

بِسْمِ... الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده‌ی مهندسی مکانیک

رشته مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید
پایان‌نامه کارشناسی ارشد

بررسی اثر تنش نرمال بر منحنی حد شکل‌دهی ورق‌های فلزی با استفاده از مدل M-K

نگارنده: سعید نادری محمد بوانلو

استاد راهنما
دکتر مهدی گردویی

تیر ۱۳۹۵



فرم شماره ۷: صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای سعید نادری محمد بواللو به شماره دانشجویی ۹۲۱۴۱۹۴ رشته مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید تحت عنوان بررسی اثر تنش نرمال بر منحنی حد شکل‌دهی ورق‌های فلزی با استفاده از مدل M-K که در تاریخ ۱۳۹۵/۴/۲۸ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

قبول (با درجه: بسیار خوب امتیاز: ۱۸,۲۷۵) دفاع مجدد مردود

نوع تحقیق: نظری عملی

- ۱- عالی (۲۰-۱۹) ۲- بسیار خوب (۱۸-۱۸/۹۹) ۳- خوب (۱۶-۱۷/۹۹) ۴- قابل قبول (۱۵-۱۵/۹۹) ۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر مهدی گردویی	استادیار	
۲- استاد راهنمای دوم	_____	_____	_____
۳- استاد مشاور	_____	_____	_____
۴- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر رضا ظاهریان	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر سید هادی قانری	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر سید وحید حسینی	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر محمد محسن شاه‌مردان

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تقدیم‌نامه

تقدیم به پدر عزیز و مادر مهربانم که در یکایک گام‌های زندگی من را همراهی نموده‌اند.

سپاس‌گزاری

با تحمید ذات مقدس حضرت حق (جل جلاله) که توان انجام این پژوهش را به من عطا نمود و سلام و صلوات بر وجود پاک نبی اکرم (صلی الله علیه و آله و سلم) و اهل بیت مطهر ایشان و یگانه منجی عالم بشریت، قائم آل محمد (عج الله فرجه)؛ بر خود واجب می‌دانم تا از استاد گرانقدرم جناب آقای دکتر مهدی گردویی که در راستای انجام این پژوهش راهنمای اینجانب بودند، کمال تشکر و قدردانی را به عمل آورم. در اینجا لازم است تا از تمامی اساتید دانشکده‌ی مهندسی مکانیک و سایر اعضای هیئت علمی و مسئولین دانشگاه شاهرود که در دوران تحصیل در مقطع کارشناسی ارشد از حضورشان بهره‌ی علمی و معنوی بردم تشکر نمایم. در پایان از تمامی افرادی که در طی انجام این پژوهش اینجانب را صمیمانه همراهی و یاری نمودند، کمال سپاس‌گزاری را دارم.

تعهد نامه

اینجانب سعید نادری دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک دانشکده‌ی مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه بررسی اثر تنش نرمال بر منحنی حد شکل‌دهی ورق‌های فلزی با استفاده از مدل M-K تحت راهنمایی دکتر مهدی گردویی متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان‌نامه 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 پایان‌نامه 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 می‌باشد 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 پایان‌نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، 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، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

متن این صفحه باید در ابتدای نسخه‌های تکثیر شده پایان‌نامه وجود داشته باشد

چکیده

منحنی حد شکل‌دهی معیاری است برای تشخیص شروع گلوبی شدن در مسیره‌های مختلف بارگذاری بر روی یک ورق فلزی که از عوامل متعدد ذاتی و محیطی تاثیر می‌پذیرد. تحقیقات به عمل آمده در سال‌های اخیر نشان می‌دهد که تنش نرمال ایجاد شده بر سطح ورق در اثر سرعت بالای برخورد در فرآیندهای شکل‌دهی سریع و یا تماس نقطه‌ای در فرآیندهای شکل‌دهی تدریجی بر شکل‌پذیری ورق تاثیر بسزائی دارد.

در این پژوهش به بررسی اثر تنش نرمال بر سطح یک ورق ناهمگن و ناهمسانگرد فلزی بر روی نمودار حد شکل‌دهی پرداخته شده است. بر طبق مدل مارسینیاک-کوزینسکی ورق دارای یک نقص اولیه به صورت شیار زاویه‌دار نسبت به راستای طولی در نظر گرفته شده است. ناهمسانگردی در نواحی نقص و سالم با استفاده از دو معیار تسلیم غیرکلاسیک Yld2003 و BBC2003 اعمال و با بکارگیری روش پلاستیسیته نموی تحلیل تنش و کرنش در هر یک از نواحی صورت گرفت. برای این منظور ضمن بکارگیری معادله‌ی جریان و سازگاری کرنش، با در نظر گرفتن شرط تراکم‌ناپذیری و صرف‌نظر کردن از کرنش الاستیک، نمو کرنش‌های اصلی به صورت جداگانه برای هر یک از نواحی سالم و نقص نوشته شد. سپس به کمک معادله رفتاری توانی و مقادیر تنش و کرنش موثر مرتبط با معیار تسلیم، مولفه‌های تنش در یک مسیر بارگذاری مشخص در ناحیه سالم بدست آمد و با استفاده از ماتریس تبدیل این مقادیر در سیستم مختصات شیار برای ناحیه نقص محاسبه شد. در انتها با نوشتن معادله‌ی تعادل در فصل مشترک دو ناحیه و به کمک روش نیوتن-رافسون نمو کرنش در هر یک از نواحی محاسبه و این روند تا رسیدن به ناپایداری پلاستیک ادامه یافت. برای استخراج ضریب نقص مناسب و صحت‌سنجی برنامه توسعه یافته برای معیارهای تسلیم Yld2003 و BBC2003 از نتایج تجربی مقالات دیگر به ترتیب برای دو آلیاژ آلومینیوم AA6111-T43 و AA5182-O استفاده شد. که در آخر برای این دو آلیاژ منحنی حد تنش و کرنش شکل‌دهی به‌ازای مقادیر مختلف تنش نرمال بدست آمد. نتایج بدست آمده نشان داد با افزایش تنش نرمال منحنی حد تنش و کرنش شکل‌دهی به سمت بالا منتقل می‌شود.

واژگان کلیدی: منحنی حد شکل‌دهی، شکل‌پذیری، مدل مارسینیاک و کوزینسکی، معیار تسلیم غیرکلاسیک، تنش نرمال،

روش عددی

فصل ۱ مقدمه..... ۱

- ۱-۱- مقدمه ۲
- ۲-۱- شکل پذیری ۲
- ۳-۱- منحنی حد شکل دهی (FLD) ۳
- ۴-۱- عوامل موثر بر شکل پذیری ورق های فلزی ۵
- ۱-۴-۱ کرنش سختی ۵
- ۲-۴-۱ نرخ کرنش سختی ۶
- ۳-۴-۱ ناهمسانگردی ۷
- ۴-۴-۱ ناهمگنی ۷
- ۵-۱- تنش نرمال در فرآیندهای شکل دهی ورق ۸
- ۱-۵-۱ شکل دهی با سیال ۱۰
- ۲-۵-۱ شکل دهی تدریجی ۱۱
- ۳-۵-۱ شکل دهی با سرعت بالا ۱۲
- ۶-۱- اثر تنش نرمال بر شکل پذیری ورق ها ۱۵
- ۷-۱- مروری بر پیشینه ی پژوهش ۱۷
- ۸-۱- معرفی پایان نامه و ضرورت تحقیق ۲۲

فصل ۲ مدل های تئوری گلوبی شدن در ورق های ناهمسانگرد فلزی..... ۲۵

- ۱-۲- معیارهای تئوری تعیین کرنش های حدی ۲۶
- ۲-۲- معیارهای تسلیم ۳۰
- ۱-۲-۲ معیارهای تسلیم کلاسیک ۳۲
- ۲-۲-۲ معیارهای تسلیم غیر کلاسیک ۳۵
- ۳-۲- نکات کلیدی در انتخاب معیار تسلیم ۳۹
- ۱-۳-۲ مقایسه معیارهای تسلیم کلاسیک و غیر کلاسیک ۴۰
- ۲-۳-۲ پارامترهای مکانیکی مورد نیاز در معیار تسلیم ۴۴

فصل ۳ تحلیل عددی ناپایداری پلاستیک ورق ناهمگن و ناهمسانگرد بر اساس مدل M-K..... ۴۷

- ۱-۳- محاسبات مدل M-K ۴۸
- ۲-۳- تحلیل تنش و کرنش در ناحیه سالم ۵۰
- ۳-۳- تحلیل تنش و کرنش در ناحیه نقص ۵۲
- ۴-۳- معیار تسلیم پیشرفته Yld2003 ۵۶

۳-۵- معیار تسلیم BBC2003 ۶۱

فصل ۴ ارائه نتایج و بحث ۶۳

۴-۱- نتایج منحنی حدشکل دهی بر اساس معیار تسلیم Yld2003 برای ورق AA6111-T43 ۶۴

۴-۲- صحت سنجی نتایج منحنی حدشکل دهی ورق AA5182-O بر اساس معیار تسلیم BBC2003 ۷۶

فصل ۵ نتیجه گیری و ارائه پیشنهاد ۸۳

۵-۱- نتیجه گیری ۸۴

۵-۲- پیشنهادها ۸۵

منابع ۸۷

- شکل ۱-۱ ۱-۱ حالت‌های مختلف تغییر شکل بر روی دیاگرام حد شکل‌دهی [۳] ۴
- شکل ۲-۱ تنش تماسی؛ چپ: تماس یک طرفه، راست: تماس دوطرفه [۷] ۹
- شکل ۳-۱ ورق‌های فولادی شکل‌دهی شده با کوبش الکترومغناطیسی بر روی سنبه‌های متقارن محوری و گوه‌ای [۱۴] ۱۳
- شکل ۴-۱ نمایش کرنش اصلی و فرعی نقاط پارگی، برای پنج فولاد مختلف، بر روی FLD [۱۴] ۱۴
- شکل ۵-۱ نقاط تماس پروب روی قطعه برای بررسی سرعت آن‌ها در فرآیند شکل‌دهی الکترومغناطیسی [۱۶] ۱۵
- شکل ۶-۱ اثر تنش نرمال بر نسبت افزایش شکل‌پذیری تحت شرایط کرنش صفحه‌ای [۷] ۱۵
- شکل ۷-۱ اثر تنش نرمال بر FLD برای آلومینیوم آلیاژی AA1050 ($q = -\sigma_3\sigma_1$) [۷] ۱۶
- شکل ۱-۲ مدل‌های تئوری برای ترسیم FLD [۳۸] ۲۶
- شکل ۲-۲ منحنی حد شکل‌دهی معیار هیل و مقایسه آن با FLD تجربی [۴] ۲۹
- شکل ۳-۲ ورق با هندسه ناهمگن مورد استفاده در مدل M-K [۲۱] ۳۰
- شکل ۴-۲ سطح تسلیم هیل ۴۸ برای مقادیر مختلف r [۴۰] ۳۳
- شکل ۵-۲ سطح تسلیم هیل ۷۹ برای مقادیر مختلف r ۳۵
- شکل ۶-۲ سطح تسلیم پیش‌بینی شده با استفاده از معیار تسلیم هیل ۴۸، هیل ۹۰، بارلات ۸۹ و BBC2000 و مقایسه آن با نتایج تجربی برای AA3103-O [۳۸] ۴۱
- شکل ۷-۲ تنش تسلیم تک‌محوره نسبت به زاویه قرارگیری نمونه پیش‌بینی شده با معیارهای تسلیم هیل ۴۸، هیل ۹۰، بارلات ۸۹ و BBC2000 و مقایسه آن با نتایج تجربی ورق آلومینیوم AA3103-O [۳۸] ۴۲
- شکل ۸-۲ ضرایب ناهمسانگردی پیش‌بینی شده با استفاده از معیارهای تسلیم هیل ۴۸، هیل ۹۰، بارلات ۸۹ و BBC2000 و مقایسه آن با نتایج تجربی بدست آمده از آلیاژ آلومینیوم AA3103-O [۳۸] ۴۳
- شکل ۹-۲ سطح تسلیم پیش‌بینی شده برای ورق آلیاژ 3103-0 با معیارهای تسلیم CB، Yld2000-2d و BBC2000 [۳۸] ۴۴

- شکل ۳-۱ طرحواره مدل مارسینیاک-کوزینسکی در شرایط سه‌بعدی [۴۶]..... ۴۹
- شکل ۳-۲ طرحواره تبدیل حالت تنش سه محوره به حالت تنش صفحه‌ای [۴۸]..... ۵۰
- شکل ۳-۳ ارتباط کرنش طولی نواحی سالم و گلوئی ۵۴
- شکل ۳-۴ فلوجارت مدل M-K..... ۵۵
- شکل ۴-۱ مقایسه FLD حاصل از این تحقیق با نتایج تجربی و عددی ژانگ [۴۵] برای ورق AA6111-T43..... ۶۵
- شکل ۴-۲ سطح تسلیم ورق AA6111-T43 بر اساس معیار تسلیم Yld2003 و هیل ۴۸ و مقایسه با نتایج تجربی [۴۶] ۶۶
- شکل ۴-۳ تغییرات تنش تسلیم نسبت به زاویه آزمون کشش ورق AA6111-T43..... ۶۷
- شکل ۴-۴ تغییرات ضریب ناهمسانگردی r نسبت به زاویه کشش ورق AA6111-T43..... ۶۷
- شکل ۴-۵ اثر زاویه شیار بر روی منحنی حد شکل‌دهی ورق AA6111-T43..... ۶۸
- شکل ۴-۶ تاثیر ضریب ناهمگنی بر روی منحنی حد شکل‌دهی ورق AA6111-T43..... ۶۸
- شکل ۴-۷ تاثیر توان کرنش سختی بر منحنی حد شکل‌دهی ورق AA6111-T43..... ۶۹
- شکل ۴-۸ تاثیر تنش نرمال بر منحنی حد شکل‌دهی ورق AA6111-T43..... ۷۰
- شکل ۴-۹ تاثیر تنش نرمال بر سطح تسلیم ورق AA6111-T43..... ۷۱
- شکل ۴-۱۰ تاثیر تنش نرمال بر منحنی حد تنش ورق AA6111-T43..... ۷۲
- شکل ۴-۱۱ تعریف پارامتر بهبود شکل‌پذیری در یک مسیر کرنش دلخواه..... ۷۳
- شکل ۴-۱۲ پارامتر بهبود شکل‌پذیری کرنش بر حسب نسبت تنش α ۷۴
- شکل ۴-۱۳ تغییرات تنش حدی بر حسب نسبت تنش α ۷۶
- شکل ۴-۱۴ مقایسه FLD حاصل از این تحقیق با نتایج تجربی و عددی گلو [۵۵] برای ورق AA5182-O..... ۷۷
- شکل ۴-۱۵ تاثیر ضریب ناهمگنی بر منحنی حد شکل‌دهی ورق AA5182-O..... ۷۸
- شکل ۴-۱۶ تاثیر توان کرنش سختی بر منحنی حد شکل‌دهی برای ورق AA5182-O..... ۷۸
- شکل ۴-۱۷ تاثیر تنش نرمال بر منحنی حد شکل‌دهی برای ورق AA5182-O..... ۷۹
- شکل ۴-۱۸ منحنی پارامتر بهبود شکل‌پذیری کرنش بر حسب نسبت تنش α برای ورق AA5182-O..... ۸۰

شکل ۱۹-۴ تاثیر تنش نرمال بر منحنی حد تنش ورق AA5182-O ۸۲

شکل ۲۰-۴ منحنی تغییرات تنش حدی بر حسب نسبت تنش α برای ورق AA5182-O ۸۲

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۱ سرعت و تنش تماسی در پنج نقطه تماسی در فرآیند شکل‌دهی الکترومغناطیسی ورق آلومینیوم [۱۶] ۱۴
- جدول ۱-۲ استراتژی‌های مختلف تعیین ضرایب معیار تسلیم BBC2003 با تعداد ثوابت مختلف [۳۸] ۳۹
- جدول ۲-۲ خواص مکانیکی مورد نیاز برای تعیین ثوابت تشخیص معیارهای تسلیم مختلف ۴۵
- جدول ۱-۳ خواص مکانیکی ورق آلومینیوم AA6111-T43 [۵۰] ۵۸
- جدول ۲-۳ مقادیر ضرایب معیار Yld2003 برای ورق AA6111-T43 [۴۸] ۵۸
- جدول ۳-۳ خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم AA5182-O [۵۲] ۶۲
- جدول ۴-۳ ثوابت بهکار رفته در معیار تسلیم BBC2003 ورق AA5182-O [۵۳] ۶۲
- جدول ۱-۴ پارامتر بهبود شکل‌پذیری برای نسبت تنش‌های مختلف ورق AA6111-T43 ۷۴
- جدول ۲-۴ نتایج بدست آمده از تحقیق ژانگ و همکاران [۵۴] ۷۵
- جدول ۳-۴ پارامتر بهبود شکل‌پذیری برای نسبت تنش‌های مختلف ورق AA5182-O ۸۱

فهرست نشانه‌ها

x	محور طولی منطبق بر جهت نورد	$a_1 - a_8$	ضرایب ناهمسانگردی معیار تسلیم Yld2003
y	محور عرضی ورق عمود بر جهت نورد	$()^a$	ناحیه سالم
z	محور عمود بر سطح ورق	$()^b$	ناحیه نقص
α	نسبت تنش در صفحه	f_0	ضریب نقص اولیه
Γ, Λ, Ψ	توابع کمکی در معیار تسلیم BBC2003	g	شتاب گرانش
γ	نسبت تنش	K	ضریب سختی معیار توانی
ε	کرنش	m	توان معیار تسلیم هیل ۷۹
$\bar{\varepsilon}$	کرنش موثر	n	توان کرنش سختی
$d\varepsilon$	نمو کرنش	n, z, t	مختصات منطبق بر شیار
ξ_e	پارامتر بهبود شکل پذیری کرنش	r	ضریب ناهمسانگردی نرمال
ξ_s	پارامتر بهبود شکل پذیری تنش	r_ψ	ضریب ناهمسانگردی در راستای ψ با جهت نورد
ρ	نسبت کرنش درون صفحه - ای	s	نسبت تنش خارج صفحه
θ	زاویه شیار در مدل نقص	T	دما
σ	تنش	T, S, R, Q, P, N	ضرایب ناهمسانگردی در معیار تسلیم BBC2003
		t	ضخامت ورق

σ_{nn}	تنش عمودی راستای شیار
σ_{nt}	تنش برشی راستای شیار
φ	تابع تسلیم
ψ	زاویه نسبت به راستای نورد

فصل ۱ مقدمه

۱-۱- مقدمه

امروزه با پیشرفت تکنولوژی و گسترش صنایع، جنبه‌های اقتصادی فرآیندهای مورد استفاده نیز مورد توجه بیشتری قرار گرفته است. فرآیندهای شکل‌دهی ورق که به منظور تغییر شکل هدفمند ورق و ساخت قطعات مختلف به کار گرفته می‌شود نیز از این مسئله مستثنی نیست. فرآیندهای شکل‌دهی ورق‌های فلزی غالباً دارای طبیعت کششی بوده و میزان تغییر شکلی که در هر مرحله می‌توان ایجاد نمود، به دلیل پدیده‌هایی همچون گلوئی شدن، پارگی و چروکیدگی محدود می‌گردد.

بررسی شکل‌پذیری^۱ ورق را می‌توان شامل بدست آوردن حد تحمل ورق و مقایسه مقادیر بدست آمده از حل تحلیلی با حد تحمل ورق دانست. در شکل‌دهی ورق‌ها، این نوع بررسی با استفاده از منحنی‌های حد شکل‌دهی^۲ (FLD) انجام می‌گیرد، که یکی از شیوه‌های کارآمد در طراحی فرآیندهای شکل‌دهی ورق‌های فلزی به شمار می‌رود. با توجه به اهمیت موضوع، در زمینه FLD تاکنون مطالعات و بررسی‌های متعددی صورت گرفته است [۱].

۱-۲- شکل‌پذیری

فرآیند شکل‌دهی ورق‌های فلزی^۳ عبارت است از، انجام یک تغییر شکل پلاستیک هدفمند بر روی ورق تا رسیدن به یک قطعه مهندسی با شکل مطلوب. برای انجام این مقصود روش‌های متعددی وجود دارد که در هر یک از آن‌ها بارگذاری و شرایط مرزی مختلفی به کار گرفته می‌شود. رفتار یک ورق فلزی در فرآیند شکل‌دهی، وابسته به چند عامل می‌باشد که میزان اهمیت هر یک بستگی به فرآیند به کار گرفته شده دارد. از جمله این عوامل می‌توان به شکل منحنی تنش-کرنش، ضرایب ناهمسانگردی، ریزساختار، متالورژیکی، مشخصات سطح ورق و حساسیت به نرخ کرنش اشاره نمود [۲]. همچنین مقدار و مسیر بارگذاری در حین تغییرشکل نیز از جمله عوامل مؤثر می‌باشد. فرآیندهای شکل‌دهی ورق‌های فلزی دارای طبیعت کششی بوده و مقدار تغییرشکلی که در هر مرحله می‌توان ایجاد کرد با شروع ناپایداری کششی، گلوئی شدن و پارگی

¹ Formability

² Forming Limit Diagrams

³ Sheet metal forming

محدود می‌گردد.

ایجاد گلویی یکی از محدودیت‌های شکل‌دهی می‌باشد. دو نوع گلویی وجود دارد؛ گلویی پخشی^۱ (کاهش عرض و ضخامت) و گلویی موضعی^۲ (کاهش ضخامت). در بسیاری از فرآیندهای ورق‌کاری، معمولاً شکست در نتیجه‌ی گلویی موضعی شدید در سطح ورق رخ می‌دهد [۲]. مشاهدات نشان می‌دهد که در ورق پیوسته، گلویی موضعی مشابه آنچه که در مورد گلویی پخشی در یک نوار تحت کششی اتفاق می‌افتد، گسترش می‌یابد. با توجه به این که پهنای این نوع گلویی کم (در حد ضخامت ورق) می‌باشد، لذا بر توزیع کلی کرنش اثر نخواهد گذاشت. اما با توجه به این که گلویی موضعی منجر به پارگی می‌شود، فهم شرایطی که تحت آن‌ها، گلویی‌های موضعی گسترش می‌یابد، حائز اهمیت می‌باشد.

۱-۳- منحنی حد شکل‌دهی (FLD)

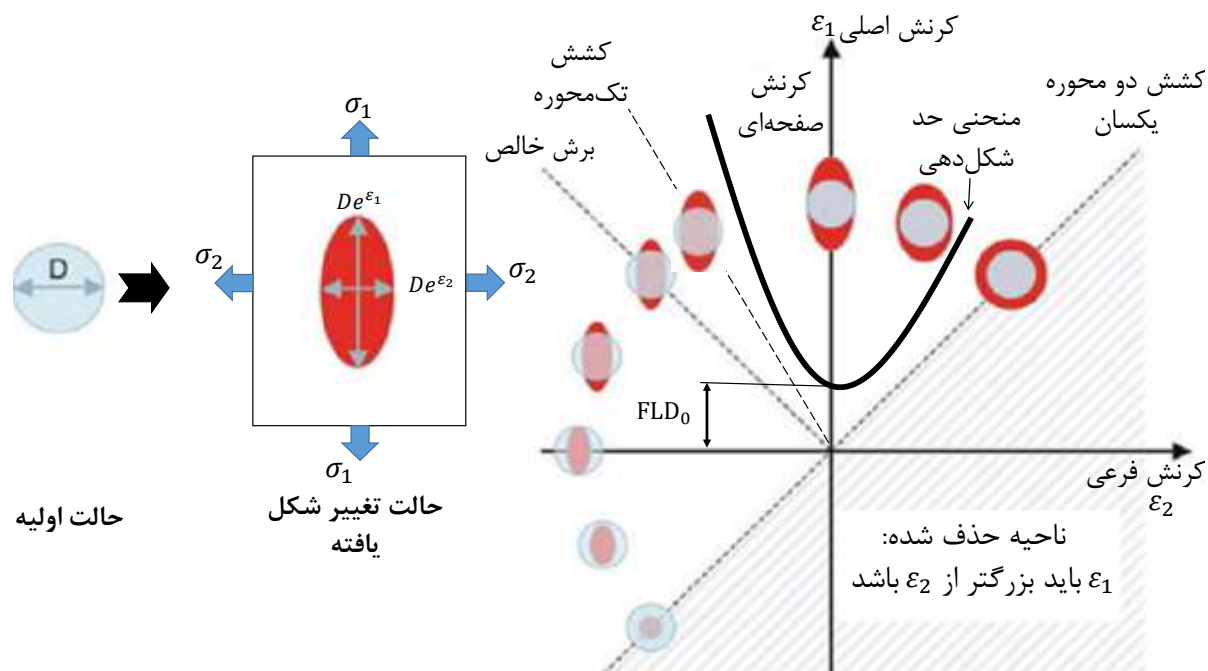
امروزه به منظور تدوین یک روش جامع در تخمین پارگی ورق، در مسیرهای مختلف بارگذاری از منحنی حد شکل‌دهی استفاده می‌شود. FLD ترکیب کرنش‌هایی است که یک ورق می‌تواند تحمل کند (شکل ۱-۱). مطابق شکل ۱-۱ تنش اصلی σ_1 و σ_2 به هر المان وارد می‌گردد. مقادیر متناظر کرنش بر روی صفحه ورق با ϵ_1 و ϵ_2 مشخص می‌شود که به ترتیب کرنش اصلی^۳ و کرنش فرعی^۴ نام می‌گیرد. FLD در حقیقت نشان دهنده ارتباط بین کرنش اصلی و فرعی هنگام شروع گلویی موضعی می‌باشد. نمایشی از یک نمونه شماتیک منحنی حد شکل‌دهی به همراه محدوده‌های موجود روی آن در شکل ۱-۱ ارائه شده است. در بارگذاری کرنش صفحه‌ای بر روی ورق ($\epsilon_2 = 0$) کرنش حدی با FLD_0 نشان داده می‌شود.

¹ Diffuse necking

² Localized necking

³ Major strain

⁴ Minor strain



شکل ۱-۱ حالت‌های مختلف تغییر شکل بر روی دیاگرام حد شکل‌دهی [۳]

در بررسی عملیات شکل‌دهی، پس از مدل‌سازی فرآیند و بدست آوردن توزیع کرنش، مقادیر آن با FLD ورق مذکور مقایسه شده و در صورتی که ترکیب کرنش‌ها در تمام نقاط ورق زیر منحنی واقع شود، می‌توان از موفقیت عملیات اطمینان حاصل کرد.

این منحنی‌ها به دو روش تئوری و تجربی به دست می‌آیند. در روش تئوری از قوانین شارش پلاستیک و تئوری ناپایداری استفاده می‌گردد. در روش تجربی نیز ورق را تحت مسیرهای کرنش مختلف بارگذاری و در لحظه گلوبی شدن عملیات را متوقف و کرنش‌های حدی را اندازه‌گیری می‌کنند. باید توجه داشت که، استخراج FLD به صورت تجربی مستلزم انجام آزمایش‌های دقیق و صرف زمان و هزینه زیاد می‌باشد. همچنین کرنش‌های حدی ورق‌های فلزی (کرنش‌هایی که برای ترسیم FLD استفاده می‌شود) از چندین عامل از قبیل: کار سختی ماده، حساسیت به نرخ کرنش، ناهمسانگردی، ناهمگنی و آسیب‌های ساختاری و همچنین ضخامت ورق تأثیر می‌پذیرد [۴]. لذا به منظور فهم بهتر این منحنی‌ها و ارائه‌ی پیش‌بینی‌های تئوری در فرآیندهای شکل‌دهی ورق، تحقیقات بسیاری در زمینه بهبود تئوری این منحنی‌ها انجام شده است.

از جمله روش‌های ارائه شده در زمینه ترسیم این منحنی‌ها به روش‌های تحلیلی، می‌توان به مدل‌های مبتنی

بر شرط ناپایداری پلاستیک، مدل‌های مبتنی بر فرضی ناهمگنی اولیه و همچنین ترکیب روش ناپایداری و ناهمگنی اشاره نمود. دو دیدگاه تئوری جامع برای توضیح گلوبی یکی روش مارسینیاک کوزینسکی^۱ (M-K) و دیگر مدل‌های مبتنی بر ناپایداری پلاستیک می‌باشد. از آنجا که مبنای کار این پایان نامه بر پایه روش M-K است، لذا در فصل بعد این روش به اجمال شرح داده می‌شود.

۱-۴- عوامل موثر بر شکل‌پذیری ورق‌های فلزی

این یک واقعیت شناخته شده است که پارامترهای ماده و برخی از عوامل خارجی تاثیر قابل توجهی بر روی شکل‌پذیری در سرعت‌های پایین شکل‌دهی دارند. اثر این پارامترها در سرعت‌های بالا هنوز به طور گسترده مورد مطالعه قرار داده نشده است. بسیاری از مطالعات در پژوهش‌های پیشین به اهمیت این عوامل در فرآیندهایی با سرعت پایین شکل‌دهی پرداخته‌اند، که در ادامه به بررسی عوامل موثر در شکل‌دهی ورق‌های فلزی خواهیم پرداخت.

۱-۴-۱ کرنش‌سختی^۲

کرنش‌سختی یا کارسختی، خصوصیت ذاتی مواد در استحکام یافتن و سخت شدن با افزایش سطح کرنش است [۴]. کارسختی یکی از مهم‌ترین خواص موثر بر شکل‌پذیری ورق‌های فلزی می‌باشد. وقتی یک ماده دچار کار سرد می‌شود، استحکام و سختی آن افزایش می‌یابد. با این حال، متعاقباً کارسختی باعث کاهش شکل‌پذیری باقیمانده نیز می‌شود [۵]. در حین تغییر شکل پلاستیک، منطقه نازک شده تحت تغییر شکل بیشتر، به موجب کرنش‌سختی مقاوم‌تر شده و می‌تواند تغییر شکل بیشتری را تحمل کند و همچنین تغییر شکل را به مناطق مجاور انتقال می‌دهد، که منجر به ترویج نازک شدن یکنواخت در ورق فلزی می‌شود. پارامتری که بیانگر این رفتار می‌باشد توان کرنش‌سختی نامیده می‌شود که به صورت رابطه ۱-۱ تعریف می‌شود.

¹ Marciniak-Kuczynski

² Strain hardening

$$n = d(\ln \bar{\sigma})/d(\ln \bar{\epsilon}) \quad 1-1$$

که در این رابطه $\bar{\sigma}$ و $\bar{\epsilon}$ به ترتیب تنش موثر و کرنش موثر می‌باشد. ازدیاد طول یکنواخت بر روی ماده تا تشکیل گلوپی توسط متغیر n کنترل می‌شود. بنابراین توان کرنش سختی بالا می‌تواند باعث به تاخیر افتادن شروع گلوپی و بهبود شکل پذیری شود. با توجه به معیار کانسیدر^۱، در کشش تک‌محوره کرنش حقیقی در لحظه گلوپی شدن با توان کرنش سختی n برابر می‌شود. لذا در فرآیندهایی که شامل تغییر شکل زیاد می‌باشد ضروری است که از ورق‌هایی با توان کرنش سختی بالاتر استفاده نمود زیرا امکان کرنش دهی بیشتر یکنواخت فراهم بوده و ورق نسبت به پارگی مقاومت بیشتری خواهد داشت. برای بسیاری از فلزات، متغیر n بین $0/5 < n < 0/1$ می‌باشد [۶].

۲-۴-۱ نرخ کرنش سختی^۲

نرخ کرنش سختی پارامتری از خواص ذاتی ورق فلزی است که بیان کننده حساسیت ماده در مقابل سرعت تغییر شکل می‌باشد. پارامتری که بیانگر این رفتار می‌باشد شاخص حساسیت به نرخ کرنش (m) است که مطابق رابطه ۲-۱ تعریف می‌شود.

$$m = d(\ln \bar{\sigma})/d(\ln \dot{\bar{\epsilon}}) \quad 2-1$$

در این رابطه $\dot{\bar{\epsilon}}$ نرخ کرنش موثر می‌باشد. مقادیر مثبت m باعث کاهش نرخ شیب کرنش بین ناحیه گلوپی و منطقه یکنواخت می‌شود و در نتیجه کرنش یکنواخت را به دلیل ایجاد تغییر شکل‌های موضعی در ناحیه گلوپی به تاخیر می‌اندازد [۶]. شرایطی که باعث ایجاد مقادیر بالاتر m می‌شود، منجر به افزایش کرنش شکست در منطقه گلوپی نیز می‌شود. حساسیت به نرخ کرنش اکثر ورق‌ها در دمای اتاق کم است (بین ۰ و ۰/۳). برای فولاد ضد زنگ مقدار آن کمی مثبت و برای آلومینیوم، صفر یا اندکی منفی است [۴]. نرخ حساسیت وابسته به میزان دما است و در دماهای بالاتر از نصف نقطه ذوب مطلق، به سرعت افزایش می‌یابد. آلیاژهای سوپرپلاستیک^۳ دارای مقادیر بالاتر m می‌باشند (در محدوده ۰/۲ تا ۰/۴) و افزایش طول یکنواخت

¹ Considere criterion

² Strain rate hardening

³ Super plastic

تا چند هزار درصد را می‌توانند فراهم سازند. تحقیقات پیشین نشان داده است که تعامل بسیار بالایی میان مقادیر m و n در مشخص کردن تغییر طول کلی وجود دارد و این تعامل در مقادیر بالای m و n چشم‌گیرتر می‌شود [۶].

۳-۴-۱ ناهمسانگردی^۱

ناهمسانگردی ورق فلزی بیان‌کننده تغییر در رفتار پلاستیک در جهات مختلف نسبت به راستای نورد می‌باشد که می‌توان آن را با ضریب ناهمسانگردی نرمال مطابق رابطه ۳-۱ بیان کرد.

$$r = \varepsilon_w / \varepsilon_t \quad 3-1$$

بنابراین مقدار آن برابر با نسبت کرنش پلاستیک در جهت عرضی به نسبت کرنش در جهت ضخامت ورق می‌باشد [۵]. تفاوت ضریب r بر روی صفحه ورق در جهات مختلف نسبت به راستای نورد را ناهمسانگردی صفحه‌ای^۲ گویند. مقدار میانگین r اندازه‌گیری شده در صفحه ورق با \bar{r} بیان می‌شود. اگر \bar{r} بزرگتر از یک باشد، نشان‌دهنده آن است که ماده دارای مقاومت بالا در برابر نازک شدن در راستای ضخامت از خود می‌باشد. همچنین نشان‌دهنده مقاومت بالاتر در تنش دومحوره است، در حالیکه مقدار \bar{r} کوچکتر نشان‌دهنده نازک شدن آسان‌تر و در نتیجه استحکام کشش دومحوره کمتر می‌باشد. در مناطق تحت کشش عمیق، مقدار بالای \bar{r} امکان کشش بیشتر ورق را نشان می‌دهد. همچنین در کشش سطحی قطعات کم‌عمق مانند پنل‌های بیرونی بدنه خودرو، مقدار بالاتر \bar{r} باعث کاهش چین و چروک در محصول نهایی می‌شود [۶].

۴-۴-۱ ناهمگنی^۳

ناهمگنی در توزیع ترکیب ماده، استحکام و یا ضخامت، اثر شدیدی بر شکل‌پذیری دارد. افزایش طول یکنواخت به شدت وابسته به ضریب ناهمگنی است، که به صورت نسبت مساحت و یا ضخامت مناطق ناهمگن به یکنواخت بیان می‌شود. ناحیه با کمترین ضخامت و یا استحکام یک مکان بالقوه برای شروع

¹ Anisotropy

² Planar anisotropy

² Non-Homogenous

ناپایداری و گلوبی موضعی در ورق می‌باشد، در نتیجه ناهمگنی منجر به کاهش شکل‌پذیری ورق می‌شود. کرنش در منطقه نقص با شتاب بیشتری به سمت گلوبی می‌رود و لذا می‌تواند باعث شکست زود هنگام در ورق شود [۴].

۱-۵- تنش نرمال در فرآیندهای شکل‌دهی ورق

فرآیندهای شکل‌دهی ورق را از نقطه نظر هندسه فرآیند و نحوه بارگذاری می‌توان به دو گروه کلی فرآیندهای شکل‌دهی درون‌صفحه‌ای^۱ و شکل‌دهی برون‌صفحه‌ای^۲ طبقه‌بندی کرد. در شکل‌دهی درون‌صفحه‌ای مانند کشش تک‌محوره و یا دومحوره که هندسه ورق از ابتدا تا انتها فرآیند به صورت کاملاً تخت باقی می‌ماند، اغلب تنش ماهیت صفحه‌ای داشته و مولفه تنش نرمال قابل صرف‌نظر کردن می‌باشد. ولی در مقابل، برای شکل‌دهی برون‌صفحه‌ای، بارگذاری و شرایط مرزی بگونه‌ای است که ورق تخت و یا انحنا دار علاوه بر تنش‌های درون‌صفحه‌ای تحت تنش نرمال (عمود بر صفحه) نیز قرار می‌گیرد. به عنوان مثال در انبساط‌دهی یک پوسته کروی جدار نازک با فشار سیال، تنش دورن صفحه (غشائی) در مقابل با تنش نرمال σ_{zz} (اغلب برابر با فشار سیال) با استفاده از رابطه ۱-۴ قابل محاسبه است.

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \frac{pR}{2t} = \frac{\sigma_{zz}R}{2t} \quad ۴-۱$$

که در این رابطه R و t به ترتیب شعاع و ضخامت پوسته است. اگر $\frac{R}{2t} > 10$ باشد، $\sigma_{zz} < 0.1\sigma_{xx}$ بوده و لذا تنش نرمال قابل صرف‌نظر کردن است. ولی با کاهش نسبت $\frac{R}{t}$ این ساده‌سازی در تحلیل فرآیند موثر واقع خواهد شد. مثلاً در فرآیندهای هیدروفورمینگ در گوشه‌های تیز قطعه که اغلب پارگی ورق و لوله نیز از همین نواحی رخ می‌دهد با کاهش نسبت $\frac{R}{t}$ فرض جدارنازک بودن پوسته و در نتیجه تنش‌صفحه‌ای بودن فرآیند نامعتبر می‌باشد. در مثال دیگر برای فرآیند مهرزنی^۳ یک ورق به ضخامت t بر روی شعاع سنبه‌ی ρ نیز می‌توان نشان داد که فشار اعمالی از سنبه به ورق از رابطه ۱-۵ محاسبه می‌شود [۴].

^۱ In-plane forming

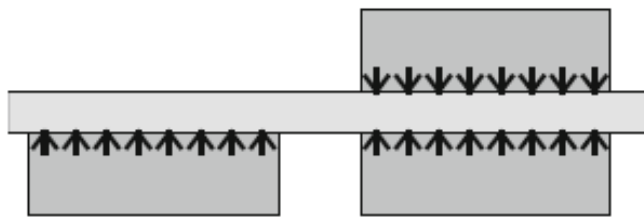
^۲ Out-of-plane forming

^۳ Stamping

$$\sigma_{xx} = \frac{p\rho}{t} \quad ۵-۱$$

که در این حالت نیز هرچه نسبت خم $\frac{\rho}{t}$ کاهش یابد تنش تماسی نرمال افزایش خواهد یافت لذا اگرچه در اغلب فرآیندهای خم کاری با شعاع خم بزرگ تنش نرمال نسبت به تنش دورن صفحه‌ای قابل صرف نظر است، ولی در فرآیندهایی با خم کاری‌های با لبه تیز قالب افزایش معنادار σ_{zz} را شاهد خواهیم بود [۴].

در واقع در تمام فرآیندهایی که تماس بین ابزار و سطح قطعه کار وجود دارد، تنش نرمال حضور خواهد داشت که این امر باعث می‌شود فرض تنش صفحه‌ای دقیق نباشد. تماس بین اجزاء قالب با ورق مطابق شکل ۲-۱ می‌تواند از نوع یک‌طرفه و یا دوطرفه باشد. به عنوان مثال در فرآیند کشش عمیق در ناحیه زیر سنبه تماس یک‌طرفه و در ناحیه فلانچ در زیر ورق گیر تماس دوطرفه حاکم می‌باشد. در فرآیند کشش عمیق همراه با لقی کم بین سنبه و ماتریس که منجر به اتوکاری ورق می‌شود تماس دو طرفه در دیواره ظرف ایجاد می‌شود. تنش تماسی در تعدادی از فرایندهای شکل دهی می‌تواند بسیار زیاد و قابل مقایسه با تنش تسلیم ماده باشد. در تماس یک‌طرفه از یکسو تنش نرمال فشاری و از سوی دیگر تنش نرمال صفر وجود خواهد داشت. این بدان معنی است که تنش نرمال در داخل ورق متغیر خواهد بود که تنش متوسط پایین تر از تنش واقعی در سطح است. این در حالی است که در تماس دوطرفه که طول تماس می‌تواند بزرگتر از ضخامت باشد، توزیع تنش نرمال در ضخامت مقدار تقریباً ثابت و مشخص خواهد داشت [۷].



شکل ۲-۱ تنش تماسی؛ چپ: تماس یک طرفه، راست: تماس دوطرفه [۷]

حضور تنش تماسی می‌تواند باعث تغییر حالت تنش در ماده شود، که این اثر را می‌توان از دو جنبه مورد بررسی قرار داد. یکی از بارزترین آثار این است که اعمال تنش نرمال باعث کاهش تنش کششی تسلیم در حالت کششی می‌شود. این اثر به طور مستقیم از روابط توابع تسلیم بدست می‌آید [۷]. به عنوان مثال در

تابع تسلیم ترسکا^۱؛ $\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_f$ ، اگر σ_3 مقدار منفی داشته باشد، اعمال آن باعث کاهش تنش σ_1 می-شود. اثر دیگر که کمتر مورد بررسی قرار گرفته است این است که اعمال تنش نرمال می‌تواند باعث افزایش شکل‌پذیری شود.

۱-۵-۱ شکل‌دهی با سیال^۲

در ساخت و تولید صنعتی و مدرن، هیدروفرمینگ به عنوان یکی از موثرترین راه‌ها برای شکل‌دهی قطعات ساخته شده از مواد سبک‌وزن مانند انواع آلیاژ آلومینیوم مورد توجه بوده است. فرآیند هیدروفرمینگ با اعمال فشار مایع به جای سنبه جامد باعث شکل‌دهی فلزات می‌شود. این فرآیند در طی یک روند طولانی در طول سال‌های جنگ جهانی دوم توسعه داده شده است [۸]. در سال‌های اخیر، هیدروفرمینگ به طور گسترده‌ای در بسیاری از زمینه‌های صنعتی به ویژه در صنایع خودرو سازی با توجه به تلورانس ابعادی کوچک و برگشت فتری پایین و هزینه قالب کم مورد توجه قرار گرفته است [۸]. در هیدروفرمینگ ورق تنش نرمال حتی ممکن است بیش از تنش صفحه‌ای باشد، که در نتیجه به وضوح می‌توان نشان داد که فرض تنش صفحه‌ای برای این فرآیند نامناسب می‌باشد. به همین دلیل در سال‌های اخیر پژوهش در هیدروفرمینگ ورق از فرض حالت تنش صفحه‌ای به در نظر گرفتن تنش غیرصفحه‌ای تغییر کرده است. بروک^۳ در سال ۱۹۹۸ نشان داد که محدوده‌ی فشار در فرآیند هیدروفرمینگ در صنعت خودروسازی از ۲۵ تا ۵۰ مگاپاسکال تغییر می‌کند [۹]. تحقیقات صورت پذیرفته بر روی FLD ورق با در نظر گرفتن تنش نرمال در هیدروفرمینگ ورق همچنان محدود می‌باشند. لیو^۴ و همکارانش در سال ۲۰۰۳ گزارش دادند که تنش نرمال فشاری باعث افزایش شکل‌پذیری ورق‌های فلزی می‌شوند. در همین راستا آن‌ها در سال ۲۰۰۳ در پژوهش دیگری یک مدل ارائه دادند که با در نظر گرفتن تنش نرمال در راستای ضخامت توانست پیش‌بینی خوبی از رفتار شکل‌پذیری ورق فلزی در فرآیند هیدروفرمینگ بدست آورد [۱۰].

¹ Tresca yield criteria

² Hydroforming

³ Brooke

¹ Lui

۱-۵-۲ شکل‌دهی تدریجی

روش شکل‌دهی تدریجی ورق^۱ (ISF) یک فرآیند جذاب برای تولید سریع قطعات ورق فلزی پیچیده می‌باشد. این روش سازگاری عالی به منظور استفاده در ماشین‌های کنترل عددی (CNC) از طریق کنترل مستقیم داده‌های CAD و به حداقل رساندن استفاده از قالب‌های تخصصی و پرس را دارد. از آنجایی که این فرآیند بسیار انعطاف‌پذیر می‌باشد و هزینه قالب کمی دارد و همچنین باعث افزایش شکل‌پذیری می‌شود، برای تولید قطعات با ارزش افزوده بالا، تعداد کم و سفارشی مورد استفاده در صنایع پزشکی و صنایع فضایی کاربرد دارد. از آغاز دهه ۹۰ میلادی ایده ISF توسط رزالکس ارائه شد و تعدادی از متغیرهای موجود در این فرآیند مورد بررسی قرار گرفت. روش‌های شکل‌دهی متفاوتی بر اساس روش ISF ارائه شده است. روش شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای^۲ (SPIF) که با تغییر شکل ورق با استفاده از یک ابزار نوک‌گرد، در امتداد یک مسیر مشخص، توسط ایسکی^۳ و همکارانش [۱۱] ارائه شد.

یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های فرآیندهای ISF، تغییر شکل موضعی ورق می‌باشد. ورق به صورت محلی در سراسر منطقه تماس با ابزار تغییر شکل می‌یابد. از آنجایی که سطح تماس در ناحیه میان ابزار و ورق کوچک می‌باشد؛ در نتیجه تنش نرمال اعمال و همچنین اصطکاک بسیار بالا ایجاد می‌شود. این امر ممکن است باعث خراب شدن سطح ورق شود. بنابراین تحقیقات دقیق بر روی اثر تنش نرمال و برشی حاصل از شرایط تماس برای توسعه روش‌های جدید ISF و بهبود کیفیت سطح ورق و افزایش درخواست برای کاربردهای صنعتی امری ضروری می‌باشد. فشار بالای موجود در این فرآیند می‌تواند باعث ایجاد مقاومت اصطکاکی بزرگتر در ورق‌های فلزی شود. بسیاری از محققان پیشنهاد کرده‌اند که اصطکاک نیز عامل بسیار مهمی در ایجاد تنش نرمال در فرآیند SPIF می‌باشد [۱۲].

¹ Incremental Sheet Forming

³ Single Point Incremental Forming (SPIF)

⁴ Iseki

۱-۵-۳ شکل‌دهی با سرعت بالا

در فرآیندهای شکل‌دهی با سرعت بالا مانند شکل‌دهی الکترومغناطیسی و شکل‌دهی انفجاری^۱ فشار اعمالی بسیار وجود دارد که به صورت تنش نرمال بر سطح ورق اعمال می‌شود. این فرآیندها اغلب با برخورد شدید ورق و یا لوله با سرعت بالا با سطح قالب همراه است. درک دقیق از این موضوع نیاز به مطالعه رفتار موج در مواد جامد دارد که فراتر از محدوده این پژوهش می‌باشد. یکی از نتایج مفید این است که فشار ضربه (p) که بر اثر برخورد دو جسم الاستیک با سرعت (V_i) ایجاد می‌شود عبارت است از:

$$p = \frac{\rho_1 \rho_2 C_1 C_2}{\rho_1 C_1 + \rho_2 C_2} V_i \quad ۶-۱$$

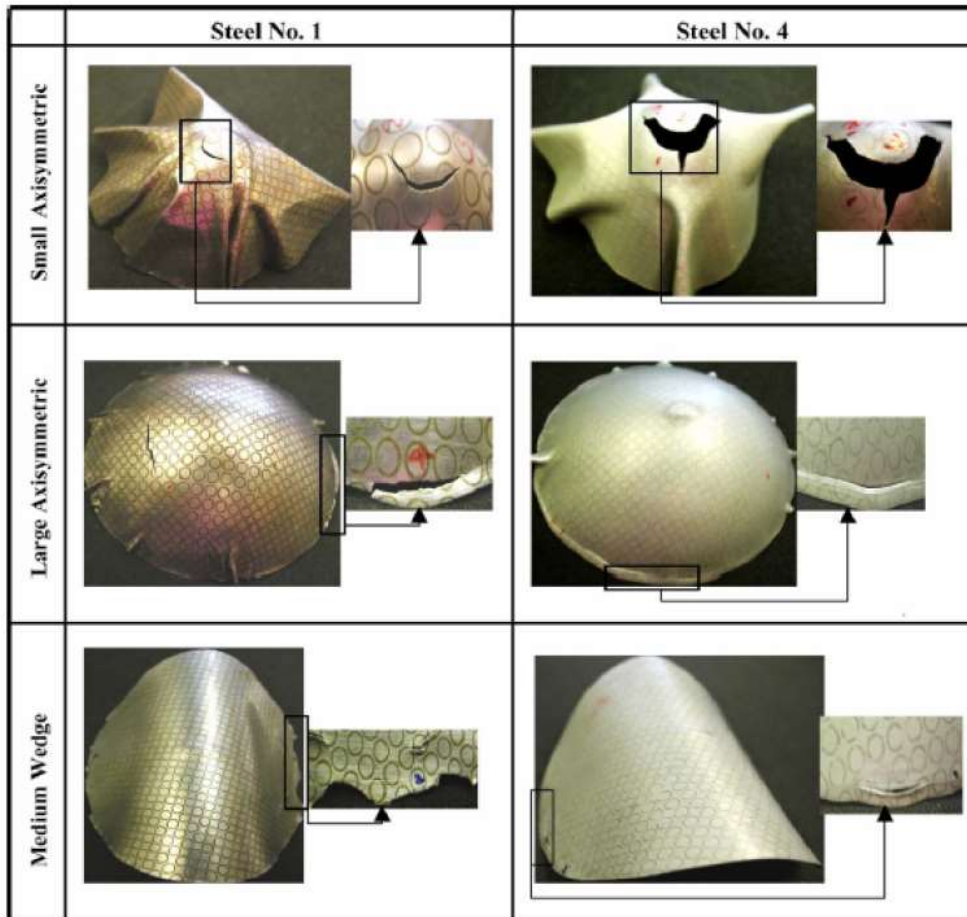
که ρ چگالی ماده و C سرعت موج طولی در ماده می‌باشد. بر طبق رابطه فوق برخورد آلومینیوم-فولاد و فولاد-فولاد در سرعت ۵۰ متر بر ثانیه می‌تواند به ترتیب فشار معادل ۵۰۰ و ۱۴۰۰ مگاپاسکال را ایجاد نماید که فشار بسیار بالایی است [۱۳]. در فرآیند شکل‌دهی انفجاری نیز فشار ایجاد شده حدود ۲۰ گیگاپاسکال می‌باشد [۱۴]. تحقیقات نشان می‌دهد که فشار ایجاد شده در فرآیند شکل‌دهی الکترومغناطیسی در حد تنش تسلیم فلز می‌باشد [۱۵].

در یک فعالیت تجربی، سس^۲ و همکارانش اقدام به بررسی شکل‌پذیری چند ورق فولادی، تحت سرعت‌های شکل‌دهی ضربه‌ای ۵۰ - ۲۲۰ متر بر ثانیه نمودند [۱۴]. ورق‌های انتخاب شده که دارای چقرمگی استاتیکی کاملاً متفاوت بوده، با استفاده از روش کوبش الکترومغناطیسی بر روی قالب‌های سهموی متقارن محوری و گوه‌ای شکل داده شد. در شکل ۱-۳ ورق‌های کوبیده شده بر روی قالب‌های متقارن محوری^۳ کوچک و بزرگ و قالب گوه‌ای متوسط مشخص شده است. نتیجه قابل توجه از این مقاله آن بود که تحت تاثیر فشار بالای ضربه و پدیده اینرسی، فولادهایی که در شرایط تغییرشکل استاتیکی رفتار ترد از خود نشان می‌دهند، در شرایط شکل‌دهی سریع ۲ تا ۵ برابر شکل‌پذیرتر خواهند بود. درحالی که تغییر سرعت شکل‌دهی تاثیر چندانی بر شکل‌پذیری فولادهای نرم ندارد (شکل ۱-۴).

¹ Explosive forming

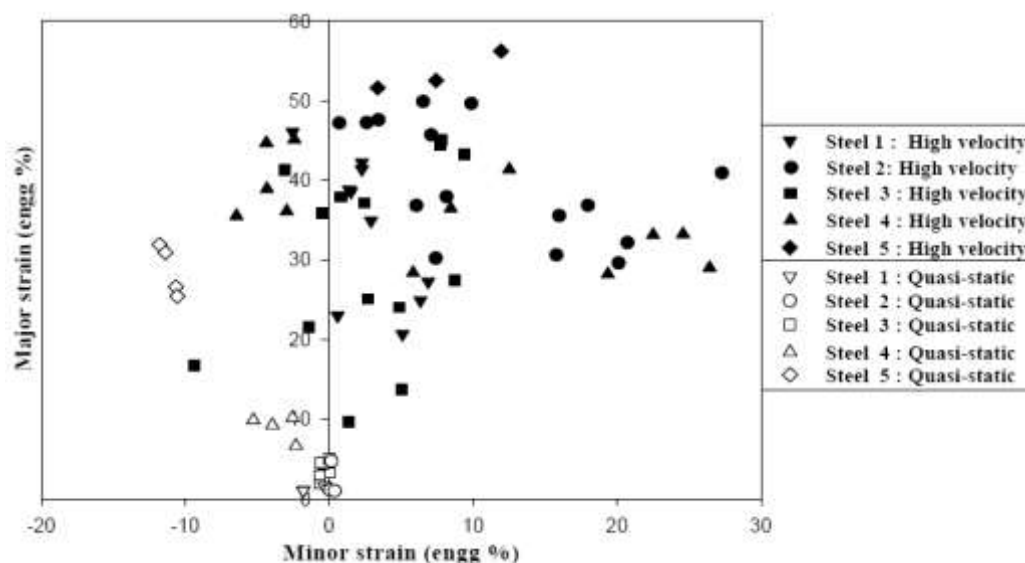
² Seth

³ Axially symmetric



شکل ۱-۳ ورق‌های فولادی شکل‌دهی شده با کوبش الکترومغناطیسی بر روی سنبه‌های متقارن محوری و گوه‌ای

[۱۴]

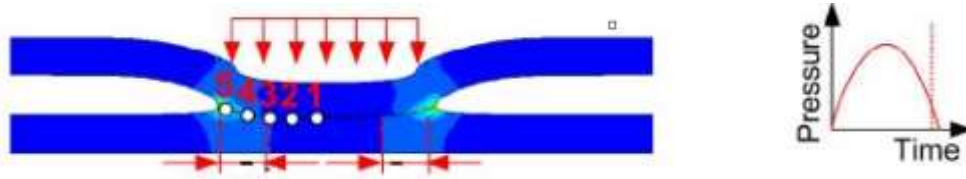


شکل ۴-۱ نمایش کرنش اصلی و فرعی نقاط پارگی، برای پنج فولاد مختلف، بر روی FLD [۱۴]

جدول ۱-۱ حداکثر سرعت و تنش تماسی ناشی از تماس پروب را برای پنج نقطه در منطقه تماس (شکل ۵-۱) برای یک فرآیند شکل‌دهی مغناطیسی نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود تنش نرمال در این فرآیند حدود ۲۷۰۰ تا ۶۵۰۰ مگاپاسکال می‌باشد که صرف‌نظر کردن از آن در تحلیل FLD منجر به خطا می‌شود [۱۶].

جدول ۱-۱ سرعت و تنش تماسی در پنج نقطه تماسی در فرآیند شکل‌دهی الکترومغناطیسی ورق آلومینیوم [۱۶]

نقطه	زمان بعد از برخورد اول [ns]	مولفه سرعت مماسی [m/s]	مولفه سرعت نرمال [m/s]	مولفه تنش مماسی [MPa]	مولفه تنش نرمال [MPa]
۱	۰	۰	۳۹۶	۰	۲۷۰۰
۲	۲۵۰	۱۷۹	۳۹۵	۷۰	۲۸۰۰
۳	۵۵۰	۴۷۱	۴۷۱	۲۶۰	۶۵۰۰
۴	۱۰۰۰	۷۲۳	۵۵۸	۱۹۰	۴۷۰۰
۵	۱۷۵۰	۵۲۰	۲۳۰	۲۵	۴۷۰۰



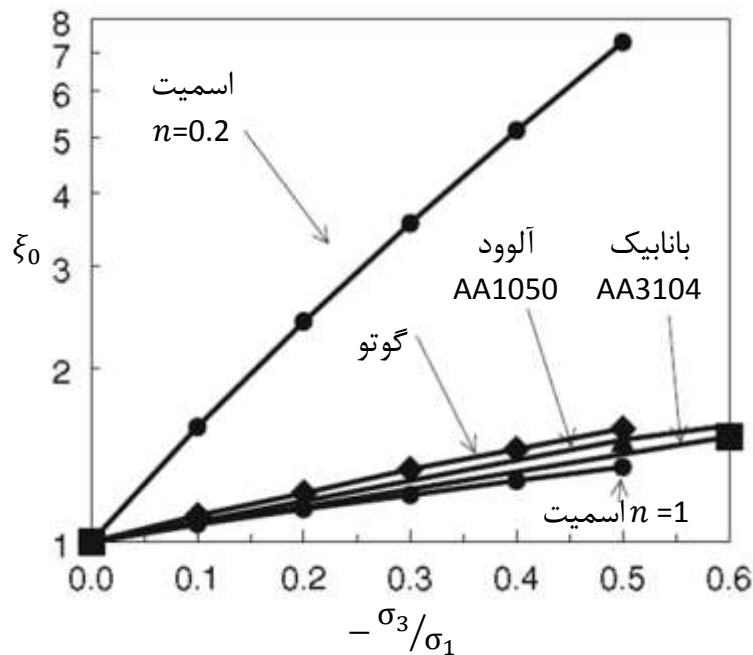
شکل ۱-۵ نقاط تماس پروب روی قطعه برای بررسی سرعت آن‌ها در فرآیند شکل‌دهی الکترومغناطیسی [۱۶]

۶-۱- اثر تنش نرمال بر شکل‌پذیری ورق‌ها

محققان متعددی به بررسی اثر تنش نرمال بر شکل‌پذیری پرداخته‌اند، اگرچه همه تحقیقات صورت پذیرفته به نتایج مشابه نرسیده است. شکل ۶-۱ اثر تنش نرمال بر نسبت بهبود شکل‌پذیری در شرایط کرنش صفحه-ای ($\epsilon_2 = 0$) را نشان می‌دهد. پارامتر بهبود شکل‌پذیری در بارگذاری کرنش صفحه‌ای با اعمال تنش نرمال به صورت رابطه ۷-۱ تعریف می‌شود.

$$\xi_0 = \frac{FLD_0|_{\sigma_{ZZ} \neq 0}}{FLD_0|_{\sigma_{ZZ} = 0}} \quad 7-1$$

که در این رابطه $FLD_0|_{\sigma_{ZZ} \neq 0}$ و $FLD_0|_{\sigma_{ZZ} = 0}$ به ترتیب حد گلوبی در شرایط کرنش صفحه‌ای با و بدون تنش نرمال می‌باشد.



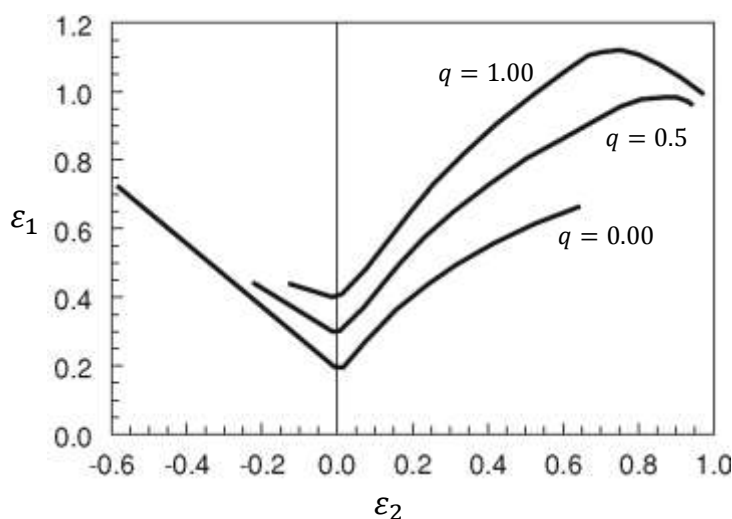
شکل ۶-۱ اثر تنش نرمال بر نسبت افزایش شکل‌پذیری تحت شرایط کرنش صفحه‌ای [۷]

همانطور که در شکل مشاهده می‌شود اکثر مدل‌های ارائه شده برای بررسی اثر تنش نرمال نشان می‌دهد که اعمال تنش نرمال باعث افزایش شکل‌پذیری ورق خواهد شد که می‌توان این افزایش شکل‌پذیری را با رابطه ۸-۱ تقریب زد.

$$\xi_0 \approx 1 - \frac{\sigma_3}{\sigma_1} \quad 8-1$$

این معادله نشان می‌دهد که میزان قابل توجه تنش نرمال برای افزایش قابل توجه شکل‌پذیری ماده مورد نیاز می‌باشد، که دستیابی به آن در شرایط تماس یک‌طرفه دشوار می‌باشد. قابل ذکر می‌باشد که معادله ۸-۱ را می‌توان با استفاده از شرایط مدل کانسیدر با اعمال تعدادی فرضیات مشخص نیز بدست آورد [۷].

آلوود^۱ و شولر^۲، به بررسی FLD تحت اثر تنش‌های غیرصفحه‌ای با در نظر گرفتن شش مولفه ماتریس متقارن تنش با استفاده از روش تحلیلی و همچنین به صورت تجربی پرداختند. همچنین به منظور نشان دادن بهتر اثر تنش نرمال منحنی حد شکل‌دهی عمومی^۳ را ارائه نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که تحت اثر تنش نرمال و تنش برشی در راستای ضخامت حد شکل‌دهی فلزات به میزان قابل توجهی بهبود می‌یابد. نتایج بدست آمده توسط آن‌ها در شکل ۷-۱ نشان داده شده است. مطابق شکل ۷-۱، اثر تنش نرمال در سمت راست FLD قابل توجه‌تر می‌باشد [۷].



شکل ۷-۱ اثر تنش نرمال بر FLD برای آلومینیوم آلیاژی AA1050 ($q = -\sigma_3/\sigma_1$) [۷]

¹ Allwood

² Shouler

³ General Forming Limit Diagram

۷-۱- مروری بر پیشینه پژوهش

برای اولین بار کیلر^۱ (۱۹۶۵) کرنش‌های حدی را در اتساع ورق‌های فلزی بطور تجربی بدست آورد [۱۷].
 [۱۸]. او از شبکه‌بندی دایروی برای اندازه‌گیری کرنش‌ها استفاده کرد و توزیع کرنش‌ها و کرنش‌های حدی را
 برای عملیات اتساع بدست آورد. سپس مارسینیاک و کوزینسکی (۱۹۶۷) یک روش تئوری بر اساس
 پلاستیسیته ناهمسانگرد و با فرض یک ناهمگنی اولیه در ورق به صورت کاهش ضخامت ارائه نمودند [۱۹].
 اساس این روش که به روش M-K معروف گردید در نظر گرفتن یک ناهمگنی در ورق و توسعه آن بر اساس
 مدل گلوبی موضعی بوده است. آن‌ها از معیار تسلیم هیل ۴۸ استفاده کردند و برای ورق خواص ناهمسانگردی
 نرمال و کرنش‌سختی در نظر گرفتند. کرنش‌های حدی از آزمایش کشش ورق داخل یک قالب استوانه‌ای
 برای حالت بارگذاری دومحوره بدست آمده و با نتایج تئوری مقایسه گردید.

نی^۲ (۱۹۸۰) نیز از مدل M-K استفاده کرده و با در نظر گرفتن ناهمسانگردی ورق و رفتار کرنش‌سختی و
 نرخ کرنش‌سختی برای ورق، اثر این پارامترها و ضریب ناهمسانگردی نرمال را روی منحنی‌های حد
 شکل‌دهی بررسی کرد. سپس برومهد^۳ (۱۹۸۲) بطور تجربی اثر نرخ کرنش را روی منحنی حد شکل‌دهی
 فولاد AK مورد بررسی قرار داد و نشان داد که نتایج تجربی نیز نشانگر تأثیر این پارامتر روی FLD می‌باشد
 [۲۰]. اوساوا^۴ نیز بطور نظری اثر n و m را روی عملیات کشش تک محوره و اتساع قالب نیم کروی مطرح و
 نتایج را با کار تجربی دیگران مقایسه نمود [۲۱]. او در بررسی خود ماده را همسانگرد فرض کرده و از معیار
 تسلیم هیل ۴۸ استفاده نموده است. در دهه هشتاد تحقیقات زیادی روی تعیین شکل‌پذیری ورق‌های مختلف
 مورد استفاده در صنعت انجام گردیده است. در کلیه این تحقیقات از روش M-K برای تعیین تئوری و از
 روش هکر^۵ برای تعیین تجربی منحنی‌های حد شکل‌دهی استفاده گردیده است. همچنین تحقیقاتی نیز در
 زمینه تأثیر خواص میکروسکوپی ورق روی منحنی‌های حد شکل‌دهی صورت گرفته، که از آن جمله می‌توان

¹ Keeler

² Ney

³ Bromhead

⁴ Osawa

⁵ Hacker

به کار لین^۱ در بررسی اثر ساختار ورق روی این منحنی‌ها اشاره نمود.

دومیاتی^۲ اثر درجه حرارت را روی شکل‌پذیری فلز Ti6Al4v بطور تجربی بررسی و نتیجه‌گیری نمود که با افزایش درجه حرارت از ۲۷ تا ۵۴ درجه سانتیگراد، کرنش‌های حدی به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابند. او نتیجه گرفت که ضریب ناهمگنی ورق را می‌توان به صافی سطح نسبت داد. وی به طور تجربی رابطه‌ای برای تغییرات صافی سطح ورق‌های تیتانیوم در حین شکل‌دهی بر حسب اندازه دانه ارائه نمود. او همچنین اثر درجه حرارت آنیل کردن را روی توان کرنش‌سختی و ضریب ناهمسانگردی مورد بررسی قرار داد.

کورودا^۳ و تورگارد^۴ تاثیر چندین معیار تسلیم اورتوتروپیک^۵ را در مدل M-K بررسی کردند و نشان دادند تغییر جهت ندادن محورهای اورتوتروپیک درون و بیرون باند گلویی می‌تواند منجر به اختلاف زیادی در تخمین منحنی‌های حد شکل‌دهی شود [۲۲].

بوتوک^۶ و همکارانش [۲۳] برنامه‌ای انعطاف‌پذیر برای گلویی شدن روش M-K ارائه دادند. این برنامه روش حلی بر پایه روش عددی نیوتن-رافسون دارد که از آن برای بدست آوردن متغیرهای موجود در روش M-K استفاده شده است. آن‌ها در روش نیوتن، فقط پارامترهای نمو کرنش موثر ناحیه نقص و تنش در جهت شیار را متغیرهای نامعلوم این روش قرار دادند. این دو پارامتر، جزئی از پارامترهای نامعلوم ناحیه شیاردار هستند. اگر بقیه پارامترها در روش نیوتن به‌عنوان متغیر وارد نگردد، باعث ایجاد خطا می‌شود.

بانابیک^۷ و همکارانش دیدگاه‌های مختلف را برای بدست آوردن منحنی‌های حد شکل‌دهی بررسی کردند [۲۴]. هورا^۸ و همکارانش، گلویی پخشی سويفت و گلویی موضعی هیل و دیدگاهی که بر پایه المان محدود می‌باشد را ارائه دادند. آن‌ها در مطالعات خود از معیار تسلیم BBC2003 استفاده کردند. آن‌ها نشان دادند که نتایج مدل مارسینیاک-کوزینسکی و دیدگاه بر پایه المان محدود خیلی نزدیک به هم هستند و نسبت به

¹ Lin

² Domiati

³ Kuroda

⁴ Tvergaard

⁵ Orthotropic

⁶ Butuc

⁷ Banabic

⁸ Hora

بقیه تطابق بهتری با نتایج تجربی دارند با همه این توصیفات، منحنی‌های حاصله آن‌ها تخمین بالایی از کرنش‌های حدی را ارائه داده است که حتی از نقاط گلوپی که به صورت تجربی بدست آمده‌اند، نیز بالاتر است. مدل M-K که بهترین نتیجه را داده است، مقدار FLD را حدوداً ۱۰ درصد بیشتر از داده‌های تجربی تخمین زده است.

داریانی و عضدی [۲۵] به بررسی مقدار بهینه توان هیل در رفتار نمودارهای حد شکل‌دهی پرداختند. در این پژوهش به بررسی معیارهای تسلیم هیل ۷۹ برای مواد مختلف پرداخته شده است. آن‌ها مقادیر مختلف توان هیل را برای قسمت راست و قسمت چپ منحنی‌های حد شکل‌دهی را با استفاده از نتایج تجربی و تحلیلی بدست آوردند. آن‌ها در این پژوهش نشان دادند که مقدار توان هیل تاثیر قابل توجهی در پیش‌بینی رفتار نمودارهای حد شکل‌دهی دارد.

گنجیانی و عاصم پور [۲۶] یک روش برای پیش‌بینی منحنی‌های حد شکل‌دهی ارائه نمودند. این روش بر پایه‌ی مدل M-K می‌باشد. برای پیدا کردن مجموعه مجهولات این مدل روش نیوتن-رافسون استفاده شده است. آن‌ها اثرات دو تابع تسلیم معروف هاسفورد^۱ و BBC2000 و همچنین دو رابطه سخت‌کاری معروف سویفت و وسی را بررسی نمودند.

عاصم پور و همکاران [۲۷] به بررسی نمودارهای حد شکل‌دهی با وجود تنش نرمال با استفاده از معیار تسلیم سه بعدی و مدل M-K اصلاح‌شده پرداختند. نتایج آن‌ها مطابقت خوبی با نتایج تجربی موجود نشان داد. نتایج بدست آمده نشان داد که اعمال تنش فشاری به ورق فلزی باعث انحراف نمودارهای حد شکل‌دهی به بالا می‌شود و میزان اثر پارامترهای موثر تنش نرمال قابل توجه بوده و قابل چشم‌پوشی نمی‌باشند.

صالحی و عضدی [۲۸، ۲۹] نیز به بررسی اثر توابع تسلیم مختلف بر کرنش‌های حدی در ورق‌های فلزی پرداخته‌اند. آن‌ها به بررسی اثر توابع تسلیم مختلف نظیر هیل ۷۹، بارلات، لاین و BBC2000، با استفاده از مدل دوبعدی M-K، بر روی منحنی حد شکل‌دهی پرداختند. نتایج حاصله نشان داد که افزایش خاصیت کرنش‌سختی و حساسیت به نرخ کرنش باعث افزایش مقدار کرنش‌های حدی می‌شود. افزایش مقدار ضریب

¹ Hosford

ناهمسانگردی نرمال ورق باعث کاهش کرنش‌های حدى در سمت راست منحنى مى‌شود. همچنين اندازه دانه-هاى ريزتر و صافى سطح بيشتر باعث بهبود شكل پذيرى ورق مى‌گردد.

بانابيك و سوار^۱ در سال ۲۰۰۸ مدلى به منظور بررسى اثر تنش نرمال بر شكل پذيرى آلومينيوم آلياژى AA3104-H19 كه ماده‌اى ارتوتروپيك است، ارائه دادند [۳۰]. آن‌ها از آناليز M-K در پژوهش خود به منظور پيش‌بينى منحنى‌هاى حد شكل‌دهى با اعمال تنش نرمال تا بازه ۲۰۰ مگاپاسكال استفاده كردند. نتايج آن‌ها نشان داد كه تحت اثر تنش نرمال اعمالى به صورت قابل توجهى (مخصوصاً در سمت راست) منحنى‌هاى حد شكل‌دهى بهبود مى‌يابد. آن‌ها به منظور راستى‌آزمايى و كالبره ساختن مدل ارائه شده از داده‌هاى تجربى استفاده نمودند.

وو^۲ و همكارانش اثر تنش نرمال را بر حد شكل‌دهى فلزات به روش تحليلى و عددى مورد بررسى قرار دادند [۳۱]. ابتدا به بررسى فلز سخت‌شده تحت تنش نرمال با تئورى وابسته به نرخ پلاستيكيته كلاسيك براى مواد همسانگرد پرداختند، مطابق با معيار كانسيدر آن‌ها نشان دادند كه تنش اعمالى مى‌تواند باعث افزايش کرنش كلّى شود.

آلوود و شولر در سال ۲۰۰۹، به بررسى منحنى‌هاى حد شكل‌دهى تحت اثر تنش‌هاى غيرصفحه‌اى با در نظر گرفتن تمام شش مولفه ماتريس متقارن تنش با استفاده از روش تحليلى و همچنين به صورت تجربى پرداختند [۳]. به اين منظور آن‌ها به اصلاح مدل M-K پرداختند. همچنين به منظور نشان دادن بهتر اثر تنش نرمال از منحنى عمومى حد شكل‌دهى استفاده نمودند. نتايج آن‌ها نشان داد كه تحت اثر تنش نرمال و اعمال تنش برشى در راستاى ضخامت حد شكل‌دهى فلزات مربوطه به ميزان قابل توجهى بهبود مى‌يابد. آن‌ها با اعمال نيروى كشى تك‌محوره به يك نمونه افزايش حد شكل‌دهى را در نمونه در حضور تنش نرمال اعمالى مشاهده نمودند. نتايج بدست آمده نشان داد كه اعمال تنش نرمال بر روى نمونه مى‌تواند باعث افزايش کرنش شكست تا ۳۰۰٪ شود.

¹ Soare

² Wu

ایکنس^۱ و همکارانش اثر تنش برشی در راستای ضخامت را بر منحنی حد شکل‌دهی فلزات با استفاده از مدل M-K اصلاح‌شده مورد بررسی قرار دادند [۳۲]. به این منظور آنها نمودارهای حد شکل‌دهی یک ماده پلاستیک خالص را با استفاده از معیار تسلیم ون-میسز، برای مسیرهای تغییرشکل مونوتونیک^۲ که شامل تنش برشی در راستای ضخامت می‌باشد، مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که در حضور تنش برشی در راستای ضخامت برای تمام حالت‌های درون‌صفحه‌ای، به جز کشش دومحوره، شکل‌پذیری بهبود می‌یابد. مکانیزمی که باعث بهبود شکل‌پذیری می‌شود، تغییر حالت تنش در شیار می‌باشد، که باعث به تاخیر افتادن شروع گلویی موضعی در نمونه فلزی می‌شود.

نورچشمه^۳ و گرین^۴ در سال ۲۰۱۲ به بررسی اثر تنش فشاری خارج از صفحه بر روی منحنی حد شکل‌دهی ورق‌های فلزی پرداختند. آن‌ها با تعمیم آنالیز کلاسیک مدل M-K و با در نظر گرفتن تنش اصلی در راستای ضخامت ورق (σ_3) به بررسی اثر تنش خارج از صفحه بر روی شکل‌پذیری ورق‌های فلزی مختلف پرداختند. در این پژوهش آن‌ها از معیار تسلیم هیل ۴۸ به منظور پیش‌بینی رفتار ورق‌های فلزی استفاده نموده و اثر پارامترهای مختلف ماده مانند ضریب کرنش‌سختی، نرخ کرنش، اندازه دانه و ضخامت اولیه ورق فلزی را مورد بررسی قرار دادند [۳۳]. در ادامه آن‌ها در سال ۲۰۱۴ به بررسی اثر تنش نرمال بر روی شکل‌دهی فلزات تحت بارگذاری غیرخطی با استفاده از روش تحلیل عددی پرداختند. آن‌ها برای این منظور یک مدل عددی بر اساس مدل M-K به منظور پیش‌بینی منحنی حد شکل‌دهی فلزات در حضور مسیر کرنش‌های مختلف، غیرخطی بودن و تنش نرمال پرداختند [۳۴]. مدل ارائه شده توسط آن‌ها قابلیت خوبی در پیش‌بینی منحنی‌های حد شکل‌دهی تحت بارگذاری‌های پیچیده از خود نشان داد. در این پژوهش آن‌ها به بررسی اثر اندازه پیش‌کرنش در بارگذاری دومحوره بر روی حساسیت منحنی‌های حد شکل‌دهی فلزات آلومینیوم AA6011 و فولاد AISI-1012 پرداختند. همچنین به بررسی اثر تنش نرمال بر روی مسیر کرنش در منحنی‌های حد شکل‌دهی پرداختند. اگرچه نتایج بدست آمده برای مدل تحت تنش نرمال در مقایسه با

¹ Eyckens

² Monotonic deformation paths

³ Nurcheshmeh

⁴ Green

نتایج تنش صفحه‌ای دارای خطای بیشتری بود، ولی مدل ارائه شده رفتار نمودارها را نسبتاً خوب پیش‌بینی نمود. در این پژوهش نشان دادند که با افزایش میزان پیش‌کرنش اثر تنش نرمال در منحنی‌های حد شکل-دهی مستقل از مسیر بارگذاری کاهش می‌یابد. همچنین نتایج بدست آمده نشان داد که اعمال تنش نرمال خیلی زیاد نیز نمی‌تواند باعث از بین رفتن وابستگی منحنی‌های حد شکل‌دهی به مسیر کرنش شود.

فاطمی و داریانی در سال ۲۰۱۵ به بررسی منحنی حد شکل‌دهی مواد ناهمسانگرد تحت اثر تنش نرمال و تنش برشی خالص با استفاده از مدل M-K اصلاح شده پرداختند [۳۵]. آن‌ها در مدل ارائه شده اثر تنش کلی را به منظور اعمال تنش‌های برشی و نرمال در نظر گرفتند. آن‌ها با اضافه کردن تعادل نیرویی سه‌بعدی و مطابقت هندسی مدل شیار و سالم، مدل M-K را برای اعمال تنش نرمال در فلزات ناهمسانگرد اصلاح نموده و از روش حل عددی نیوتون-رافسون به منظور محاسبه کرنش‌های حد شکل‌دهی استفاده نمودند. به این منظور آنها از معیار تسلیم کلاسیک هیل ۴۸ به منظور پیاده‌سازی مدل استفاده نمودند. در آخر نشان دادند که با اعمال تنش نرمال، حد شکل‌دهی فلزات به مقدار قابل توجهی بهبود می‌یابد. همچنین آن‌ها نشان دادند که اعمال تنش برشی در راستای ضخامت نیز می‌تواند به میزان قابل توجهی باعث بهبود رفتار حد شکل‌دهی ماده برای تمام مسیرهای کرنش‌دهی شود.

۱-۸- معرفی پایان‌نامه و ضرورت تحقیق

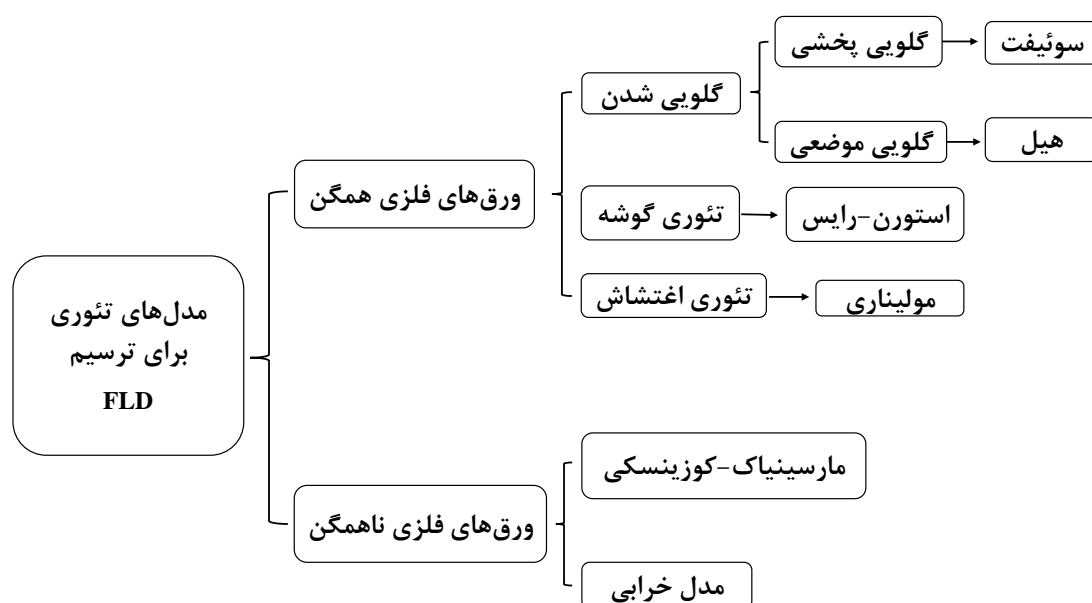
در زمینه پیش‌بینی FLD تاکنون تحقیقات بسیاری انجام گرفته است؛ همچنین تأثیر پارامترهای مختلف روی این منحنی‌ها بررسی شده است. اما نقص پژوهش‌های پیشین، حالت تنشی است که در تحصیل اغلب این نمودارها در نظر گرفته شده است. بدین صورت که در استخراج منحنی‌ها، با صرف‌نظر از تنش نرمال، از برقراری حالت تنش صفحه‌ای بهره گرفته شده است. اگرچه این فرض در بسیاری از فرآیندها همچون کشش عمیق می‌تواند تا حدی صادق باشد، اما در مورد فرآیندهایی نظیر فرآیند هیدروفرمینگ استفاده از این فرض و منحنی‌های بدست آمده بر اساس آن، چندان منطقی به نظر نمی‌رسد زیرا در این فرآیند، تنش نرمال مقدار قابل توجهی را دارا می‌باشد. لذا با توجه به فواید استفاده از FLD، شایسته است که اثر تنش نرمال روی منحنی‌های مذکور، مورد بررسی قرار گیرد. با وجود تحقیقات اندک صورت پذیرفته بر روی اثر تنش

نرمال در رفتار حد شکل‌دهی ورق‌های فلزی، اکثر این پژوهش‌ها با استفاده از معیارهای تسلیم کلاسیک صورت پذیرفته‌اند، که دقت نسبتاً پایینی را به خصوص در تنش‌های خارج از صفحه از خود نشان می‌دهند. در این تحقیق با استفاده از دو معیار تسلیم غیر کلاسیک Yld2003 و BBC2003 که علی‌رغم پیچیدگی ریاضی دقت بیشتری در پیش‌بینی رفتار ناهمسانگردی ورق‌های آلومینیومی دارد؛ در حالت سه‌محوره اثر تنش نرمال بر ناپایداری پلاستیک برای دو ورق ناهمسانگرد فلزی AA6111-T43 و AA5182-O بررسی شد. به این منظور در فصل دوم به معرفی و بررسی اجمالی معیارهای تئوری تعیین کرنش‌های حدی پرداخته خواهد شد و تعدادی از معیارهای کلاسیک و غیر کلاسیک موجود معرفی خواهند شد. در فصل سوم تحلیل عددی ناپایداری ورق بر اساس مدل M-K را بررسی کرده و روند کدنویسی و روابط مورد استفاده برای دو معیار تسلیم غیر کلاسیک Yld2003 و BBC2003 ارائه شده است. در فصل چهارم نتایج حاصل از تحلیل برای دو معیار مذکور و بررسی اثر پارامترهای مختلف بر FLD آورده شده است. در فصل پنجم نتیجه‌گیری و پیشنهادها ارائه شده است.

فصل ۲ مدل‌های تئوری گلویی شدن در ورق‌های ناهمسانگرد فلزی

۲-۱- معیارهای تئوری تعیین کرنش‌های حدی

مدل‌های تئوری مختلفی تا کنون برای محاسبه FLD ارائه شده و در شکل ۲-۱ نشان داده شده‌اند. اولین مدل‌های ارائه شده مبتنی بر روش‌های سوئیفت^۱ و هیل [۳۶] بوده‌اند که ورق‌های فلزی را همگن در نظر گرفته‌اند. مدل سوئیفت بعدها توسط هورا ارتقا داده شد و به نام معیار نیروی بیشینه‌ی اصلاح شده^۲ نامیده شد. مارسینیاک با در نظر گرفتن خصوصیات غیرهمگن ورق فلزی از دیدگاه هندسی و ساختاری، مدل جدیدی ارائه داد. استورن^۳ و رایس^۴ [۳۷]، مدلی بر اساس تئوری دوشاخه‌ای ارائه کردند. دوزینسکی^۵ و مولیناری^۶ از مدل دوشاخه‌ای خطی برای بررسی و تحلیل کرنش موضعی و محاسبه حد کرنشی استفاده کردند [۳۶].



شکل ۲-۱ مدل‌های تئوری برای ترسیم FLD [۳۸]

از آنجایی که مدل‌های تئوری موجود دارای ماهیت بسیار پیچیده‌ای هستند و برای درک درست آن‌ها نیاز به فهم کامل و درست مکانیک محیط‌های پیوسته می‌باشد، در این بخش، تنها به طور خلاصه به معرفی برخی

¹ Swift

² Modified Maximum Force Criterion-MMFC

³ Stören

⁴ Rice

⁵ Dudzinski

⁶ Molinari

از معیارهای مختلفی که برای تعیین کرنش‌های حدی به کار می‌روند پرداخته خواهد شد.

مدل کانسیدر

کانسیدر برای اولین بار مسئله ناپایداری پلاستیک را در کشش تک‌محوره^۱ بررسی نمود. در مواد نرم، دو منطقه در ناحیه کرنش پلاستیک قابل تشخیص می‌باشد. در منطقه اول، اثر کارسختی بر نیروی اعمالی، قوی‌تر از اثر کاهش سطح مقطع است که منطقه‌های کرنش پلاستیک پایدار^۲ نامیده می‌شود و مشخصه‌ی آن افزایش نیروی لازم برای تغییر شکل اضافی نمونه می‌باشد. در منطقه دوم، کارسختی قادر به جبران کاهش نیروی حاصل از کاهش سطح مقطع نمونه نمی‌باشد، که منطقه‌ی کرنش پلاستیک ناپایدار نامیده می‌شود. مشخصه‌ی این ناحیه کاهش نیروی اعمالی ضمن افزایش تنش می‌باشد. آغاز گلوبی متناظر با بیشترین مقدار نیروی اعمالی می‌باشد، که از نقطه نظر ریاضی با صفر شدن دیفرانسیل نیرو بیان می‌شود [۳۹]. باید به این نکته اشاره شود که این معیار، شروع گلوبی پخشی را پیش‌بینی می‌نماید. با نگاهی ساده به معادلات پلاستیسیته شرایط ناپایداری پلاستیک به صورت رابطه ۱-۲ به دست خواهد آمد:

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = 1 + \sigma \quad 1-2$$

با قرار دادن قانون کارسختی در معادله ۱-۲ شرط معادله به صورت ۲-۲ خواهد شد:

$$\varepsilon^* = n \quad 2-2$$

مدل سویفت

سویفت مدل کانسیدر را جهت تعیین کرنش‌های حدی در کشش دومحوره استفاده نمود. وی یک المان ورق بارگذاری شده در دو جهت عمود بر هم را تحلیل کرده و معیار کانسیدر را برای هر جهت اعمال نمود. با فرض استفاد از قانون کارسختی $\bar{\sigma} = k\bar{\varepsilon}^n$ ، کرنش‌های حدی به صورت روابط ۲-۳ و ۲-۴ بدست می‌آید [۳۹]:

¹ Uniaxial Tension

² Stable plastic straining

۳-۲

$$\varepsilon_1^* = \frac{\sigma_1 \left(\frac{\partial \varphi}{\partial \sigma_1}\right)^2 + \sigma_2 \left(\frac{\partial \varphi}{\partial \sigma_1}\right) \left(\frac{\partial \varphi}{\partial \sigma_2}\right)}{\sigma_1 \left(\frac{\partial \varphi}{\partial \sigma_1}\right)^2 + \sigma_2 \left(\frac{\partial \varphi}{\partial \sigma_2}\right)^2} n$$

۴-۲

$$\varepsilon_2^* = \frac{\sigma_2 \left(\frac{\partial \varphi}{\partial \sigma_2}\right)^2 + \sigma_1 \left(\frac{\partial \varphi}{\partial \sigma_1}\right) \left(\frac{\partial \varphi}{\partial \sigma_2}\right)}{\sigma_1 \left(\frac{\partial \varphi}{\partial \sigma_1}\right)^2 + \sigma_2 \left(\frac{\partial \varphi}{\partial \sigma_2}\right)^2} n$$

در روابط فوق، φ تابع تسلیم می‌باشد. با استفاده از توابع تسلیم مختلف، می‌توان کرنش حدی را به صورت تابعی از نسبت تنش، α و یا حتی سایر پارامترهای ماده ارائه کرد. به عنوان مثال، در صورتی که معیار تسلیم هیل ۴۸ به کار گرفته شود، کرنش‌های حدی به صورت روابط ۶-۲ و ۵-۲ و ۶-۲ تعریف می‌شوند [۳۹]:

۵-۲

$$\varepsilon_1^* = \frac{[1 + r(1 - \alpha)] \left(1 - \frac{2r}{1+r} \alpha + \alpha^2\right)}{(1+r)(1+\alpha) \left[1 - \frac{1+4r+2r^2}{(1+r)^2} \alpha + \alpha^2\right]} \times n$$

۶-۲

$$\varepsilon_2^* = \frac{[(1+r)\alpha - r] \left(1 - \frac{2r}{1+r} \alpha + \alpha^2\right)}{(1+r)(1+\alpha) \left[1 - \frac{1+4r+2r^2}{(1+r)^2} \alpha + \alpha^2\right]} \times n$$

عباسی به حل تحلیلی برای محاسبه کرنش ناپایداری پلاستیک از روش گلوبی پخشی سوئیفت و معیار تسلیم هیل ۴۸ و ۷۹ پرداخت و کرنش بحرانی در حالت سه‌بعدی بر اساس مدل سوئیفت و معیار هیل ۴۸ را طبق رابطه ۸-۲ ارائه کرد [۴۰].

۷-۲

$$\varepsilon_1^* = \frac{(1-\gamma)[(r+1)\rho^2 + 2r\rho + r + 1]}{(1+\rho)[(1+r)\rho^2 - \rho + r + 1] + \gamma\rho^2(1-\rho)} \times n$$

در این رابطه ρ و γ به ترتیب نسبت کرنش و تنش خارج صفحه می‌باشد. ($\gamma = \frac{\sigma_3}{\sigma_1}$)

مدل هیل^۱

در کشش تک‌محوره، گلوبی موضعی در راستایی که نسبت به جهت بارگذاری شیب‌دار است، گسترش می‌-

^۱ Hill Model

یابد. هیل فرض نمود که جهت گلوبی منطبق بر جهت بدون تغییر طول^۱ بوده و بنابراین کرنش در ناحیه گلوبی تنها به دلیل نازک شدن ضخامتی ورق می‌باشد وی کرنش‌های حدی را چنین بیان نمود (۲-۸ و ۲-۹). [۳۶]

$$\varepsilon_1^* = \frac{\frac{\partial \varphi}{\partial \sigma_1}}{\frac{\partial \varphi}{\partial \sigma_1} + \frac{\partial \varphi}{\partial \sigma_2}} n$$

۸-۲

$$\varepsilon_2^* = \frac{\frac{\partial \varphi}{\partial \sigma_2}}{\frac{\partial \varphi}{\partial \sigma_1} + \frac{\partial \varphi}{\partial \sigma_2}} n$$

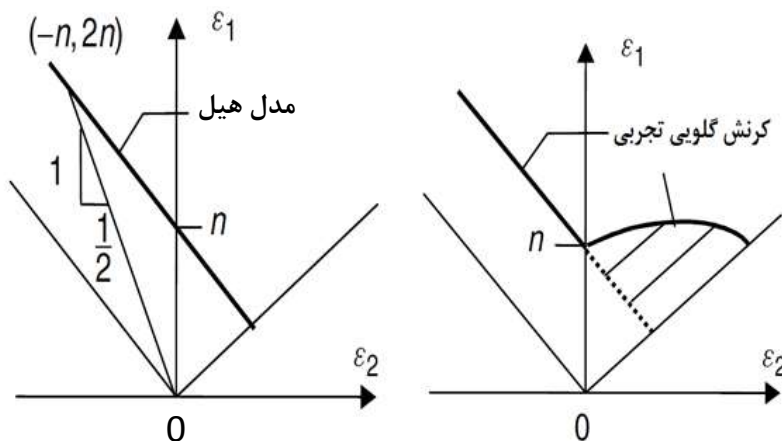
۹-۲

باید به این نکته اشاره شود که مجموع دو کرنش حدی محاسبه شده برابر با توان کار سختی ماده n است.

$$\varepsilon_1^* + \varepsilon_2^* = n$$

۱۰-۲

و بنابراین منحنی محاسبه شده توسط مدل هیل، به تابع تسلیم بستگی ندارد و تنها به مقدار توان کار سختی n وابسته می‌باشد. همانطور که در شکل ۲-۲ مشاهده می‌شود، این مدل سمت چپ FLD را تقریباً مناسب پیش‌بینی می‌نماید، اما در سمت راست با نتایج تجربی متفاوت بوده و قابل قبول نمی‌باشد.

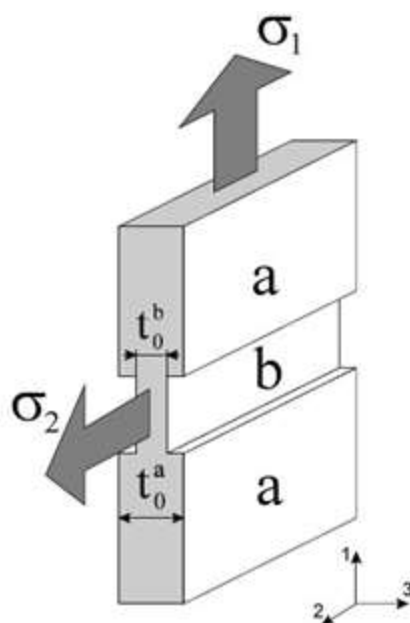


شکل ۲-۲ منحنی حد شکل‌دهی معیار هیل و مقایسه آن با FLD تجربی [۴]

¹ Direction of zero-elongation

مدل مارسینیاک - کوزینسکی (M-K)

مارسینیاک بر اساس تحقیقات آزمایشگاهی که برای مطالعه کرنش موضعی در قطعات تحت بالج و پانچ هیدرولیک صورت داد نشان داد که گلوئی معمولاً با ناهمگنی ماده هم از لحاظ ساختاری و هم از لحاظ هندسی همراه می‌باشد. این ناهمگنی ممکن است به علت تفاوت در ضخامت ورق (ناهمگنی هندسی) و یا ساختار شبکه ماده ورق (ناهمگنی ساختاری) ایجاد شود [۱۹]. تحلیل فرآیند گلوئی با در نظر گرفتن غیرهمگن بودن هندسی در ضخامت ورق صورت پذیرفت. این تغییرات معمولاً به دلیل عیوب موجود در فرآیند تکنولوژیک برای تولید ورق‌های فلزی ایجاد می‌شود. تغییرات ضخامت در طول فرآیند گلوئی معمولاً آرام هستند؛ اگرچه در مطالعات تئوری این تغییرات را ناگهانی فرض می‌کنند تا محاسبات ساده‌تر گردد. مدل تئوری ارائه شده توسط مارسینیاک نمونه را دارای دو ناحیه در نظر می‌گیرد: ناحیه a ، که ضخامت ثابت t_0^a دارد و ناحیه b ، که دارای ضخامت ثابت t_0^b می‌باشد (شکل ۲-۳).



شکل ۲-۳ ورق با هندسه ناهمگن مورد استفاده در مدل M-K [۲۱]

۲-۲- معیارهای تسلیم

انتقال از ناحیه الاستیک به ناحیه پلاستیک در رفتار تنش-کرنش ورق‌های فلزی زمانی اتفاق خواهد افتاد که تنش در ماده معیار تسلیم را ارضا کند. اگرچه برای بارگذاری تک‌محوره می‌توان به راحتی رفتار تنش کرنش

را رسم و معیار مشخصی برای تنش تسلیم ارائه داد، ولی برای بارگذاری چند محوره پیچیدگی محاسبه و تعیین معیار تسلیم افزایش پیدا می‌کند. رابطه تنش تسلیم معمولاً به صورت یک تابع بر حسب مولفه‌های تنش ارائه می‌شود (۱۱-۲):

$$\varphi(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, Y) = 0 \quad 11-2$$

که $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ تنش‌های اصلی و Y تنش تسلیم بدست آمده از تست کشش و یا فشار ساده است. رایج‌ترین معیار تسلیم مورد استفاده برای مواد همسانگرد عبارتند از: معیار تسلیم ترسکا (معیار ماکزیمم تنش برشی)، و معیار تسلیم هوبر-ون میسز^۱ (معیار انرژی کرنشی).

به منظور بررسی ناهمسانگردی در فرآیندهای شکل‌دهی و نقش آن در پدیده گلوبی معیارهای تسلیم مختلفی برای بررسی مواد ناهمسانگرد توسط محققان مختلفی ارائه شده است. رایج‌ترین معیارهای تسلیم ناهمسانگرد را می‌توان معیارهای تسلیم هیل ۴۸ [۲]، معیار تسلیم هاسفورد [۵] و معیارهای تسلیم هیل ۷۹ [۲، ۴۱، ۴۲] دانست. این معیارها برای تعیین قاعده‌ای برای پیش‌بینی اثر ناهمسانگردی بر منحنی حد شکل-دهی مورد بررسی قرار گرفته است. همسانگردی صفحه‌ای فرض شده و میزان تعیین شده r که ضریب ناهمسانگردی تعریف شده و به صورت نسبت کرنش عرضی به کرنش ضخامت تحت شرایط کشش تک‌محوره تعریف می‌شود (۱۲-۲).

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} \quad 12-2$$

این مقدار بسته به جهت آزمون در صفحه ورق تغییر کرده و مقدار متوسط آن به صورت رابطه ۱۳-۲ تعریف می‌شود:

$$\bar{r} = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \quad 13-2$$

در ادامه به بررسی و معرفی معیارهای تسلیم کلاسیک و غیرکلاسیک رایج خواهیم پرداخت. علاوه بر بررسی فرمول‌بندی حاکم در معادلات تنش موثر و سطح تسلیم معیار مورد نظر، به بررسی اجمالی مزایا و محدودیت

¹ Von-mises

هرکدام اشاره شده است.

۱-۲-۲ معیارهای تسلیم کلاسیک

معیار تسلیم هیل ۴۸

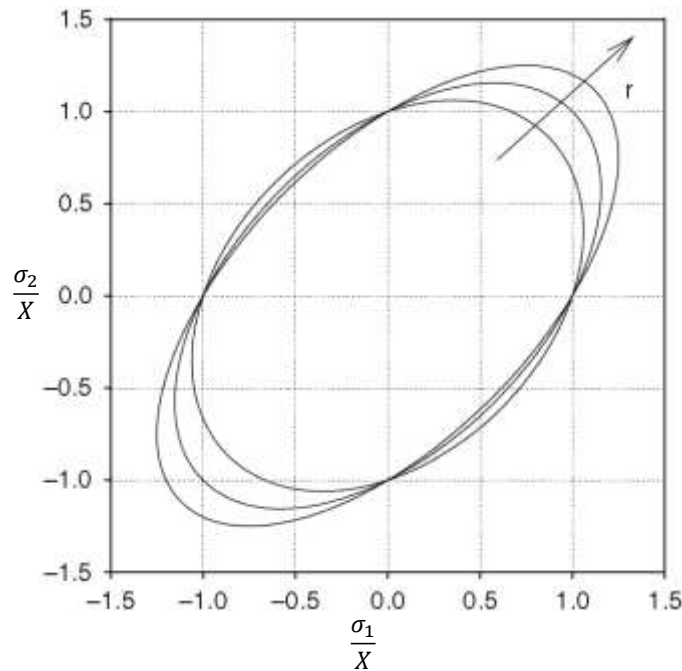
در سال ۱۹۴۸ هیل [۳۶] معیار تسلیمی برای مواد ناهمسانگرد ارائه کرد. در این معیار فرض می‌شود که ماده دارای ناهمسانگردی با سیستم تقارن صفحه‌ای ارتوگونال باشد، که معیار تسلیم مربوطه به صورت تابع درجه دوم ارائه می‌شود (۱۴-۲).

$$2\varphi(\sigma_{ij}) = F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L\sigma_{23}^2 + 2M\sigma_{31}^2 + 2N\sigma_{12}^2 = 1 \quad 14-2$$

که φ تابع تسلیم، F, G, H, L, M, N و ثابت ناهمسانگردی ورق می‌باشد و ۱، ۲ و ۳ محورهای اصلی ناهمسانگردی می‌باشد. ثابت‌های H, G, F را می‌توان با انجام آزمون‌های کشش ساده بدست آورد. در مورد ورق‌های فلزی معمولاً محور ۱ در جهت نورد، محور ۲ در راستای عرضی و محور ۳ در راستای ضخامت می‌باشد. معیار هیل ۴۸ در شرایطی که ورق‌ها دارای رفتار متقارن چرخشی باشد یعنی ضرایب ناهمسانگردی نرمال در جهات مختلف ثابت باشد به صورت ۱۵-۲ خواهد بود [۳۸].

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + r(\sigma_1 - \sigma_2)^2 = (r + 1)\bar{\sigma}^2 \quad 15-2$$

که در این رابطه σ_1 و σ_2 تنش‌های اصلی و $\bar{\sigma}$ تنش موثر می‌باشد، معیار تسلیم در شکل ۴-۲ برای مقادیر مختلف r به صورت یک بیضی ترسیم شده است. امتداد این بیضی در ربع اول با افزایش مقدار r افزایش یافته که حاکی از افزایش استحکام در کشش دو محوره با افزایش مقدار r می‌باشد.



شکل ۲-۴ سطح تسلیم هیل ۴۸ برای مقادیر مختلف r [۴۰]

معيار تسلیم هیل ۷۹

همانطور که اشاره شد، معیارهای تسلیم درجه دوم به خوبی نمی‌توانند رفتار پلاستیک موادی مانند آلیاژهای آلومینیوم را پیش‌بینی کنند. مطابق با وودتروپ^۱ و پیرس^۲ [۴۳]، این فلزات، اگرچه ضرایب ناهمسانگرد کوچکتر از واحد هم دارند، تسلیم تجربی‌شان خارج از محدوده پیش‌بینی معیار تسلیم فون میسز اتفاق می‌افتد. لذا در چنین شرایط معیارهای تسلیم درجه دوم هیل توانایی پیش‌بینی صحیح رفتار منحنی‌های حد شکل‌دهی را نخواهند داشت [۳۶].

با توجه به مشاهدات تجربی، در سال‌های ۱۹۷۰ محققان متعددی نشان دادند که بررسی رفتار تسلیم با استفاده از معیارهای درجه دوم توانایی باعث بهبود روابط تئوریک می‌شود. در همین راستا مدل هیل ۷۹ نیز ارائه شد، که بر خلاف مدل هیل ۴۸ که امکان استفاده در میله‌ها و ورق‌ها را دارد این معیار تنها در مورد ورق‌های فلزی صادق است. معادله هیل ۱۹۷۹ به صورت عمومی آن به صورت معادله ۲-۱۶ می‌باشد [۳۸]:

$$f|\sigma_2 - \sigma_3|^m + g|\sigma_3 - \sigma_1|^m + h|\sigma_1 - \sigma_2|^m + a|2\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3|^m + b|2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3|^m + c|\sigma_3 - \sigma_1 - \sigma_2|^m = \bar{\sigma}^m \quad (2-16)$$

¹Woodthrope

²Pearce

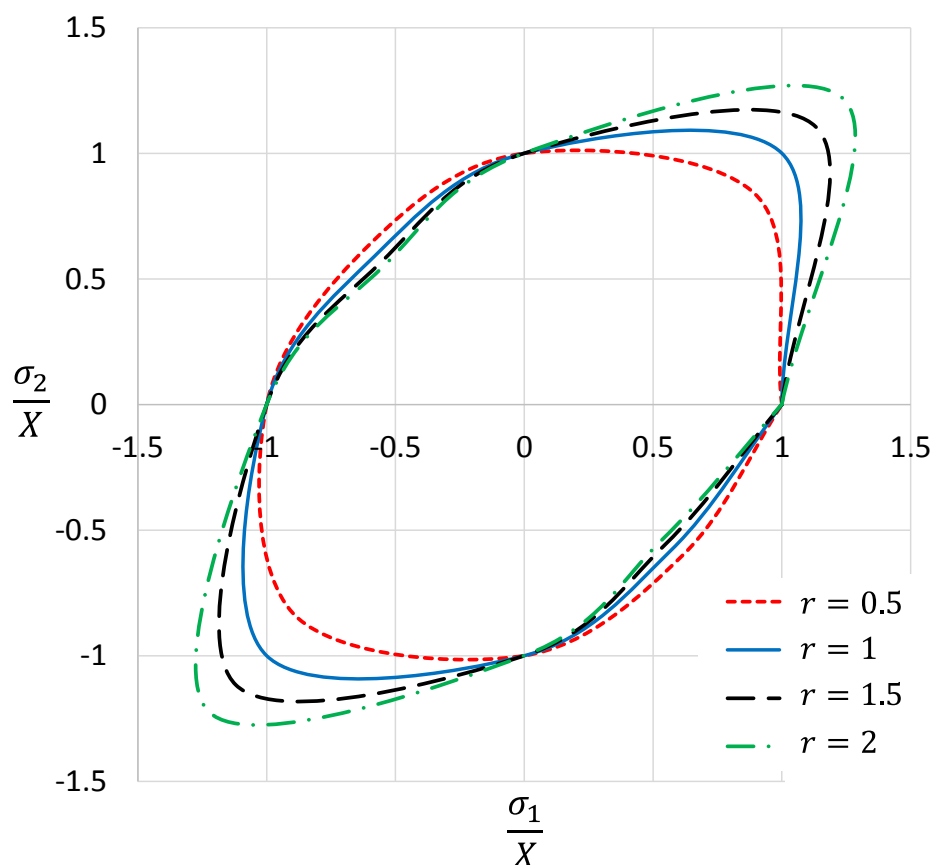
که در آن a, b, c, f, g و h ثوابت ناهمسانگردی هستند که به جنس ماده مربوط است و m توان معیار تسلیم که معمولاً بزرگتر از یک است. برای حالت تنش صفحه‌ای و همسانگرد صفحه‌ای معادله ۱۶-۲ را می‌توان به صورت رابطه ۱۷-۲ بسط داد [۳۸]:

$$|\sigma_1 + \sigma_2|^m + (1 + 2r)|\sigma_1 - \sigma_2|^m = 2(1 + r)\bar{\sigma}^m \quad 17-2$$

این معیار تسلیم در تلاشی برای گسترش محدودیت‌های معیار تسلیم درجه دوم هیل، به خصوص برای موادی با مقدار r کمتر از یک، توسعه پیدا کرده است. بر خلاف دو معیار تسلیم گذشته، توان در معادله ۱۶-۲ ثابت نیست، بلکه تابعی از r بوده و به صورت تجربی توسط رابطه ۱۸-۲ تعیین می‌شود.

$$\left(\frac{\sigma_b}{\sigma_Y}\right)^m = \frac{1+r}{2^{m-1}} \quad 18-2$$

که در این رابطه σ_Y و σ_b به ترتیب تنش تسلیم ماده و تنش تسلیم ماده در حالت کشش دو محوره یکسان است [۳۸]. اگر در معادله ۱۶-۲ توان دوم انتخاب شود، این معیار به معیار هیل ۴۸ تبدیل می‌شود. همانطور که در شکل ۵-۲ دیده می‌شود، با افزایش r در معیار تسلیم هیل ۷۹ سطح تسلیم در موقعیت کشش‌های دو محوره بزرگ‌تر شده، ولی در موقعیت کشش‌های تک محوره مقادیر مشابهی را پیش‌بینی می‌کند و همچنین موقعیت کرنش صفحه‌ای پایین می‌رود. مکان کرنش صفحه‌ای و مقدار تسلیم در کشش دو محوره معادل به کشش تک محوره در هر یک از معیارهای تسلیم را نشان می‌دهد. این ویژگی سطح تسلیم بر پیش‌بینی کرنش‌های حدی با مدل M-K تاثیر زیادی می‌گذارد.



شکل ۲-۵ سطح تسلیم هیل ۱۹۷۹ برای مقادیر مختلف r

مهم‌ترین مزایای استفاده از معیار هیل ۱۹۷۹ را می‌توان، امکان استفاده این معیار برای بررسی رفتار مواد وودتروپ و پیرس، دانست.

۲-۲-۲ معیارهای تسلیم غیرکلاسیک

در طول سال‌های اخیر، رقابت در صنعت خودرو و حمل و نقل هوایی شدیدتر شده است. این امر منجر به توسعه آلیاژهای فولاد جدید (دو فاز، فاز مجتمع، انواع فولادهای مارتنزیتی، فولادهای آلیاژی هات اسپات^۱ - شده) شده است، همچنین استفاده از آلیاژهای آلومینیوم با عملکرد بهتر و سوپرآلیاژهای آلومینیوم-منیزیم و آلیاژهای سوپرپلاستیک توجه صنایع مختلف را به خود جلب کرده است. از سال ۲۰۰۰ به خاطر رفتار ناهمسانگرد این مواد، محققان زیادی به منظور توسعه معیارهای تسلیم مناسب، بر روی این مواد تحقیق کرده‌اند. چندین مدل جدید در طول سال‌های اخیر ارائه شده است. این مدل‌ها امکان ارائه مدل بسیار خوبی

^۱ Hot-spating

از رفتار ناهمسانگردی آلیاژهای فولاد (با ساختار کریستالوگرافی BCC)، انواع آلیاژهای آلومینیوم (با ساختار FCC) و آلیاژهای منیزیم (با ساختار HCP) را فراهم ساخته است. معیارهای تسلیم غیر کلاسیک شامل تعداد زیادی ضرایب (معمولا ۸ ضریب) می‌باشند و از پیچیدگی بیشتری نسبت به معیارهای کلاسیک برخوردارند. بر این اساس این معیارها قادر به ارائه تعریف دقیقی از سطح تسلیم، تغییرات تنش تسلیم تک-محوره و ضریب ناهمسانگردی پلاستیک در جهات مختلف می‌باشد. به‌علاوه، برخی از مدل‌هایی که به تازگی توسعه یافته‌اند می‌توانند پیش‌بینی خوبی از پاسخ غیرممتقارن در فرآیندهای کشش و فشار برای آلیاژهای با ساختار HCP ارائه دهند. با توجه به اثر قابل توجه این معیارهای تسلیم پیشرفته در دقت پیش‌بینی تسلیم، شکل‌پذیری و ناهمسانگردی ورق‌ها، در ادامه به بررسی تعدادی از این معیارها خواهیم پرداخت.

معیار تسلیم بارلات ۲۰۰۰

به منظور حذف معایب معیارهای تسلیم بارلات ۹۴ و بارلات ۹۶ و حفظ انعطاف‌پذیری آن‌ها، بارلات در سال ۲۰۰۰ یک مدل جدید خاص برای حالت تنش صفحه‌ای (دوبعدی) ارائه کرد. اگر یک تبدیل خطی را مطابق رابطه ۱۹-۲ در نظر بگیریم خواهیم داشت:

$$X = C \cdot s$$

۱۹-۲

که s تانسور تنش انحرافی و X تانسور تنش تبدیل‌شده خطی می‌باشند. این معادله ۹ ضریب مستقل برای حالت سه‌بعدی کلی و ۷ ضریب برای حالت تنش صفحه‌ای خواهد داشت. با این حال، با اعمال شرایط تنش صفحه‌ای، تنها یک ضریب تنش باقی می‌ماند (σ_{45} و r_{45}). ضرایب اضافی در رابطه با انتقال خطی را می‌توان با استفاده از دو انتقال مربوط به دو تابع تسلیم همسانگرد مختلف به دست آورد. در نتیجه، بارلات معادله ۲۰-۲ را برای بیان تابع تسلیم ارائه کرد:

$$\Phi = \Phi' + \Phi'' = 2\sigma^a$$

۲۰-۲

که در آن:

$$\emptyset' = |s_1 - s_2|^a \quad 21-2$$

$$\emptyset'' = |2s_2 + s_1|^a + |2s_2 - s_1|^a \quad 22-2$$

که s_1 و s_2 تنش‌های انحرافی اصلی و a یک ضریب است که با توجه به ساختار کریستالوگرافی ماده مشخص می‌شود.

معيار تسليم بانابیک-بالان-کومسا^۱ (BBC)

در سال ۲۰۰۰ اعضای تیم سرتتا^۲ یک برنامه تحقیقاتی با هدف توسعه یک مدل که قادر به توصیف دقیق سطح تسلیم باشد آغاز کردند. فرمول جدید ارائه شده بر اساس معیار هرشی برای مواد همسانگرد توسعه داده شد. با اضافه کردن ضرایب وزنی به آن مدل، آن‌ها موفق شدند یک معیار تسلیم انعطاف‌پذیر ارائه دهند. این معیار شامل هشت ضریب مستقل بوده و در نتیجه روش شناسایی آن با استفاده از هشت ثابت مکانیکی (سه تنش تسلیم تک‌محوره، سه ضریب ناهمسانگردی تک‌محوره، تنش تسلیم دوم‌محوره و ضریب ناهمسانگردی دوم‌محوره) بود. اولین رابطه ریاضی ارائه شده به صورت معادله ۲۳-۲ ارائه شد:

$$\bar{\sigma} = [a(b\Gamma + c\psi)^{2k} + a(b\Gamma - c\psi)^{2k} + (1 - a)(2c\psi)^{2k}]^{1/2k} \quad 23-2$$

که a ، b ، c و k پارامترهای ماده، Γ و ψ به ترتیب توابع کمکی درجه سوم و دوم تانسور تنش تبدیل می‌باشند. که L یک تانسور مرتبه چهار می‌باشد. در این روش ناهمسانگردی با استفاده از تانسور L مشخص شده که شرایط تقارن ($L_{ijkl} = L_{jikl} = L_{jilk} = L_{klij}$)، عدم وابستگی به تقارن ماده و شرط $L_{1k} + L_{2k} + L_{3k} = 0$ ($k = 1, 2, 3$) را مهیا می‌سازد. لذا، در مختصات مرجع متناسب با اورتوتروپیک^۳، تانسور L دارای شش ضریب غیرصفر برای مدل سه‌بعدی و دارای چهار مقدار مستقل برای مدل تنش صفحه‌ای خواهد بود. توابع مستقل Γ و Ψ را نیز به صورت توابع ضرایب تنش می‌توان به صورت رابطه ۲۴-۲ بیان نمود:

¹ Banabic-Balan-Comsa Yield Criteria

² Certeta

³ Orthotropic

$$\Gamma = M\sigma_{11} + N\sigma_{22} \quad 24-2$$

$$\Psi = \sqrt{(P\sigma_{11} + Q\sigma_{22})^2 + R\sigma_{12}^2}$$

که در آن:

$$\begin{aligned} M &= d + e \\ N &= e + f \\ P &= \frac{d-e}{2} \\ Q &= \frac{e-f}{2} \\ R &= g^2 \end{aligned} \quad 25-2$$

شکل سطح تسلیم با خصوصیات ماده از جمله a, b, c, d, e, f, g و k مشخص می‌شود. ثابت k متناسب با ساختار کریستالوگرافی ماده (برای آلیاژهای BCC، برابر سه و برای آلیاژهای FCC، برابر چهار) می‌باشد. بقیه ضرایب با استفاده از خصوصیات تجربی ورق فلزی اورتوتروپیک، که عبارتند از $\sigma_b^{exp}, \sigma_{45}^{exp}, \sigma_{90}^{exp}, \sigma_0^{exp}$ و r_{90}^{exp} و r_{45}^{exp} محاسبه می‌شود.

بانابیک و همکارانش در ادامه مدل اصلاح شده‌ای برای تابع تسلیم با عنوان BBC2003، با هدف در نظر گرفتن خواص مکانیکی دیگر (ضریب ناهمسانگردی دومحوره)، به صورت رابطه ۲-۲۶ ارائه دادند:

$$\sigma = [a(\Gamma + \psi)^{2k} + a(\Gamma - \psi)^{2k} + (1 - a)(2\Lambda)^{2k}]^{\frac{1}{2k}} \quad 26-2$$

که $k \in N \geq 1$ و همچنین $0 \leq a \leq 1$ خصوصیات ماده می‌باشند. Γ ، Ψ و Λ توابع کمکی معیار تسلیم بوده که به مولفه‌های تانسور تنش صفحه‌ای وابسته می‌باشد.

$$\Gamma = \frac{\sigma_{xx} + M\sigma_{yy}}{2}$$

$$\psi = \sqrt{\left(\frac{N\sigma_{xx} - P\sigma_{yy}}{2}\right)^2 + Q^2\sigma_{xy}\sigma_{yx}} \quad 27-2$$

$$\Lambda = \sqrt{\left(\frac{R\sigma_{xx} - S\sigma_{yy}}{2}\right)^2 + T^2\sigma_{xy}\sigma_{yx}}$$

که مقادیر M, N, P, Q, R, S و T نیز پارامترهای مشخصه ماده می‌باشد. مهم‌ترین مزایای مدل BBC ارائه شده توسط بانابیک و همکارانش را می‌توان به صورت زیر برشمرد:

- تابع تسلیم آن‌ها دارای شکل ساده‌ای می‌باشد.
- معیار ارائه شده توانایی ارائه دقیق سطح تسلیم را داشته و همچنین پیش‌بینی خوبی از توزیع صفحه‌ای تنش تسلیم تک‌محوره و ضرایب ناهمسانگردی تک‌محوره را ارائه می‌دهد.
- حجم محاسباتی مورد نیاز برای شبیه‌سازی هندسه‌های پیچیده با وجود دقت مناسب پایین می‌باشد.
- مدل ارائه شده قابلیت ساده‌سازی به مدل‌های کلاسیک مانند هیل ۴۸ و بارلات ۸۹ را دارد.

در جدول ۱-۲ مدل‌های موجود معیار تسلیم BBC و تعداد ضرایب مورد نیاز برای هر معیار نشان داده شده است.

جدول ۱-۲ استراتژی‌های مختلف تعیین ضرایب معیار تسلیم BBC2003 با تعداد ثوابت مختلف [۳۸]

BBC	BBC	BBC	BBC	BBC	BBC	خواص مکانیکی مورد نیاز
2003-2	2003-4	2003-5	2003-6	2003-7	2003-8	
						σ_0
						σ_{45}
						σ_{90}
						σ_b
						r_0
						r_{45}
						r_{90}
						r_b

۲-۳- نکات کلیدی در انتخاب معیار تسلیم

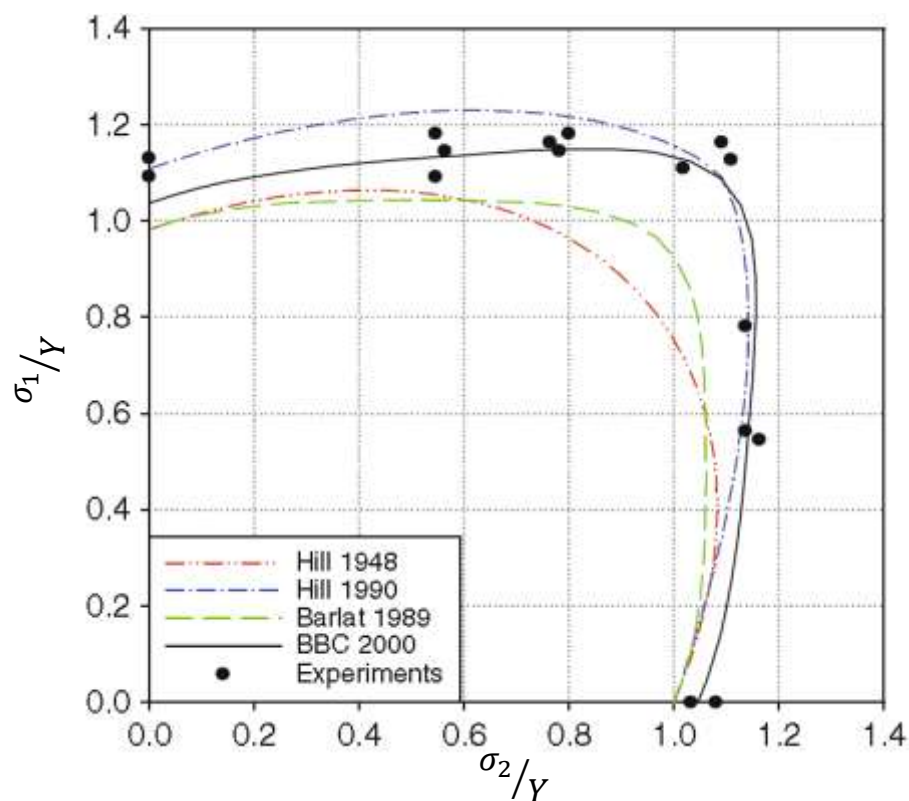
با توجه به کثرت معیارهای تسلیم کلاسیک و غیر کلاسیک این سوال مطرح می‌شود که در یک تحلیل خاص کدام معیار ارجحیت دارد. در انتخاب معیار تسلیم باید مسائل مهمی از قبیل، دقت پیش‌بینی سطح

تسلیم و تنش تسلیم تک‌محوره در جهات مختلف، حجم محاسباتی مورد نیاز با معیار تسلیم، انعطاف‌پذیری تابع تسلیم مورد استفاده، میزان عمومیت معیار، تعداد پارامترهای مکانیکی مورد نیاز در، دشواری آزمون‌های تجربی و هزینه مربوط به آن و مقبولیت معیار مورد نظر در جوامع صنعتی - پژوهشی را در نظر داشت. در ادامه به بررسی تعدادی از مهم‌ترین عوامل دخیل در انتخاب معیار تسلیم پرداخته شده است [۳۸].

۲-۳-۱ مقایسه معیارهای تسلیم کلاسیک و غیرکلاسیک

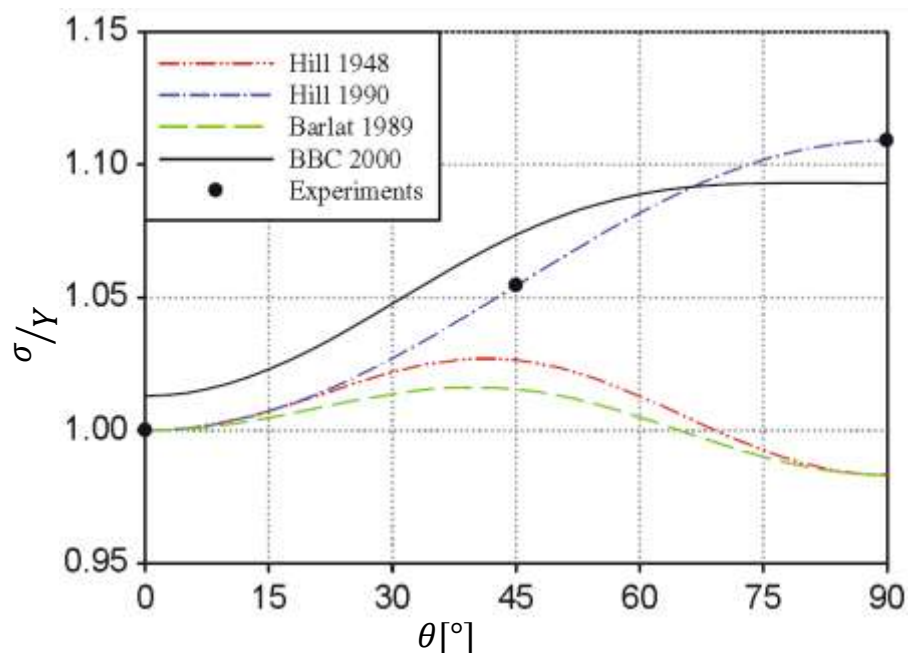
در این بخش به مقایسه معیارهای تسلیم کلاسیک هیل ۴۸، هیل ۹۰ و بارلات ۸۹ با معیار تسلیم غیرکلاسیک BBC2000 در خصوص پیش‌بینی سطح تسلیم و ناهمسانگردی به عنوان نمونه برای ورق AA3103-O ارائه شد و با نتایج تجربی مورد مقایسه قرار گرفته است.

شکل ۲-۶ سطح تسلیم پیش‌بینی شده توسط معیارهای هیل ۴۸، هیل ۹۰، بارلات ۸۹ و BBC2000 را همراه با داده‌های تجربی [۲۴] نشان می‌دهد. قابل توجه می‌باشد که بهترین پیش‌بینی توسط مدل BBC2000 و هیل ۹۰ به خصوص در منطقه تنش دومحوره ارائه شده است، در حالی که مدل‌های هیل ۴۸ و بارلات ۸۹ به هیچ وجه رضایت‌بخش نمی‌باشند.



شکل ۲-۶ سطح تسلیم پیش‌بینی شده با استفاده از معیار تسلیم هیل ۴۸، هیل ۹۰، بارلات ۸۹ و BBC2000 و مقایسه آن با نتایج تجربی برای AA3103-0 [۳۸]

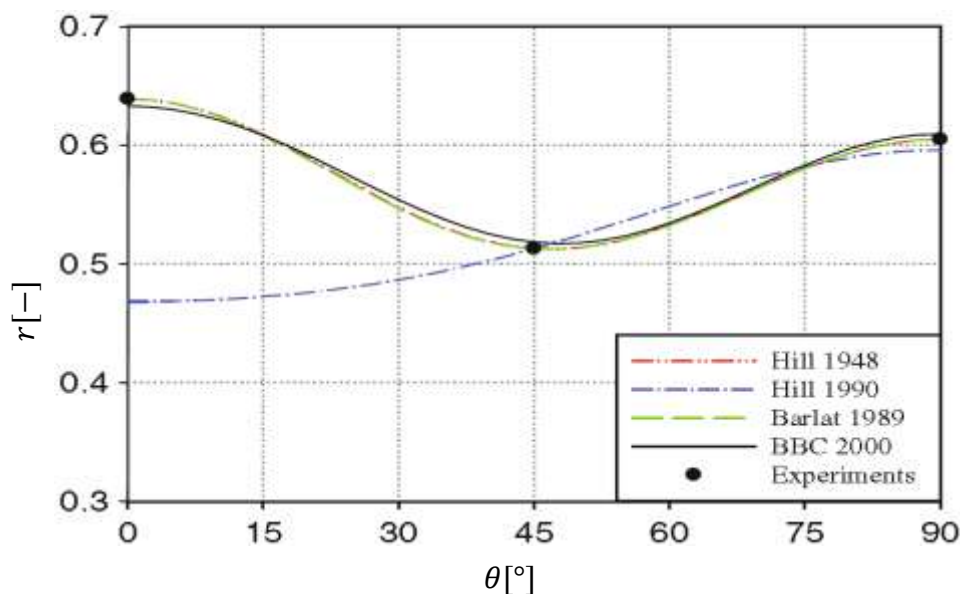
تغییرات تنش تسلیم تک‌محوره در زوایای مختلف نسبت به جهت نورد پیش‌بینی شده توسط مدل‌های مربوطه در شکل ۲-۷ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، معیار BBC2000 و هیل ۹۰ نتایج بهتری را نشان داده و پیش‌بینی معیار هیل ۴۸ و بارلات ۸۹ ضعیف‌تر بوده و با داده‌های تجربی اختلاف بیشتری از خود نشان داده‌اند. این امر ناشی از آن است که در این معیارها تنها تنش تک‌محوره مربوط به جهت نورد در تابع تسلیم استفاده شده است.



شکل ۲-۷ تنش تسلیم تک‌محوره نسبت به زاویه قرارگیری نمونه پیش‌بینی شده با معیارهای تسلیم هیل ۴۸، هیل ۹۰، بارلات ۸۹ و BBC2000 و مقایسه آن با نتایج تجربی ورق آلومینیوم AA3103-O [۳۸]

در شکل ۲-۸ تغییرات ضریب ناهمسانگردی پیش‌بینی شده در جهات مختلف نسبت به راستای نورد بدست آمده که معیارهای BBC2000، هیل ۴۸ و بارلات ۸۹ بهترین نتایج را نشان داده‌اند. از آنجایی که معیار هیل ۹۰ در تابع تسلیم خود تنها ضریب مربوط به جهت مورب استفاده می‌شود، این معیار قادر به پیش‌بینی دقیق نتایج نمی‌باشد.

می‌توان نتیجه گرفت که بهترین کیفیت پیش‌بینی را باید با معیارهای تسلیمی که دارای روش استخراج تابع تسلیم مبتنی بر داده‌های تجربی تنش تک‌محوره و دو‌محوره هستند، بدست آورد. البته با در نظر گرفتن داده‌های تجربی استخراج شده با استفاده از آزمون کشش تک‌محوره، در روش شناسایی معیار تسلیم مناسب باید حداقل تنش تسلیم و ضرایب ناهمسانگردی پلاستیک در سه جهت (۰، ۴۵ و ۹۰ درجه) بدست آورده شود. در چنین شرایطی، به منظور محاسبه معیار تسلیم باید به تناسب حداقل تعداد هفت پارامتر مکانیکی محاسبه گردد.

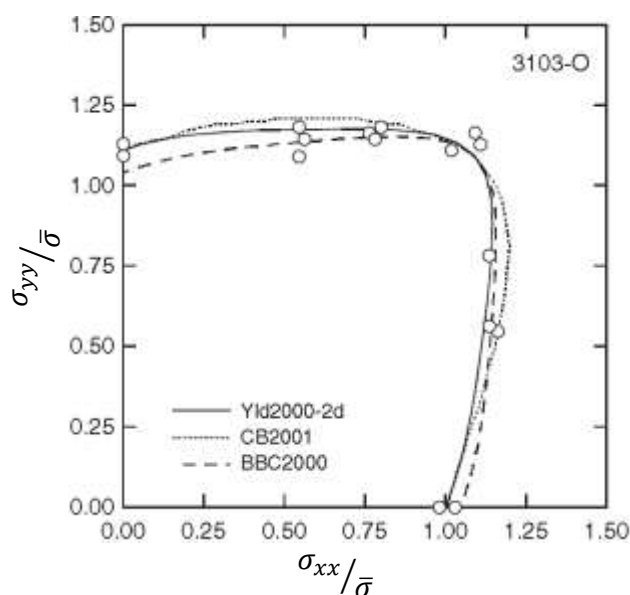


شکل ۲-۸ ضرایب ناهمسانگردی پیش‌بینی شده با استفاده از معیارهای تسلیم هیل ۴۸، هیل ۹۰، بارلات ۸۹ و

BBC2000 و مقایسه آن با نتایج تجربی بدست آمده از آلیاژ آلومینیوم AA3103-O [۳۸]

معیارهای تسلیمی که حداقل هفت پارامتر مکانیکی در روش شناسایی دارند، تقریباً همان رفتار ناهمسانگرد برای مواد معمول را پیش‌بینی می‌کنند. این واقعیت را می‌توان با مقایسه سه مدل که اخیراً توسعه یافته‌اند، یعنی بارلات ۲۰۰۰ (Yld2000-2d)، کازاکو-بارلات^۱ ۲۰۰۱ و معیار تسلیم BBC2000 متوجه شد. نتایج سطح تسلیم ربع اول آلیاژ آلومینیوم AA3103-O در شکل ۲-۹ نشان داده شده است. هر سه مدل قادر به پیش‌بینی بسیار خوب شکل سطح تسلیم این آلیاژ هستند.

¹ Cazacu-Bralat



شکل ۹-۲ سطح تسلیم پیش‌بینی شده برای ورق آلیاژ 3103-0 با معیارهای تسلیم Yld2000-2d، CB 2001 و

[۳۸] BBC2000

معیارهای تسلیمی که از تعداد زیادی پارامترهای مکانیکی در شناسایی استفاده می‌کنند، قادر به ارائه توضیحات بسیار دقیق از رفتار ناهمسانگرد ورق‌های فلزی هستند.

۲-۳-۲ پارامترهای مکانیکی مورد نیاز در معیار تسلیم

جدول ۲-۲ پارامترهای مکانیکی مورد نیاز برای تعیین ثوابت معیار مختلف تسلیم را نشان می‌دهد. مطابق با جدول ۲-۲، می‌توان مقدار قرار داده شده و هزینه‌های مورد نیاز برای شناسایی معیارهای تسلیم مختلف را بررسی کرد. سوال اصلی این است که آیا تنش دو محوره و ضریب ناهمسانگردی تک محوره باید تعیین شوند، از آنجایی که برای بدست آوردن آن‌ها نیاز به دستگاه خاص و آزمون‌های خاص مانند، آزمایش کشش متقاطع، آزمایش برآمدگی هیدرولیک و یا فشردگی دیسک می‌باشد. جدول ۲-۲ تنها به مدل‌های صفحه-ای (تنش دوبعدی) اشاره دارد. علائم استفاده شده در جدول ۲-۲ معانی زیر را دارند: $3D$ نشانگر این واقعیت است که مدل قابلیت تعمیم به تنش‌های سه‌بعدی را دارد؛ $A1$ بیانگر آن است که معیار تسلیم مورد نظر قادر به توصیف، رفتار غیرعادی مرتبه اول می‌باشد [۴۴]؛ $A2$ بیانگر آن است که معیار تسلیم قادر به توصیف، رفتار غیر عادی مرتبه دوم است [۴۵].

جدول ۲-۲ خواص مکانیکی مورد نیاز برای تعیین ثوابت تشخیص معیارهای تسلیم مختلف

$A2$	$A1$	$3D$	r_b	r_{90}	r_{75}	r_{45}	r_{30}	r_0	σ_b	σ_{90}	σ_{75}	σ_{45}	σ_{30}	σ_0	معیار تسلیم
															گروه هیل
			×	×		×		×						×	هیل ۴۸
	×	×						×	×					×	هیل ۷۹
		×				×			×	×		×		×	هیل ۹۰
×	×			×				×	×	×				×	هیل ۹۳
×	×			×		×		×	×	×				×	<i>Lin, Ding 1996</i>
×	×	×		×		×		×	×	×				×	<i>Hu 2005</i>
×	×			×		×		×	×	×				×	<i>Leacock 2006</i>
															گروه هاسفورد
	×	×		×				×						×	هاسفورد ۷۹
	×			×				×						×	بارلات ۸۹
	×	×							×	×		×		×	بارلات ۹۱
×	×	×		×		×		×		×		×		×	<i>Karafillis, Boyce</i>
×	×	×		×		×		×	×	×		×		×	بارلات ۹۷
×	×	×		×		×		×	×	×		×		×	<i>BBC2000</i>
×	×			×		×		×	×	×		×		×	بارلات ۲۰۰۰
×	×	×	×	×		×		×	×	×		×		×	<i>Bron, Beson</i>
×	×	×	×	×		×		×	×	×		×		×	<i>Yld2003</i>
×	×	×	×	×		×		×	×	×		×		×	<i>BBC2003</i>
×	×	×	×	×		×		×	×	×		×		×	بارلات ۲۰۰۴
×	×	×	×	×		×		×	×	×		×		×	<i>BBC2005</i>
															گروه دراگر
×	×	×		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	کازاکو-بارلات ۲۰۰۱
×	×	×		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	کازاکو-بارلات ۲۰۰۳
×	×	×		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	<i>C-P-B 2006</i>
															گروه چندجمله‌ای
×	×	×	×	×		×		×	×	×		×		×	کومسا ۲۰۰۶
×	×	×	×	×		×		×	×	×		×	×	×	سوار ۲۰۰۷

فصل ۳ تحلیل عددی ناپایداری پلاستیک ورق ناهمگن و ناهمسانگرد بر
اساس مدل M-K

در این فصل روابط تحلیلی جهت بدست آوردن نمودار حد کرنش با استفاده از مدل M-K و در نظر گرفتن تنش نرمال توضیح داده می‌شود. جهت حل معیار تسلیم پیشرفته Yld2003 با در نظر گرفتن تنش نرمال انتخاب شده است. خواص ماده‌ی انتخابی برای حل معادلات آلیاژ آلومینیوم AA6111-T43 است.

۳-۱- محاسبات مدل M-K

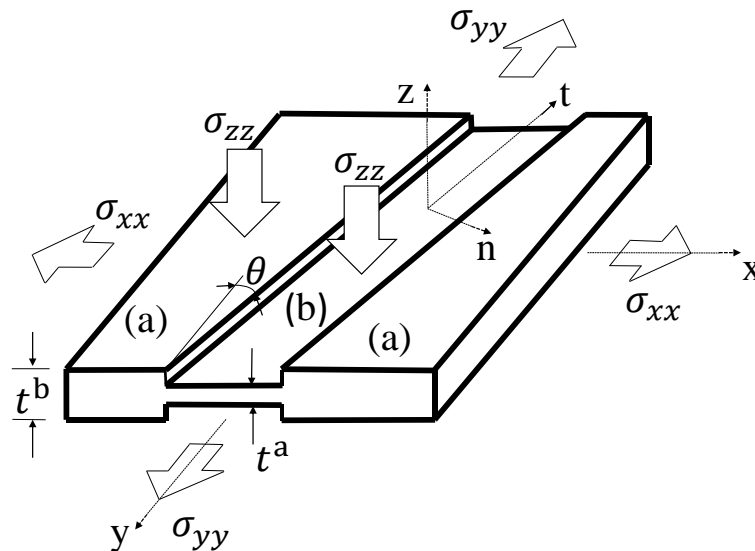
در مدل M-K ناهمگنی ورق به صورت شیاری با زاویه θ نسبت به محور عرضی انتخاب می‌شود (مطابق شکل ۳-۱). ناحیه بیرون ناهمگنی ناحیه a می‌باشد که دارای ضخامت بیشتر نسبت به ناحیه داخل ناهمگنی (ناحیه b) می‌باشد. مطابق با شکل ضریب نقص هندسی صفحه استفاده از معادله ۳-۱ تعریف می‌شود.

$$f_0 = \frac{t_0^b}{t_0^a} \quad ۳-۱$$

که t_0^b ضخامت اولیه ناحیه b و t_0^a ضخامت اولیه ناحیه a می‌باشد. ضریب نقص هندسی در فلزات تابع تغییر شکل پلاستیک ایجاد شده در صفحه می‌باشد و در حین تغییر شکل پلاستیک مطابق با رابطه ۳-۲ تغییر می‌کند:

$$f = \frac{t^b}{t^a} = f_0 \exp(\varepsilon_3^b - \varepsilon_3^a) \quad ۳-۲$$

همانطور که در شکل ۳-۱ نشان داده شده است، محورهای X ، y و Z محورهای اصلی تنش در ناحیه a و محورهای t ، n و Z محورهای اصلی تنش در ناحیه b می‌باشد.



شکل ۳-۱ طرحواره مدل مارسینیاک-کوزینسکی در شرایط سه بعدی [۴۶]

مدل مارسینیاک توسط مارسینیاک و کوزینسکی [۱۹]، ارتقا یافت. این مدل به ناحیه منفی FLD توسط هاجسون^۱ و نیل^۲ بسط داده شد. بر طبق مطالعات این دو محقق، شیب غیرهمگن بودن با کرنش‌های اصلی بر اساس معادله ۳-۳ تغییر می‌کند. در حین فرآیند تغییر شکل، تنش سه محوره بر دو ناحیه فوق اعمال می‌شود و ناحیه a تحت کرنش یکنواخت قرار می‌گیرد، اما به ناحیه b با توجه به ناهمگنی که وجود دارد کرنش بالاتری اعمال می‌شود. این افزایش کرنش تا زمانی که ناحیه b به گلویی موضعی برسد، ادامه پیدا می‌کند. در حین فرآیند تغییر شکل پلاستیک، زاویه θ بین راستای شیار و راستای y مطابق رابطه ۳-۳ تغییر می‌کند [۴۷].

$$\tan(\theta + d\theta) = \frac{1+d\varepsilon_{xx}^a}{1+d\varepsilon_{yy}^a} \tan\theta \quad ۳-۳$$

در این رابطه $d\varepsilon_{xx}$ و $d\varepsilon_{yy}$ به ترتیب نمو کرنش‌های اصلی در راستای x و y می‌باشند. معادله ساختاری در این مطالعه، بر طبق معادله هالومن، مطابق رابطه ۴-۳ می‌باشد.

$$\bar{\sigma} = K\bar{\varepsilon}^n \quad ۴-۳$$

در این رابطه، $\bar{\varepsilon}$ کرنش معادل، K ضریب سختی، $\bar{\sigma}$ تنش سیلان و n توان کرنش‌سختی ماده می‌باشد. در

^۱ Hutchinson
^۲ Neale

ادامه محاسبات تنش و کرنش در ناحیه سالم و نقص توضیح داده شده است و همچنین فلوجارت روش M-K ارائه شده نیز توضیح داده شده است.

۳-۲- تحلیل تنش و کرنش در ناحیه سالم

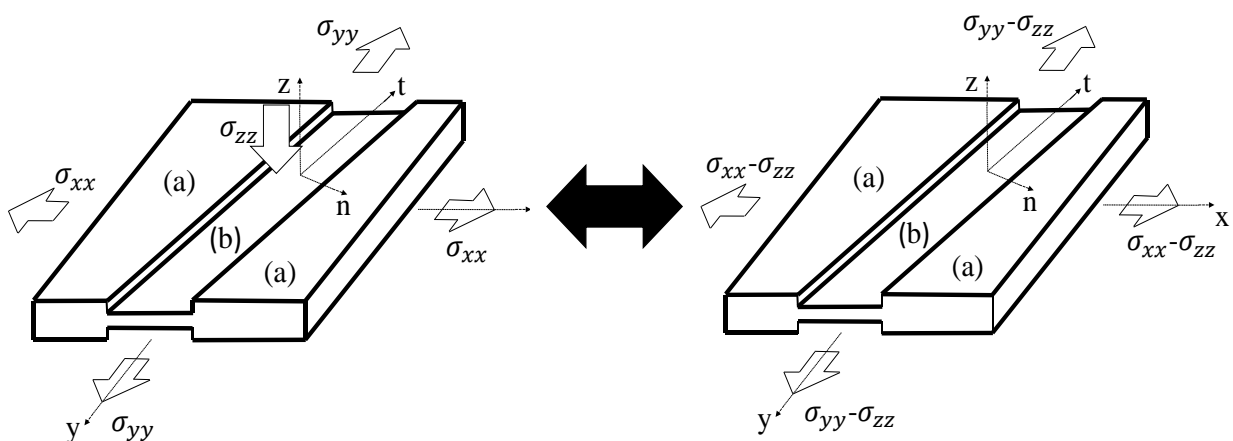
تنش نرمال با مقداری مشخص و ثابت به صورت کسری از تنش تسلیم ماده (σ_Y) مطابق رابطه ۳-۵ در نظر گرفته می شود.

$$s = \frac{|\sigma_{zz}|}{\sigma_Y} \quad ۳-۵$$

نسبت تنش درون صفحه ای α به صورت ۳-۶ تعریف می شود.

$$\alpha = \frac{\sigma_{yy}^a}{\sigma_{xx}^a} \quad ۳-۶$$

در این پژوهش هدف بررسی اثر تنش نرمال با استفاده از این معیار می باشد. با توجه به آنکه وجود تنش نرمال باعث ایجاد تنش سه بعدی می شود و همچنین در نظر گرفتن آنکه تنش هیدرواستاتیک تاثیری بر تغییر شکل پلاستیک ندارد، بنابراین جهت استفاده از معیار تسلیم معادل سازی حالت تنش سه بعدی به تنش صفحه ای مطابق شکل ۳-۲ انجام می شود.



شکل ۳-۲ طرحواره تبدیل حالت تنش سه محوره به حالت تنش صفحه ای [۴۸]

در معیارهای تسلیم Yld2003 و BBC2003 تنش سیلان تابعی از تنش دو محوره و تنش برشی به صورت

رابطه ۷-۳ می‌باشد:

$$\bar{\sigma} = \varphi(\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{xy}) \quad ۷-۳$$

معادل سازی تنش سه بعدی به تنش صفحه‌ای رابطه‌ی ۷-۳ را به صورت رابطه ۸-۳ تغییر می‌دهد:

$$\bar{\sigma} = \varphi(\sigma_{xx} - \sigma_{zz}, \sigma_{yy} - \sigma_{zz}, \sigma_{xy}) \quad ۸-۳$$

در ادامه به چگونگی تغییر معیارهای تسلیم Yld2003 و BBC2003 طبق این قانون پرداخته خواهد شد و روند کلی کد نوشته شده توضیح داده می‌شود.

جهت محاسبه کرنش‌های ناحیه a از قانون جریان استفاده می‌شود که رابطه‌ی آن به صورت ۹-۳ می‌باشد.

$$d\varepsilon_i = d\lambda \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_i}, \quad i = 1, 2 \quad ۹-۳$$

در این رابطه مقدار $d\lambda$ برابر $d\bar{\varepsilon}^a$ می‌باشد. بنابراین کرنش‌های در راستای x و y مطابق روابط ۱۰-۳ و ۱۱-۳ بدست می‌آیند:

$$d\varepsilon_{xx}^a = d\bar{\varepsilon}^a \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial (\sigma_{xx} - \sigma_{zz})} \quad ۱۰-۳$$

$$d\varepsilon_{yy}^a = d\bar{\varepsilon}^a \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})} \quad ۱۱-۳$$

با توجه به شرایط تراکم ناپذیری ماده، مقدار کرنش در راستای ضخامت مطابق رابطه ۱۲-۳ بدست می‌آید:

$$d\varepsilon_{zz}^a = -(d\varepsilon_{xx}^a + d\varepsilon_{yy}^a) \quad ۱۲-۳$$

در نهایت پس از بدست آمدن مولفه‌های کرنش در ناحیه سالم، مقادیر کرنش مطابق رابطه ۱۳-۳ بروز رسانی می‌شوند.

$$\varepsilon_{ii}^a|_{\text{new}} = \varepsilon_{ii}^a|_{\text{old}} + d\varepsilon_{ii}^a \quad ۱۳-۳$$

سپس کرنش نسبی معادل $d\bar{\varepsilon}^a$ اعمال می‌شود. این مقدار کرنش با کرنش قبلی جمع می‌شود و کرنش معادل $\bar{\varepsilon}^a$ بدست می‌آید. با استفاده از رابطه هالومن تنش سیلان یا تنش معادل نیز بدست خواهد آمد. با در

نظر گرفتن α مشخص که مطابق رابطه ۳-۶ تعریف می‌شود و استفاده از معیار تسلیم Yld2003، تنش‌های σ_{yy}^a و σ_{xx}^a بدست خواهد آمد.

پس از بدست آمدن تنش و کرنش در ناحیه سالم، جهت محاسبه تنش و کرنش ناحیه ناهمگن بایستی مقادیر فوق در راستای n ، t و z بدست آورده شوند. با استفاده از ماتریس دوران ۳-۱۴، تنش و کرنش در راستای محورهای اصلی به تنش و کرنش در راستای شیار تبدیل می‌شوند.

$$T = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad ۱۴-۳$$

و مقادیر اجزای تنش و کرنش مطابق روابط ۳-۱۵ و ۳-۱۶ محاسبه می‌شوند.

$$[\sigma^a]_{ntz} = T^T [\sigma^a]_{xyz} T \quad ۱۵-۳$$

$$[d\varepsilon^a]_{ntz} = T^T [d\varepsilon^a]_{xyz} T \quad ۱۶-۳$$

۳-۳- تحلیل تنش و کرنش در ناحیه نقص

رابطه سازگاری اول مربوط به برابر بودن کرنش در راستای عرضی مطابق رابطه ۳-۱۷ می‌باشد.

$$d\varepsilon_{tt}^b = d\varepsilon_{tt}^a \quad ۱۷-۳$$

روابط تعادل نیروها در راستای عمود و مماس بر شیار مطابق روابط ۳-۱۸ و ۳-۱۹ می‌باشد.

$$\sigma_{nn}^a t^a = \sigma_{nn}^b t^b \quad ۱۸-۳$$

$$\sigma_{nt}^a t^a = \sigma_{nt}^b t^b \quad ۱۹-۳$$

در رابطه فوق σ_{nn}^b و σ_{nt}^b به ترتیب برابر تنش عمودی و تنش برشی در راستای شیار در ناحیه b می‌باشد.

معادلات فوق با توجه به ضریب نقص اولیه f_0 به صورت ۳-۲۰ و ۳-۲۱ نیز بدست می‌آیند.

$$\sigma_{nn}^b = \sigma_{nn}^a \left(1/f_0\right) \exp(\varepsilon_3^a - \varepsilon_3^b) \quad ۲۰-۳$$

$$\sigma_{nt}^b = \sigma_{nt}^a \left(1/f_0\right) \exp(\varepsilon_3^a - \varepsilon_3^b) \quad ۲۱-۳$$

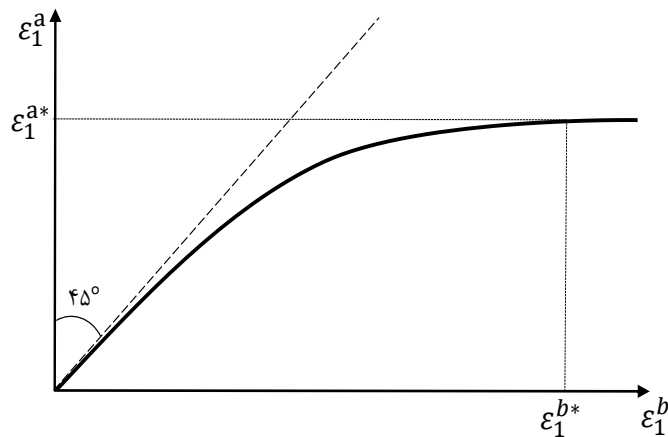
با استفاده از روابط فوق σ_{nn}^b و σ_{nt}^b محاسبه می‌شوند. بنابراین در ناحیه b پارامترهای $d\varepsilon^b$ ، $d\varepsilon_{nt}^b$ ، $d\varepsilon_{tt}^b$ ، $d\varepsilon_{nn}^b$ ، σ_{tt}^b مجهول می‌باشند. مولفه‌های نمو کرنش در ناحیه b با استفاده از قانون جریان قابل محاسبه می‌باشند. در نتیجه مجهول‌های این ناحیه به σ_{tt}^b و $d\varepsilon^b$ کاهش می‌یابند. جهت محاسبه‌ی مجهولات ذکر شده، نیاز به دو معادله می‌باشد. معادله اول براساس معیار تسلیم و قانون کارسختی و معادله دوم براساس قانون جریان و رابطه سازگاری می‌باشد. دو معادله ذکر شده در زیر آمده است (۳-۲۲ و ۳-۲۳).

$$G1(d\varepsilon^b, \sigma_{tt}^b) = \bar{\sigma}^b - \bar{\sigma}_Y^b(\varepsilon^b) = 0 \quad ۲۲-۳$$

$$G2(d\varepsilon^b, \sigma_{tt}^b) = d\varepsilon_{tt}^a - d\varepsilon_{tt}^b = 0 \quad ۲۳-۳$$

جهت حل دو معادله فوق از روش عددی نیوتن-رافسون استفاده شده است. پس از حل دو معادله فوق تمام کرنش‌های نسبی بر اساس قانون جریان محاسبه می‌شود. در روش M-K گلوبی موضعی زمانی اتفاق می‌افتد که نسبت نمو کرنش در ناحیه b به نسبت نمو کرنش در ناحیه a بزرگتر از ۱۰ باشد.

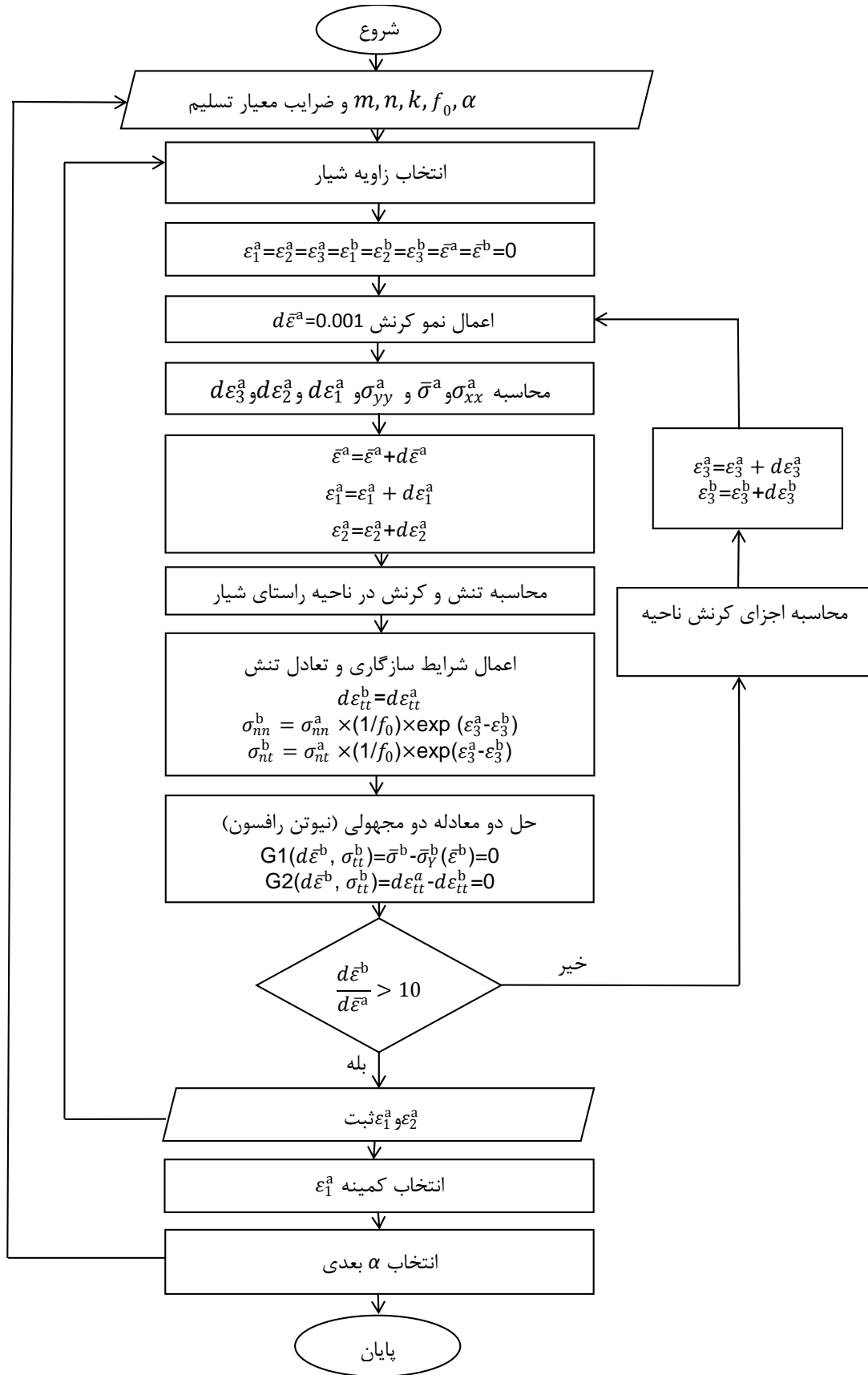
شکل و مکان منحنی ε_1^a بر حسب ε_1^b ، به مقدار ضریب ناهمگنی هندسی f بستگی دارد. اگر $f = 1$ و ورق کاملاً همگن باشد (هندسه همگن ورق)، منحنی با نیمساز اول مطابق خواهد شد در این شرایط توانایی تحلیل گلوبی موضعی را نخواهد داشت (شکل ۳-۳). مقدار کرنش اصلی ε_1^a در ناحیه a و کرنش نه چندان زیاد این ناحیه در مقایسه با کرنش ناحیه b، به صورت حد کرنش ε_1^{a*} در شکل نشان داده شده است. این کرنش به همراه کرنش فرعی ε_2^{b*} نقطه ای را برای منحنی حد شکل‌دهی مشخص می‌کند.



شکل ۳-۳ ارتباط کرنش طولی نواحی سالم و گلویی

بنابراین زمانی که شرایط گلویی موضعی بوجود آید، محاسبات متوقف و کرنش‌های $(\varepsilon_{yy}^a$ و ε_{xx}^a) به عنوان یک نقطه از FLD ثبت می‌شوند. این محاسبات برای زوایای شیار ۰ تا ۹۰ درجه ادامه پیدا می‌کند و در نهایت کرنش‌های کمینه به عنوان کرنش‌های حدی ثبت می‌شود. محاسبات برای نسبت تنش‌های مختلف انجام و با ثبت کرنش‌های گلویی برای هر یک FLD ترسیم می‌شود.

فلوچارت روند حل مساله جهت ترسیم نمودار حد کرنش در شکل ۳-۴ نشان داده شده است. برای شروع تحلیل ابتدا با اعمال نمو کرنش جزئی معادل $d\varepsilon^a = 0.001$ در ناحیه a، تنش‌ها و کرنش‌ها مطابق آنچه قبلاً بیان شد محاسبه می‌شوند. سپس با استفاده از ماتریس دوران، تنش‌ها و کرنش‌ها در جهت شیار محاسبه می‌شوند. پس از اعمال روابط سازگاری و حل معادلات مربوط به ناحیه b مجهولات این ناحیه نیز محاسبه خواهد شد. سپس نسبت نمو کرنش دو ناحیه مقایسه می‌شود و در صورت داشتن شرط لازم برای گلویی موضعی، محاسبات متوقف شده و کرنش‌های ناحیه a به عنوان کرنش‌های حدی ثبت خواهند شد.



شکل ۳-۴ فلوجارت مدل M-K

۳-۴- معیار تسلیم پیشرفته Yld2003

آرتز معیار تسلیم Yld2003 را با در نظر گرفتن هشت ضریب ناهمسانگردی ارائه نمود. این معیار با معیار Yld2000-2D دارای دقت یکسانی است اما مدل ریاضی آن ساده تر است. رابطه‌ی ۳-۲۴ معیار تسلیم Yld2003 را نشان می‌دهد [۴۹]:

$$\bar{\sigma} = \left(\frac{|\sigma'_1|^m + |\sigma'_2|^m + |\sigma''_1 - \sigma''_2|^m}{2} \right)^{1/m} \quad ۲۴-۳$$

در این رابطه:

$$\{\sigma'_1, \sigma'_2\} = \frac{a_8 \sigma_{xx} + a_1 \sigma_{yy}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{a_2 \sigma_{xx} - a_3 \sigma_{yy}}{2} \right)^2 + a_4^2 \sigma_{xy}^2} \quad ۲۵-۳$$

$$\{\sigma''_1, \sigma''_2\} = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{a_5 \sigma_{xx} - a_6 \sigma_{yy}}{2} \right)^2 + a_7^2 \sigma_{xy}^2} \quad ۲۶-۳$$

ضرایب a_1 تا a_8 در روابط فوق ضرایب ناهمسانگردی می‌باشد که با استفاده از داده‌های تجربی مطابق روش زیر بدست می‌آید:

(الف) برای تست کشش تک‌محوره با زاویه ψ نسبت به راستای نورد، مولفه‌های تنش به صورت روابط ۳-۲۷ قابل محاسبه است:

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= \sigma_{\theta} \cos^2 \psi \\ \sigma_{yy} &= \sigma_{\theta} \sin^2 \psi \\ \sigma_{xy} &= \sigma_{\theta} \cos \psi \sin \psi \end{aligned} \quad ۲۷-۳$$

(ب) مقدار ضرایب ناهمسانگردی در راستای 0° و 45° و 90° درجه با توجه به جهت نورد بدست می‌آید. رابطه‌ی ۳-۲۸ ارتباط بین ضریب ناهمسانگردی در راستای ψ نسبت به محور نورد را نشان می‌دهد.

$$r_{\psi} = - \frac{\sin^2 \psi \left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_{xx}} \right) - \frac{1}{2} \sin 2\psi \left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_{xy}} \right) + \cos^2 \psi \left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_{yy}} \right)}{\left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_{xx}} \right) + \left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_{yy}} \right)} \Bigg|_{\sigma_{\psi}} \quad ۲۸-۳$$

(ج) تست کشش دومحوره با تنش‌های برابر در دو راستا با استفاده از تست بالچ یا تست کشش درون صفحه-

ای انجام می‌شود. با در نظر گرفتن مقدار تنش تسلیم دومحوره برابر σ_b ، مولفه‌های تنش مطابق روابط ۲۹-۳ محاسبه می‌شود.

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= \sigma_b \\ \sigma_{yy} &= \sigma_b \\ \sigma_{xy} &= 0\end{aligned}\quad 29-3$$

(د) مقادیر ضریب ناهمسانگردی دو محوره نیز که در کشش دو محوره یکسان محاسبه می‌شود مطابق رابطه ۳۰-۳ می‌باشد:

$$r_b = \left. \frac{\partial \bar{\sigma} / \partial \sigma_{xx}}{\partial \bar{\sigma} / \partial \sigma_{xx}} \right|_{\sigma_b} \quad 30-3$$

مطابق روابط (الف) تا (د) هشت معادله برای بدست آوردن ضرایب a_1 تا a_8 وجود دارد. هشت معادله غیر خطی می‌باشند و برای حل معادلات از روش نیوتن-رافسون استفاده می‌شود. هشت معادله به صورت خلاصه در معادلات ۳۱-۳ آمده است.

$$\begin{aligned}\bar{\sigma}(\sigma_{00}^{exp}, a_1, \dots, a_8) - \sigma_y &= 0 \\ \bar{\sigma}(\sigma_{45}^{exp}, a_1, \dots, a_8) - \sigma_y &= 0 \\ \bar{\sigma}(\sigma_{90}^{exp}, a_1, \dots, a_8) - \sigma_y &= 0 \\ \bar{\sigma}(\sigma_b^{exp}, a_1, \dots, a_8) - \sigma_y &= 0 \\ \bar{\sigma}(\sigma_{00}^{exp}, a_1, \dots, a_8) - r_{00}^{exp} &= 0 \\ \bar{\sigma}(\sigma_{00}^{exp}, a_1, \dots, a_8) - r_{45}^{exp} &= 0 \\ \bar{\sigma}(\sigma_{00}^{exp}, a_1, \dots, a_8) - r_{90}^{exp} &= 0 \\ \bar{\sigma}(\sigma_{00}^{exp}, a_1, \dots, a_8) - r_b^{exp} &= 0\end{aligned}\quad 31-3$$

خواص مکانیکی مورد نیاز برای حل معادلات بر اساس اطلاعات بدست آمده از پژوهش تجربی بانابیک و همکاران [۵۰] می‌باشد. جنس ماده‌ی مورد استفاده ورق آلومینیومی AA6111-T43 می‌باشد. جدول ۱-۳

خواص مکانیکی و جدول ۲-۳ ضرایب ناهمسانگردی ورق مورد استفاده را نشان می‌دهد [۴۶].

جدول ۱-۳ خواص مکانیکی ورق آلومینیوم AA6111-T43 [۵۰]

σ_0 (MPa)	σ_{45} (MPa)	σ_{90} (MPa)	σ_b (MPa)	r_0	r_{45}	r_{90}	r_b	K (MPa)	n
۱۴۰/۱	۱۳۳/۹	۱۳۱/۴	۱۴۰	۰/۸۸۶	۰/۷۰۸	۰/۷۲	۱/۲۲۵	۵۱۲	۰/۲۷۶

جدول ۲-۳ مقادیر ضرایب معیار Yld2003 برای ورق AA6111-T43 [۴۸]

a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8
۱/۰۷۶۵	۱/۱۰۴۶	۱/۱۱۲	۱/۵۱۳۱	۰/۹۸۳۵	۱/۰۳۲۴	۱/۰۰۷۵	۰/۹۲۴۹

بعد از بدست آمدن ضرایب معیار تسلیم مطابق فلوجارت روابط بدست آمده توضیح داده خواهد شد. با دانستن روابط ۲۴-۳ و ۲۶-۳ از معیار تسلیم Yld2003 و همچنین معادل سازی رابطه ۳-۸ تنش تسلیم این معیار مطابق رابطه ۳-۳۲ تغییر خواهد کرد.

$$\bar{\sigma} = \left(\frac{|\sigma'_1|^m + |\sigma'_2|^m + |\sigma''_1 - \sigma''_2|^m}{2} \right)^{1/m} \quad ۳۲-۳$$

که پس از جایگذاری مقادیر $(\sigma_{xx} - \sigma_{zz})$ و $(\sigma_{yy} - \sigma_{zz})$ در معادلات ۳-۲۵ و ۳-۲۶ توابع وابسته‌ی معیار تسلیم مطابق ۳-۳۳ و ۳-۳۴ می‌شوند.

$$\{\sigma'_1, \sigma'_2\} = \frac{a_8(\sigma_{xx} - \sigma_{zz}) + a_1(\sigma_{yy} - \sigma_{zz})}{2} \quad ۳۳-۳$$

$$\pm \sqrt{\left(\frac{a_2(\sigma_{xx} - \sigma_{zz}) - a_3(\sigma_{yy} - \sigma_{zz})}{2} \right)^2 + a_4^2 \sigma_{xy}^2}$$

$$\{\sigma''_1, \sigma''_2\} = \frac{(\sigma_{xx} - \sigma_{zz}) + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})}{2} \quad ۳۴-۳$$

$$\pm \sqrt{\left(\frac{a_5(\sigma_{xx} - \sigma_{zz}) - a_6(\sigma_{yy} - \sigma_{zz})}{2} \right)^2 + a_7^2 \sigma_{xy}^2}$$

برای بدست آوردن مقدار σ_{xx}^a با دانستن رابطه $\bar{\sigma} = K(\bar{\epsilon}^a)^n$ و معادله تسلیم و همچنین چون مقدار α که به عنوان نسبت تنش‌ها معرفی شد به عنوان ورودی برنامه است می‌توان در روابط ۳-۳۳ و ۳-۳۴ به جای

σ_{yy} مقدار σ_{xx} قرار داد. در این صورت با حل یک معادله ساده که از تساوی دو مقدار $\bar{\sigma}$ حاصل می‌شود مقدار σ_{xx} بدست می‌آید. سپس مقادیر σ_{yy} و $\bar{\sigma}$ نیز حساب خواهد شد. تمام مراحل به صورت عددی و از نرم‌افزار متلب^۱ استفاده شده است. مقادیر تنش در ناحیه سالم این چنین بدست آمدند اما برای بدست آوردن مقادیر کرنش باید از قانون جریان استفاده کرد که مطابق روابط ۳-۳۵ و ۳-۳۶ تعریف می‌شوند.

$$d\varepsilon_{xx}^a = d\varepsilon^a \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial (\sigma_{xx} - \sigma_{zz})} \quad ۳۵-۳$$

$$d\varepsilon_{yy}^a = d\varepsilon^a \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})} \quad ۳۶-۳$$

همچنین $d\varepsilon_{zz}^a$ با استفاده از قانون حجم ثابت بدست می‌آید. مقدار ρ نیز که معرف نسبت کرنش‌ها است مطابق رابطه ۳-۳۷ تعریف می‌شود.

$$\rho = \frac{d\varepsilon_{yy}^a}{d\varepsilon_{xx}^a} \quad ۳۷-۳$$

پس از بدست آمدن اجزای کرنش در ناحیه سالم مقادیر کرنش طبق رابطه ۳-۱۳ به روز رسانی خواهد شد. برای بدست آوردن مقادیر تنش و کرنش در ناحیه نقص از ماتریس دوران مطابق رابطه ۳-۱۴ استفاده شد. جهت محاسبات تنش و کرنش در ناحیه نقص ابتدا روابط سازگاری را معرفی می‌کنیم. رابطه سازگاری اول مربوط به برابر بودن تنش در راستای عرضی مطابق رابطه ۳-۱۷ می‌باشد. روابط سازگاری دوم و سوم مربوط به معادلات تعادل نیروها در راستای عمود و مماس بر شیار مطابق ۳-۱۸ و ۳-۱۹ می‌باشد. در این روابط σ_{nt}^b و σ_{nn}^b به ترتیب برابر تنش عمودی و تنش برشی در راستای شیار در ناحیه b می‌باشد. معادلات فوق با توجه به ضریب نقص هندسی به صورت ۳-۲۰ و ۳-۲۱ نیز می‌توانند نوشته شوند. که با حل یک دستگاه دو معادله و دو مجهولی مقادیر σ_{nt}^b و σ_{nn}^b بدست خواهند آمد.

تا به این مرحله مقادیر σ_{tt}^b و $d\varepsilon^b$ و $d\varepsilon_{nt}^b$ و $d\varepsilon_{nn}^b$ بدست نیامده‌اند. با توجه به قانون جریان می‌توان با بدست آوردن $d\varepsilon^b$ دو مقدار کرنش دیگر را بدست آورد پس در حالت کلی دو مجهول خواهیم داشت. برای بدست آوردن این دو مجهول نیاز به دو معادله داریم. رابطه اول بر اساس معیار تسلیم و قانون کارسختی بیان

^۱Matlab

خواهد شد (۳۸-۳).

$$K(\bar{\varepsilon}^b + d\bar{\varepsilon}^b)^n = \left(\frac{|\sigma'_1|^m + |\sigma'_2|^m + |\sigma''_1 - \sigma''_2|^m}{2} \right)^{1/m} \quad ۳۸-۳$$

که در رابطه سمت راست تساوی ۳۸-۳ مقادیر σ'_1 و σ'_2 مطابق ۳۹-۳ و ۴۰-۳ تعریف می‌شوند.

$$\{\sigma'_1, \sigma'_2\} = \frac{a_8(\sigma_{nn} - \sigma_{zz}) + a_1(\sigma_{tt} - \sigma_{zz})}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{a_2(\sigma_{nn} - \sigma_{zz}) - a_3(\sigma_{tt} - \sigma_{zz})}{2} \right)^2 + a_4^2 \sigma_{nt}^2} \quad ۳۹-۳$$

$$\{\sigma''_1, \sigma''_2\} = \frac{(\sigma_{nn} - \sigma_{zz}) + (\sigma_{tt} - \sigma_{zz})}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{a_5(\sigma_{nn} - \sigma_{zz}) - a_6(\sigma_{tt} - \sigma_{zz})}{2} \right)^2 + a_7^2 \sigma_{nt}^2} \quad ۴۰-۳$$

در رابطه ۳۸-۳ در مرحله اول $\bar{\varepsilon}^b$ صفر در نظر گرفته می‌شود. با این حال دو مقدار $d\bar{\varepsilon}^b$ و σ_{tt}^b مجهول هستند. برای معادله دوم نیز از قانون جریان و شرط سازگاری استفاده می‌کنیم.

$$d\varepsilon_{tt}^a = d\varepsilon_{tt}^b = d\bar{\varepsilon}^b \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_{tt}^b} \quad ۴۱-۳$$

با استفاده از روش نیوتن رافسون و حل دومعادله و دو مجهول بالا مقادیر مجهول بدست می‌آید. با بدست

آمدن مقادیر کرنش در ناحیه نقص می‌توان $d\varepsilon_{nn}^b$ و $d\varepsilon_{nt}^b$ را با استفاده از قانون جریان مطابق روابط ۴۲-۳ و ۴۳-۳ نوشت.

$$d\varepsilon_{nn}^b = d\bar{\varepsilon}^b \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_{nn}^b} \quad ۴۲-۳$$

$$d\varepsilon_{nt}^b = d\bar{\varepsilon}^b \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_{nt}^b} \quad ۴۳-۳$$

مقدار نمو کرنش در راستای ضخامت نیز طبق رابطه ۴۴-۳ بدست می‌آید.

$$d\varepsilon_{zz}^b = -(d\varepsilon_{tt}^b + d\varepsilon_{nn}^b) \quad ۴۴-۳$$

مقادیر کرنش در این ناحیه نیز مطابق رابطه ۴۵-۳ بروز رسانی خواهد شد.

$$\varepsilon_{ii_{new}}^b = \varepsilon_{ii_{old}}^b + d\varepsilon_{ii}^b \quad ۴۵-۳$$

کد نوشته تا مرحله‌ای که نسبت جزء کرنش‌ها در ناحیه نقص و سالم بیشتر از ۱۰ شود ادامه پیدا خواهد کرد. پس از این مقدار زاویه شیار تغییر خواهد کرد و با گام ۵ درجه بیشتر خواهد شد و تا ۹۰ درجه ادامه دارد. با اتمام این کار کمترین مقادیری که برای ε_1^a و ε_2^a بدست آمدند ذخیره می‌شود. سپس کد برای مقدار α جدید ادامه پیدا می‌کند. کد نوشته شده برای بازه $0 < \alpha < 1$ است.

۳-۵- معیار تسلیم BBC2003

معیار تسلیم BBC2003، در سال ۲۰۰۳ با هدف ارتقای دقت و صحت شبیه‌سازی‌های عددی شکل‌دهی ورق فلزی ناهمسانگرد طراحی و ارائه گردید. این معیار تسلیم، حالت تنش را صفحه‌ای در نظر گرفته و در آن تنش معادل به صورت رابطه‌ی ۴۶-۳ بیان شده است [۵۱].

$$\bar{\sigma} = [a(\Gamma + \psi)^{2k} + a(\Gamma - \psi)^{2k} + (1 - a)(2\Lambda)^{2k}]^{\frac{1}{2k}} \quad ۴۶-۳$$

در رابطه‌ی فوق، $k \in N \geq 1$ و $0 \leq a \leq 1$ پارامترهای ماده می‌باشد و Λ, Ψ, Γ توابعی از مولفه‌های تانسور تنش می‌باشند که با روابط ۴۷-۳ تا ۴۹-۳ بیان می‌شود.

$$\Psi = \sqrt{\left(\frac{N\sigma_{xx} - P\sigma_{yy}}{2}\right)^2 + Q^2\sigma_{xy}\sigma_{xy}} \quad ۴۷-۳$$

$$\Lambda = \sqrt{\left(\frac{R\sigma_{xx} - S\sigma_{yy}}{2}\right)^2 + T^2\sigma_{xy}\sigma_{xy}} \quad ۴۸-۳$$

$$\Gamma = \frac{\sigma_{xx} + M\sigma_{yy}}{2} \quad ۴۹-۳$$

در روابط فوق a, M, N, P, Q, R, S, T پارامترهای ناهمسانگردی ماده می‌باشد و به جنس ماده بستگی

دارد. پارامتر k وابسته به ساختار کریستالی ماده می‌باشد، برای مواد با ساختار BCC برابر ۳ و برای مواد با ساختار FCC برابر ۴ می‌باشد. خواص مکانیکی مورد نیاز برای حل معادلات بر اساس اطلاعات بدست آمده از پژوهش تجربی بانابیک و همکاران [۵۲] می‌باشد. ماده مورد استفاده آلیاژ آلومینیوم AA5182-O می‌باشد. جدول ۳-۳ خواص مکانیکی و جدول ۴-۳ ضرایب ناهمسانگردی این ورق را نشان می‌دهد.

جدول ۳-۳ خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم AA5182-O [۵۲]

n	$K(\text{MPa})$	r_0	r_{45}	r_{90}	ϵ_0
۰/۳۲۳۲	۵۸۵/۲	۰/۶۴۲	۱/۰۳۹	۰/۸۲۹	۰/۰۰۴۹۲۶

جدول ۴-۳ ثوابت به کار رفته در معیار تسلیم BBC2003 ورق AA5182-O [۵۳]

M	N	P	Q	R	S	T	a	k
۰/۹۳۴۲	۱/۰۰۲۱	۱/۰۲۶۸	۱/۰۳۲۴	۰/۹۹۷۹	۱/۰۴۶۱	۱/۰۷۷۴	۰/۶۵۰۳	۴

روند کدنویسی برای این معیار نیز مشابه معیار Yld2003 است فقط معیار تسلیم مربوطه عوض می‌شود. معیار BBC2003 نیز در حالت کلی تغییری نخواهد کرد اما توابع وابسته‌ی آن مطابق روابط ۵۰-۳ تا ۵۲-۳ تغییر می‌کند.

$$\Psi = \sqrt{\left(\frac{N(\sigma_{xx} - \sigma_{zz}) - P(\sigma_{yy} - \sigma_{zz})}{2}\right)^2 + Q^2 \sigma_{xy} \sigma_{xy}} \quad ۵۰-۳$$

$$\Lambda = \sqrt{\left(\frac{R(\sigma_{xx} - \sigma_{zz}) - S(\sigma_{yy} - \sigma_{zz})}{2}\right)^2 + T^2 \sigma_{xy} \sigma_{xy}} \quad ۵۱-۳$$

$$\Gamma = \frac{(\sigma_{xx} - \sigma_{zz}) + M(\sigma_{yy} - \sigma_{zz})}{2} \quad ۵۲-۳$$

برای این معیار تسلیم نیز همانند معیار قبلی مطابق فلوجارت عمل کرده و نتایج بدست آمده ثبت شده است.

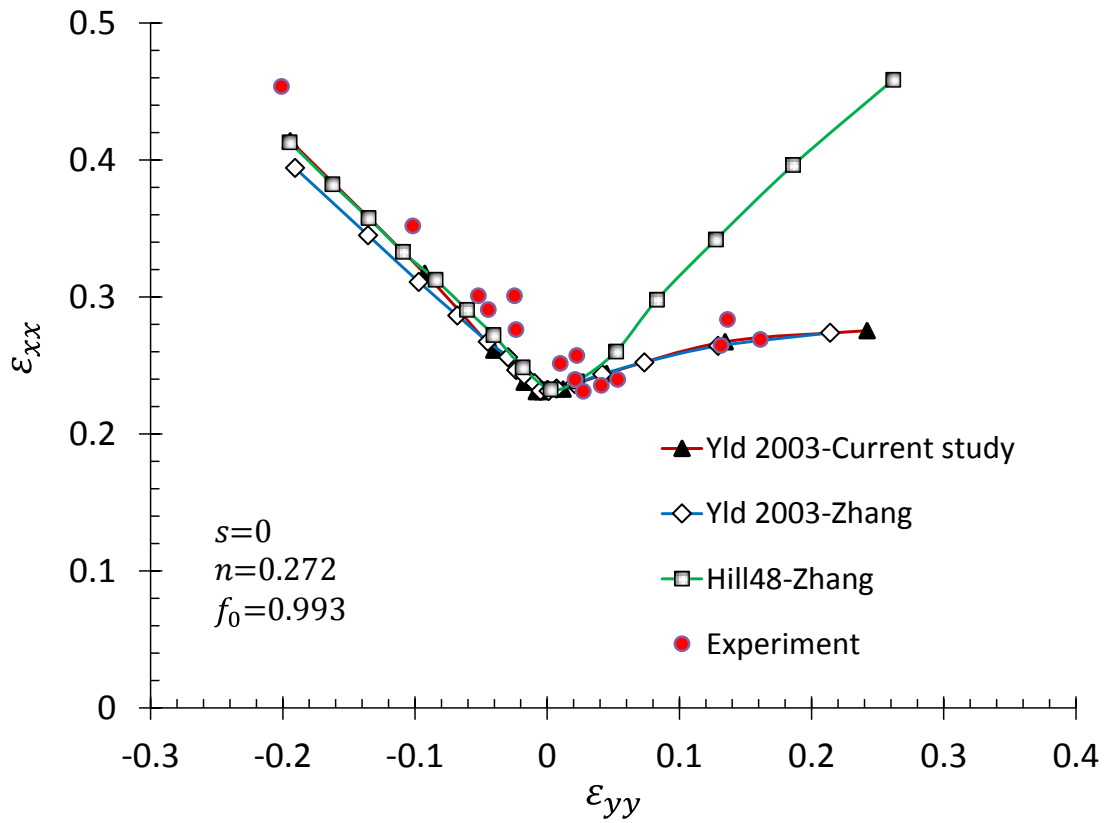
فصل ۴ ارائه نتایج و بحث

در این فصل به ارائه نتایج اثر تنش نرمال و پارامترهای دیگر بر روی منحنی تنش حد شکل‌دهی^۱ (FLSD) و FLD پرداخته می‌شود. ابتدا برای ورق آلومینیوم آلیاژی AA6111-T43 بر اساس معیار تسلیم Yld2003 با مقایسه با نتایج تجربی ضریب نقص مناسب انتخاب و نتایج مورد صحت‌سنجی قرار خواهد گرفت. سپس به منظور بررسی دقت ثوابت معیار تسلیم، تغییرات ضریب ناهمسانگردی r تنش تسلیم بر حسب زاویه آزمون کشش نسبت به راستای نورد ترسیم شده است. اثر زاویه شیار، ضریب نقص، توان کرنش سختی و در نهایت تنش نرمال برای FLD و FLSD و سطح تسلیم مورد توجه قرار می‌گیرد. نتایج مشابه برای ورق آلومینیوم AA5182-O بر اساس معیار تسلیم BBC2003 ارائه خواهد شد.

۴-۱- نتایج منحنی حد شکل‌دهی بر اساس معیار تسلیم Yld2003 برای ورق AA6111-T43

نخست با هدف انتخاب مقدار مطلوب f_0 و صحت‌سنجی کد، نتایج با مقاله ژانگ و همکاران [۴۸] مقایسه شده (شکل ۴-۱). همانطور که قابل مشاهده است در شرایط بارگذاری تنش صفحه‌ای به ازای ضریب نقص اولیه ۰/۹۹۳، FLD حاصل از این مطالعه بر نتایج تجربی منطبق شده است.

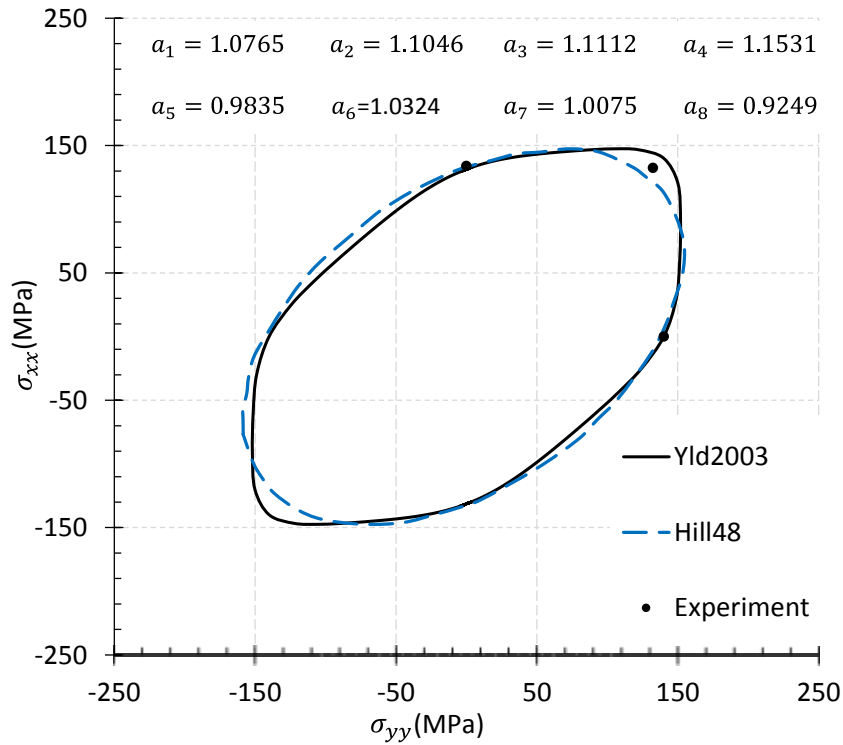
^۱ Forming Limit Stress Diagram



شکل ۱-۴ مقایسه FLD حاصل از این تحقیق با نتایج تجربی و عددی ژانگ [۴۵] برای ورق AA6111-T43

سطح تسلیم برای آلیاژ آلومینیوم AA6111-T43 در شکل ۲-۴ با در نظر گرفتن $\sigma_{zz} = 0$ و با توجه به

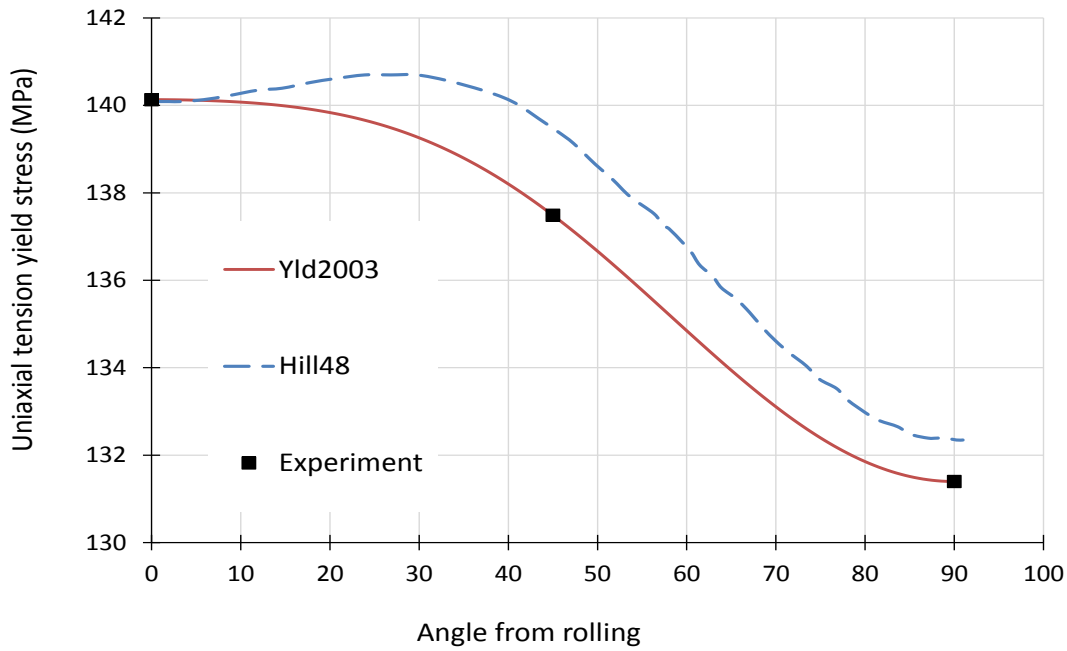
خواص مکانیکی ارائه شده در جدول ۱-۳ و جدول ۲-۳ رسم شده است.



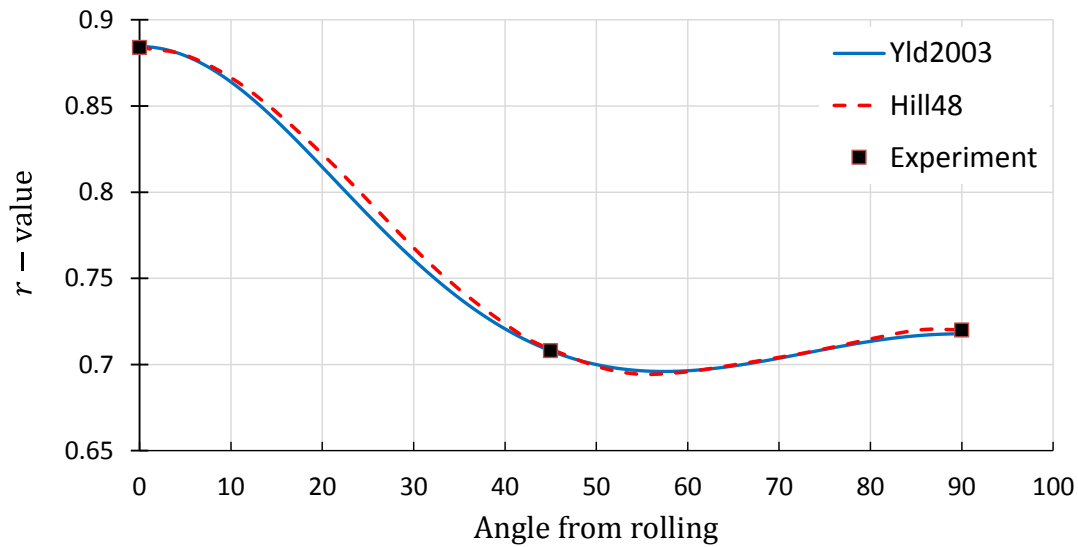
شکل ۴-۲ سطح تسلیم ورق AA6111-T43 بر اساس معیار تسلیم Yld2003 و هیل ۴۸ و مقایسه با نتایج تجربی

[۴۶]

در شکل ۴-۳، با استفاده از رابطه ۳-۲۴، تغییرات تنش تسلیم آزمون کشش تک‌محوره نسبت به جهت نورد، ارائه شده است. نتایج عددی در مقایسه با مقادیر بدست آمده از سه آزمون کشش در زاویه‌های ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه بدست آمده از مرجع [۴۶] ازدقت خوبی برخوردار است. همچنین شکل ۴-۴ تغییرات ضریب ناهمسانگردی نسبت به زاویه کشش را نشان می‌دهد. تغییرات این ضریب بر اساس رابطه ۳-۲۸ محاسبه می‌شود.

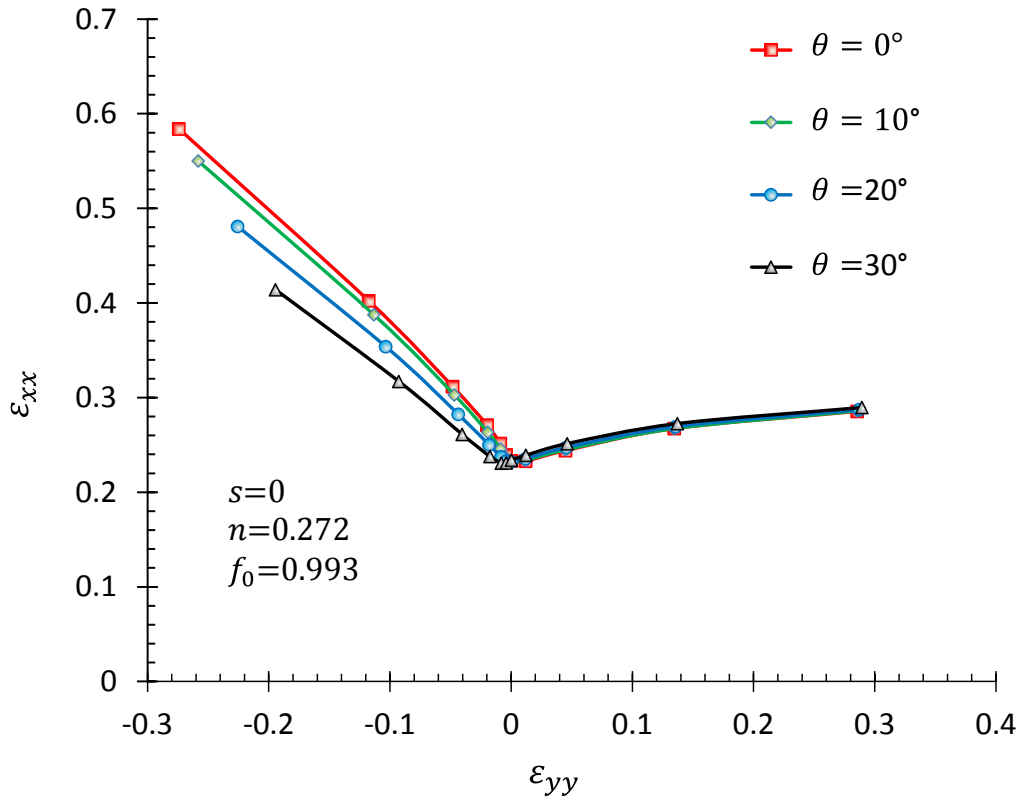


شکل ۳-۴ تغییرات تنش تسلیم نسبت به زاویه آزمون کشش ورق AA6111-T43



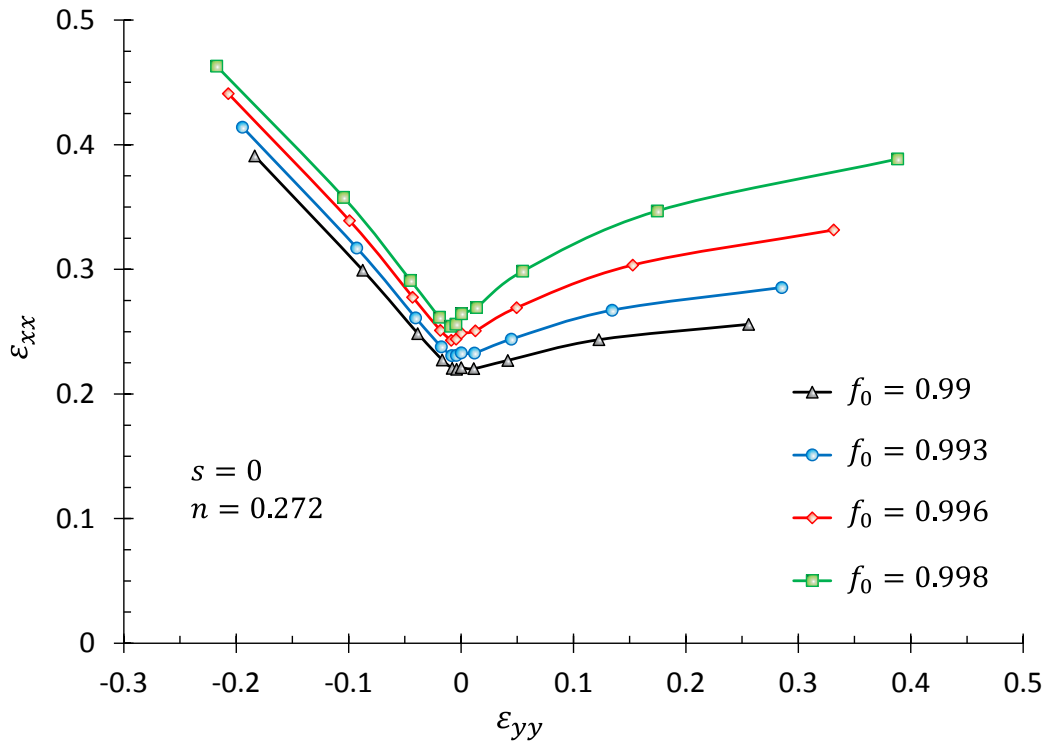
شکل ۴-۴ تغییرات ضریب ناهمسانگردی r نسبت به زاویه کشش ورق AA6111-T43

اثر زاویه شیار بر روی منحنی حد شکل دهی در شکل ۴-۵ نشان داده شده است. افزایش زاویه شیار باعث کاهش کرنش‌های حدی در سمت چپ نمودار می‌شود، اما سمت راست نمودار تغییر محسوسی پیدا نمی‌کند. حداقل مقادیر کرنش‌ها در زاویه 30° می‌باشد. در این پژوهش در شیار با زاویه 30° نتایج منطبق بر نتایج تجربی شد و دقت قابل قبولی دارد.



شکل ۴-۵ اثر زاویه شیار بر روی منحنی حد شکل دهی ورق AA6111-T43

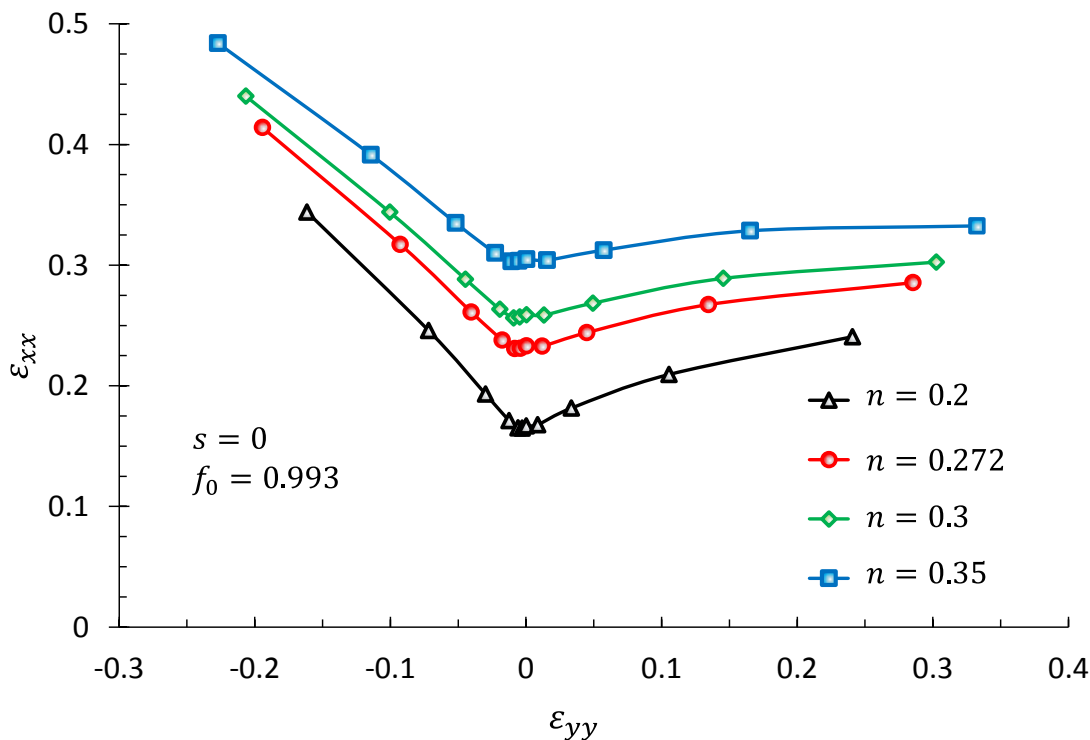
در شکل ۴-۶ اثر ضریب نقص f_0 بر منحنی حد شکل دهی ورق AA6111-T43 ارائه شده است.



شکل ۴-۶ تاثیر ضریب ناهمگنی بر روی منحنی حد شکل دهی ورق AA6111-T43

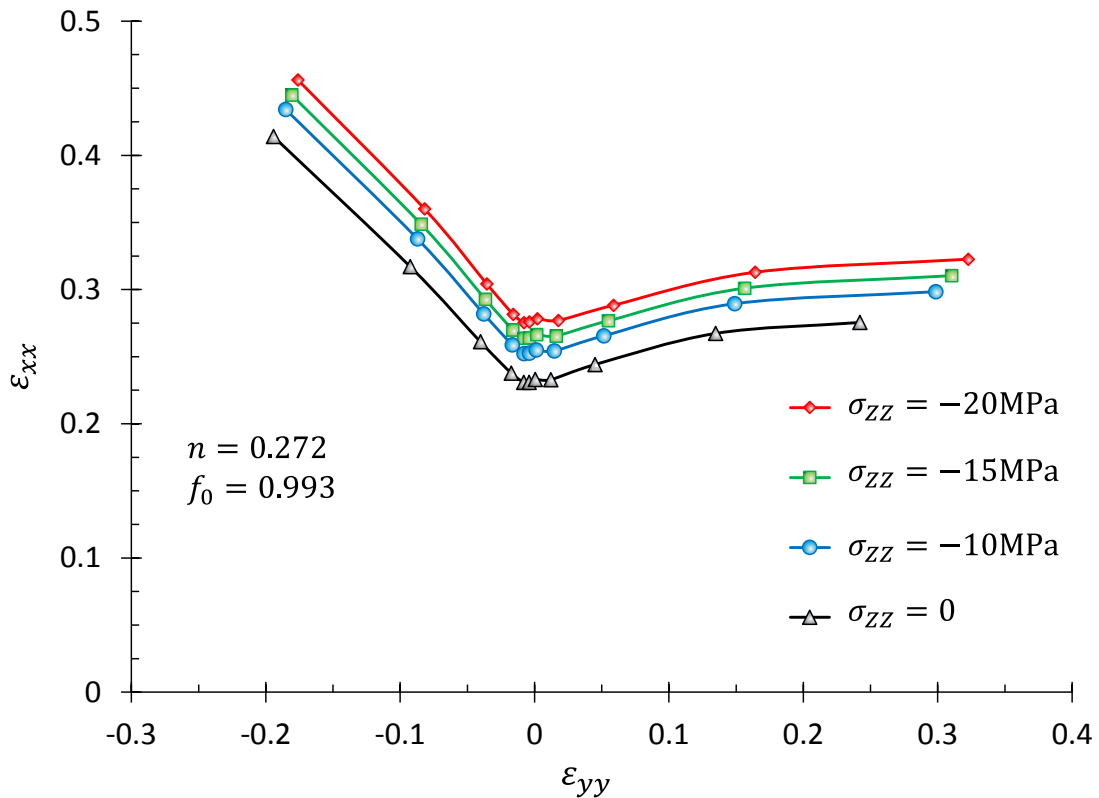
همانطور که در شکل ۴-۶ مشخص است، منحنی حد شکل‌دهی بسیار وابسته به مقدار ضریب ناهمگنی می‌باشد. افزایش ضریب ناهمگنی باعث کمتر شدن اثر ناهمگنی در ورق می‌شود و در نتیجه باعث افزایش شکل‌پذیری و افزایش مقادیر کرنش‌های حادی می‌شود. وابستگی منحنی به این مقدار در مقالات دانشمندان متعددی بررسی شده است که نتایج همگی مشابه نتیجه‌ی این پژوهش بوده و با افزایش این ضریب منحنی به سمت بالا منتقل می‌شود. بنابراین انتخاب صحیح ضریب ناهمگنی در بدست آوردن پاسخ صحیح و نزدیک به نتایج آزمایش عملی بسیار مهم می‌باشد. مقدار مناسب ضریب ناهمگنی برای ورق AA6111-T43 با مقایسه نتایج با مشاهدات تجربی مرجع [۴۶] برابر 0.993 در نظر گرفته شد.

افزایش توان کرنش سختی باعث افزایش شکل‌پذیری ماده می‌شود. این مطلب در شکل ۴-۷ نشان داده شده است. چهار ضریب کرنش مختلف انتخاب شده‌اند و افزایش مقدار توان کرنش سختی باعث حرکت نمودار حد شکل‌دهی به سمت بالا و افزایش مقادیر کرنش‌های حادی می‌شود.



شکل ۴-۷ تاثیر توان کرنش سختی بر منحنی حد شکل‌دهی ورق AA6111-T43

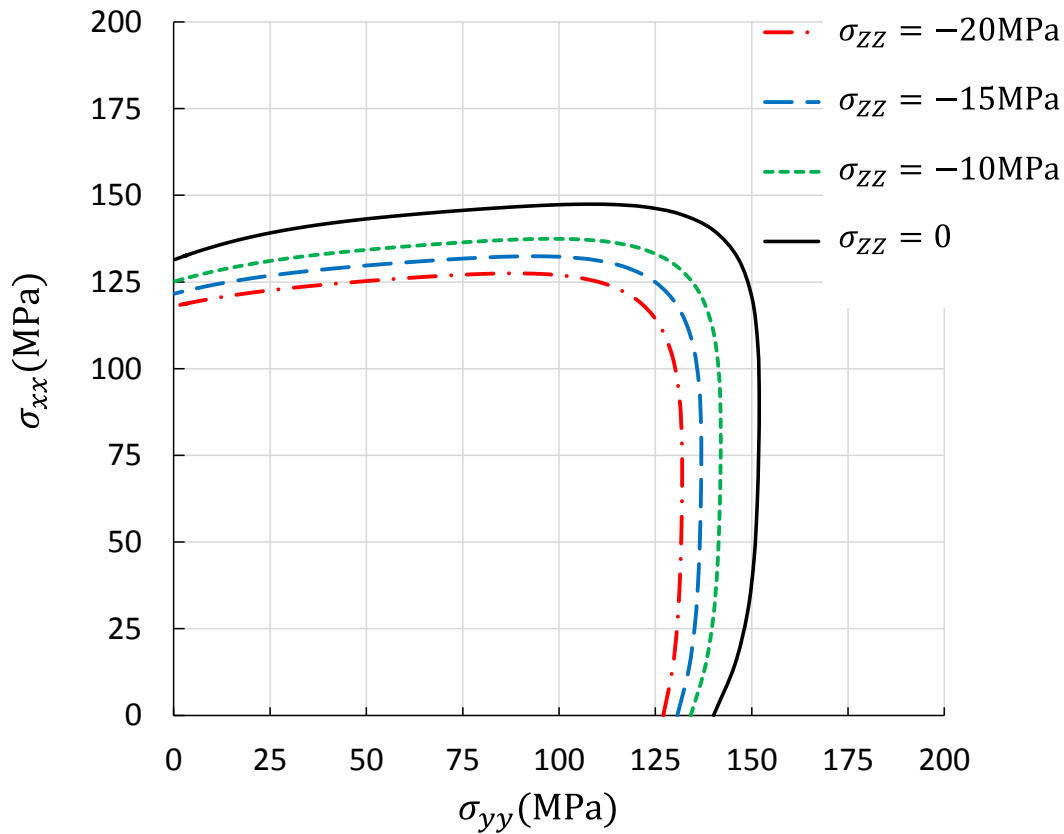
در شکل ۴-۸ نمودار حد شکل‌دهی به ازای مقادیر مختلف تنش نرمال نشان داده شده است.



شکل ۴-۸ تاثیر تنش نرمال بر منحنی حدشکل دهی ورق AA6111-T43

همان طور که در شکل مشخص است، افزایش تنش نرمال باعث بهبود شکل پذیری ورق می شود. نتیجه بدست آمده با نتایجی که سایر محققان بدست آورده اند در تطابق است [۳۴، ۵۴]. این تحقیق نشان می دهد که افزایش تنش نرمال نرخ رشد گلوئی را کاهش داده و گلوئی موضعی ایجاد شده را به گلوئی پخشی تبدیل خواهد نمود و به بیان دیگر مانع از نازک شدن موضعی ضخامت می شود.

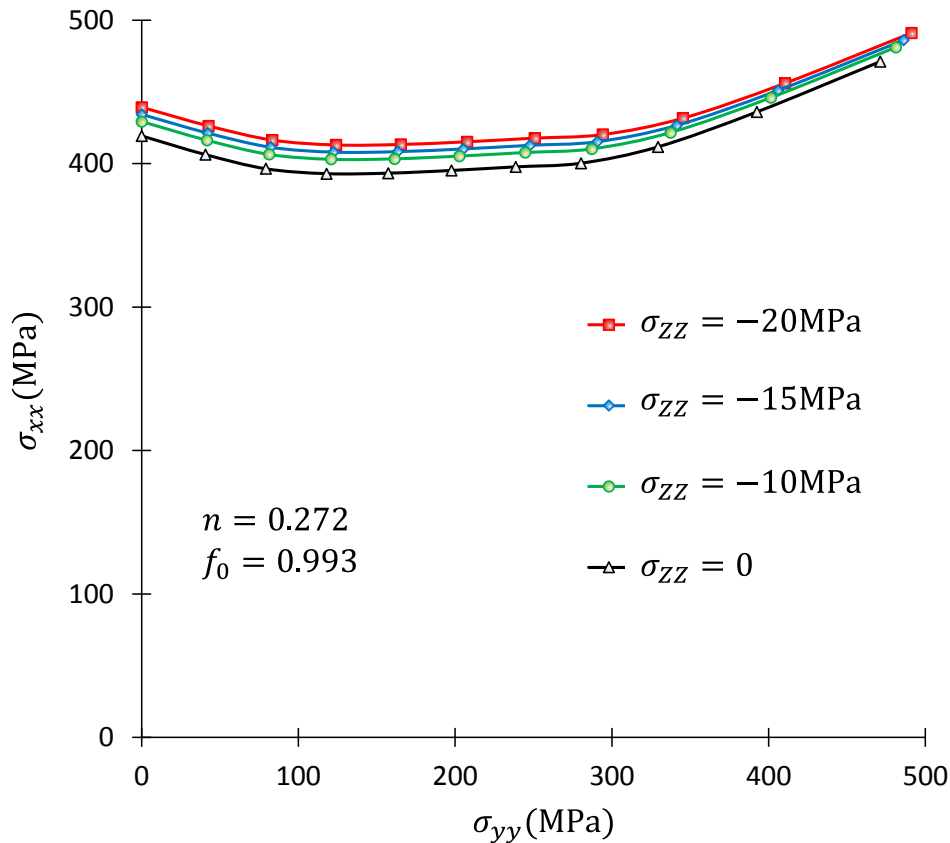
شکل ۴-۹ اثر تنش نرمال بر روی سطح تسلیم براساس معیار Yld2003 را نشان می دهد.



شکل ۴-۹ تاثیر تنش نرمال بر سطح تسلیم ورق AA6111-T43

مطابق شکل با افزایش تنش نرمال، تسلیم شدن در مقادیر کمتری از تنش‌های درون صفحه‌ای رخ می‌دهد. دلیل کاهش آن است که در حالت دوبعدی و بدون تنش فشاری، تابع تسلیم تابعی از تنش در راستای محور یک و دو می‌باشد، اما با اعمال تنش فشاری تابع تسلیم علاوه بر تنش در در راستای محور یک و دو، تابعی از تنش فشاری نیز می‌باشد [۵۴].

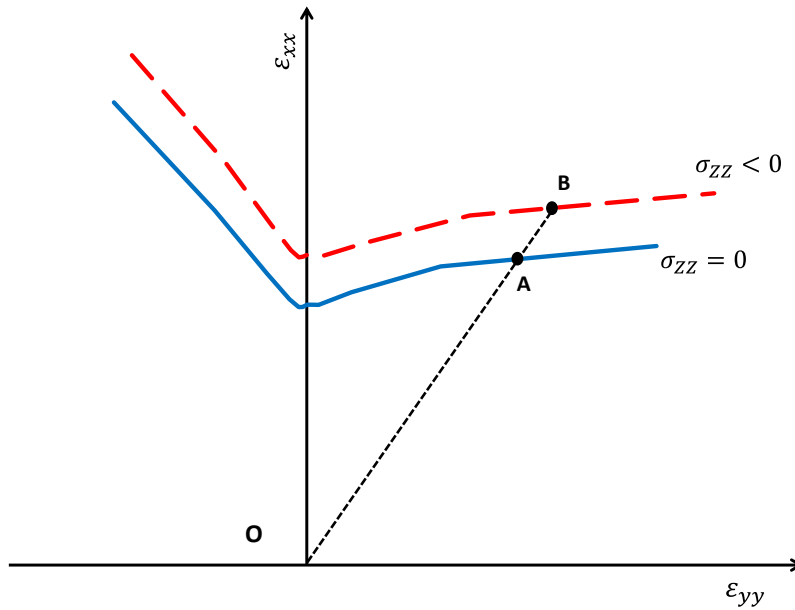
تاثیر تنش نرمال بر روی منحنی حد تنش در شکل ۴-۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۰ تاثیر تنش نرمال بر منحنی حد تنش ورق AA6111-T43

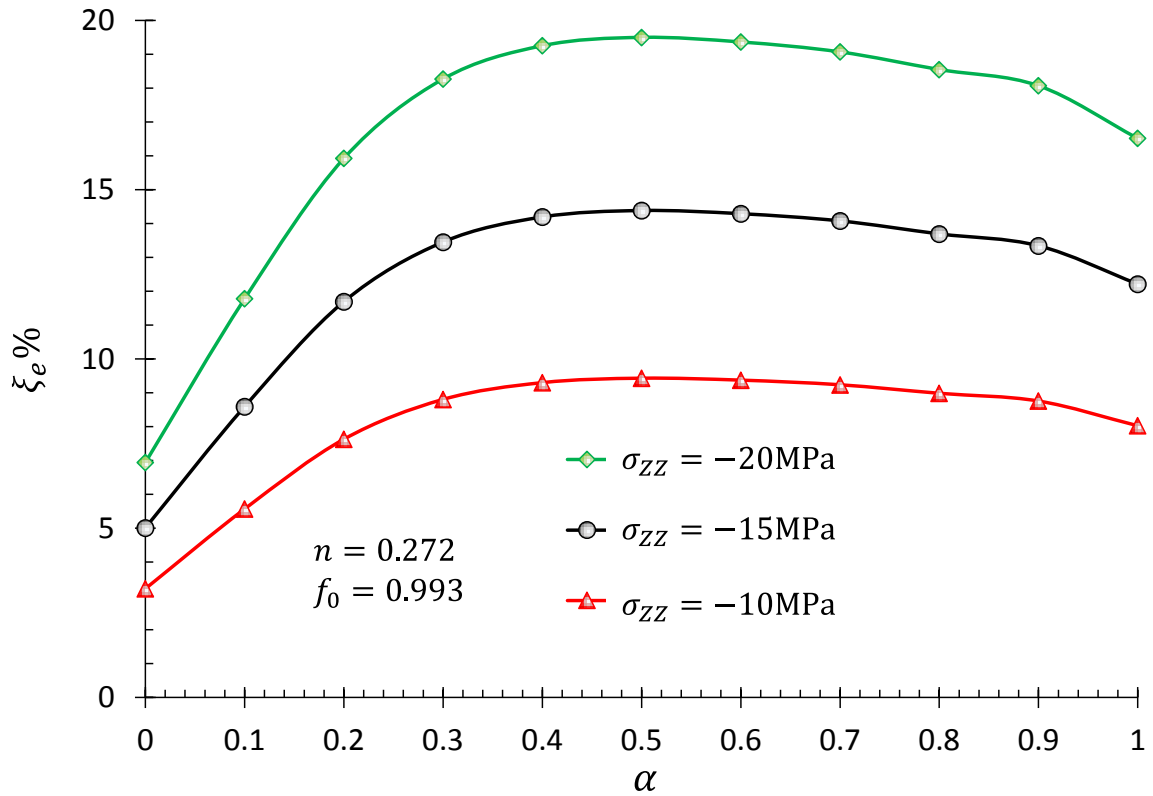
مطابق شکل ۴-۱۰، با افزایش تنش نرمال مشابه افزایش نمودار حد کرنش، حد تنش نیز افزایش پیدا می‌کند البته نسبت بهبود شکل‌پذیری برای حد کرنش بیشتر از حد تنش می‌باشد. نتایج حاصل از نمودارهای فوق با نتایج دیگر محققان کاملاً تطابق دارد [۴۸، ۵۴]. جهت بررسی میزان بهبود شکل‌پذیری در مسیرهای مختلف، پارامتر بهبود شکل‌پذیری مطابق شکل ۴-۱۱ با مقایسه FLD با تنش نرمال و FLD بدون تنش نرمال به صورت درصد افزایش طول پاره خط OA با اعمال اثر فشار بر FLD تعریف شده است.

$$\xi_e \% = \frac{OB - OA}{OA} \times 100$$



شکل ۴-۱۱ تعریف پارامتر بهبود شکل پذیری در یک مسیر کرنش دلخواه

که مقدار ξ_e به عنوان پارامتر بهبود شکل پذیری کرنش و ξ_s به صورت مشابه به عنوان پارامتر بهبود شکل-پذیری تنش معرفی می‌شود. در شکل ۴-۱۲ نمودار پارامتر بهبود شکل پذیری در نسبت‌های تنش مختلف (α) برای ورق AA6111-T43 ترسیم شده است. مطابق شکل، با افزایش نسبت تنش میزان افزایش شکل-پذیری ابتدا با شیب تندتری افزایش می‌یابد و سپس کاهش پیدا می‌کند. بیشترین مقدار شکل‌پذیری برای نسبت تنش $\alpha=0.5$ در بارگذاری کرنش صفحه‌ای می‌باشد. پارامتر بهبود شکل‌پذیری برای مقادیر مختلف نسبت تنش در جدول ۳-۱ گزارش شده است.



شکل ۴-۱۲ پارامتر بهبود شکل پذیری کرنش بر حسب نسبت تنش α

جدول ۴-۱ پارامتر بهبود شکل پذیری برای نسبت تنش‌های مختلف ورق AA6111-T43

	α	$\xi_e\%$			
		$\sigma_{zz} = -10\text{MPa}$	$\sigma_{zz} = -15\text{MPa}$	$\sigma_{zz} = -20\text{MPa}$	
کشش تک محوره	۰	۳/۲	۵	۶/۹	
	۰/۱	۵/۵	۸/۵	۱۱/۷	
	۰/۲	۷/۶	۱۱/۶	۱۵/۹	
	۰/۳	۸/۸	۱۳/۴	۱۸/۲	
	۰/۴	۹/۳	۱۴/۱	۱۹/۲	
	کشش کرنش صفحه‌ای	۰/۵	۹/۴	۱۴/۳	۱۹/۴
		۰/۶	۹/۳	۱۴/۲	۱۹/۳
		۰/۷	۹/۲	۱۴	۱۹
		۰/۸	۸/۹	۱۳/۶	۱۸
۰/۹		۸/۷	۱۳/۳	۱۸	
کشش دو محوره متوازن	۱	۸	۱۲/۲	۱۶/۵	

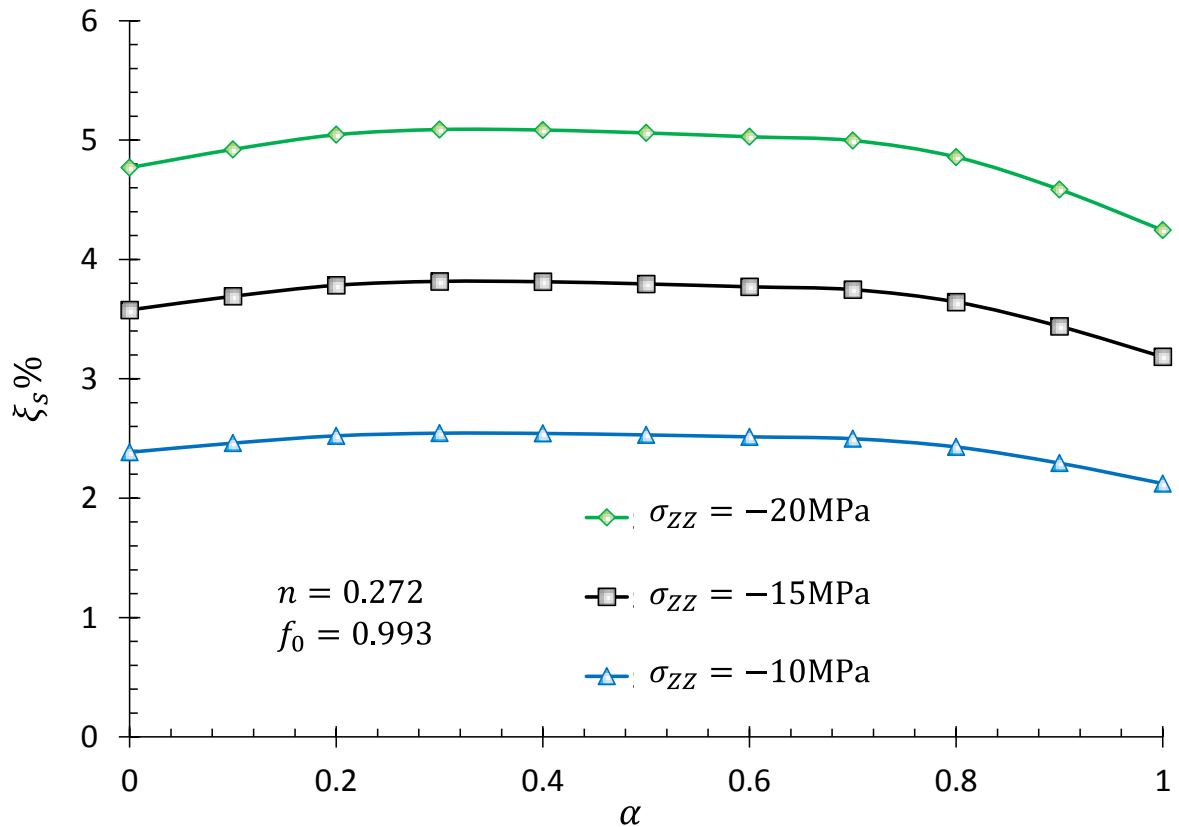
نتایج حاصل از این پژوهش مشابه نتایج بدست آمده برای آلیاژ آلومینیوم AA6011 که ژانگ و همکاران [۵۴] بدست آوردند است. جدول ۲-۴ نتایج حاصل از تحقیق این محققین است که گویای تشابه نتایج بدست آمده برای آلیاژهای آلومینیوم سری ۶۰۰۰ است.

جدول ۲-۴ نتایج بدست آمده از تحقیق ژانگ و همکاران [۵۴]

تنش نرمال (MPa)	ξ_e %
-۱۵	۹/۷۱
-۳۰	۲۰/۴۷

عباسی نیز FLD را با مدل سویفت و معیار تسلیم هیل ۷۹ برای آلومینیوم آلیاژی AA6061 بدست آورد و به درصد بهبود ۱۰/۹۸ برای حالت کرنش صفحه‌ای در تنش نرمال ۱۵- مگاپاسکال رسید که مشابه نتایج پژوهش حاضر است [۴۰]. نتایج بدست آمده از این پژوهش نشان دهنده این است که اثر تنش نرمال بر FLD برای سمت راست منحنی ($\alpha > 0/5$) قابل توجه‌تر است که مشابه نتایج آلود و شولر [۳] و بانابیک و سوار [۳۰] است.

نمودار شکل ۴-۱۳ مقدار درصد افزایش تنش در نمودار حد تنش برای سه تنش نرمال در مسیرهای تنش مختلف را نشان می‌دهد. در این نمودار نیز همانطور که مشاهده می‌شود، افزایش تنش نرمال باعث افزایش تغییرات تنش می‌شود. میزان تغییرات تنش برای نسبت تنش‌های مختلف تقریباً با یکدیگر برابر است.

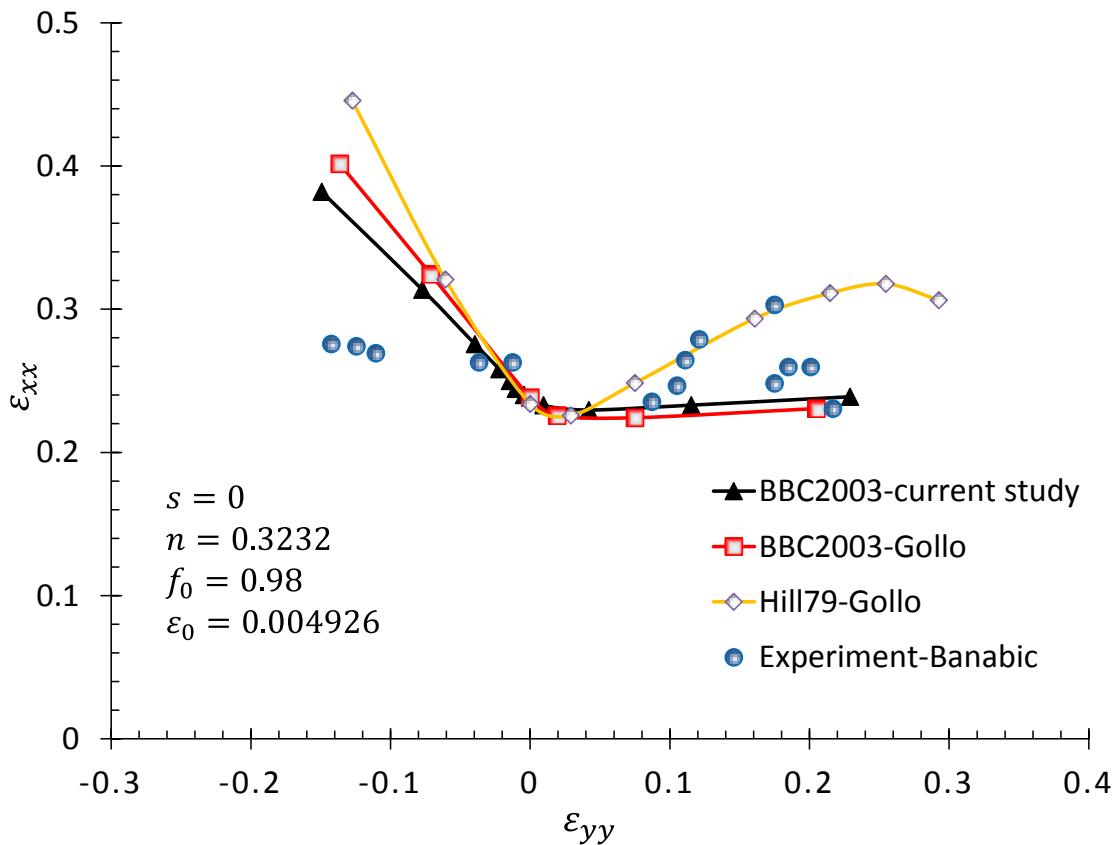


شکل ۴-۱۳ تغییرات تنش حدی بر حسب نسبت تنش α

۴-۲- صحت‌سنجی نتایج منحنی حدشکل‌دهی ورق AA5182-O بر اساس معیار تسلیم

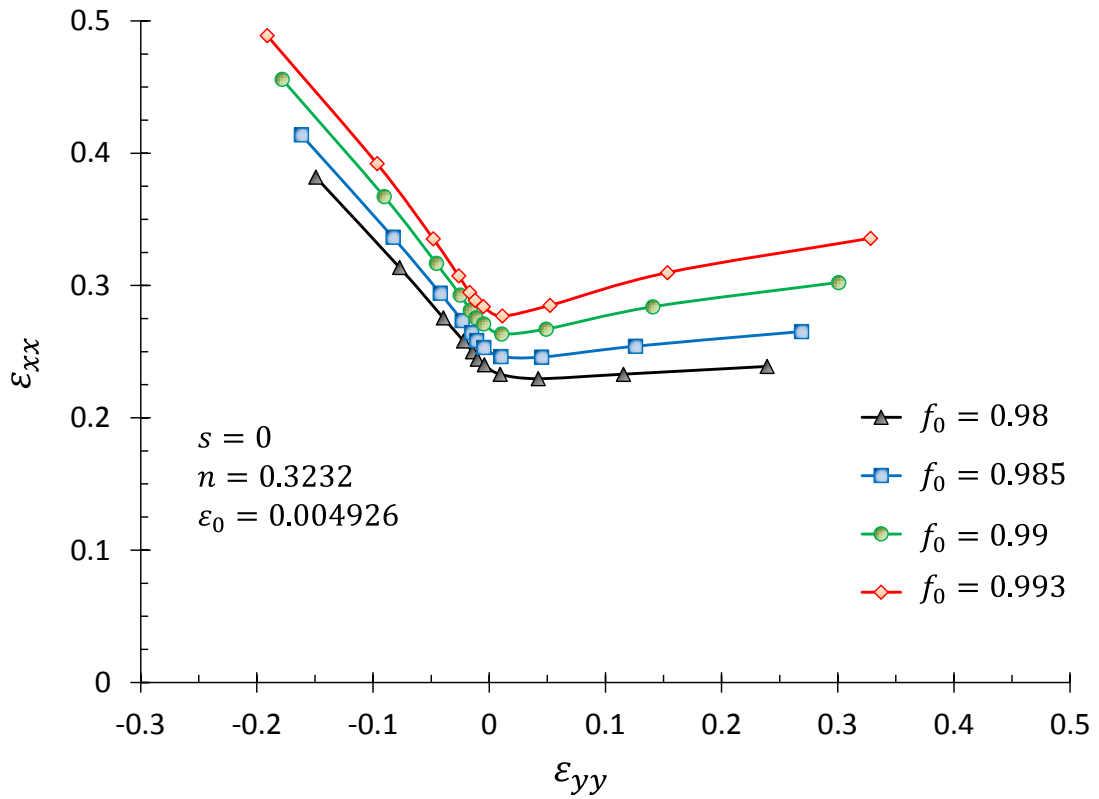
BBC2003

در این بخش به ارائه نتایج اثر تنش نرمال بر روی FLD ورق AA5182-O با استفاده از معیار تسلیم BBC2003 پرداخته می‌شود. FLD ورق آلومینیوم آلیاژی AA5182-O در شکل ۴-۱۴ نشان داده شده است. خواص مکانیکی این آلیاژ در فصل قبل در جدول ۳-۳ و جدول ۴-۳ بیان شده است.



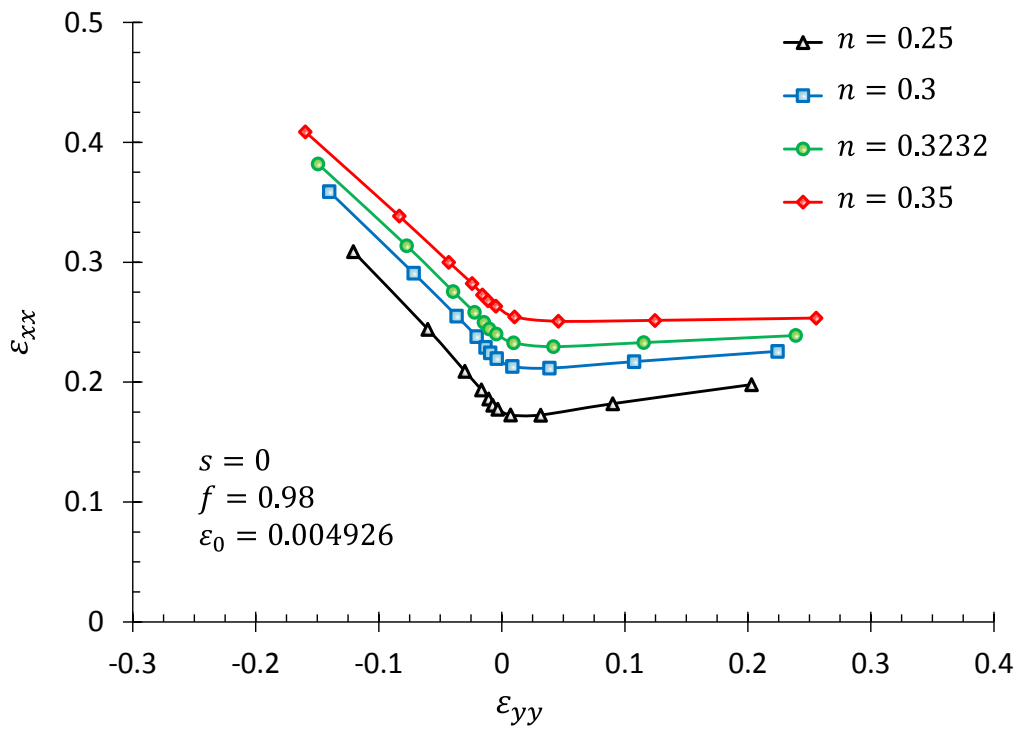
شکل ۴-۱۴ مقایسه FLD حاصل از این تحقیق با نتایج تجربی و عددی گلو [۵۵] برای ورق AA5182-O

همانند بخش قبل در ابتدا اثر ضریب ناهمگنی مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به وابستگی بالای مدل M- K به ضریب ناهمگنی، انتخاب مناسب این ضریب برای تطابق بهتر نتایج تئوری با عملی بسیار مهم می‌باشد. از این رو چهار مقدار مختلف برای این ضریب در نظر گرفته شده است و نتایج آن‌ها در شکل ۴-۱۵ نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشخص افزایش مقدار ضریب ناهمگنی باعث افزایش حد شکل‌پذیری می‌شود زیرا افزایش ضریب ناهمگنی به معنای در نظر گرفتن عیوب کمتر در قطعه می‌باشد. در این پژوهش مقدار ضریب ناهمگنی $f_0 = 0.98$ در نظر گرفته شده است.



شکل ۴-۱۵ تاثیر ضریب ناهمگنی بر منحنی حد شکل دهی ورق AA5182-O

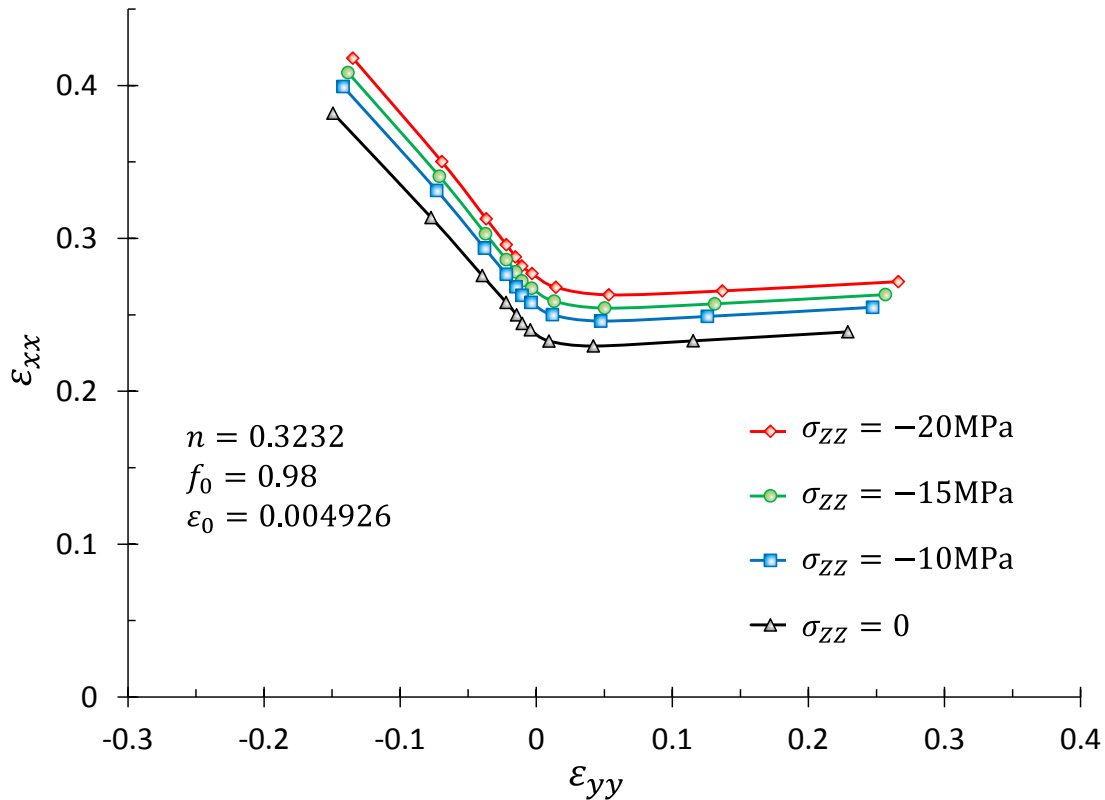
برای اثر توان کرنش سختی چهار ضریب انتخاب شد و نتایج در نمودار شکل ۴-۱۶ ارائه شده است.



شکل ۴-۱۶ تاثیر توان کرنش سختی بر منحنی حد شکل دهی ورق AA5182-O

مطابق شکل فوق همانطور که انتظار می‌رود، افزایش توان کرنش سختی موجب افزایش شکل پذیری و مقادیر کرنش‌های حدی می‌شود.

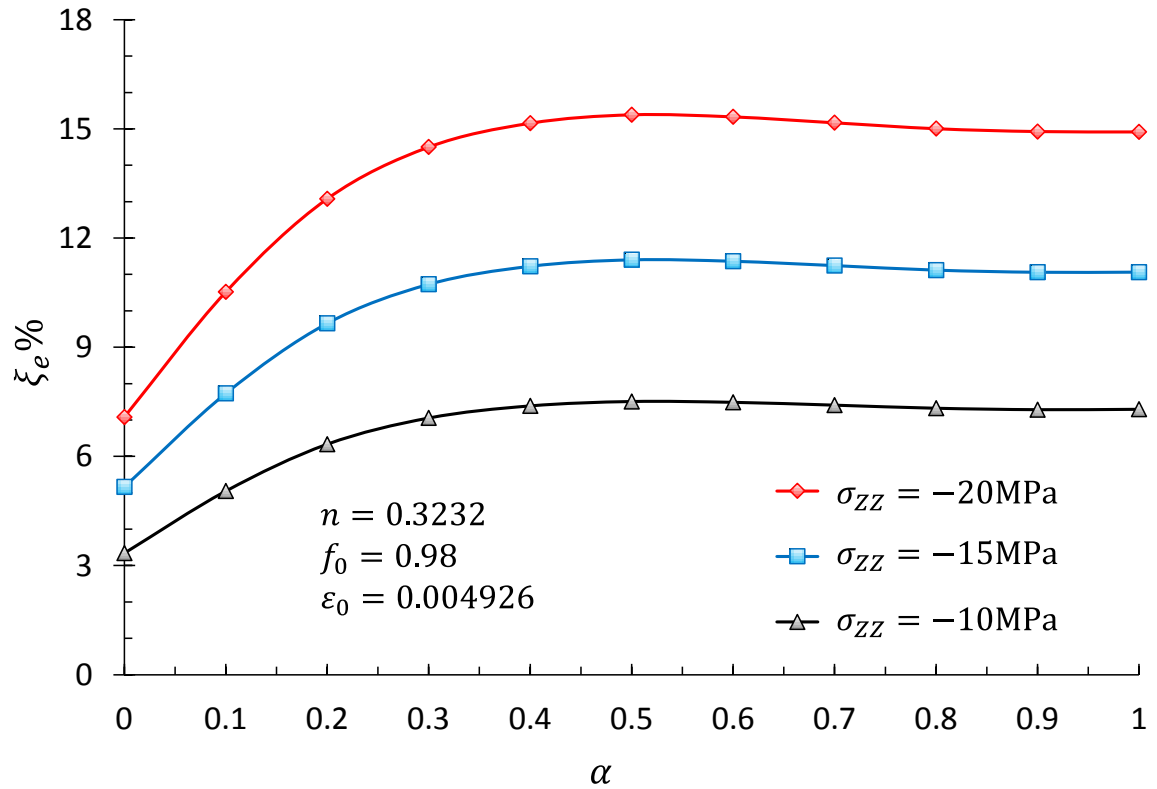
پارامتر اصلی مورد بررسی اثر تنش نرمال بر روی منحنی‌های حد شکل دهی می‌باشد. بدین منظور سه مقدار تنش نرمال مختلف ۱۰، ۱۵ و ۲۰ مگاپاسکال انتخاب و نتایج آن با حالت دوبعدی مقایسه شد. شکل ۴-۱۷ نمودار حد کرنش برای تنش‌های نرمال مختلف را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۷ تاثیر تنش نرمال بر منحنی حد شکل دهی برای ورق AA5182-O

مطابق شکل و همانطور که در بخش قبل نیز نشان داده شد، افزایش تنش نرمال باعث افزایش شکل پذیری و مقادیر کرنش‌های حدی می‌شود [۲۷، ۳۳].

در شکل ۴-۱۸ نمودار پارامتر بهبود شکل پذیری در نسبت‌های تنش مختلف (α) برای ورق AA5182-O ترسیم شده است.



شکل ۴-۱۸ منحنی پارامتر بهبود شکل پذیری کرنش بر حسب نسبت تنش α برای ورق AA5182-O

همچنین مقادیر بهبود شکل پذیری برای تمام نسبت تنش‌ها در جدول ۴-۳ آمده است. همانطور که مشاهده

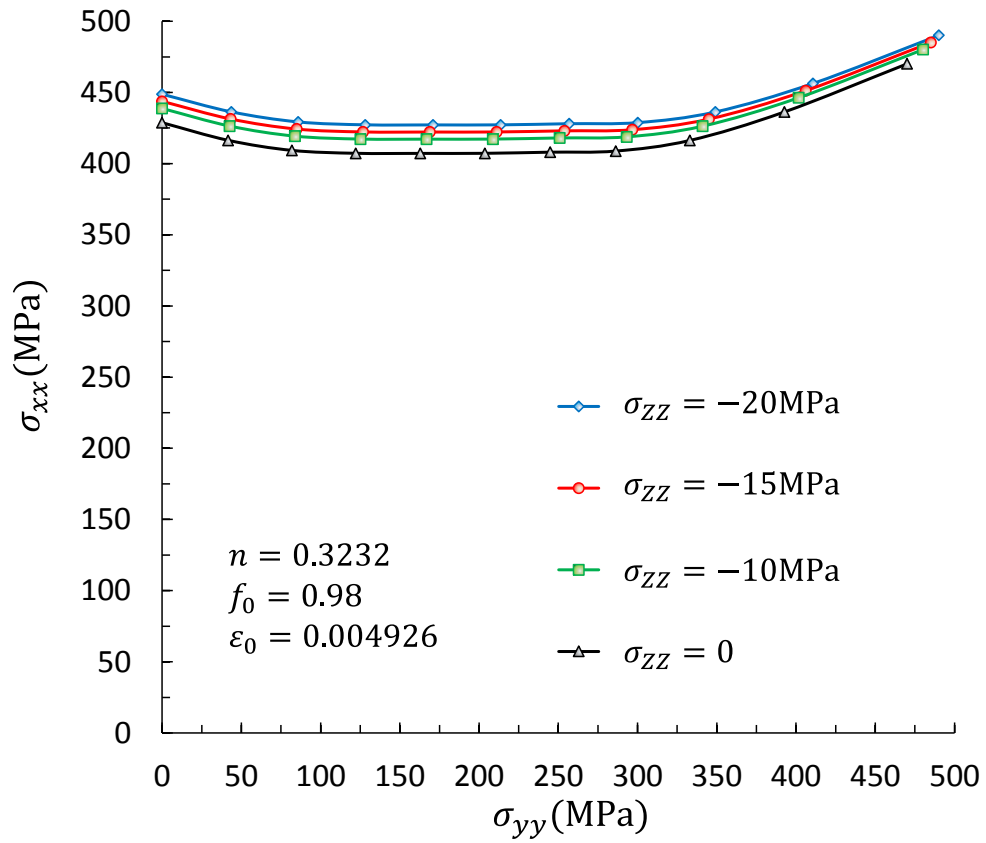
می‌شود برای این آلیاژ نیز افزایش تنش نرمال باعث افزایش درصد بهبود شکل پذیری می‌شود.

جدول ۳-۴ پارامتر بهبود شکل پذیری برای نسبت تنش‌های مختلف ورق AA5182-O

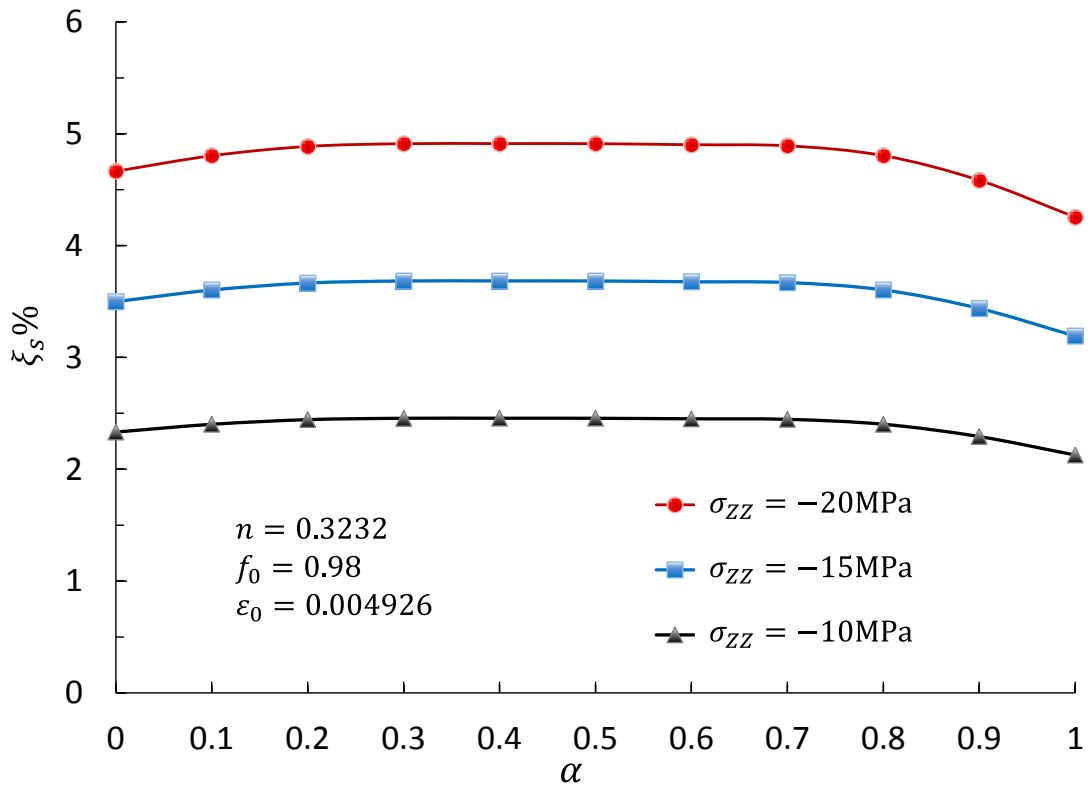
	α	$\xi_e\%$		
		$\sigma_{zz} = -10 \text{ MPa}$	$\sigma_{zz} = -15 \text{ MPa}$	$\sigma_{zz} = -20 \text{ MPa}$
کشش تک محوره	۰	۳/۳۴	۵/۱۶	۷/۰۸
	۰/۱	۵/۰۴	۷/۷۳	۱۰/۵۲
	۰/۲	۶/۳۳	۹/۶۵	۱۳/۰۸
	۰/۳	۷/۰۵	۱۰/۷۳	۱۴/۵
محدوده کشش کرنش صفحه‌ای	۰/۴	۷/۳۹	۱۱/۲۲	۱۵/۱۵
	۰/۵	۷/۵۱	۱۱/۴۰	۱۵/۳۹
	۰/۶	۷/۴۹	۱۱/۳۶	۱۵/۳۳
	۰/۷	۷/۴۱	۱۱/۲۴	۱۵/۱۷
	۰/۸	۷/۳۲	۱۱/۱۲	۱۵
کشش دو محوره متوازن	۰/۹	۷/۲۸	۱۱/۰۶	۱۴/۹۳
	۱	۶/۷۳	۱۰/۲۱	۱۳/۷۶

FLSD برای تنش‌های نرمال مختلف در شکل ۴-۱۹ نشان داده شده است. مطابق شکل همانند رفتار FLD، افزایش تنش فشاری باعث افزایش تنش کششی بر ورق و بالا رفتن حد تحمل ورق می‌شود و در نتیجه تنش‌های بیشتری را می‌تواند تحمل کند [۵۴].

نمودار شکل ۴-۲۰ مقدار درصد افزایش تنش در FLSD برای سه تنش نرمال در مسیرهای تنش مختلف را نشان می‌دهد. در این نمودار نیز همانطور که مشاهده می‌شود، افزایش تنش نرمال باعث افزایش تغییرات تنش می‌شود. میزان تغییرات تنش برای نسبت تنش‌های مختلف تقریباً با یکدیگر برابر است.



شکل ۴-۱۹ تاثیر تنش نرمال بر منحنی حد تنش ورق AA5182-O



شکل ۴-۲۰ منحنی تغییرات تنش حدی بر حسب نسبت تنش α برای ورق AA5182-O

فصل ۵ نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهاد

۵-۱- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی اثر تنش نرمال بر روی FLD با استفاده از دو معیار تسلیم غیر کلاسیک Yld2003 و BBC2003 پرداخته شد. منحنی‌های حد کرنش و تنش رسم شد و مورد مقایسه گرفت. همچنین اثر پارامترهای مختلف بر شکل‌پذیری نیز مورد بررسی و بحث قرار گرفت. نتایج کلی بدست آمده از بررسی تحلیلی شامل موارد زیر می‌باشد:

۱. برنامه تحلیلی بر اساس مدل M-K با استفاده از دو معیار پیشرفته Yld2003 و BBC2003 در

حالت دویعدی نوشته شد. برای استفاده از این معیارها برای حالت سه‌یعدی از یک تکنیک ریاضی

استفاده شد و با اعمال اثر تنش هیدرواستاتیکی تنش σ_{zz} ظاهر شده و مورد بررسی قرار گرفت.

۲. برای صحت‌سنجی کد نوشته شده برای معیار تسلیم پیشرفته Yld2003 از نتایج تجربی دیگر

مقالات برای آلومینیوم AA6111-T43 و برای معیار تسلیم BBC2003 از نتایج تجربی دیگر مقالات

برای آلومینیوم AA5182-O استفاده و نتایج نشان داد که با انتخاب ضریب ناهمگنی ۰/۹۹۳ برای

معیار تسلیم Yld2003 و ۰/۹۸ برای معیار تسلیم BBC2003 نتایج از دقت خوبی برخوردار می-

باشد.

۳. اثر تنش نرمال در سه تنش ۱۰-، ۱۵- و ۲۰- مگاپاسکال مورد بررسی قرار گرفت. به عنوان نمونه

برای ورق آلومینیوم AA6111-T43 و معیار تسلیم Yld2003 مشخص شد که در تنش نرمال ۲۰-

مگاپاسکال شکل‌پذیری ورق به ترتیب در مسیرهای کشش تک‌محوره و کرنش صفحه‌ای و کشش دو

محوره متوازن به ترتیب ۶/۹ و ۱۹/۴ و ۱۶/۵ درصد افزایش پیدا کرده است. نتایج مشابه برای ارتقاء

سطح منحنی حد تنش برای این فشار در سه مسیر مذکور به ترتیب برابر ۴/۸ و ۵ و ۴/۶ درصد

بدست آمد.

۴. برای ورق آلومینیوم AA5182-O و معیار تسلیم BBC2003 مشخص شد که در تنش نرمال ۲۰-

شکل‌پذیری ورق به ترتیب در سه مسیر کشش تک‌محوره و کرنش صفحه‌ای و کشش دو محوره

متوازن به ترتیب ۷/۰۸ و ۱۵/۳۳ و ۱۳/۷۶ درصد افزایش پیدا کرده است. برای این ورق افزایش

سطح منحنی حد تنش برای این فشار در سه مسیر مذکور به ترتیب برابر $4/6$ و $4/7$ و $4/4$ درصد بدست آمد.

۵. مشخص شد که با افزایش تنش نرمال سطح تسلیم بر روی صفحه تنش‌های اصلی کوچکتر می‌شود. به این معنی است که با افزایش تنش نرمال ورق با تنش‌های کمتری تسلیم شدن رخ خواهد داد.

۵-۲- پیشنهادها

پس از انجام این پژوهش، پیشنهادهای زیر برای انجام مطالعات آینده ارائه می‌گردد:

۱. بررسی همزمان اثر تنش برشی، تنش نرمال و نرخ کرنش در مدل M-K
۲. صحت‌سنجی نتایج FLD بدست آمده از این تحقیق با طراحی آزمون‌های تجربی مناسب در فشار بالا
۳. بررسی اثر تنش نرمال بر شکل‌پذیری ورق در مسیرهای غیر خطی کرنش
۴. بررسی منحنی‌های حد شکل‌دهی در حضور تنش نرمال در دماهای بالا
۵. بررسی منحنی حد شکل‌دهی ورق‌های چند لایه با حضور تنش نرمال

منابع

1. Stoughton, T.B., and Zhu, X., *Review of theoretical models of the strain-based FLD and their relevance to the stress-based FLD*. International Journal of Plasticity, 2004. **20**(8): p. 1463-1486.
2. Hill, R., *The mathematical theory of plasticity*. Vol. 11. 1998 :Oxford university press.
3. Allwood, J.M., and Shouler, D.R., *Generalised forming limit diagrams showing increased forming limits with non-planar stress states*. International Journal of Plasticity, 2009. **25**(7): p. 1207-1230.
4. Hu, J., Marciniak, Z., and Duncan, J., *Mechanics of sheet metal forming*. 2002: Butterworth-Heinemann.
5. Hosford, W.F., and Caddell, R.M., *Metal forming: mechanics and metallurgy*. 2011: Cambridge University Press.
6. Dehra, M.S., *High velocity formability and factors affecting it*. 2006 ,The Ohio State University.
7. Emmens, W.C., *Formability: a review of parameters and processes that control, limit or enhance the formability of sheet metal*. 2011: Springer Science & Business Media.
8. Zhang, F., Chen, J., Lu, J., Liu, G., Yuan S., *Overview on constitutive modeling for hydroforming with the existence of through-thickness normal stress*. Journal of Materials Processing Technology, 2012. **212**(11): p. 2228-2237.
9. Brooke, L., *Hydroforming Hits The Big Time-The massive frame rails of Chevys new Corvette pave the way for hydroformed truck frames, and more. Metalforming will never be the same*. Automotive Industries-AI, 1997. **177**(6): p. 57-62.
10. Liu, B., Lang, L., Zeng, Y., Lin, J., *Forming characteristic of sheet hydroforming under the influence of through-thickness normal stress*. Journal of Materials Processing Technology, 2012. **212**(9): p. 1875-1884.

11. Iseki, H., Kato, K., and Sakamoto, S., *Flexible and incremental sheet metal forming using a spherical roller*. Proc. 40th JJCTP, 1989. **41**: p. 44.
12. Lu, B., Fang, Y., Xu, DK., Chen, J., Ou, H., Moser, NH., *Mechanism investigation of friction-related effects in single point incremental forming using a developed oblique roller-ball tool*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2014. **85**: p. 14-29.
13. Daehn, G.S., *High-velocity metal forming*. Metalworking: Sheet Forming(ASM Handbook Volume 14 B), 2006. **14**: p. 405-418.
14. Seth, M., Vohnout, V.J., and Daehn G.S., *Formability of steel sheet in high velocity impact*. Journal of Materials Processing Technology, 2005. **168**(3): p. 390-400.
15. Imbert Boyd, J., *Increased formability and the effects of the tool/sheet interaction in electromagnetic forming of aluminum alloy sheet*. 2005.
16. Schäfer, R., Pasquale, P., and Elsen, A., *Material hybrid joining of sheet metals by electromagnetic pulse technology*. in Key Engineering Materials. 2011. Trans Tech Publ.
17. Keeler, S.P., *Determination of forming limits in automotive stampings*. 1965, SAE Technical Paper.
18. Keeler, S.P., and Backofen, W.A., *Plastic instability and fracture in sheets stretched over rigid punches*. Asm Trans Q ,1963.**56**(1) :p. 25-48.
19. Marciniak, Z., and Kuczyński, K., *Limit strains in the processes of stretch-forming sheet metal*. International journal of mechanical sciences, 1967. **9**(9): p. 609-620.
20. Graf, A., and Hosford, W.F., *Calculations of forming limit diagrams*. Metallurgical Transactions A, 1990. **21**(1): p. 87-94.
21. Banabic, D., *A review on recent developments of Marciniak-Kuczynski model*. Computer Methods in Materials Science, 2010. **10**(4): p. 1-13.
22. Kuroda, M. and Tvergaard, V., *Forming limit diagrams for anisotropic metal sheets with different yield criteria*. International Journal of Solids and Structures, 2000. **37**(37): p. 5037-5059.
23. Butuc, M., Rocha, AB., Gracio, JJ., *A more general model for forming limit diagrams prediction*. Journal of materials processing technology, 2002. **125**: p. 213-218.
24. Banabic, D. and S. Wagner, *Anisotropic behaviour of aluminium alloys sheets*. Aluminium, 2002. **78**(10): p. 926-930.
25. Dariani, B. and Azodi, H., *Finding the optimum Hill index in the determination of the forming limit diagram*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2003. **217**(12): p. 1677-1683.
26. Ganjiani, M. and Assempour, A., *An improved analytical approach for determination of forming limit diagrams considering the effects of yield functions*. Journal of materials processing technology, 2007. **182**(1): p. 598-607.
27. Assempour, A., Nejadkhaki, H.K., and R. Hashemi, *Forming limit diagrams with the existence of through-thickness normal stress*. Computational Materials Science, 2010. **48**(3): p. 504-508.

۲۸. صالحی، ف.، دیلمی، ح.، تعیین تئوری منحنی‌های حد شکل‌دهی با استفاده از معیار تسلیم بارلات و لاین، دهمین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید ایران. ۱۳۸۸: دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل.

۲۹. صالحی، ف.، دیلمی ح.، مطالعه اثر توابع تسلیم بر کرنش‌های حدی در ورق‌های فلزی، هیجدهمین همایش سالانه بین‌المللی مهندسی مکانیک ایران، ISME-2010. 2015، دانشگاه صنعتی شریف: تهران.

30. Banabic, D. and Soare, S., *On the effect of the normal pressure upon the forming limit strains*. in Proceedings Numisheet. 2008.
31. Wu, P., Embury, J., Liord, D., Huang, Y., *Effects of superimposed hydrostatic pressure on sheet metal formability*. International Journal of Plasticity, 2009. **25**(9): p. 1711-1725.
32. Eyckens, P., Van Bael, A., and Van Houtte, P., *Marciniak–Kuczynski type modelling of the effect of through-thickness shear on the forming limits of sheet metal*. International Journal of Plasticity, 2009. **25**(12): p. 2249-2268.
33. Nurcheshmeh, M. and Green, D.E., *Influence of out-of-plane compression stress on limit strains in sheet metals*. International journal of material forming, 2012. **5**(3): p. 213-226.
34. Nurcheshmeh, M. and Green, D.E., *The effect of normal stress on the formability of sheet metals under non-proportional loading*. International Journal of Mechanical Sciences, 2014. **82**: p. 131-139.
35. Fatemi, A. and Dariani, B.M., *Forming limit prediction of anisotropic material subjected to normal and through thickness shear stresses using a modified M–K model*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015.(9-12)**80**: p. 1497-1509.
36. Banabic, D., *Sheet metal forming processes: constitutive modelling and numerical simulation*. 2010: Springer Science & Business Media.
37. Stören, S. and Rice, J., *Localized necking in thin sheets*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1975. **23**(6): p. 421-441.
38. Venkataraman, K., *Sheet Metal Forming Processes*. Design of Jigs, Fixtures and Press Tools: p. 2.1-2.20.
39. Swift, H.W., *Plastic instability under plane stress*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, (1)1.1952: p. 1-18.
۴۰. عباسی، ا.، پایان‌نامه کارشناسی ارشد.، بررسی تحلیلی و عددی اثر تنش در راستای ضخامت بر ناپایداری پلاستیک ورق‌های فلزی.، دانشکده مکانیک.، دانشگاه شاهرود.، ۱۳۹۳.
41. Chu, E., *Generalization of Hill's 1979 anisotropic yield criteria*. Journal of materials processing technology, 1995. **50** (۱) p. 207-215.
42. M. Hosseinpour Gollo, Seyedkashi, H., Valian Iraj, N., *The effects of Hosford, Hill's quadratic and non-quadratic yield criteria on prediction of forming limit diagrams based on M-K Model*. Modares Mechanical Engineering, 2014. **14**(5): p. 137-146.
43. Woodthorpe, J. and R. Pearce., *Effect of rand upon the forming limit diagrams of sheet steel*. Sheet Metal Ind, 1969. **46**(12): p. 1061-1067.
44. Woodthorpe, J. and Pearce, R., *The anomalous behaviour of aluminium sheet under balanced biaxial tension*. International Journal of Mechanical Sciences, 1970. **12**(4): p. 341-347.
45. Banabic, D., Müller, W., and Pöhlandt, K., *Determination of yield loci from cross tensile tests assuming various kinds of yield criteria*. Sheet metal forming beyond,

- 2000: p. 343-349.
46. Zhang, F., J. Chen, and J. Chen, *Effect of through-thickness normal stress on forming limits under Yld2003 yield criterion and MK model*. International Journal of Mechanical Sciences, 2014. **89**: p. 92-100.
 47. Ganjiani, M. and Assempour, A., *Implementation of a robust algorithm for prediction of forming limit diagrams*. Journal of Materials Engineering and Performance, 2008. **17**(1): p. 1-6.
 48. Zhang, F., and Chen, J., *Effect of through-thickness normal stress on forming limits under Yld2003 yield criterion and M-K model*. International Journal of Mechanical Sciences, 2014. **89**: p. 92-100.
 49. Aretz, H., *Applications of a new plane stress yield function to orthotropic steel and aluminium sheet metals*. Modelling and simulation in Materials Science and Engineering, 2004. **12**(3): p. 491.
 50. Banabic, D. and Vos, M., *Modelling of the forming limit band—a new method to increase the robustness in the simulation of sheet metal forming processes*. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2007. **56**(1): p. 249-252.
 51. Banabic, D., Aretz, H., Comsa, DS., *An improved analytical description of orthotropy in metallic sheets*. International Journal of Plasticity, 2005. **21**(3): p. 493-512.
 52. Banabic, D., Aretz, H., Paraianu, L., *Application of various FLD modelling approaches*. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 2005. **13**(5): p. 759.
 53. Shen, Y.Z., K.H. Oh, and D.N. Lee, *The effect of texture on the Portevin–Le Chatelier effect in 2090 Al–Li alloy*. Scripta Materialia, 2004. **51**(4): p. 285-289.
 54. Zhang, F., Chen, J., Zhu, X., *Forming limit model evaluation for anisotropic sheet metals under through-thickness normal stress*. International Journal of Mechanical Sciences, 2014. **89**: p. 40-46.
 55. Gollo, M.H., Seyedkashi, H., Shahi, S., *The Effect of Advanced BBC2003, Yld2004 and BBC2008 Yield Criteriaon FLDs Based on MK, Swift and Hill Models*. Modares Mechanical Engineering, 2015. **15**(1).

Abstract

Forming limit diagram (FLD) is a criterion to determine necking initiation under different loading paths on sheet metal which can be influenced by various intrinsic and extrinsic parameters. In recent years, several investigations have shown that the normal stress applied on sheet surface affects the material formability. This normal stress could be created by high speed impact in the rapid metal forming processes or by concentrated contact force in incremental forming processes.

In the present study, the effect of normal stress on forming limit diagram of anisotropic sheet was investigated. Based on well-known Marciniak-Kuczynski (M-K) model, the sheet had a grooved inhomogeneity. Anisotropy was considered as an inhomogeneity and uniform zone by Yld2003 and BBC2003 criteria, and plasticity theorem was used to conduct stress-strain relation in each zone. The equation of strain increments for both imperfect and perfect zone was written by using flow rule and strain compatibility and assuming incompressibility condition and regardless of elastic strain. Then stress components were obtained in uniform zone and by using transformation matrix, the stress components were obtained in inhomogeneity zone too. Strain increments were calculated in each zone by using equilibrium equation and Newton-Raphson method and this process continued to reach plastic instability. Experimental data's of other studies were used for BBC2003 and Yld2003 to verify numerical code in the present study respectively for AA6111-T43 and AA5182-O aluminum alloys. Then, forming limit diagrams strain and stress base of these two alloys for different normal stresses were obtained.

Keywords: Forming limit diagram, formability, Through thickness stress, Newton-Raphson numerical method, Marciniak-Kuczynski, Advanced yield criteria



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

**Investigation of Normal Stress Effect on The Forming Limit Diagram of Metallic Sheets
Using M-K Model**

Presented for Master of Science in Mechanical Engineering

By: Saeed Naderi Mohammad Boanlo

Supervisor

Dr. Mahdi Gerdooei

July 2016