام گردید. برای این منظور در آزمون کشش تک‌محوره، دو طرف نمونه‌ها با الگوی منظم دایره‌ای و الگوی تصادفی اسپری شده بر سطح، مش‌بندی و مقدار ناهمسانگردی در جهت‌های  $0^\circ$ ،  $45^\circ$  و  $90^\circ$  نسبت به راستای نورد، با استفاده از روش‌های سنتی، DIC (مش منظم) و DIC (مش تصادفی) محاسبه و مورد مقایسه قرار گرفت. به کمک این مقادیر، سطح تسلیم ورق به ازای مقادیر مختلف کرنش ترسیم و نحوه‌ی سخت‌شوندگی مومسان ورق در مسیرهای مختلف بارگذاری به دست آمد. با استخراج مؤلفه‌های کرنش و نرخ کرنش برحسب زمان فرآیند، ملاک‌های مختلف شروع گلوبی مورد بررسی و صفر شدن نسبت نمو کرنش فرعی به اصلی بر روی نوار گلوبی به‌عنوان ملاک انشقاق کرنش انتخاب گردید. بر این اساس با ترسیم منحنی مسیر کرنش در آزمون‌های مختلف، مقدار حدی مشخص و FLD ورق به دست آمد. با در اختیار داشتن مقادیر کرنش حدی و استفاده از قانون جریان مرتبط با معیار تسلیم هیل ۴۸، مقادیر تنش حدی استخراج و منحنی‌های تنش حد شکل‌دهی (SFLD) ترسیم شد. از شبیه‌سازی المان محدود برای بررسی و تطبیق نتایج مرتبط با مسیر کرنش و FLD تجربی استفاده شد. از نوآوری‌های مهم این تحقیق می‌توان به ارائه‌ی منحنی‌های حد شکل‌دهی به انضمام مسیر کرنش مورد استفاده، اشاره کرد که به علت وابستگی اجتناب‌ناپذیر FLD به تاریخچه بارگذاری دارای اهمیت است.

**واژگان کلیدی:** همبستگی تصاویر دیجیتال، منحنی حد شکل‌دهی، شبیه‌سازی المان محدود، کشش با سنبه‌ی سرکروی، ناهمسانگردی

## فهرست عنوان‌ها

### فصل ۱ مقدمه..... ۱

- ۱-۱- شکل‌دهی فلزات و طبقه‌بندی آن ..... ۱
- ۲-۱- مفاهیم اولیه در تغییر شکل ورق‌های فلزی ..... ۲
- ۱-۲-۱- حالت تنش و کرنش در فرایندهای شکل‌دهی ورق ..... ۲
- ۲-۲-۱- ناهمسانگردی مومسان ..... ۴
- ۳-۱- شکل‌پذیری ورق‌های فلزی ..... ۶
- ۱-۳-۱- آزمون‌های تجربی تعیین FLD ..... ۹
- ۴-۱- معرفی روش‌های چاپ شبکه‌بندی ..... ۱۱
- ۵-۱- اندازه‌گیری کرنش با استفاده از همبستگی تصاویر دیجیتال ..... ۱۳
- ۶-۱- پیشینه‌ی تحقیق ..... ۱۴
- ۷-۱- اهداف تحقیق و مروری بر فصل‌های پایان‌نامه ..... ۱۷

### فصل ۲ روش تجربی..... ۱۹

- ۱-۲- مقدمه ..... ۱۹
- ۲-۲- معرفی ماده‌ی خام و آزمون‌های اولیه ..... ۱۹
- ۲-۳- اندازه‌گیری مقادیر ناهمسانگردی ..... ۲۲
- ۱-۳-۲- اندازه‌گیری مقادیر ناهمسانگردی به روش سنتی ..... ۲۳
- ۲-۳-۲- اندازه‌گیری مقادیر ناهمسانگردی با استفاده از روش DIC و شبکه‌بندی منظم ..... ۲۳
- ۳-۳-۲- اندازه‌گیری مقادیر ناهمسانگردی با استفاده از روش DIC و شبکه‌بندی تصادفی [۴۲] ..... ۲۵
- ۲-۴- اندازه‌گیری کرنش‌های حدی در آزمون‌های درون صفحه‌ای ..... ۲۹
- ۵-۲- اندازه‌گیری کرنش‌های حدی در آزمون‌های برون صفحه‌ای ..... ۳۰
- ۱-۵-۲- معرفی تجهیزات و قالب ..... ۳۰
- ۲-۵-۲- آماده‌سازی نمونه‌ها ..... ۳۶
- ۳-۵-۲- اجرای آزمون کشش برون صفحه‌ای ..... ۳۸
- ۴-۵-۲- اصلاح مقادیر کرنش ..... ۳۹
- ۲-۶- محاسبه تنش‌های حدی جهت ترسیم SFLD ..... ۴۴

### فصل ۳ شرح مدل‌سازی المان محدود..... ۴۷

- ۳-۱- مقدمه ..... ۴۷



۴۸	۲-۳- تعریف رفتار ناهمسانگردی ورق
۴۹	۱-۲-۳- رفتار ناهمسانگردی صفحه‌ای برای آلیاژ AA6061-O
۵۱	۳-۳- شبیه‌سازی فرایند کشش درون صفحه‌ای
۵۲	۴-۳- شبیه‌سازی فرایند کشش برون صفحه‌ای
۵۶	۱-۴-۳- کالیبره کردن ضریب اصطکاک در شبیه‌سازی آزمون‌های برون صفحه‌ای

## فصل ۴ ارائه نتایج و بحث..... ۵۷

۵۷	۱-۴- مقدمه
۵۷	۲-۴- خواص مکانیکی ماده‌ی اولیه
۵۹	۳-۴- کالیبراسیون متغیرهای روش DIC
۶۵	۴-۴- اندازه‌گیری تغییرات مقادیر ناهمسانگردی
۷۲	۵-۴- نحوه‌ی رشد سطح تسلیم (سخت‌شوندگی)
۷۵	۶-۴- تشخیص لحظه‌ی شروع گلویی
۸۶	۴-۷- استخراج FLD با استفاده از روش DIC و FEM
۹۵	۸-۴- استخراج SFLD ورق AA6061-O

## فصل ۵ نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها..... ۹۷

۹۷	۱-۵- نتیجه‌گیری
۱۰۰	۲-۵- پیشنهادها

## منبع‌ها..... ۱۰۱

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱- حالت تنش و کرنش برای یک المان از ورق تحت شرایط تنش صفحه‌ای [۲] ..... ۳
- شکل ۲-۱- تغییر شکل شبکه‌های دایره‌ای (الف) حالت قبل از تغییر شکل، (ب) حالت تغییر شکل یافته [۲] ..... ۴
- شکل ۳-۱- شکل نمادین از نمونه‌های برش شده نسبت به راستای نورد ..... ۵
- شکل ۴-۱- قطعه فنجان‌ی شکل تولید شده از یک ورق گرد اولیه [۵] ..... ۶
- شکل ۵-۱- مقایسه‌ی گلوپی موضعی و سراسری (الف) گلوپی موضعی، (ب) گلوپی سراسری [۲] ..... ۷
- شکل ۶-۱- FLD نمای شماتیک FLD و مسیرهای بارگذاری متداول [۳] ..... ۸
- شکل ۷-۱- منحنی تنش حد شکل‌دهی ارائه شده توسط آریکس [۹] ..... ۹
- شکل ۸-۱- نمونه شبکه‌بندی به روش تصادفی ..... ۱۲
- شکل ۹-۱- اندازه‌گیری کرنش در آزمون کشش تک‌محوره به کمک روش پردازش تصویر [۱۹, ۲۰] ..... ۱۴
- شکل ۱-۲- تجهیزات آزمون کشش تک‌محوره شامل دستگاه کشش و واحد کنترل رایانه‌ای ..... ۲۰
- شکل ۲-۲- نمونه‌ی آزمون کشش تک‌محور بر طبق استاندارد ASTM-E۸ ..... ۲۱
- شکل ۳-۲- نمونه‌ی برش شده در سه جهت مختلف نسبت به راستای نورد ..... ۲۱
- شکل ۴-۲- نحوه‌ی نصب تغییرطول‌سنج بر روی نمونه‌ی آزمون کشش ..... ۲۲
- شکل ۵-۲- اجزاء مختلف آزمون کشش تک‌محوره ..... ۲۲
- شکل ۶-۲- اندازه‌گیری مقادیر ناهمسانگردی در کشش نمونه با شبکه‌بندی منظم (الف) اجزای آزمون، (ب) خواندن تصاویر اولیه، (ج) آستانه‌گذاری ..... ۲۴
- شکل ۷-۲- آماده‌سازی نمونه‌های شبکه‌بندی شده (الف) الگوی تصادفی، (ب) الگوی منظم ..... ۲۵
- شکل ۸-۲- تغییر مکان مجموعه‌ای از لکه‌ها بین تصویرهای متوالی [۴۲] ..... ۲۶
- شکل ۹-۲- تأثیر ضرایب رابطه‌ی ۳-۲ بر جابجایی مجموعه لکه‌ها [۴۲] ..... ۲۶

- شکل ۲-۱۰- برچسب‌زنی به نقاط برحسب شدت رنگ خاکستری،  
 مقایسه‌ی ضرایب همبستگی و پیدا کردن نقاط متناظر ..... ۲۷
- شکل ۲-۱۱- نمونه‌ی مورد آزمون همراه با نمای شماتیک شعاع و فاصله‌ی لکه‌ها [۴۲] ..... ۲۹
- شکل ۲-۱۲- نمونه‌های آماده شده برای آزمون‌های درون صفحه‌ای  
 الف) هندسه و ابعاد، ب) نمونه‌های قبل از تغییر شکل ..... ۳۰
- شکل ۲-۱۳- دستگاه پرس هیدرولیک ژاو آریا ..... ۳۱
- شکل ۲-۱۴- ابعاد اصلی قالب کشش با سنبه سر کروی ..... ۳۳
- شکل ۲-۱۵- پایه‌ی قالب و متعلقات فیلم‌برداری ..... ۳۴
- شکل ۲-۱۶- دستگاه پرس و متعلقات فیلم‌برداری ..... ۳۵
- شکل ۲-۱۷- تنش مؤثر ون میزز (MPa) برای پایه‌ی قالب ..... ۳۶
- شکل ۲-۱۸- نمونه‌های اولیه آزمون کشش برون صفحه‌ای (ابعاد برحسب mm) ..... ۳۷
- شکل ۲-۱۹- دستگاه اچ الکتروشمیایی ..... ۳۷
- شکل ۲-۲۰- شبکه‌بندی نمونه‌ی N۲ (به روش الف) اچ الکتروشمیایی، ب) الگوی تصادفی ..... ۳۸
- شکل ۲-۲۱- مسیر کرنش پیش‌بینی شده برای آزمون‌های درون و برون صفحه‌ای ..... ۳۹
- شکل ۲-۲۲- حالت تنش و کرنش غشائی در فرایند کشش متقارن محوری ورق [۳] ..... ۴۰
- شکل ۲-۲۳- خطای پرسپکتیو ..... ۴۱
- شکل ۲-۲۴- مقدار خطای کرنشی پرسپکتیو نسبت به جابجایی نمونه در مقابل دوربین ..... ۴۲
- شکل ۲-۲۵- شماتیک فرایند کشش با سنبه سر کروی [۴۴] ..... ۴۳
- شکل ۳-۱- نحوه‌ی المان‌بندی نمونه‌های کشش درون صفحه‌ای ..... ۵۱
- شکل ۳-۲- مدل‌سازی اجزاء آزمون برون صفحه‌ای در محیط آباکوس ..... ۵۲
- شکل ۳-۳- اعمال شرط تقارن صفحه‌ای بر روی لبه‌های ورق ..... ۵۳
- شکل ۳-۴- تأثیرپذیری نتایج FEM از اندازه‌ی المان در تحلیل نمونه‌ی N۵ ..... ۵۴

- شکل ۳-۵- نحوه‌ی المان‌بندی نمونه‌های کشش برون صفحه‌ای ..... ۵۵
- شکل ۳-۶- تغییرات انرژی جنبشی و انرژی داخلی در تحلیل نمونه‌ی N۵ ..... ۵۵
- شکل ۳-۷- مقایسه‌ی قطر نوار گلیویی در نمونه‌ی N۵ به‌ازای ضریب اصطکاک ۰/۱۵ ..... ۵۶
- الف) حالت تجربی، ب) FEM ..... ۵۶
- شکل ۴-۱- تنش و کرنش مهندسی، برای سه جهت  $0^\circ$ ،  $45^\circ$  و  $90^\circ$  از آلیاژ AA6061-O ..... ۵۸
- شکل ۴-۲- تنش و کرنش حقیقی، برای سه جهت  $0^\circ$ ،  $45^\circ$  و  $90^\circ$  از آلیاژ AA6061-O ..... ۵۸
- شکل ۴-۳- نقاط متناظر برای مقایسه‌ی کرنش در دو روش سنتی و مش‌بندی تصادفی از نمونه‌ی M۱ ..... ۶۰
- شکل ۴-۴- خطای کرنشی به‌ازای مقادیر مختلف شعاع کرنش و شعاع لکه در نمونه‌ی M۱ ..... ۶۱
- شکل ۴-۵- زمان و تعداد دفعات میان‌یابی انجام تحلیل هم‌بستگی بر حسب شعاع لکه در نمونه‌ی M۱ ..... ۶۱
- شکل ۴-۶- خطای کرنشی و زمان تحلیل DIC بر حسب فاصله بین لکه‌ها در نمونه‌ی M۱ ..... ۶۲
- شکل ۴-۷- خطای کرنشی بر حسب شعاع کرنش در تحلیل DIC نمونه‌ی M۱ ..... ۶۳
- شکل ۴-۸- نتایج محاسبه کرنش طولی ( $\epsilon_y$ ) به روش DIC در نمونه‌ی M۱ ..... ۶۴
- شکل ۴-۹- توپوگرافی کرنش طولی نمونه‌ی M۱ حاصل از روش DIC به کمک نرم‌افزار Surfer ..... ۶۴
- شکل ۴-۱۰- نتایج محاسبه کرنش طولی آزمون N۱ به روش DIC ..... ۶۴
- الف) توزیع کرنش، ب) نمونه‌ی در حین تغییر شکل ..... ۶۵
- شکل ۴-۱۱- تغییرات مقدار ناهمسانگردی یک ورق ناهمسانگرد شدید در جهت‌های مختلف [۴۷] ..... ۶۶
- شکل ۴-۱۲- مقدار ناهمسانگردی R0 بر حسب کرنش طولی، روش سنتی و DIC با الگوی مش‌بندی منظم و تصادفی ..... ۶۷
- شکل ۴-۱۳- مقدار ناهمسانگردی R45 بر حسب کرنش طولی، روش سنتی و DIC با الگوی مش-بندی منظم و تصادفی ..... ۶۸
- شکل ۴-۱۴- مقدار ناهمسانگردی R90 بر حسب کرنش طولی، روش سنتی و DIC با الگوی مش-بندی منظم و تصادفی ..... ۶۸

- شکل ۴-۱۵- مقدار ناهمسانگردی  $R$  برحسب کرنش طولی در سه جهت نسبت به راستای نور، روش DIC با الگوی مش‌بندی منظم ..... ۶۹
- شکل ۴-۱۶- مقدار ناهمسانگردی  $R$  برحسب کرنش طولی در سه جهت نسبت به راستای نور، روش DIC با الگوی مش‌بندی تصادفی ..... ۷۰
- شکل ۴-۱۷- مقدار ناهمسانگردی  $R$  برحسب کرنش طولی با روش سنتی با الگوی مش‌بندی منظم و تصادفی ..... ۷۱
- شکل ۴-۱۸- مقدار ناهمسانگردی  $\Delta R$  برحسب کرنش طولی با روش سنتی با الگوی مش‌بندی منظم و تصادفی ..... ۷۱
- شکل ۴-۱۹- رشد سطح تسلیم آلیاژ AA6061-O به‌ازای چهار کرنش مختلف در طی فرایند، بر اساس معیار تسلیم هیل ۴۸ ..... ۷۴
- شکل ۴-۲۰- توزیع کرنش طولی نمونه در چهار لحظه از آزمون کشش، حاصل از DIC، برای نمونه‌ی M۱ ..... ۷۵
- شکل ۴-۲۱- نقطه گلوبی و ایمن بر روی نمونه‌ی آزمون M۱ ..... ۷۶
- شکل ۴-۲۲- ایجاد پدیده انشقاق در مسیر کرنش نواحی سالم و گلوبی، حاصل از DIC، برای نمونه-ی M۱ ..... ۷۷
- شکل ۴-۲۳- مسیر کرنش ناحیه‌ی گلوبی، حاصل از FEM و DIC، برای نمونه‌ی M۱ ..... ۷۸
- شکل ۴-۲۴- نسبت کرنش  $\beta$  برای نوار گلوبی برحسب زمان، حاصل از FEM، برای نمونه‌ی M۱ ..... ۷۹
- شکل ۴-۲۵- نسبت کرنش  $\beta$  برای نوار گلوبی برحسب زمان، حاصل از DIC، برای نمونه‌ی M۱ ..... ۷۹
- شکل ۴-۲۶- کرنش طولی و نرخ آن نسبت به زمان بر روی نوار گلوبی، حاصل از FEM، برای نمونه‌ی M۱ ..... ۸۰
- شکل ۴-۲۷- کرنش طولی و نرخ آن نسبت به زمان بر روی نوار گلوبی، حاصل از DIC، برای نمونه‌ی M۱ ..... ۸۰
- شکل ۴-۲۸- کرنش عرضی و نرخ آن نسبت به زمان بر روی نوار گلوبی، حاصل از FEM، برای نمونه-ی M۱ ..... ۸۱

- شکل ۴-۲۹- کرنش عرضی و نرخ آن نسبت به زمان بر روی نوار گلوبی، حاصل از DIC، برای نمونه‌ی M1 ..... ۸۱
- شکل ۴-۳۰- کرنش ضخامتی و نرخ آن نسبت به زمان بر روی نوار گلوبی، حاصل از FEM، برای نمونه‌ی M1 ..... ۸۲
- شکل ۴-۳۱- کرنش ضخامتی و نرخ آن نسبت به زمان بر روی نوار گلوبی، حاصل از DIC، برای نمونه‌ی M1 ..... ۸۳
- شکل ۴-۳۲- توزیع کرنش اصلی در نمونه‌های کشش درون صفحه‌ای، برای نتایج حاصل از FEM ..... ۸۴
- شکل ۴-۳۳- توزیع کرنش اصلی در نمونه‌های کشش درون صفحه‌ای، حاصل از DIC ..... ۸۵
- شکل ۴-۳۴- توزیع کرنش اصلی در نمونه‌های کشش برون صفحه‌ای، در نتایج حاصل از FEM ..... ۸۵
- شکل ۴-۳۵- توزیع کرنش اصلی در نمونه‌های کشش برون صفحه‌ای، حاصل از روش DIC ..... ۸۶
- شکل ۴-۳۶- مسیر کرنش برای نمونه‌های درون صفحه‌ای، حاصل از FEM ..... ۸۷
- شکل ۴-۳۷- مسیر کرنش برای نمونه‌های درون صفحه‌ای، حاصل از DIC ..... ۸۷
- شکل ۴-۳۸- مسیر کرنش برای نمونه‌های برون صفحه‌ای، حاصل از FEM ..... ۸۸
- شکل ۴-۳۹- مسیر کرنش برای نمونه‌های برون صفحه‌ای، حاصل از DIC ..... ۸۹
- شکل ۴-۴۰- کرنش‌های حدی آزمون‌های درون صفحه‌ای، مقایسه‌ی سه روش سنتی، DIC و FEM برای ورق AA6061-O ..... ۹۱
- شکل ۴-۴۱- کرنش‌های حدی آزمون‌های برون صفحه‌ای، مقایسه‌ی سه روش سنتی، DIC و FEM برای ورق AA6061-O ..... ۹۲
- شکل ۴-۴۲- منحنی حد شکل‌دهی ورق AA6061-O، به‌دست آمده از روش سنتی و DIC ..... ۹۲
- شکل ۴-۴۳- مسیر کرنش و FLD ورق AA6061-O حاصل از روش DIC ..... ۹۳
- شکل ۴-۴۴- SFLD برای نتایج حاصل از DIC و سنتی ..... ۹۶

## فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۱- مزایا و معایب روش‌های چاپ شبکه‌بندی [۱۴]..... ۱۳
- جدول ۱-۲: ترکیب شیمیایی آلومینیوم آلیاژی AA6061-O..... ۲۰
- جدول ۱-۳- مقادیر ناهمسانگردی R اندازه‌گیری شده از روش تجربی..... ۴۹
- جدول ۲-۳: نسبت‌های تنش تسلیم برای ورق AA6061-O..... ۵۰
- جدول ۳-۳: ضریب اصطکاک و فاصله قطری پارگی در آزمون‌های برون صفحه‌ای..... ۵۶
- جدول ۱-۴: خواص مکانیکی ورق AA6061-O..... ۵۹
- جدول ۲-۴: تنش سیلان ورق آلومینیوم AA6061-O در جهت‌های مختلف،..... ۷۳
- جدول ۳-۴: کرنش‌های حدی و نسبت کرنش متناظر برای هر آزمون از سه روش سنتی، DIC و FEM..... ۸۹
- جدول ۴-۴: تنش‌های حدی و نسبت تنش مرتبط برای هر آزمون از سه روش سنتی، DIC و FEM..... ۹۵

### فهرست نشانه‌ها

$n(s)$	شماره المان	$C_{cc}$ و $C_{ls}$	ضرایب هم‌بستگی
$r$	فاصله‌ی شعاعی	$D$	قطر حفره قالب
$R$	مقدار ناهمسانگردی	$d_0$	قطر اولیه‌ی مش
$\bar{R}$	مقدار ناهمسانگردی نرمال	$d_1$	قطر بزرگ مش پس از تغییر شکل
$\Delta R$	ناهمسانگردی صفحه‌ای	$d_2$	قطر کوچک مش پس از تغییر شکل
$R_d$	شعاع گوشه قالب	$D_f$	قطر نوار پارگی
$R_p$	شعاع سنبه	$f_m$	شدت خاکستری بودن
$r_{ij}$	نسبت تنش‌های تسلیم	$g_m$	شدت خاکستری بودن
$s$	ثانیه	$h$	عمق کشش هر نقطه
$st-r$	شعاع کرنش	$h_t$	عمق ظرف
$sub-r$	شعاع لکه	$H_d$	ارتفاع ماتریس
$sub-sp$	فاصله‌ی لکه‌ها	$H_h$	ارتفاع ورق‌گیر
$t$	ضخامت ورق	$k$	ضریب سختی در معادله توانی
$x$	محور افقی کارت‌زین	$L_s$	طول تصویر
$X$	فاصله قطعه تا نقطه کانونی	$L_0$	طول قطعه
$y$	محور عمودی کارت‌زین	$M1, \dots, M5$	شماره‌ی نمونه کشش درون صفحه
$\alpha$	نسبت تنش‌ها	$M1, \dots, M5$	شماره‌ی نمونه کشش برون صفحه
		$n$	توان کرنش سختی در معادله توانی



$\varepsilon_1$	کرنش اصلی	$\alpha^*$	نسبت تنش‌ها در لحظه گلوبی
$\varepsilon_2$	کرنش فرعی	$\beta^*$	نسبت کرنش‌ها در لحظه گلوبی
$\varepsilon_{i0}; (i = \theta, \emptyset)$	مؤلفه‌های کرنش DIC	$\beta$	نسبت کرنش‌ها
$\varepsilon_\theta$	کرنش واقعی محیطی	$\gamma_{\theta\emptyset}$	کرنش برشی
$\varepsilon_\emptyset$	کرنش واقعی نصف‌النهاری	$\Delta\varepsilon_x$	تفاضل کرنش DIC و سنتی در راستای $x$
$\sigma_b$	تنش تسلیم در بارگذاری دو محور یکسان	$\Delta\varepsilon_y$	تفاضل کرنش DIC و سنتی در راستای $y$
$\sigma_0$	تنش تسلیم مرجع	$\Delta\varepsilon$	خطای کرنشی
$\sigma_\theta$	تنش در جهت محیطی	$\Delta\varepsilon_c$	خطای کرنشی انحناء
$\sigma_\emptyset$	تنش در جهت نصف‌النهاری	$\Delta\varepsilon_{pp}$	خطای کرنش پرسپکتیو
$\bar{\sigma}_{ij}$	تنش تسلیم بر روی صفحه $i$ ، در جهت $j$	$\varepsilon_l$	کرنش طولی
$\rho$	شعاع سنبه	$\varepsilon_x$	کرنش در جهت $x$ با روش هم‌بستگی تصاویر
$\tau_{\theta\emptyset}$	تنش برشی	$\varepsilon_t$	کرنش ضخامتی
$\tau^0$	تنش تسلیم برشی	$\varepsilon_y$	کرنش در جهت $y$ با روش هم‌بستگی تصاویر
		$\varepsilon_w$	کرنش عرضی



## فصل ۱ مقدمه

### ۱-۱- شکل‌دهی فلزات<sup>۱</sup> و طبقه‌بندی آن

شکل‌دهی فلزات، علم بررسی اصول و روش‌های تغییر شکل فلزات با اعمال نیرو به آن با هدف تولید یک محصول صنعتی از یک ماده خام اولیه می‌باشد که در قرن اخیر با جمع‌آوری تحقیقات علمی و تجربه‌های عملی مراکز پژوهشی و صنعتی پیشرفت‌های بسیار زیادی در این زمینه ایجاد شده است. هر فرایند شکل‌دهی فلزات شامل متغیرهای ورودی، از قبیل جنس قطعه یا شمش اولیه و هندسی آن، ابزار شکل‌دادن (از لحاظ ماده و هندسه)، شرایط موجود در فصل مشترک ابزار و ماده، حالت تنش در منطقه تغییر شکل، نوع و نحوه‌ی کاربرد ابزار، خصوصیات محصول نهایی و نهایتاً شرایط محیط کارگاه می‌باشد که لازم است جهت دستیابی به یک عملیات شکل‌دهی موفق شناخت کافی از همه موارد فوق وجود داشته باشد.

فرایندهای شکل‌دادن فلزات به‌صورت کلی زیر قابل تقسیم‌بندی است:

الف) شکل‌دهی حجمی<sup>۱</sup>

---

<sup>۱</sup> Metal forming

ب) شکل‌دهی ورق‌ی فلزات<sup>۲</sup>

شکل‌دهی حجمی فلزات به مواردی اطلاق می‌شود که یک حجم زیادی از فلز به‌صورت شمش، میلگرد و یا تسمه ضخیم بر اثر اعمال نیرو تغییر شکل داده و به شکل نهایی تبدیل شود. حالت تنش اعمالی در این فرایند متأثر از هندسه، شرایط مرزی و نوع بارگذاری کاملاً سه محوره است. فرایندهای آهنگری، نورد و روزن‌رانی<sup>۳</sup> از جمله این روش‌ها است.

در فرایند شکل‌دهی ورق‌های فلزی تغییر شکل مومسان بر روی ورق مسطح انجام و یک قطعه با شکل خاص به وجود می‌آید. این فرایندها اغلب در قالب‌های سنبه - ماتریس به‌صورت یک یا چند مرحله اجرا می‌شود که از فرایندهایی مانند کشش عمیق و خم‌کاری می‌توان در این گروه نام برد. در این روش‌ها، پدیده‌ی برگشت فنری و تغییرات ناخواسته هندسی حاصل از آن دارای اهمیت است [۱].

## ۲-۱- مفاهیم اولیه در تغییر شکل ورق‌های فلزی

### ۱-۲-۱- حالت تنش و کرنش در فرایندهای شکل‌دهی ورق

یک ویژگی متداول بسیاری از فرایندهای شکل‌دهی ورق این است که تنش عمود بر سطح ورق در مقایسه با تنش‌های واقع در صفحه‌ی ورق (تنش‌های غشایی) کوچک است زیرا که فشار تماس بین ورق و قالب عموماً بسیار کمتر از تنش تسلیم ماده است. در این شرایط یک ساده‌سازی عمده صورت می‌گیرد که در چنین فرایندی تغییر شکل تنش صفحه‌ای<sup>۴</sup> نامیده می‌شود. در شکل ۱-۱ یک المان از ورق فلزی تحت مؤلفه‌های کرنش  $\varepsilon_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) و تنش‌های اصلی  $\sigma_i$  ( $i = 1, 2, 3$ )

<sup>1</sup> Bulk metal forming

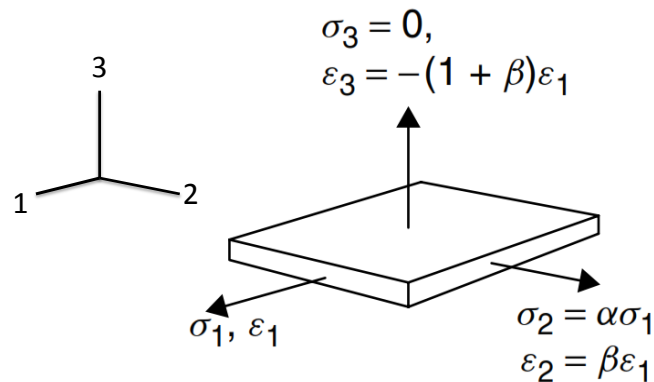
<sup>2</sup> Sheet metal forming

<sup>3</sup> Extrusion

<sup>4</sup> Plane stress

نمایش داده شده است. زیرنویس 1 و 2 مرتبط با مؤلفه‌های درون صفحه‌ای و زیرنویس 3 مرتبط با مؤلفه‌ی عمود بر صفحه می‌باشد.

در تحلیل مکانیکی فرایندهای شکل‌دهی ورق به کرنش درون صفحه‌ای کوچک‌تر، کرنش فرعی<sup>۱</sup> و به کرنش درون صفحه‌ای بزرگ‌تر، کرنش اصلی<sup>۲</sup> گفته می‌شود. اگر کرنش فرعی و  $\varepsilon_1$  کرنش اصلی باشد، نسبت کرنش و تنش به ترتیب  $\beta = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$  و  $\alpha = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$  تعریف می‌شود. بر این اساس با فرض ثابت بودن حجم کرنش ضخامتی را می‌توان به صورت  $\varepsilon_3 = -(1 + \beta)\varepsilon_1$  نوشت.

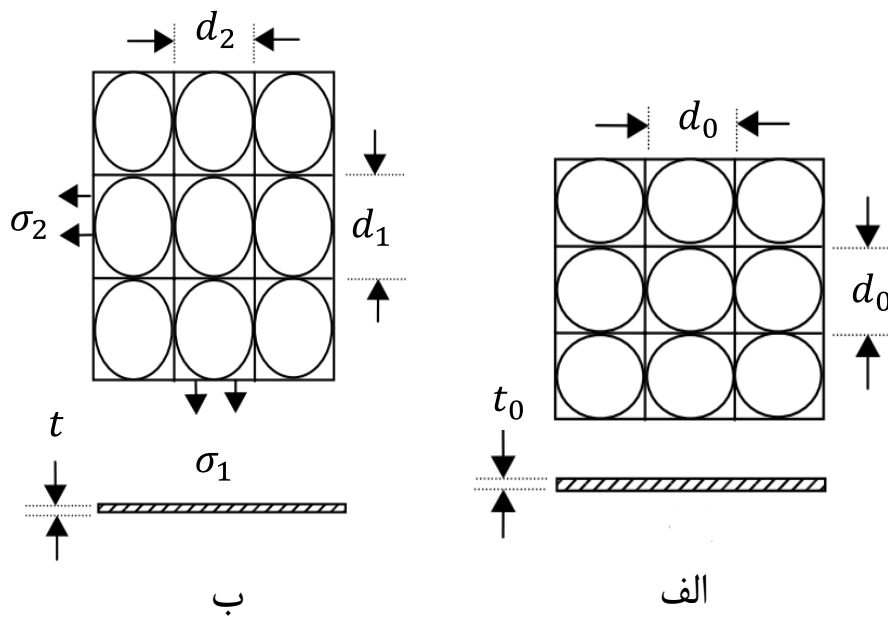


شکل ۱-۱- حالت تنش و کرنش برای یک المان از ورق تحت شرایط تنش صفحه‌ای [۲]

در شکل (۱-۲-الف) سطح ورق فلزی مش‌بندی با الگوی منظم دایره‌ای به قطر اولیه  $d_0$  و ضخامت  $t_0$ ، نمایش داده شده است. پس از تغییر شکل، مطابق شکل (۱-۲-ب) دایره‌ها به بیضی‌هایی با قطر بزرگ‌تر  $d_1$  و کوچک‌تر  $d_2$  تبدیل می‌شود و ضخامت نهایی ورق به  $t$  خواهد رسید.

<sup>1</sup> Minor strain

<sup>2</sup> Major strain



شکل ۱-۲- تغییر شکل شبکه‌های دایره‌ای (الف) حالت قبل از تغییر شکل، (ب) حالت تغییر شکل یافته [۲]

در این صورت کرنش‌های اصلی، فرعی و ضخامتی پس از تغییر شکل به ترتیب با روابط ۱-۱، ۲-۱ و ۳-۱ محاسبه می‌شوند [۲].

$$\varepsilon_1 = \ln\left(\frac{d_1}{d_0}\right) \quad 1-1$$

$$\varepsilon_2 = \ln\left(\frac{d_2}{d_0}\right) \quad 2-1$$

$$\varepsilon_3 = \ln\left(\frac{t}{t_0}\right) \quad 3-1$$

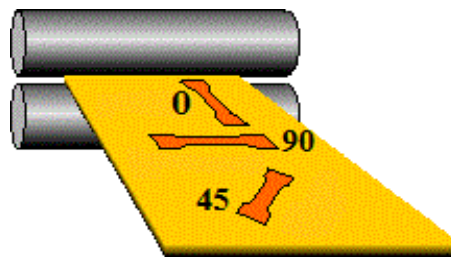
### ۱-۲-۲- ناهمسانگردی مومسان<sup>۱</sup>

ناهمسانگردی مومسان که در ورق‌های فلزی که از ایجاد دانه‌بندی جهت‌دار در اثر فرایند نورد نشأت می‌گیرد؛ با مقدار  $R$  طبق رابطه‌ی ۴-۱ تعریف و محاسبه می‌شود.

<sup>1</sup> Plastic anisotropy

$$R = \frac{\varepsilon_{\omega}}{\varepsilon_t} = \frac{\varepsilon_{\omega}}{-\varepsilon_{\omega} - \varepsilon_t} \quad 4-1$$

در این رابطه  $\varepsilon_t$  و  $\varepsilon_{\omega}$  به ترتیب کرنش طولی، عرضی و ضخامتی در حین کشش تک‌محوری ورق پس از ۱۰٪ تا ۲۰٪ تغییر طول نسبی می‌باشد [۳]. این مقدار را می‌توان با تغییر زاویه‌ی برش قطعه ( $\theta$ ) نسبت به یک راستای مرجع که انتخاب آن قراردادی است (معمولاً راستای نورد ورق) محاسبه و آن را با  $R_{\theta}$  نمایش داد.



شکل ۱-۳- شکل نمادین از نمونه‌های برش شده نسبت به راستای نورد

دو مقدار دیگر که در بررسی ناهمسانگردی ورق‌ها عامل و مطرح می‌باشد عبارت است از مقدار ناهمسانگردی نرمال<sup>۱</sup> ( $\bar{R}$ ) و مقدار ناهمسانگردی صفحه‌ای<sup>۲</sup> ( $\Delta R$ ) که مطابق با روابط زیر محاسبه می‌شود [۴].

$$\bar{R} = \frac{R_0 + R_{90} + 2R_{45}}{4} \quad 5-1$$

$$\Delta R = \frac{R_0 + R_{90} - 2R_{45}}{2} \quad 6-1$$

$\bar{R}$  بیان‌کننده‌ی میزان متوسطی از تفاوت رفتار مکانیکی بر روی صفحه و راستای ضخامت می‌باشد؛ که هر چه مقدار آن افزایش یابد، بدان معنی است که در یک کشش ثابت سهم کرنش ضخامتی نسبت به کرنش عرضی کمتر و مقاومت ورق به نازک شدن افزایش می‌یابد. این به‌منزله‌ی افزایش

<sup>۱</sup> Normal anisotropy factor

<sup>۲</sup> Planar anisotropy factor

کشش‌پذیری ورق در فرایندی مانند کشش عمیق خواهد بود. اگر ورق در جهت‌های مختلف بر روی صفحه دارای مقدار ناهمسانگردی نرمال یکسان باشد به آن، همسانگرد صفحه‌ای<sup>۱</sup> گویند. در این صورت فنجان کشیده شده از یک ورق گرد، کاملاً استوانه‌ای خواهد بود (شکل ۱-۴-الف).



ب

$$\Delta R \neq 0$$

الف

$$\Delta R = 0$$

شکل ۱-۴-۱- قطعه فنجانی شکل تولید شده از یک ورق گرد اولیه [۵]

در اغلب ورق‌های فلزی به دلیل وجود ناهمسانگردی صفحه‌ای،  $\Delta R \neq 0$  بوده لذا فنجان کشیده شده، دارای لبه‌های نابرابر از لحاظ ارتفاع می‌باشد که این عیب گوشواره‌ای شدن<sup>۲</sup> نامیده می‌شود (۱-۴-ب).

### ۱-۳- شکل‌پذیری<sup>۳</sup> ورق‌های فلزی

ایجاد یک فرآیند بهینه‌ی شکل‌دهی مرهون در اختیار داشتن اطلاعات قابل استناد لازم از شکل‌پذیری می‌باشد. تغییر شکل ورق از شکل اولیه به شکل مطلوب، با ایجاد شدن ناپایداری مومسان و یا با ایجاد ناپایداری‌های ساختاری مانند چین‌خوردگی محدود می‌شود. نازک شدن خارج از کنترل سطح مقطع در حال کشش را گلویی شدن<sup>۴</sup> می‌نامند. مطابق شکل ۱-۵ دو نوع گلویی وجود دارد: گلویی سراسری<sup>۵</sup> و گلویی موضعی<sup>۱</sup>. در آغاز فرایند کشش ورق، تغییر شکل یکنواخت

<sup>1</sup> Planar isotropic

<sup>2</sup> Earing

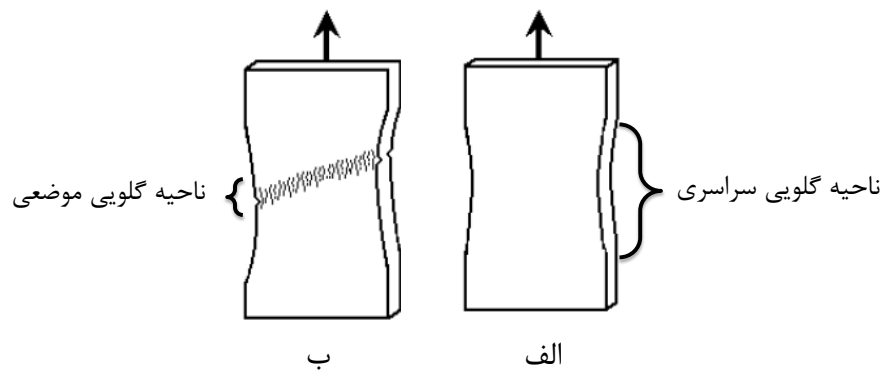
<sup>3</sup> Formability

<sup>4</sup> Necking

<sup>5</sup> Diffused necking



است و کاهش مساحت در تمامی نواحی توزیع می‌شود. با افزایش نیرو، گلوبی سراسری آغاز می‌شود که در این شرایط تغییر شکل یکنواخت نیست. با آغاز گلوبی سراسری تغییر شکل عرضی در یک ناحیه‌ی نسبتاً وسیع تمرکز می‌یابد. سرانجام زمانی فرا می‌رسد که نازک شدن ضخامت در یک نوار نازک به پهنای نزدیک به ضخامت ورق تمرکز می‌یابد که به آن گلوبی موضعی می‌گویند [۶، ۷]؛ گلوبی موضعی به تندی به پارگی ورق می‌انجامد.

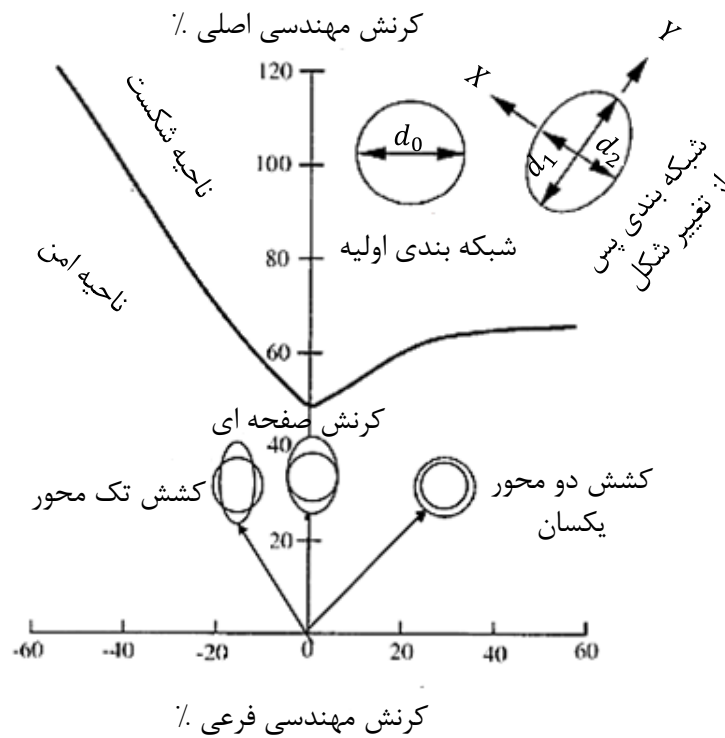


شکل ۱-۵- مقایسه‌ی گلوبی موضعی و سراسری (الف) گلوبی موضعی، (ب) گلوبی سراسری [۲]

به‌منظور تدوین یک روش جامع در تخمین پارگی ورق در فرایندهای شکل‌دهی با مسیرهای مختلف بارگذاری صفحه‌ای منحنی‌های حد شکل‌دهی<sup>۲</sup> (FLD) ارائه گردید. این منحنی‌ها در شرایطی که ورق تحت بارگذاری دومحوری قرار دارد، بر روی صفحه‌ی کرنش‌های اصلی ( $\epsilon_1$ ) و فرعی ( $\epsilon_2$ ) ترسیم می‌شود [۸]. FLD نواحی ایمن و نواحی منجر به پارگی را از یکدیگر جدا می‌کند که می‌توان آن را بر روی صفحه کرنش‌های مهندسی یا حقیقی ترسیم نمود. در شکل ۱-۶ یک نمونه FLD و مسیرهای کرنش متداول در شکل‌دهی ورق نمایش داده شده است.

<sup>1</sup> Localized necking

<sup>2</sup> Forming Limit Diagram

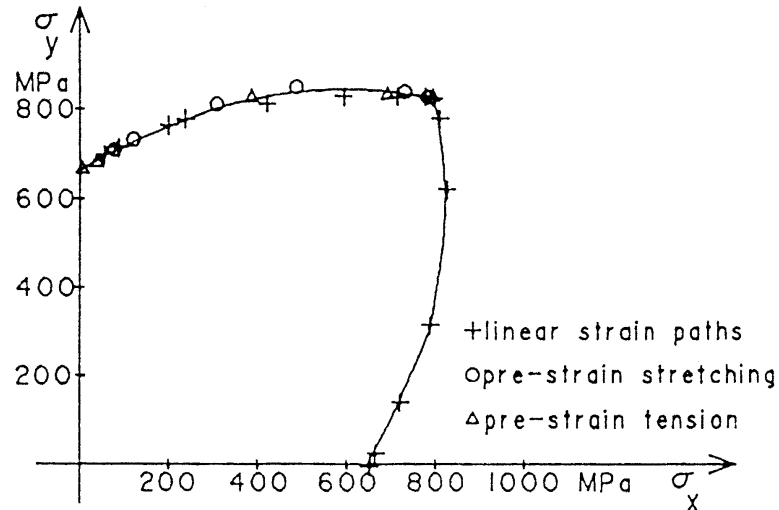


شکل ۱-۶- FLD نمای شماتیک FLD و مسیرهای بارگذاری متداول [۳]

منحنی‌های حد شکل‌دهی را بر اساس تنش‌های حدی نیز می‌توان بیان کرد. این منحنی‌ها که مستقل از مسیر بارگذاری است توسط آریکس ارائه شد [۹]. در شکل ۱-۷ منحنی تنش حد شکل‌دهی<sup>۱</sup> (SFLD) ارائه شده توسط او برای آلیاژ آلومینیوم که دارای پیش‌کرنش بوده، نمایش داده شده است. از FLD و SFLD می‌توان به‌عنوان یک معیار آسیب<sup>۲</sup> برای پیش‌بینی شکست در فرایندهای شکل‌دهی ورق‌های فلزی استفاده کرد.

<sup>1</sup> Stress Forming Limit Diagram

<sup>2</sup> Damage criterion



شکل ۱-۷- منحنی تنش حد شکل دهی ارائه شده توسط آریکس [۹]

### ۱-۳-۱- آزمون‌های تجربی تعیین FLD

FLD را به دو طریق تئوری و تجربی می‌توان به دست آورد. استاندارد ASTM E2218 و ISO12004 نحوه‌ی استخراج این منحنی‌ها را از آزمون‌های تجربی تشریح کرده است.

در روش تجربی پس از آنکه سطح ورق توسط دوایری هم‌اندازه به قطر  $d_0$  شبکه‌بندی شد، فرآیند تغییر شکل کششی ورق تا رسیدن به آستانه‌ی پارگی صورت می‌گیرد. این فرآیندها عموماً کشش تک‌محوری، اتساع ورق‌های گرد و مستطیل شکل با استفاده از سنبه‌ی سرکروی و همچنین خم‌کاری ورق در قالب‌های U و V شکل می‌باشند. مش‌های دایروی، در اثر تغییر شکل مومسان به بیضی با قطر بزرگ  $d_1$  و قطر کوچک  $d_2$  تبدیل خواهد شد. در مجاورت ناحیه‌ی پاره شده، کرنش‌های حدی اصلی و فرعی با روابط ۱-۱ تا ۳-۱ محاسبه می‌شود. محاسبه‌ی این مقادیر برای دایره‌هایی که روی نوار باریک پارگی قرار دارد مردود می‌باشد و برای اندازه‌گیری باید حداقل یک قطر از نوار باریک فاصله گرفت. نقاط مرتبط بر روی صفحه‌ی کرنش  $\epsilon_1$  و  $\epsilon_2$  مشخص شده و از این نقاط، FLD به دست می‌آید.

نخستین بار کیلر و بکهفن در سال ۱۹۶۴ کرنش‌های حدی را در کشش ورق‌های فلزی به‌طور تجربی به‌دست آوردند. آن‌ها نمودارهای حد شکل‌دهی را برای ورق‌های فولادی کم کربن رسم کردند [۱۰]. به‌طور کلی تعیین تجربی نمودارهای حد شکل‌دهی به دو روش انجام می‌شود: کشش درون صفحه‌ای<sup>۱</sup> و کشش برون صفحه‌ای<sup>۲</sup>. در حالت نخست با اعمال نیروی کششی به طرفین ورق، قطعه به‌صورت یکنواخت کشیده شده و ورق دچار تغییر شکل خمشی نمی‌شود. برای دستیابی به مسیرهای مختلف کرنش نمونه‌هایی با هندسه و اندازه‌های گوناگون بکار گرفته می‌شود.

آزمون‌های گروه دوم مرتبط با کشش ورق در داخل قالب سنبه و ماتریس است که به‌علت اعمال نیرو در جهت عمود بر صفحه ورق به‌عنوان کشش برون صفحه‌ای شناخته می‌شود. تعدادی از آزمون‌های کشش برون صفحه‌ای شامل: روش مارسنیاک [۱۱]، ناکازیما [۱۲]، خم‌کاری ورق در قالب U , V شکل می‌باشد.

در این آزمون، مسیرهای لازم برای کرنش را می‌توان به کمک روان‌کارهای مختلف یا با استفاده از نمونه‌هایی با شکل متفاوت ایجاد کرد. اندازه‌گیری کرنش در نمونه‌ی تغییر شکل یافته برون صفحه‌ای دشوارتر و با خطای بیشتری نسبت به نمونه‌ی درون صفحه‌ای همراه است.

<sup>1</sup> In-plane stretching

<sup>2</sup> Out of plane stretching

### ۱-۴- معرفی روش‌های چاپ شبکه‌بندی

به‌منظور ایجاد یک شبکه‌بندی مناسب از روش‌های مختلف چاپ استفاده شده است که هر کدام دارای مزایا و معایب خاص خود می‌باشد. این روش‌ها دارای تفاوت‌هایی از قبیل دقت، کیفیت، هزینه و وضوح می‌باشند. برای چاپ شبکه‌ها باید از روشی بهره گرفت که ماندگاری بیشتری داشته باشد. در ادامه مهم‌ترین این روش‌ها بیان و مورد مقایسه قرار می‌گیرد [۱۴].

#### • چاپ شبکه‌بندی توسط رنگ و جوهر

این روش دارای قدمت ۲۰۰۰ ساله در چین بوده که با نام سیلک اسکرین<sup>۱</sup> نیز شناخته می‌شود و جزء روش‌های آسان و مقرون به‌صرفه شبکه‌بندی می‌باشد. در این روش بعد از آماده‌سازی الگو با طرح مورد نظر آن را روی ورق قرار می‌دهند و با حرکت یک تیغه روی سطح الگو، رنگ از روزنه‌های الگو به ورق منتقل و الگوی مطلوب ایجاد می‌شود. از مهم‌ترین مزایای آن می‌توان به‌سادگی، مقرون به‌صرفه بودن و امکان استفاده برای تمامی مواد و همچنین ایجاد شبکه‌های رنگی با دقت بالا اشاره نمود. از طرفی میزان صحت عملکرد این روش وابسته به میزان دقت ساخت الگو می‌باشد. در مجموع این روش دارای عملکرد نسبتاً خوبی بوده ولی به‌علت عدم پایداری شبکه‌ها تحت تأثیر سایش و دمای موضعی بالای فرایندهای شکل‌دهی مورد استقبال جدی قرار نگیرد [۱۴].

#### • روش چاپ شبکه‌بندی توسط الکتروشیمیایی

در این روش که اولین بار توسط کیلر انجام گردیده [۱۵]، منبع انرژی که با توجه به رنگ نهایی مورد نظر از نوع مستقیم یا متناوب انتخاب می‌شود، از یک سو به ورق و از سوی دیگر به الکتروود متصل می‌شود. ورق در زیر الگوی مورد نظر قرار گرفته و با اتصال جریان الکتریکی در حین حرکت الکتروود بر روی الگو، فقط نواحی دایره‌ای یا بیضوی الگو اجازه عبور محلول اچ را می‌دهند و به این صورت طرح مورد نظر بر روی ورق حکاکی می‌شود. از مهم‌ترین مزایای این روش می‌توان به ایجاد الگوهای

<sup>۱</sup> Silk screen

دائمی با عمق اثر تقریبی  $30\mu\text{m}$  اشاره نمود. این روش دارای نقاط ضعفی مانند نیاز به رسانا بودن مواد و زمان بر بودن فرایند می‌باشد [۱۴, ۱۷].

#### • روش حکاکی به‌وسیله اشعه لیزر

این روش یکی از مطمئن‌ترین و بهترین روش‌های شبکه‌بندی است، از مهمترین معایب آن می‌توان به پرهزینه و زمان بر بودن و همچنین عدم امکان استفاده از آن برای ورق‌های مشکی رنگ اشاره نمود [۱۸].

#### • روش چاپ شبکه‌بندی تصادفی به‌وسیله اسپری

این روش در همبستگی تصویر مورد استفاده قرار می‌گیرد. ابتدا توسط اسپری یک لایه سفید رنگ بر روی سطح کشیده و بعد از آن لکه‌های مشکی اسپری می‌شود [۱۹]. از مزایای این روش می‌توان سرعت بالا در ایجاد الگو، کم‌هزینه بودن و دوام نسبتاً خوب آن اشاره نمود. در شکل ۱-۸ نمونه‌ای از قطعه مش‌بندی شده به روش الگوی تصادفی نمایش داده شده است.



شکل ۱-۸- نمونه شبکه‌بندی به روش تصادفی

در مجموع هر کدام از روش‌های چاپ الگو دارای مزایا و معایب خاص خود بوده که باید با توجه به فرایند مورد آزمون، نیاز به صحت الگوها در انتهای فرایند، دقت و کیفیت تصویر، دمای کاری، کیفیت و هزینه یکی از آن‌ها را برگزید. در جدول ۱-۱ مزایا و معایب هر یک از روش‌های چاپ شبکه بر روی ورق بیان شده است.

جدول ۱-۱- مزایا و معایب روش‌های چاپ شبکه‌بندی [۱۴]

A: عالی، B: خوب، C: متوسط، D: ضعیف

روش	کیفیت و وضوح	مقاومت به سایش	مقاومت به دما	عدم وابستگی به جنس	صرفه اقتصادی	زمان بر بودن	دقت
چاپ رنگ	A	D	D	A	A	A	A
الکتروشیمیایی	B	A	A	D	C	B	B
اشعه لیزر	A	A	A	C	D	C	A
اسپری رنگ (شبکه تصادفی)	A	D	D	A	A	A	A

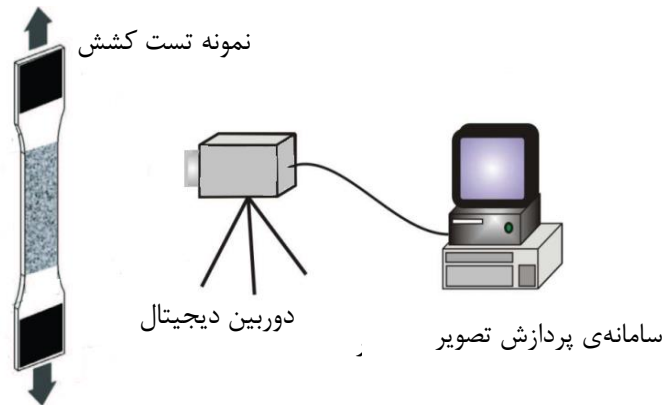
### ۱-۵- اندازه‌گیری کرنش با استفاده از هم‌بستگی تصاویر دیجیتال<sup>۱</sup>

برای اندازه‌گیری کرنش‌های اصلی و فرعی بر روی سطح ورق، نخست شبکه تغییر شکل یافته باید مورد اندازه‌گیری قرار گیرد. برای این منظور از ابزارهایی مانند کولیس دیجیتال، پروفایل پروژکتور، نوار مایلر و روش پردازش تصاویر دیجیتال استفاده می‌شود که در این پژوهش به صورت خاص از روش هم‌بستگی تصاویر دیجیتال استفاده شده که در واقع زیر مجموعه پردازش تصاویر دیجیتال می‌باشد.

هم‌بستگی تصاویر دیجیتال روش نوری است که با ردیابی و پیگیری در تغییرات عکس‌های متوالی اندازه‌گیری‌های دقیق دو و سه‌بعدی ارائه می‌دهد. کاربردهای امروزه DIC شامل تحلیل تصاویر، فشرده‌سازی تصاویر و برآورد کرنش در آزمون‌های مکانیکی حتی در مقیاس نانو می‌باشد. این روش در سال‌های اخیر با پیشرفت رایانه‌ها، دوربین‌های دیجیتال و لامپ‌های سفید (LED) توسعه و بهبود یافته است. تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مواد با این روش دارای دقت و سرعت بسیار بالایی

<sup>۱</sup> Digital Image Correlation (DIC)

می‌باشد. در شکل ۱-۱۴ سامانه‌ی اندازه‌گیری کرنش اندازه‌گیری کرنش در آزمون کشش تک‌محوری یک ورق فلزی نشان داده شده است.



شکل ۱-۹- اندازه‌گیری کرنش در آزمون کشش تک‌محوره به کمک روش پردازش تصویر [۱۹، ۲۰]

برای تشخیص نقاط متناظر از تصاویر مختلف، روش DIC متکی بر حداکثر ضریب هم‌بستگی<sup>۱</sup> می‌باشد. به این صورت که با بررسی چندین عکس پی‌درپی و بررسی شدت نور پیکسل‌ها در نقاط مختلف، تابع تغییر شکل مرتبط را استخراج می‌نمایند [۲۱]. در این روش، یک الگوریتم تکرار شونده می‌تواند به منظور تسریع در به حداکثر رساندن ضریب هم‌بستگی با استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی غیرخطی استفاده گردد. لازم به ذکر است که امروزه سیستم‌های خودکاری به نام تحلیل‌گرهای شبکه دایره‌ای، به کمک روش هم‌بستگی تصاویر دیجیتال برای اندازه‌گیری ابعاد دایره‌ها و نمایش کرنش نیز به کار می‌روند که دارای دقت خوبی است. شرح مبانی DIC در بخش ۲-۳-۳ بیان شده است.

### ۱-۶- پیشینه‌ی تحقیق

در اواخر قرن بیستم با رشد صنایع مرتبط با تغییر شکل ورق‌های فلزی تحقیقات بسیار گسترده‌ای در زمینه بهبود روش‌های شکل‌دهی و به حداقل رساندن عیوب آن‌ها انجام گردید. روش سنتی اندازه‌گیری کرنش مومسان در ورق‌های فلزی برای نخستین بار توسط کیلر و بکهفن [۱۰] برای سمت

<sup>۱</sup> Correlation coefficient



راست FLD انجام شد. سپس گودوین [۲۲] با ترکیب دو فرایند کشش ساده‌ی تک‌محوری (کشش یک نمونه‌ی ساده‌ی مستطیلی از دو انتها) و کشش عمیق (کشیدن لوح به درون قالب با یک سنبه‌ی استوانه‌ای) سمت چپ FLD را برای ورق‌های فولادی کم‌کربن به‌دست آورد و با افزودن آزمایش‌های خود به آزمایش‌های کیلر و بکهوفن، نمودار کامل حد شکل‌دهی را ترسیم نمود. کلیمولا و همکاران [۲۳]، محدودیت‌های نمودار حد شکل‌دهی برای تحلیل فرایند لبه‌زنی مس، برنج و فولادها را نشان دادند. آن‌ها نمودار تنش حد شکل‌دهی را به‌عنوان جایگزین مناسب برای آن پیشنهاد کرده و نشان دادند که این نمودارها، مستقل از مسیر بارگذاری است. استفاده از شبکه‌بندی مربعی توسط سوربی و همکاران [۲۴] معرفی گردید. ایراد اصلی وارد بر این پژوهش این بود که محاسبات بعد از آزمون به‌صورت دستی انجام شده و دارای خطای قابل توجهی است.

تن و همکاران [۲۵] با استفاده از دستگاهی که بر اساس پردازش تصویر کار می‌کرد میزان کرنش را بسیار دقیق اندازه‌گیری نمودند. در پژوهش آن‌ها الگوها به‌صورت دایره‌ای بود و اولین بار بحث تحلیل شبکه‌های دایره‌ای مطرح گردید. این پژوهش مقدمه‌ای بر کار واچر و همکارانش شد [۲۶] که یک سال بعد با یک دوربین و چاپ الگوی تصادفی روی نمونه‌ها تاریخچه کرنش در آزمون مارسنیاک محاسبه نماید. هاویس و همکاران [۲۷] با حرکت الگوی تعریف شده در سطح نمونه شیوه‌ای برای اندازه‌گیری کرنش دو بعدی ابداع نمودند. در این روش آن‌ها عبارات مجهول تغییر شکل را با حل هم‌زمان معادلات جابجایی به‌دست آوردند. کلاکسین و همکاران [۲۸] جهت ایجاد الگوهای ذرات روی سطح اولیه، از رنگ‌پاشی و شبکه‌بندی دستی استفاده کردند. دقت اندازه‌گیر آن‌ها علی‌رغم استفاده از دوربین ۱۲ megapixel کم بود و دلیل آن استفاده از الگوریتم‌های محاسبه اختلاف فاصله دو الگو به‌صورت اسکالر بود؛ یعنی جهت در الگوریتم‌های ایشان اهمیت داشت و به‌دلیل غیر هموزن بودن نمونه‌های مورد آزمون، جهت‌ها به‌صورت یکنواخت و پیش‌بینی شده تغییر نمی‌کردند. در سال ۲۰۰۳ برای اولین بار کیگر و مرکلین [۲۹] با تعقیب عکس‌های متوالی از آزمون کشش ناکیزاما در یک

سامانه‌ی سه بعدی توزیع کرنش را به دست آوردند. آمیدو و همکاران [۳۰] از یک روش نوین هم-بستگی لکه‌های دیجیتال، بهره گرفتند. از مهم‌ترین مزیت‌های این روش، آماده‌سازی بسیار آسان نمونه آن می‌باشد که عمدتاً به دلیل انجام محاسبات کرنش، با تکیه بر روش‌های پیچیده عددی می‌باشد که بر روی نتایج حاصل از تصاویر انجام می‌شود. ایراد تحقیق ایشان، ردگیری لکه‌ها با استفاده از دوربین عکاسی بود که نتایج حاصل از دقت زیادی برخوردار نبودند. یونینما و موریمتو [۳۱] روش جدیدی با انتخاب لکه<sup>۱</sup> مناسب در عکس‌های متوالی برای فضای جستجو مطرح کردند؛ به عبارت دیگر ایشان جهت افزایش دقت ردگیری الگوها در عکس بعدی فضای جستجویی را با نوشتن معادلات گاوس-نیوتن طرح‌ریزی کردند. با این روش دقت اندازه‌گیری افزایش یافت. برایتون و لقرن [۳۲] با ارائه الگوریتمی برای طیف خاصی از فلزات با استفاده از پردازش تصویر، موفق به اندازه‌گیری تغییر شکل صفحه‌ای شدند. مزیت کار ایشان اصلاح و گسترش شیوه‌های عددی بکار رفته موجود و بهبود اندازه‌گیری می‌باشد؛ اما به دلیل حجم زیاد محاسبات عددی، در کسب نتایج بهبودی حاصل نشد. الگوریتم‌های این تحقیق فقط برای فلزات نرم کاربرد دارند. آسترل و همکاران [۳۳] با کمک ابزار پردازش تصویر جعبه ابزار متلب و ارائه الگوریتمی که بر پایه معادلات تجمیع گاوس نوشته شده بود، حفره‌های روی سطوح فلزات ناصاف را ردگیری کرده و کرنش را با تقریب کم استخراج کردند. معادلات ایشان فقط برای سطوح ناصاف کاربرد دارد. لمن و همکاران [۳۴] با معرفی تکنیک هم-بستگی تصاویر و استفاده آن در یک نرم‌افزار ساده تدوین عکس، تهیه الگوریتمی جهت بکارگیری در دو منطقه کشسان و مومسان نمونه را مورد بررسی قرار دادند. در سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۱ چن و همکاران [۳۵، ۳۶] با توسعه روش هم‌بستگی تصاویر دیجیتال، مشکل ضعف ردگیری الگوهای دست‌ساز در نمونه موجود در تحقیقات دیگران را برطرف کردند. آن‌ها با استفاده از این روش جدید، الگوهای ایجاد شده موجود در روی سطح چند نمونه ردگیری کردند و توانستند کرنش دقیق‌تری را

---

<sup>1</sup> Subset

نسبت به دیگر تحقیقات ارائه دهند. ایشان در تحقیقاتشان تغییرات تنش، کرنش و ناهمسانگردی را با استفاده از هم‌بستگی تصاویر به‌دست آوردند.

در سال ۲۰۱۲ پورقانعی و همکاران [۳۷] روش جدیدتری ارائه دادند، در این تحقیق پس از تهیه عکس‌های متوالی از فیلم تهیه شده در حین انجام آزمون کشش نمونه با کمک الگوریتم‌های پردازش تصویر و تکنیک هم‌بستگی تصاویر دیجیتال، الگوهای چاپ شده بر روی نمونه را تا آخرین عکس ردگیری کرده و مختصات  $(x,y)$  آن‌ها به‌دست می‌آید. سرانجام با پردازش بر روی مختصات به‌دست آمده توسط الگوریتم محاسبه جابجایی، مقدار دقیق تغییر طول نمونه و درنهایت کرنش محاسبه می‌شود. مهمترین نقص این تحقیق وابستگی نتایج به شدت نور تابیده شده به نمونه و همچنین دقت پایین تصویربرداری دوربین استفاده شده و در نتیجه خطای قابل توجه در ردیابی الگوهای دیجیتالی اشاره کرد. ویسکوژنسکی و همکاران [۳۸] منحنی‌های حد شکل‌دهی را برای آلومینیوم AA6016 با سه شرایط مختلف آنیل کامل، پیش کرنش و ۸٪ پیش کرنش در فرایند نورد، به روش DIC به‌دست آوردند. ژانگ و همکاران [۳۹] در سال ۲۰۱۳ یک روش تحت عنوان هم‌بستگی شبکه در تصاویر دیجیتال ارائه نمودند که با آن منحنی‌های حد شکل‌دهی برای ورق‌های نازک به‌دست می‌آید. در این روش دایره‌هایی با قطر  $2/5$  mm که تقریباً هم‌اندازه با شبکه روش سنتی است بر روی نمونه‌های ناکازیم چاپ کرده و مقادیر کرنش حدی را با روش سنتی مقایسه نمودند. وانگ و همکاران [۴۰] در سال ۲۰۱۴ به بررسی توپوگرافی سطح در نتایج حاصل از DIC پرداختند. همچنین با بررسی اختلاف ارتفاع سطح نزدیک ناحیه‌ی گلویی موضعی روش جدیدی برای محاسبه کرنش‌های حدی ارائه کردند.

### ۱-۷- اهداف تحقیق و مروری بر فصل‌های پایان‌نامه

در این پایان‌نامه با انجام آزمون‌های کشش ساده تک‌محوره بر روی نمونه‌های برش خورده در سه جهت  $0^\circ$ ،  $45^\circ$  و  $90^\circ$  نسبت به راستای نورد خواص مکانیکی ماده مورد آزمون (AA6061) از جمله نمودارهای تنش-کرنش حقیقی و مهندسی، توان کرنش سختی و... محاسبه می‌شود. در ادامه

متغیرهای مؤثر در روش DIC کالیبره و مقادیر بهینه برای آن‌ها استخراج می‌شود. مقادیر ناهمسانگردی ماده با استفاده از سه روش سنتی، پردازش تصاویر دیجیتال الگوهای تصادفی و دایروی مورد بررسی قرار گرفته است و سطح تسلیم آلیاژ مورد نظر ترسیم می‌گردد.

روش‌های مختلف پیش‌بینی لحظه شروع گلویی بررسی و صفر شدن نرخ کرنش عرضی به‌عنوان معیار آغاز گلویی در نظر گرفته خواهد شد. پنج نمونه آزمون درون صفحه‌ای و پنج نمونه آزمون کشش برون صفحه‌ای اجرا می‌شود و با در نظر گرفتن معیار گلویی فوق‌الذکر کرنش‌های حدی محاسبه و FLD ترسیم می‌گردد. سپس بر پایه‌ی معیار تسلیم هیل ۴۸، مقادیر تنش حدی استخراج و منحنی‌های تنش حد شکل‌دهی (SFLD) ترسیم می‌شود. در شبیه‌سازی المان محدود اجزاء قالب طراحی و همچنین مسیر کرنش و FLD بررسی می‌شود. از نوآوری‌های این تحقیق می‌توان به ارائه‌ی منحنی‌های حد شکل‌دهی به انضمام مسیر کرنش مورد استفاده اشاره کرد که به‌علت وابستگی غیر قابل اجتناب FLD به مسیر بارگذاری دارای اهمیت است.

پایان‌نامه‌ی حاضر شامل پنج فصل است که در فصل دوم ضمن معرفی روش DIC، اجزاء و نحوه‌ی اجرای آزمون‌های کشش درون و برون صفحه‌ای آمده است. در فصل سوم نحوه‌ی شبیه‌سازی آزمون‌ها و استقلال نتایج از اندازه‌ی المان‌ها بیان می‌شود. در فصل چهارم، نتایج این پژوهش بررسی و در فصل پنجم، نتیجه‌گیری و پیشنهادهایی برای ادامه‌ی کار ارائه شده است.

## فصل ۲ روش تجربی

## ۲-۱- مقدمه

فعالیت‌های تجربی انجام شده در این تحقیق شامل: ۱- استخراج خواص ماده اولیه، ۲- استفاده از روش DIC در اندازه‌گیری ناهمسانگردی، ۳- تحلیل کرنش به روش DIC در آزمون‌های درون صفحه‌ای و ۴- تحلیل کرنش به روش DIC در آزمون‌های برون صفحه‌ای می‌باشد، که در ذیل به- ترتیب مورد معرفی قرار می‌گیرد.

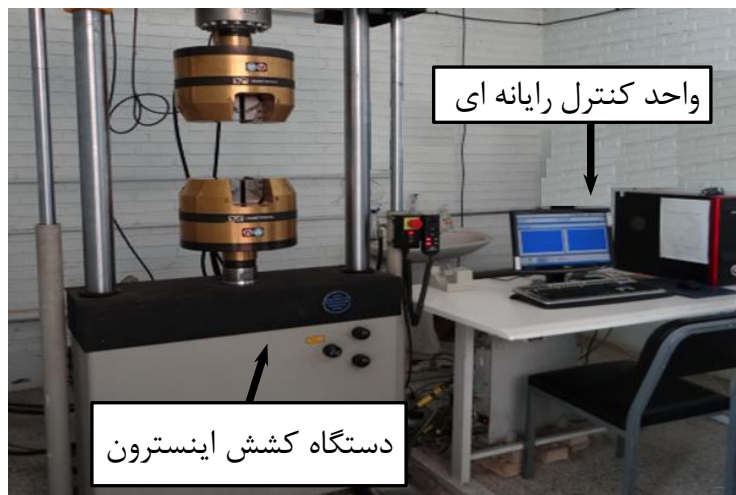
## ۲-۲- معرفی ماده‌ی خام و آزمون‌های اولیه

ماده مورد آزمون ورق‌ی از جنس آلومینیوم آلیاژی AA6061-O به ضخامت اولیه  $1/3$  mm می‌باشد. این ورق دارای عمر خستگی و چقرمگی بالا، قابلیت ماشین‌کاری نسبتاً خوب، وزن سبک، استحکام بالا و قابلیت جوشکاری با انواع روش‌ها و شکل‌پذیری مطلوب می‌باشد؛ از کاربردهای آن می‌توان ساخت لوله‌های فلزی، تیرهای برق مرتفع، دیگ‌های بخار، ناوهای نظامی، بدنه فضاپیماها و روتور بالگردها اشاره کرد. ترکیب شیمیایی این آلیاژ که تحت عملیات حرارتی آنیل قرار گرفته در جدول ۲-۱ نمایش داده شده است.

جدول ۱-۲: ترکیب شیمیایی آلومینیوم آلیاژی AA6061-O

عنصر	Al	Cr	Cu	Fe	Mg
درصد وزنی	۹۵/۸ تا ۹۸/۶	۰/۳۵ تا ۰/۰۴	۰/۴ تا ۰/۱۵	Max = ۰/۷	۱/۲ تا ۰/۸

خصوصیات مکانیکی ورق با کشش تک‌محوره با نرخ کرنش اولیه (1/s) ۰/۰۰۱، به‌وسیله‌ی دستگاه آزمون کشش سرو هیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲ به ظرفیت نامی ۲۵ تن (مطابق شکل ۱-۲) به‌دست آمده است. به این منظور نمونه‌های کشش تک‌محوره‌ی ورق، طبق استاندارد ASTM-E8 در زوایای  $0^\circ$ ،  $45^\circ$  و  $90^\circ$  نسبت به جهت نورد با استفاده از دستگاه وایرکات از آلیاژ AA6061-O برش داده شد.

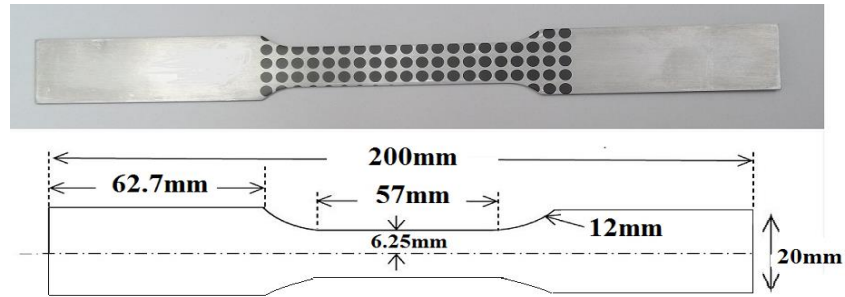


شکل ۱-۲- تجهیزات آزمون کشش تک‌محوره شامل دستگاه کشش و واحد کنترل رایانه‌ای

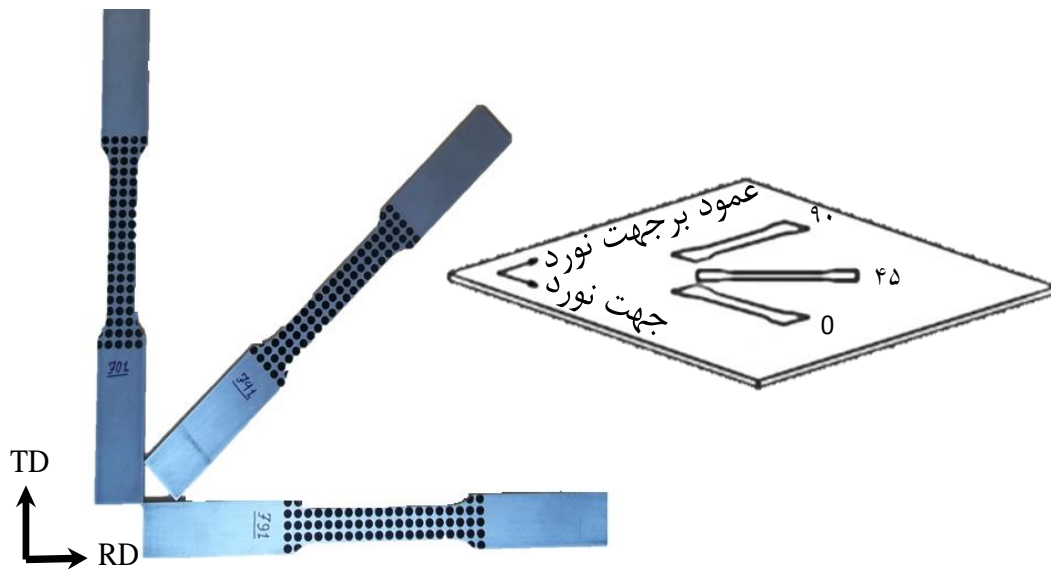
در شکل ۲-۲ یک نمونه‌ی اولیه قبل از تغییر شکل به‌همراه ابعاد هندسی آن و در شکل ۳-۲ جهت برش نمونه‌ها نسبت به راستای نورد ورق<sup>۱</sup> و عمود بر راستای نورد<sup>۲</sup> نمایش داده شده است.

<sup>۱</sup> Rolling direction (RD)

<sup>۲</sup> Transverse direction (TD)



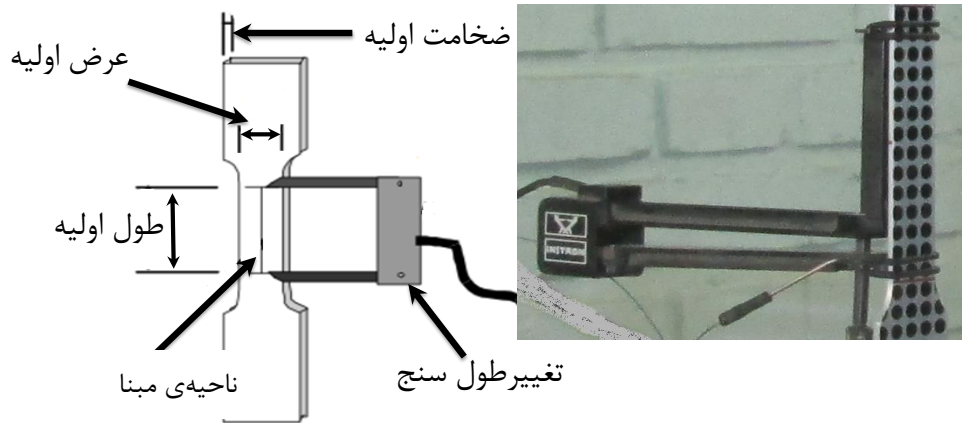
شکل ۲-۲- نمونه‌ی آزمون کشش تک‌محور بر طبق استاندارد ASTM-E8



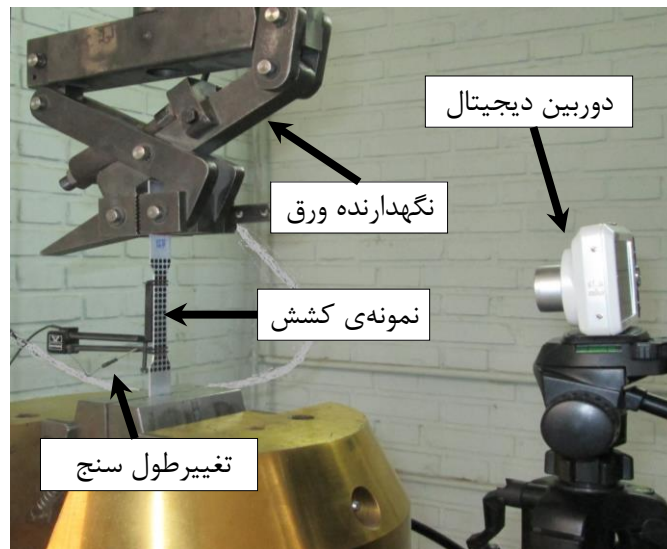
شکل ۲-۳- نمونه‌ی برش شده در سه جهت مختلف نسبت به راستای نورد

همچنین در این سری از آزمون‌ها هم‌زمان با محاسبه نیروی لازم برای جابجایی فک‌ها، میزان کرنش توسط تغییر طول سنج<sup>۱</sup> محاسبه شده و نمونه‌ها تا حد پارگی کشیده می‌شوند. در شکل ۲-۴ تغییر طول سنج و نحوه نصب آن و در شکل ۲-۵ اجزاء مختلف این آزمون تجربی که شامل فیکسچر، نمونه‌ی آزمون کشش و تغییر طول سنج می‌باشد، نمایش داده شده است.

<sup>۱</sup> Extensometer



شکل ۲-۴- نحوه ی نصب تغییر طول سنج بر روی نمونه ی آزمون کشش



شکل ۲-۵- اجزاء مختلف آزمون کشش تک محوره

با تحلیل نتایج این آزمون ها خصوصیاتى مانند تنش تسلیم، تنش نهایی، مقادیر ضریب سختی و توان کرنش سختی ماده در هر سه جهت فوق الذکر محاسبه می گردد.

### ۲-۳- اندازه گیری مقادیر ناهمسانگردی



### ۲-۳-۱- اندازه‌گیری مقادیر ناهمسانگردی به روش سنتی

اندازه‌گیری مقادیر ناهمسانگردی ورق AA6061-O طبق استاندارد ASTM E517 انجام شد. برای این منظور نمونه آزمون کشش تک‌محوری (شکل ۲-۲) تا ۱۲٪ کرنش شکست کشیده شد و طول ( $l$ )، عرض ( $w$ ) و ضخامت نمونه ( $t$ ) در ناحیه‌ی مبنا پس از تغییر شکل اندازه‌گیری و با استفاده از روابط ۱-۴، ۱-۵ و ۱-۶ مقادیر ناهمسانگردی در سه راستای  $0^\circ$ ،  $45^\circ$  و  $90^\circ$  نسبت به راستای نورد محاسبه شد. برای اندازه‌گیری از کولیس دیجیتال با دقت ۰/۰۱ استفاده شد.

### ۲-۳-۲- اندازه‌گیری مقادیر ناهمسانگردی با استفاده از روش DIC و شبکه‌بندی منظم

در این آزمون‌ها مقادیر کرنش و میزان ناهمسانگردی با کد عددی ابتکاری در جعبه‌ابزار پردازش تصویر نرم‌افزار متلب نسخه R2013a بررسی گردیده است. همان‌طور که در شکل ۲-۶-الف نشان داده شده، به این منظور تغییرات نمونه‌های شبکه‌بندی شده به روش دایره‌ای منظم با دوربین دیجیتال به دقت ۱۴ megapixel و ۳۰ frame/s ضبط و سپس طی مراحل پنج‌گانه‌ی زیر تحلیل می‌شوند.

مرحله اول: در ابتدا تصاویر خوانده شده به صورت خاکستری<sup>۱</sup> تبدیل می‌شود، سپس با اعمال فیلتر میانه<sup>۲</sup> نویزهای موجود در عکس از بین می‌رود.

مرحله دوم: با اعمال آستانه‌گذاری<sup>۳</sup> مناسب تصویرها به فرمت باینری تبدیل می‌شود.

مرحله سوم: با استفاده از الگوریتم‌های که در محیط نرم‌افزار متلب ایجاد شده است، با افکنش<sup>۴</sup> در دو راستای افقی و عمودی شکل‌های متناظر در تصاویر متوالی شناسایی می‌شود.

<sup>۱</sup> Gray scale

<sup>۲</sup> Medium filter

<sup>۳</sup> Thresholding

<sup>۴</sup> Projection

مرحله چهارم: با استفاده از دستوره‌های لبه‌یاب، لبه‌ها شناسایی و فاصله بین هر دو لبه استخراج می‌شود.

مرحله پنجم: در این مرحله محاسبه کرنش‌ها و مقدار ناهمسانگردی پس از اندازه‌گیری تغییر طول و عرض لبه‌های قطعه برحسب پیکسل انجام می‌گیرد که توضیح بیشتر انجام هر یک از مراحل بالا در مرجع [۴۱] بیان شده است. برای این هدف مقادیر کرنش طولی و عرضی به ترتیب از روابط  $\epsilon_l = \ln \frac{l}{l_0}$  و  $\epsilon_w = \ln \frac{w}{w_0}$ ، محاسبه و کرنش ضخامتی از رابطه‌ی حجم ثابت به صورت  $\epsilon_t = -(\epsilon_w + \epsilon_l)$  محاسبه و در نهایت مقدار ناهمسانگردی برای هر فریم با استفاده از رابطه‌ی  $R = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t}$  محاسبه می‌شود. در شکل ۲-۶-ب و ۲-۶-ج نتایج حاصل از اعمال این مراحل بر نمونه آزمون کشش نمایش داده شده است.



شکل ۲-۶- اندازه‌گیری مقادیر ناهمسانگردی در کشش نمونه با شبکه‌بندی منظم الف) اجزای آزمون، ب) خواندن تصاویر اولیه، ج) آستانه‌گذاری

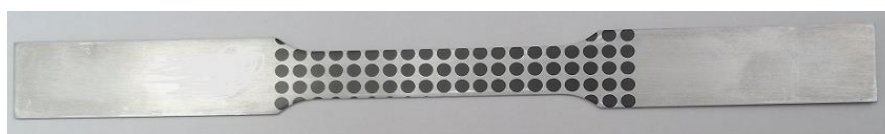
## ۲-۳-۳- اندازه‌گیری مقادیر ناهمسانگردی با استفاده از روش DIC و شبکه‌بندی

تصادفی [۴۲]

در این آزمون یک روی نمونه به روش تصادفی و روی دیگر آن به روش دایره‌ای منظم شبکه‌بندی شده‌اند که نمونه‌ای از آن در شکل ۲-۷- نشان داده شده است.



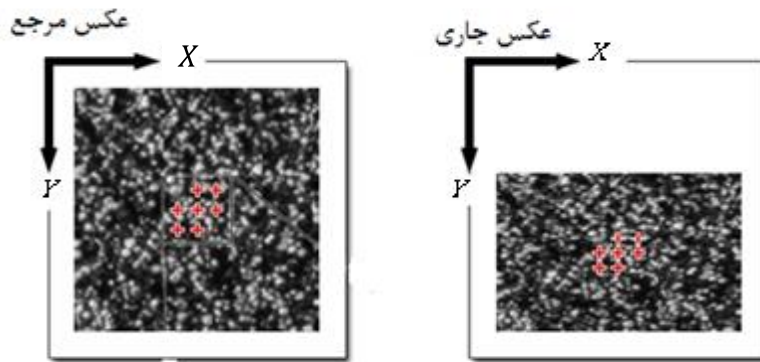
الف



ب

شکل ۲-۷- آماده‌سازی نمونه‌های شبکه‌بندی شده (الف) الگوی تصادفی، (ب) الگوی منظم

در این سری از آزمون‌ها تحلیل تصاویر دیجیتال با استفاده از کد ncorr در نرم‌افزار متلب نسخه R2013a انجام گردید. به‌منظور ایجاد تناظر مکانی بین نقاط تصاویر حاصله از آزمون کشش از روش DIC استفاده شد. در نتیجه استفاده از این روش پراکندگی کرنش طولی و عرضی در ناحیه مبنا و به‌تبع آن مقادیر ناهمسانگردی ورق از رابطه‌ی ۱-۴ قابل محاسبه است، در ادامه شرح مختصری از DIC ارائه شده است. در این کد فرض شده اگر بین تصاویر متوالی مانند شکل ۲-۸ مکان لکه‌ها تغییر نماید می‌توان مختصات نقاط جدید را از روابط ۲-۱ و ۲-۲ محاسبه نمود [۴۲].



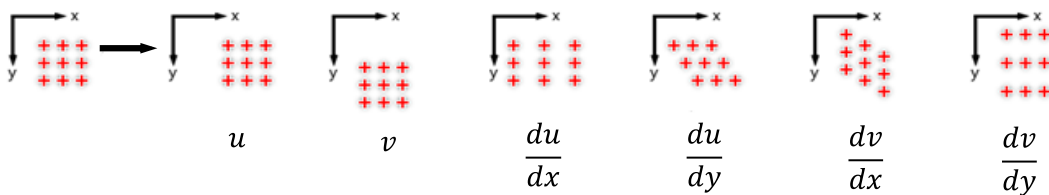
شکل ۲-۸- تغییر مکان مجموعه‌ای از لکه‌ها بین تصویرهای متوالی [۴۲]

$$X_{cur_i} = X_{ref_i} + u_{rc} + \frac{\partial u}{\partial X_{rc}}(X_{ref_i} - X_{ref_c}) + \frac{\partial u}{\partial Y_{rc}}(Y_{ref_j} - Y_{ref_c}) \quad 1-2$$

$$Y_{cur_j} = Y_{ref_j} + v_{rc} + \frac{\partial v}{\partial Y_{rc}}(X_{ref_i} - X_{ref_c}) + \frac{\partial v}{\partial Y_{rc}}(Y_{ref_j} - Y_{ref_c}) \quad 2-2$$

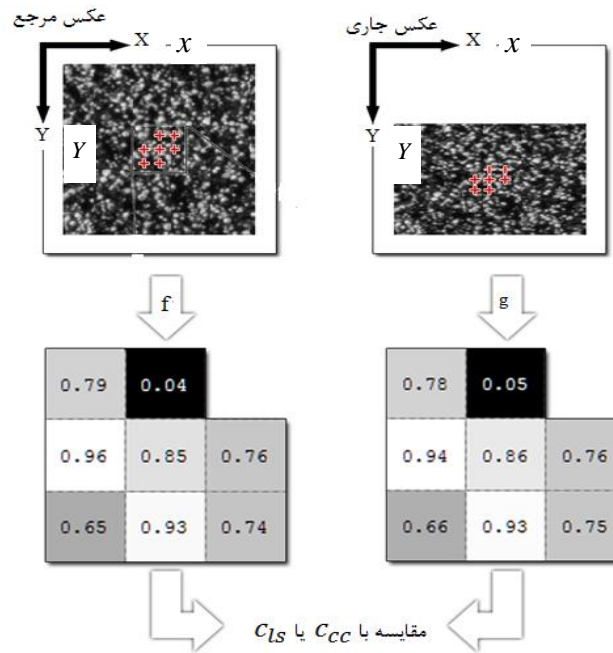
در روابط ۱-۲ و ۲-۲،  $X_{ref_c}$  و  $Y_{ref_c}$  مکان مرکز مختصات در عکس مرجع بوده،  $X_{ref_i}$  و  $Y_{ref_j}$  مختصات نقطه مورد نظر در سیستم مختصات عکس مرجع،  $X_{cur_i}$  و  $Y_{cur_j}$  مختصات نقطه مورد نظر در عکس جدید می‌باشد. زیرنویس IC نشان‌دهنده تغییر از سیستم مختصات عکس مرجع به عکس جاری می‌باشد. در این وضعیت بردار تغییر شکل به صورت رابطه‌ی ۳-۲ قابل بیان بوده که تأثیر هر یک از این ضرایب را در شکل ۲-۹ می‌توان دید :

$$p = \left\{ u \ v \ \frac{\partial u}{\partial x} \ \frac{\partial u}{\partial y} \ \frac{\partial v}{\partial x} \ \frac{\partial v}{\partial y} \right\}^T \quad 3-2$$



شکل ۲-۹- تأثیر ضرایب رابطه‌ی ۳-۲ بر جابجایی مجموعه لکه‌ها [۴۲]

گام بعدی پیدا کردن نقاط متناظر بین تصویر مرجع و تصویر فعلی می‌باشد، به این منظور همان‌طور که در شکل ۲-۱۰ نشان داده شده به هر نقطه از تصویر یک برچسب مجازی و یک میزان از خاکستری بودن اختصاص داده می‌شود و سپس بر حسب ضرایب هم‌بستگی که با روابط ۲-۴ و ۲-۵ محاسبه شده، نقاط متناظر در تصاویر بعدی شناسایی می‌شوند [۴۲].



شکل ۲-۱۰- برچسب‌زنی به نقاط برحسب شدت رنگ خاکستری، مقایسه‌ی ضرایب هم‌بستگی و پیدا کردن نقاط متناظر

$$C_{cc} = \frac{\sum_{(i,j) \in S} (f(\tilde{x}_{ref_i}, \tilde{y}_{ref_j}) - f_m)(g(\tilde{x}_{cur_i}, \tilde{y}_{cur_j}) - g_m)}{\sqrt{\sum_{(i,j) \in S} [f(\tilde{x}_{ref_i}, \tilde{y}_{ref_j}) - f_m]^2 \sum_{(i,j) \in S} [g(\tilde{x}_{ref_i}, \tilde{y}_{ref_j}) - g_m]^2}} \quad ۴-۲$$

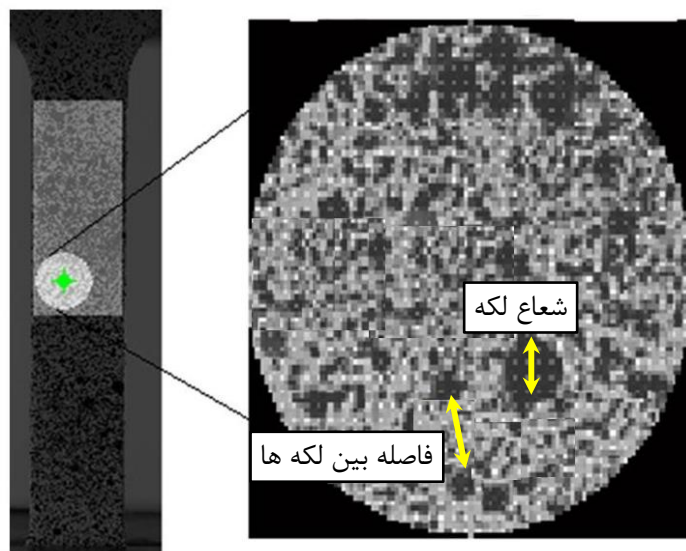
$$c_{ls} = \sum \left[ \frac{f(\tilde{x}_{ref_i}, \tilde{y}_{ref_j}) - f_m}{\sqrt{\sum_{(i,j) \in S} [f(\tilde{x}_{ref_i}, \tilde{y}_{ref_j}) - f_m]^2}} - \frac{g(\tilde{x}_{cur_i}, \tilde{y}_{cur_j}) - g_m}{\sqrt{\sum_{(i,j) \in S} [g(\tilde{x}_{ref_i}, \tilde{y}_{ref_j}) - g_m]^2}} \right]^2 \quad ۵-۲$$

در این روابط  $g$  و  $f$  به ترتیب توابع عکس اولیه و جاری بوده و نشان دهنده میزان خاکستری بودن نقطه‌ی  $(x,y)$  می‌باشند. همچنین  $f_m$  و  $g_m$  به صورت روابط ۶-۲ و ۶-۲ میانگینی از میزان خاکستری بودن نقاط در عکس مرجع و عکس جاری می‌باشند [۴۲].

$$g_m = \frac{\sum_{(i,j) \in S} g(\tilde{x}_{cur_i}, \tilde{y}_{cur_j})}{n(s)} \quad ۶-۲$$

$$f_m = \frac{\sum_{(i,j) \in S} f(\tilde{x}_{ref_i}, \tilde{y}_{ref_j})}{n(s)} \quad ۷-۲$$

در روابط بالا  $n(s)$  نشان دهنده شماره المان بوده که در نهایت می‌توان با مقایسه‌ی شدت نور خاکستری در نقاط مختلف تصویرها، نقاطی را که در آن‌ها  $c_{cc}$  نزدیک به یک و  $c_{ls}$  نزدیک به صفر باشد را به عنوان نقاط متناظر شناخت. نتایج به دست آمده از ردیابی‌های بالا دارای خطای محاسباتی بوده که به منظور بهینه‌سازی نتایج و به حداقل رساندن خطا از روش تکرار گوس-نیوتن<sup>۱</sup> استفاده شد. این روش نیاز به حدس اولیه برای شعاع لکه<sup>۲</sup> و فاصله بین لکه‌ها<sup>۳</sup> دارد که این دو مفهوم در شکل ۱۱-۲ نمایش داده شده است.



<sup>1</sup> Gauss-Newton iteration method

<sup>2</sup> Subset radius

<sup>3</sup> Subset spacing

شکل ۲-۱۱- نمونه‌ی مورد آزمون همراه با نمای شماتیک شعاع و فاصله‌ی لکه‌ها [۴۲]

بعد از اعمال الگوریتم‌های بهینه‌سازی قادر خواهیم بود با استفاده از روش DIC میزان جابه‌جایی نقاط را محاسبه نموده و با استفاده از تعریف تانسور کرنش گرین-لاگرانژین<sup>۱</sup> مقادیر کرنش عرضی، طولی و برشی به صورت ۲-۸، ۲-۹ و ۲-۱۰ محاسبه می‌شود [۴۲].

$$\varepsilon_x = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + 1 \right)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 - \frac{1}{2} \quad ۲-۸$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial y} + 1 \right)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 - \frac{1}{2} \quad ۲-۹$$

$$\varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + 1 \right) \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right) \left( \frac{\partial v}{\partial y} + 1 \right) \quad ۲-۱۰$$

کرنش‌های محاسبه شده به کمک این روش دارای اختلالاتی<sup>۲</sup> بود؛ برای برطرف کردن آن‌ها از روشی تحت عنوان پنجره‌ی کرنش<sup>۳</sup> استفاده شد. در این روش صفحه‌ای مربعی شکل به ابعادی موسوم به شعاع کرنش<sup>۴</sup>، به داده‌های حاصل از محاسبه جابجایی بین عکس‌های متوالی منطبق شده به‌گونه‌ای که می‌توان با تغییر مقادیر آن اختلالات موجود را کاهش داد. در ادامه به‌منظور خلاصه‌سازی فاصله‌ی بین لکه‌ها *sub-sp*، شعاع لکه *sub-r* و شعاع کرنش *st-r* نامیده شده است.

## ۲-۴- اندازه‌گیری کرنش‌های حدی در آزمون‌های درون صفحه‌ای

برای اندازه‌گیری مقادیر کرنش حدی در آزمون‌های درون صفحه‌ای بر طبق روش ارائه شده در مرجع [۲] از نمونه‌های شیاردار با شعاع قوس متفاوت در وسط آن‌ها استفاده شد. پنج نمونه با ابعاد ارائه شده در شکل ۲-۱۲-الف با استفاده از روش برش سیمی<sup>۵</sup> آماده شد.

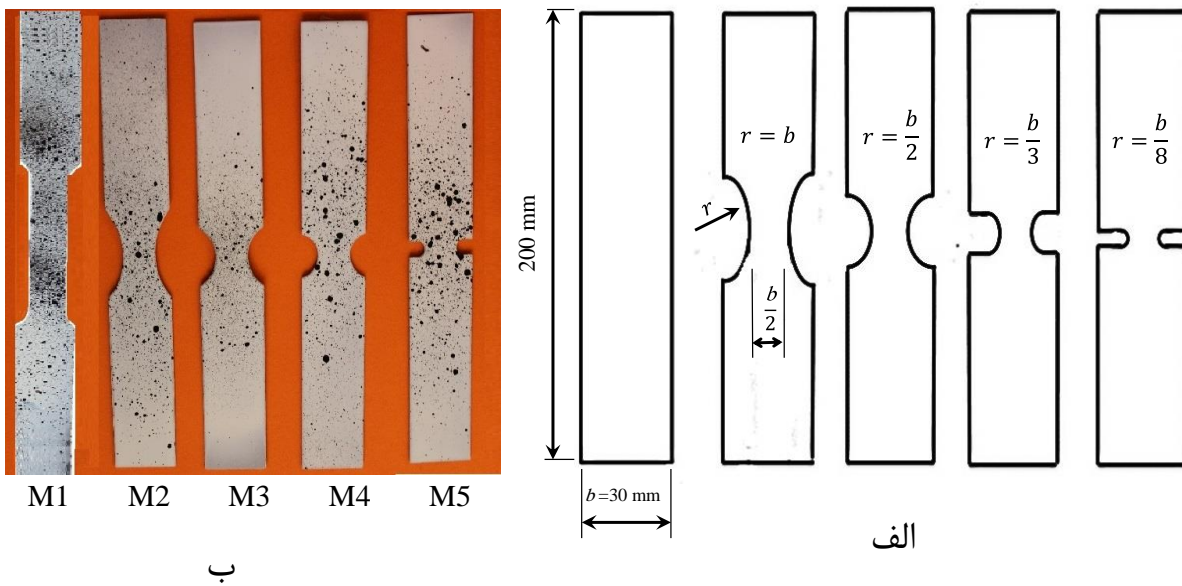
<sup>۱</sup> Green-Lagrangian

<sup>۲</sup> Noise

<sup>۳</sup> Strain window

<sup>۴</sup> Strain radius

<sup>۵</sup> Wire cut



شکل ۲-۱۲- نمونه‌های آماده شده برای آزمون‌های درون صفحه‌ای  
 (الف) هندسه و ابعاد، (ب) نمونه‌های قبل از تغییر شکل

بر یک سطح ورق الگوی منظم دایره‌ای به کمک چاپ سیلک و بر سطح دیگر با اسپری، الگوی تصادفی ایجاد گردیده است. مقادیر کرنش از الگوی تصادفی به کمک روش DIC و از الگوی منظم به کمک کولیس دیجیتال با دقت  $0.01 \text{ mm}$  اندازه‌گیری شد. لازم به ذکر است که در روش DIC برای کلیه فریم‌های فیلم امکان استخراج توزیع کرنش وجود دارد ولی از کولیس دیجیتال تنها برای کرنش حدی استفاده می‌شود.

## ۲-۵- اندازه‌گیری کرنش‌های حدی در آزمون‌های برون صفحه‌ای

به منظور استخراج کرنش‌های حدی مورد نیاز برای ترسیم FLD ورق، آزمون‌های برون صفحه‌ای طراحی و اجرا گردید که در ادامه شرح این آزمون‌ها بیان شده است.

### ۲-۵-۱- معرفی تجهیزات و قالب

(الف) دستگاه پرس هیدرولیک



در این پژوهش، از پرس هیدرولیکی ژاو آریا با تناژ نامی ۱۰۰ تن متریک، دارای چهار میله راهنما، کورس حرکتی ۷۰۰mm و حداکثر سرعت رم ۹۰ mm/min استفاده شد. این پرس، قابلیت استخراج منحنی نیرو-جابجایی را در حین فرایند دارا می‌باشد. در شکل ۲-۱۳ این دستگاه نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۳- دستگاه پرس هیدرولیک ژاو آریا

### ب) قالب کشش<sup>۱</sup> با سنبه‌ی سر کروی<sup>۲</sup>

در شکل ۲-۱۴ قالب مورد استفاده برای انجام آزمون برون صفحه‌ای و اجزای آن نمایش داده شده است. توضیحات بیشتر در خصوص اجزا قالب، به شرح زیر است:

- **ماتریس:** ماتریس قالب از فولاد VCN200 و دارای سختی HRC ۴۰ می‌باشد. این ماتریس به صورت استوانه‌ای به قطر ۲۱۰ mm و ارتفاع ۶۰ mm می‌باشد که برای جلوگیری از جریان فلز به درون ناحیه‌ی شکل‌دهی حفره‌ی ترمز<sup>۳</sup> بر روی آن کار گذاشته شده است. در ضمن دو سطح بالا و پایین ماتریس سنگ زده شده و صاف و صیقلی گردیده است. حفره‌ی ماتریس

<sup>۱</sup> Stretching Die

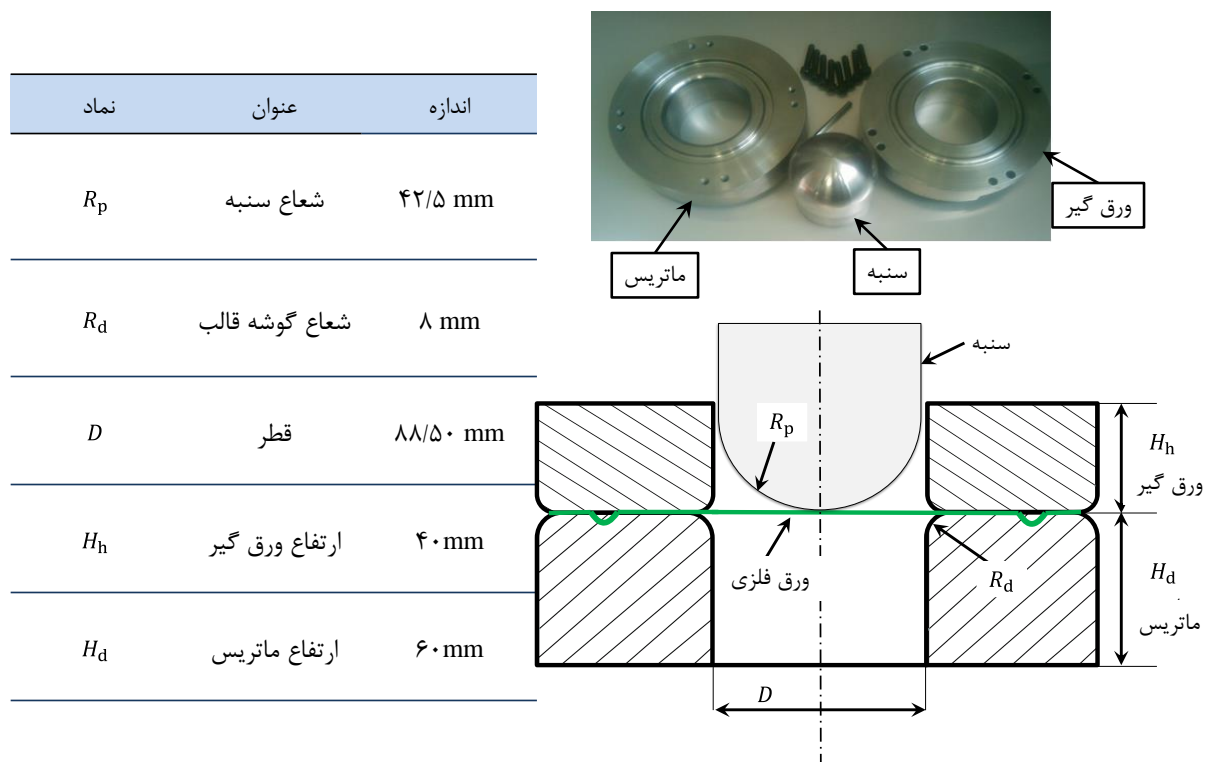
<sup>۲</sup> Hemispherical Punch

<sup>۳</sup> Female bead

که در مرکز آن قرار گرفته است به قطر ۸۸/۵ mm می‌باشد که دارای گردی گوشه به شعاع ۸mm برای جلوگیری از پارگی ورق در هنگام شکل‌دهی، در قسمت لبه‌ی حفره‌ی ماتریس می‌باشد.

- **نگهدارنده‌ی ورق:** نگهدارنده‌ی ورق که به‌صورت استوانه‌ای به قطر ۲۰۰ mm و ارتفاع ۴۰mm می‌باشد، همانند ماتریس از فولاد VCN200 ساخته شده است و دارای سختی HRC ۴۰ می‌باشد. زائده‌ی ترمز<sup>۱</sup> نگهدارنده و از جریان فلز به درون ناحیه‌ی شکل‌دهی جلوگیری می‌کند. برای هدایت دقیق سنبه به درون ماتریس برای عملیات شکل‌دهی، حفره‌ای به قطر ۸۵/۲ mm در مرکز نگهدارنده‌ی ورق ایجاد شده است.
- **سنبه‌ی سرکروی:** سنبه‌ی سرکروی به قطر ۸۵ mm و ارتفاع ۱۲۰ mm، بر روی ورق آزمون که بین ماتریس و نگهدارنده‌ی ورق محکم بسته شده است، به سمت پایین حرکت کرده و عملیات شکل‌دهی انجام می‌گیرد. سنبه نیز از جنس فولاد VCN200 با سختی HRC ۴۰ می‌باشد.
- **یاتاقان واسط:** برای حذف خطای عدم توازی سطوح پرس، از یک یاتاقان واسط به‌صورت عرق‌چین کروی نری و مادگی استفاده شد. این یاتاقان بین سطوح بالای سنبه و سینی بالای پرس قرار می‌گیرد. دو عرق‌چین با اصطکاک بسیار کم، بر روی یکدیگر می‌غلتند و باعث اعمال یکنواخت نیروی شکل‌دهی به سنبه می‌شوند. در شکل شماتیک ۲-۱۴ ابعاد اصلی قالب کشش نمایش داده شده است.

<sup>1</sup> Male bead



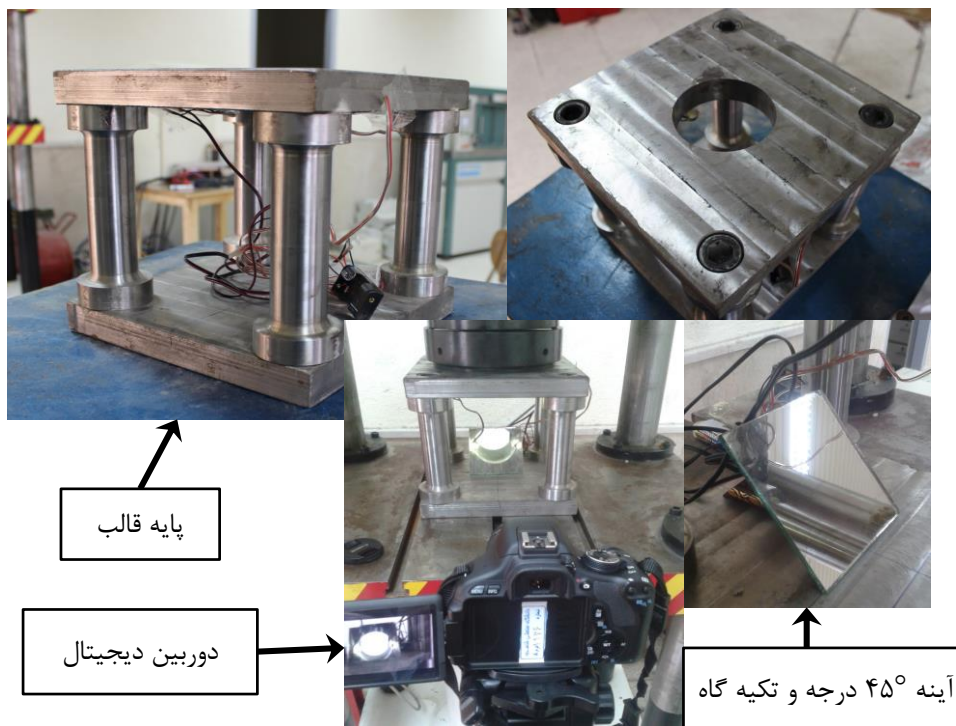
شکل ۲-۱۴- ابعاد اصلی قالب کشش با سنبه سر کروی

ج) پایه زیر قالب و تجهیزات فیلم برداری: به منظور تصویربرداری از سطح زیرین ورق فلزی که با الگوی مش تصادفی مدرج شده است، قالب کشش باید بر روی یک پایه‌ی فلزی قرار گیرد. این پایه از یک سو باید دارای استحکام لازم باشد تا نیروی شکل دهی را بدون هیچ تغییرشکل مومسانی تحمل نماید و از سوی دیگر باید فضای باز کافی برای تصویربرداری در اختیار قرار دهد. این پایه با چهار ستون از جنس VCN200 با سختی HRC ۴۰ طراحی و ساخته شد (شکل ۲-۱۵).

از یک آینه‌ی تخت مورب با زاویه‌ی  $45^\circ$  برای انتقال عمودی تصویر به حالت افقی تا رسیدن به عدسی دوربین استفاده شد. در این مرحله نیز از دوربین Canon Eos 600D که دارای دقت<sup>۱</sup> تصویر ۱۸ megapixel و سرعت تصویربرداری ۳۰ Frame/s استفاده شد. فیلم تهیه شده با کیفیت FULL HD و ساختار MPEG ذخیره و سپس با استفاده از نرم‌افزار Free video to JPG، به صورت فریم‌های جداگانه با ساختار تصویر JPEG تبدیل گردید. همچنین برای ایجاد روشنایی بهتر تصویر، در حفره

<sup>۱</sup> Resolution

این پایه ۲ LED کوچک با جریان مستقیم تعبیه گردید. در شکل ۱۶-۲ دستگاه پرس به همراه سامانه‌ی نورپردازی نمایش داده شد. است.



شکل ۱۵-۲- پایه‌ی قالب و متعلقات فیلم‌برداری

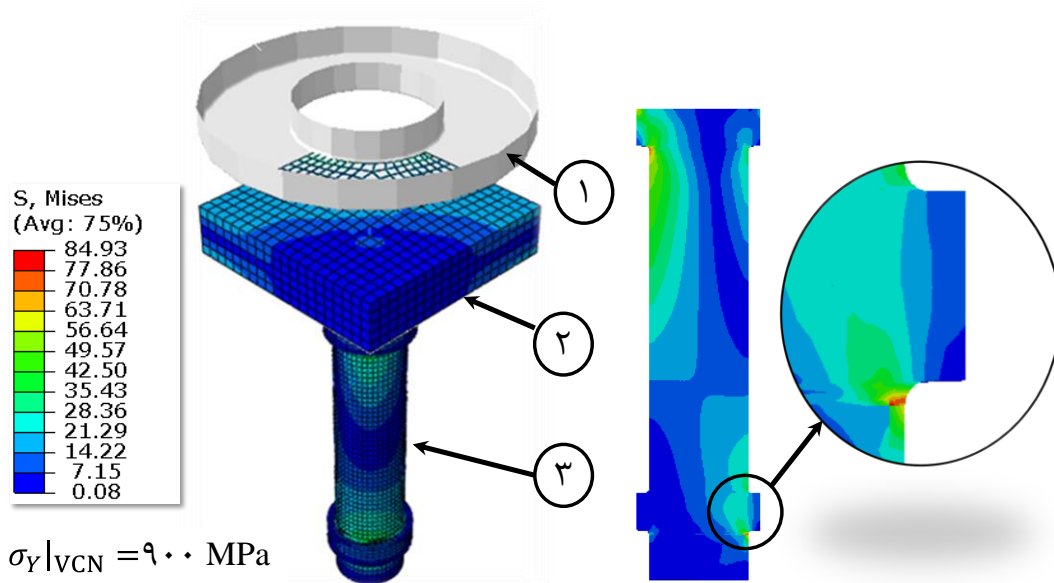


شکل ۲-۱۶- دستگاه پرس و متعلقات فیلم برداری

به منظور طراحی پایه‌ی قالب از مدل‌سازی المان محدود<sup>۱</sup> (FEM) به کمک نرم‌افزار آباکوس<sup>۲</sup> ۶/۱۳ استفاده شد. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی که در آن ماتریس قالب به صورت صلب، یک چهارم کفه بالایی و ستون به صورت شکل‌پذیر مدل گردید؛ در شکل ۲-۱۷ آمده است.

<sup>۱</sup> Finite Element Method

<sup>۲</sup> Abaqus



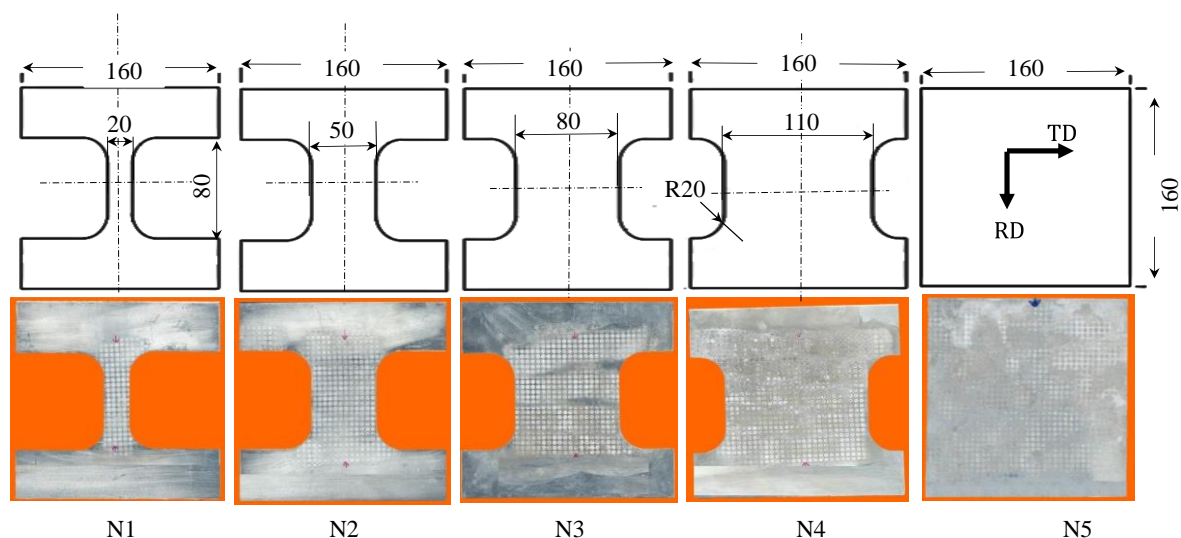
شماره قطعه	نام قطعه
۱	ماتریس قالب (صلب)
۲	یک چهارم کفه بالایی (شکل پذیر)
۳	ستون (شکل پذیر)

شکل ۲-۱۷- تنش مؤثر ون میزز (MPa) برای پایه‌ی قالب

تنش تسلیم فولاد آلیاژی سردکار VCN200، برابر  $900 \text{ MPa}$  می‌باشد [۴۳]. شبیه‌سازی انجام شده، تنش مؤثر بیشینه را در ستون پایه، برابر  $84/93 \text{ MPa}$  نشان می‌دهد. بر این اساس، می‌توان از عدم آسیب پایه‌ی تکیه‌گاه اطمینان حاصل کرد.

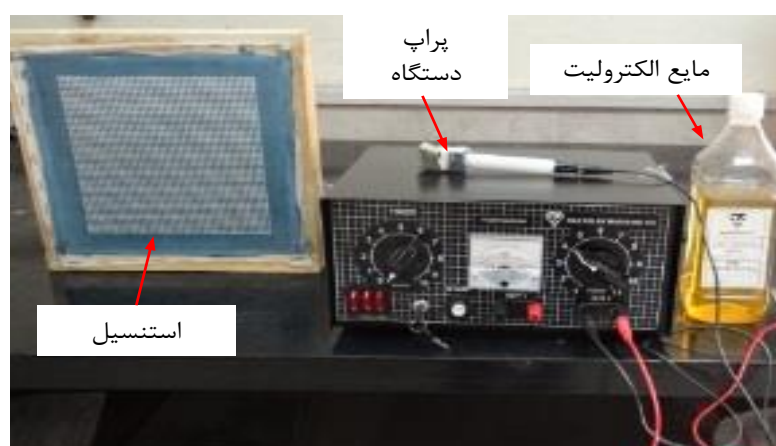
## ۲-۵-۲- آماده‌سازی نمونه‌ها

نمونه‌های مورد استفاده برای آزمون‌های برون صفحه‌ای و ابعاد آن، در شکل ۲-۱۸ نشان داده شده است. برای انجام آزمون، ورق آلومینیوم مورد بررسی به شکل مربعی به ضلع  $160 \text{ mm}$  برش خورده و سپس با استفاده از دستگاه فرز CNC ماشین‌کاری شد.



شکل ۲-۱۸- نمونه‌های اولیه آزمون کشش برون صفحه‌ای (ابعاد بر حسب mm)

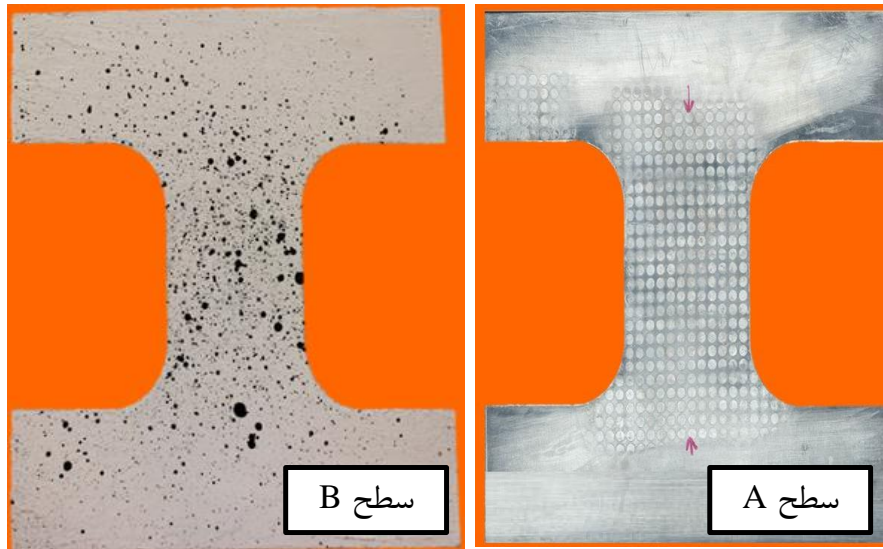
برای آنکه بتوان میزان کرنش اعمال شده بر روی ورق در اثر کشش را اندازه‌گیری کرد، لازم است ورق قبل از عملیات شکل‌دهی شبکه‌بندی شود. به این منظور بر روی یک سطح از ورق به روش اچ الکتروشیمیایی و روی سطح دیگر به کمک اسپری مش‌بندی تصادفی انجام شد. در شکل ۲-۱۹ یک دستگاه اچ الکتروشیمیایی مورد استفاده شده در این روش، نمایش داده شده است.



شکل ۲-۱۹- دستگاه اچ الکتروشیمیایی

در شکل ۲-۲۰ سطح رویی و پشتی نمونه‌ی N2 که با روش اچ الکتروشیمیایی و الگوی مش تصادفی مش‌بندی شده است، نمایش داده شده است.





ب

الف

شکل ۲-۲۰- شبکه‌بندی نمونه‌ی N2 به روش الف) اچ الکتروشیمیایی، ب) الگوی تصادفی

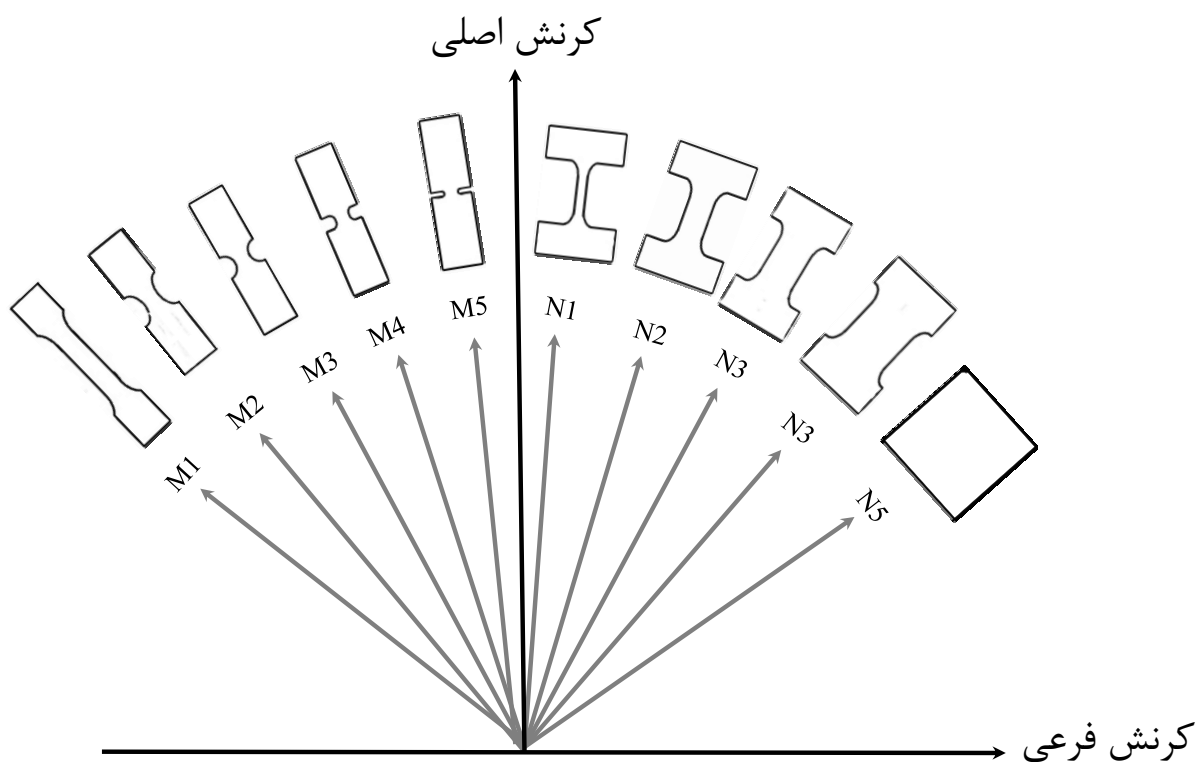
### ۲-۵-۳- اجرای آزمون کشش برون صفحه‌ای

در آزمون‌های برون صفحه‌ای، ورق به‌گونه‌ای بر روی سطح قالب قرار می‌گیرد که سطح A (با مش منظم)، با سنبه در ارتباط باشد و سطح B (با مش تصادفی اسپری شده)، در زیر قرار گرفته و تصویر آن پس از انعکاس آینه‌ی  $45^\circ$ ، توسط عدسی دریافت و ذخیره شود. از روانکار نایلون به‌منظور کاهش هر چه بیشتر اصطکاک استفاده شد.

با افزایش فشار روغن و حرکت سنبه با سرعت ثابت  $6 \text{ mm/min}$  ورق به داخل ماتریس کشیده می‌شود. این فرایند تا رسیدن به لحظه ناپایداری مومسان در تغییر شکل ورق که با ایجاد گلوبی در نمونه و افت ناگهانی نیرو همراه است، ادامه می‌یابد. با تحلیل فریم به فریم فیلم گرفته شده از سطح B توسط دوربین دیجیتال به روش DIC توزیع کرنش در ورق حاصل می‌شود. البته برای کالیبراسیون متغیرهای تحلیل DIC شامل شعاع لکه، فاصله لکه‌ها و شعاع کرنش، از اندازه‌گیری کرنش در سطح A به کمک کولیس دیجیتال استفاده شده است.



در مجموع پیش‌بینی شد که مطابق شکل ۲-۲۱ بتوان با استفاده از آزمون‌های کشش درون صفحه‌ای M1 تا M5، کرنش‌های حدی را در سمت چپ FLD و با استفاده از آزمون‌های کشش برون صفحه‌ای N1 تا N5، کرنش‌های حدی را در سمت راست FLD به‌دست آورد.



شکل ۲-۲۱-۲ مسیر کرنش پیش‌بینی شده برای آزمون‌های درون و برون صفحه‌ای

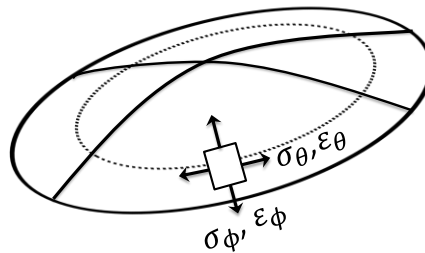
## ۲-۵-۴- اصلاح مقادیر کرنش

در شکل‌دهی ورق‌های فلزی به حالت متقارن محوری جهت‌های اصلی نصف‌النهاری<sup>۱</sup> و محیطی<sup>۲</sup> مطابق شکل ۲-۲۲ تعریف می‌شود. مقادیر تنش در این جهت‌ها به ترتیب با  $\sigma_\theta$  و  $\sigma_\phi$  و مقادیر کرنش

<sup>۱</sup> Meridian

<sup>۲</sup> Circumferential

نیز به ترتیب با  $\varepsilon_\theta$  و  $\varepsilon_\phi$  بیان می‌شود. با توجه به متقارن محوری بودن هندسه و بارگذاری مسئله کرنش برشی  $\gamma_{\theta\phi}$  و تنش برشی  $\tau_{\theta\phi}$  برابر صفر خواهد بود، از سوی دیگر با توجه به اینکه در فرایند کشش با سنبه سر کروی  $\varepsilon_\theta > \varepsilon_\phi$  است لذا  $\varepsilon_\theta$  در این فرایند کرنش اصلی و  $\varepsilon_\phi$  کرنش فرعی خواهد بود.



شکل ۲-۲۲- حالت تنش و کرنش غشائی در فرایند کشش متقارن محوری ورق [۳]

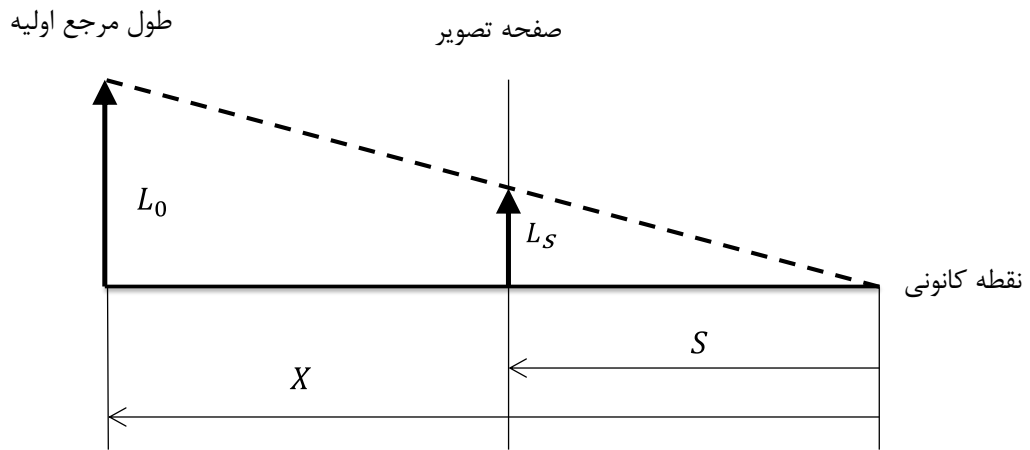
به دلیل استفاده از یک دوربین در تحلیل کرنش نمونه‌های برون صفحه‌ای، کرنش‌های محیطی و نصف‌النه‌ای اندازه‌گیری شده دارای خطای پرسپکتیو<sup>۱</sup> و انحناء<sup>۲</sup> می‌باشد. در ادامه، ضمن معرفی این دو خطا، نحوه‌ی برطرف کردن آن، بیان شده است.

#### • خطای پرسپکتیو

مطابق شکل ۲-۲۳ در تصویربرداری پرسپکتیو، با دور شدن منظره از نقطه‌ی کانون تصویر، طول آن کوتاه‌تر به نظر خواهد رسید.

<sup>۱</sup> Perceptivity error

<sup>۲</sup> Curvature error



شکل ۲-۲۳- خطای پرسپکتیو

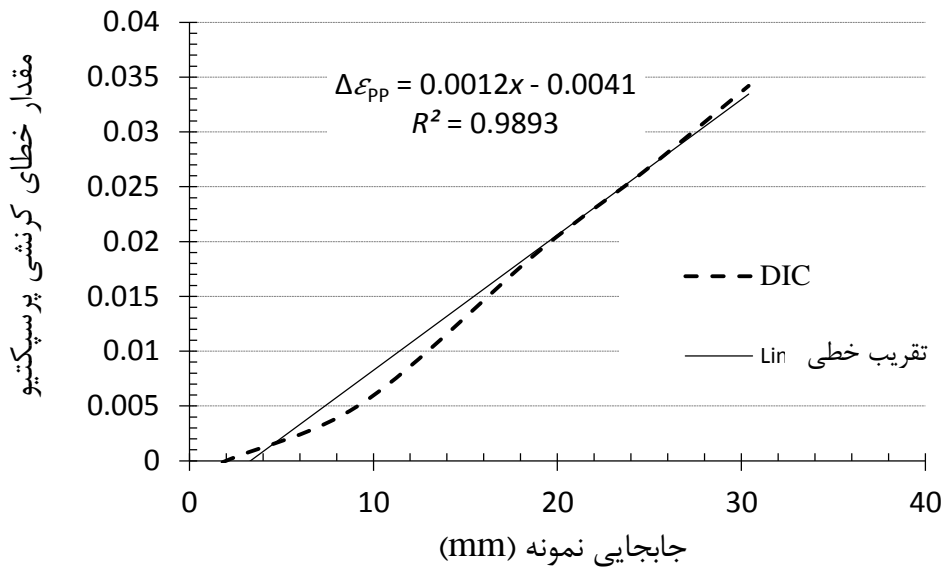
در این شکل،  $X$  فاصله‌ی قطعه تا نقطه‌ی کانونی،  $S$  فاصله‌ی تصویر تا نقطه‌ی کانونی،  $L_0$  طول قطعه و  $L_S$  طول تصویر است. اگر قطعه از صفحه‌ی تصویر تا موقعیت  $X$  جابجا شود، در روش آنالیز تصاویر دیجیتال خطای کرنشی پرسپکتیو مطابق رابطه ۱۱-۲ به دست می‌آید.

$$\Delta \varepsilon_{PP} = \ln \frac{L_S}{L_0} = \ln \frac{S}{X} \quad 11-2$$

#### • تشخیص خطای کرنش پرسپکتیو و نحوه‌ی جبران آن

به منظور تشخیص میزان خطای پرسپکتیو، مجموعه‌ی تصویربرداری شامل دوربین و آینه‌ی  $45^\circ$  آماده و ورق مربعی شکل به ابعاد  $160 \times 160$  mm که سطح آن با الگوریتم تصادفی مش بندی شده به سینی بالای پرس متصل شد. با حرکت دادن سینی متحرک پرس و نزدیک شدن آینه به ورق به مقدار  $30$  mm (کمی بیشتر از عمق نفوذ سنبه در آزمون‌های کشش) تصویربرداری از نمونه به کمک دوربین انجام شد. واضح است که در جابجایی جسم صلب<sup>۱</sup>، کرنش واقعی برابر صفر است. لذا، مقادیر کرنش ارائه شده توسط تحلیل DIC در واقع خطای کرنش پرسپکتیو خواهد بود. نتایج حاصل از این آزمایش در شکل ۲-۲۴ ارائه شده است.

<sup>1</sup> Rigid body motion



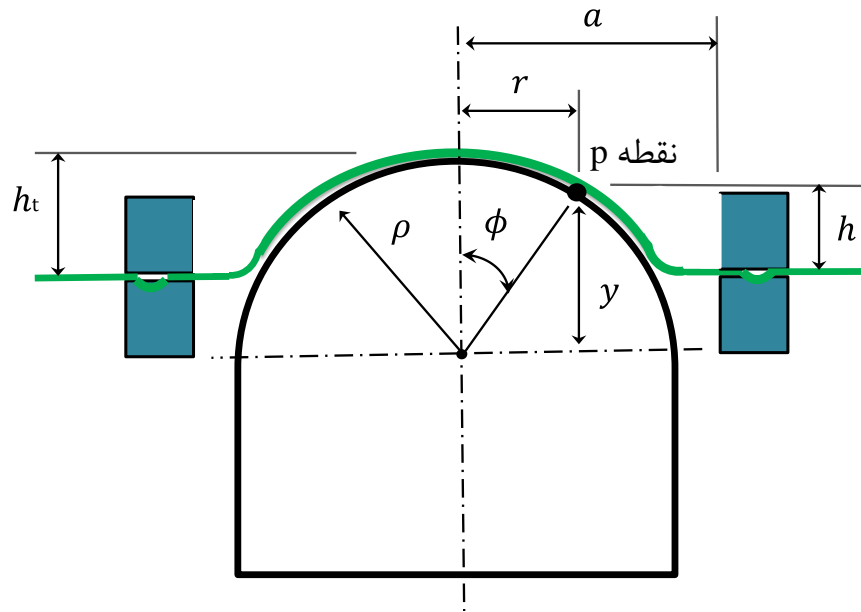
شکل ۲-۲۴- مقدار خطای کرنشی پرسپکتیو نسبت به جابجایی نمونه در مقابل دوربین

لازم به ذکر است که در فرایند کشش برون صفحه‌ای، خطای مذکور در هر دو مؤلفه‌ی کرنش محیطی  $\varepsilon_\theta$  و کرنش نصف‌النهاری  $\varepsilon_\phi$  وجود دارد. لذا می‌توان نوشت:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{i0} - \Delta\varepsilon_{pp}; \quad (i = \theta, \phi) \quad ۱۲-۲$$

در این رابطه  $\varepsilon_{i0}$ ، مؤلفه‌ی کرنش به‌دست آمده از روش DIC قبل از جبران خطا و  $\varepsilon_i$  مؤلفه‌های کرنش پس از جبران خطا است. لازم به ذکر است که  $\Delta\varepsilon_{pp}$  در حین کشش ورق، با نزدیک‌تر شدن ورق به دوربین مقداری مثبت خواهد داشت.

در شکل ۲-۲۵ شماتیک فرایند کشش با سنبه‌ی سر کروی نمایش داده شده است. در این شکل، نقطه p بر روی ورق به فاصله‌ی شعاعی r و موقعیت زاویه‌ای  $\phi$  نسبت به محور در نظر گرفته شده است. شعاع سنبه برابر  $\rho$ ، فاصله‌ی تصویر نقطه‌ی p بر روی محور تا مرکز سنبه برابر  $l$  می‌باشد. عمق کشش نقطه‌ی p و عمق کشش به‌ترتیب برابر با  $h$  و  $h_t$  می‌باشد.



شکل ۲-۲۵- شماتیک فرایند کشش با سنبه سر کروی [۴۴]

می توان نوشت:

$$\phi = \sin^{-1} \frac{r}{\rho} \quad ۱۳-۲$$

همچنین عمق نقطه p برابر خواهد بود با:

$$h = \frac{r}{\tan(\phi)} - (\rho - h_t) \quad ۱۴-۲$$

از رابطه فوق می توان برای هر نقطه دلخواه از ظرف، عمق کشش را محاسبه و به کمک شکل ۲-۲۶ مقدار دقیق خطای کرنشی پرسپکتیو ( $\Delta \epsilon_{pp}$ ) را به دست آورد.

#### • جبران خطای انحنا

به علت استفاده از یک دوربین در این تحقیق کرنش های نصف النهاری بر روی صفحه تصویر اندازه گیری می شود. با توجه به هندسه کروی محصول، کرنش واقعی نصف النهاری بر روی صفحه انحنا

( $\varepsilon_\emptyset$ ) بر حسب کرنش اندازه گیری شده بر روی صفحه تصویر ( $\varepsilon_{\emptyset_0}$ ) و زاویه  $\emptyset$ ، با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه است [۴۴].

$$\varepsilon_\emptyset = \varepsilon_{\emptyset_0} + \Delta\varepsilon_c = \varepsilon_{\emptyset_0} + \ln(\sec \emptyset) \quad ۱۵-۲$$

$\Delta\varepsilon_c$  در اینجا خطای کرنش انحنا می باشد.

### ۲-۶- محاسبه تنش های حدی جهت ترسیم SFLD

به منظور ترسیم منحنی SFLD با در اختیار داشتن مقادیر کرنش حدی به روش زیر عمل شد: رفتار سخت شوندگی مومسان ماده مطابق رابطه ی ۲-۱۶ از نوع توانی در نظر گرفته می شود.

$$\bar{\sigma} = k\bar{\varepsilon}^n \quad ۱۶-۲$$

همچنین با توجه به ناهمسانگردی ماده، معیار تسلیم هیل ۴۸ با شرط تنش صفحه ای استفاده شد که در این شرایط تنش و کرنش مؤثر از ۲-۱۷ و ۲-۱۸ محاسبه می شود [۲].

$$\bar{\sigma} = \left[ \frac{R_0(1+R_{90})}{R_{90}(1+R_0)} \sigma_2^2 - \frac{2R_0}{1+R_0} \sigma_1 \sigma_2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad ۱۷-۲$$

$$d\bar{\varepsilon} = \frac{\sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}}{\bar{\sigma}} = \left[ [R_{90}(d\varepsilon_2 - R_0 d\varepsilon_3)^2 + R_0(R_{90} d\varepsilon_3 - d\varepsilon_1)^2 + (R_0 d\varepsilon_1 - R_{90} d\varepsilon_2)^2] \right]^{\frac{1}{2}} \quad ۱۸-۲$$

در این حالت تنش اصلی (تنش نصف النهاری) برابر خواهد بود با:

$$\sigma_1 = \sigma_\emptyset = \left[ \frac{(\bar{\sigma})^2}{\left( 1 + \frac{R_0(1+R_{90})}{R_{90}(1+R_0)} \alpha^2 - \frac{2R_0}{1+R_0} \alpha \right)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad ۱۹-۲$$

با معلوم بودن نسبت کرنش ( $\beta$ )، نسبت تنش ( $\alpha$ ) و تنش محیطی ( $\sigma_\theta$ ) مطابق روابط ۲۰-۲ و ۲۱-۲ محاسبه خواهد شد.

$$\alpha = \frac{\beta(R_{90} + R_0R_{90} + \left(\frac{R_0R_{90}}{\beta}\right))}{(R_0R_{90} + \beta R_0R_{90} + R_0)} \quad 20-2$$

$$\sigma_2 = \sigma_\theta = \alpha\sigma_\phi \quad 21-2$$





## فصل ۳ شرح مدل سازی المان محدود

### ۳-۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر شبیه‌سازی به روش المان محدود (FEM) جایگاه ویژه‌ای در شبیه‌سازی فرایندهای شکل‌دهی پیدا کرده است زیرا که به کمک آن می‌توان اطلاعات زیادی در مورد اجرای فرایند و تغییر تدریجی بعضی متغیرهای آن در حین شکل‌دهی تخمین زد و فرایند شکل‌دهی را بهبود داد. بطور کلی شبیه‌سازی فرایندهای شکل‌دهی شامل مراحل زیر است:

- ساخت مدل‌های CAD (ورق، ابزار، نگهدارنده، ...)
- ساخت مدل المان محدود، اعمال شرایط مرزی، تعریف مشخصات ماده، پارامترهای تماسی و ...
- حل مدل

در ادامه در ابتدا نرم‌افزار المان محدود آباکوس معرفی و سپس به تشریح فعالیت‌های شبیه‌سازی هر یک از آزمون‌های درون صفحه‌ای و برون صفحه‌ای در این نرم‌افزار پرداخته شده است.

## ۳-۲- تعریف رفتار ناهمسانگردی ورق

رفتار ناهمسانگردی ماده با تعریف شش نسبت تنش تسلیم<sup>۱</sup>  $r_{ij}$  مطابق رابطه‌ی ۳-۱ تعریف می‌شود:

$$r_{ij} = \frac{\bar{\sigma}_{ij}}{\sigma_0}; \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad ۱-۳$$

در این رابطه  $\sigma_0$  تنش تسلیم مرجع و  $\bar{\sigma}_{ij}$  تنش تسلیم بر روی صفحه  $i$  و در جهت  $j$  می‌باشد. تابع تسلیم هیل ۴۸ به صورت رابطه‌ی ۳-۲ بیان می‌شود [۴۶]:

$$f(\sigma) = \sqrt{\frac{F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L\sigma_{23}^2 + 2M\sigma_{31}^2 + 2N\sigma_{12}^2}{2}} \quad ۲-۳$$

که  $F, G, H, L, M$  و  $N$  ثابت‌های ناهمسانگردی ماده است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$F = \frac{(\sigma_0)^2}{2} \left( \frac{1}{\bar{\sigma}_{22}^2} + \frac{1}{\bar{\sigma}_{33}^2} - \frac{1}{\bar{\sigma}_{11}^2} \right) = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{r_{22}^2} + \frac{1}{r_{33}^2} - \frac{1}{r_{11}^2} \right) \quad ۳-۳$$

$$G = \frac{(\sigma_0)^2}{2} \left( \frac{1}{\bar{\sigma}_{33}^2} + \frac{1}{\bar{\sigma}_{11}^2} - \frac{1}{\bar{\sigma}_{22}^2} \right) = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{r_{33}^2} + \frac{1}{r_{11}^2} - \frac{1}{r_{22}^2} \right) \quad ۴-۳$$

$$H = \frac{(\sigma_0)^2}{2} \left( \frac{1}{\bar{\sigma}_{11}^2} + \frac{1}{\bar{\sigma}_{22}^2} - \frac{1}{\bar{\sigma}_{33}^2} \right) = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{r_{11}^2} + \frac{1}{r_{22}^2} - \frac{1}{r_{33}^2} \right) \quad ۵-۳$$

$$L = \frac{3}{2} \left( \frac{\tau^0}{\bar{\sigma}_{23}} \right)^2 = \frac{3}{2r_{23}^2} \quad ۶-۳$$

$$M = \frac{3}{2} \left( \frac{\tau^0}{\bar{\sigma}_{13}} \right)^2 = \frac{3}{2r_{13}^2} \quad ۷-۳$$

$$N = \frac{3}{2} \left( \frac{\tau^0}{\bar{\sigma}_{12}} \right)^2 = \frac{3}{2r_{12}^2} \quad ۸-۳$$

<sup>۱</sup> Yield stress ratio

$\tau^0$  در روابط ۳-۶، ۳-۷ و ۳-۸ تنش تسلیم برشی می‌باشد.

### ۳-۲-۱- رفتار ناهمسانگردی صفحه‌ای<sup>۱</sup> برای آلیاژ AA6061-O

در تحلیل ناهمسانگردی ورق‌های فلزی از مقادیر  $R$  لانکفورد<sup>۲</sup> بر طبق رابطه‌ی ۱-۴ استفاده می‌شود. هرگاه  $R_0 \neq R_{90}$  باشد، مقادیر  $r_{11}$ ،  $r_{22}$  و  $r_{33}$  همگی متفاوت خواهند بود و ناهمسانگردی از نوع صفحه‌ای خواهد شد. در این وضعیت نسبت‌های تنش تسلیم ماده به‌صورت زیر خواهد بود [۴۶].

$$r_{11} = r_{13} = r_{23} = 1 \quad ۹-۳$$

$$r_{22} = \sqrt{\frac{R_{90}(R_0 + 1)}{R_0(R_{90} + 1)}} \quad ۱۰-۳$$

$$r_{33} = \sqrt{\frac{R_{90}(R_0 + 1)}{(R_0 + R_{90})}} \quad ۱۱-۳$$

$$r_{12} = \sqrt{\frac{3(R_0 + 1)R_{90}}{(2R_{45} + 1)(R_0 + R_{90})}} \quad ۱۲-۳$$

در جدول ۳-۱ مقادیر ناهمسانگردی ورق AA6061-O به‌دست آمده از آزمون‌های تجربی، ارائه شده است.

جدول ۳-۱- مقادیر ناهمسانگردی  $R$ ، اندازه‌گیری شده از روش تجربی

زاویه نسبت به راستای نورد	$R$
۰	۰/۵۶
۴۵	۰/۶۵
۹۰	۰/۴۴

<sup>۱</sup> Planar anisotropy

<sup>۲</sup> R Lankford

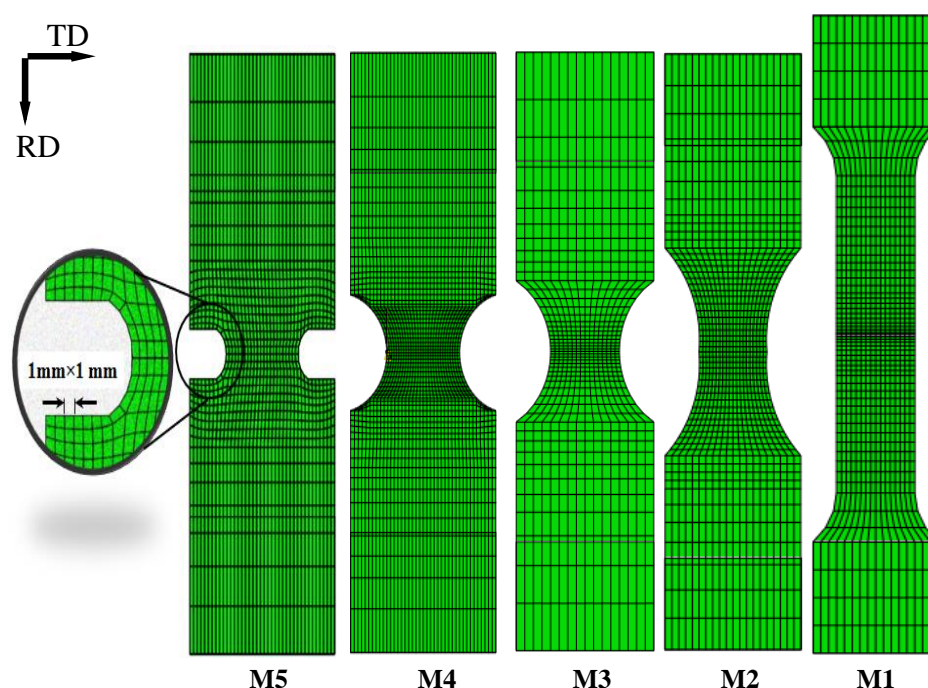
با جایگذاری مقادیر  $R_0$ ،  $R_{45}$  و  $R_{90}$  در روابط ۳-۱۰، ۳-۱۱ و ۳-۱۲، به ترتیب مقادیر  $r_{22}$  و  $r_{33}$  و  $r_{12}$  محاسبه و در جدول ۳-۲ ارائه شده است.

جدول ۳-۲: نسبت‌های تنش تسلیم برای ورق AA6061-O

نسبت تنش تسلیم					
$r_{33}$	$r_{12}$	$r_{22}$	$r_{23}$	$r_{13}$	$r_{11}$
۰/۸۲۸۵	۰/۹۴۶۲	۰/۹۲۳	۱	۱	۱
مقدار					

## ۳-۳- شبیه سازی فرایند کشش درون صفحه ای

به منظور شبیه سازی آزمون های M1 تا M5، ورق به صورت شکل پذیر<sup>۱</sup> و پوسته ای<sup>۲</sup> مدل شد. خواص ورق از جمله چگالی، مدول کشسانی، ضریب پوانسون، داده های منحنی تنش- کرنش مومسان و همچنین مقادیر ناهمسانگردی، از داده های آزمون کشش تک محوره حاصل گردید. قید جابجایی طولی بر روی لبه ی ورق به گونه ای اعمال گردید که فرایند به ناپایداری مومسان برسد. در شکل ۱-۳ نحوه ی المان بندی نمونه های درون صفحه ای نمایش داده شده است.



شکل ۱-۳- نحوه ی المان بندی نمونه های کشش درون صفحه ای

از المان S4R (پوسته ای چهار گره ای با انتگرال گیری کاهش یافته) استفاده شد. با توجه به اهمیت نقاط میانی، طول المان ها از 1 mm در وسط آغاز و هرچه به لبه های خارجی نزدیک می شود، درشت تر می گردد. در شبیه سازی فرایند کشش درون صفحه ای، به منظور کاهش زمان تحلیل از مقیاس دهی

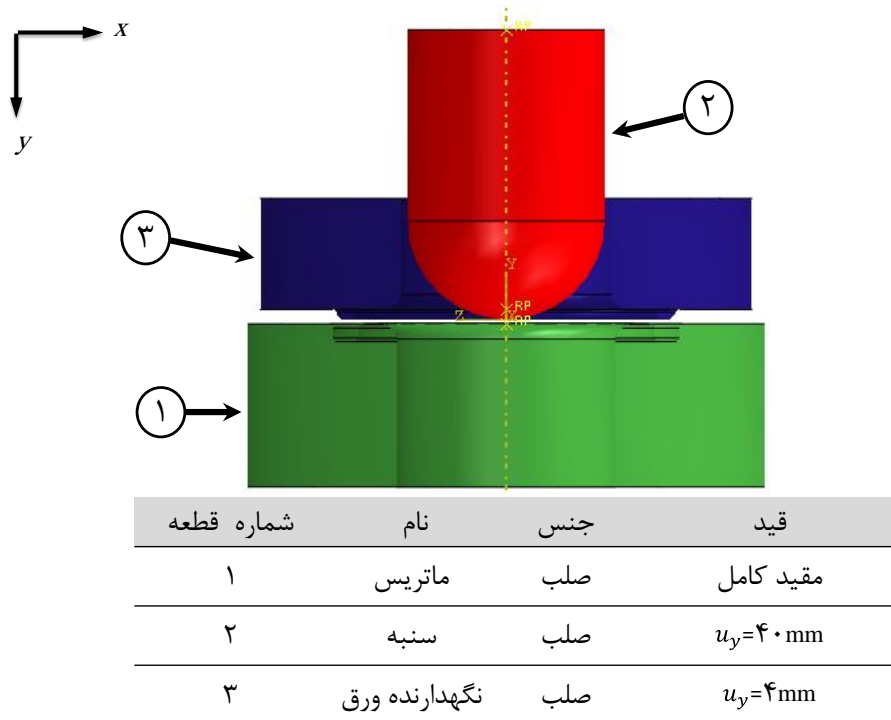
<sup>1</sup> Deformable

<sup>2</sup> Shell

جرمی<sup>۱</sup> با ضریب ۱۰۰۰ استفاده و زمان گام<sup>۲</sup> نیز برابر ۱ s در نظر گرفته شد. نمونه‌ها در این آزمون‌ها بصورت صلب در نظر گرفته شده‌اند که به نقطه مرجع آن‌ها<sup>۳</sup> جابجایی برابر با ۱۵ mm اعمال داده شده است.

### ۳-۴- شبیه‌سازی فرایند کشش برون صفحه‌ای

ساخت مدل اولیه‌ی فرایند کشش برون صفحه‌ای از نظر جنس، نوع المان و...، مشابه آزمون‌های درون صفحه‌ای می‌باشد. اجزاء آزمون برون صفحه‌ای در شکل ۳-۲ نمایش داده شده است.



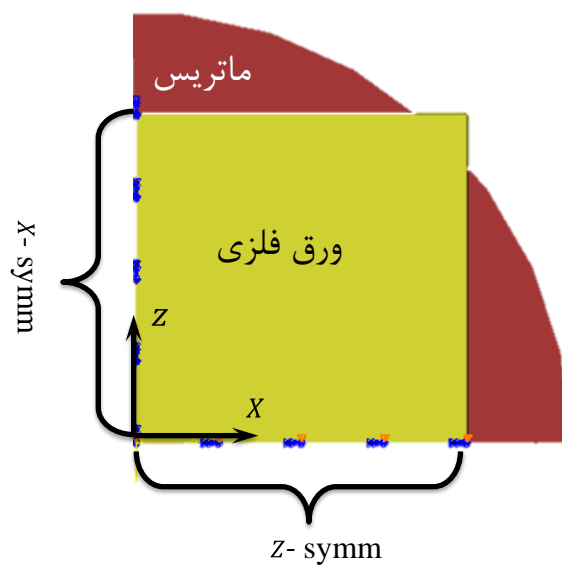
شکل ۳-۲- مدل‌سازی اجزاء آزمون برون صفحه‌ای در محیط آباکوس

مطابق شکل ۳-۳ به منظور تسهیل در انجام فرایند، یک‌چهارم نمونه‌ها شبیه‌سازی و قید تقارن صفحه‌ای بر روی لبه‌های مرتبط قرار گرفت.

<sup>1</sup> Mass scale

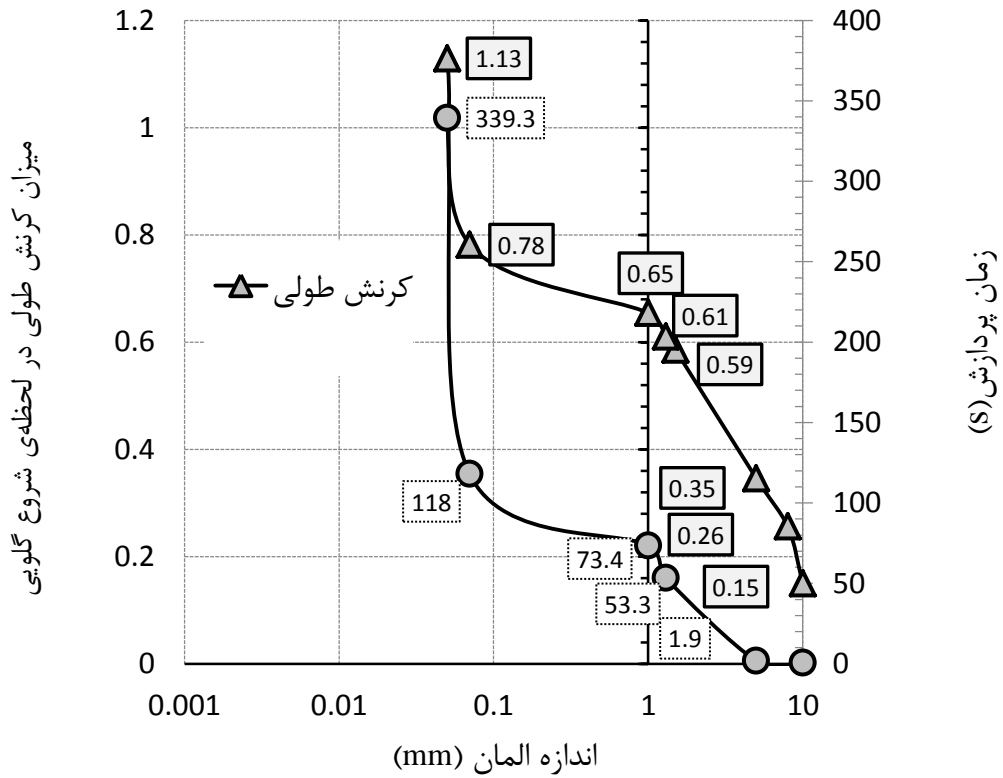
<sup>2</sup> Step time

<sup>3</sup> Reference point



شکل ۳-۳- اعمال شرط تقارن صفحه‌ای بر روی لبه‌های ورق

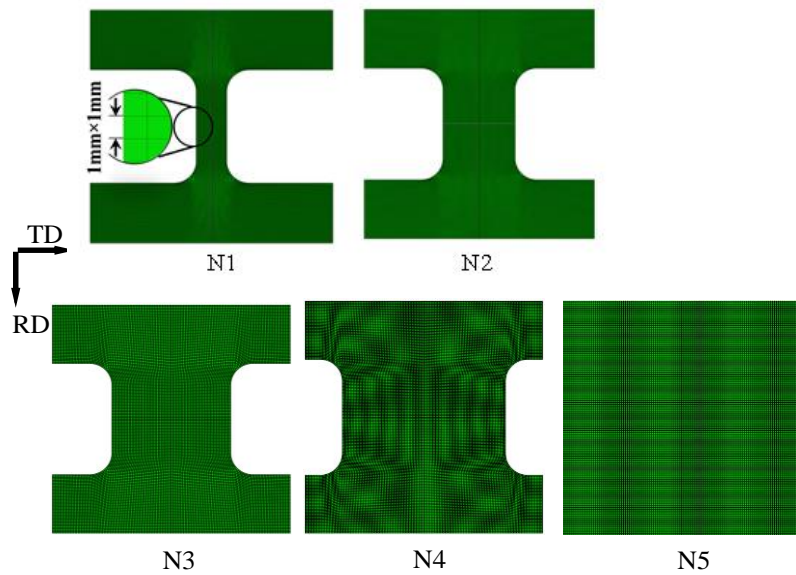
همچنین به منظور برآورد بهترین اندازه‌ی المان، کرنش حدی و زمان پردازش تا رسیدن نمونه به لحظه‌ی شروع گلویی به‌ازای اندازه‌ی المان مختلف بررسی گردید که در شکل ۳-۴ بررسی استقلال نتایج از اندازه‌ی المان برای تحلیل شکل‌دهی نمونه‌ی N5 نمایش داده شده است.



شکل ۳-۴- تأثیرپذیری نتایج FEM از اندازه‌ی المان در تحلیل نمونه‌ی N5

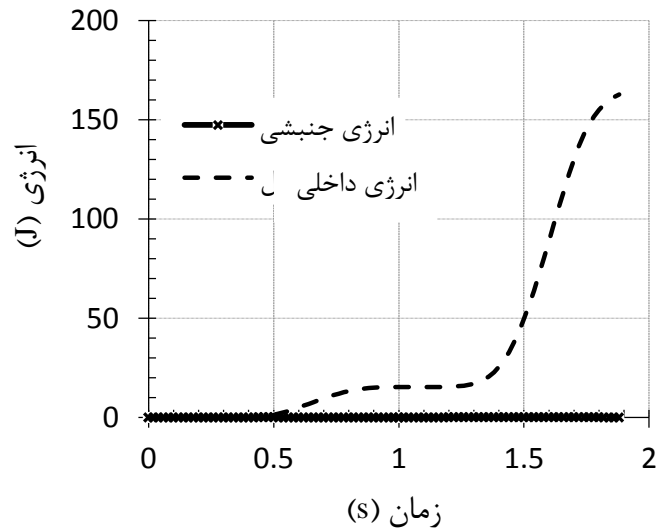
مطابق شکل با تغییر اندازه‌ی المان در محدوده ۱ mm تا ۰/۱ mm تغییر چندانی در کرنش حدی مشاهده نمی‌شود. این در حالی است که زمان تحلیل با کاهش اندازه المان به‌صورت مطلقاً صعودی در حال افزایش است. بر این اساس اندازه‌ی المان‌ها در تمام نقاط نمونه یکسان و برابر با ۱ mm لحاظ شد. در شکل ۳-۵ نحوه‌ی مش‌بندی نمونه‌های کشش برون صفحه‌ای مشاهده می‌گردد.





شکل ۳-۵- نحوه‌ی المان‌بندی نمونه‌های کشش برون صفحه‌ای

در این شبیه‌سازی ضریب مقیاس‌دهی جرمی برابر با ۱۰۰۰۰، زمان گام برابر با ۲ s و سرعت فرآیند با  $20\text{ mm/s}$  در نظر گرفته شد. در شکل ۳-۶ تغییرات انرژی جنبشی و داخلی را بر حسب زمان فرایند نمایش داده شده است.

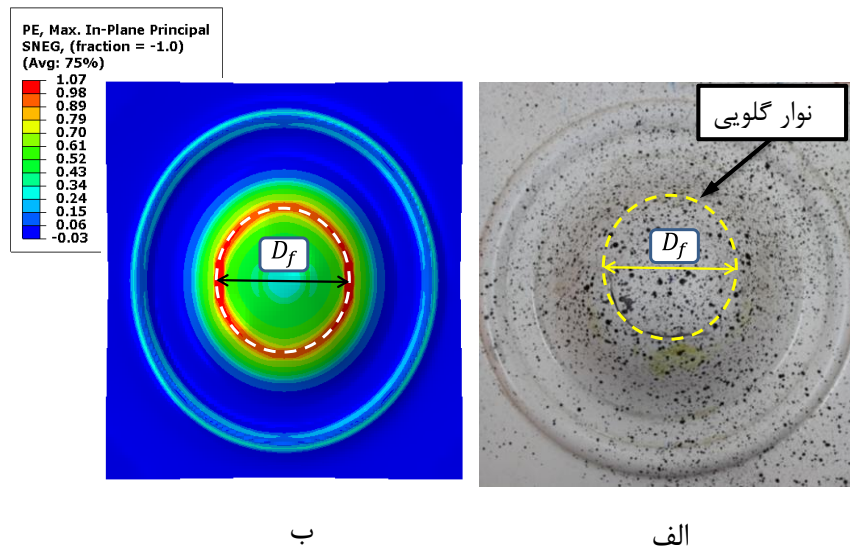


شکل ۳-۶- تغییرات انرژی جنبشی و انرژی داخلی در تحلیل نمونه‌ی N5

با توجه به اینکه انرژی جنبشی سیستم نسبت به انرژی داخلی بسیار ناچیز است، می‌توان قضاوت نمود که اثرات دینامیکی افزایش جرم بر دقت نتایج عددی تأثیر چندانی ندارد.

### ۳-۴-۱- کالیبره کردن ضریب اصطکاک در شبیه‌سازی آزمون‌های برون صفحه‌ای

نتایج تحقیقات تجربی نشان می‌دهد که محل نوار پارگی ورق در کشش با سنبه سر کروی به شدت وابسته به میزان اصطکاک است. با افزایش ضریب اصطکاک از مرکز به سمت بیرون فاصله می‌گیرد؛ از این قاعده برای کالیبراسیون مقدار مناسب ضریب اصطکاک در آزمون‌های برون صفحه استفاده شد که در شکل ۳-۷ نمونه‌ای از این آزمون مشاهده می‌گردد.



شکل ۳-۷- مقایسه‌ی قطر نوار گلویی در نمونه‌ی N5 به‌ازای ضریب اصطکاک ۰/۱۵  
(الف) حالت تجربی، (ب) FEM

$D_f$  قطر نوار پارگی می‌باشد که در دو حالت شبیه‌سازی و تجربی با دقت مطلوبی با هم برابر شد. در جدول ۳-۳ مقادیر اصطکاک بین ورق و سنبه برای آزمون‌های برون صفحه‌ای ارائه شده است. ضریب اصطکاک بین ورق و ورق گیر نیز در تمامی مدل‌ها برابر با ۰/۳ در نظر گرفته شده است.

جدول ۳-۳: ضریب اصطکاک و فاصله قطری پارگی در آزمون‌های برون صفحه‌ای

شماره آزمون	N1	N2	N3	N4	N5
ضریب اصطکاک بین ورق و سنبه	۰/۲۵	۰/۳	۰/۲	۰/۱	۰/۱۵

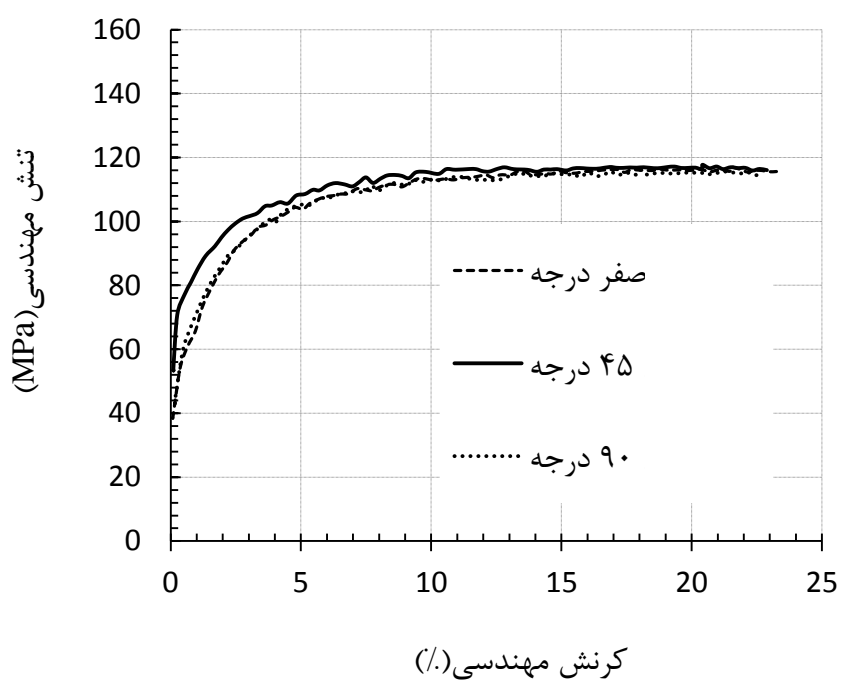
## فصل ۴ ارائه نتایج و بحث

## ۴-۱- مقدمه

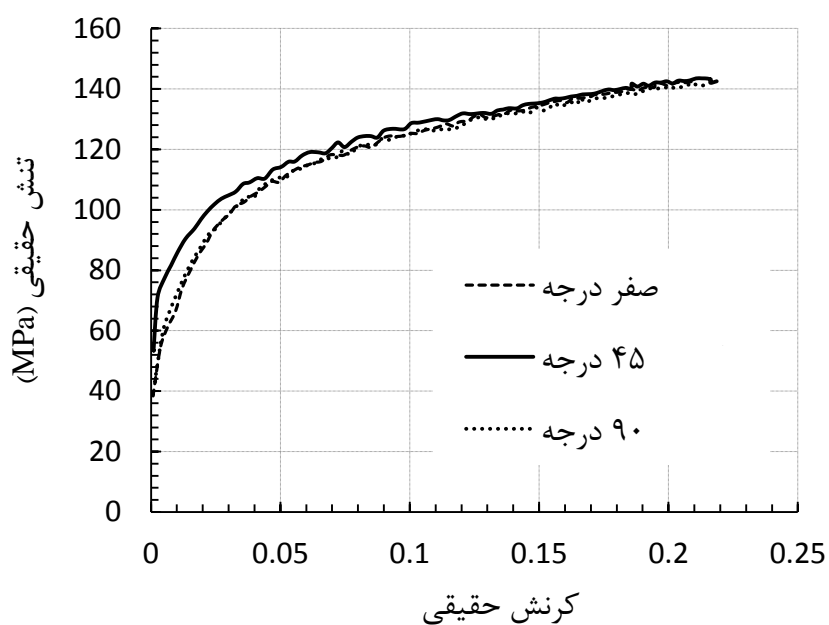
در این فصل، نتایج آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی همراه با تصاویر و نمودارهای مرتبط، ارائه می‌شود. در ابتدا، نتایج آزمون‌های تجربی تعیین خواص مواد ارائه و سپس به بهینه‌سازی متغیرهای روش DIC پرداخته می‌شود؛ در بخش بعدی مقادیر ناهمسانگردی ماده در راستای  $0^\circ$ ،  $45^\circ$  و  $90^\circ$  نسبت به RD به دو روش سنتی و DIC محاسبه و مقایسه‌ی خواهد شد. در ادامه ابتدا ملاک‌های مختلف آغاز گلوبی برای نمونه‌ی M1 به روش DIC و FEM بررسی شد. با تعمیم نتایج به سایر آزمون‌ها منحنی‌های مرتبط با مسیر کرنش و در آخر منحنی‌های حد شکل‌دهی برای آزمون‌های درون و برون صفحه‌ای ارائه گردیده است.

## ۴-۲- خواص مکانیکی ماده‌ی اولیه

در شکل‌های ۴-۱ و ۴-۲ به ترتیب منحنی‌های تنش-کرنش مهندسی و حقیقی ورق AA6061-O حاصل از آزمون کشش تک‌محوره نمونه‌های استاندارد برش شده در سه جهت  $0^\circ$ ،  $45^\circ$  و  $90^\circ$  نسبت به RD را نمایش می‌دهد.



شکل ۴-۱- تنش و کرنش مهندسی، برای سه جهت  $0^\circ$ ،  $45^\circ$  و  $90^\circ$  از آلیاژ AA6061-O



شکل ۴-۲- تنش و کرنش حقیقی، برای سه جهت  $0^\circ$ ،  $45^\circ$  و  $90^\circ$  از آلیاژ AA6061-O

مطابق شکل ۴-۲ در ابتدای تغییر شکل، تنش سیلان در جهت  $45^\circ$  بیشتر از جهت‌های  $0^\circ$  و  $90^\circ$  می‌باشد که در ادامه از میزان این تفاوت کاسته می‌شود. جدول ۴-۱ ثوابت مکانیکی جنس ماده حاصل شده از منحنی‌های فوق گزارش شده است. در این جدول  $k$  و  $n$  به ترتیب مقادیر ضریب سختی و توان کرنش سختی در معادله ساختاری  $\bar{\sigma} = k\bar{\epsilon}^n$  می‌باشد که بر طبق استاندارد ISO 10275 استخراج شد.

جدول ۴-۱: خواص مکانیکی ورق AA6061-O

جهت نسبت به راستای نورد	$n$	$k$ (MPa)	تنش نهایی (MPa)	تنش تسلیم (MPa)	درصد افزایش طول
$0^\circ$	۰/۲۳	۲۱۰	۱۱۷	۴۹/۹	۲۵
$45^\circ$	۰/۱۸	۱۹۱	۱۱۸	۷۳/۲	۲۸
$90^\circ$	۰/۲۳	۲۰۹	۱۱۶	۵۰/۳	۲۶/۹

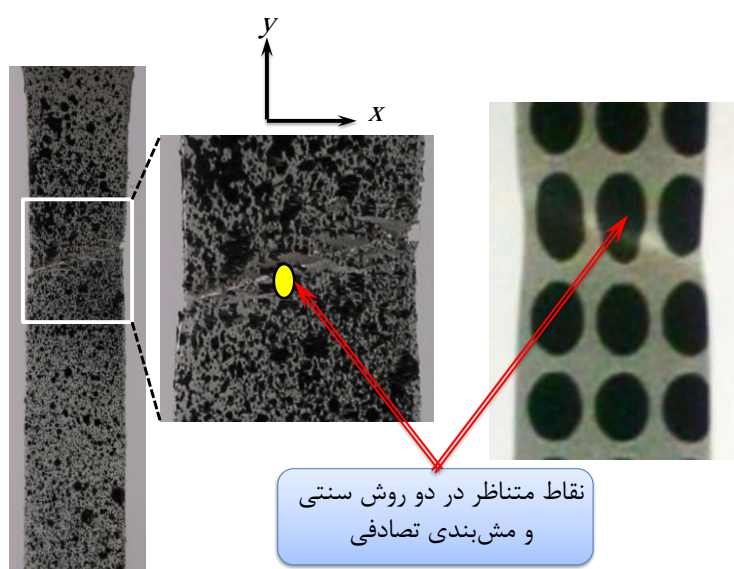
نتایج ارائه شده در جدول ۴-۱ به صورت آشکار اختلاف رفتار ورق را در راستای  $45^\circ$  نسبت به دو جهت دیگر نمایش می‌دهد.

#### ۴-۳- کالیبراسیون متغیرهای روش DIC

به منظور دستیابی به صحیح‌ترین مقادیر کرنش‌های حدی باید با تغییر مقادیر مطرح شده در روش DIC شامل: شعاع لکه، فاصله بین لکه‌ها و شعاع کرنش بهترین مقادیر را برای آن برگزید. انتخاب صحیح این مقادیر می‌تواند نقش به‌سزایی بر دقت خروجی داشته باشد. به این منظور در نقطه‌ای مشخص در مجاورت نوار گلیبی مؤلفه‌های کرنش با استفاده از روش DIC محاسبه و با نتایج اندازه‌گیری شده در وجه دیگر قطعه به روش سنتی مقایسه و خطای کرنشی ( $\Delta\epsilon$ ) از رابطه‌ی ۴-۱ محاسبه می‌شود.

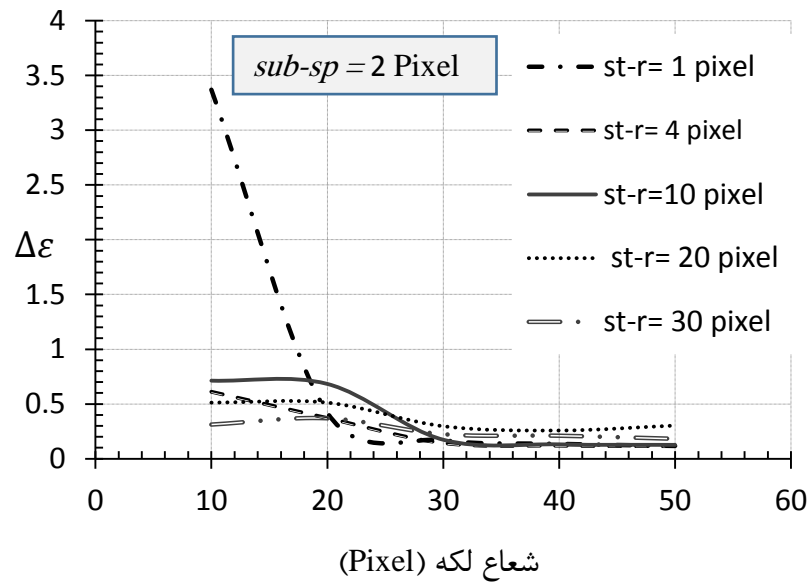
$$\Delta\varepsilon = \sqrt{(\Delta\varepsilon_x)^2 + (\Delta\varepsilon_y)^2} \quad 1-4$$

در رابطه‌ی فوق  $\Delta\varepsilon_x$  و  $\Delta\varepsilon_y$  تفاضل مقادیر کرنش برای دو روش سنتی و DIC در راستای به ترتیب محورهای  $x$  و  $y$  می‌باشد. در شکل ۳-۴ نقطه‌ی مورد بررسی در دو وجه قطعه نمایش داده شده است.



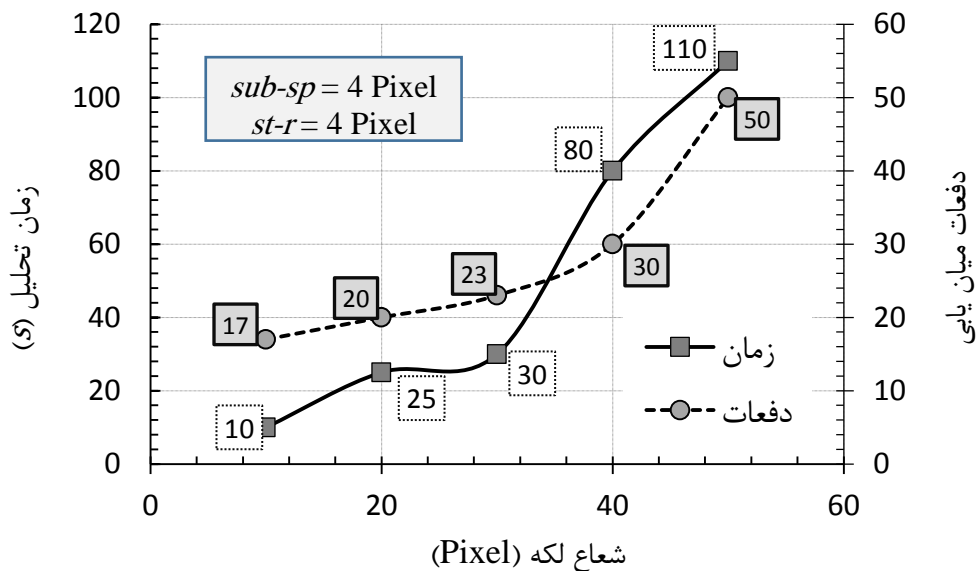
شکل ۳-۴- نقاط متناظر برای مقایسه‌ی کرنش در دو روش سنتی و مش بندی تصادفی از نمونه‌ی M1

در شکل ۴-۴ خطای کرنش به‌ازای مقادیر مختلف شعاع کرنش و شعاع لکه برای نمونه‌ی M1 نمایش داده شده است. مطابق این شکل به فرض ثابت بودن فاصله‌ی بین لکه‌ها، با بزرگ شدن متغیر اندازه-ی لکه تا ۳۰ Pixel به‌ازای تمامی مقادیر شعاع کرنش میزان خطا کاهش می‌یابد و پس از آن تغییرات نامحسوس است.



شکل ۴-۴- خطای کرنشی به‌ازای مقادیر مختلف شعاع کرنش و شعاع لکه در نمونه‌ی M1

در شکل ۴-۵ تغییرات زمان انجام تحلیل و دفعات میان‌یابی در روش DIC بر حسب متغیر شعاع لکه نمایش داده شده است.

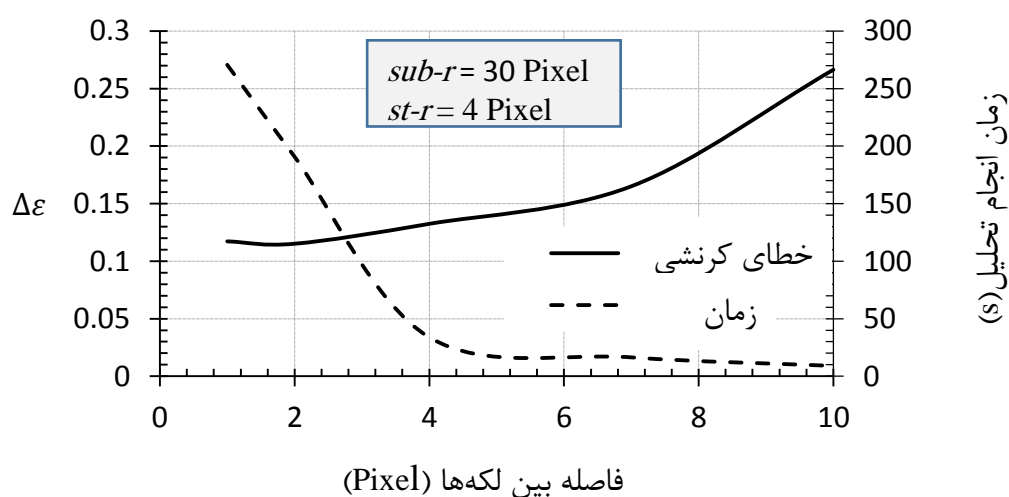


شکل ۴-۵- زمان و تعداد دفعات میان‌یابی انجام تحلیل هم‌بستگی بر حسب شعاع لکه در نمونه‌ی

M1

بر این اساس با فرض ثابت بودن فاصله بین لکه‌ها با افزایش شعاع لکه، زمان برای مکان‌یابی و تعداد دفعات میان‌یابی DIC افزایش می‌یابد.

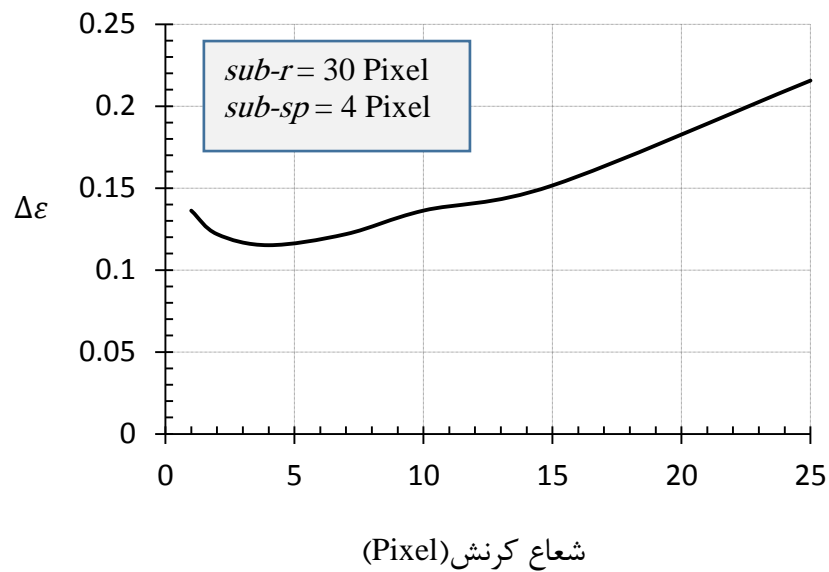
در شکل ۴-۶ اثر فاصله بین لکه‌ها در حالتی که شعاع لکه و شعاع کرنش ثابت باشد، بر روی زمان انجام تحلیل و خطای کرنشی نشان داده شده است. مطابق شکل، افزایش فاصله بین لکه‌ها اگرچه موجب کاهش زمان محاسبات می‌شود ولی از سوی دیگر باعث نادیده گرفتن تعداد زیادی از نقاط در محاسبه کرنش و در نتیجه افزایش خطای کرنشی خواهد شد.



شکل ۴-۶- خطای کرنشی و زمان تحلیل DIC بر حسب فاصله بین لکه‌ها در نمونه‌ی M1

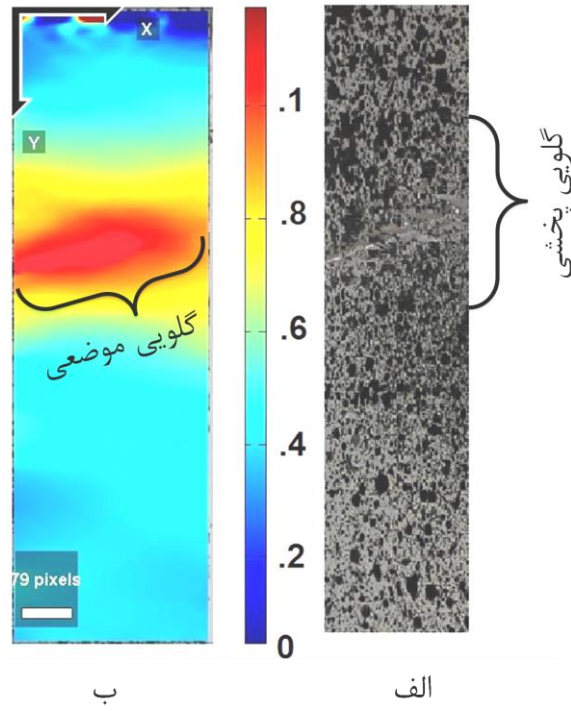
در شکل ۴-۷ خطای کرنش با افزایش شعاع کرنش به‌ازای مقادیر ثابتی از شعاع لکه و فاصله بین آن‌ها نمایش داده شده است. همان‌طور که در قبل اشاره گردید انتخاب مقدار صحیح برای شعاع کرنش می‌تواند نقش مؤثری در کاهش اختلالات مکان‌یابی و در نهایت افزایش دقت در میزان اندازه‌گیری کرنش داشته باشد.



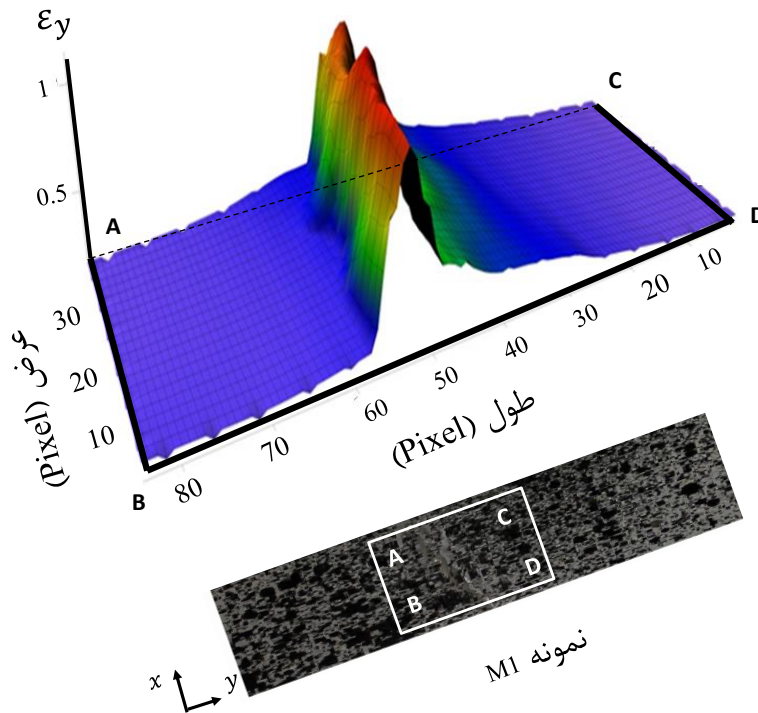


شکل ۴-۷- خطای کرنشی برحسب شعاع کرنش در تحلیل DIC نمونه‌ی M1

در نهایت می‌توان نتیجه گرفت: تحلیل با شعاع لکه ۳۰ Pixel، فاصله بین لکه ۴ Pixel و همچنین شعاع کرنش ۴ Pixel، کمترین مقدار خطا را خواهد داشت. با استفاده از این مقادیر، در شکل ۴-۸ توزیع کرنش طولی در نمونه‌ی M1 ارائه شده است. همچنین توپوگرافی کرنش طولی به صورت سه-بعدی حاصل از تحلیل DIC کشش نمونه‌ی M1 در مجاورت نوار گلوبی موضعی به کمک نرم‌افزار Surfer به دست آمد که نتیجه در شکل ۴-۹ ارائه شده است.

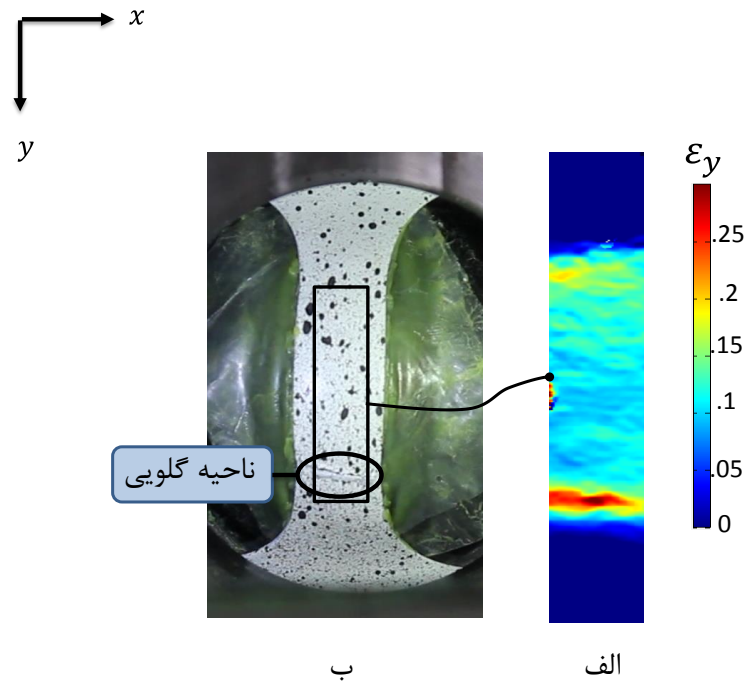


شکل ۴-۸- نتایج محاسبه کرنش طولی ( $\epsilon_y$ ) به روش DIC در نمونه‌ی M1  
 (الف) الگوی تصادفی پس از گلویی شدن، (ب) پراکندگی کرنش



شکل ۴-۹- توپوگرافی کرنش طولی نمونه‌ی M1 حاصل از روش DIC به کمک نرم‌افزار Surfer

به صورت مشابه برای آزمون‌های کشش برون صفحه‌ای با سنبه سرکروی نیز تحلیل تجربی کرنش تا رسیدن به آستانه‌ی پارگی انجام شد. به عنوان نمونه در شکل ۴-۱۰ توزیع کرنش طولی آزمون N1 حاصل از تحلیل DIC در لحظه‌ی شروع گلوپی نمایش داده شده است.

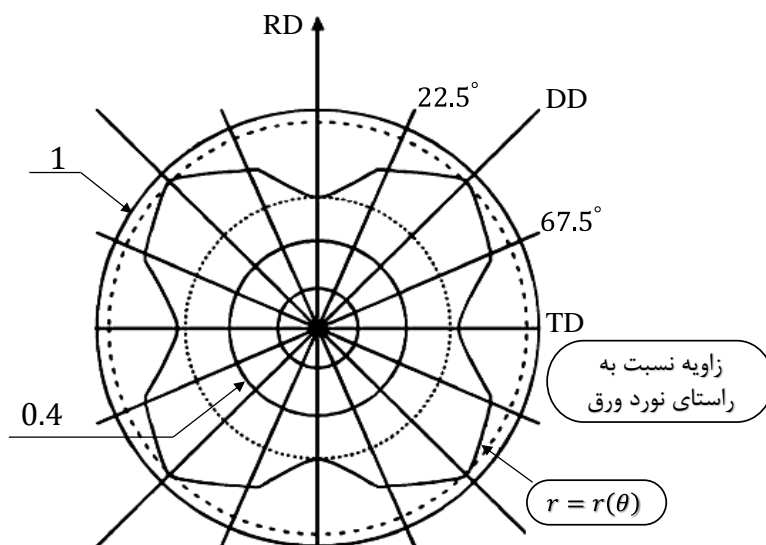


شکل ۴-۱۰- نتایج محاسبه کرنش طولی آزمون N1 به روش DIC  
(الف) توزیع کرنش، (ب) نمونه‌ی در حین تغییر شکل

#### ۴-۴- اندازه‌گیری تغییرات مقادیر ناهمسانگردی

در این بخش مقادیر ناهمسانگردی ورق به سه روش برای نمونه‌ی M1 مورد محاسبه قرار گرفت. در روش اول با استفاده از استاندارد ASTM E517 که روش سنتی و متداول در اندازه‌گیری این مقادیر است، پس از ۱۲٪ افزایش طول نسبی، تغییر ابعادی نمونه در جهت‌های طولی و عرضی اندازه‌گیری و از رابطه‌ی ۴-۱ مقدار ناهمسانگردی محاسبه شد. در روش دوم و سوم با استفاده از همبستگی تصاویر دیجیتال به ترتیب با شبکه‌بندی منظم و تصادفی، مقدار ناهمسانگردی  $R$  محاسبه گردید. جدول ۳-۱ مقادیر ناهمسانگردی که با استفاده از روش اول (سنتی) به‌ازای کرنش ۱۲٪ به‌دست آمده گزارش

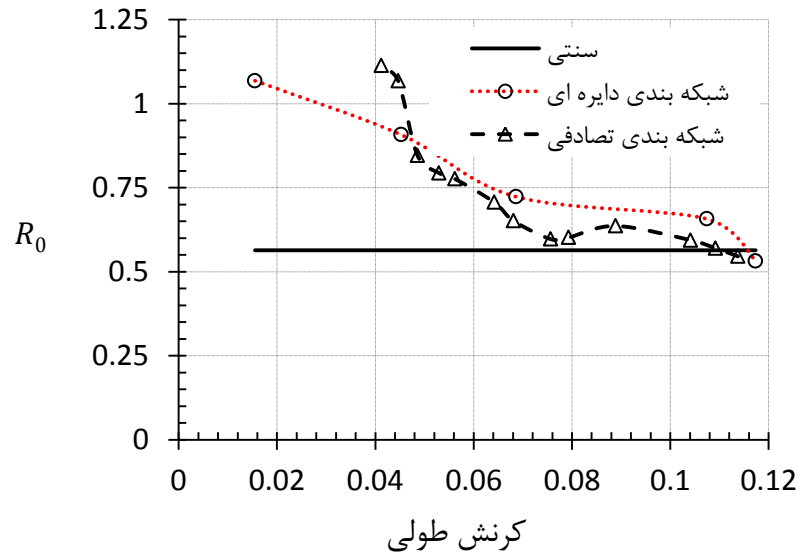
شده است. همچنین میزان مقدار ناهمسانگردی برای راستای  $45^\circ$  بیشترین و برای راستای  $90^\circ$  کمترین مقدار را دارد که این تفاوت به صورت مشابه در دیگر گزارش‌های علمی نیز تأیید شده است. در شکل ۴-۱۱ تغییرات مقدار ناهمسانگردی برای یک ورق فلزی با ناهمسانگردی شدید، در جهت‌های مختلف نسبت به نورد از مرجع [۴۷] ارائه شده است.



شکل ۴-۱۱- تغییرات مقدار ناهمسانگردی یک ورق ناهمسانگرد شدید در جهت‌های مختلف [۴۷]

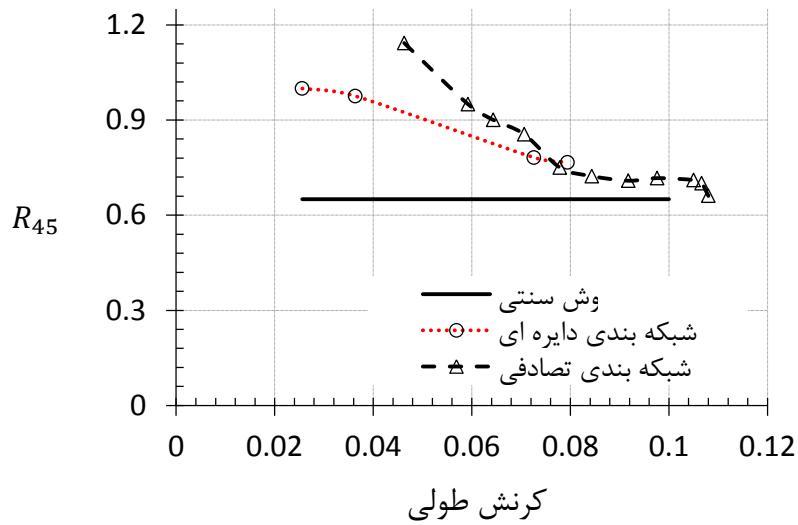
در شکل ۴-۱۲ تغییرات مقدار ناهمسانگردی  $R_0$  بر حسب کرنش طولی که با استفاده از روش سنتی و روش هم‌بستگی تصاویر دیجیتال در دو نوع الگو فوق‌الذکر محاسبه شده، مشاهده می‌شود. مطابق این شکل، افزایش کرنش، موجب کاهش مقدار ناهمسانگردی لحظه‌ای می‌شود که تا رسیدن به کرنش طولی  $0/12$  با مقدار محاسبه شده از روش سنتی برابری خواهد نمود. بر این اساس می‌توان قضاوت کرد که استفاده از روش سنتی در تحلیل فرآیندهای شکل‌دهی ورق‌های فلزی به ازای کرنش‌های کوچک دارای خطا می‌باشد. به‌عنوان مثال در فرآیند خم‌کاری ورق به ضخامت  $t$  روی شعاع قالب  $\rho$  که میزان کرنش از رابطه‌ی  $\varepsilon = \frac{t}{2\rho}$  محاسبه می‌شود؛ مادامی که نسبت خم  $\frac{\rho}{t}$  بزرگ‌تر از ۵ باشد؛ کرنش طولی از  $0/12$  کوچک‌تر و مقادیر ناهمسانگردی واقعی از مقادیر ناهمسانگردی

سنٹی بیشتر خواهد بود. همچنین از شکل ۴-۱۲ برمی آید که الگوی مش تصادفی در کرنش ۰/۱ با دقت بیشتری با نتایج اندازه گیری سنٹی منطبق خواهد شد.



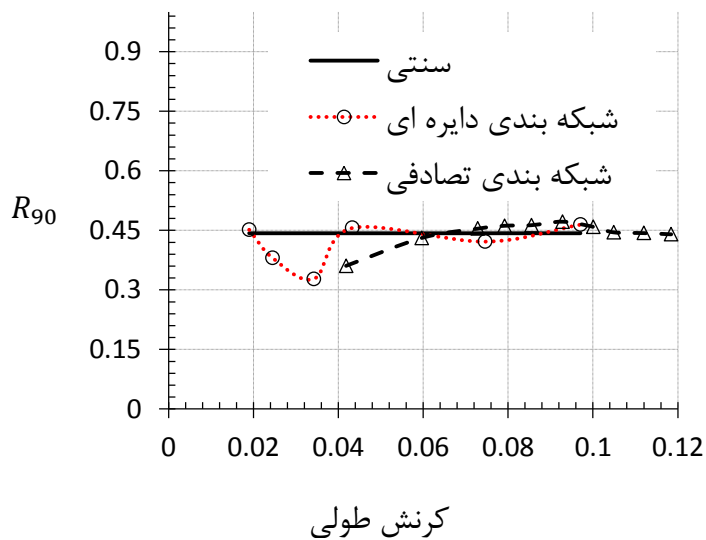
شکل ۴-۱۲- مقدار ناهمسانگردی  $R_0$  برحسب کرنش طولی، روش سنٹی و DIC با الگوی مش بندی منظم و تصادفی

همان طور که در شکل ۴-۱۳ دیده می شود تغییرات مقدار ناهمسانگردی در جهت  $45^\circ$  نسبت به نورد، با افزایش کرنش طولی با روندی نزولی به سمت مقدار ناهمسانگردی استخراج شده توسط روش سنٹی پیش می رود. همچنین مقادیر ناهمسانگردی در مش تصادفی نامنظم بالاتر از مقدار مش منظم به دست آمده است که به نظر می رسد به مقدار واقعی نزدیک تر باشد. علت این خطا در روش مش منظم بزرگ تر بودن ناحیه ی شعاع اندازه گیری نسبت به مش تصادفی خواهد بود



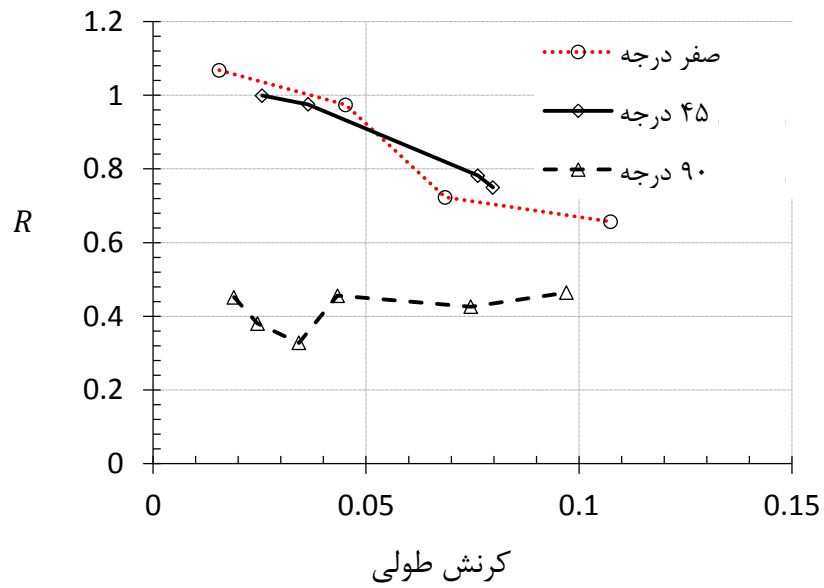
شکل ۴-۱۳- مقدار ناهمسانگردی  $R_{45}$  برحسب کرنش طولی، روش سنتی و DIC با الگوی مش بندی منظم و تصادفی

مقدار ناهمسانگردی در جهت TD مطابق شکل ۴-۱۴ حالتی نوسانی را پیرامون مقدار ناهمسانگردی حاصل از روش سنتی دارد. این مقدار با عبور کرنش طولی از مقدار ۰/۱ با نوسان تقریباً کم و یکنواخت، با مقدار سنتی برابر می شود.

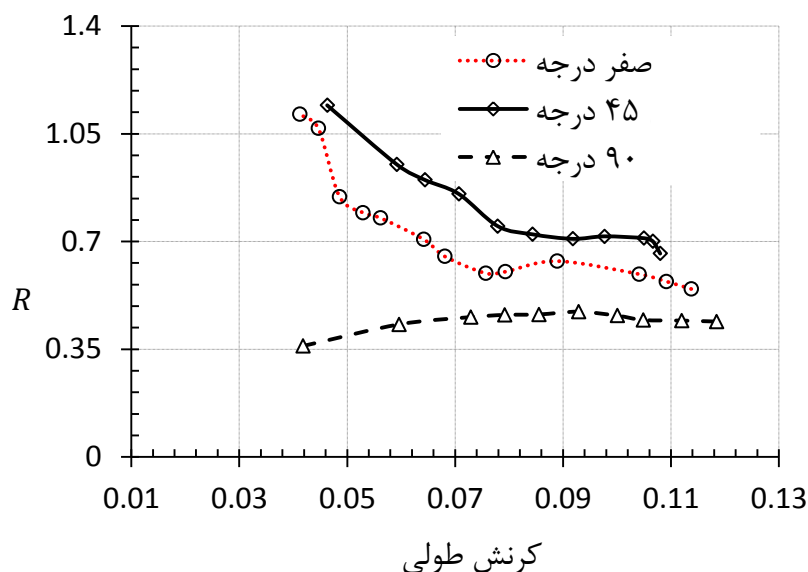


شکل ۴-۱۴- مقدار ناهمسانگردی  $R_{90}$  برحسب کرنش طولی، روش سنتی و DIC با الگوی مش بندی منظم و تصادفی

به جهت جمع‌بندی نتایج فوق، در شکل‌های ۴-۱۵ و ۴-۱۶ تغییرات مقدار ناهمسانگردی با افزایش کرنش طولی در نمونه‌هایی با دو نوع شبکه‌بندی به‌ترتیب دایره‌ای منظم و شبکه‌بندی تصادفی نمایش داده شده است.



شکل ۴-۱۵- مقدار ناهمسانگردی  $R$  برحسب کرنش طولی در سه جهت نسبت به راستای نورد، روش DIC با الگوی مش‌بندی منظم

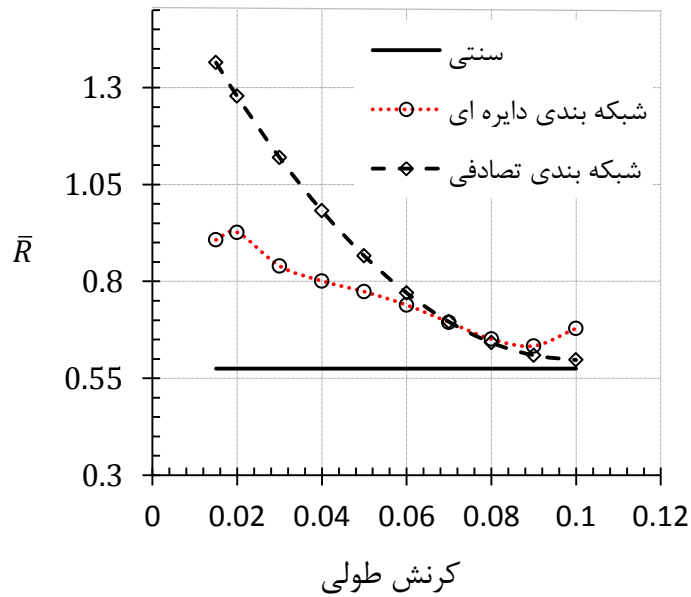


شکل ۴-۱۶- مقدار ناهمسانگردی  $R$  برحسب کرنش طولی در سه جهت نسبت به راستای نورد، روش DIC با الگوی مش‌بندی تصادفی

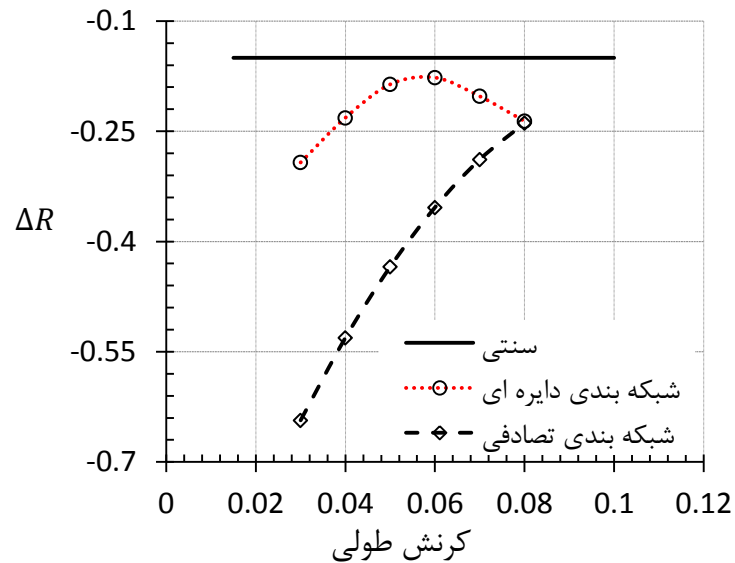
با توجه به نتایج فوق می‌توان استنباط کرد نتایج حاصل از روش هم‌بستگی تصاویر دیجیتال در حالت الگوی نامنظم تصادفی، دارای دقت و صحت بیشتری نسبت به مش منظم می‌باشد زیرا که در این روش به‌علت کوچک بودن شعاع حوزه هم‌بستگی نسبت به مش منظم تعداد نقاط قابل بررسی بسیار بیشتر بوده در نتیجه مقدار ناهمسانگردی به‌صورت محلی قابل اندازه‌گیری است در حالی که در مش منظم تعداد نقاط قابل اندازه‌گیری محدود به تعداد دوایر می‌باشد.

مقدار ناهمسانگردی نرمال  $\bar{R}$  که بیان‌کننده تفاوت متوسط خواص نرمال نسبت به خواص صفحه‌ای می‌باشد؛ و همچنین مقدار ناهمسانگردی صفحه‌ای  $\Delta R$  که معرف میزان متوسط تفاوت در خواص درون صفحه‌ای ورق است، با در اختیار داشتن مقادیر ناهمسانگردی در جهت‌های مختلف نسبت به کرنش از روابط ۱-۵ و ۱-۶ قابل محاسبه است که نتایج در شکل‌های ۴-۱۷ و ۴-۱۸ گزارش شده است.





شکل ۴-۱۷- مقدار ناهمسانگردی  $\bar{R}$  برحسب کرنش طولی با روش سنتی با الگوی مش بندی منظم و تصادفی



شکل ۴-۱۸- مقدار ناهمسانگردی  $\Delta R$  برحسب کرنش طولی با روش سنتی با الگوی مش بندی منظم و تصادفی

مطابق شکل ۴-۱۸ افزایش کرنش طولی موجب کاهش ناهمسانگردی صفحه‌ای خواهد شد که این پدیده می‌تواند از شکست دانه‌ها و ریزتر شدن اندازه آنها نشأت گرفته باشد. بر این اساس نتیجه

می‌شود شدت پدیده‌های متأثر از ناهمسانگردی صفحه‌ای مانند گوشواره شدن متأثر از میزان کرنش محصول می‌باشد.

#### ۴-۵- نحوه‌ی رشد سطح تسلیم (سخت‌شوندگی)

به‌منظور بررسی نحوه‌ی رشد سطح تسلیم در ورق آلومینیوم AA6061-O در ابتدا فرض شد که ورق از معیار هیل ۴۸ تبعیت می‌کند. تنش مؤثر این معیار در رابطه‌ی ۲-۱۷ بیان شده است. اگر تنش تسلیم در راستای  $0^\circ$  و  $90^\circ$  نسبت به راستای نورد برابر با  $\sigma_{y_0}$  و  $\sigma_{y_{90}}$  بیان شود، می‌توان نوشت:

$$\sigma_{y_{90}} = \sigma_{y_0} \sqrt{\frac{R_{90}(1 + R_0)}{R_0(1 + R_{90})}} \quad ۲-۴$$

تنش تسلیم در بارگذاری دو محور یکسان را با  $\sigma_b$  نشان می‌دهند. با استفاده از معیار تسلیم فوق-الذکر و رابطه‌ی  $\sigma_b = \sigma_1 = \sigma_2$  می‌توان رابطه‌ی زیر را به‌دست آورد:

$$\sigma_b = \sigma_{y_0} \sqrt{\frac{(1 + \bar{R})}{2}} \quad ۳-۴$$

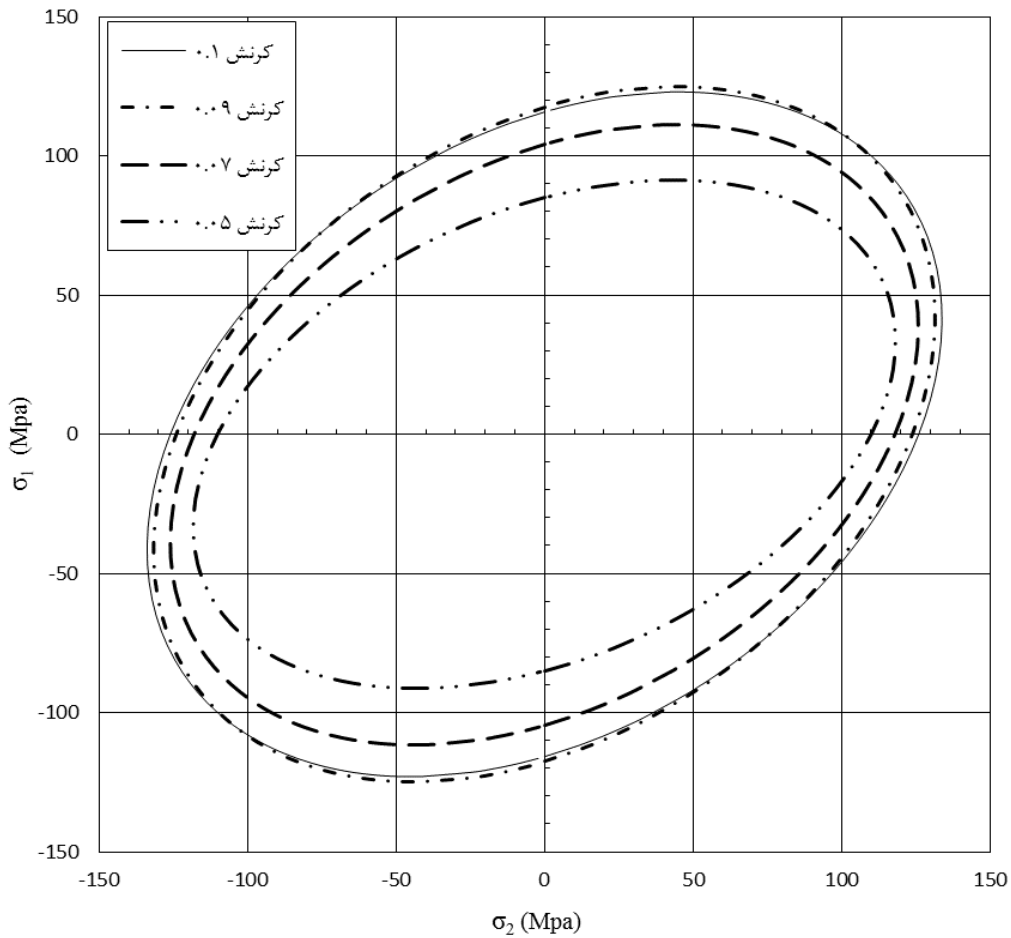
در جدول ۲-۴، برای چهار مرحله‌ی A تا D از تغییر شکل به ازای مقادیر مختلف کرنش طولی  $\epsilon_1$  و مقدار ناهمسانگردی  $\bar{R}$ ، مؤلفه‌های تنش سیلان در دو جهت  $0^\circ$  و  $90^\circ$  ( $\sigma_{y_0}$  و  $\sigma_{y_{90}}$ ) و تنش تسلیم در بارگذاری دوماحوری یکسان  $\sigma_b$  که از روابط ۲-۴ و ۳-۴ محاسبه شده است؛ مشاهده می‌شود. در ستون‌های دیگر این جدول که با  $\Delta$  مشخص شده، تغییرات مؤلفه‌های تنش نسبت به حالت A که پارامتری برای بیان میزان سخت‌شوندگی در مسیرهای مختلف از تغییر شکل صفحه‌ای است، گزارش شده است.

جدول ۴-۲: تنش سیلان ورق آلومینیوم AA6061-O در جهتهای مختلف،

بهزای مقادیر مختلف کرنش مؤثر

	$\varepsilon_1$	$\bar{R}$	$\sigma_{y_0}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{y_0}$ (MPa)	$\sigma_{y_{90}}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{y_{90}}$ (MPa)	$\sigma_b$ (MPa)	$\Delta\sigma_b$ (MPa)
حالت A	۰/۰۵	۰/۸۷	۱۱۰	۰	۸۵/۷	۰	۱۰۶/۳۶	۰
حالت B	۰/۰۷	۰/۷	۱۱۸	۸	۱۰۴	۱۸/۳	۱۰۸/۷۹	۲/۴۳
حالت C	۰/۰۹	۰/۶۱	۱۲۴	۱۴	۱۱۷	۳۱/۳	۱۱۱/۲۶	۴/۹
حالت D	۰/۱	۰/۶	۱۲۶	۱۶	۱۱۷/۵	۳۱/۸	۱۱۲/۷	۶/۳۴

در شکل ۴-۱۹ مکان هندسی سطح تسلیم هیل ۴۸ در صفحه‌ی تنش  $\sigma_1$  و  $\sigma_2$ ، در چهار حالت ذکر شده در جدول ۴-۲ مشاهده می‌شود.



شکل ۴-۱۹- رشد سطح تسلیم آلیاژ AA6061-O به‌ازای چهار کرنش مختلف در طی فرایند، بر اساس معیار تسلیم هیل ۴۸

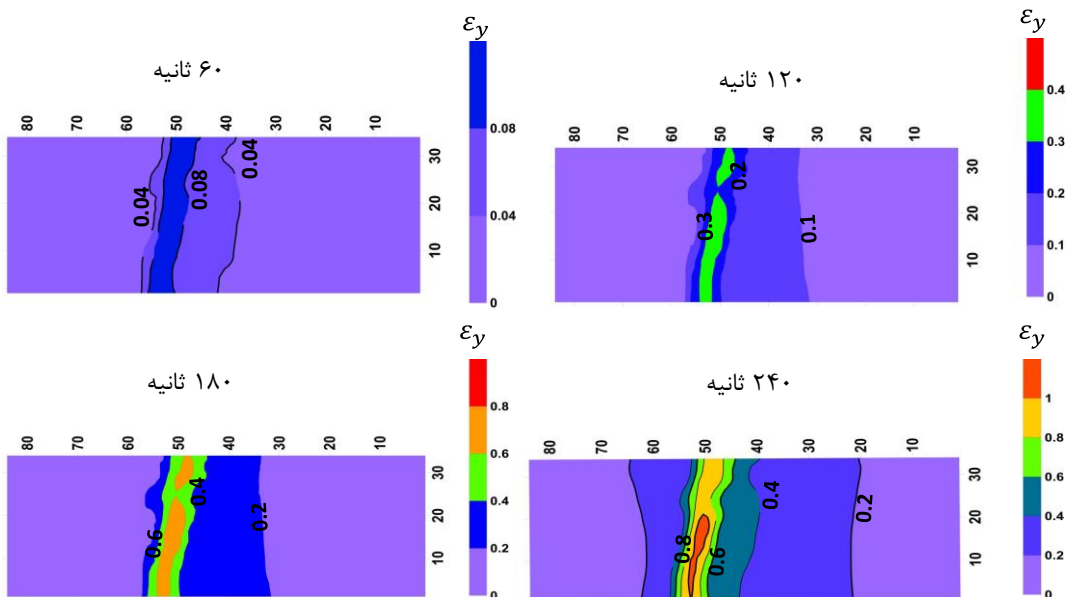
همان‌طور که قابل پیش‌بینی است با افزایش میزان کرنش از حالت A تا D، به‌علت پدیده کرنش سختی، رشد سطح تسلیم و افزایش قطر بزرگ و کوچک بیضی تسلیم رخ خواهد داد. البته باید به این نکته توجه داشت که با افزایش کرنش از حالت A تا D، مقدار ناهمسانگردی در این ورق، کمتر و در نتیجه نسبت قطر بزرگ به کوچک بیضی کمتر و در نتیجه شکل کلی بیضی به دایره نزدیک‌تر می‌شود. در خصوص نحوه و میزان سخت‌شوندگی در جهت‌های مختلف می‌توان نتیجه‌گیری کرد؛ اولاً ورق در تمام جهت‌ها رفتاری سخت‌شونده دارد. ثانیاً میزان سخت‌شوندگی در جهت عمود بر نورد بیشترین شدت را از خود نشان می‌دهد به‌گونه‌ای که رشد سطح تسلیم در این جهت تقریباً دو برابر

جهت نورد و ۱/۵ برابر جهت دو محوری یکسان است. با رسیدن به کرنش ۰/۰۹ رشد سطح تسلیم و سخت‌شوندگی ورق متوقف می‌شود. در مجموع می‌توان نتیجه گرفت ورق AA6061-O دارای رفتار سخت‌شوندگی مومسان کاملاً ناهمسانگرد می‌باشد.

#### ۴-۶- تشخیص لحظه‌ی شروع گلوبی

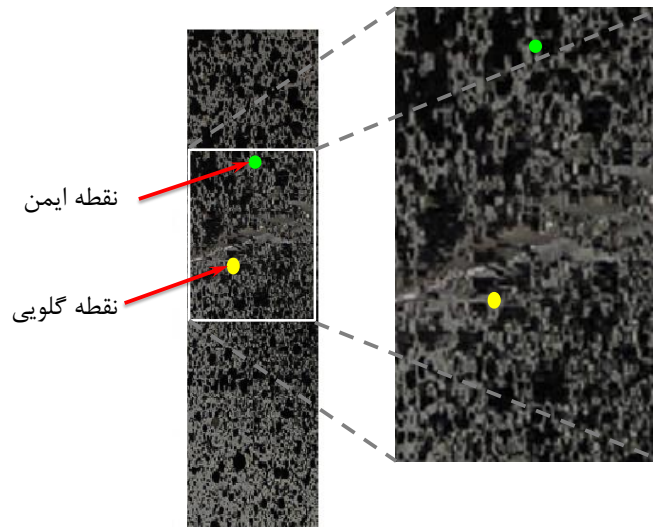
به منظور ترسیم منحنی‌های حد شکل‌دهی باید لحظه‌ی شروع گلوبی در آزمون‌های درون و برون صفحه‌ای تشخیص داده شود. تاکنون رابطه‌ای که بتواند مکان و زمان دقیق شروع گلوبی را در حین فرایندهای شکل‌دهی پیش‌بینی کند؛ ارائه نشده است. در نتایج مشاهدات و تحقیقات تجربی گلوبی موضعی همراه با تغییرات آنی نسبتاً شدید در کرنش‌های طولی، عرضی و ضخامتی ورق در یک نوار باریک گزارش شده است. در این تحقیق امکان استخراج لحظه به لحظه‌ی پراکندگی مؤلفه‌های کرنش در سطح ورق ایجاد گردید.

در شکل ۴-۲۰ به عنوان نمونه توزیع کرنش طولی نمونه در چهار لحظه از آزمون کشش نمونه M1 نمایش داده شده است.



شکل ۴-۲۰- توزیع کرنش طولی نمونه در چهار لحظه از آزمون کشش، حاصل از DIC، برای نمونه‌ی M1

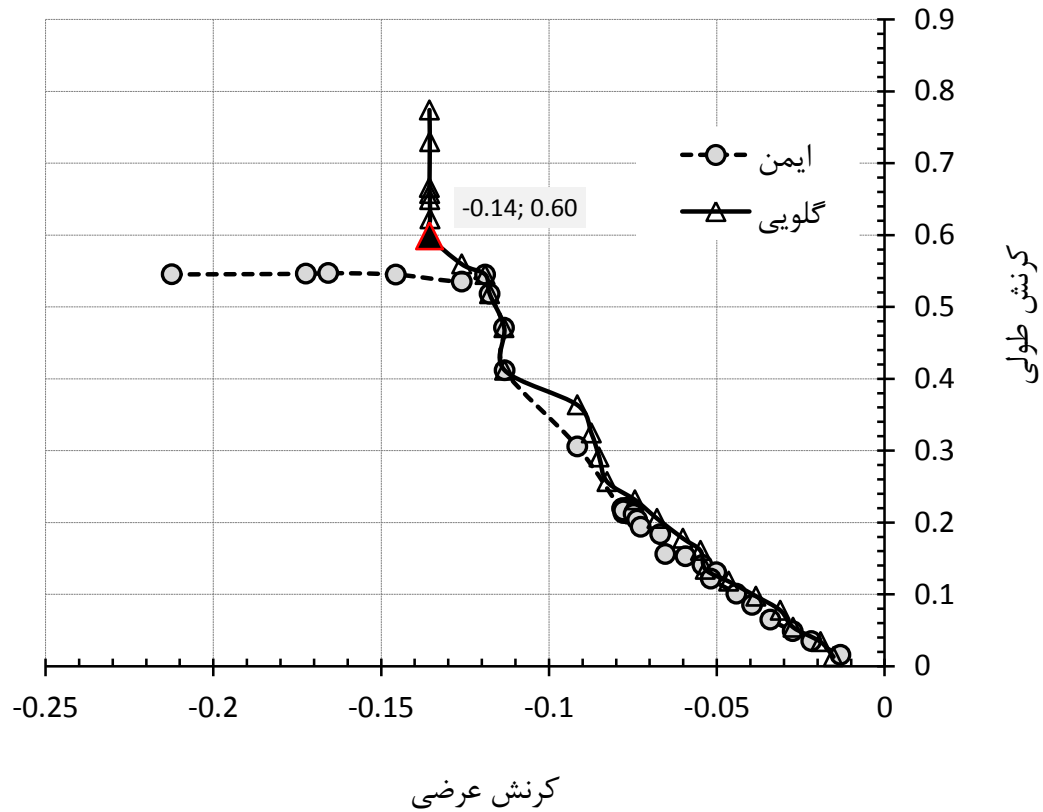
همانطور که دیده می‌شود در ابتدا نوار گلویی سراسری ایجاد و سپس در طی انجام آزمون کشش، کرنش طولی در نوار باریک گلویی به شدت رشد می‌کند. به منظور تشخیص لحظه‌ی شروع گلویی، دو نقطه یکی در ناحیه‌ی ایمن و دیگری نزدیک ناحیه‌ی گلویی انتخاب شد. به عنوان نمونه این نقاط برای قطعه M1 در شکل ۴-۲۱ نمایش داده شده است.



شکل ۴-۲۱- نقطه گلویی و ایمن بر روی نمونه‌ی آزمون M1

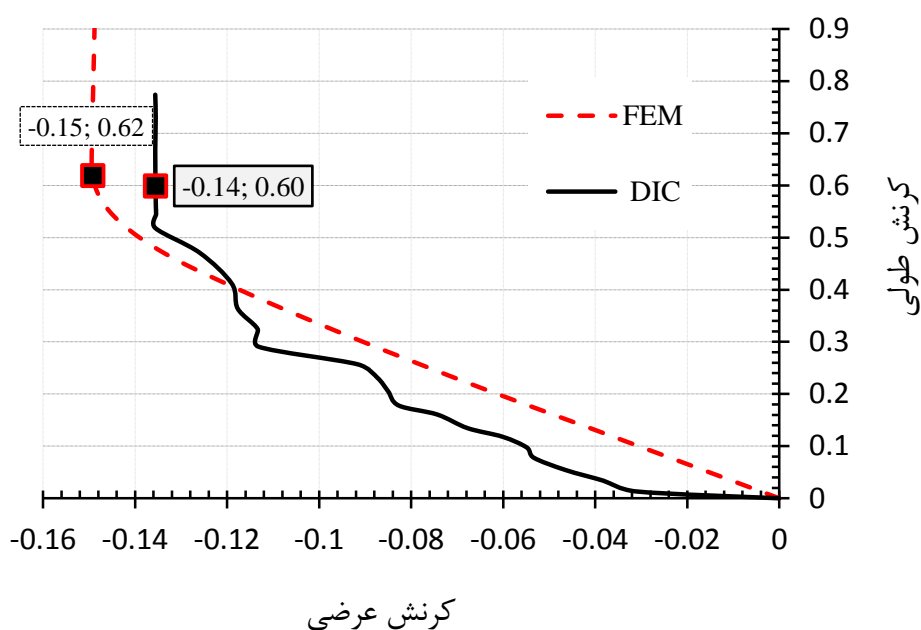
شکل ۴-۲۲ مقادیر کرنش عرضی و طولی به دست آمده از DIC، در حین آزمون کشش برای دو نقطه مورد نظر نشان می‌دهد. در لحظه‌ی شروع گلویی، رشد کرنش طولی در ناحیه‌ی سالم متوقف و در ناحیه‌ی گلویی شدت می‌گیرد که به این پدیده انشقاق کرنش<sup>۱</sup> گفته می‌شود. نماد مورد استفاده برای کرنش حدی با رنگ مشکی توپر از دیگر نقاط متمایز شده است.

<sup>۱</sup> Strain bifurcation



شکل ۴-۲۲- ایجاد پدیده انشقاق در مسیر کرنش نواحی سالم و گلوبی، حاصل از DIC، برای نمونه-  
ی M1

تغییرات کرنش طولی برحسب کرنش عرضی برای نتایج حاصل از دو روش DIC و FEM در شکل ۴-۲۳ نمایش داده شده است که نتایج تحلیل FEM نیز تأیید کننده‌ی نتایج DIC می‌باشد. پس از آغاز و رشد گلوبی سراسری، گلوبی موضعی در نوار باریک ایجاد می‌شود. در یک لحظه کوتاه کرنش عرضی تقریباً ثابت می‌ماند که این حالت خود می‌تواند نشان دهنده‌ی شروع گلوبی موضعی در قطعه کار باشد.

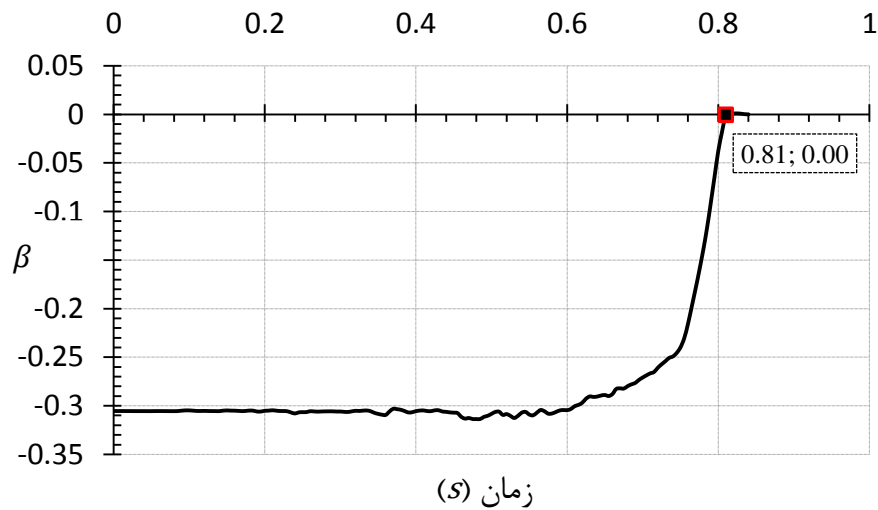


شکل ۴-۲۳- مسیر کرنش ناحیه‌ی گلوبی، حاصل از FEM و DIC، برای نمونه‌ی M1

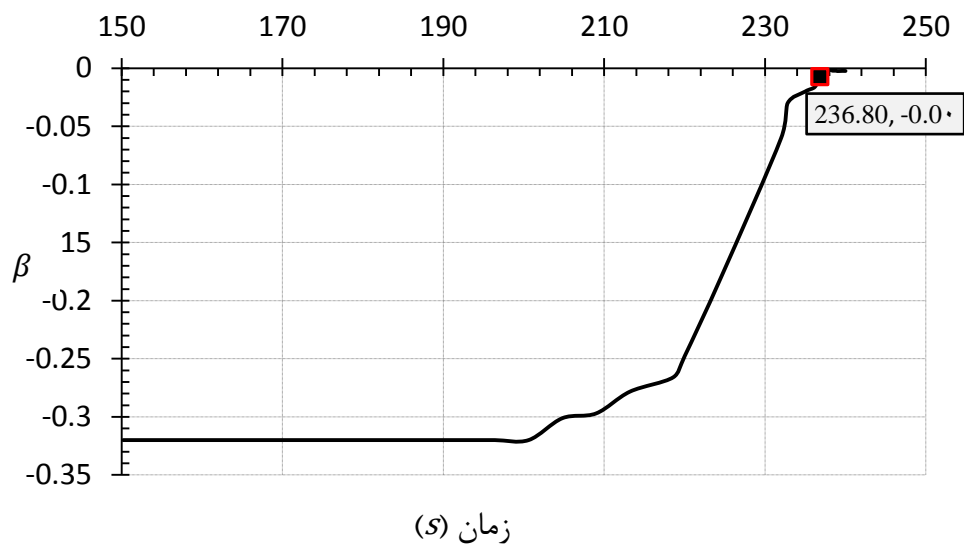
تغییرات کرنش طولی بر حسب عرضی برای نتایج حاصل از DIC رفتار بشدت غیر خطی دارد که این ناشی از تغییرات مقادیر ناهمسانگردی می‌باشد؛ این تغییرات در شبیه‌سازی رفتاری خطی از خود نشان داده که می‌تواند ناشی از ثابت بودن مقادیر ناهمسانگردی در معیار تسلیم هیل ۴۸ حین اجرای آزمون باشد.

در شکل‌های ۴-۲۴ و ۴-۲۵ نسبت کرنش لحظه‌ای ( $\beta = \frac{\Delta \varepsilon_2}{\Delta \varepsilon_1}$ ) به ترتیب حاصل از دو روش FEM و DIC نسبت به زمان نشان داده شده است. در لحظه‌ی گلوبی شدن نسبت کرنش لحظه‌ای به سمت صفر میل خواهد کرد.



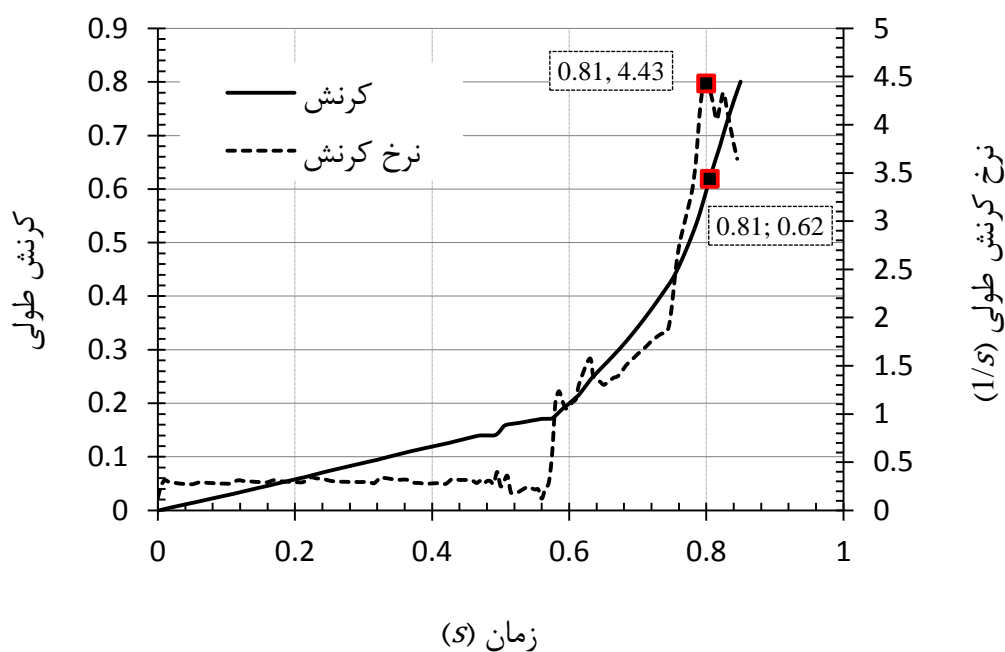


شکل ۴-۲۴- نسبت کرنش  $\beta$  برای نوار گلوبی برحسب زمان، حاصل از FEM، برای نمونه‌ی M1

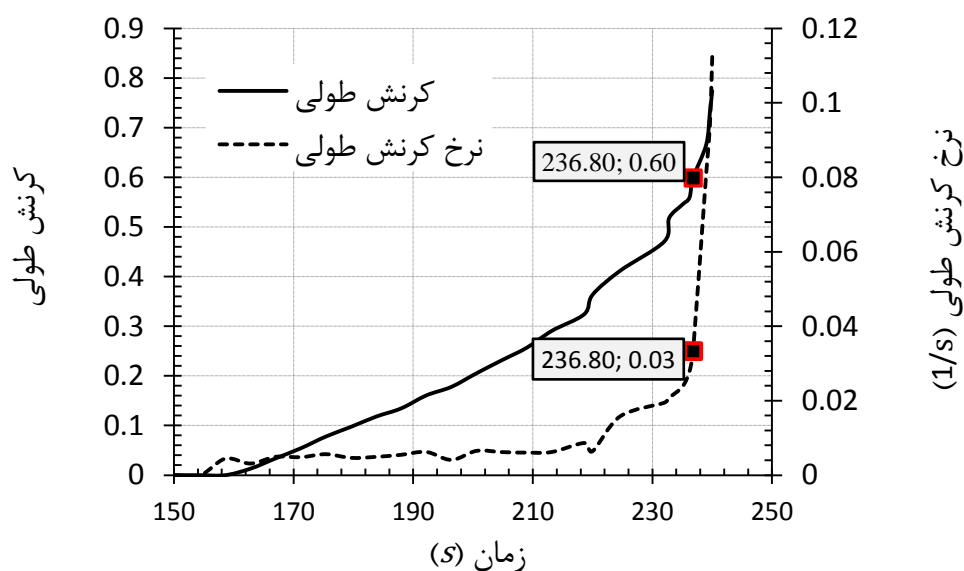


شکل ۴-۲۵- نسبت کرنش  $\beta$  برای نوار گلوبی برحسب زمان، حاصل از DIC، برای نمونه‌ی M1

گلوبی شدن و انشقاق به نحو دیگری نیز با بیان تغییرات نرخ کرنش در نمونه قابل بیان است. در شکل‌های ۴-۲۶ و ۴-۲۷ کرنش طولی و نرخ آن به ترتیب حاصل از FEM و DIC بر حسب زمان ترسیم شده است.



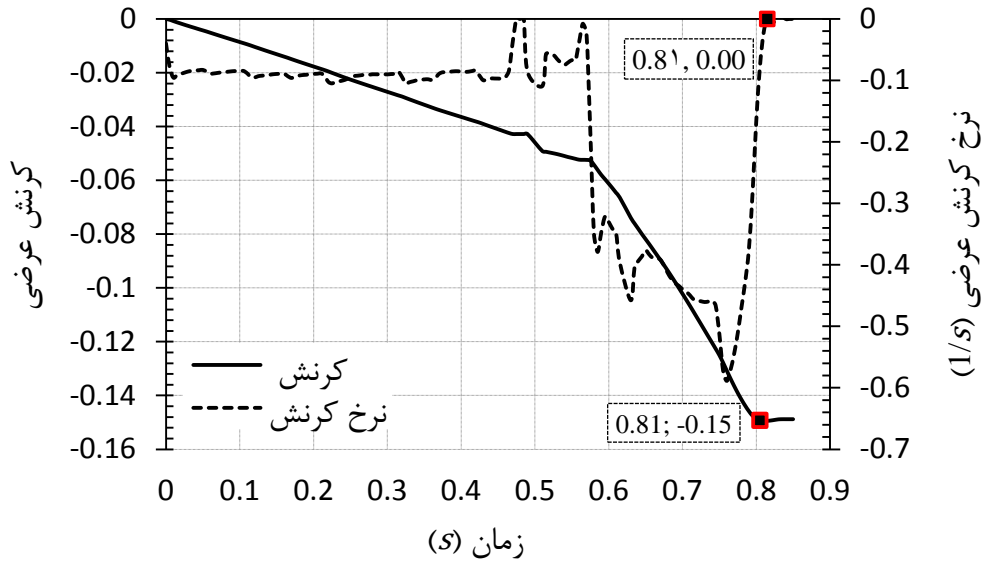
شکل ۴-۲۶- کرنش طولی و نرخ آن نسبت به زمان بر روی نوار گلویی، حاصل از FEM، برای نمونه M1



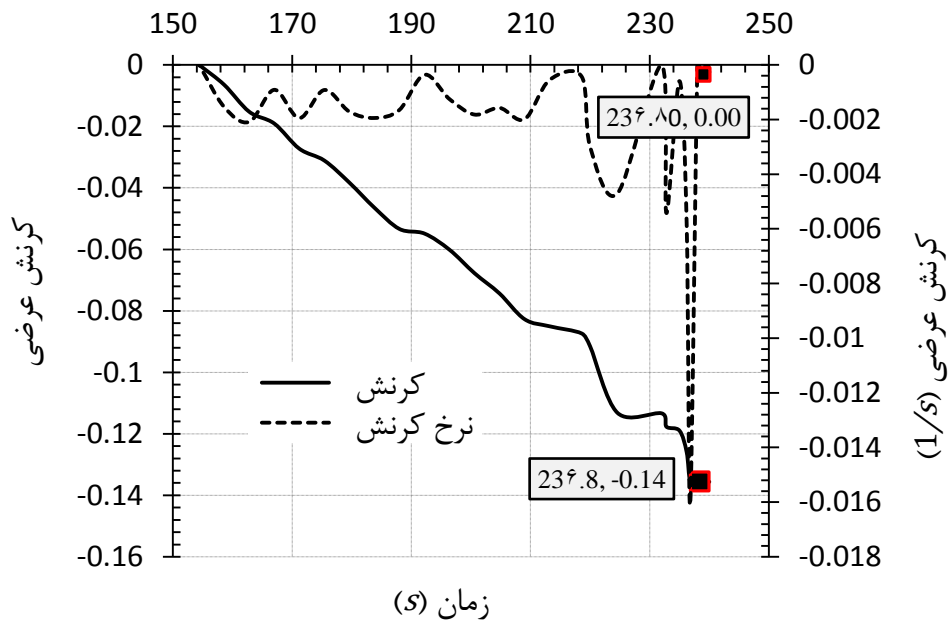
شکل ۴-۲۷- کرنش طولی و نرخ آن نسبت به زمان بر روی نوار گلویی، حاصل از DIC، برای نمونه M1

در لحظه‌ی شروع گلویی که با نقطه‌ی توپر نمایش داده شده، کرنش طولی در نوار باریک گلویی به‌شدت افزایش می‌یابد. این پدیده با رشد ناگهانی نرخ کرنش طولی همراه است.

در شکل‌های ۴-۲۸ و ۴-۲۹ تغییرات کرنش عرضی و نرخ آن بر حسب زمان به ترتیب برای نتایج حاصل از FEM و DIC نمایش داده شده است.



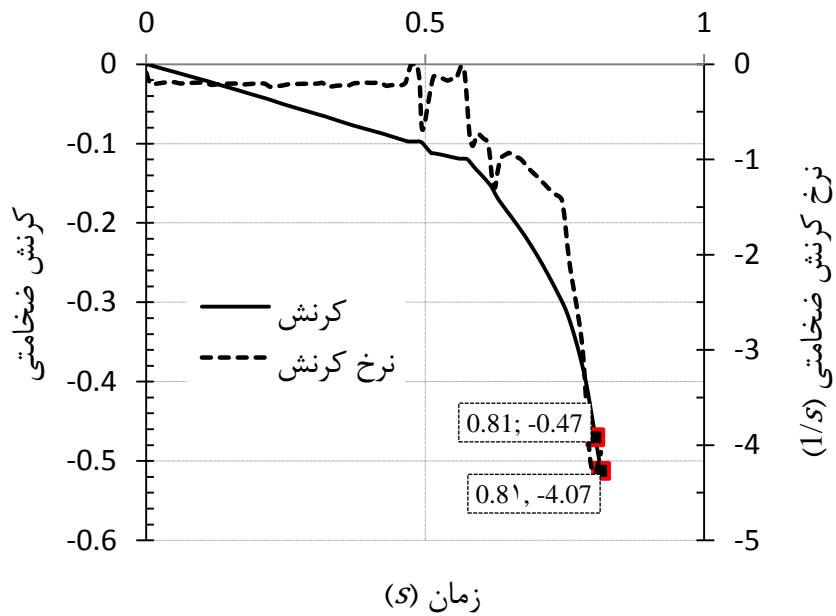
شکل ۴-۲۸- کرنش عرضی و نرخ آن نسبت به زمان بر روی نوار گلوبی، حاصل از FEM، برای نمونه M1



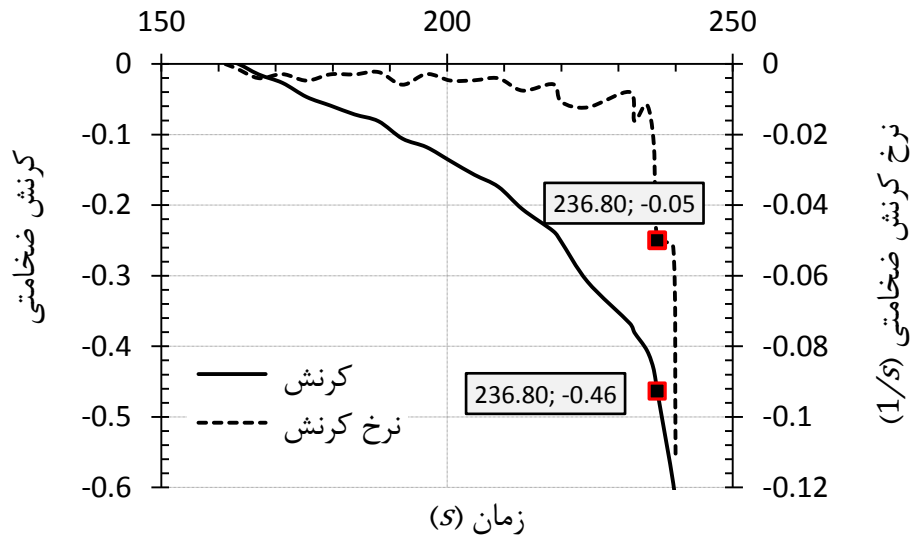
شکل ۴-۲۹- کرنش عرضی و نرخ آن نسبت به زمان بر روی نوار گلوبی، حاصل از DIC، برای نمونهی M1

شکل‌های ۴-۲۸ و ۴-۲۹ بیان‌کننده این واقعیت است که لحظه‌ی شروع گلوپی، کرنش عرضی ثابت و نرخ کرنش آن برابر صفر خواهد شد. پس صفر شدن نرخ کرنش عرضی ملاک دیگری برای گلوپی شدن تلقی می‌شود.

در شکل ۴-۳۰ و ۴-۳۱ تغییرات کرنش ضخامتی و نرخ آن به‌ازای زمان برای نوار گلوپی نمونه M1 به ترتیب حاصل از FEM و DIC نمایش داده شده است.



شکل ۴-۳۰- کرنش ضخامتی و نرخ آن نسبت به زمان بر روی نوار گلوپی، حاصل از FEM، برای نمونه‌ی M1

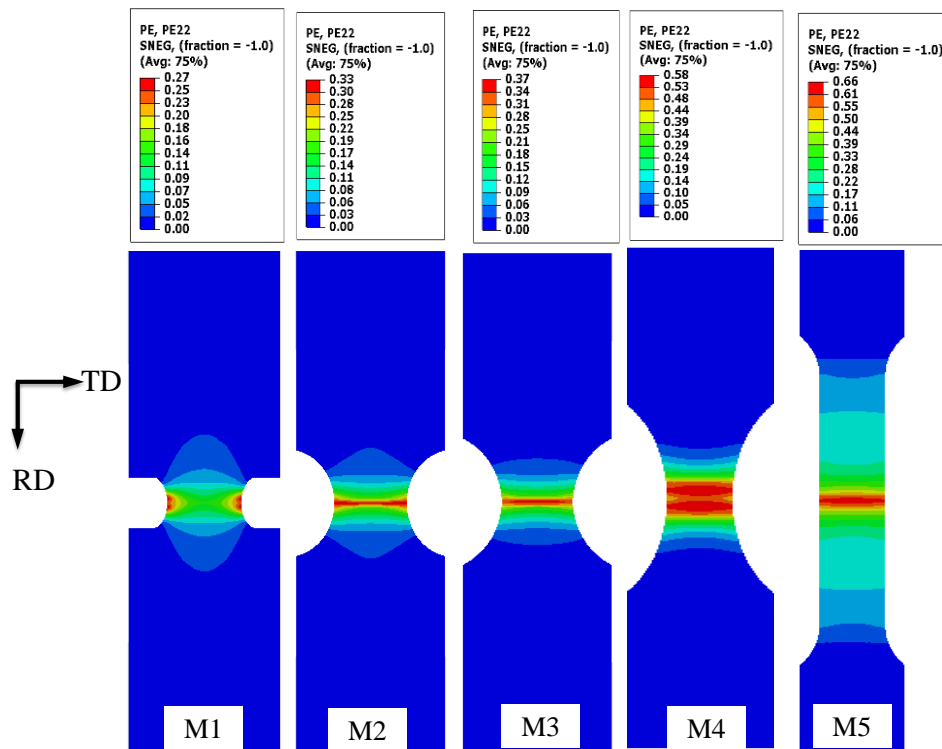


شکل ۴-۳۱- کرنش ضخامتی و نرخ آن نسبت به زمان بر روی نوار گلوپیی، حاصل از DIC، برای نمونه ی M1

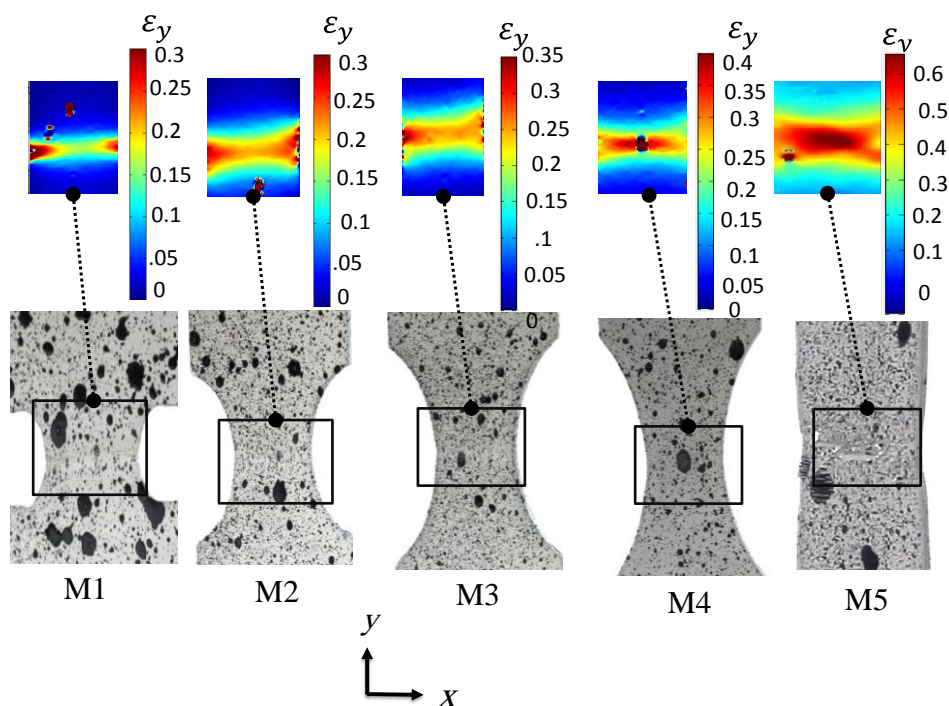
با توجه به ثابت بودن حجم و صفر شدن کرنش عرضی نمونه در لحظه شروع گلوپیی، مقدار کرنش طولی و ضخامتی نمونه با علامت مخالف هم جهش پیدا می کنند که این پدیده نیز می تواند توصیف دیگری از گلوپیی موضعی در ورق باشد.

اگر چه کلیه روش های فوق برای تشخیص کرنش حدی تقریباً نتایج مشابه و نزدیکی ارائه می کنند در این پایان نامه ملاک صفر شدن نرخ کرنش عرضی ناحیه گلوپیی و یا صفر شدن نسبت کرنش لحظه ای  $\beta$  ملاک شروع گلوپیی لحاظ شده است که به صورت مشابه هاسفورد و کدل [۳] نیز به آن اشاره کرده اند.

در شکل‌های ۴-۳۲ و ۴-۳۳ توزیع کرنش اصلی در لحظه‌ی شروع گلوبی برای نمونه‌های درون صفحه‌ای به ترتیب برای نتایج FEM و DIC نشان داده شده است.



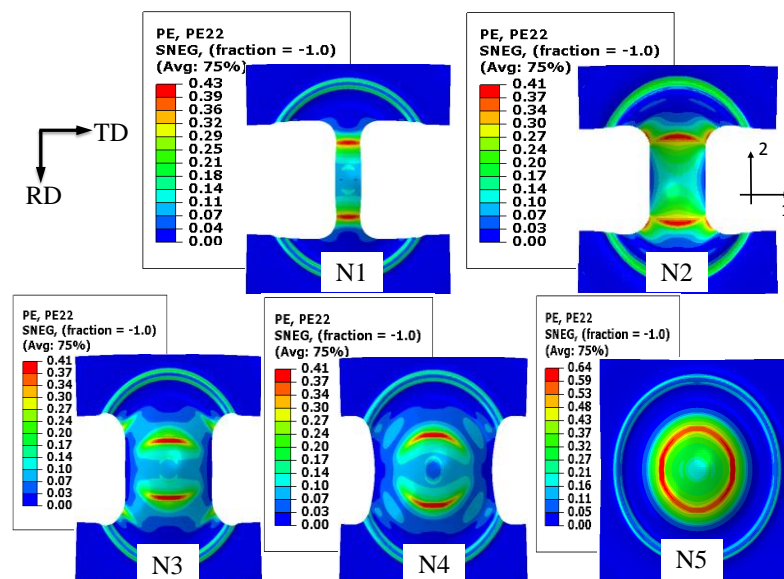
شکل ۴-۳۲- توزیع کرنش اصلی در نمونه‌های کشش درون صفحه‌ای، برای نتایج حاصل از FEM



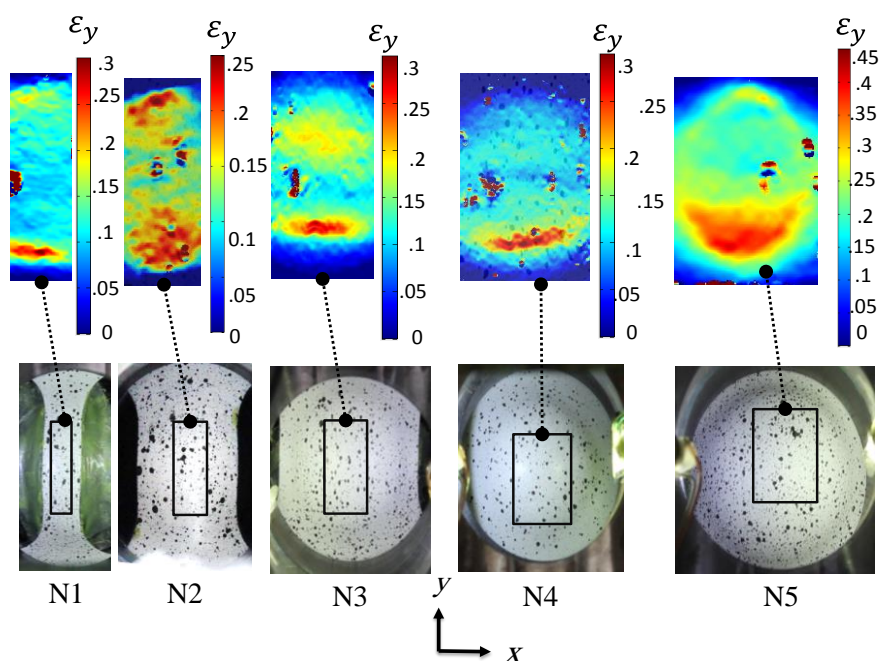
شکل ۴-۳۳- توزیع کرنش اصلی در نمونه‌های کشش درون صفحه‌ای، حاصل از DIC

همانطور که مشاهده می‌شود. اولاً مقادیر کرنش طولی در روش FEM کمی بزرگ‌تر از DIC می‌باشد که این اتفاق برآمده از عدم استفاده از معیار شکست در مدل عددی می‌باشد؛ ثانیاً روش DIC امکان تشخیص لکه‌های خیلی بزرگ را ندارد و کرنش در این نقاط غیر واقعی می‌باشد.

در شکل‌های ۴-۳۴ و ۴-۳۵ توزیع کرنش اصلی در لحظه‌ی شروع گلوپی برای نمونه‌های برون صفحه‌ای به ترتیب با دو روش FEM و DIC نشان داده شده است.



شکل ۴-۳۴- توزیع کرنش اصلی در نمونه‌های کشش برون صفحه‌ای، در نتایج حاصل از FEM



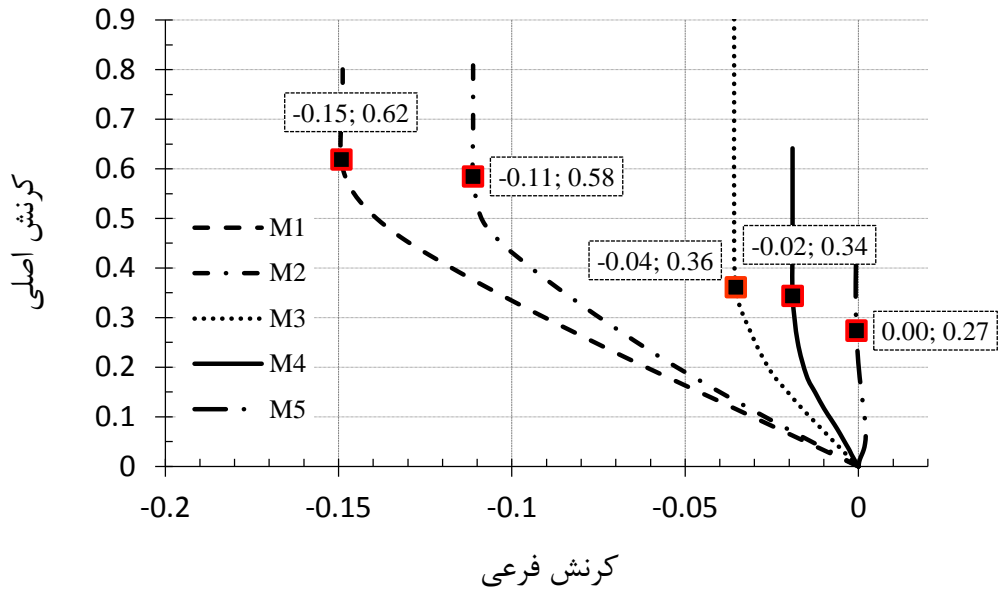
شکل ۴-۳۵- توزیع کرنش اصلی در نمونه‌های کشش برون صفحه‌ای، حاصل از روش DIC

#### ۴-۷- استخراج FLD با استفاده از روش DIC و FEM

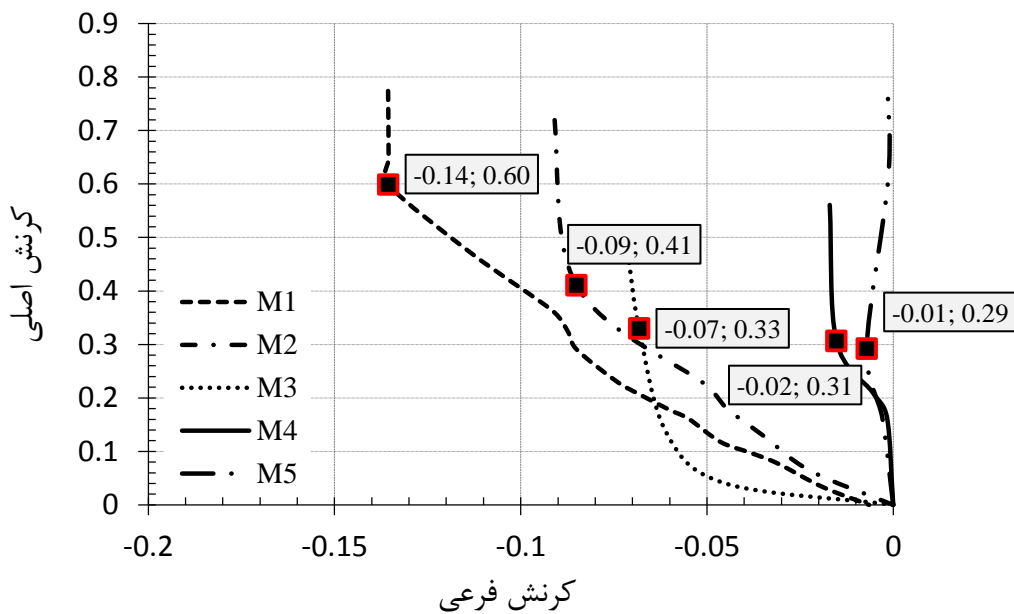
هیواتاچی نشان دادند که مسیر کرنش ورق بر روی شکل و موقعیت منحنی حد شکل‌دهی تأثیر می‌گذارد [۴۸]. از این رو باید در تخمین شکست یک فرایند شکل‌دهی ورق توجه داشت که FLD مورد استفاده، با استفاده از چه مسیر بارگذاری استحصال شده است. بر این اساس، روش DIC می‌تواند به عنوان تنها روش مناسب برای ارائه مسیر واقعی کرنش در حین آزمون‌های تجربی FLD مطرح شود که در این بخش نخست به ارائه‌ی مسیر کرنش آزمون‌های مختلف به دو روش DIC و FEM پرداخته و در ادامه کرنش‌های حدی به دست می‌آید.

شکل‌های ۴-۳۶ و ۴-۳۷ مسیر کرنش و کرنش‌های حدی را برای آزمون‌های درون صفحه‌ای به ترتیب با استفاده از نتایج FEM و DIC نمایش می‌دهد.





شکل ۴-۳۶- مسیر کرنش برای نمونه‌های درون صفحه‌ای، حاصل از FEM

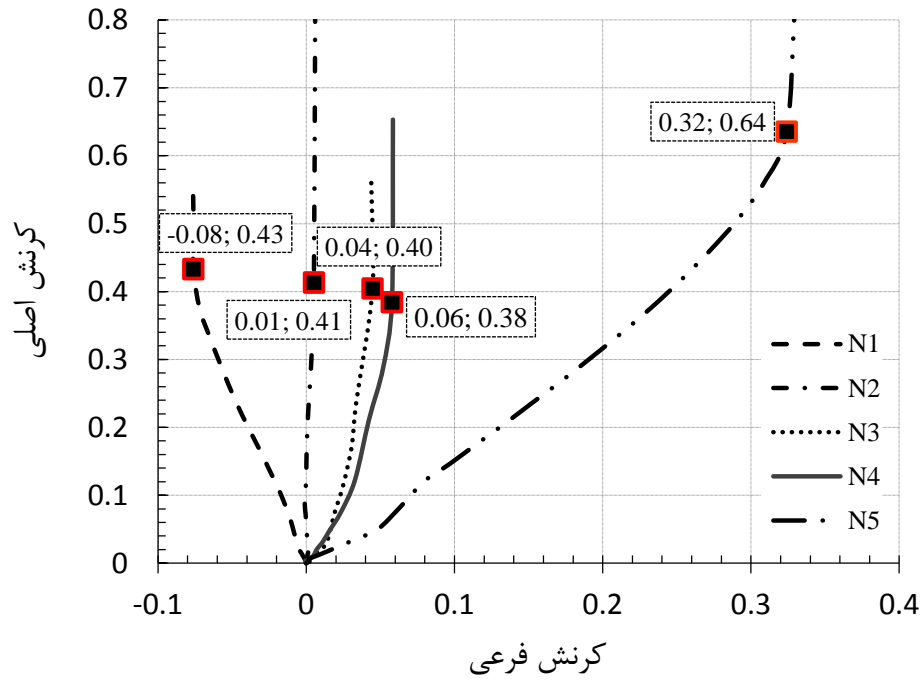


شکل ۴-۳۷- مسیر کرنش برای نمونه‌های درون صفحه‌ای، حاصل از DIC

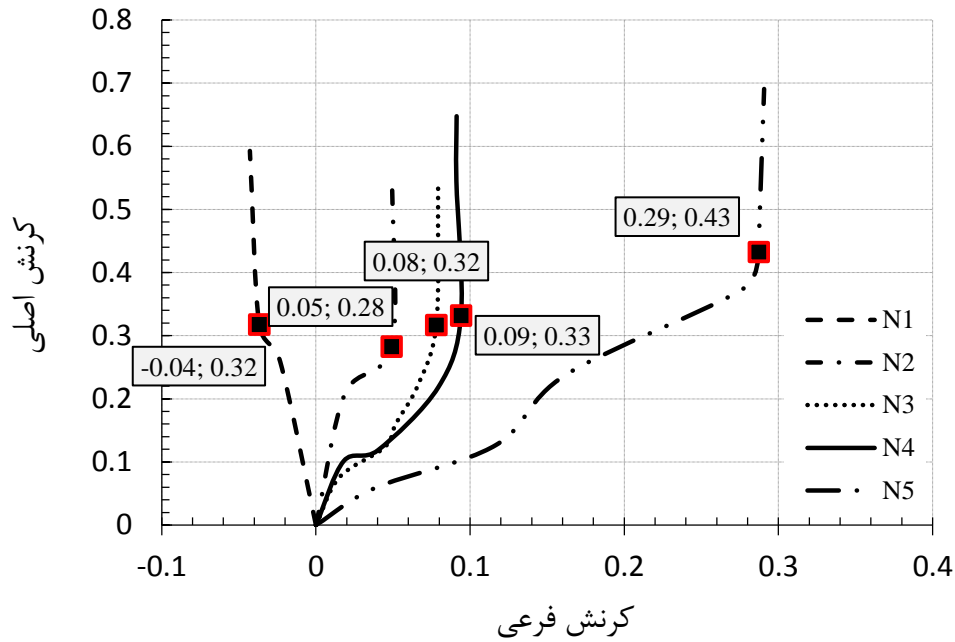
مطابق شکل‌های ۴-۳۶ و ۴-۳۷ کرنش حدی پیش‌بینی شده توسط FEM کمی بالاتر از DIC می‌باشد. مدل FEM مسیر کرنش آزمون‌ها در ابتدای تحلیل تقریباً خطی ارزیابی می‌کند که با نزدیک شدن به حالت ناپایداری روند غیرخطی و صعودی خواهد یافت؛ این در حالی است که در مدل DIC

برای آزمون‌های M1 و M2 روندی مشابه FEM پیش‌بینی شده است و برای آزمون‌های دیگر غیر خطی بودن مسیر کرنش از ابتدای شکل‌دهی آشکار است.

در شکل‌های ۴-۳۸ و ۴-۳۹ مسیر کرنش و کرنش‌های حدی برای آزمون‌های برون صفحه‌ای به- ترتیب با تحلیل FEM و DIC نشان داده شده است.



شکل ۴-۳۸- مسیر کرنش برای نمونه‌های برون صفحه‌ای، حاصل از FEM



شکل ۴-۳۹- مسیر کرنش برای نمونه‌های برون صفحه‌ای، حاصل از DIC

مطابق شکل‌های ۴-۳۸ و ۴-۳۹ در آزمون‌های برون صفحه‌ای نیز مشابه آزمون‌های درون صفحه‌ای، مقادیر کرنش حدی FEM بیشتر از DIC پیش‌بینی شده است. آزمون N1 که مرتبط با کم عرض-ترین نمونه می‌باشد دارای نسبت کرنش منفی بوده و کرنش حدی در سمت چپ FLD را خواهد داد. دیگر آزمون‌های گروه N منتهی به کرنش حدی سمت راست FLD خواهند شد؛ بعلاوه روش DIC بر خلاف روش FEM مسیر کرنش غیرخطی را برای آزمون‌های این گروه ارائه می‌کند.

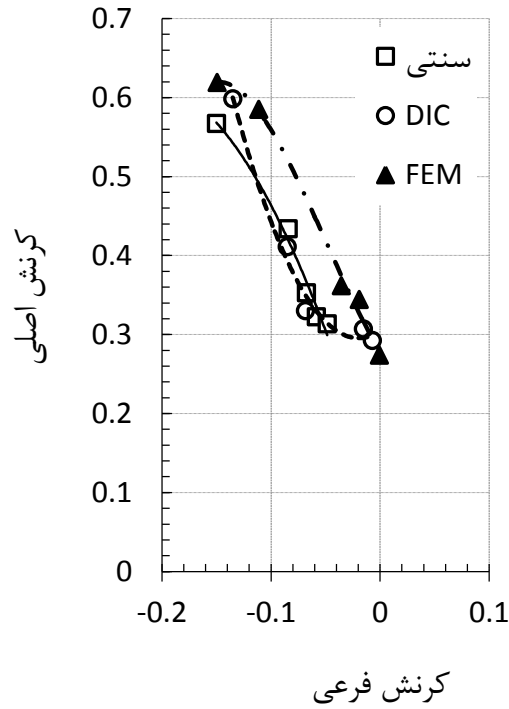
جدول ۴-۳ کرنش‌های حدی و نسبت کرنش مرتبط را برای هر آزمون مستخرج از سه روش سنتی (TRD)، DIC و FEM نشان می‌دهد.

جدول ۴-۳: کرنش‌های حدی و نسبت کرنش متناظر برای هر آزمون از سه روش سنتی، DIC و FEM

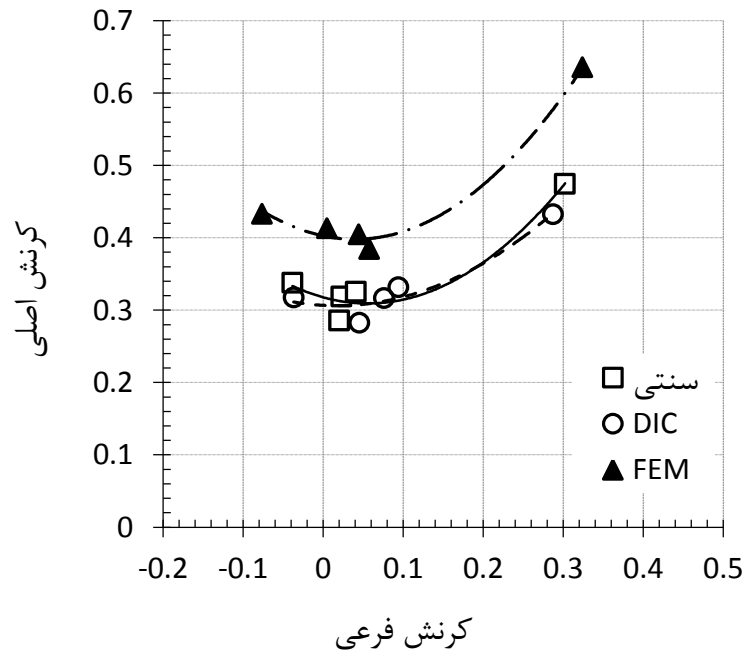
		M1	M2	M3	M4	M5	N1	N2	N3	N4	N5
DIC	$\varepsilon_1^*$	۰/۶۰	۰/۴۱	۰/۳۳	۰/۳۱	۰/۲۹	۰/۳۲	۰/۲۸	۰/۳۲	۰/۳۳	۰/۴۳
	$\varepsilon_2^*$	-۰/۱۴	-۰/۰۹	-۰/۰۷	-۰/۰۲	-۰/۰۱	-۰/۰۴	-۰/۰۵	۰/۰۸	-۰/۰۹	۰/۲۹

	$\beta^*$	-۰/۲۳	-۰/۲۱	-۰/۲۱	-۰/۰۵	-۰/۰۲	-۰/۱۲	۰/۱۶	۰/۲۴	۰/۲۸	۰/۶۶
	$\varepsilon_1^*$	۰/۵۷	۰/۴۳	۰/۳۵	۰/۳۲	۰/۳۱	۰/۳۴	۰/۲۹	۰/۳۲	۰/۳۳	۰/۴۷
TRD	$\varepsilon_2^*$	-۰/۱۵	-۰/۰۸	-۰/۰۷	-۰/۰۶	-۰/۰۵	-۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۳
	$\beta^*$	-۰/۲۶	-۰/۱۹	-۰/۱۹	-۰/۱۸	-۰/۱۵	-۰/۱۱	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۱۳	۰/۶۴
	$\varepsilon_1^*$	۰/۶۲	۰/۵۸	۰/۳۶	۰/۳۴	۰/۲۷	۰/۴۳	۰/۴۱	۰/۴۰	۰/۳۸	۰/۶۴
FEM	$\varepsilon_2^*$	-۰/۱۵	-۰/۱۱	-۰/۰۴	-۰/۰۲	-۰/۰۰	-۰/۰۸	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۳۲
	$\beta^*$	-۰/۲۴	-۰/۱۹	-۰/۱	-۰/۰۶	۰/۰۰	-۰/۱۸	۰/۰۱	۰/۱۱	۰/۱۵	۰/۵۱

شکل‌های ۴-۴۰ و ۴-۴۱ کرنش‌های حدى به‌ترتیب آزمون‌های درون صفحه‌ای و برون صفحه‌ای، به- دست آمده از سه روش سنتی، DIC و FEM را نمایش می‌دهد.



شکل ۴-۴۰- کرنش‌های حدى آزمون‌های درون صفحه‌ای، مقایسه‌ی سه روش سنتی، DIC و FEM برای ورق AA6061-O

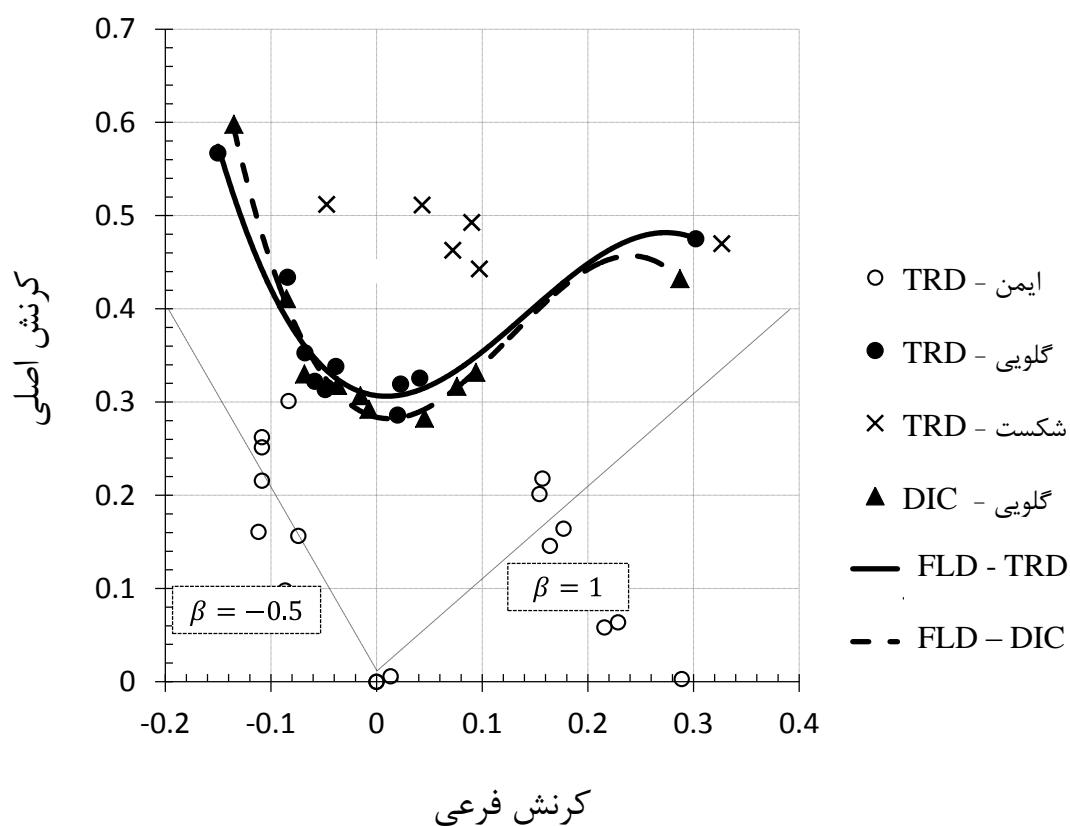


شکل ۴-۴۱- کرنش‌های حدی آزمون‌های برون صفحه‌ای، مقایسه‌ی سه روش سنتی، DIC و FEM برای ورق AA6061-O

از شکل‌های فوق می‌توان استنباط کرد که با توجه به کالیبراسیون صحیح متغیرهای FLD، DIC، ارائه شده از این روش با دقت مطلوبی بر FLD روش سنتی منطبق است این در حالی است که FLD به دست آمده از روش FEM در هر دو گروه آزمون بالاتر از FLD سنتی و DIC قرار دارد. علت این خطا در مدل FEM را می‌توان به عدم استفاده از مدل خرابی مناسب در شبیه‌سازی نسبت داد.

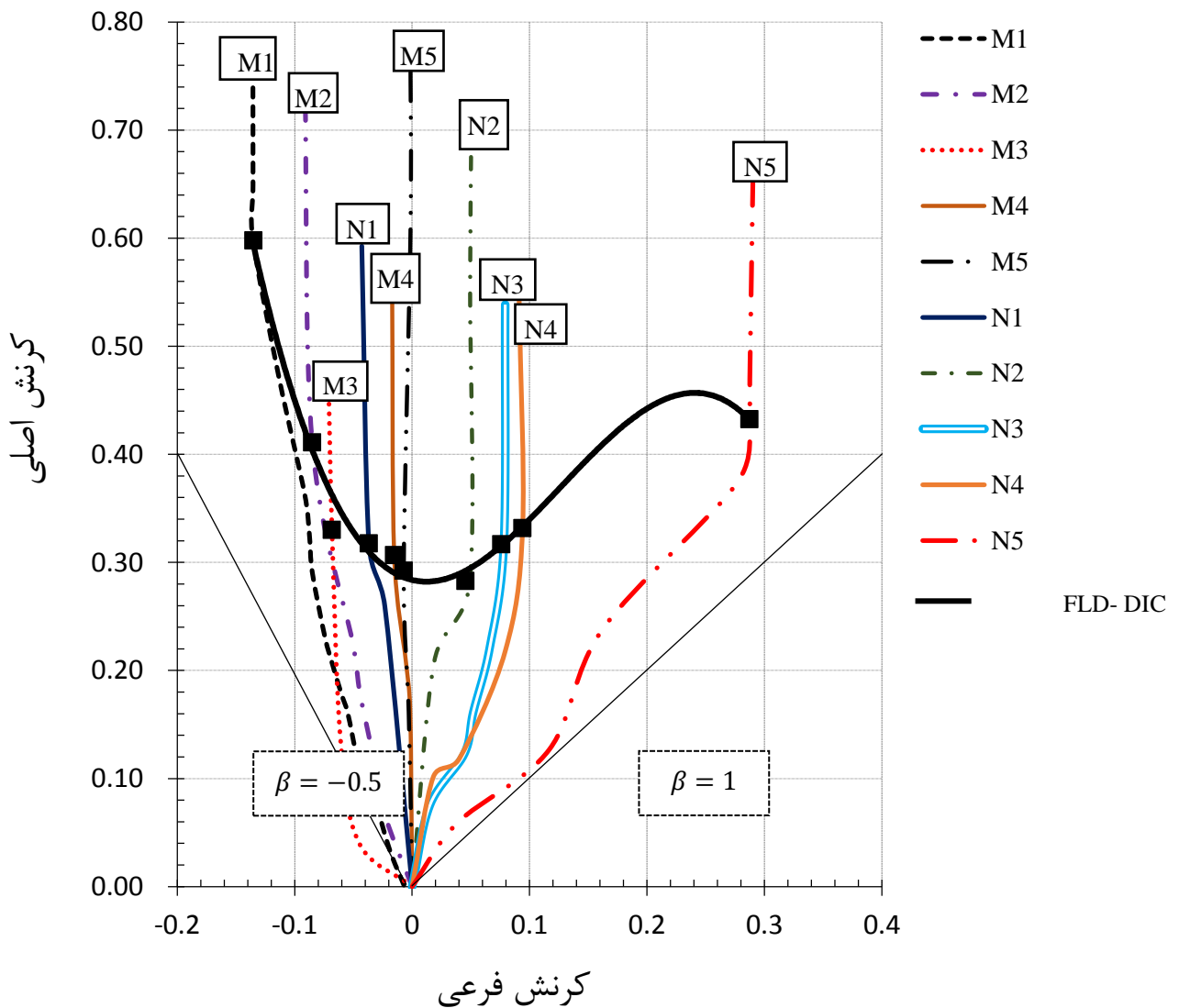
در پایان با معلوم بودن مقادیر کرنش حدی با نظر گرفتن سه دسته نقاط ایمن، گلوپی و پارگی در نتایج آزمون‌های تجربی منحنی‌های حد شکل‌دهی برای دو حالت سنتی و DIC ترسیم گردید (شکل

۴-۴۲)



شکل ۴-۴۲- منحنی حد شکل‌دهی ورق AA6061، به دست آمده از روش سنتی و DIC

در شکل ۴-۴۳ مسیر کرنش آزمون‌های گروه M و N بر روی صفحه کرنش‌های اصلی و فرعی نمایش داده شده است. همچنین کرنش‌های حدی هر یک از آزمون‌ها با علامت مربع توپر نمایش داده شده است. نهایتاً FLD ورق از نقاط حدی گذرانده شده است؛ ارائه FLD به انضمام مسیر کرنش مرتبط با آن می‌تواند از اصلی‌ترین مزایای استفاده از روش DIC در استخراج تجربی این منحنی‌ها ذکر شود.



شکل ۴-۴۳- مسیر کرنش و FLD ورق AA6061-O حاصل از روش DIC





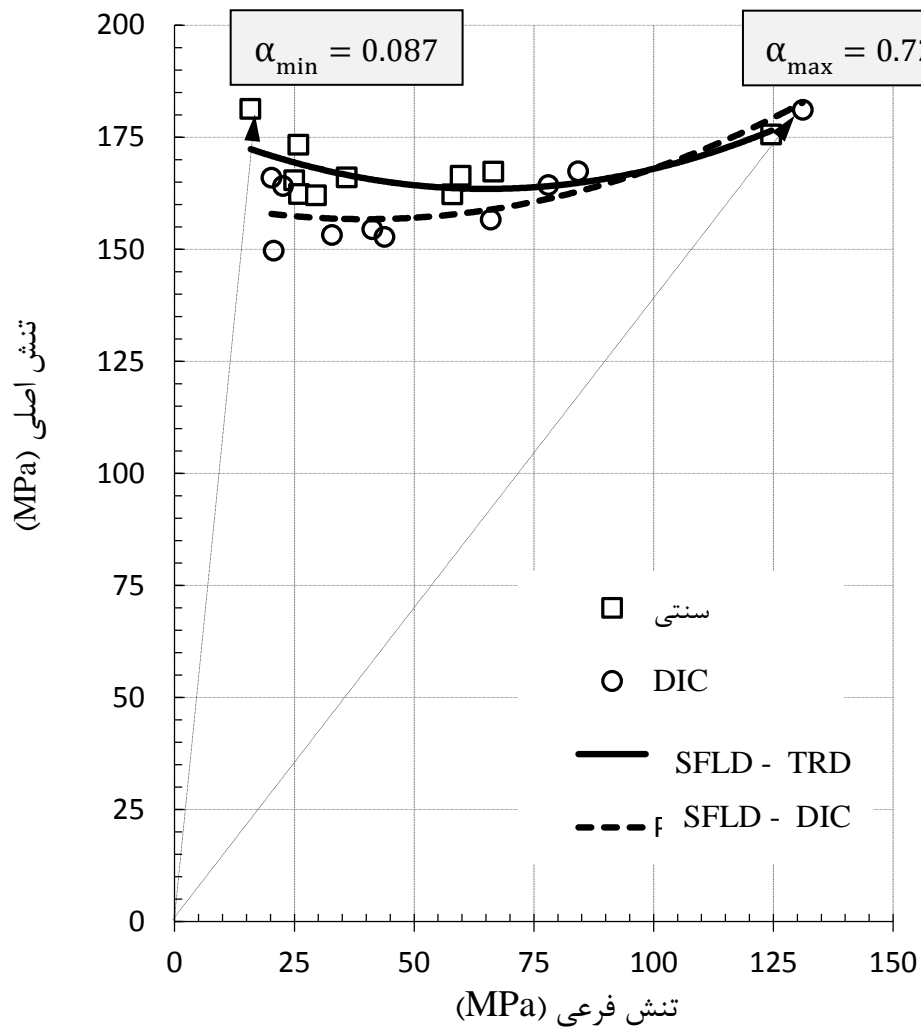
## ۴-۸- استخراج SFLD ورق AA6061-O

با استفاده از روابط ۲-۲۰ و ۲-۲۱ برای مقادیر کرنش گزارش شده در جدول ۴-۳، تنش حدی و نسبت تنش هر یک از آزمون‌ها محاسبه و در جدول ۴-۴ ارائه شده است.

جدول ۴-۴: تنش‌های حدی و نسبت تنش مرتبط با هر آزمون از سه روش سنتی، DIC و FEM

		M1	M2	M3	M4	M5	N1	N2	N3	N4	N5
DIC	$\sigma_1^*(MPa)$	۱۶۶	۱۶۴	۱۵۰	۱۵۴	۱۵۳	۱۵۳	۱۵۷	۱۶۴	۱۶۷	۱۸۱
	$\sigma_2^*(MPa)$	۲۰	۲۳	۲۱	۴۱	۴۴	۳۳	۶۶	۷۸	۸۴	۱۳۱
	$\alpha^*$	/۱۲	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۲۷	۰/۲۹	۰/۲۱	۰/۴۲	۰/۴۸	۰/۵۰	۰/۷۲
TRD	$\sigma_1^*(MPa)$	۱۸۱	۱۷۳	۱۶۵	۱۶۲	۱۶۲	۱۶۶	۱۶۲	۱۶۶	۱۶۷	۱۷۵
	$\sigma_2^*(MPa)$	۱۶	۲۶	۲۵	۲۶	۳۰	۳۶	۵۸	۶۰	۶۷	۱۲۵
	$\alpha^*$	/۰۹	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۶	۰/۱۸	۰/۲۲	۰/۳۶	۰/۳۶	۰/۴۰	۰/۷۱
FEM	$\sigma_1^*(MPa)$	۱۷۹	۱۷۷	۱۵۷	۱۵۶	۱۴۶	۱۸۳	۱۵۳	۱۶۰	۱۷۲	۱۹۴
	$\sigma_2^*(MPa)$	۶۴	۶۲	۵۰	۵۵	۵۱	۶۶	۶۱	۵۸	۶۹	۹۳
	$\alpha^*$	/۳۶	۰/۳۵	۰/۳۲	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳۶	۰/۴۰	۰/۳۶	۰/۴	۰/۴۸

با استفاده از مقادیر جدول فوق SFLD ورق AA6061-O مطابق شکل ۴-۴ ارائه شده است.



شکل ۴-۴-۴ SFLD برای نتایج حاصل از DIC و سنٹی

آزمون‌های اجرا شده در این تحقیق مقادیر تنش حدی را در محدوده‌ی نسبت تنش ۰/۰۸۷ تا ۰/۷۲۱ ارائه نموده است.

## فصل ۵ نتیجه گیری و ارائه پیشنهادها

## ۵-۱- نتیجه گیری

در این پایان نامه منحنی حد شکل دهی (FLD) ورق آلومینیومی AA6061-O با استفاده از روش هم-بستگی تصاویر دیجیتال (DIC) به دست آمد. در این راستا در ابتدا آزمون تجربی کشش تک محوره بر روی سه نمونه برش شده طبق استاندارد ASTM-E8 در سه جهت  $0^\circ$ ،  $45^\circ$  و  $90^\circ$  نسبت به راستای نورد انجام شد. این آزمون‌ها تا آستانه‌ی گلویی اجرا مقادیر ناهمسانگردی و خواص مکانیکی مانند نمودارهای تنش-کرنش، ضریب سختی، توان کرنش سختی و... برای ماده اولیه در سه جهت فوق-الذکر به دست آمد. در نتایج، تفاوت آشکار مقدار تنش سیلان در راستای  $45^\circ$  که ۴۰٪ بیش از سایر جهت‌ها است، به خوبی دیده شد.

به منظور استخراج نتایج هر چه دقیق‌تر از روش DIC متغیرهای این روش شامل شعاع لکه، فاصله بین لکه‌ها و شعاع کرنش کالیبره شد. به این منظور نتایج حاصل از کشش نمونه‌ها که یک وجه آن دارای مش منظم دایره‌ای و وجه دیگر دارای مش تصادفی است، مقایسه شد نتایج نشان داد با بزرگ-تر شدن لکه‌ها زمان تحلیل و تعداد دفعات میان‌یابی افزایش می‌یابد ولی مقدار خطا ابتدا روند نزولی داشته و بعد ثابت می‌گردد.

تغییرات مقادیر ناهمسانگردی ورق ( $R, \bar{R}, \Delta R$ ) نسبت به کرنش طولی با استفاده از سه روش سنتی (ASTM E517)، DIC (الگوی منظم) و DIC (الگوی تصادفی) بررسی گردید. از کولیس دیجیتال با دقت  $0.01 \text{ mm}$  در روش سنتی، کد ابتکاری عددی نوشته شده برای بررسی مش منظم دایره‌ای و کد ncorr در نرم‌افزار متلب R2012 برای تحلیل مش تصادفی استفاده شد. نتایج حاصل نشان داد همبستگی تصاویر دیجیتال در حالت الگوی نامنظم تصادفی، دارای دقت و صحت بیشتری نسبت به مش منظم می‌باشد زیرا که در این روش به علت کوچک بودن شعاع حوزه همبستگی نسبت به مش منظم، تعداد نقاط قابل بررسی بسیار بیشتر بوده در نتیجه مقدار ناهمسانگردی به صورت محلی قابل اندازه‌گیری است در حالی که در مش منظم تعداد نقاط قابل اندازه‌گیری محدود به تعداد دوایر می‌باشد. همچنین به کمک نتایج مستخرج از این آزمون‌ها سطح تسلیم تجربی ورق مورد پژوهش به ازای مقادیر مختلف کرنش ترسیم شد که نتایج نشان داد ورق AA6061 رفتار سخت شونده کاملاً ناهمسانگرد دارد.

در آزمون کشش تک محوره با استخراج مؤلفه‌های کرنش و نرخ کرنش (طولی، عرضی و ضخامتی) در دو نقطه نزدیک به نوار گلوبی و ناحیه‌ی سالم و بررسی تغییرات نرخ این مؤلفه‌ها بر حسب زمان، ملاک‌های مختلف شروع گلوبی مورد بررسی قرار گرفت و صفر شدن نسبت نمو کرنش فرعی به اصلی بر روی نوار گلوبی به عنوان ملاک شروع گلوبی انتخاب گردید.

در ادامه تعداد ۵ آزمون کشش درون صفحه‌ای (M1 تا M5) به کمک دستگاه کشش اینسترون و ۵ آزمون کشش برون صفحه‌ای (N1 تا N5) به کمک قالب کشش سنبه سرکروی طراحی و تا رسیدن به آستانه گلوبی اجرا گردید. نتایج نشان داد با افزایش شعاع ناحیه میانی نمونه‌های درون صفحه‌ای میزان کرنش‌های عرضی و طولی حدی افزایش می‌یابد. این روند به صورت مشابه در آزمون‌های کشش برون صفحه‌ای نیز مشاهده گردید. با استفاده از این مقادیر مسیر کرنش و منحنی حد شکل-دهی به روش DIC برای نمونه‌های درون و برون صفحه‌ای ترسیم شد. مقادیر کرنش‌های حدی به

روش سنتی بر روی وجه دیگر نمونه که دارای مش منظم دایره‌ای می‌باشد، محاسبه گردید؛ مقادیر حاصل تطبیق بسیار خوب با روش DIC داشت. با به‌دست آمدن مقادیر کرنش حدی در هر یک از آزمون‌ها و استفاده از قانون جریان مرتبط با معیار تسلیم هیل ۴۸، مقادیر تنش حدی استخراج و منحنی‌های تنش حد شکل‌دهی (SFLD) ترسیم شد.

شبیه‌سازی المان محدود برای طراحی اجزاء قالب و همچنین بررسی و تطبیق نتایج مرتبط با مسیر کرنش و FLD استفاده شد. نتایج حاصل نشان داد سطح FLD آزمون‌های شبیه‌سازی بالاتر از روش سنتی و DIC بوده که این خطا را می‌توان به علت عدم استفاده از یک معیار آسیب در روش FEM دانست.

## ۵-۲- پیشنهادها

در ادامه ی پژوهش در این زمینه، پیشنهادهای زیر ارائه می شود.

۱. توسعه برنامه DIC برای ارائه لحظه به لحظه ی توزیع کرنش در حین فرایند و استفاده از آن برای کنترل شکست در فرایندهای شکل دهی،
۲. اصلاح گروه آزمون های برون صفحه ای به منظور استخراج کرنش های حدی نزدیکتر و پیوسته تر بر روی صفحه کرنش،
۳. توسعه زیر برنامه UMAT و VUMAT برای در نظر گرفتن تغییرات  $R$  و  $\Delta R$  در مسیر کرنش
۴. استفاده از دو دوربین برای اندازه گیری سه بعدی جابجایی و مؤلفه های کرنش.

## منبعها

- [1] F. H. Aboutalebi, M. Farzin, M. Poursina, Numerical simulation and experimental validation of a ductile damage model for DIN 1623 St14 steel, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 53, No. 1-4, pp. 157-165, 2011 .
- [2] D. Banabic, *Sheet metal forming processes: constitutive modelling and numerical simulation*: Springer Science & Business Media, 2010 .
- [3] W. F. Hosford, R. M. Caddell, *Metal forming: mechanics and metallurgy*: Cambridge University Press, 2011 .
- [4] S. Aleksandrovic, M. Stefanovic, D. Adamovic, V. Lazic, Variation of Normal Anisotropy Ratio  $r$  during Plastic Forming, *Strojniški vestnik*, Vol. 55, No. 6, pp. 392-399, 2009 .
- [5] [www.aluminium.matter.org.uk](http://www.aluminium.matter.org.uk).
- [6] A. Ghazanfari, A. Assempour, Calibration of forming limit diagrams using a modified Marciniak–Kuczynski model and an empirical law, *Materials & Design*, Vol. 34, pp. 185.2012
- [7] L. Xue, Localization conditions and diffused necking for damage plastic solids, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 77, No. 8, pp. 1275-1297, 2010 .
- [8] G. Chinouilh, F. Toscan, J. L. a. P.-O. Santacreu, BEHAVIOR AND FORMING LIMIT DIAGRAM PREDICTIONS OF STAINLESS STEELS SHEETS .
- [9] R. Arrieux, *Contribution to the determination of forming limit curves of titanium and aluminum. Proposal of an intrinsic criterion*, Thesis, PhD Thesis, INSA, Lyon (in French), 1981 .
- [10] S. P. Keeler, W. A .Backofen, Plastic instability and fracture in sheets stretched over rigid punches, *Asm Trans Q*, Vol. 56, No. 1, pp. 25-48, 1963 .
- [11] Z. Marciniak, K. Kuczyński, Limit strains in the processes of stretch-forming sheet metal, *International journal of mechanical sciences*, Vol. 9, No. 9, pp. 609-620, 1967 .
- [12] K. Nakazima, T. Kikuma, K. Hasuka, Study on the formability of steel sheets, *YAWATA TECH REP, SEPT. 1968,--264--*, 8517-8530, 1968 .
- [13] A. Hijazi, N. Yardi, V. Madhavan, Determination of forming limit curves using 3D digital image correlation and in-situ observation, in *Proceeding of*, 16-20 .
- [14] F. Ozturk, M. Dilmeç, M. Turkoz, R. E. Ece, H. S. Halkaci, Grid marking and measurement methods for sheet metal formability, in *Proceeding of*, 41-49 .
- [15] S. P. Keeler, *Circular grid system—a valuable aid for evaluating sheet metal formability*, SAE Technical Paper, pp. 1968 .
- [16] K. Siegert, S. Wagner, Formability characteristics of aluminum sheet, *Lecture notes on training in aluminum application technologies*, EAA-European Aluminum Association, 1994 .

- [17] E. Carasusán, F. Canal, An automated procedure for non-contact strain analysis of sheet metal parts, in *Proceeding of, IEEE*, pp. 724-731 .
- [18] K. Mäntyjärvi, J. Tulonen, T. Saarnivuo, J. Porter, J .A. Karjalainen, Grid patterns by laser for forming strain analysis, *International Journal of Material Forming*, Vol. 1, No. 1, pp. 249-252, 2008 .
- [19] R. Student, R. Cintrón, R. Mentor, V. Saouma, Strain measurements with the digital image correlation system Vic-2D, *System*, Vol. 106, pp. 2D, 2008 .
- [20] Y. Iger, M. Abraham, The process of skin healing in experimentally wounded carp, *Journal of Fish Biology*, Vol. 36, No. 3, pp. 421-437, 1990 .
- [21] [https://en.wikipedia.org/wiki/Digital\\_image\\_correlation](https://en.wikipedia.org/wiki/Digital_image_correlation).
- [22] G. M. Goodwin, Application of strain analysis to sheet metal *forming problems in the press shop*, SAE Technical Paper, pp. 68 .
- [23] H. Kleemola, M. Pelkkikangas ,Effect of predeformation and strain path on the forming limits of steel, copper and brass, *Sheet Met Ind*, Vol. 64, No. 6, pp. 591-592, 1977 .
- [24] R. Sowerby, E. Chu, J. Duncan, Determination of large strains in metalforming, *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, Vol. 17, No. 2, pp. 95-101, 1982 .
- [25] Z. Tan, L. Melin, C. Magnusson, Application of an image processing technique in strain measurement in sheet metal forming, *Journal of materials processing technology*, Vol. 33, No. 3, pp. 2.1992.
- [26] P. Vacher, A. Haddad, R. Arrieux, Determination of the forming limit diagrams using image analysis by the corelation method, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 48, No. 1, pp. 227-230, 1999 .
- [27] G. L. Hovis, W. F. Ranson, H. J .Reed, C. T. Etheredge, *Vision System for Remote Strain/Deformation Measurement*, Citeseer, pp. 1999 .
- [28] W. F. Clocksin, J. Q. da Fonseca, P. Withers, P. H. Torr, Image processing issues in digital strain mapping, in *Proceeding of, International Society for Optics and Photonics*, pp. 384-395 .
- [29] M. Geiger, M. Merklein, Determination of forming limit diagrams—a new analysis method for characterization of materials' formability, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 52, No. 1, pp. 213-216, 2003 .
- [30] D. Amodio, G. B. Broggiato, F. Campana, G. M. Newaz, Digital speckle correlation for strain measurement by image analysis, *Experimental Mechanics*, Vol. 43, No. 4, pp. 396-402, 2003 .
- [31] S. Yoneyama, Y. Morimoto, Accurate Displacement Measurement by Correlation of Colored Random Patterns, *JSME international journal series a solid mechanics and material engineering*, Vol. 46, No. 2, pp. 178-184, 2003 .
- [32] P. Britton, J. Loughran, Application of image measurement and continuum mechanics to the direct measurement of two-dimensional finite strain in a complex fibro-porous material, *International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics*, Vol. 7, No. 2, pp. 81-90, 2006 .



- [33] P.-E. Austrell, B. Enquist, A. Heyden, S. Spanne, Contact free strain measurement using MATLAB Image Processing Toolbox, in *Proceeding of*, Citeseer, pp .
- [34] H. Lemmen, R. Alderliesten, R. Benedictus, J. Hofstede, R. Rodi, The power of Digital Image Correlation for detailed elastic-plastic strain measurements, in *Proceeding of* .
- [35] X. Chen, L. Yang, X. Chen, C. Chirac, C. Du, D. Zhou, *Measurement of Strain Distribution for Hole Expansion with Digital Image Correlation (DIC) System*, SAE Technical Paper, pp. 2011 .
- [36] L. Y. PI, L. Smith, M. A. Gotheekar, M. X. Chen, Measure Strain Distribution Using Digital Image Correlation (DIC) for Tensile Tests, 2010 .
- [۳۷] امیرحسین سرخابی و امیرکریم قانع‌پور، اندازه‌گیری کرنش در تست کشش به کمک پردازش ویدئویی، یازدهمین کنفرانس دانشجویی مهندسی برق ایران، ۲۰۱۲.
- [38] D. Vysochinskiy, T. Coudert, A. Reyes, O. G. Lademo, Determination of forming limit strains using marciniak-kuczynski tests and automated digital image correlation procedures, in *Proceeding of*, Trans Tech Publ, pp. 17-22 .
- [39] L. Zhang, J. Lin, L. Sun, C. Wang, L. Wang, *A New Method for Determination of Forming Limit Diagram Based on Digital Image Correlation*, SAE Technical Paper, pp. 2013 .
- [40] K. Wang, J. E. Carsley, B. He, J. Li, L. Zhang, Measuring forming limit strains with digital image correlation analysis, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 214, No. 5, pp. 1120-1130, 2014 .
- [41] R. C. Gonzalez, R. E. Woods, S. L. Eddins, *Digital image processing using MATLAB*: Pearson Education India, 2004 .
- [42] [http://www.ncorr.com/ncorrmanual\\_v1\\_2.pdf](http://www.ncorr.com/ncorrmanual_v1_2.pdf) .
- [43] C. Wegst, V. S. Wegst, *Key to steel*: Verlag Stahlschlüssel Wegst, 1974 .
- [44] J. Chakrabarty, *Applied plasticity*: Springer, 2000 .
- [45] <http://www.fatan.ir/software/abaqus/process-analysis-elements-abaqus-software>.
- [46] R. Hill, A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals, in *Proceeding of*, The Royal Society, pp. 281-297 .
- [47] S. M. Son, Y. S. Park, W. J. Lim, S. B. Kim, Development and evaluation of validity of short dish frequency questionnaire (DFQ) for estimation of habitual sodium intake for Korean adults, *Korean Journal of Community Nutrition*, Vol. 12, No. 6, pp. 838-853, 2007 .
- [48] S. Hiwatashi, A. Van Bael, P. an Houtte, C. Teodosiu, Prediction of forming limit strains under strain-path changes: application of an anisotropic model based on texture and dislocation structure, *International Journal of Plasticity*, Vol. 14, No. 7, pp. 647-669, 1998 .

## Abstract

Achieving a defect-free product in metal forming processes undoubtedly depends on a reliable and attributable formability criterion. The present dissertation deals with drawing out of Forming Limit Diagram (FLD) of aluminum sheet AA6061-O using Digital Image Correlation (DIC) approach. For this purpose, five in-plane tensile tests using Instron tensile machine as more as five out-of-plane stretching tests using hemispherical punch were carried out until necking. Mechanical properties of the raw material were obtained by performing proper tests. Calibration of effective DIC variables including: subset radius, subset spacing and strain radius was done to gain the optimal values. To verify the accuracy of the results, in uniaxial tensile test according to ASTM-E8 standard, two faces of samples were meshed using a regular pattern of circles and irregular sprayed pattern. Anisotropy values in directions  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  and  $90^\circ$  degrees respect to the rolling direction, measured and analyzed using traditional methods (ASTM E517), DIC (regular pattern) and DIC (irregular pattern). Using these values, experimental yield surfaces were drawn for different strains and the plastic hardening of the sheet was obtained for different loading paths. By representing the components of strain and strain rate in terms of process time, different criteria for onset of necking were investigated. Finally, the moving of strain ratio (the ratio of minor to major strain) in to the zero on the necking band was selected as a strain bifurcation criterion. Accordingly by drawing the strain path of each test, limit strains were determined and sheets FLD was drawn. Furthermore, by using the current limit strains and associated flow rule of Hill-48 yield criterion, limit stresses were calculated and Stress Forming Limit Diagram (SFLD) was drawn. Finite element simulation was applied to design the die components and evaluate the results of experimental strain passes and FLD. Representing the related strain path on the experimental FLD of sheet metals is one of the main innovations of this study, which is important because of the unavoidable dependency of FLD to loading history.

**Keywords:** Digital image correlation, Forming limit diagram, Finite element simulation, Hemispherical punch stretching, Anisotropy.



دانشگاه صنعتی شاهرود

**Shahrood University Of Technology**  
**Department of Mechanical Engineering**

**Thesis for Master of Science in Mechanical Engineering**

**Experimental analysis of stress and strain in sheet metal forming processes using digital  
image processing**

**Omid Arjmand**

**Supervisor**  
**Dr. Mahdi Gerdooei**

**Advisor**  
**Dr. Hossein Khosravi**

**September 2015**