

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی مکانیک

گروه ساخت و تولید

پایان نامه کارشناسی ارشد

بررسی تحلیلی و عددی اثر تنش در راستای ضخامت بر ناپایداری پلاستیک ورق‌های فلزی

ایمان عباسی

استاد راهنما

دکتر مهدی گردویی

بهمن ۱۳۹۳

تقدیم نامه

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 آقای مهندس حسن غفوریان نصرتی، مهندس سعید نادری و تمامی افرادی که در طی انجام این پژوهش اینجانب را صمیمانه همراهی و یاری نمودند، کمال سپاس‌گزاری را دارم.

تعهدنامه

اینجانب ایمان عباسی دانشجوی دوره‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید دانشکده‌ی مهندسی مکانیک دانشگاه شاهرود نویسنده‌ی پایان‌نامه‌ی بررسی تحلیلی و عددی اثر تنش در راستای ضخامت بر ناپایداری پلاستیک ورق‌های فلزی ، 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 شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه شاهرود» و یا «Shahrood University» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه‌ی مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه‌ی مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه‌ی 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

- کلیه‌ی حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه 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.

چکیده

استفاده از تولید محصولات پیچیده صنعتی با هدف افزایش نسبت استحکام به وزن و کاهش مصرف سوخت وسایل نقلیه در سال‌های اخیر مورد توجه صنعتگران قرار گرفته است. در این راستا از فرآیندهای نوین شکل‌دهی فلزات از جمله روش‌های شکل‌دهی با انرژی بالا مانند شکل‌دهی انفجاری، الکتروهایدرولیکی و الکترومغناطیسی استفاده می‌شود. مهم‌ترین ویژگی این فرآیندها آزادکردن انرژی زیاد در بازه زمانی خیلی کوتاه و ایجاد فشار تماسی بسیار بالا می‌باشد. تحقیقات متعدد تئوری و تجربی در سال‌های اخیر نشان می‌دهد در این فرآیندها شکل‌پذیری تحت تاثیر تنش نرمال ایجاد شده در راستای ضخامت به شدت افزایش می‌یابد. در این پژوهش به منظور دستیابی به یک حل تحلیلی دقیق برای بررسی اثر تنش در راستای ضخامت بر ناپایداری پلاستیک ایجاد شده در ورق‌های فلزی از معیار گلوبی پخشی سوئیت استفاده شد. فرضیات حل تحلیلی برای جنس ورق شامل رفتار صلب_پلاستیک، معادله‌ی سخت‌شوندگی توانی با ناهمسانگردی نرمال بوده و از ناهمسانگردی صفحه-ای ورق صرف‌نظر شده است. با نوشتن قانون جریان پلاستیک برای معیار تسلیم هیل درجه دو و غیر درجه دو در حالت عمومی (با ملاحظه‌ی تنش نرمال)، نخست ثوابت معیار تسلیم بر حسب ضریب ناهمسانگردی ورق محاسبه و سپس مقادیر تنش و کرنش بحرانی در آستانه گلوبی پخشی استخراج شد. به منظور بررسی اثر تنش در راستای ضخامت بر روی منحنی حد شکل‌دهی ورق AA6011 با استفاده از داده‌های تجربی مقاله مرجع، نخست توان مناسب معیار تسلیم تعیین و سپس منحنی حد شکل‌دهی در نسبت تنش‌های نرمال مختلف به دست آمد. نتایج این بخش نشان داد که با افزایش فشار نرمال میزان شکل‌پذیری ورق بهبود می‌یابد. در قسمت حل عددی تخمین پارگی در فرآیند انبساط‌دهی لوله فولادی زنگ‌نزن ۳۰۴ به کمک بالشتک کشسان و با استفاده از معیار شکست نرم منحنی حد شکل‌دهی انجام شد.

کلید واژه‌ها: گلویی پخشی سوئیفت، تنش در راستای ضخامت، معیار هیل غیر درجه دو، قابلیت

شکل‌دهی، ورق‌های فلزی

فهرست عنوان‌ها

تقدیم‌نامه.....	ج
سیاس‌گزاری.....	د
تعهدنامه.....	ه
چکیده.....	و
فهرست عنوان‌ها.....	ح
فهرست شکل‌ها.....	ک
فهرست جدول‌ها.....	خ
فهرست نشانه‌ها.....	س
فصل ۱ مقدمه.....	۱
۱-۱ مقدمه.....	۲
۲-۱ ناهمسانگردی پلاستیک ورق‌های فلزی.....	۶
۳-۱ معیارهای تسلیم.....	۸
۱-۳-۱ خانواده معیارهای تسلیم ناهمسانگرد هیل.....	۹
۲-۳-۱ معیارهای تسلیم بر پایه ساختار کریستالی.....	۱۰
۴-۱ اصل تعامد و قانون جریان.....	۱۱
۵-۱ رابطه توانی هولومن.....	۱۲
۶-۱ مفاهیم اولیه در بارگذاری صفحه‌ای.....	۱۳
۱-۶-۱ بارگذاری تک‌محوره.....	۱۳
۲-۶-۱ نموهای کرنش اصلی.....	۱۳
۳-۶-۱ شرط حجم ثابت (تراکم ناپذیری).....	۱۴
۴-۶-۱ تغییر شکل تنش صفحه‌ای.....	۱۵
۵-۶-۱ نسبت‌های تنش و کرنش.....	۱۵
۶-۶-۱ کرنش در راستای ضخامت.....	۱۶
۷-۱ گلوئی شدن.....	۱۶

۱۸	۸-۱ قابلیت شکل پذیری و اهمیت آن در طراحی فرآیندها.....
۱۸	۹-۱ منحنی‌های حد شکل دهی.....
۲۲	۱-۹-۱ نمودار حد تنش شکل دهی (FLSD).....
۲۳	۲-۹-۱ منحنی‌های حد شکل دهی توسعه یافته.....
۲۴	۱۰-۱ روش‌های تئوری بررسی شکل پذیری ورق.....
۲۵	۱-۱۰-۱ تئوری انشقاق نیرو یا ناپایداری سوئفت.....
۲۵	۲-۱۰-۱ تئوری انشقاق تنش یا ناپایداری هیل.....
۲۵	۳-۱۰-۱ تئوری گوشه یا انشقاق استورن-رایس.....
۲۶	۴-۱۰-۱ تئوری مارسینیاک - کوزینسکی.....
۲۷	۵-۱۰-۱ تحقیقات تئوری بر پایه مدل خرابی.....
۲۸	۱۱-۱ پارامترهای موثر بر شکل پذیری ورق.....
۲۸	۱-۱۱-۱ مشخصه‌های ذاتی ورق.....
۲۸	۲-۱۱-۱ مشخصه‌های محیطی ورق.....
۲۹	۱۲-۱ پیشینه‌ی تحقیق.....
۳۴	۱۳-۱ اهداف پایان‌نامه.....

فصل ۲ تحلیل ناپایداری پلاستیک بر اساس معیار تسلیم هیل درجه دو.....۳۷

۳۸	۱-۲ مقدمه.....
۳۸	۲-۲ معیار تسلیم هیل درجه دو و تعریف ضرایب ناهمسانگردی.....
۴۳	۳-۲ تحلیل ناپایداری بر اساس روش سوئفت و معیار تسلیم هیل درجه دو در حالت سه‌بعدی..
۵۱	۴-۲ محاسبه تنش‌ها در لحظه شروع ناپایداری پلاستیک.....

فصل ۳ تحلیل ناپایداری پلاستیک بر اساس معیار تسلیم هیل غیر درجه دو.....۵۳

۵۴	۱-۳ مقدمه.....
۵۴	۲-۳ رفتار غیر واقعی معیار تسلیم هیل درجه دو.....
۵۴	۱-۲-۳ ناتوانی معیار تسلیم هیل درجه دو در پیش‌بینی تنش تسلیم دو محوری یکسان.....
۵۵	۲-۲-۳ رفتار غیر واقعی هیل درجه دو در پیش‌بینی اثر ضریب ناهمسانگردی بر شکل پذیری.....
۵۵	۳-۳ حالت‌های مختلف معیار تسلیم هیل.....
۵۶	۱-۳-۳ حالت اول.....
۵۷	۲-۳-۳ حالت دوم.....
۵۸	۳-۳-۳ حالت سوم.....
۶۰	۴-۳-۳ حالت چهارم.....
۶۱	۵-۳-۳ حالت پنجم.....

۴-۳ محاسبه کرنش ناپایداری پلاستیک..... ۶۲

فصل ۴ تحلیل عددی شکل پذیری لوله فولادی به کمک دیاگرام FLD وابسته به فشار ۶۵

۱-۴ مقدمه..... ۶۶

۲-۴ معرفی نرم افزار شبیه سازی..... ۶۶

۳-۴ شرح مدل عددی..... ۶۷

۱-۳-۴ تحلیل شکست نرم به کمک نمودار حد شکل دهی..... ۷۰

۲-۳-۴ مدل سازی درز لوله با یک نقص مکانیکی..... ۷۱

فصل ۵ ارائه نتایج و بحث..... ۷۵

۱-۵ مقدمه..... ۷۶

۲-۵ نتایج حل عددی..... ۷۶

۱-۲-۵ تعیین مدل مناسب از حالات مختلف معیار تسلیم هیل غیر درجه دو در حالت

تنش صفحه ای..... ۷۶

۲-۲-۵ استخراج توان مناسب معیار تسلیم هیل غیر درجه دو..... ۷۷

۳-۲-۵ شرح محاسبه نسبت تنش نرمال و ترسیم نمودار حد شکل دهی تحت فشار..... ۷۸

۳-۵ نتایج حل تحلیلی..... ۸۲

۱-۳-۵ مقایسه اثر ضریب ناهمسانگردی بر شکل پذیری فولاد زنگنزن ۳۰۴ در معیار تسلیم

هیل درجه دو و غیر درجه دو..... ۸۲

۲-۳-۵ تعیین مدل مناسب از حالات مختلف معیار تسلیم هیل غیر درجه دو، برای ورق

AA6011..... ۸۵

۳-۳-۵ استخراج توان مناسب معیار تسلیم هیل غیر درجه دو، برای ورق AA6011..... ۸۶

۴-۳-۵ اثر تنش نرمال بر شکل پذیری ورق AA6011، در اولین حالت از معیار تسلیم هیل غیر

درجه دو..... ۸۷

فصل ۶ نتیجه گیری و پیشنهادها..... ۹۱

۱-۶ نتیجه گیری..... ۹۲

۲-۶ پیشنهادها..... ۹۴

منابع..... ۹۵

Abstract..... ۹۸

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱ عیوب بوجود آمده در ورق‌های فلزی [۱]..... ۳
- شکل ۲-۱ فرآیندهای سنتی شکل‌دهی ورق [۲]..... ۴
- شکل ۳-۱ روش‌های شکل‌دهی سریع بر پایه‌ی نوع انرژی اعمالی..... ۵
- شکل ۴-۱ جهت‌های اصلی در یک ورق فلزی [۱]..... ۶
- شکل ۵-۱ هندسه یک نمونه، الف) قبل از تغییرشکل، ب) بعد از تغییرشکل [۱]..... ۷
- شکل ۶-۱ تنش تسلیم تک‌محوره نسبت به یک جهت در صفحه ورق [۱]..... ۸
- شکل ۷-۱ سطح تسلیم سه‌بعدی با کرنش $d\varepsilon$ عمود بر سطح تسلیم [۸]..... ۱۲
- شکل ۸-۱ نمایش قائم بودن در ارتباط با مکان هندسی تسلیم [۸]..... ۱۲
- شکل ۹-۱ المان در یک نمونه آزمون کشش که نشان‌دهنده جهات اصلی است [۲]..... ۱۳
- شکل ۱۰-۱ تنش‌ها و کرنش‌های اصلی برای المان تغییر شکل یافته، الف) تنش صفحه‌ای، ب) کشش تک محوری [۲]..... ۱۶
- شکل ۱۱-۱ گلوپی شدن پختی و موضعی ورق تحت کشش [۸]..... ۱۷
- شکل ۱۲-۱ گلوپی شدن ورق تحت کشش، الف) کشش دو محوری، ب) کشش تک‌محوری [۲]..... ۱۷
- شکل ۱۳-۱ FLD تجربی برای آلومینیوم ۲۰۳۶-T۴ و فولاد A-K [۹]..... ۱۹
- شکل ۱۴-۱ حالات شکل‌دهی ورق در مسیرهای مختلف کرنش [۲]..... ۲۰
- شکل ۱۵-۱ چارچوب شکل‌دهی در حالت تنش صفحه‌ای برای ورق فلزی [۲]..... ۲۱
- شکل ۱۶-۱ نمای شماتیک یک FLD با توجه به مسیر بارگذاری..... ۲۲
- شکل ۱۷-۱ الف) نمودار تنش حدی شکل‌دهی (FLSD) ب) نمودار حد شکل‌دهی (FLD) [۱۰]..... ۲۳
- شکل ۱۸-۱ نمودار XSFLC در مسیرهای مختلف [۱۱]..... ۲۴
- شکل ۱۹-۱ مدل‌های تئوری ترسیم منحنی‌های حد شکل‌دهی فلزات [۱۲]..... ۲۴

- شکل ۱-۲۰ ورق دارای نقص اولیه در مدل اولیه ی M-K ۲۷
- شکل ۱-۲۱ آزمون تجربی شکل دهی الکترومغناطیس نمونه فولادی [۱۹] ۳۱
- شکل ۱-۲۲ کرنش شکست برای آزمون کشش تک محوره و آزمون شکل دهی الکترومغناطیسی فولاد شماره ۱ [۱۹] ۳۲
- شکل ۲-۱-۱ اثر ضریب ناهمسانگردی r_0 بر شکل تابع تسلیم هیل ۴۸ [۱] ۴۲
- شکل ۲-۲-۱ اثر ضریب ناهمسانگردی r_{90} بر شکل تابع تسلیم هیل ۴۸ [۱] ۴۲
- شکل ۲-۳-۱ اثر ضریب ناهمسانگردی نرمال بر شکل تابع تسلیم هیل ۴۸ [۱] ۴۳
- شکل ۲-۴-۱ تاثیر افزایش توان کرنش سختی n بر منحنی حد شکل دهی [۲] ۵۱
- شکل ۴-۱-۱: ابعاد و نحوه چیدمان اجزاء در شبیه سازی (ابعاد بر حسب میلی متر) ۶۸
- شکل ۴-۲: منحنی تنش-کرنش لوله فولادی [۲۸] ۶۹
- شکل ۴-۳: برازش خطی $\ln \bar{\sigma}$ بر حسب $\ln \bar{\epsilon}$ ۷۰
- شکل ۴-۴: مقایسه وضعیت فعلی کرنش با وضعیت بحرانی در تعریف پارامتر حد شکل دهی در نرم افزار آباکوس ۷۱
- شکل ۴-۵: تعریف خواص مکانیکی ناحیه نقص و ناحیه سالم ۷۲
- شکل ۴-۶ منحنی حد شکل دهی برای ناحیه سالم و ناحیه نقص از لوله فولادی زنگ نزن ۳۰۴ ، بدون اعمال اثر فشار ۷۳
- شکل ۴-۷ منحنی حد شکل دهی برای ناحیه سالم و ناحیه نقص از لوله فولادی زنگ نزن ۳۰۴ ، با اعمال اثر فشار ۷۳
- شکل ۵-۱ نمودار حد شکل دهی ورق فولادی زنگ نزن ۳۰۴ [۲۹] ۷۶
- شکل ۵-۲ نمودار حد شکل دهی ورق فولادی زنگ نزن ۳۰۴ در پنج حالت از معیار تسلیم هیل غیر درجه دو ۷۷
- شکل ۵-۳ نمودار حد شکل دهی ورق فولادی زنگ نزن ۳۰۴ به ازای مقادیر مختلف نمای m ۷۸
- شکل ۵-۴ نسبت فشار تماسی به تنش اصلی بیشینه در طول ناحیه بالچ ۷۹

- شکل ۵-۵ مسیر طولی تعریف شده در ناحیه بالچ ۷۹
- شکل ۵-۶ نمودار کرنش طولی و محیطی در قله بالچ بر حسب زمان از شبیه‌سازی عددی ۷۹
- شکل ۵-۷ توزیع فاکتور شکل‌پذیری در آستانه پارگی لوله ۸۰
- شکل ۵-۸ توزیع کرنش موثر پلاستیک در آستانه پارگی لوله ۸۰
- شکل ۵-۹ توزیع جابجایی شعاعی بر حسب متر ۸۱
- شکل ۵-۱۰ نمودار درصد عمق بالچ به قطر اولیه در طول ناحیه بالچ ۸۲
- شکل ۵-۱۱ اثر ضریب ناهمسانگردی در ورق فولادی زنگ‌زن ۳۰۴ ۸۳
- شکل ۵-۱۲ اثر ضریب ناهمسانگردی در ورق فولادی زنگ‌زن ۳۰۴ ۸۴
- شکل ۵-۱۳ منحنی حد شکل‌دهی ترسیم شده با معیار تسلیم هیل درجه دو، به ازای مقادیر مختلف ضریب ناهمسانگردی [۸] ۸۴
- شکل ۵-۱۴ منحنی حد شکل‌دهی ترسیم شده با معیار تسلیم هیل غیر درجه دو، به ازای مقادیر مختلف ضریب ناهمسانگردی [۸] ۸۵
- شکل ۵-۱۵ منحنی FLD ورق AA6011 در پنج حالت از معیار تسلیم هیل غیر درجه دو ۸۶
- شکل ۵-۱۶ نمودار حد شکل‌دهی ورق AA6011 به ازای مقادیر مختلف m ۸۶
- شکل ۵-۱۷ اثر نسبت تنش نرمال بر روی منحنی حد شکل‌دهی AA6011 در اولین حالت از معیار تسلیم هیل غیر درجه دو ۸۷
- شکل ۵-۱۸ تعریف پارامتر بهبود شکل‌پذیری در یک مسیر دلخواه روی منحنی حد شکل‌دهی ۸۷
- شکل ۵-۱۹ منحنی پارامتر بهبود شکل‌پذیری بر حسب نسبت β ۸۸
- شکل ۵-۲۰ منحنی پارامتر بهبود شکل‌پذیری در مسیر $\beta=0$ بر حسب ضریب ناهمسانگردی ۸۹
- شکل ۵-۲۱ منحنی پارامتر بهبود شکل‌پذیری در مسیر $\beta=0$ بر حسب توان کار سختی ۸۹

فهرست جدول‌ها

جدول ۱-۱: خواص مکانیکی ورق فولادی [۱۹].....	۳۱
جدول ۲-۱: جزئیات آزمون شکل‌دهی الکترومغناطیس برای حالات مختلف [۱۹].....	۳۲
جدول ۱-۴: خواص پلی‌اورتان مورد استفاده.....	۶۹
جدول ۲-۴: خصوصیات فیزیکی و مکانیکی لوله فولادی [۲۸].....	۶۹
جدول ۱-۵: خواص مکانیکی ورق AA6011 [۲۴].....	۸۵
جدول ۲-۵: پارامتر بهبود شکل‌پذیری در مسیرهای مختلف کرنش برای ورق AA6011.....	۸۸

فهرست نشانه‌ها

ε_w	کرنش عرضی	σ_1	تنش اصلی طولی
ε_t	کرنش ضخامتی	σ_2	تنش اصلی عرضی
$\bar{\varepsilon}$	کرنش موثر	σ_3	تنش اصلی در راستای ضخامتی
$d\varepsilon_1$	نمو کرنش اصلی بزرگ	σ_θ	تنش در راستای θ
$d\varepsilon_2$	نمو کرنش اصلی کوچک	Y_θ	تنش تسلیم در راستای θ
$d\varepsilon_3$	نمو کرنش در راستای ضخامت	σ_{eq}	تنش معادل
$\bar{r}$	ضریب ناهمسانگردی نرمال	σ_{hyd}	تنش هیدرواستاتیکی
r_θ	ضریب ناهمسانگردی در جهت θ	$\bar{\sigma}$	تنش موثر
r_0	ضریب ناهمسانگردی در جهت نورد	X	تنش تسلیم در جهت اصلی ۱
	ضریب ناهمسانگردی در جهت عمود بر نورد	Y	تنش تسلیم در جهت اصلی ۲
r_{90}		Z	تنش تسلیم در جهت اصلی ۳
	ضریب ناهمسانگردی در راستای ۴۵ درجه	R	تنش تسلیم برشی در جهت اصلی ۱
r_{45}		S	تنش تسلیم برشی در جهت اصلی ۲
TD	جهت عرضی	T	تنش تسلیم برشی در جهت اصلی ۳
ND	جهت عمود بر نورد	ε_1	کرنش اصلی بزرگ
RD	جهت نورد	ε_2	کرنش اصلی کوچک
α	نسبت تنش	ε_3	کرنش در راستای ضخامت
β	نسبت کرنش	ε_1^*	کرنش بحرانی بزرگ
γ	نسبت تنش نرمال	ε_2^*	کرنش بحرانی کوچک

w_{FLD}	شاخص شکل پذیری FLD	m	نمای معیار تسلیم هیل
f	ضریب نقص	a	نمای معیار تسلیم هاسفورد
φ	تابع تسلیم	M	نمای معیار تسلیم بارلات
D	قطر بالچ	$d\lambda$	ثابت قانون جریان
ξ	پارامتر بهبود شکل پذیری	K	ضریب استحکام
L_n	طول بالچ نرماله شده	n	توان کرنش سختی
H_n	درصد بالچ	t	ضخامت ورق
	ثوابت معیار تسلیم هیل ۴۸	l	طول ورق
	F, G, H, L, M, N	w	عرض ورق
	ثوابت معیار تسلیم هیل ۷۹	P	فشار
	f, g, h, a, b, c		

فصل ۱ مقدمه

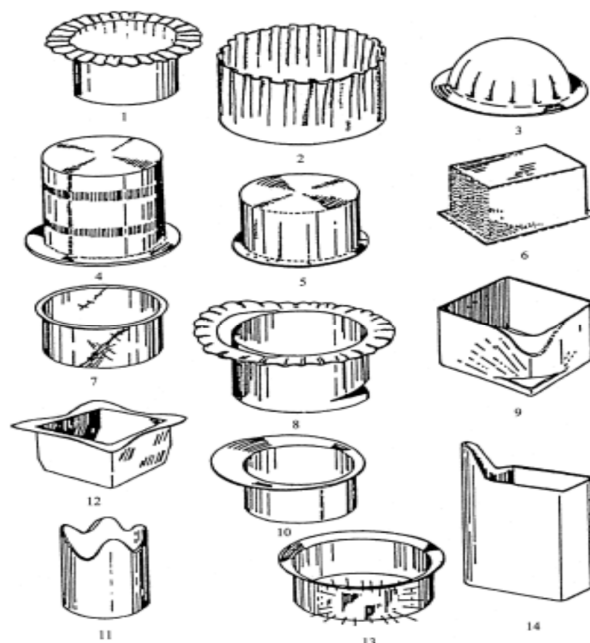
۱-۱ مقدمه

فرآیند شکل‌دهی ورق‌های فلزی^۱ از مهمترین عملیات بر روی فلزات به شمار می‌رود، حجم وسیعی از محصولات فلزی تولید شده در کشورهای صنعتی بر پایه این فرآیند می‌باشد. شکل‌دهی ورق‌های فلزی عبارت است از انجام تغییرشکل پلاستیک عمدی مشخص، بر روی ورق فلزی مسطح، جهت تولید یک قطعه مهندسی با شکل خاص. امروزه این فرآیندها در تولید قطعات خودرو، لوازم خانگی، محصولات ساختمانی، صنایع غذایی و صنایع هواپیمایی بیشترین استفاده را دارد. در قطعات تولید شده از ورق‌های فلزی، به علت مدول الاستیک و تنش تسلیم بالای جنس ورق و همچنین شکل خاص این قبیل محصولات، به نسبت بالای استحکام به وزن می‌توان دست یافت.

لزوم کاهش هزینه و افزایش عملکرد قطعات تولیدی و کاهش هر چه بیشتر وزن قطعات به همراه افزایش استحکام آنها، نیاز به تعیین مرزهای محدود کننده‌ی شکل‌دهی را توجیه می‌کند. هرچند که از جمله مزایای ورق‌های فلزی، مدول کشسانی بالا و استحکام زیاد است به گونه‌ای که قطعات تولید شده از ورق‌ها سخت بوده و از نسبت استحکام به وزن مطلوبی برخوردارند، اما بازار گسترده ورق‌های فلزی در صنایع همواره استفاده از ورق‌هایی با استحکام بالاتر را مقرون به صرفه می‌سازد. توسعه فرآیند تولید بهینه در شکل‌دهی ورق‌های فلزی، نیازمند فهم و دانش کاملی از عیوب به وجود آمده حین شکل‌دادن ورق‌های فلزی است. نمونه‌ای از این عیوب در شکل ۱-۱ نشان داده شده است. فرآیندهای متعددی جهت تغییرشکل ورق مورد استفاده قرار می‌گیرد، که از منظر تجهیزات این فرآیندها در دو گروه روش‌های شکل‌دهی سنتی و روش‌های شکل‌دهی نوین تقسیم‌بندی می‌شود. در روش‌های شکل‌دهی سنتی عموماً از نیروی پرس‌های مکانیکی و هیدرولیکی جهت شکل‌دهی استفاده می‌شود، سرعت پایین فرآیند، نیروهای تماسی بالا، اصطکاک بالا و راندمان

¹Sheet metals forming

فرآیند پایین است. از مهمترین این روش‌ها می‌توان به برش‌کاری^۱، خم‌کاری^۲، اتساع^۳، کشش عمیق^۴، چرخ‌کاری^۵ و نورد^۶ ورق‌های فلزی اشاره کرد. شکل ۱-۲ نمای شماتیک این فرآیندها را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱ عیوب بوجود آمده در ورق‌های فلزی [۱]

پارگی بعضی از ورق‌های خاص در کرنش‌های پایین، کندبودن فرآیندهای سنتی شکل‌دهی و همچنین ضرورت شکل‌دهی در ابعاد غیر معمول از جمله عوامل پایه‌گذاری فرآیندهای خاص شکل‌دهی بوده است. از جمله‌ی این فرآیندها می‌توان به روش‌های شکل‌دهی با انرژی بالا^۷ مانند شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی^۸، الکترومغناطیسی^۹ و انفجاری^{۱۰} ورق‌ها اشاره کرد (شکل ۱-۳).

^۱ Cutting

^۲ Bending

^۳ Stretching

^۴ Deep drawing

^۵ Spining

^۶ Rolling

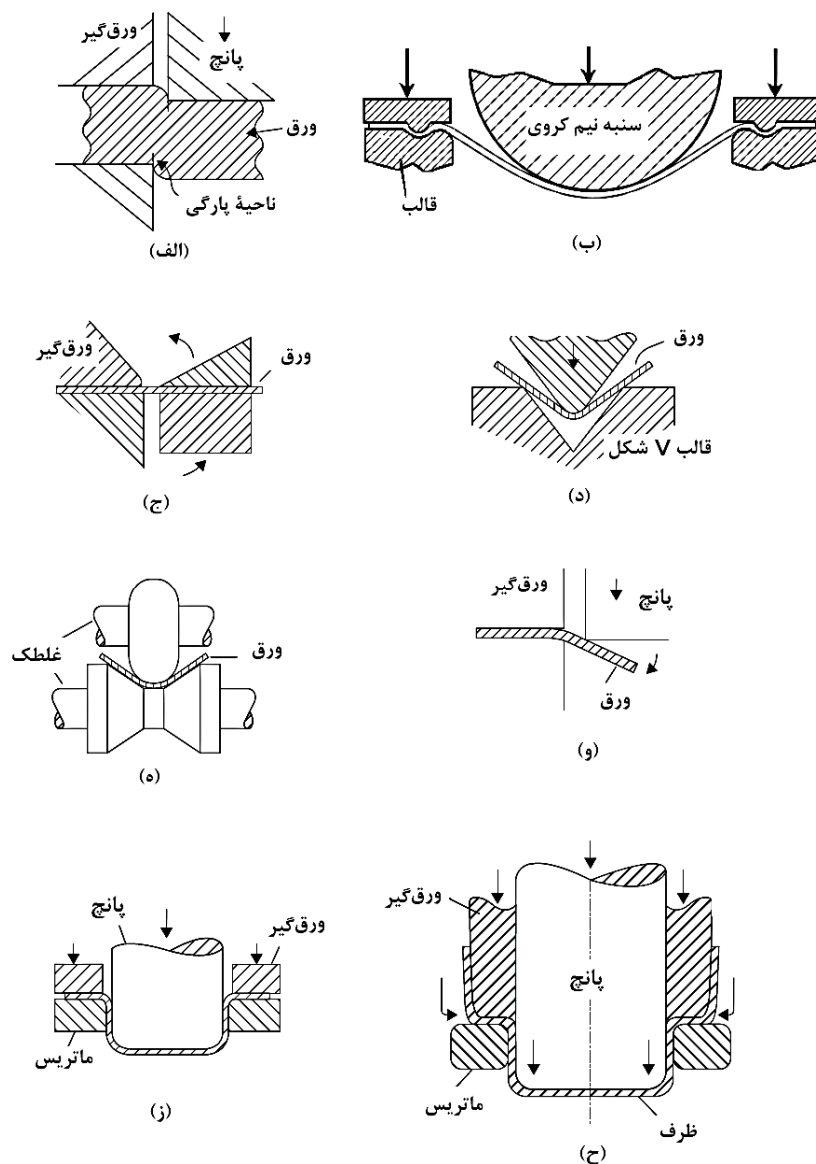
^۷ High energy rate forming (HERF)

^۸ Electrohydraulic forming

^۹ Electromagnetic forming

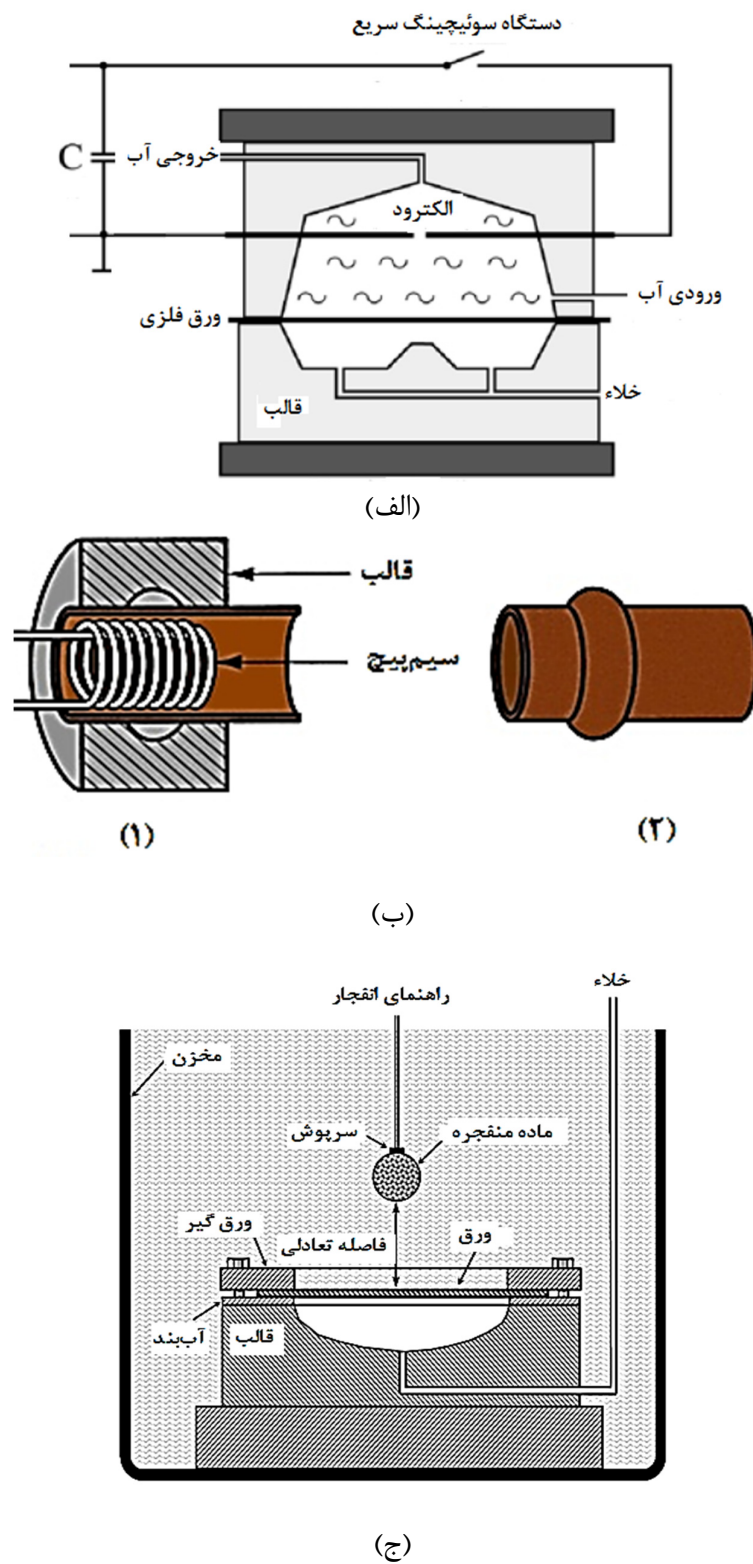
^{۱۰} Explosive forming

از آنجایی که مشخصه‌ی اصلی این فرآیندها سرعت بالای تغییر شکل می‌باشد، به آن‌ها فرآیندهای شکل‌دهی سریع نیز گفته می‌شود.



شکل ۱-۲ فرآیندهای سنتی شکل‌دهی ورق [۲]

لف (برش کاری، ب) اتساع، ج) خم کاری بر روی دستگاه خم، د) خم کاری با قالب V شکل،
ه) خم کاری با غلتک، و) خم کاری با قالب کناره، ز) مرحله‌ی اول کشش عمیق، ح) مرحله‌ی دوم کشش عمیق

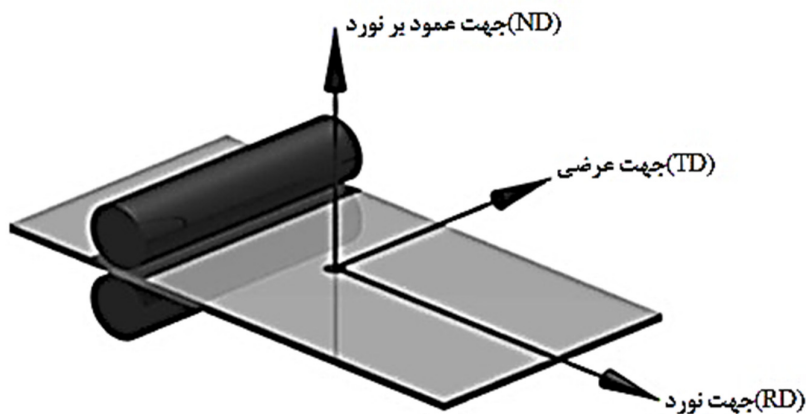


شکل ۱-۳ روش‌های شکل‌دهی سریع بر پایه‌ی نوع انرژی اعمالی

(الف) شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی، (ب) شکل‌دهی الکترومغناطیسی، (ج) شکل‌دهی انفجاری

۲-۱ ناهمسانگردی^۱ پلاستیک ورق‌های فلزی

ماده‌ای که خواص اندازه‌گیری شده یکسانی در هر جهت دارد همسانگرد نامیده می‌شود. اما بیشتر ورق‌های صنعتی خواص متفاوتی را در راستاهای مختلف، برای مثال در جهت‌های نورده، عرضی و ۴۵ درجه، نشان می‌دهند. این تغییرات، ناهمسانگردی صفحه‌ای^۲ نامیده می‌شود. به علاوه، بین میانگین خواص در صفحه ورق و در جهت ضخامت ممکن است اختلاف وجود داشته باشد. در آزمون‌های کشش برای ماده‌ای که خواص یکسانی در تمام جهت‌ها دارد، انتظار می‌رود که به دلیل تقارن، کرنش‌های عرضی و ضخامتی با هم برابر باشد. در غیر این صورت بیان‌گر مقداری ناهمسانگردی است. در شکل ۴-۱ جهت‌های اصلی در یک ورق فلزی نشان داده شده است.



شکل ۴-۱ جهت‌های اصلی در یک ورق فلزی [۱]

برای موادی که خواصشان به جهت وابسته است، حالت ناهمسانگردی معمولاً با مقدار r مشخص می‌شود.

شود. این مقدار به صورت نسبت کرنش عرضی، $\epsilon_w = \ln \frac{w}{w_0}$ به کرنش در راستای ضخامت^۳،

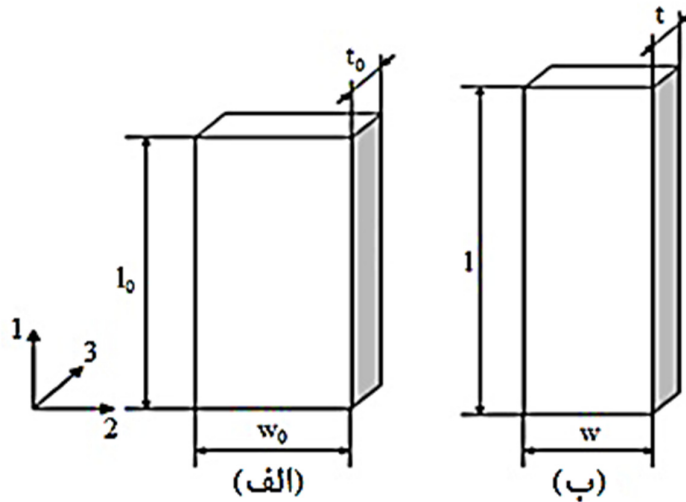
$\epsilon_t = \ln \frac{t}{t_0}$ تعریف می‌شود. در بعضی موارد، کرنش ضخامتی به صورت مستقیم اندازه‌گیری می‌شود،

^۱ Anisotropy

^۲ Plane anisotropy

^۳ Through thickness stress

اما از اندازه‌گیری کرنش طولی و عرضی و اعمال فرض حجم ثابت نیز قابل محاسبه است. در شکل ۵-۱ هندسه یک نمونه قبل و بعد از تغییر شکل نشان داده شده است.



شکل ۵-۱ هندسه یک نمونه، (الف) قبل از تغییر شکل، (ب) بعد از تغییر شکل [۱]

لذا مقدار r به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$r = \frac{\ln \frac{w}{w_0}}{\ln \frac{w_0 l_0}{w l}} \quad (۱-۱)$$

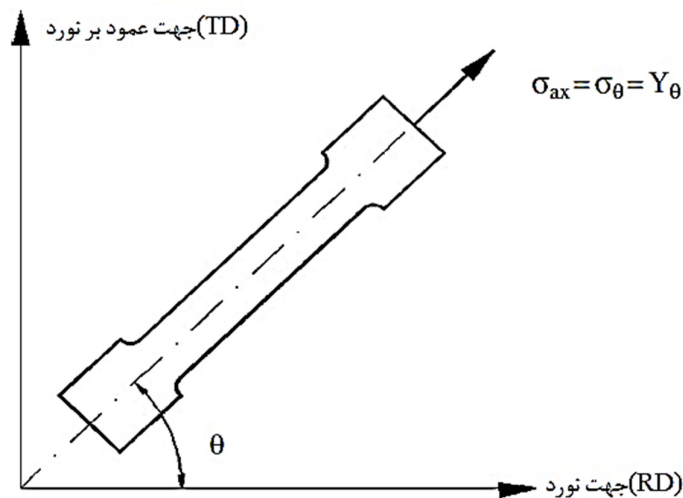
اگر در طی آزمایش تغییر در عرض اندازه‌گیری شود، مقدار r را می‌توان به طور پیوسته محاسبه نمود و ممکن است تغییراتی در این مقدار با تغییر کرنش مشاهده شود. اغلب اندازه‌گیری‌ها در یک کرنش خاص (در حدود ۰.۱۵-۰.۱۰٪) صورت می‌گیرد، و جهتی که در آن، مقدار r اندازه‌گیری می‌شود با یک زیر نویس مشخص می‌شود، یعنی r_0 ، r_{90} و r_{45} به ترتیب برای آزمایش‌هایی در جهات نورد، عرضی و قطری. برای تعیین ناهمسانگردی ورق‌های فلزی، نمونه‌هایی از آن در سه جهت موازی، عمود و با زاویه‌ی ۴۵ درجه نسبت به جهت نورد، ماشین‌کاری شده و تحت آزمون کشش قرار می‌گیرد (شکل ۶-۱). اگر برای یک ماده معین، این مقادیر متفاوت باشند، ورق دارای ناهمسانگردی صفحه‌ای است و

معمول‌ترین تعریف برای این حالت عبارت است از:

$$\Delta r = \frac{r_0 + r_{90} - 2r_{45}}{4} \quad (2-1)$$

که ممکن است مثبت یا منفی باشد. اگر مقدار r اندازه‌گیری شده غیر از مقدار واحد باشد، نشان‌دهنده اختلاف بین خواص صفحه‌ای و ضخامتی متوسط است، که با ضریب ناهمسانگردی نرمال^۱ بیان و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\bar{r} = \frac{r_0 + r_{90} + 2r_{45}}{4} \quad (3-1)$$



شکل ۱-۶ تنش تسلیم تک‌محوره نسبت به یک جهت در صفحه ورق [۱]

۳-۱ معیارهای تسلیم

در حالت کشش تک محوره، هنگامی تغییر شکل از حالت الاستیک به پلاستیک رخ می‌دهد، که تنش‌ها به نقطه تسلیم برسند. در حالت کشش تک محوره، نقطه تسلیم به کمک نمودار تنش-کرنش ماده قابل محاسبه است. در حالت کشش چند محوره بیان یک معیار برای توصیف تغییر شکل از حالت الاستیک به پلاستیک مشکل‌تر است. برای بیان شرایطی که تحت آن جریان پلاستیک رخ می‌دهد به

^۱ Normal anisotropy coefficient

رابطه میان تنش‌های اصلی نیاز است که چنین رابطه‌ای معمولاً به صورت یک تابع ضمنی بیان می‌شود:

$$\varphi(\sigma_{ij}) = 0 \quad i, j = x, y, z \quad (4-1)$$

در این رابطه σ_{ij} مولفه‌های تانسور تنش و φ تابع تسلیم می‌باشد. که این معادله در حالت خاص توصیف ریاضی از یک سطح در فضای سه‌بعدی بر حسب مولفه‌های تانسور تنش اصلی خواهد بود، که سطح تسلیم نامیده می‌شود. همه نقاطی که داخل این سطح قرار می‌گیرند ($\varphi < 0$)، در حالت الاستیک قرار دارند و نقاطی که روی سطح واقع می‌شوند ($\varphi = 0$)، بیان‌کننده حالت پلاستیک می‌باشد. نقاطی که خارج از سطح واقع می‌شوند ($\varphi > 0$) مفهوم فیزیکی ندارد.

۱-۳-۱ خانواده معیارهای تسلیم ناهمسانگرد هیل^۱

رادنی هیل (متولد ۱۹۲۱ در لیدز) درجه MA (۱۹۴۶)، phd (۱۹۴۸) و sc (۱۹۵۹) خود را از دانشگاه کمبریج دریافت کرد. کتاب او، نظریه ریاضی مومسانی [۳] از کتاب‌های کلاسیک به شمار می‌رود. این کتاب شامل پژوهشی اصیل روی کاربردهای میدان خط لغزش و معرفی نخستین نظریه کامل ناهمسانگردی مومسان است. در سال ۱۹۴۸ هیل ناهمسانگردی مومسان را بدون توجه به منشاء بلورشناختی آن، به طور کمی فرمول‌بندی کرد. او فرض کرد که هر ماده همگن با سه محور متعامد ناهمسانگردی ۱، ۲ و ۳ مشخص می‌شود که خواص ماده حول آنها تقارن درجه دو دارند. در ورق نورد شده ۱، ۲ و ۳ را به ترتیب در امتداد نورد، عمود بر جهت نورد و ضخامت آن در نظر می‌گیرند. در این نظریه فرض می‌شود که استحکام کششی و فشاری در هر امتداد مفروض برابر است. معیار تسلیم ناهمسانگرد درجه‌ی دو^۲ پیشنهادی به صورت زیر است [۴]:

$$2\varphi(\sigma_{ij}) = F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L\sigma_{23}^2 + 2M\sigma_{31}^2 + 2N\sigma_{12}^2 = 1 \quad (5-1)$$

^۱ Hill's family yield criteria

^۲ Quadratic anisotropic yield criterion

φ تابع تسلیم، F, G, H, L, M و N ثوابت ناهمسانگردی جنس ورق است و ناهمسانگردی را مشخص می‌کند. ثابت‌های F, G و H را می‌توان با انجام آزمون‌های کشش ساده به دست آورد. معیار تسلیم هیل در حالت سه محوره با عنوان معیار تسلیم هیل غیر درجه دو^۱ بر اساس تنش‌های اصلی به صورت زیر بیان می‌شود [۵]:

$$f |\sigma_2 - \sigma_3|^m + g |\sigma_3 - \sigma_1|^m + h |\sigma_1 - \sigma_2|^m + a |2\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3|^m + b |2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3|^m + c |2\sigma_3 - \sigma_1 - \sigma_2|^m = \bar{\sigma}^m \quad (6-1)$$

f, g, h, a, b, c مقادیر ثابت، m توان معیار تسلیم هیل غیر درجه دو، $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ تنش‌های اصلی و $\bar{\sigma}$ تنش موثر می‌باشد.

۱-۳-۲ معیارهای تسلیم بر پایه ساختار کریستالی

علاوه بر مجموعه معیارهای تسلیم هیل، خانواده دیگری از معیارهای تسلیم مواد ناهمسانگرد، بر پایه ساختار کریستالی مطرح است، که از این خانواده می‌توان به معیارهای تسلیم هاسفورد و بارلات اشاره کرد.

معیار تسلیم هاسفورد^۲ به صورت زیر تعریف شد [۶]:

$$F |\sigma_{22} - \sigma_{33}|^a + G |\sigma_{33} - \sigma_{11}|^a + H |\sigma_{11} - \sigma_{22}|^a = \sigma^a \quad (7-1)$$

در این رابطه F, G و H مقادیر ثابت و a نمای معیار می‌باشد. نمای ۶ برای فلزاتی با ساختار BCC و نمای ۸ برای فلزاتی با ساختار FCC می‌باشد.

بارلات و ریچموند یک شکل عمومی‌تر از معیار تسلیم هاسفورد را برای مواد همسانگرد به صورت زیر پیشنهاد دادند که به معیار تسلیم بارلات^۳ ۱۹۸۹ شهرت یافت [۷]:

$$\varphi = |k_1 + k_2|^M + |k_1 - k_2|^M + 2|k_2|^M = 2\sigma_e^M \quad (8-1)$$

^۱ Hill's Non-quadratic yield criterion

^۲ Hosford yield criterion

^۳ Barlat yield criterion

k_1 و k_2 نامتغیرهای تانسور تنش^۱ می‌باشند، M عدد صحیحی می‌باشد که همانند معیار هاسفورد تعریف می‌شود. ثابت‌های k_1 و k_2 از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$k_1 = \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22}}{2}, \quad k_2 = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{2}\right)^2 + \sigma_{12}^2} \quad (9-1)$$

۱-۴ اصل تعامد^۲ و قانون جریان^۳

برای تعیین رابطه بین مؤلفه‌های تنش و کرنش در لحظه تسلیم، اصل قائم بودن مطرح می‌شود. بر اساس اصل تعامد، جمع برداری تغییرات مؤلفه‌های کرنش، بر سطح تسلیم عمود است [۸]. این تعبیر به صورت سه‌بعدی در شکل ۷-۱ و به صورت دوبعدی در شکل ۸-۱ نشان داده شده است. برای بیان رابطه میان کرنش‌های حاصل از تغییر شکل مومسان، قانون جریان کاربرد دارد. این قانون در کلی-ترین صورت خود به صورت زیر است:

$$d\varepsilon_{ij} = d\lambda \frac{\partial \varphi}{\partial \sigma_{ij}} \quad (10-1)$$

در این رابطه، φ تابعی از σ_{ij} است که سطح تسلیم را توصیف می‌کند. در جامدهای همسانگرد^۴ جهت‌های کرنش اصلی و تنش اصلی بر هم منطبق‌اند، لذا رابطه زیر حاصل می‌شود:

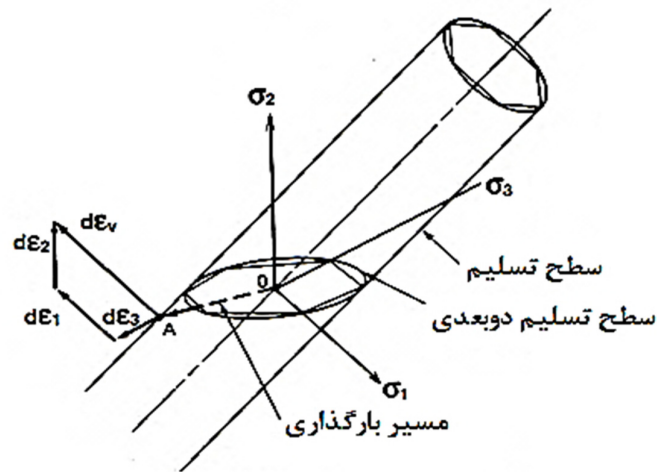
$$\frac{d\varepsilon_2}{d\varepsilon_1} = -\frac{\partial \sigma_1}{\partial \sigma_2} \quad (11-1)$$

^۱ Stress tensor invariant

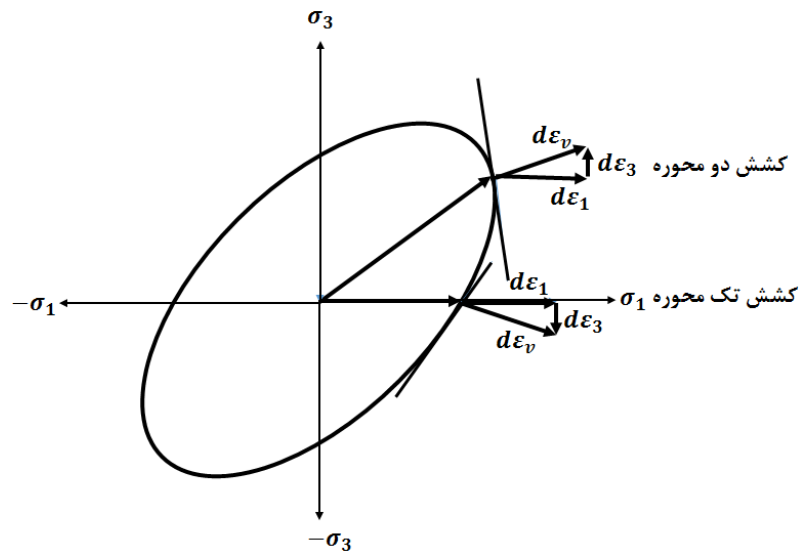
^۲ Orthogonality principle

^۳ Flow rule

^۴ Isotropic solids



شکل ۱-۷ سطح تسلیم سه‌بعدی با کرنش $d\epsilon_v$ عمود بر سطح تسلیم [۸]



شکل ۱-۸ نمایش قائم بودن در ارتباط با مکان هندسی تسلیم [۸]

۱-۵ رابطه توانی هولومن^۱

براساس این رابطه، تنش موثر با کرنش موثر طبق یک رابطه نمایی با یکدیگر مرتبط می‌شوند [۸].

$$\bar{\sigma} = K \bar{\epsilon}^n \quad (۱۲-۱)$$

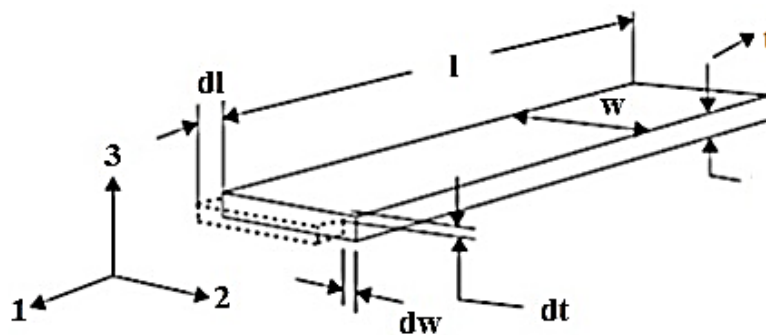
^۱ Holloman power law relation

n توان کار سختی، $\bar{\epsilon}$ کرنش موثر، K ضریب استحکام و $\bar{\sigma}$ تنش سیلان است. برای کلیه مواد $0 \leq n \leq 1$ و برای فلزات $0.1 \leq n \leq 0.5$ می‌باشد.

۶-۱ مفاهیم اولیه در بارگذاری صفحه‌ای

۱-۶-۱ بارگذاری تک‌محوره

آزمون کشش که در آن حالت تنش، تک محوری است، یک فرآیند تنش صفحه‌ای محسوب می‌شود. با در نظر گرفتن المانی از یک نمونه آزمون کشش، که در معرض بارگذاری تک محوری است، مشاهده می‌شود که فرآیند تغییر شکل، با شروع از یک تغییر کوچک اولیه تا لحظه بار حداکثر، یکنواخت است. این المان، می‌تواند بزرگ باشد و تمام مقطع مبنا را در بر بگیرد (شکل ۹-۱).



شکل ۹-۱ المان در یک نمونه آزمون کشش که نشان‌دهنده جهات اصلی است [۲]

در حین تغییر شکل، وجوه المان بر یکدیگر عمود باقی می‌ماند، به طوری که می‌توان آن را یک المان اصلی در نظر گرفت؛ یعنی هیچگونه کرنش برشی برای جهتهای اصلی ۱، ۲ و ۳ به ترتیب در طول محور، در راستای عرض و در امتداد ضخامت وجود ندارد.

۲-۶-۱ نمونه‌های کرنش اصلی

در بازه‌های زمانی کوچک از فرآیند تغییر شکل، نمو کرنش اصلی در امتداد محور کشش با معادله (۱۳-۱) تعیین می‌شود:

$$d\varepsilon_1 = \frac{dl}{l} \quad (۱۳-۱)$$

به طور مشابه، در راستای عرض و در امتداد ضخامت ورق نمونه‌های کرنش عبارتند از:

$$d\varepsilon_2 = \frac{dw}{w}, \quad d\varepsilon_3 = \frac{dt}{t} \quad (۱۴-۱)$$

۱-۶-۳ شرط حجم ثابت (تراکم ناپذیری)

تغییر شکل مومسان در حجم ثابت رخ می‌دهد، به طوری که نمونه‌های کرنش مطابق زیر به هم مربوط می‌شوند. بدون هیچ تغییر در حجم، دیفرانسیل حجم ناحیه مبنا صفر خواهد بود، یعنی:

$$d(lwt) = d(l_0 w_0 t_0) \quad (۱۵-۱)$$

از بسط رابطه (۱۵-۱) خواهیم داشت:

$$dl \times wt + dw \times lt + dt \times lw = 0 \quad (۱۶-۱)$$

با تقسیم طرفین رابطه (۱۶-۱) بر lwt نتیجه می‌شود:

$$\frac{dl}{l} + \frac{dw}{w} + \frac{dt}{t} = 0 \quad (۱۷-۱)$$

که با توجه به روابط (۱۳-۱) و (۱۴-۱) نتیجه می‌شود:

$$d\varepsilon_1 + d\varepsilon_2 + d\varepsilon_3 = 0 \quad (۱۸-۱)$$

در نتیجه، برای تغییر شکل با حجم ثابت، مجموع نمونه‌های کرنش اصلی برابر صفر است.

۱-۶-۴ تغییر شکل تنش صفحه‌ای^۱

بسیاری از فرآیندهای سنتی شکل‌دهی ورق را می‌توان با فرض کوچک‌بودن تنش عمود بر سطح ورق در مقایسه با تنش‌های واقع در صفحه ورق (تنش‌های غشایی) تحلیل کرد. اگرچه در فصول بعد در حالت کلی با حضور تنش نرمال تحلیل شکل‌دهی ورق انجام خواهد شد لکن در این مرحله در بیان مقدمه بحث اگر فرض شود که این تنش عمودی صفر است آنگاه یک ساده‌سازی عمده ممکن خواهد بود. چنین فرآیندی تغییر شکل تنش صفحه‌ای نامیده می‌شود.

۱-۶-۵ نسبت‌های تنش و کرنش

تغییر شکل صفحه‌ای یک المان مانند شکل ۱-۱۰ بر حسب نسبت کرنش β یا نسبت تنش α بیان می‌شود. برای یک فرآیند متناسب^۲ هر دو نسبت ثابت خواهند بود. قرارداد مرسوم این است که جهت‌های اصلی را به گونه‌ای تعریف کنیم که $\sigma_1 > \sigma_2$ و جهت سوم عمود بر سطح باشد که در آن $\sigma_3 = 0$. بنابراین، حالت تغییر شکل عبارت است از:

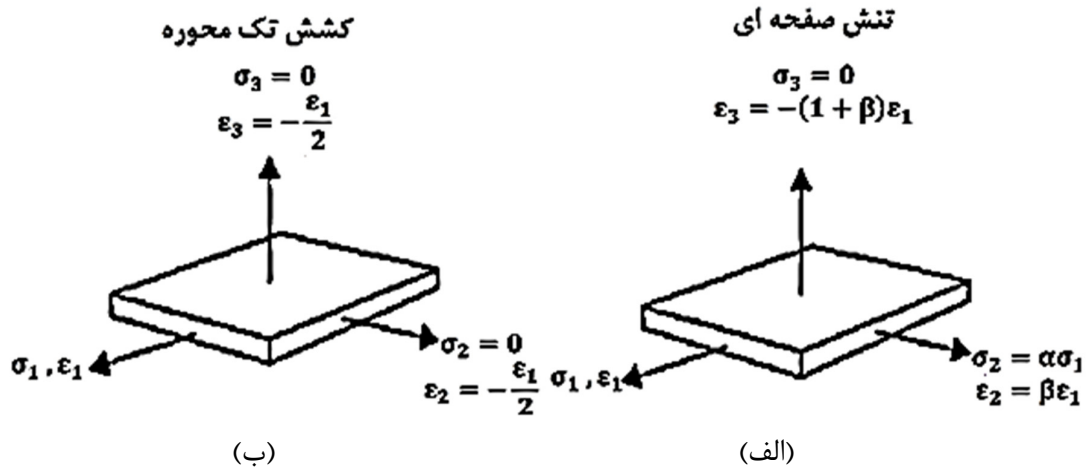
$$\beta = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}, \quad \alpha = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}, \quad \varepsilon_3 = -(1 + \beta)\varepsilon_1 \quad (۱۹-۱)$$

شرط ثابت بودن حجم، برای به دست آوردن کرنش اصلی سوم به کار می‌رود. انتگرال‌گیری از نمودهای کرنش در معادله (۱۸-۱) نشان می‌دهد که این شرط در بارگذاری متناسب می‌تواند بر حسب کرنش‌های حقیقی نهایی به صورت زیر بیان شود:

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0 \quad (۲۰-۱)$$

^۱ Plane stress

^۲ Proportional



شکل ۱-۱۰ تنش‌ها و کرنش‌های اصلی برای المان تغییر شکل یافته، (الف) تنش صفحه‌ای، (ب) کشش تک محوری [۲]

۱-۶-۶ کرنش در راستای ضخامت

با فرض شرط حجم ثابت کرنش در راستای ضخامت به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\epsilon_3 = \ln \frac{t}{t_0} = -(1 + \beta)\epsilon_1 \quad (۱-۲۱)$$

از معادله (۱-۲۱)، ضخامت لحظه‌ای عبارت است از:

$$t = t_0 \exp(\epsilon_3) = t_0 \exp[-(1 + \beta)\epsilon_1] \quad (۱-۲۲)$$

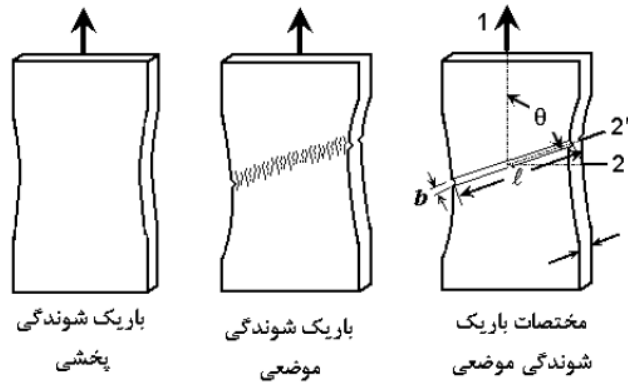
۱-۷ گلویی شدن^۱

مطابق شکل ۱-۱۱ دو نوع باریک شدن متفاوت برای ورق‌های فلزی تحت کشش دو محوری مشاهده می‌شود. در شروع فرآیند شکل‌دهی ورق، با تغییر شکل یکنواخت پلاستیک، ضخامت ورق به صورت یکنواخت نازک می‌شود. این نوع باریک شدن را به علت گستردگی وسیع ناحیه‌ی گلویی در ورق، گلویی پخشی^۲ می‌نامند. در ادامه‌ی فرآیند، با متمرکز شدن تغییر شکل در یک نوار باریک، تغییر شکل در دیگر نواحی ورق کاملاً متوقف می‌شود و باریک شدن موضعی^۳ رخ خواهد داد.

^۱ Necking

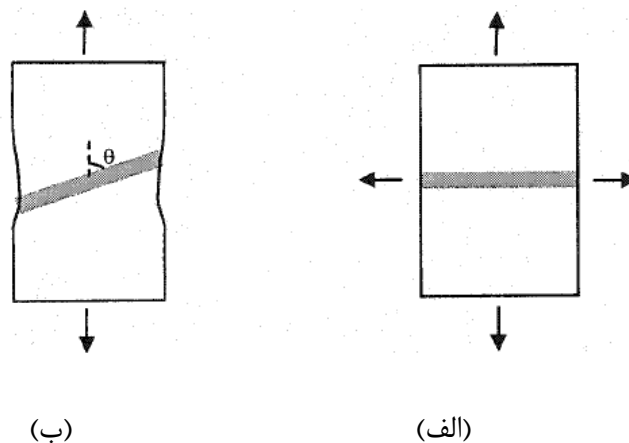
^۲ Diffuse necking

^۳ Localized necking



شکل ۱۱-۱ گلوپی شدن پخشی و موضعی ورق تحت کشش [۸]

در این شرایط، تغییر شکل در نوار گلوپی به شدت متوجه ضخامت ورق می شود، این در حالی است که مواد در خارج از نوار گلوپی تنها به حرکت صلب ادامه می دهند. باریک شدن موضعی معمولاً به سرعت منجر به پارگی ورق می شود [۸]. لذا در تحلیل شکل پذیری ورق از مفهوم باریک شدن موضعی معادل با پارگی استفاده می شود. تحقیقات نشان می دهد که این نوع گلوپی شدن کاملاً وابسته به خواص جنس فلز (مانند توان کارسختی، حساسیت به نرخ کرنش و میزان ناهمگنی ورق) و پیشینه ی مسیر بارگذاری می باشد. مطابق شکل ۱۲-۱ راستای نوار گلوپی موضعی در بارگذاری کششی دوماحوره عمود بر راستای تنش اصلی بزرگ و در بارگذاری کششی تک محوره با زاویه θ نسبت به راستای طولی خواهد بود.



شکل ۱۲-۱ گلوپی شدن ورق تحت کشش، (الف) کشش دو محوری، (ب) کشش تک محوری [۲]

۸-۱ قابلیت شکل پذیری و اهمیت آن در طراحی فرآیندها

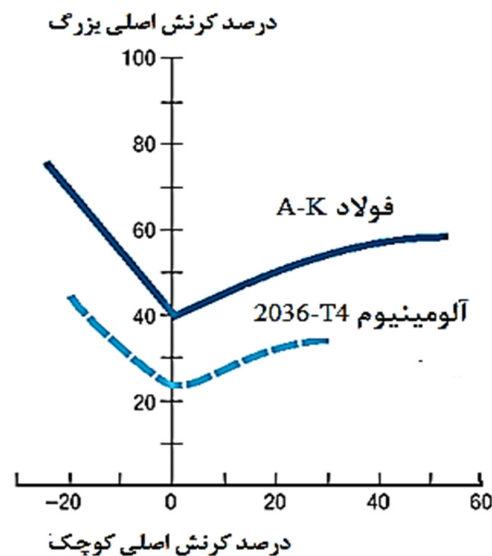
شکل پذیری، قابلیت ورق های فلزی در تغییر شکل مومسان به فرم دلخواه است به گونه ای که در آن آسیبی مشاهده نشود. ایجاد یک فرآیند بهینه ی شکل دهی ورق مرهون در اختیار داشتن اطلاعات قابل استناد لازم از قابلیت شکل پذیری ورق می باشد. تغییر شکل ورق از فرم اولیه به فرم مطلوب، با ایجاد شدن ناپایداری پلاستیک ورق در یک نوار باریک گلویی و یا با ایجاد شدن ناپایداری ساختاری مانند چین خوردگی و همچنین با تغییر شکل ناخواسته حاصل از باربرداری یعنی برگشت فنری محدود می شود. گلویی شدن زمانی رخ می دهد که ورق تحت کشش بیش از حد قرار گیرد. درحالی که چین خوردگی در اثر نیروهای فشاری زیاد پدید می آید. برگشت فنری نیز تقریباً برای تمام فرآیندهای شکل دهی مواد الاستیک-پلاستیک ممکن است رخ دهد. معمولاً مشکل چین خوردگی را با روش های خاصی مانند افزایش نیروی ورق گیر و تعبیه ی آویزه می توان حل نمود. مشکل برگشت فنری نیز با اعمال روش هایی چون کشش در حین فرآیند و روش معکوس در اعمال اثر برگشت فنری بر روی قالب، قابل کاهش است لذا عامل تعیین کننده در یک طراحی موفق تخمین قابلیت شکل دهی ورق است که در اثر پدیده ی گلویی شدن و در نتیجه پارگی محدود می شود. طراح با در اختیار داشتن اطلاعات دقیق از قابلیت شکل دهی ورق، پس از تحلیل فرآیند مورد نظر، می تواند میزان موفقیت فرآیند را از نقطه نظر عدم پارگی پیش بینی نماید و به این وسیله تعداد مراحل شکل دهی، کنترل نیروی ورق گیر و ضرورت استفاده از روانکار مشخص می شود.

۹-۱ منحنی های حد شکل دهی^۱

به منظور تدوین یک روش جامع در تخمین پارگی ورق، در فرآیندهای مختلف شکل دهی امروزه بررسی شکل پذیری ورق های فلزی و حد تحمل یک فلز در مسیرهای مختلف بارگذاری، معمولاً با استفاده از منحنی های حد شکل دهی انجام می گیرد. مطابق قرارداد، جهت اصلی ۱ برای تنش اصلی

^۱ Forming limit diagram (FLD)

بزرگتر^۱ و در نتیجه کرنش اصلی بزرگتر^۲ انتخاب می‌شود و عمود بر آن برای جهت اصلی ۲ با عنوان تنش اصلی کوچکتر^۳ و کرنش اصلی کوچکتر^۴ مشخص می‌شود. در شرایطی که ورق تحت بارگذاری دومحوری قرار دارد، این منحنی‌ها بر روی صفحه‌ی کرنش‌های اصلی بزرگتر ϵ_1 و کوچکتر ϵ_2 ترسیم می‌شود. FLD، نواحی ایمن و نواحی منجر به پارگی را از یکدیگر جدا می‌کند. شکل ۱-۱۳ یک نمونه از FLD را برای فولاد A-K و آلومینیوم 2036-T4 نمایش می‌دهد.



شکل ۱-۱۳ FLD تجربی برای آلومینیوم 2036-T4 و فولاد A-K [۹]

در تمام مسیرهای کرنش ممکن، در فرآیندهای شکل‌دهی ورق بین OA و OE در شکل ۱-۱۴ نسبت کرنش در محدوده $-2 < \beta < 1$ قرار دارد. در مسیر OA (انبساط دو محوری مساوی^۵)، کرنش‌های غشایی در تمام جهت‌ها یکسان‌اند، یک المان دایروی در شبکه منبسط می‌شود اما دایره‌ای می‌ماند. در مسیر OB (کشش کرنش صفحه‌ای^۶)، ورق تنها در یک امتداد کشیده می‌شود، یک المان دایروی به صورت بیضی در می‌آید، محور کوچک بیضی تغییر نمی‌کند، و ورق بطور خاص

^۱ Major stress

^۲ Major strain

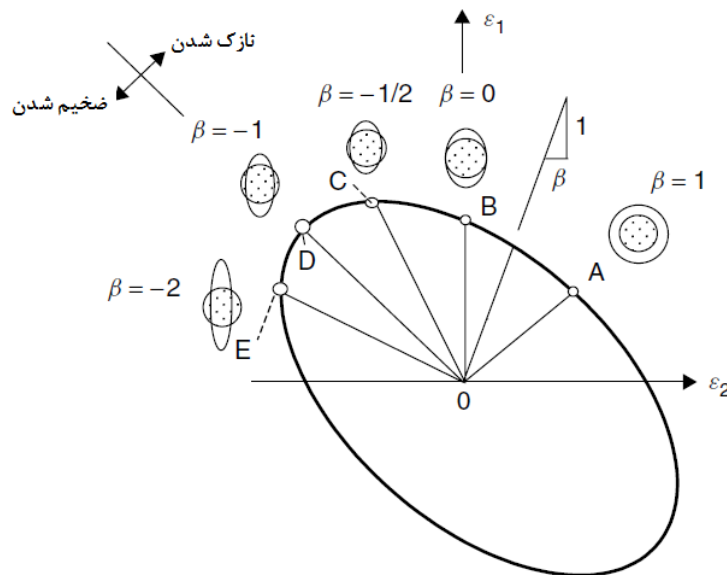
^۳ Minor stress

^۴ Minor strain

^۵ Equal biaxial tension

^۶ Plane strain tension

در معرض گسیختگی ناشی از شکافتن قرار دارد. در مسیر OC (کشش تک‌محوری^۱)، تنش اصلی کوچک مساوی صفر است، ورق در یک راستا کشیده می‌شود، و در راستای دیگر منقبض می‌گردد. در مسیر OD (برش خالص^۲)، ورق بدون تغییر در ضخامت تغییر شکل می‌دهد، کرنش ضخامتی صفر است، کارسختی تدریجی است، شکافتن غیر محتمل بوده و در عملیات واقعی شکل‌دهی اغلب کرنش-های زیادی در این حالت ایجاد می‌گردد. در مسیر OE (فشار تک‌محوری^۳)، تنش اصلی بزرگ برابر صفر است، تنش اصلی کوچک فشاری است، ورق ضخیم می‌شود و چروکیدگی محتمل است.



شکل ۱-۱۴ حالات شکل‌دهی ورق در مسیرهای مختلف کرنش [۲]

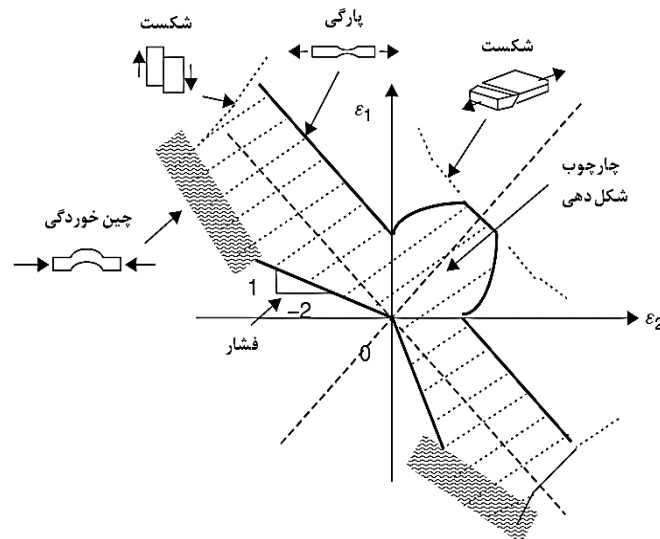
از آنجایی که فرآیند شکل‌دهی علاوه بر گلوپی‌شدن توسط پدیده‌های دیگری مانند چین‌خوردگی و شکست برشی نیز محدود می‌شود، لذا نوارهای کنترل‌کننده‌ی جدیدی بر روی دیاگرام شکل‌پذیری اضافه می‌شود. این نوارها یک پنجره‌ی بسته بر روی صفحه‌ی کرنش‌های اصلی ایجاد می‌کند، که شکل‌دهی سالم در داخل آن صورت می‌پذیرد. شکل ۱-۱۵ این چارچوب را به صورت شماتیک مشخص می‌کند. حد چین‌خوردگی تنها یک پدیده‌ی وابسته به ماده نیست لذا در شکل به صورت یک

^۱ Uniaxial tension

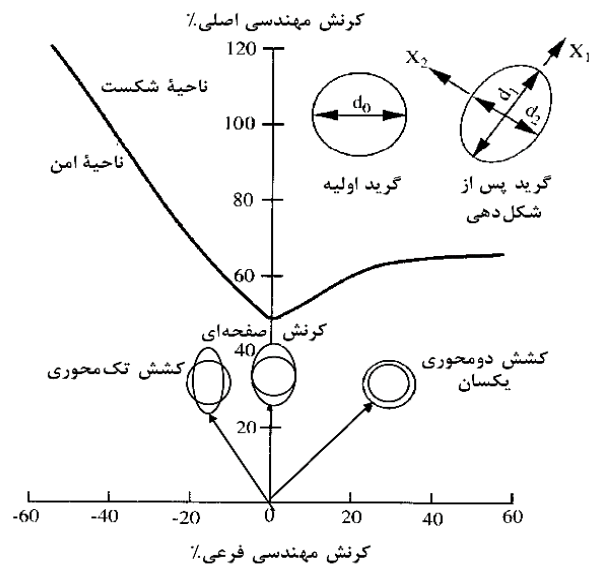
^۲ Pure shear

^۳ Uniaxial compression

باند عریض مشخص شده است. FLD را به دو طریق تئوری و تجربی می‌توان به دست آورد. در رایج‌ترین روش تجربی پس از آنکه سطح ورق توسط دوایری هم‌اندازه به قطر d_0 شبکه بندی شد، فرآیند تغییرشکل کششی ورق صورت می‌گیرد. مش‌های دایروی، در اثر تغییرشکل پلاستیک به بیضی‌هایی به قطر بزرگ d_1 و قطر کوچک d_2 تبدیل خواهد شد. در مجاورت ناحیه‌ی پاره‌شده، کرنش‌های حدی اصلی و فرعی را می‌توان بر حسب کرنش‌های حقیقی به صورت $\epsilon_1^* = \ln\left(\frac{d_1}{d_0}\right)$ و $\epsilon_2^* = \ln\left(\frac{d_2}{d_0}\right)$ و یا بر حسب کرنش‌های مهندسی $e_1^* = \frac{d_1 - d_0}{d_0} \times 100$ و $e_2^* = \frac{d_2 - d_0}{d_0} \times 100$ محاسبه نمود. محاسبه‌ی این مقادیر برای دایره‌هایی که روی نوار باریک پارگی قرار دارد مردود می‌باشد. برای اندازه‌گیری باید حداقل یک قطر از نوار باریک فاصله داشت [۸]. نقاط مربوطه بر روی صفحه‌ی کرنش‌های اصلی ϵ_1 و ϵ_2 مشخص شده و از این نقاط، منحنی FLD گذرانده می‌شود. نمای شماتیک منحنی‌های FLD در شکل ۱-۱۶ مشاهده می‌شود که در آن مسیر بارگذاری خطی فرض شده است.



شکل ۱-۱۵ چارچوب شکل‌دهی در حالت تنش صفحه‌ای برای ورق فلزی [۲]

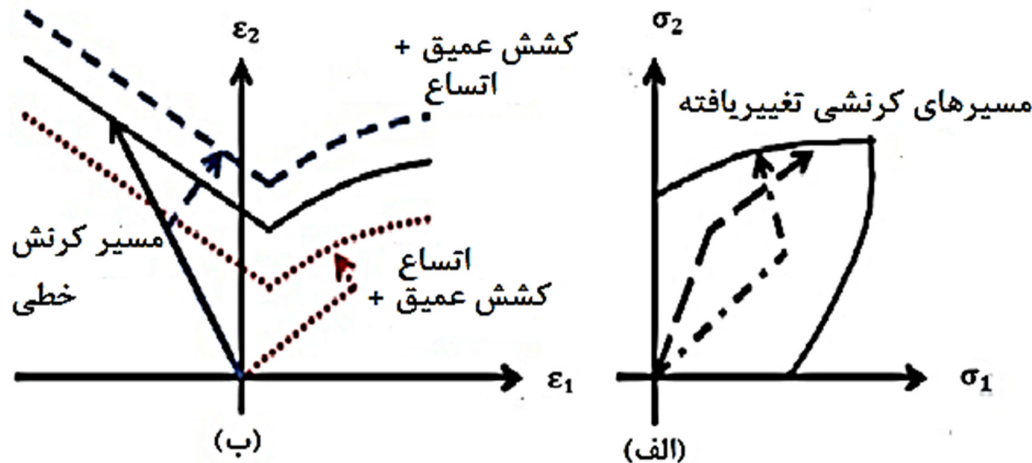


شکل ۱-۱۶ نمای شماتیک یک FLD با توجه به مسیر بارگذاری

۱-۹-۱ نمودار حد تنش شکل دهی (FLSD)^۱

به طور کلی منحنی‌های حد شکل دهی در شریط بارگذاری خطی یا تقریباً خطی ترسیم می‌شوند [۱۰]. در تحلیل شکل پذیری ورق‌های فلزی هنگامی که مسیرهای کرنش غیرخطی است، منحنی‌های حد شکل دهی نتایج نادرستی نشان می‌دهند. دلیل تغییر حد شکل دهی بر اثر تغییر مسیر کرنش تغییر رفتار کارسختی ماده است. بر خلاف منحنی‌های حد کرنش شکل دهی، نمودارهای حد تنش شکل دهی مستقل از مسیر بارگذاری ماده است. این نمودارها بر حسب تنش‌های اصلی و فرعی ترسیم می‌شود، و حد شکل دهی ماده را در مسیرهای تنشی متفاوت توصیف می‌کند. در شکل ۱-۱۷ برای حالتی که مسیر کرنش خطی باشد و برای دو حالت از شکل دهی که نخست اتساع و سپس کشش عمیق انجام شود و بالعکس، منحنی حد شکل دهی ترسیم شده است. در شکل (الف) با تغییر مسیر موقعیت FLSD ثابت مانده است، اما در شکل (ب) منحنی حد شکل دهی با تغییر مسیر تغییر کرده است.

^۱ Forming limit stress diagram (FLSD)



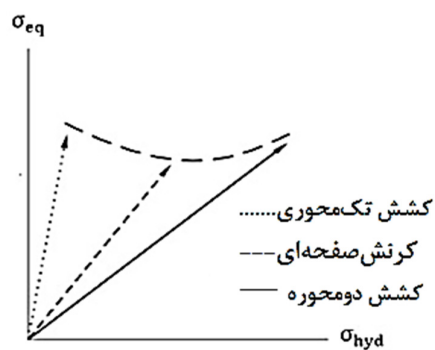
شکل ۱-۱۷ (الف) نمودار تنش حدی شکل‌دهی (FLSD) (ب) نمودار حد شکل‌دهی (FLD) [۱۰]

۱-۹-۲ منحنی‌های حد شکل‌دهی توسعه‌یافته^۱

برای تعمیم استفاده از منحنی‌های حد تنش به حالت تنش سه بعدی (با وجود مولفه تنش فشاری در راستای ضخامت)، سیمپا [۱۱] یک مفهوم جدید بر اساس منحنی‌های حد تنش توسعه‌یافته معرفی کرده است. XSFLC، شروع گلوپی شدن را برحسب تنش معادل و تنش میانگین پیش‌بینی می‌کند. شکل ۱-۱۸ مسیر بارگذاری را در سه حالت مختلف تنش تک‌محوره، مسیر کرنش صفحه‌ای و بارگذاری دو محوره نشان می‌دهد. در فرآیند شکل‌دهی ورق‌های فلزی اگر شرط تنش صفحه‌ای برقرار باشد، با آگاهی از مسیر بارگذاری FLSD برای پیش‌بینی شروع گلوپی شدن استفاده می‌شود. اگرچه XSFLC هم در حالت تنش صفحه‌ای می‌تواند شروع گلوپی شدن را پیش‌بینی کند، اما برای فرآیندهایی مدنظر است که در آن گلوپی شدن تحت شرایط بارگذاری سه‌محوره اتفاق می‌افتد، چون متغیرهای تنش میانگین و تنش معادل برای توصیف بارگذاری سه‌محوره تعریف شده است. یکی از کاربردهای این منحنی‌ها در زمینه هیدروفرمینگ لوله‌های مستقیم است. در حالت تنش صفحه‌ای مقادیر تنش معادل و تنش میانگین برابر است با:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2} \quad , \quad \sigma_{hyd} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{3} \quad (۲۳-۱)$$

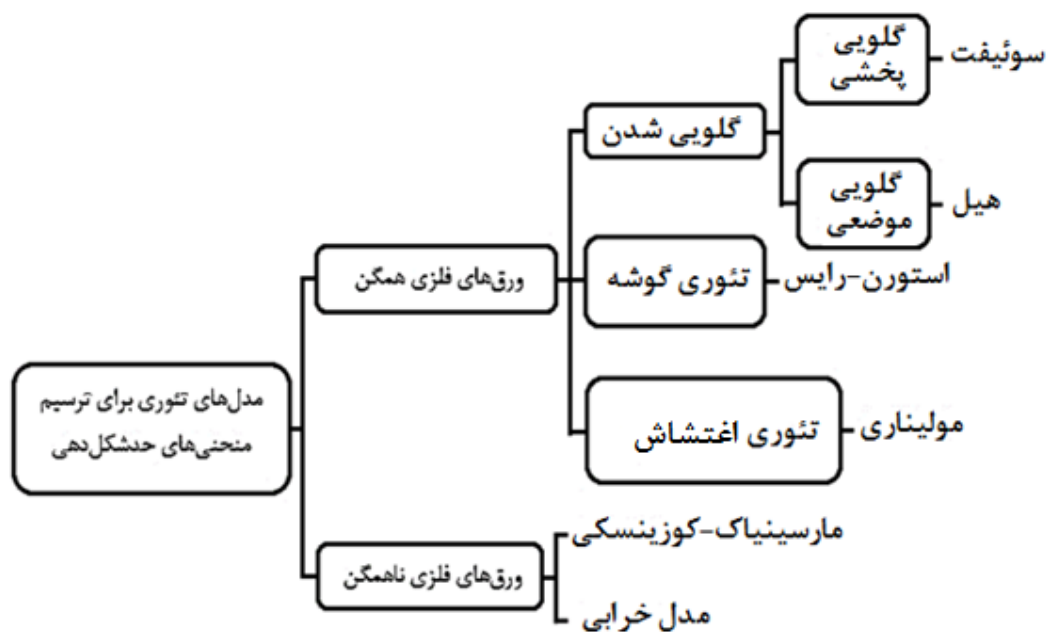
^۱ Extended stress forming limit curve (XSFLC)



شکل ۱۸-۱ نمودار XSFLC در مسیرهای مختلف [۱۱]

۱۰-۱ روش‌های تئوری بررسی شکل‌پذیری ورق

مدل‌های تئوری مختلفی، که برای ترسیم منحنی‌های حد شکل‌دهی ورق‌های فلزی استفاده می‌شود؛ در شکل ۱۹-۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۹-۱ مدل‌های تئوری ترسیم منحنی‌های حد شکل‌دهی فلزات [۱۲]

۱-۱۰-۱ تئوری انشقاق نیرو یا ناپایداری سوئیفت^۱

سوئیفت در سال ۱۹۵۲ یک معیار جهت تخمین گلوئی نفوذی در بارگذاری خطی ارائه نمود [۱۳]. این معیار که برداشتی از ایده‌ی ناپایداری کنسیدر^۲ می‌باشد، مبنی بر این فرض بود که ناپایداری پلاستیک زمانی رخ می‌دهد که نیروی فرآیند به مقدار ماکزیمم خود برسد. در واقع این پدیده زمانی رخ می‌دهد که افزایش نیروی حاصل از کارسختی با کاهش نیروی مربوط به نازک شدن هندسی برابر شود. اگر چه نتایج ناپایداری سوئیفت برای تخمین کل منحنی FLD قابل استفاده است لکن واضح است، آنچه که منجر به ناپایداری پلاستیک و در نتیجه پارگی می‌شود، گلوئی موضعی است که بعد از گلوئی نفوذی رخ می‌دهد. لذا تخمین گلوئی نفوذی سوئیفت به منظور حد پایینی برای کرنش ناپایداری توجیه‌پذیر است.

۲-۱۰-۱ تئوری انشقاق تنش یا ناپایداری هیل^۳

هیل در سال ۱۹۵۲، تشریح نمود که در حین تغییرشکل یکنواخت ورق، در راستایی که کرنش برابر صفر است، گلوئی موضعی رخ می‌دهد [۱۴]. در نتیجه‌ی تحلیل هیل، زاویه‌ی عمود بر نوار گلوئی موضعی نسبت به راستای کرنش اصلی برابر $\theta = \tan^{-1} \sqrt{-\beta}$ محاسبه شد. از این رابطه نتیجه می‌شود که زاویه‌ی فوق تنها در حالی جواب حقیقی دارد که نسبت کرنش مقداری منفی داشته باشد، لذا از این تئوری صرفاً در تخمین سمت چپ منحنی FLD استفاده می‌شود.

۳-۱۰-۱ تئوری گوشه یا انشقاق استورن-رایس^۴

تئوری‌های پلاستیسیته‌ی فیزیکی حاکی از آن است که در اثر اعمال تغییرشکل پلاستیک موضعی بر روی سطح تسلیم، یک برآمدگی به شکل گوشه به وجود خواهد آمد. ایجاد چنین گوشه‌ای بر روی

^۱ Swift's diffuse neck theory

^۲ Considere

^۳ Hill's instability theory

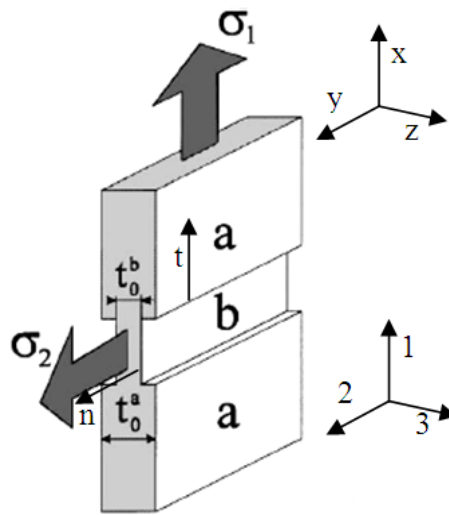
^۴ Stören-Rice bifurcation theory

سطح تسلیم به صورت تجربی نیز به اثبات رسیده است. استورن و رایس با اعمال تئوری تغییر شکل J_2 در پلاستیسیته، بر روی تحلیل کلاسیک انشقاق، موضعی شدن تغییر شکل را تخمین زده و منحنی کامل FLD را ترسیم نمودند [۱۵]. آنها فرض کردند که موضعی شدن گلویی در اثر گسترش یک گوشه بر روی سطح تسلیم رخ می‌دهد. همچنین دریافتند که راستای نوار گلویی در بارگذاری با نسبت کرنش مثبت همواره منطبق بر راستای کرنش فرعی است این در حالی است که زاویه‌ی نوار گلویی موضعی (در بارگذاری با نسبت کرنش منفی) به واقع در راستای کرنش صفر نمی‌باشد. لذا آنها برای تخمین منحنی در سمت چپ، از یک روش عددی استفاده نمودند.

۱-۱۰-۴ تئوری مارسینیاک - کوزینسکی^۱

برای تخمین FLD در یک ورق تحت کشش دومحوری، مارسینیاک و کوزینسکی یک ناهمگنی اولیه در ورق در نظر گرفتند [۱۶]. مطابق شکل ۱-۲۰، این ناهمگنی که می‌تواند به شکل یک نقص هندسی باشد، به صورت شیاری نازک و سرتاسری، عمود بر راستای کرنش اصلی ورق فرض می‌شود که حکم نقطه‌ی شروع تمرکز کرنش و در نتیجه موضعی شدن تغییر شکل می‌باشد. با پیشرفت کرنش‌گذاری پلاستیک بر روی ورق، این نقص به تدریج رشد می‌کند تا در نهایت تبدیل به یک گلویی موضعی می‌شود. مطابق شکل ناحیه‌ی نقص با حرف b و ناحیه‌ی سالم با حرف a مشخص می‌شود. لازم به ذکر است که ناحیه‌ی سالم a تحت کرنش‌گذاری یکنواخت خطی قرار دارد. همچنین فرض می‌شود که به علت پیوستگی ورق، در راستای شیار (جهت ۲)، کرنش در داخل و خارج از شیار یکسان است. علاوه بر این نسبت کرنش (نسبت کرنش فرعی به کرنش اصلی) در ناحیه‌ی a در طول فرآیند ثابت است. با پیشرفت حل عددی معادلات پلاستیسیته حاکم بر مسئله، سرانجام در داخل شیار حالت بارگذاری به سمت کرنش صفحه‌ای میل می‌کند. در این شرایط مقادیر کرنش در ناحیه‌ی سالم، کرنش حدی را در این بارگذاری خاص بیان خواهد نمود.

^۱ Marciniak-Kuckzynski (M-K) theory



شکل ۱-۲۰ ورق دارای نقص اولیه در مدل اولیه‌ی M-K

۱-۱۰-۵ تحقیقات تئوری بر پایه مدل خرابی^۱

میزان تخلخل یک ماده‌ی جامد با تعریف نسبت حجمی حفره‌ها به صورت $C_v = \frac{V_v}{V}$ مشخص می‌شود، که V و V_v به ترتیب برابر حجم حفره‌ها و حجم کل ماده به همراه حفره‌ها می‌باشد. برای آلیاژهای فلزی این نسبت بسیار کوچک گزارش شده است (تقریباً برای آلیاژهای آلومینیوم 10^{-5} و برای فولادها 10^{-4} [۱۷]). برخلاف تحلیل‌های کلاسیک که تسلیم‌شدن فلز مستقل از تنش‌های هیدروستاتیکی^۲ است، تحلیل تغییرشکل پلاستیک فلز متخلخل نیاز به تئوری دارد که در آن تسلیم فلز، وابسته به تنش‌های هیدروستاتیکی باشد. در این مدل‌ها، فلز به شکل یک ماده‌ی متخلخل با حفره‌های کروی و یا استوانه‌ای شبیه‌سازی شده‌است. آغازگر این فعالیت‌ها محققى به نام گارسون بوده است [۱۸]. در مدل اولیه‌ی گارسون ماده شامل یک سلول واحد کروی است که در مغز خود حفره‌ی کروی دیگری را جای داده است. زمینه‌ی فلز از معیار تسلیم وون‌میسز پیروی می‌کند. در این مدل از به هم پیوستگی حفره‌ها صرف نظر شده است، لذا چقرمگی فلز را بیش از مقدار واقعی پیش‌بینی

^۱ Damage model

^۲ Hydrostatic stress

می‌کند. در این مدل با رسیدن نسبت حجمی حفره‌ها به مقدار بحرانی، به هم‌پیوستگی حفره‌ها و ناپایداری پلاستیک رخ می‌دهد.

۱-۱۱ پارامترهای موثر بر شکل‌پذیری ورق

نتایج به دست آمده از تحقیقات تئوری و تجربی نشان می‌دهد، شکل‌پذیری ورق‌ها و در نتیجه موقعیت FLD به دو سری از مشخصه‌ها بستگی دارد:

۱-۱۱-۱ مشخصه‌های ذاتی^۱ ورق

عمده‌ترین فاکتورهای ذاتی موثر بر شکل‌پذیری شامل توان کرنش‌سختی، پارامتر حساسیت به نرخ کرنش، ضریب ناهمسانگردی ورق، ضریب ناهمگنی ورق، خواص متالورژیکی ورق مانند ترکیب، ریز ساختار، شکل و اندازه‌ی دانه، اندازه و نحوه‌ی توزیع عیوب ساختاری و ...، ضخامت ورق، نحوه رشد سطح تسلیم از نقطه نظر سخت‌شدن همسانگرد یا سخت‌شدن سینماتیکی، صافی سطح ورق و کرنش پسماند موجود در ورق می‌باشد.

۱-۱۱-۲ مشخصه‌های محیطی^۲ ورق

عمده‌ترین فاکتورهای محیطی موثر بر شکل‌پذیری شامل درجه‌ی حرارت محیط و ورق، سرعت شکل‌دهی، مسیر بارگذاری بر روی صفحات کرنش، شرایط تماسی بین قالب و ورق و فشار ایجاد شده در جهت ضخامت می‌باشد. لازم به ذکر است این دو گروه از متغیرها از هم مستقل نیستند. به عنوان مثال با تغییر درجه‌ی حرارت، ثابت‌های معادله‌ی کارسختی جنس ورق کاملاً تغییر می‌کند و با افزایش نرخ کرنش مقادیر اندازه‌گیری شده برای ثوابت n و m نیز تغییر خواهد نمود.

^۱ Intrinsic parameters

^۲ Extrinsic parameters

۱۲-۱ پیشینه‌ی تحقیق

روش‌های شکل‌دهی با سرعت بالا در اواخر دهه سال ۱۸۰۰ میلادی مورد توجه قرار گرفتند هرچند کاربردهایی از این نوع فرآیندها در شکل‌دهی صفحات ضخیم فلزی در سال ۱۹۳۰ میلادی دیده شده بود. از جمله فرآیندهای شکل‌دهی با سرعت بالا می‌توان به فرآیند شکل‌دهی انفجاری، الکترومغناطیسی و الکتروهیدرولیکی اشاره کرد. نکته قابل توجه و منحصر به فرد در فرآیندهای شکل‌دهی با سرعت بالا، ایجاد فشار بسیار بالا می‌باشد. هنگامی که دو جسم جامد با سرعت قابل توجهی به شدت به هم اصابت می‌کنند فشار بالایی ایجاد می‌شود. درک دقیق از این امر مستلزم آگاهی از رفتار موج در جامدات است که فراتر از محدوده این تحقیق است. هنگامی که دو جسم الاستیک با سرعت v_i برخورد می‌کند، فشار ایجاد شده از این برخورد از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۹]:

$$p = \frac{\rho_1 \rho_2 c_1 c_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} v_i \quad (۲۴-۱)$$

در این رابطه ρ_i چگالی در هر ماده و c_i سرعت موج طولی است و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$c_i = \sqrt{\frac{3k_i(1-\nu_i)}{\rho_i(1+\nu_i)}} \quad i=1,2 \quad (۲۵-۱)$$

در این رابطه k_i مدول بالک و ν_i ضریب پواسون می‌باشد. برای اکثر فلزات محدوده سرعت موج عرضی حدود 7000 m/s می‌باشد. طبق معادله فوق اگر یک صفحه فولادی با یک صفحه آلومینیومی با سرعت 50 m/s برخورد کند، در اثر شدت اصابت فشاری معادل 500 MPa ایجاد می‌شود و اگر هر دو صفحه فولادی باشند با همان سرعت برخورد فشاری معادل $1/4 \text{ GPa}$ تولید می‌شود. بر طبق نتایج فوق ایجاد مقادیر فشار بسیار زیاد در فرآیندهایی که منجر به تغییر شکل پلاستیک در فلز می‌شود امری طبیعی به نظر می‌رسد. همچنین واضح است که حتی برخوردهای با سرعت نسبتاً کم نیز به علت ایجاد فشار نرمال زیاد، قادر است تغییر شکل پلاستیک قابل توجه ایجاد کند. از چنین فشاری

می‌توان برای ایجاد فرورفتگی‌ها و برجستگی‌های سطحی بزرگ در فرآیندهایی مانند نقش‌زنی^۱ و سکه‌زنی^۲ استفاده کرد.

در فرآیند شکل‌دهی انفجاری، فشار ایجاد شده حدود ۲۰ GPa می‌باشد [۱۹]. تحقیقات نشان می‌دهد که فشار ایجاد شده در فرآیند شکل‌دهی الکترومغناطیسی در حد تنش تسلیم فلز می‌باشد [۲۰]. در فرآیند مهرزنی قالب باز^۳ اگر چه به صورت عمومی حالت تنش در ورق صفحه‌ای است ولی به صورت موضعی اثر تنش نرمال قابل توجه خواهد بود. در فرآیندهایی که تماس ورق با ابزار دو طرفه است مانند اتوکاری^۴ در حین کشش عمیق، ایجاد تنش‌های فشاری نسبتاً بزرگ اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. بروک در سال ۱۹۹۸ نشان داد که محدوده‌ی فشار در فرآیند هیدروفرمینگ در صنعت خودروسازی از ۲۵ تا ۵۰ MPa تغییر می‌کند [۲۱]. در فرآیند هیدروفرمینگ اگر نسبت شعاع خم به ضخامت آن نسبتاً بزرگ باشد و فشار هیدرولیک تنها در یک طرف اعمال شود این شرایط منجر به افزایش معنی-دار در تنش نرمال نخواهد شد. در صورتی که اگر فشار هیدرولیک دوطرفه باشد و یا قطعه کار در تماس با قالب باشد اثر تنش نرمال قابل توجه است [۲۲]. با پیشرفت روزافزون روش‌های شکل‌دهی با انرژی بالا (HERF) بررسی اثر فشار حاصل از تماس^۵ بر شکل‌پذیری ورق‌های فلزی به یکی از جدیدترین موضوعات مورد تحقیق در حیطه دانش شکل‌دهی تبدیل شده است. برای بررسی اثر سرعت برخورد بر شکل‌پذیری یک نمونه ورق فولادی در فرآیند شکل‌دهی الکترومغناطیسی مطابق شکل ۱-۲۱ توسط مالا و همکاران آزمایش شد [۱۹]. در این آزمایش نمونه‌ها با سرعت بالا شتاب گرفته و در اثر برخورد با یک پانچ صلب که سطح مقطع آن یک منحنی هموار و سهموی است تغییر شکل می‌یابد. پانچ‌های صلب از فولاد سخت شده با دو هندسه متفاوت به صورت متقارن محوری^۶ و

^۱ Embossing

^۲ Coining

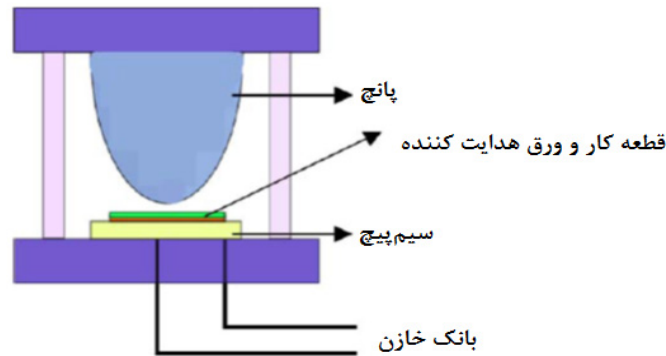
^۳ Stamping

^۴ Ironing

^۵ Contact pressure

^۶ Axisymmetric

گوه‌ای^۱ شکل و در سه اندازه کوچک، متوسط و بزرگ طراحی شد. در پانچ با هندسه متقارن محوری تغییرشکل در راس آن از نوع کشش دو محوره و تغییر شکل در پانچ با هندسه گوه‌ای نزدیک به حالت کرنش صفحه‌ای می‌باشد. به عنوان نمونه خواص مکانیکی ورق فولادی شماره ۱ از این تحقیق در جدول ۱-۱ ارائه شده است.



شکل ۱-۲۱ آزمون تجربی شکل‌دهی الکترومغناطیس نمونه فولادی [۱۹]

جدول ۱-۱ خواص مکانیکی ورق فولادی [۱۹]

ضخامت mm	درصد افزایش طول	استحکام نهایی کشش MPa	مقاومت تسلیم MPa	شماره فولاد
۰/۱۵	٪۱/۳	۶۷۵	۶۴۷	۱

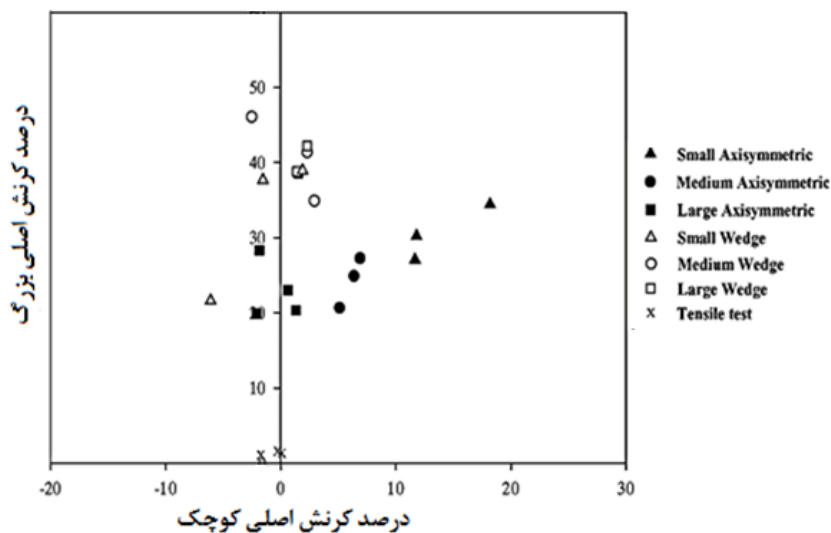
جزئیات سرعت برخورد و انرژی در هر آزمایش در جدول ۲-۱ نشان داده شده است. در شکل ۲۲-۱ کرنش شکست ورق فولادی شماره ۱ در آزمون‌های کشش تک محوره ساده با حالت شکل‌دهی ضربه-ای با کوبش الکترومغناطیسی بر روی قالب‌های مختلف مقایسه شده است. نتایج این تحقیق نشان داد برای فولادهایی با چقرمگی شبه استاتیکی^۲ پایین در شرایط بارگذاری دینامیکی شدید شکل‌پذیری بهبود قابل توجه می‌یابد.

^۱ Wedge

^۲ Quasi-static ductility

جدول ۲-۱ جزئیات آزمون شکل‌دهی الکترومغناطیسی برای حالات مختلف [۱۹]

قالب	انرژی (KJ)	سرعت برخورد (m/s)
Small axisymmetric	۱/۲	۷۲
Medium axisymmetric	۱/۴۴	۹۶
Large axisymmetric	۴/۸	۱۸۲
Small wedge	۶/۷۲	۶۲
Medium wedge	۴/۸	۱۹۶
Large wedge	۶	۲۰۵



شکل ۲۲-۱ کرنش شکست برای آزمون کشش تک محوره و آزمون شکل‌دهی الکترومغناطیسی فولاد شماره ۱ [۱۹]

گوتو و همکاران در سال ۱۹۹۵ اثر تنش‌های برون صفحه‌ای^۱ را بر شکل‌پذیری ورق‌های فلزی بررسی کردند، در این بررسی برای پیش‌بینی گلوبی‌شدن از تئوری سوئیفت و معیار تسلیم هیل درجه دوم استفاده و به این نتیجه رسیدند که تنش فشاری عامل تاخیر گلوبی‌شدن و در نتیجه موجب بهبود

^۱ Out-of-plane stress

شکل پذیری می‌باشد [۲۳]. اسمیث در سال ۲۰۰۳ محدودیت‌های عملی شکل‌پذیری فلزات تحت تاثیر تنش نرمال با استفاده از معیار سوئیفت و معیار تسلیم هیل درجه دوم را با در نظر گرفتن اثر کرنش‌سختی مورد بررسی قرار داد [۲۲]. عاصم‌پور و همکاران در سال ۲۰۱۰ نیز اثر تنش نرمال را در شکل‌پذیری ورق‌های فلزی به کمک معیار تسلیم هیل درجه دوم با استفاده از روش مارسینیاک-کوزینسکی برای ورق داری نقص از جنس فولاد AA6011، STKM-11A و ST12 مورد بررسی و نتایج خود را با نتایج تجربی اسمیث مطابقت دادند [۲۴]. وو و همکاران اثر فشار هیدرواستاتیک را روی شکل‌پذیری ورق‌های فلزی به صورت تحلیلی و عددی مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق یک نمونه تحت کشش با مدل سخت‌شوندگی نمایی، تحت فشار هیدرواستاتیک با استفاده از تئوری پلاستیسیته همسانگرد کلاسیک تحلیل شد. برای بررسی اثر فشار هیدرواستاتیک روی شکل‌پذیری از معیار مارسینیاک-کوزینسکی استفاده کردند و نشان داده شد که افزایش فشار هیدرواستاتیک در تمام مسیرهای کرنش موجب تاخیر اولین گلوپی و بهبود شکل‌پذیری خواهد شد [۲۵]. این محققین در پژوهشی دیگر اثر فشار هیدرواستاتیک را در شکل‌پذیری ورق‌های فلزی به صورت عددی و با کمک روش‌های المان محدود مورد بررسی قرار دادند و در بررسی خود از معیار گارسون استفاده کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که افزایش فشار هیدرواستاتیک اثر قابل توجهی روی شروع گلوپی شدن نداشته اما با کنترل جوانه‌زنی و رشد حفره‌ها و ترک‌های ریز به طور قابل توجهی کرنش پارگی را افزایش می‌دهد [۲۶]. در یک جمع‌بندی کلی از مطالعات صورت گرفته بر روی تحقیقات پیشین مرتبط با اثر فشار بر روی شکل‌پذیری می‌توان بیان داشت که تنش نرمال بر ورق که در بعضی از فرآیندهای نوین تولید مقدار قابل توجه دارد، بر روی حد شکل‌دهی تاثیر داشته و تحلیل ناپایداری پلاستیک در این شرایط بر اساس فرض تنش صفحه‌ای نتایج قابل اعتمادی را بدست نخواهد داد.

در کلیه مدل‌های فوق از معیار تسلیم هیل درجه دو استفاده شده است که تحقیقات متعدد ناتوانی این مدل را در تخمین تسلیم فلزاتی مانند آلومینیوم تحت عنوان رفتار غیرواقعی مطرح کرده‌اند. رفتار

غیر واقعی معیار تسلیم هیل درجه دو در پیش‌بینی تسلیم شدن اولین بار توسط وودتراپ، در سال ۱۹۷۰ مطرح شد [۲۷]. بر اساس معیار تسلیم هیل درجه دو برای مقادیر $\bar{r} < 1$ باید تنش تسلیم در کشش دو محوری یکسان بزرگتر از تنش تسلیم در کشش تک محوری باشد وودتراپ خلاف این فرضیه را با انجام آزمایش‌های تجربی بر روی آلیاژهای آلومینیوم با $\bar{r} < 1$ اثبات نمود. دومین رفتار غیر واقعی معیار تسلیم هیل درجه دو در تخمین اثر ضریب ناهمسانگردی نرمال بر شکل‌پذیری ورق می‌باشد، که نشان می‌دهد با افزایش ضریب ناهمسانگردی، شکل‌پذیری ورق کاهش می‌یابد. یافته‌های تجربی نشان می‌دهد که افزایش میزان ناهمسانگردی نرمال $\bar{r}$ تاثیر چندانی در موقعیت منحنی FLD نخواهد داشت که این واقعیت با کمک معیار هیل ناهمسانگرد درجه‌ی بالا قابل پیش‌بینی است [۸، ۱۲].

۱-۱۳ اهداف پایان‌نامه

در این تحقیق ناپایداری پلاستیک تحت بارگذاری سه محوره بر روی یک ورق تخت فلزی با استفاده از تئوری گلوبی‌شدن پخشی سوئفت^۱ پیش‌بینی می‌شود. اثر ناهمسانگردی پلاستیک در ورق با در نظر گرفتن معیار تسلیم هیل درجه‌ی دو و غیر درجه‌ی دو مورد بررسی قرار خواهد گرفت. از تغییر شکل الاستیک و اثر باوشینگر صرف نظر شده و همچنین در تغییر شکل پلاستیک ورق دارای رفتار سخت‌شوندگی توانی می‌باشد. پس از استخراج معادلات جریان پلاستیک ورق بر اساس معیار تسلیم فوق تغییر شکل نمویی تا ارضا شدن شرط ناپایداری ادامه می‌یابد. مطالعه این روش در مسیرهای مختلف بارگذاری، نقاط ناپایداری پلاستیک را در صفحه کرنش‌های اصلی بزرگ و کوچک به ازای تنش نرمال مشخص ارائه خواهد نمود. مکان هندسی این نقاط منحنی حد شکل‌دهی حاصل از تحلیل گلوبی پخشی، در شرایط بارگذاری سه محوره می‌باشد. تکرار روند فوق به ازای مقادیر مختلف فشار نرمال، منجر به FLD وابسته به فشار نرمال خواهد شد که در پیش‌بینی پارگی در فرآیندهای سرعت

^۱ Swift's diffused neck theory

بالا می تواند مورد استفاده قرار گیرد. به عنوان نمونه در یک مطالعه موردی تخمین پارگی در فرآیند انبساط‌دهی لوله فولادی زنگ‌زن ۳۰۴ به کمک بالشتک کشسان که فشار تماسی قابل توجه است، با استفاده از معیار شکست نرم منحنی حد شکل‌دهی انجام و با نتایج تجربی دیگر مقالات مقایسه خواهد شد.

در انجام پایان‌نامه حاضر، در ابتدا مطالعه‌ای پیرامون فرایندهای شکل‌دهی، معیارهای تسلیم، اصول و مفاهیم اولیه، نمودارهای حد شکل‌دهی پارامترهای موثر بر شکل‌پذیری، روش‌های تئوری بررسی شکل‌پذیری و همچنین مطالعه‌ای پیرامون پژوهش‌های انجام شده توسط سایر محققان صورت گرفت که در فصل اول بیان شد. محاسبه ضرایب ناهمسانگردی در معیار تسلیم هیل درجه دو و محاسبه تنش و کرنش ناپایداری پلاستیک بر اساس تئوری گلوئی پخشی سوئیفت با معیار تسلیم هیل درجه دو در فصل دوم ارائه شده است. رفتار غیر واقعی معیار تسلیم هیل درجه دو، حالت‌های مختلف معیار تسلیم هیل غیر درجه دو و محاسبه تنش و کرنش ناپایداری پلاستیک با استفاده از این معیار در فصل سوم ارائه شده است. مراحل انجام شبیه‌سازی فرآیند انبساط‌دهی لوله فولادی زنگ‌زن ۳۰۴ به کمک بالشتک کشسان و بررسی اثر فشار تماسی بر قطر بحرانی ناحیه بالچ‌شده از لوله در فصل چهارم ارائه شده است. در فصل پنجم ضمن ارائه نتایج تحلیلی و عددی به مقایسه و بحث پیرامون آن پرداخته شده است. در فصل پایانی نتیجه‌گیری‌های کلی از پایان‌نامه بیان شده و چند پیشنهاد به منظور تکمیل نتایج حاصل از این تحقیق ارائه خواهد شد.

فصل ۲ تحلیل ناپایداری پلاستیک بر اساس معیار تسلیم هیل درجه دو

۲-۱ مقدمه

در این فصل ابتدا معیار تسلیم هیل درجه دو تشریح و پس از استخراج ضرایب ناهمسانگردی و تعیین ضرایب، اثر ضریب ناهمسانگردی بر شکل تابع تسلیم بررسی شده است. با استفاده از تئوری گلوبی پخشی سوئیفت و معیار تسلیم هیل درجه دو مقادیر تنش و کرنش ناپایداری پلاستیک در حالت تنش سه محوره محاسبه شده است.

۲-۲ معیار تسلیم هیل درجه دو و تعریف ضرایب ناهمسانگردی

معیار تسلیم هیل درجه دو که به معیار تسلیم هیل ۴۸ نیز شناخته می‌شود؛ طبق رابطه (۵-۱) به صورت زیر بیان می‌شود:

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

که در آن φ تابع تسلیم، F, G, H, L, M و N ثوابت ناهمسانگردی جنس ورق می‌باشد. با انجام تست کشش در جهت محورهای اصلی ناهمسانگردی رابطه میان تنش‌های تسلیم در جهات اصلی با ثوابت معیار تسلیم بدست می‌آید:

$$G + H = \frac{1}{X^2}, \quad F + H = \frac{1}{Y^2}, \quad F + G = \frac{1}{Z^2} \quad (۱-۲)$$

X, Y, Z به ترتیب تنش تسلیم در جهت ۱، ۲ و ۳ تعریف شده است. از سه معادله فوق ضرایب F, G و H برحسب تنش‌های تسلیم تک‌محوره به صورت ذیل بدست می‌آید:

$$2F = \frac{1}{Y^2} + \frac{1}{Z^2} - \frac{1}{X^2}, \quad 2G = \frac{1}{Z^2} + \frac{1}{X^2} - \frac{1}{Y^2}, \quad 2H = \frac{1}{X^2} + \frac{1}{Y^2} - \frac{1}{Z^2} \quad (۲-۲)$$

اگر R, S و T تنش‌های تسلیم برشی در جهت‌های ۱، ۲ و ۳ تعریف شود با انجام تست برش خالص رابطه میان تنش‌های تسلیم برشی و ضرایب تنش برشی در معیار تسلیم بدست می‌آید:

$$2L = \frac{1}{R^2}, \quad 2M = \frac{1}{S^2}, \quad 2N = \frac{1}{T^2} \quad (۳-۲)$$

در حالت تنش صفحه‌ای ($\sigma_{33} = \sigma_{32} = \sigma_{31} = 0$) معیار تسلیم به شکل زیر تبدیل می‌شود:

$$\bar{\sigma}^2 = (G + H) \sigma_{11}^2 - 2H \sigma_{11} \sigma_{22} + (H + F) \sigma_{22}^2 + 2N \sigma_{12}^2 = 1 \quad (۴-۲)$$

از ترکیب معادله (۱-۲)، (۲-۲)، (۳-۲) و (۴-۲) نتیجه می‌شود:

$$\frac{1}{X^2} \sigma_{11}^2 - \left(\frac{1}{X^2} + \frac{1}{Y^2} - \frac{1}{Z^2} \right) \sigma_{11} \sigma_{22} + \frac{1}{Y^2} \sigma_{22}^2 + \frac{1}{T^2} \sigma_{12}^2 = 1 \quad (۵-۲)$$

اگر جهت‌های اصلی تانسور تنش بر محورهای اصلی ناهمسانگردی منطبق شود معیار تسلیم هیل ۴۸ در حالت تنش صفحه‌ای بر حسب تنش‌های اصلی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{1}{X^2} \sigma_1^2 - \left(\frac{1}{X^2} + \frac{1}{Y^2} - \frac{1}{Z^2} \right) \sigma_1 \sigma_2 + \frac{1}{Y^2} \sigma_2^2 = 1 \quad (۶-۲)$$

برای تعیین ناهمسانگردی ورق‌های فلزی، نمونه‌هایی از آنها، در سه جهت موازی، عمود و با زاویه ۴۵ نسبت به جهت نورد، ماشین کاری می‌شود و تحت آزمون کشش قرار می‌گیرد (شکل ۱-۶). تنش تسلیم در جهتی که با راستای نورد زاویه θ می‌سازد با Y_θ نمایش داده می‌شود، لذا در حالت بارگذاری تک محوره برای اجزای تانسور تنش را می‌توان نوشت:

$$\sigma_{11} = Y_\theta \cos^2 \theta, \quad \sigma_{22} = Y_\theta \sin^2 \theta, \quad \sigma_{12} = \sigma_{21} = Y_\theta \sin \theta \cos \theta \quad (۷-۲)$$

ضریب ناهمسانگردی ورق در راستای θ با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$r_\theta = \frac{\dot{\varepsilon}_{\theta+90}}{\dot{\varepsilon}_\theta} \quad (۸-۲)$$

$\dot{\varepsilon}_\theta$ بر حسب $\dot{\varepsilon}_{11}$ ، $\dot{\varepsilon}_{22}$ و $\dot{\varepsilon}_{12}$ بیان می‌شود:

$$\begin{aligned}\dot{\varepsilon}_{\theta} &= \dot{\varepsilon}_{11} \cos^2 \theta + \dot{\varepsilon}_{22} \sin^2 \theta + \dot{\varepsilon}_{12} \sin \theta \cos \theta \\ \dot{\varepsilon}_{33} &= -(\dot{\varepsilon}_{11} + \dot{\varepsilon}_{22})\end{aligned}\quad (۹-۲)$$

با ترکیب معادلات (۸-۲) و (۹-۲) ضریب ناهمسانگردی در راستای θ مشخص می‌شود:

$$r_{\theta} = \frac{\dot{\varepsilon}_{11} \sin^2 \theta + \dot{\varepsilon}_{22} \cos^2 \theta - \dot{\varepsilon}_{12} \sin \theta \cos \theta}{\dot{\varepsilon}_{33}} \quad (۱۰-۲)$$

با استفاده از قانون جریان پلاستیک (۱۰-۱) و معادلات رابطه (۷-۲) نرخ کرنش پلاستیک به دست می‌آید:

$$\begin{aligned}\dot{\varepsilon}_{11} &= \dot{\lambda} \frac{\partial \varphi}{\partial \sigma_{11}} = \dot{\lambda} \frac{Y_{\theta}}{\bar{\sigma}} [(G + H) \cos^2 \theta - H \sin^2 \theta] \\ \dot{\varepsilon}_{22} &= \dot{\lambda} \frac{\partial \varphi}{\partial \sigma_{22}} = \dot{\lambda} \frac{Y_{\theta}}{\bar{\sigma}} [(H + F) \sin^2 \theta - H \cos^2 \theta] \\ \dot{\varepsilon}_{12} &= \dot{\lambda} \frac{\partial \varphi}{\partial \sigma_{12}} = \dot{\lambda} \frac{Y_{\theta}}{\bar{\sigma}} (2N \sin \theta \cos \theta)\end{aligned}\quad (۱۱-۲)$$

با جایگذاری معادلات رابطه (۱۱-۲) در رابطه (۱۰-۲) ضریب ناهمسانگردی در راستای θ محاسبه می‌شود:

$$r_{\theta} = \frac{H + (2N - F - G - 4H) \sin^2 \theta \cos^2 \theta}{F \sin^2 \theta + G \cos^2 \theta} \quad (۱۲-۲)$$

از معادله (۱۲-۲) ضرایب ناهمسانگردی در راستای موازی، عمود و با زاویه ۴۵ درجه نسبت به جهت نورد محاسبه می‌شود:

$$r_0 = \frac{H}{G}, \quad r_{90} = \frac{H}{F}, \quad r_{45} = \frac{N}{F + G} - \frac{1}{2} \quad (۱۳-۲)$$

با استفاده از رابطه (۱۱-۲) و معادلات رابطه (۱۳-۲) رابطه میان ضرایب ناهمسانگردی و تنش‌های تسلیم به صورت زیر است:

$$\frac{X}{Y} = \sqrt{\frac{r_0(1+r_{90})}{r_{90}(1+r_0)}}, \quad \frac{X}{Z} = \sqrt{\frac{r_0+r_{90}}{r_{90}(1+r_0)}} \quad (۱۴-۲)$$

از روابط (۱-۲)، (۱۳-۲) و (۱۴-۲) نتیجه می‌شود:

$$N = \frac{1}{X^2} \frac{r_0+r_{90}}{r_{90}(1+r_0)} \left(\frac{2r_{45}+1}{2} \right) \quad (۱۵-۲)$$

از مجموع روابط (۱-۲)، (۲-۲)، (۴-۲)، (۱۴-۲) و (۱۵-۲) معیار تسلیم هیل ۴۸ در حالت تنش-صفحه‌ای بر حسب ضرایب ناهمسانگردی ورق در جهات مختلف به دست می‌آید:

$$\sigma_{11}^2 - \frac{2r_0}{1+r_0} \sigma_{11}\sigma_{22} + \frac{r_0(1+r_{90})}{r_{90}(1+r_0)} \sigma_{22}^2 + \frac{r_0+r_{90}}{r_{90}(1+r_0)} (2r_{45}+1) \sigma_{12}^2 = X^2 \quad (۱۶-۲)$$

در حالتی که محورهای اصلی تانسور تنش بر محورهای ناهمسانگردی منطبق باشد معیار تسلیم هیل ۴۸ بر حسب تنش‌های اصلی به صورت زیر تبدیل می‌شود:

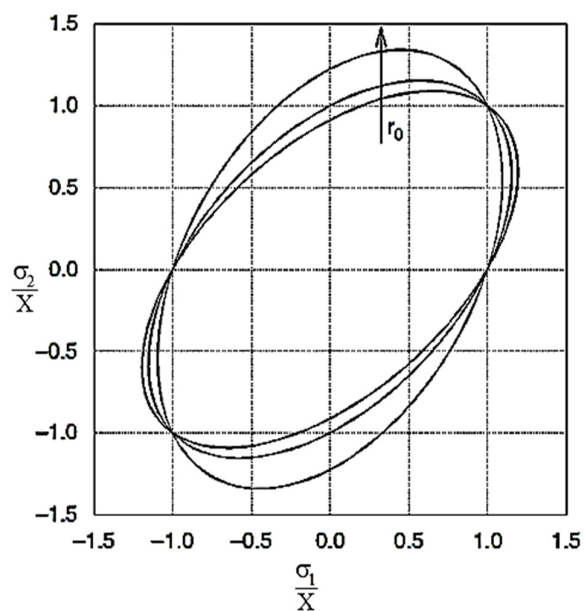
$$\sigma_1^2 - \frac{2r_0}{1+r_0} \sigma_1\sigma_2 + \frac{r_0(1+r_{90})}{r_{90}(1+r_0)} \sigma_2^2 = X^2 \quad (۱۷-۲)$$

رابطه (۱۷-۲) را می‌توان با استفاده از رابطه (۱۴-۲) به صورت دیگری بازنویسی کرد:

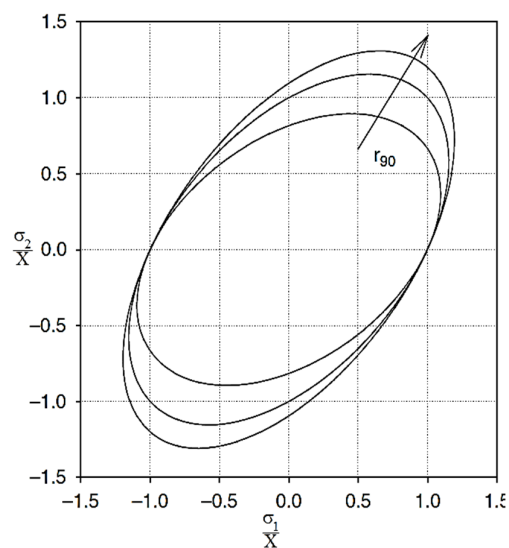
$$\sigma_1^2 - \frac{2r_0}{1+r_0} \sigma_1\sigma_2 + \frac{r_0(1+r_{90})}{r_{90}(1+r_0)} \sigma_2^2 = \frac{r_0(1+r_{90})}{r_{90}(1+r_0)} Y^2 \quad (۱۸-۲)$$

معادلات (۱۷-۲) و (۱۸-۲) خانواده‌ای از بیضی‌ها را در صفحه تنش‌های اصلی نشان می‌دهد. تاثیر r_0

و r_{90} بر شکل سطح تسلیم در شکل ۱-۲ و شکل ۲-۲ نمایش داده شده است.



شکل ۲-۱- اثر ضریب ناهمسانگردی r_0 بر شکل تابع تسلیم هیل ۴۸ [۱]



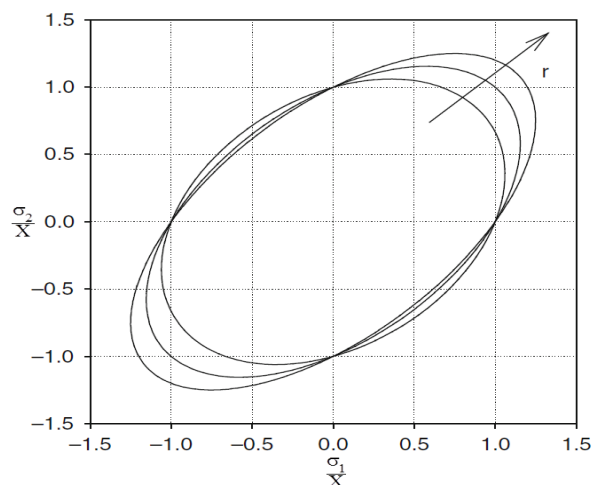
شکل ۲-۲- اثر ضریب ناهمسانگردی r_{90} بر شکل تابع تسلیم هیل ۴۸ [۱]

اگر رفتار ماده طوری باشد که ضرایب ناهمسانگردی مساوی باشد ($r_0 = r_{90} = r$) از رابطه (۲-۱۴)

نتیجه می‌شود که $X = Y = \sigma_u$ لذا با جایگذاری در رابطه (۲-۱۷) رابطه زیر نتیجه می‌شود:

$$\sigma_1^2 - \frac{2r}{1+r} \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2^2 = \sigma_u^2 \quad (2-19)$$

تاثیر ضریب ناهمسانگردی نرمال بر شکل تابع تسلیم در شکل ۳-۲ نشان داده شده است. افزایش ضریب ناهمسانگردی نرمال (r) موجب افزایش نسبت قطر بزرگتر به کوچکتر بیضی تسلیم می‌شود، بگونه‌ای که به ازای $r=1$ ورق همسانگرد بوده و بیضی هیل بر بیضی وون میسر منطبق می‌شود.



شکل ۳-۲- اثر ضریب ناهمسانگردی نرمال بر شکل تابع تسلیم هیل ۴۸ [۱]

۳-۲ تحلیل ناپایداری بر اساس روش سوئیفت و معیار تسلیم هیل درجه دو در حالت سه-بعدی

در این بخش ضمن استفاده از معیار تسلیم هیل درجه دو در حالت سه محوره، اثر تنش نرمال (σ_3) بر شکل‌پذیری ورق فلزی بررسی می‌شود. فرضیات تحلیل به این شرح است، که رفتار ورق به صورت صلب-مومسان است و اثر کرنش سختی با مدل توانی و اثر ناهمسانگردی نرمال با معیار تسلیم هیل ۴۸ در حالت سه محوری لحاظ می‌شود. از اثر نرخ کرنش و دما در سخت‌شوندگی و همچنین ناهمسانگردی درون صفحه‌ای ورق صرف‌نظر شده است. گلوئی شدن پخشی به کمک معیار ناپایداری پلاستیک سوئیفت مورد مطالعه قرار می‌گیرد. معیار تسلیم هیل ۴۸ در حالت سه محوره بر حسب تنش‌های اصلی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$(\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 + r(\sigma_1 - \sigma_2)^2 = (r+1)\bar{\sigma}^2 \quad (20-2)$$

نسبت تنش صفحه‌ای α ، نسبت تنش نرمال γ و نسبت کرنش β به صورت زیر تعریف شده است:

$$\alpha = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}, \quad \gamma = \frac{\sigma_3}{\sigma_1}, \quad \beta = \frac{d\varepsilon_2}{d\varepsilon_1} \quad (21-2)$$

تنش موثر نسبت به تنش‌های اصلی، تابعی همگن از مرتبه یک است، لذا از قضیه اوایلر برای توابع

همگن، تنش موثر به صورت ترکیب خطی از تنش‌های اصلی و $\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_i}$ بیان می‌شود:

$$\bar{\sigma} = \sigma_1 \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_1} + \sigma_2 \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_2} + \sigma_3 \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_3} \quad (22-2)$$

دیفرانسیل تابع سه متغیره $\bar{\sigma}(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$d\bar{\sigma} = \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_1} d\sigma_1 + \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_2} d\sigma_2 + \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_3} d\sigma_3 \quad (23-2)$$

با تقسیم کردن دو طرف رابطه (۲-۲) بر dt نتیجه می‌شود:

$$\dot{\bar{\sigma}} = \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_1} \dot{\sigma}_1 + \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_2} \dot{\sigma}_2 + \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_3} \dot{\sigma}_3 \quad (24-2)$$

چون فشار در جهت ضخامت ثابت فرض شده است $\dot{\sigma}_3 = 0$ و در رابطه (۲-۲) جایگذاری می‌شود:

$$\dot{\bar{\sigma}} = \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_1} \dot{\sigma}_1 + \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_2} \dot{\sigma}_2 \quad (25-2)$$

در لحظه ناپایداری بر اساس شرط ناپایداری برای گلولی پخشی سوئیفت، باید دو معادله $dF_1 =$

$dF_2 = 0$ برقرار باشد. لذا نتیجه می‌شود:

$$dF_1 = A_1 d\sigma_1 + \sigma_1 dA_1 = 0, \quad dF_2 = A_2 d\sigma_2 + \sigma_2 dA_2 = 0 \quad (26-2)$$

از روابط (۲-۲) داریم:

$$\frac{d\sigma_1}{\sigma_1} = -\frac{dA_1}{A_1} = d\varepsilon_1, \quad \frac{d\sigma_2}{\sigma_2} = -\frac{dA_2}{A_2} = d\varepsilon_2 \quad (27-2)$$

با تقسیم کردن دو طرف رابطه فوق بر dt نرخ تنش‌های اصلی بر حسب نرخ کرنش‌های اصلی محاسبه

می‌شود:

$$\dot{\sigma}_1 = \sigma_1 \dot{\varepsilon}_1, \quad \dot{\sigma}_2 = \sigma_2 \dot{\varepsilon}_2 \quad (28-2)$$

قانون جریان برای کرنش‌های مومسان به صورت زیر است:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\lambda} \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_{ij}} \quad (29-2)$$

از روابط (۲۵-۲)، (۲۸-۲) و (۲۹-۲) نرخ تنش موثر بدست می‌آید:

$$\dot{\sigma} = \dot{\lambda} \left[\left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_1} \right)^2 \sigma_1 + \left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_2} \right)^2 \sigma_2 \right] \quad (30-2)$$

از روابط (۲۲-۲) و (۳۰-۲) نسبت $\frac{\dot{\sigma}}{\bar{\sigma} \dot{\varepsilon}}$ بدست می‌آید:

$$\frac{\dot{\sigma}}{\bar{\sigma} \dot{\varepsilon}} = \frac{\left(\left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_1} \right)^2 \sigma_1 + \left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_2} \right)^2 \sigma_2 \right)}{\sigma_1 \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_1} + \sigma_2 \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_2} + \sigma_3 \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_3}} \frac{d\lambda}{d\bar{\varepsilon}} \quad (31-2)$$

برای محاسبه $d\lambda$ ، از رابطه کار مومسان در واحد حجم بر حسب استفاده شده است:

$$dw = \bar{\sigma} d\bar{\varepsilon} = \sigma_1 d\varepsilon_1 + \sigma_2 d\varepsilon_2 + \sigma_3 d\varepsilon_3 \quad (32-2)$$

از روابط (۲۱-۲) و (۳۲-۲) نموکرنش موثر بدست می‌آید:

$$d\bar{\varepsilon} = \frac{\sigma_1}{\bar{\sigma}} [1 + \alpha\beta - \gamma(1 + \beta)] d\varepsilon_1 \quad (33-2)$$

به کمک قانون جریان نسبت کرنش به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\beta = \frac{(\alpha - \gamma) - r(1 - \alpha)}{r(1 - \alpha) - (\gamma - 1)} \quad (34-2)$$

از رابطه (۳۴-۲) α بر حسب β و γ به دست می‌آید:

$$\alpha = \frac{\beta(r - \gamma + 1) + r + \gamma}{1 + r(1 + \beta)} \quad (35-2)$$

از روابط (۳۵-۲) و (۳۳-۲) نمو کرنش موثر بر حسب ثوابت β و γ بدست می‌آید:

$$d\bar{\varepsilon} = \frac{\sigma_1}{\bar{\sigma}} \frac{(1-\gamma) \left[r(\beta+1)^2 + \beta^2 + 1 \right]}{1+r(1+\beta)} d\varepsilon_1 \quad (۳۶-۲)$$

از روابط (۲۰-۲) و (۲۱-۲) تنش موثر بر حسب ثوابت α ، γ و r بدست می‌آید:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma_1}{(r+1)^{\frac{1}{2}}} \left[(\alpha-\gamma)^2 + (\gamma-1)^2 + r(1-\alpha)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (۳۷-۲)$$

با جایگذاری رابطه (۳۵-۲) در رابطه (۳۷-۲) نسبت $\frac{\sigma_1}{\bar{\sigma}}$ محاسبه می‌شود:

$$\frac{\sigma_1}{\bar{\sigma}} = \left[\frac{r+1}{2r+1} \right]^{\frac{1}{2}} \frac{1+r(1+\beta)}{\left[r(\beta+1)^2 + \beta^2 + 1 \right]^{\frac{1}{2}}} \frac{1}{(1-\gamma)} \quad (۳۸-۲)$$

با جایگذاری رابطه (۳۸-۲) در رابطه (۳۶-۲) نمو کرنش موثر بر حسب r و β بدست می‌آید:

$$d\bar{\varepsilon} = \left[\frac{r+1}{2r+1} \right]^{\frac{1}{2}} \left[r(\beta+1)^2 + \beta^2 + 1 \right]^{\frac{1}{2}} d\varepsilon_1 \quad (۳۹-۲)$$

با جایگذاری β از رابطه (۲۱-۲) در رابطه (۳۹-۲) و با استفاده از شرط حجم ثابت نمو کرنش موثر بر حسب نموهای کرنش اصلی بدست می‌آید:

$$d\bar{\varepsilon} = \left[\frac{r+1}{2r+1} \right]^{\frac{1}{2}} \left[rd\varepsilon_3^2 + d\varepsilon_2^2 + d\varepsilon_1^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (۴۰-۲)$$

اگر در رابطه (۴۰-۲) $r=1$ قرار داده شود نمو کرنش موثر بر اساس معیار وون میسز بدست می‌آید:

$$d\bar{\varepsilon} = \sqrt{\frac{2}{3}(d\varepsilon_3^2 + d\varepsilon_2^2 + d\varepsilon_1^2)} \quad (۴۱-۲)$$

با قرار دادن $d\varepsilon_{ij} = d\lambda \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_{ij}}$ در رابطه (۴۰-۲) نمو کرنش موثر برحسب r و $\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_{ij}}$ بدست می‌آید:

$$d\bar{\varepsilon} = \left[\frac{r+1}{2r+1} \right]^{\frac{1}{2}} \left[r \left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_3} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_2} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_1} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} d\lambda \quad (۴۲-۲)$$

برای محاسبه $\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_{ij}}$ از رابطه (۲۰-۲) نتیجه می‌شود:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_1} &= \frac{r(\sigma_1 - \sigma_2) - (\sigma_3 - \sigma_1)}{(r+1)\bar{\sigma}} \\ \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_2} &= \frac{(\sigma_2 - \sigma_3) - r(\sigma_1 - \sigma_2)}{(r+1)\bar{\sigma}} \\ \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_3} &= \frac{(\sigma_3 - \sigma_1) - (\sigma_2 - \sigma_3)}{(r+1)\bar{\sigma}} \end{aligned} \quad (۴۳-۲)$$

از جایگذاری مقادیر $\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_{ij}}$ از رابطه (۴۳-۲) معادل عبارت $r \left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_3} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_2} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_1} \right)^2$ استخراج می‌شود:

$$r \left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_3} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_2} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_1} \right)^2 = \frac{2r+1}{r+1} \quad (۴۴-۲)$$

از قرار دادن رابطه (۴۴-۲) در رابطه (۴۲-۲) مقدار $d\lambda$ بدست می‌آید:

$$d\lambda = d\bar{\varepsilon} \quad (۴۵-۲)$$

با توجه به اینکه رفتار ماده از حالت توانی پیروی می‌کند، معادل نسبت $\frac{\dot{\bar{\sigma}}}{\bar{\sigma}\dot{\bar{\varepsilon}}}$ که در رابطه (۳۱-۲)

بدست آمد قابل محاسبه است:

$$\frac{\dot{\bar{\sigma}}}{\bar{\sigma}\dot{\bar{\varepsilon}}} = \frac{d\bar{\sigma}}{\bar{\sigma}d\bar{\varepsilon}} = \frac{n}{\bar{\varepsilon}} \quad (۴۶-۲)$$

از روابط (۴۵-۲)، (۳۱-۲) و (۴۶-۲) نتیجه می‌شود:

$$\bar{\varepsilon}^* = \left(\frac{\sigma_1 \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_1} + \sigma_2 \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_2} + \sigma_3 \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_3}}{\left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_1} \right)^2 \sigma_1 + \left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_2} \right)^2 \sigma_2} \right) \times n \quad (۴۷-۲)$$

از روابط (۴۵-۲) و (۲۹-۲) نتیجه می‌شود:

$$d\varepsilon_{ij} = d\bar{\varepsilon} \frac{\partial \bar{\sigma}}{\sigma_{ij}} \quad (۴۸-۲)$$

در مسائل پلاستیسیته به علت غیر قابل برگشت بودن بارگذاری و غیر خطی بودن رفتار مواد، نمی‌توان مانند حالت الاستیک خطی یک‌باره کل کرنش را در محدوده بارگذاری بر حسب مولفه‌های تنش به دست آورد. چون بارگذاری وابسته به مسیر است، و مسیر بارگذاری روی حالت تنش و کرنش تاثیر گذار است لذا معادلات حالت پلاستیک در حالت عمومی همیشه به صورت نمویی^۱ بیان می‌شود، این حالت از نوشتن معادلات پلاستیسیته نمویی^۲ نامیده می‌شود. در مبحث پلاستیسیته نمویی بازه زمانی جزء به جزء به بازه‌های زمانی کوچک تقسیم تقسیم‌بندی می‌شود و در هر کدام از این بازه‌های کوچک تنش‌ها و کرنش‌های موثر محاسبه شده و در یک ماتریس ذخیره می‌شود، و در هر مرحله نمو کرنش موثر محاسبه می‌شود و در نهایت کرنش موثر برابر است با مجموع نموهای کرنش جزئی. فقط در شرایط خاص با استفاده از یک رابطه می‌توان کرنش پلاستیک کل را به دست آورد و این در شرایطی است که بارگذاری یکنواخت^۳ باشد یعنی در شرایطی که در لحظه شروع بارگذاری تا لحظه فعلی نسبت کرنش ثابت باقی بماند بارگذاری یکنواخت است.

^۱ Incremental

^۲ Incremental plasticity

^۳ Proportional loading

$$\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_j} = c_{ij} = \text{const} \Rightarrow \bar{\varepsilon}_p = \int d\bar{\varepsilon}_p \quad (۴۹-۲)$$

با ترکیب روابط تا (۴۹-۲) کرنش طولی و عرضی شروع ناپایداری پلاستیک محاسبه می‌شود:

$$\varepsilon_1^* = \frac{\sigma_1 \left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_1} \right)^2 + \sigma_2 \left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_2} \right) \left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_1} \right) + \sigma_3 \left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_3} \right) \left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_1} \right)}{\left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_1} \right)^2 \sigma_1 + \left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_2} \right)^2 \sigma_2} \times n$$

$$\varepsilon_2^* = \frac{\sigma_2 \left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_2} \right)^2 + \sigma_1 \left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_1} \right) \left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_2} \right) + \sigma_3 \left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_3} \right) \left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_2} \right)}{\left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_1} \right)^2 \sigma_1 + \left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_2} \right)^2 \sigma_2} \times n \quad (۵۰-۲)$$

برای محاسبه رابطه‌ای صریح که کرنش‌های ناپایداری را بر حسب ثوابت تعریف شده ارائه دهد، روابط

$$(۲۱-۲) \text{ و } (۴۳-۲) \text{ بکار برده می‌شود تا مقادیر } \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_i} \text{ محاسبه شود:}$$

$$\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_1} = \frac{\sigma_1}{(r+1)\bar{\sigma}} [r(1-\alpha) + 1 - \gamma]$$

$$\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_2} = \frac{\sigma_1}{(r+1)\bar{\sigma}} [(\alpha - \gamma) - r(1-\alpha)] \quad (۵۱-۲)$$

$$\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_3} = \frac{\sigma_1}{(r+1)\bar{\sigma}} (2\gamma - \alpha - 1)$$

با جایگذاری رابطه (۳۵-۲) در رابطه (۵۱-۲) خواهیم داشت:

$$\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_1} = \frac{\sigma_1}{(r+1)\bar{\sigma} [r(1+\beta) + 1]} (1-\gamma)(2r+1)$$

$$\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_2} = \frac{\sigma_1}{(r+1)\bar{\sigma} [r(1+\beta) + 1]} \beta(1-\gamma)(2r+1) \quad (۵۲-۲)$$

$$\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_3} = \frac{-\sigma_1}{(r+1)\bar{\sigma} [r(1+\beta) + 1]} (1-\gamma)(2r+1)(\beta+1)$$

از رابطه‌های (۵۰-۲) و (۵۲-۲) کرنش طولی شروع ناپایداری پلاستیک محاسبه می‌شود:

$$\varepsilon_1^* = \frac{1 + \alpha\beta - \gamma(\beta + 1)}{1 + \alpha\beta^2} \times n \quad (۵۳-۲)$$

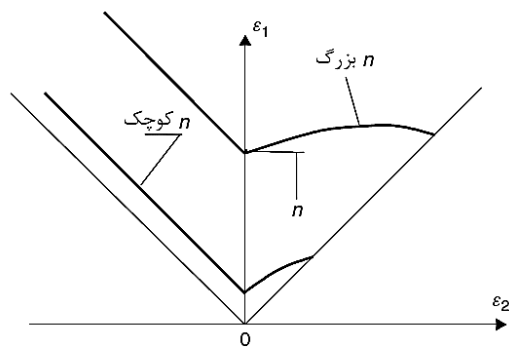
در نهایت از روابط (۳۴-۲) و (۵۳-۲) مقدار کرنش طولی شروع ناپایداری پلاستیک بر اساس معیار تسلیم هیل ۴۸ در حالت بارگذاری سه‌محوره به دست می‌آید:

$$\varepsilon_1^* = \frac{(1 - \gamma)[(r + 1)\beta^2 + 2r\beta + r + 1]}{(1 + \beta)[(r + 1)\beta^2 - \beta + r + 1] + \gamma\beta^2(1 - \beta)} \times n \quad (۵۴-۲)$$

کمترین مقدار حد شکل‌دهی در مسیر $\beta = 0$ با FLD_0 نشان داده می‌شود که از رابطه (۵۴-۲) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$FLD_0 = (1 - \gamma) \times n \quad (۵۵-۲)$$

بر اساس رابطه (۵۵-۲)، FLD_0 تنها تابعی از توان کارسختی و نسبت تنش نرمال است و در حالت تنش صفحه‌ای ($\gamma = 0$) کرنش حدی برابر توان کرنش‌سختی است. نحوه‌ی کارسخت شدن ماده تحت تاثیر تغییر شکل پلاستیک، تاثیر شایانی بر روی کرنش حدی دارد بگونه‌ای که تا مدت‌ها، توان کرنش سختی n خود به عنوان یک فاکتور اندازه‌گیر شکل‌پذیری ورق مطرح بود. تحقیقات نشان می‌دهد که اولاً FLD محور کرنش اصلی بزرگ را تقریباً در نقطه‌ای به عرض n قطع می‌کند ثانیاً افزایش n موجب افزایش کرنش یکنواخت (قبل از رخ دادن گلوپی) می‌شود [۸]. لذا در مجموع اثر این فاکتور را می‌توان در شکل ۱۶-۲ مشاهده کرد.



شکل ۴-۲ تاثیر افزایش توان کرنش سختی n بر منحنی حد شکل‌دهی [۲]

به ازای $\gamma = 0$ و $r = 1$ مقدار کرنش اصلی در لحظه شروع ناپایداری پلاستیک در حالت تنش-صفحه‌ای بر اساس معیار وون میسز محاسبه می‌شود:

$$\varepsilon_1^* = \frac{2(\beta^2 + \beta + 1)}{(1 + \beta)(2\beta^2 - \beta + 2)} \times n \quad (۵۶-۲)$$

به ازای $r = 1$ مقدار کرنش اصلی ناپایداری بر اساس معیار وون میسز در حالت سه محوره محاسبه می‌شود:

$$\varepsilon_1^* = \frac{2(1 - \gamma)(\beta^2 + \beta + 1)}{(1 + \beta)(2\beta^2 - \beta + 2) + \gamma\beta^2(1 - \beta)} \times n \quad (۵۷-۲)$$

۴-۲ محاسبه تنش‌ها در لحظه شروع ناپایداری پلاستیک

از رابطه (۳۷-۲) نسبت $\frac{\sigma_1}{\bar{\sigma}}$ بدست می‌آید:

$$\frac{\sigma_1}{\bar{\sigma}} = \left[\frac{r + 1}{(\alpha - \gamma)^2 + (\gamma - 1)^2 + r(1 - \alpha)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (۵۸-۲)$$

از رابطه (۳۲-۲) کرنش موثر برحسب نسبت $\frac{\sigma_1}{\bar{\sigma}}$ و کرنش‌های اصلی بدست می‌آید:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sigma_1}{\bar{\sigma}} [(1 - \gamma)\varepsilon_1 + (\alpha - \gamma)\varepsilon_2] \quad (۵۹-۲)$$

با جایگذاری رابطه (۵۸-۲) در رابطه (۵۹-۲) کرنش موثر در لحظه شروع ناپایداری پلاستیک برحسب کرنش‌های اصلی و فرعی محاسبه می‌شود:

$$\bar{\varepsilon}^* = \left[\frac{r+1}{(\alpha-\gamma)^2 + (\gamma-1)^2 + r(1-\alpha)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \left[(1-\gamma)\varepsilon_1^* + (\alpha-\gamma)\varepsilon_2^* \right] \quad (۶۰-۲)$$

با مشخص شدن کرنش موثر در لحظه شروع ناپایداری پلاستیک، مقدار تنش موثر در لحظه شروع ناپایداری پلاستیک نیز به دست می‌آید:

$$\bar{\sigma}^* = k \left(\left[\frac{r+1}{(\alpha-\gamma)^2 + (\gamma-1)^2 + r(1-\alpha)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \left[(1-\gamma)\varepsilon_1^* + (\alpha-\gamma)\varepsilon_2^* \right] \right)^n \quad (۶۱-۲)$$

با مشخص شدن تنش موثر، با استفاده از رابطه (۵۸-۲) مقدار تنش اصلی بحرانی محاسبه می‌شود:

$$\sigma_1^* = k \left[\frac{r+1}{(\alpha-\gamma)^2 + (\gamma-1)^2 + r(1-\alpha)^2} \right]^{\frac{n+1}{2}} \left[(1-\gamma)\varepsilon_1^* + (\alpha-\gamma)\varepsilon_2^* \right]^n \quad (۶۲-۲)$$

فصل ۳ تحلیل ناپایداری پلاستیک براساس معیار تسلیم هیل غیر درجه دو

۳-۱ مقدمه

در این فصل ابتدا رفتار غیر واقعی معیار تسلیم هیل درجه دو در کشش دوماحوری یکسان، در تاثیر ضریب ناهمسانگردی بر شکل پذیری شرح داده می شود، سپس معیار تسلیم هیل غیر درجه دو در پنج حالت مختلف بیان می شود و در هر حالت کرنش ناپایداری پلاستیک تحت تنش سه محوره محاسبه می شود.

۳-۲ رفتار غیر واقعی معیار تسلیم هیل درجه دو^۱

در استفاده از معیار تسلیم هیل درجه دو، این معیار دو رفتار غیر واقعی از خود نشان می دهد که با حالت تجربی مطابقت ندارد. اولین رفتار غیر واقعی معیار تسلیم هیل درجه دو در حالت کشش دوماحوری یکسان و دومین رفتار غیر واقعی در اثر ضریب ناهمسانگردی در تخمین شکل پذیری ورق-های فلزی مشاهده می شود که در ذیل توضیح داده می شود.

۳-۲-۱ ناتوانی معیار تسلیم هیل درجه دو در پیش بینی تنش تسلیم دو محوری یکسان

با توجه به رابطه (۲-۱۹) اگر $r = 1$ باشد، سطح تسلیم به بیضی وون میسر تبدیل می شود همچنین اگر $r < 1$ ، معیار تسلیم هیل درجه دو، مکان هندسی تسلیم را داخل بیضی وون میسر و اگر $r > 1$ ، مکان هندسی تسلیم را خارج بیضی وون میسر پیش بینی می کند. وودتراپ^۲ و پی ارث^۳ برای آلیاژهای خاص آلومینیوم نشان دادند که علی رغم اینکه ضریب ناهمسانگردی کوچکتر از یک دارند اما سطح تسلیم آنها خارج بیضی وون میسر خواهد بود [۱]. در حالت تست کشش دو محوره یکسان $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_b$ برقرار است، از رابطه (۲-۱۹) نتیجه می شود:

$$\sigma_b = X \sqrt{\frac{1+r}{2}} \quad (۳-۱)$$

^۱ The anomalous behaviour of hill's yield criterion

^۲ Woodthrope

^۳ Pearce

رابطه (۱-۳) نشان می‌دهد که، اگر $r > 1$ آنگاه $\sigma_b > X$ و اگر $r < 1$ آنگاه $\sigma_b < X$ خواهد بود. وود تراپ و پی‌ارث نقض این قانون را برای آلیاژهای متعددی از آلومینیوم نشان دادند که در آن علی‌رغم آنکه $r < 1$ اما $\sigma_b > X$ می‌باشد.

۳-۲-۲ رفتار غیر واقعی هیل درجه دو در پیش‌بینی اثر ضریب ناهمسانگردی بر شکل‌پذیری

با توجه به تست‌های تجربی افزایش ضریب ناهمسانگردی تاثیر قابل ملاحظه‌ای در بهبود شکل‌پذیری ورق ندارد [۸، ۱۲]، اما در معیار تسلیم هیل درجه دو با افزایش ضریب ناهمسانگردی شکل‌پذیری ورق کاهش می‌یابد [۲۷].

۳-۳ حالت‌های مختلف معیار تسلیم هیل

همانطور که در شرح رفتار غیر واقعی معیار تسلیم هیل درجه دو در قسمت قبل ذکر شد، معیار تسلیم هیل درجه دو قادر نیست رفتار پلاستیک برخی از آلیاژهای آلومینیوم را توصیف کند. پس از مشاهده رفتار غیر واقعی معیار تسلیم هیل ۴۸، تحقیقات متعددی مستقل از هم انجام شد، که همگی به این نتیجه رسیدند توابع غیر درجه دو برای توصیف چنین رفتاری مناسب است. از رابطه (۱-۶) ضرایب ناهمسانگردی در راستای موازی و عمود بر جهت نورد بر اساس قانون جریان برای معیار تسلیم هیل ۷۹ محاسبه می‌شود:

$$r_0 = \frac{d\varepsilon_2}{d\varepsilon_3} \bigg|_{\sigma_2=0} = \frac{\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_2}}{\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_3}} \bigg|_{\sigma_2=0} = \frac{2^{m-1}a + h + 2b - c}{2^{m-1}a + g - b + 2c} \quad (2-3)$$

$$r_{90} = \frac{d\varepsilon_1}{d\varepsilon_3} \bigg|_{\sigma_1=0} = \frac{\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_1}}{\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_3}} \bigg|_{\sigma_1=0} = \frac{2^{m-1}b + h + 2a - c}{2^{m-1}b + f - a + 2c}$$

از مقایسه r_0 و r_{90} در رابطه (۲-۳) نتیجه می‌شود برای اینکه معیار تسلیم هیل غیر درجه دو همسانگرد صفحه‌ای باشد لازم است شرط ذیل برقرار باشد:

$$a = b, f = g \quad (۳-۳)$$

با در نظر گرفتن همسانگردی صفحه‌ای برای معیار تسلیم هیل غیر درجه دو پنج حالت خاص در حالت تنش صفحه‌ای ارائه می‌شود [۱۲]. در این بخش معادل این حالت‌ها با در نظر گرفتن تنش در راستای ضخامت شرح داده می‌شود. سپس با استفاده از قانون جریان نسبت کرنش در هر حالت محاسبه می‌شود و در قسمت بعد مقدار تنش و کرنش در لحظه ناپایداری پلاستیک بدست می‌آید.

۳-۳-۱ حالت اول

ضرایب در این حالت به صورت زیر فرض می‌شود:

$$a = b = h = 0, f = g \quad (۴-۳)$$

در این حالت رابطه (۱-۶) به شکل زیر تبدیل می‌شود:

$$f \left[|\sigma_2 - \sigma_3|^m + |\sigma_3 - \sigma_1|^m \right] + c |2\sigma_3 - \sigma_1 - \sigma_2|^m = \bar{\sigma}^m \quad (۵-۳)$$

از روابط (۲-۳) و (۴-۳) نتیجه می‌شود:

$$c = \frac{-rf}{2r+1} \quad (۶-۳)$$

با انجام تست کشش در راستای محور X و رابطه (۵-۳) خواهیم داشت:

$$\bar{\sigma}^m = X^m f \left(\frac{r+1}{2r+1} \right) \quad (۷-۳)$$

با جایگذاری روابط (۳-۶) و (۳-۷) در رابطه (۳-۵) و ساده‌سازی ضرایب محاسبه می‌شود:

$$f = \frac{2r+1}{r+1}, \quad c = -\frac{r}{r+1} \quad (۳-۸)$$

از رابطه (۳-۵) نتیجه می‌شود:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_1} &= \frac{\sigma_1 |\sigma_1|^{m-2} \left[-f(\gamma-1) |\gamma-1|^{m-2} - c(2\gamma-1-\alpha) |2\gamma-1-\alpha|^{m-2} \right]}{\bar{\sigma}^{m-1}} \\ \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_2} &= \frac{\sigma_1 |\sigma_1|^{m-2} \left[f(\alpha-\gamma) |\alpha-\gamma|^{m-2} - c(2\gamma-1-\alpha) |2\gamma-1-\alpha|^{m-2} \right]}{\bar{\sigma}^{m-1}} \end{aligned} \quad (۳-۹)$$

با نوشتن قانون جریان، نسبت کرنش عرضی به کرنش طولی بدست می‌آید:

$$\beta = \frac{\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_2}}{\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_1}} = \frac{f(\alpha-\gamma) |\alpha-\gamma|^{m-2} - c(2\gamma-1-\alpha) |2\gamma-1-\alpha|^{m-2}}{-f(\gamma-1) |\gamma-1|^{m-2} - c(2\gamma-1-\alpha) |2\gamma-1-\alpha|^{m-2}} \quad (۳-۱۰)$$

۳-۳-۲ حالت دوم

ضرایب در این حالت به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$a = b, \quad c = f = g = 0 \quad (۳-۱۱)$$

با اعمال شرایط رابطه (۳-۱۱) رابطه (۳-۶) به شکل زیر تبدیل می‌شود:

$$h |\sigma_1 - \sigma_2|^m + a \left[|2\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3|^m + |2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3|^m \right] = \bar{\sigma}^m \quad (۳-۱۲)$$

از روابط (۳-۲) و (۳-۱۱) نتیجه می‌شود:

$$a = \frac{h}{2^{m-1}(r-1) - (r+2)} \quad (۳-۱۳)$$

با انجام تست کشش در راستای محور X و رابطه (۱۲-۳) نتیجه می‌شود:

$$\bar{\sigma}^m = X^m h \left[\frac{2^{m-1}(r-1) - (r+2) + 2^m + 1}{2^{m-1}(r-1) - (r+2)} \right] \quad (۱۴-۳)$$

با قراردادن روابط (۱۳-۳) و (۱۴-۳) در رابطه (۱۲-۳) ضرایب مشخص می‌شود:

$$h = \frac{2^{m-1}(r-1) - (r+2)}{2^{m-1}(r-1) - (r+2) + 2^m + 1}, \quad a = \frac{1}{2^{m-1}(r-1) - (r+2) + 2^m + 1} \quad (۱۵-۳)$$

از رابطه (۱۲-۳) نتیجه می‌شود:

$$(۱۶-۳)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_1} &= \frac{\sigma_1 |\sigma_1|^{m-2} \left[h(1-\alpha) |1-\alpha|^{m-2} + 2a(2-\alpha-\gamma) |2-\alpha-\gamma|^{m-2} - a(2\alpha-1-\gamma) |2\alpha-1-\gamma|^{m-2} \right]}{\bar{\sigma}^{m-1}} \\ \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_2} &= \frac{\sigma_1 |\sigma_1|^{m-2} \left[-h(1-\alpha) |1-\alpha|^{m-2} - a(2-\alpha-\gamma) |2-\alpha-\gamma|^{m-2} + 2a(2\alpha-1-\gamma) |2\alpha-1-\gamma|^{m-2} \right]}{\bar{\sigma}^{m-1}} \end{aligned}$$

با نوشتن قانون جریان، نسبت کرنش عرضی به کرنش طولی بدست می‌آید:

$$(۱۷-۳)$$

$$\beta = \frac{\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_2}}{\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_1}} = \frac{-h(1-\alpha) |1-\alpha|^{m-2} - a(2-\alpha-\gamma) |2-\alpha-\gamma|^{m-2} + 2a(2\alpha-1-\gamma) |2\alpha-1-\gamma|^{m-2}}{h(1-\alpha) |1-\alpha|^{m-2} + 2a(2-\alpha-\gamma) |2-\alpha-\gamma|^{m-2} - a(2\alpha-1-\gamma) |2\alpha-1-\gamma|^{m-2}}$$

۳-۳-۳ حالت سوم

در سومین حالت ضرایب به صورت زیر فرض می‌شود:

$$a = b, \quad f = g, \quad h = c = 0 \quad (۱۸-۳)$$

از رابطه (۱۸-۳) و (۶-۱) نتیجه می‌شود:

$$f \left[|\sigma_2 - \sigma_3|^m + |\sigma_3 - \sigma_1|^m \right] + a \left[|2\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3|^m + |2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3|^m \right] = \bar{\sigma}^m \quad (۱۹-۳)$$

از روابط (۲-۳) و (۱۸-۳) نتیجه می‌شود:

$$a = \frac{fr}{2^{m-1}(1-r) + (r+2)} \quad (۲۰-۳)$$

با انجام تست کشش در راستای محور X و رابطه (۱۹-۳) نتیجه می‌شود:

$$\bar{\sigma}^m = X^m f \left[\frac{2^{m-1}(1-r) + (r+2) + 2^m r}{2^{m-1}(1-r) + (r+2)} \right] \quad (۲۱-۳)$$

با جایگذاری روابط (۲۰-۳) و (۲۱-۳) در رابطه (۱۹-۳) و ساده‌سازی نتیجه می‌شود:

$$f = \frac{2^{m-1}(1-r) + (r+2)}{2^{m-1}(1-r) + (r+2) + (2^m)r}, \quad a = \frac{r}{2^{m-1}(1-r) + (r+2) + 2^m r} \quad (۲۲-۳)$$

از رابطه (۱۹-۳) نتیجه می‌شود:

$$(۲۳-۳)$$

$$\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_1} = \frac{\sigma_1 |\sigma_1|^{m-2} \left[-f(\gamma-1) |\gamma-1|^{m-2} + 2a(2-\alpha-\gamma) |2-\alpha-\gamma|^{m-2} - a(2\alpha-1-\gamma) |2\alpha-1-\gamma|^{m-2} \right]}{\bar{\sigma}^{m-1}}$$

$$\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_2} = \frac{\sigma_1 |\sigma_1|^{m-2} \left[f(\alpha-\gamma) |\alpha-\gamma|^{m-2} - a(2-\alpha-\gamma) |2-\alpha-\gamma|^{m-2} + 2a(2\alpha-1-\gamma) |2\alpha-1-\gamma|^{m-2} \right]}{\bar{\sigma}^{m-1}}$$

با نوشتن قانون جریان، نسبت کرنش عرضی به کرنش طولی بدست می‌آید:

$$(۲۴-۳)$$

$$\beta = \frac{\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_2}}{\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_1}} = \frac{f(\alpha-\gamma) |\alpha-\gamma|^{m-2} - a(2-\alpha-\gamma) |2-\alpha-\gamma|^{m-2} + 2a(2\alpha-1-\gamma) |2\alpha-1-\gamma|^{m-2}}{-f(\gamma-1) |\gamma-1|^{m-2} + 2a(2-\alpha-\gamma) |2-\alpha-\gamma|^{m-2} - a(2\alpha-1-\gamma) |2\alpha-1-\gamma|^{m-2}}$$

۳-۳-۴ حالت چهارم

ضرایب در این حالت به صورت زیر فرض می‌شوند:

$$a = b = f = g = 0 \quad (۲۵-۳)$$

در این حالت رابطه (۶-۱) به شکل زیر تبدیل می‌شود:

$$h |\sigma_1 - \sigma_2|^m + c |2\sigma_3 - \sigma_1 - \sigma_2|^m = \bar{\sigma}^m \quad (۲۶-۳)$$

از روابط (۲-۳) و (۲۵-۳) نتیجه می‌شود:

$$h = c(2r+1) \quad (۲۷-۳)$$

با انجام تست کشش در راستای محور X و رابطه (۲۶-۳) نتیجه می‌شود:

$$\bar{\sigma}^m = 2X^m c(r+1) \quad (۲۸-۳)$$

از جایگذاری روابط (۲۷-۳) و (۲۸-۳) در رابطه (۲۶-۳) نتیجه می‌شود:

$$h = \frac{2r+1}{2(r+1)}, \quad c = \frac{1}{2(r+1)} \quad (۲۹-۳)$$

از رابطه (۲۶-۳) نتیجه می‌شود:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_1} &= \frac{\sigma_1 |\sigma_1|^{m-2} \left[h(1-\alpha) |1-\alpha|^{m-2} - c(2\gamma-1-\alpha) |2\gamma-1-\alpha|^{m-2} \right]}{\bar{\sigma}^{m-1}} \\ \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_2} &= \frac{\sigma_1 |\sigma_1|^{m-2} \left[-h(1-\alpha) |1-\alpha|^{m-2} - c(2\gamma-1-\alpha) |2\gamma-1-\alpha|^{m-2} \right]}{\bar{\sigma}^{m-1}} \end{aligned} \quad (۳۰-۳)$$

با نوشتن قانون جریان، نسبت کرنش عرضی به کرنش طولی بدست می‌آید:

$$\beta = \frac{\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_2}}{\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_1}} = \frac{-h(1-\alpha) |1-\alpha|^{m-2} - c(2\gamma-1-\alpha) |2\gamma-1-\alpha|^{m-2}}{h(1-\alpha) |1-\alpha|^{m-2} - c(2\gamma-1-\alpha) |2\gamma-1-\alpha|^{m-2}} \quad (۳۱-۳)$$

۳-۳-۵ حالت پنجم

ضرایب در این حالت به صورت زیر فرض می‌شود:

$$a = b = c = 0, \quad f = g \quad (۳۲-۳)$$

با لحاظ کردن مقادیر رابطه (۳۲-۳) در رابطه (۶-۱) نتیجه می‌شود:

$$f \left[|\sigma_2 - \sigma_3|^m + |\sigma_3 - \sigma_1|^m \right] + h |\sigma_1 - \sigma_2|^m = \bar{\sigma}^m \quad (۳۳-۳)$$

از روابط (۲-۳) و (۳۲-۳) نتیجه می‌شود:

$$h = rf \quad (۳۴-۳)$$

با انجام تست کشش در راستای محور X و رابطه (۳۳-۳) خواهیم داشت:

$$\bar{\sigma}^m = X^m [f + h] = X^m f (r + 1) \quad (۳۵-۳)$$

مقادیر مشتق جزئی تنش موثر نسبت به تنش‌های اصلی برابر است با:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_1} &= \frac{\sigma_1 |\sigma_1|^{m-2} \left[-f (\gamma - 1) |\gamma - 1|^{m-2} + h (1 - \alpha) |1 - \alpha|^{m-2} \right]}{\bar{\sigma}^{m-1}} \\ \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_2} &= \frac{\sigma_1 |\sigma_1|^{m-2} \left[f (\alpha - \gamma) |\alpha - \gamma|^{m-2} - h (1 - \alpha) |1 - \alpha|^{m-2} \right]}{\bar{\sigma}^{m-1}} \end{aligned} \quad (۳۶-۳)$$

با نوشتن قانون جریان، نسبت کرنش عرضی به کرنش طولی بدست می‌آید:

$$\beta = \frac{f (\alpha - \gamma) |\alpha - \gamma|^{m-2} - h (1 - \alpha) |1 - \alpha|^{m-2}}{-f (\gamma - 1) |\gamma - 1|^{m-2} + h (1 - \alpha) |1 - \alpha|^{m-2}} \quad (۳۷-۳)$$

با جایگذاری رابطه (۳۴-۳) و (۳۵-۳) در رابطه (۳۳-۳) و ساده‌سازی ضرایب مشخص می‌شود:

$$f = \frac{1}{r + 1}, \quad h = \frac{r}{r + 1} \quad (۳۸-۳)$$

۳-۴ محاسبه کرنش ناپایداری پلاستیک

در این قسمت روند محاسبه کرنش ناپایداری پلاستیک براساس تئوری گلوئی پخشی سوئیفت و معیار تسلیم هیل غیر درجه دو ارائه شده است. در همه حالت‌های ذکر شده برای معیار تسلیم هیل غیر درجه دو که در قسمت قبل شرح داده شد، رابطه میان β و α غیر خطی است، لذا α به صورت صریح قابل محاسبه نیست و برای محاسبه α ، این معادلات باید به صورت عددی حل شود. پس از محاسبه α از رابطه (۲-۵۰) کرنش ناپایداری پلاستیک قابل محاسبه است.

$$\varepsilon_1^* = \frac{\sigma_1 \left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_1} \right)^2 + \sigma_2 \left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_2} \right) \left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_1} \right) + \sigma_3 \left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_3} \right) \left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_1} \right)}{\left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_1} \right)^2 \sigma_1 + \left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_2} \right)^2 \sigma_2} \times n$$

$$\varepsilon_2^* = \frac{\sigma_2 \left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_2} \right)^2 + \sigma_1 \left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_1} \right) \left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_2} \right) + \sigma_3 \left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_3} \right) \left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_2} \right)}{\left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_1} \right)^2 \sigma_1 + \left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_2} \right)^2 \sigma_2} \times n$$

به منظور محاسبه تنش و کرنش موثر و تنش‌های اصلی در لحظه ناپایداری پلاستیک از رابطه (۱-۶) نسبت تنش اصلی بزرگ به تنش موثر محاسبه می‌شود:

(۳-۳۹)

$$\frac{\sigma_1}{\bar{\sigma}} = \left(\frac{1}{f |\alpha - \gamma|^m + g |\gamma - 1|^m + h |1 - \alpha|^m + a |2 - \alpha - \gamma|^m + b |2\alpha - 1 - \gamma|^m + c |2\gamma - 1 - \alpha|^m} \right)^{\frac{1}{m}}$$

برای محاسبه کرنش موثر در لحظه ناپایداری پلاستیک از رابطه (۲-۵۹) استفاده شده است:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sigma_1}{\bar{\sigma}} \left[(1 - \gamma) \varepsilon_1^* + (\alpha - \gamma) \varepsilon_2^* \right]$$

با جایگذاری نسبت $\frac{\sigma_1}{\bar{\sigma}}$ از رابطه (۳-۳۹) در رابطه (۲-۵۹) مقدار کرنش موثر در لحظه ناپایداری پلاستیک محاسبه شده است:

(۳-۴۰)

$$\bar{\varepsilon} = \frac{(1-\gamma)\varepsilon_1^* + (\alpha-\gamma)\varepsilon_2^*}{\left(f|\alpha-\gamma|^m + g|\gamma-1|^m + h|1-\alpha|^m + a|2-\alpha-\gamma|^m + b|2\alpha-1-\gamma|^m + c|2\gamma-1-\alpha|^m\right)^{\frac{1}{m}}}$$

با محاسبه کرنش موثر، تنش موثر در لحظه ناپایداری پلاستیک از رابطه $\bar{\sigma} = K\bar{\varepsilon}^n$ به دست می‌آید. با محاسبه تنش و کرنش موثر در لحظه ناپایداری و جایگذاری در رابطه (۳-۳۹) مقدار تنش اصلی بزرگ در لحظه ناپایداری پلاستیک به دست می‌آید.

(۳-۴۱)

$$\sigma_1 = k \frac{\left[(1-\gamma)\varepsilon_1^* + (\alpha-\gamma)\varepsilon_2^*\right]^n}{\left(f|\alpha-\gamma|^m + g|\gamma-1|^m + h|1-\alpha|^m + a|2-\alpha-\gamma|^m + b|2\alpha-1-\gamma|^m + c|2\gamma-1-\alpha|^m\right)^{\frac{n+1}{m}}}$$

چون FLD_0 کرنش اصلی بزرگ در مسیر $\beta = 0$ می‌باشد، و $\beta = \frac{\partial \sigma_2}{\partial \bar{\sigma}}$ نتیجه می‌شود $\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_2} = 0$ لذا

با جایگذاری در رابطه (۲-۵۰) نتیجه می‌شود:

$$FLD_0 = \left(1 + \gamma \frac{\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_3}}{\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_1}}\right) \times n \quad (۳-۴۲)$$

با توجه به شرط حجم ثابت، ($\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0$) اگر به جای مقادیر کرنش‌های اصلی مقدار معادل آن از قانون جریان قرار داده شود، نتیجه می‌شود:

$$\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_1} + \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_2} + \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_3} = 0 \quad (۴۳-۳)$$

با توجه به اینکه در مسیر $\beta = 0$ ، تساوی $\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_2} = 0$ برقرار است، از رابطه (۴۳-۳) نتیجه می‌شود:

$$\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_3} = -\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_1} \quad (۴۴-۳)$$

با قرار دادن رابطه (۴۳-۳) در رابطه (۴۲-۳) مقدار FLD_0 محاسبه می‌شود:

$$FLD_0 = (1 - \gamma) \times n \quad (۴۵-۳)$$

تئوری گلوبی پخشی سوئیفت مقدار FLD_0 را مستقل از نوع معیار تسلیم پیش‌بینی می‌کند، و نشان می‌دهد

که مقدار FLD_0 تنها تابع تنش در راستای ضخامت و توان کرنش‌سختی است.

فصل ۴ تحلیل عددی شکل پذیری لوله فولادی به کمک دیاگرام FLD وابسته به

فشار

۴-۱ مقدمه

در سال‌های اخیر روش اجزای محدود^۱ به یک ابزار بسیار قدرتمند برای شبیه‌سازی فرایندهای مختلف تولید تبدیل گردیده است. هنگام تدوین و توسعه یک فرایند جدید، شبیه‌سازی صحیح فرایند و آزمایش پارامترهای مختلف آن در ابتدای امر بسیار موثر بوده و بدین ترتیب طراحی ساختار صحیح و انتخاب پارامترهای صحیح فرایند قبل از آزمایش عملی ممکن خواهد بود. در نتیجه زمان صرف شده و تعداد آزمایش و خطا کاهش یافته و منجر به کاهش هزینه‌های تولید خواهد گردید. از جمله کدهای متداول صریح FEM می‌توان به LS-DYNA3D، ANSYS، ABAQUS اشاره کرد. به علت قابلیت‌های بالای نرم‌افزار ABAQUS نسبت به سایر نرم‌افزارهای اجزای محدود، در این پژوهش از نرم‌افزار فوق برای انجام شبیه‌سازی استفاده گردیده است. از جمله خصوصیات بارز این نرم‌افزار که آن را نسبت به سایر نرم‌افزارهای مشابه متمایز کرده، راحتی استفاده، دقت و سرعت بالای محاسبات است. در ادامه، نخست نرم‌افزار شبیه‌سازی اجزای محدود ABAQUS معرفی شده و سپس مراحل تحلیل فرایند هیدروفرمینگ لوله، با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود ارائه می‌گردد.

۴-۲ معرفی نرم‌افزار شبیه‌سازی

نرم‌افزار ABAQUS یکی از نرم‌افزارهای تحلیل اجزای محدود است که در سال‌های اخیر کاربرد گسترده‌ای در زمینه شبیه‌سازی فرایندهای شکل‌دهی فلزات پیدا کرده است، به‌طوری‌که شرکت‌های بزرگ اتومبیل‌سازی برای طراحی‌های پیشرفته خود به استفاده از نرم‌افزار ABAQUS روی آورده‌اند. امروزه ABAQUS به عنوان یک نرم‌افزار انعطاف‌پذیر در حل مسائل به روش اجزای محدود در پژوهشکده‌های مهندسی دنیا جایگاه ویژه‌ای پیدا کرده و به عنوان نرم‌افزار قدرتمند مهندسی در مراکز تحقیقات اغلب صنایع استفاده می‌شود. یک بسته نرم‌افزاری ABAQUS دارای سه محصول اصلی است که شامل موارد زیر است:

^۱ Finite Element Method

۱- ABAQUS/Standard: محصول اصلی شرکت ABAQUS است که با استفاده از آن می‌توان گستره وسیعی از مسائل خطی و غیرخطی شامل مسائل استاتیکی، دینامیکی، انتقال حرارت و الکترونیک را تحلیل کرد. این محصول دستگاه معادلات حاکم را در هر نمو^۱ به صورت ضمنی^۲ تحلیل می‌کند. در این روش، کاربر می‌تواند میزان نمو در هر مرحله را تعیین کند یا از روش نیوتن-رافسون اصلاح شده استفاده نماید.

۲- ABAQUS/Explicit: محصولی با اهداف ویژه است که برای مدل‌سازی مسائل دینامیکی گذرا مانند برخورد و ضربه‌ی انفجار، آزمایش ضربه، مچالگی و همچنین مسائل شبه استاتیکی یا مسائل غیرخطی که در آنها شرایط تماس تغییر می‌کند (مانند شکل‌دهی) مناسب است. این محصول، دستگاه معادلات حاکم را بر پایه قانون انتگرال‌گیری صریح^۳ به همراه استفاده از ماتریس جرم قطری المان تحلیل می‌کند. در این روش تعیین اندازه نمو در مسائل غیرخطی توسط کاربر ممکن نبوده و نرم‌افزار بر اساس شرایط پایداری، میزان نمو در هر مرحله را به صورت اتوماتیک محاسبه می‌کند.

۳- ABAQUS/CAE: به عنوان یک رابط گرافیکی کاربر در بسته نرم‌افزاری ABAQUS گنجانده شده است. این محصول به کاربر کمک می‌کند که یک مدل هندسی را سریعاً و به‌سادگی بسازد یا از یک نرم‌افزار مدل‌سازی دیگر وارد کند. با استفاده از این نرم‌افزار می‌توان مدل هندسی قطعه را گسسته-سازی و خواص مواد آن را تعیین و شرایط مرزی و بار اعمالی را مشخص کرد. در این پژوهش از نرم‌افزار ABAQUS/Explicit 6.12 جهت انجام شبیه‌سازی استفاده شده است.

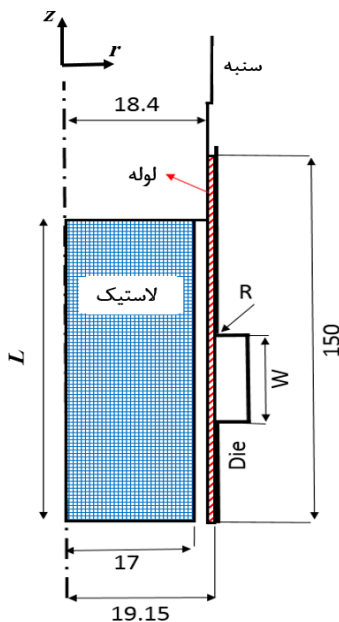
۴-۳ شرح مدل عددی

^۱ Increment

^۲ Implicit

^۳ Explicit

برای مطالعه موردی بررسی اثر فشار بر قابلیت شکل‌پذیری به مدل‌سازی این پدیده با استفاده از معیار شکست نرم FLD، یافته شده از این تحقیق پرداخته شده است. برای این منظور فرآیند انبساط دهی لوله فولادی زنگ‌نزن ۳۰۴ به کمک بالشتک کشسان مدل شده و نتایج عددی در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن اثر فشار بر منحنی FLD با نتایج تجربی پایان‌نامه کارشناسی ارشد غفوریان مقایسه شده است [۲۸]. در این شبیه‌سازی از حلگر دینامیکی صریح با تکنیک کمکی بزرگنمایی سرعت برای کاهش زمان تحلیل استفاده شده است. لوله فولادی زنگ‌نزن ۳۰۴ دارای ضخامت ۰/۷۵ میلی-متر، قطر خارجی و ارتفاع به ترتیب ۳۸ و ۱۵۰ میلی‌متر می‌باشد. لوله با المان‌های تغییرشکل‌پذیر پوسته‌ای S4R مدل شده و قالب صلب در نظر گرفته شده است. شکل ۴-۱ نحوه مدل‌سازی و مونتاژ مجموعه را نمایش می‌دهد.



شکل ۴-۱: ابعاد و نحوه چیدمان اجزاء در شبیه‌سازی (ابعاد بر حسب میلی‌متر)

به منظور تعیین خواص پلی‌اورتان‌ها از مدل ریاضی مونی-ریولین استفاده شده است که ضرایب مربوط به آنها در جدول ۴-۱ آورده شده است [۲۸].

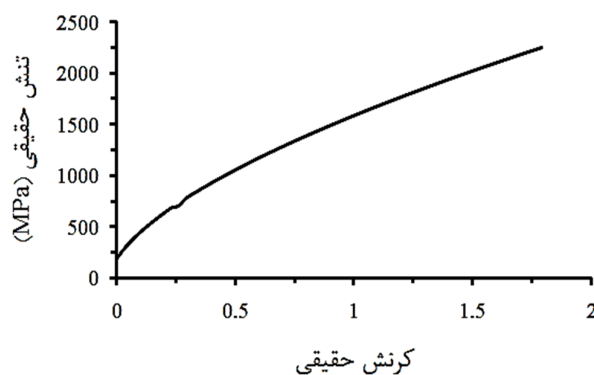
جدول ۴-۱: خواص پلی‌اورتان مورد استفاده

سختی لاستیک (شور A)	ضریب C2 (MPa)	ضریب C1 (MPa)
پلی‌اورتان مورد استفاده در این تحقیق با سختی ۷۵	۰/۳۲۸	۱/۸۵۶

خصوصیات فیزیکی و مکانیکی لوله شامل منحنی تنش-کرنش حقیقی، ضریب پواسون، مدول الاستیک و چگالی مطابق جدول ۴-۲ و شکل ۴-۲ به نرم‌افزار اعمال گردید. لوله فولادی استفاده شده در آزمایش همگن و همسانگرد در نظر گرفته شده است.

جدول ۴-۲: خصوصیات فیزیکی و مکانیکی لوله فولادی [۲۸]

جنس ورق	چگالی (kg/m ³)	مدول یانگ (GPa)	تنش تسلیم (MPa)	ضریب پواسون
فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴	۷۹۳۰	۲۰۰	۲۱۵	۰/۲۹

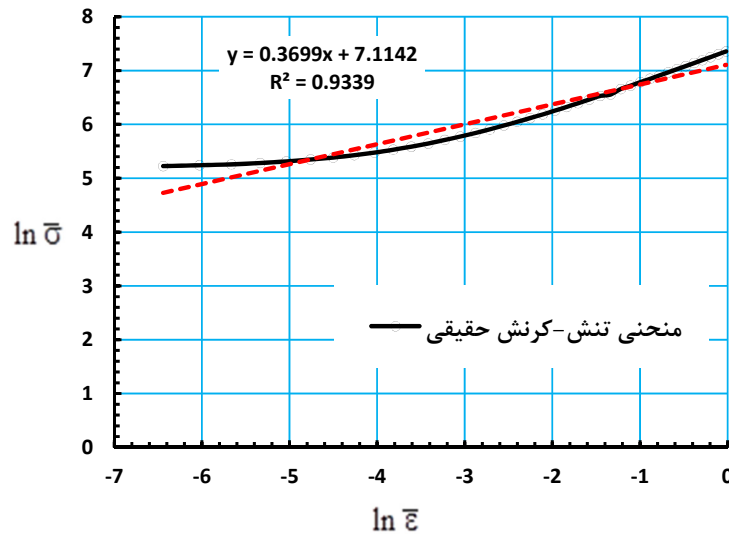


شکل ۴-۲: منحنی تنش-کرنش لوله فولادی [۲۸]

با در نظر گرفتن منحنی تنش-کرنش لوله فولادی زنگ‌نزن ۳۰۴ می‌توان مقادیر n و K مربوط به رابطه (۱-۱۲) که تنش و کرنش موثر را به هم مرتبط می‌کند تخمین زد. جهت تخمین مقادیر n و K نمودار $\ln \bar{\sigma}$ را بر حسب $\ln \bar{\epsilon}$ ترسیم می‌شود و بهترین برازش خطی با استفاده از روش حداقل مربعات

از آن عبور داده می‌شود و با معلوم بودن معادله خط مزبور مقادیر n و K را برآورد می‌شود. از رابطه (۱۲-۱) می‌توان نوشت:

$$\ln \bar{\sigma} = \ln K + n \ln \bar{\epsilon} \quad (۱-۴)$$



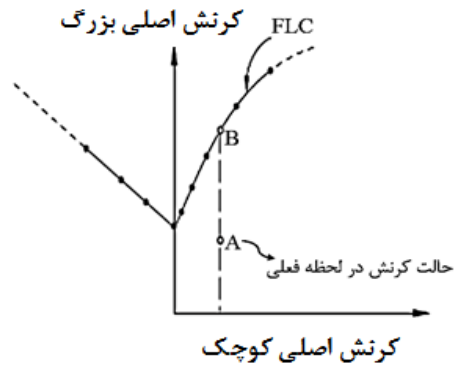
شکل ۴-۳ برازش خطی $\ln \bar{\sigma}$ بر حسب $\ln \bar{\epsilon}$

در ترسیم نمودار فوق قسمت غیر خطی نمودار تنش-کرنش حقیقی لحاظ نشده است. با استفاده از معادله خط تقریب زده شده مقادیر K و n به صورت زیر تخمین زده می‌شود.

$$\begin{cases} \ln K = 7.1142 \\ n = 0.3699 \end{cases} \Rightarrow K = 1229/3 \text{ Mpa}$$

۴-۳-۱ تحلیل شکست نرم به کمک نمودار حد شکل‌دهی

معیار شروع شکست نمودار حد شکل‌دهی نیاز به مشخصات منحنی حد شکل‌دهی دارد، که به منظور تعریف منحنی حد شکل‌دهی می‌توان کرنش اصلی بزرگ را بر حسب کرنش اصلی کوچک، دمای فرایند و دیگر متغیرهای فرایند به صورت $(\epsilon_{minor}, \theta, f_i)$ ϵ_{major}^{FLD} وارد کرد.



شکل ۴-۴: مقایسه وضعیت فعلی کرنش با وضعیت بحرانی در تعریف پارامتر حد شکل‌دهی در نرم‌افزار آباکوس

در این روش متغیر شکل‌پذیری تحت عنوان w_{FLD} طبق رابطه (۲-۴) بیان می‌شود. متغیر w_{FLD} یک تابعی از حالت تغییر شکل فعلی می‌باشد که به عنوان نسبت کرنش اصلی در حال حاضر، به کرنش اصلی بر روی منحنی حد شکل‌دهی تعریف شده و به صورت زیر ارائه می‌گردد.

$$w_{FLD} = \frac{\varepsilon_{major}}{\varepsilon_{major}^{FLD}(\varepsilon_{minor}, \theta, f_i)} \quad (2-4)$$

به عنوان مثال، در شکل ۴-۴ برای حالت تغییر شکل داده شده در نقطه A متغیر شکل‌پذیری FLD به صورت زیر محاسبه می‌شود. در لحظه رسیدن حالت کرنش فعلی (نقطه A) به حد شکل‌دهی (B)؛ پارامتر شکل‌پذیری $w_{FLD} = 1$ خواهد شد و لحظه شروع آسیب خواهد بود و می‌توان نوشت:

$$w_{FLD} = \frac{\varepsilon_{major}^A}{\varepsilon_{major}^B} \quad (3-4)$$

اگر مقدار کرنش اصلی کوچک در خارج از محدوده‌ی مقادیر مشخص شده باشد؛ مقادیر کرنش روی منحنی حد شکل‌دهی با این فرض که شیب در نقطه پایانی از منحنی ثابت بماند؛ برون‌یابی می‌شوند.

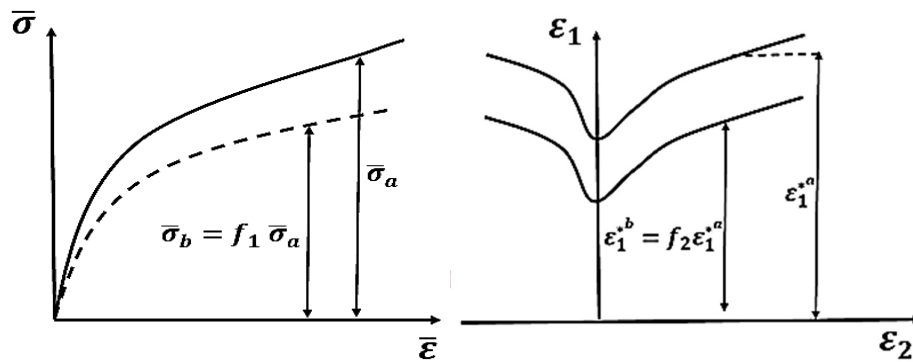
۴-۳-۲ مدل سازی درز لوله با یک نقص مکانیکی

درز لوله به صورت یک نوار نازک به عرض ثابت ۱ میلی‌متر در طول با خواص مکانیکی ضعیف‌تر نسبت به دیگر نواحی تعریف شده است. به منظور تعیین خواص مکانیکی ناحیه درز لوله ضریب

ناهمگنی^۱ f_1 برای افت تنش جریان $\bar{\sigma}$ و f_2 برای افت کرنش اصلی بزرگتر (ε_1^*) نسبت به ناحیه سالم تعریف گردید.

$$f_1 = \frac{\bar{\sigma}^b}{\bar{\sigma}^a}, \quad f_2 = \frac{\varepsilon_1^{*b}}{\varepsilon_1^{*a}} \quad (۴-۴)$$

در روابط فوق بالانویس a و b به ترتیب مربوط به نواحی سالم و درز جوش می‌باشند. شکل ۴-۵ تنش جریان پلاستیک و منحنی حد شکل‌دهی را برای دو ناحیه سالم و نقص به صورت شماتیک نشان می‌دهد. می‌توان با استفاده از روابط (۴-۴) خواص ناحیه‌ی نقص را بر حسب ناحیه سالم بدست آورد. مقدار بهینه‌ی ضریب نقص از نتایج پایان‌نامه انجام شده توسط غفوریان برابر $۰/۸۹۷$ در نظر گرفته شد [۲۸].

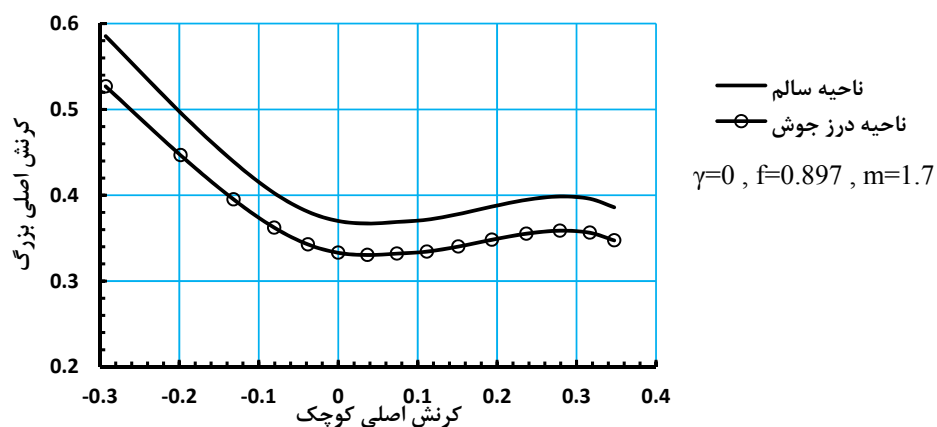


شکل ۴-۵: تعریف خواص مکانیکی ناحیه نقص و ناحیه سالم

الف) براساس منحنی تنش و کرنش، ب) براساس منحنی حد شکل‌دهی

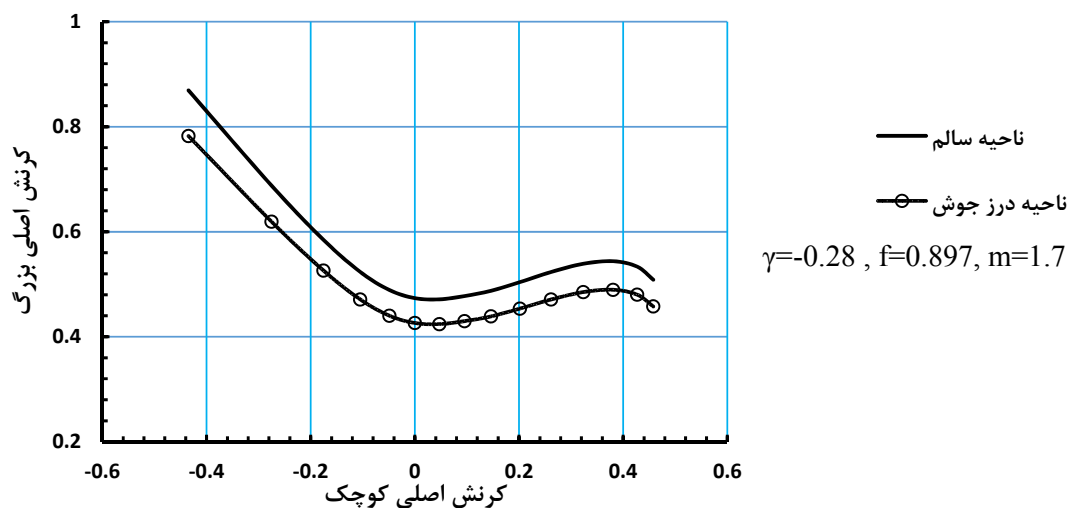
در شکل ۴-۶ منحنی حد شکل‌دهی برای دو ناحیه سالم و درز جوش با استفاده از اولین حالت از معیار تسلیم هیل غیر درجه دو و $m = ۱/۷$ ترسیم شده است که در فصل پنج روند این موضوع بیان شده است.

^۱ Inhomogeneity factor



شکل ۴-۶ منحنی حد شکل‌دهی برای ناحیه سالم و ناحیه نقص از لوله فولادی زنگ‌نزن ۳۰۴، بدون اعمال اثر فشار

پس از یک تحلیل اولیه مقدار متوسط γ که به صورت نسبت فشار تماسی به تنش اصلی بیشینه تعریف شده است برابر $0/28$ - به دست آمد و از حل تحلیلی منحنی حد شکل‌دهی با اعمال اثر فشار به دست آمد شرح محاسبه مقدار γ در فصل پنج بیان شده است. شکل ۴-۷ منحنی حد شکل‌دهی را برای نواحی سالم و درز جوش به ازای $\gamma = -0/28$ ترسیم شده است.



شکل ۴-۷ منحنی حد شکل‌دهی برای ناحیه سالم و ناحیه نقص از لوله فولادی زنگ‌نزن ۳۰۴، با اعمال اثر فشار

فصل ۵ ارائه نتایج و بحث

۵-۱ مقدمه

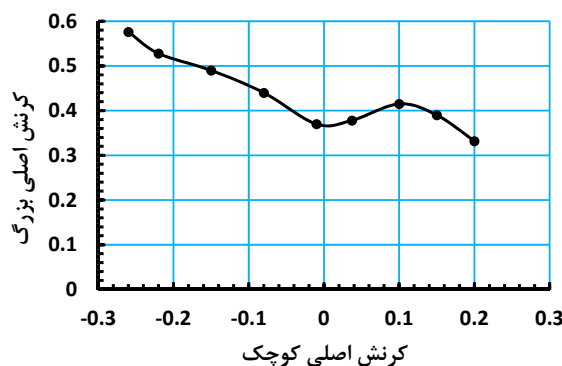
در این فصل ابتدا نتایج حل عددی و سپس نتایج حل تحلیلی شرح داده می‌شود. در نتایج عددی ابتدا از میان حالت‌های مختلف معیار تسلیم هیل غیر درجه دو، مدل و توان مناسب، جهت انطباق بهتر نتایج حل تحلیلی با نتایج تجربی منحنی حد شکل‌دهی فولاد زنگ‌زن ۳۰۴ انتخاب می‌شود. سپس روند محاسبه نسبت تنش نرمال و نتایج پیش‌بینی پارگی در فرآیند انبساط‌دهی لوله فولادی به کمک بالشتک کشسان شرح داده می‌شود. در قسمت ارائه نتایج حل تحلیلی، رفتار غیر واقعی معیار تسلیم هیل درجه دو در تاثیر ضریب ناهمسانگردی بر شکل‌پذیری بیان شده است. سپس نتایج حل تحلیلی برای بررسی اثر فشار روی منحنی حد شکل‌دهی ورق AA6011 ارائه شده است.

۵-۲ نتایج حل عددی

۵-۲-۱ تعیین مدل مناسب از حالات مختلف معیار تسلیم هیل غیر درجه دو در حالت

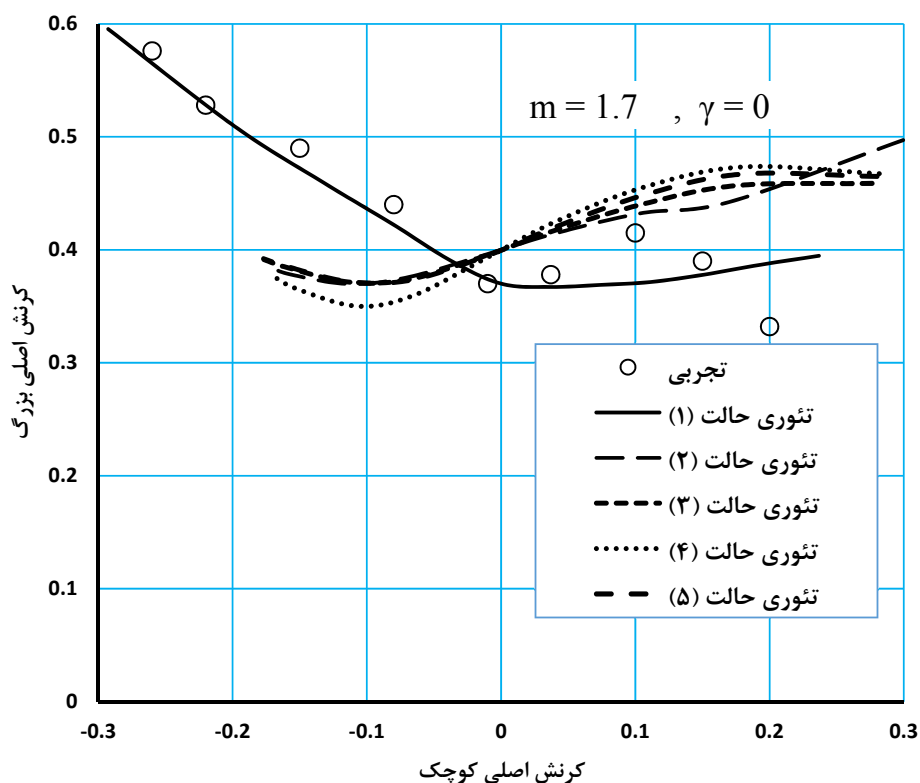
تنش صفحه‌ای

در این قسمت منحنی حد شکل‌دهی فولاد زنگ‌زن ۳۰۴ با معیار تسلیم هیل غیر درجه دو در پنج حالت ذکر شده بدست می‌آید و حالتی که بهترین انطباق را با منحنی حد شکل‌دهی فولاد زنگ‌زن دارد انتخاب می‌شود. برای این امر نمودار حد شکل‌دهی ورق فولادی زنگ‌زن ۳۰۴ در شرایط تنش-صفحه‌ای مطابق شکل ۵-۷ استفاده شده است.



شکل ۵-۱ نمودار حد شکل‌دهی ورق فولادی زنگ‌زن ۳۰۴ [۲۹]

در شکل ۲-۵ منحنی‌های حد شکل‌دهی فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ تحت شرایط تنش صفحه‌ای ($\gamma = 0$) در پنج حالت مختلف از معیار تسلیم هیل غیر درجه دو که در فصل سوم شرح داده شد، به دست آمد و با منحنی شکل ۱-۵ مقایسه شد.



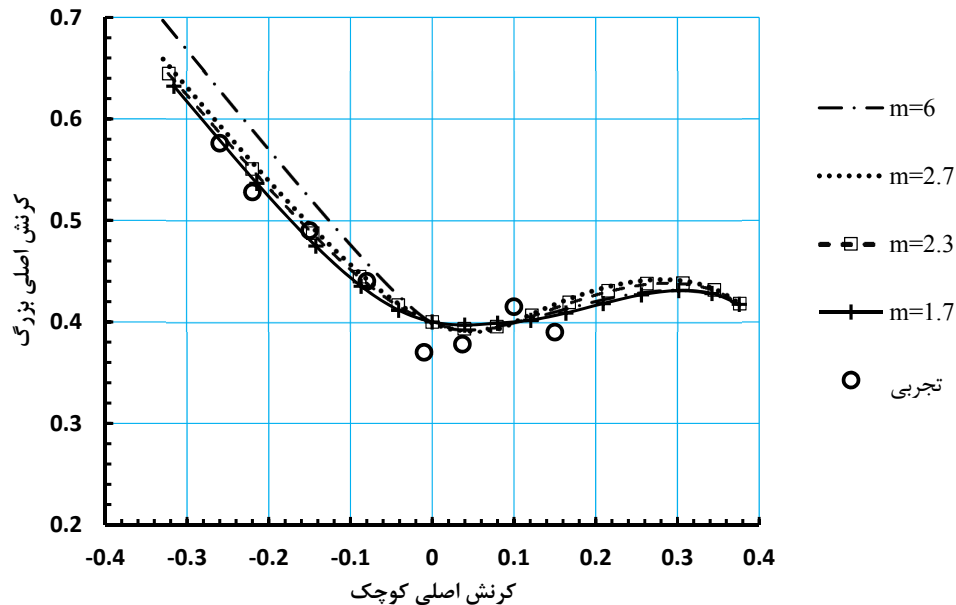
شکل ۲-۵ نمودار حد شکل‌دهی ورق فولادی زنگ‌نزن ۳۰۴ در پنج حالت از معیار تسلیم هیل غیر درجه دو

در نمودارهای فوق مشاهده می‌شود که اولین حالت از معیار تسلیم هیل غیر درجه دو بهترین انطباق را با منحنی حد شکل‌دهی فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ دارد.

۵-۲-۲ استخراج توان مناسب معیار تسلیم هیل غیر درجه دو

برای تخمین توان مناسب معیار تسلیم هیل غیر درجه دو، با استفاده از اولین حالت از معیار تسلیم هیل غیر درجه دو که در قسمت قبل بهترین انطباق را با منحنی حد شکل‌دهی فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ نشان داد؛ به ازای چند مقدار مختلف از توان m ، منحنی حد شکل‌دهی فولاد در حالت بدون فشار ترسیم شد و با انطباق با منحنی تجربی ورق فولادی مقدار مناسب برابر $m = 1/7$ انتخاب شد (شکل

۳-۵). با استفاده از اولین حالت از معیار تسلیم هیل غیر درجه دو با توان $m = 1/7$ و ضریب نقص 0.897 منحنی حد شکل‌دهی نواحی نقص و سالم بدست می‌آید.



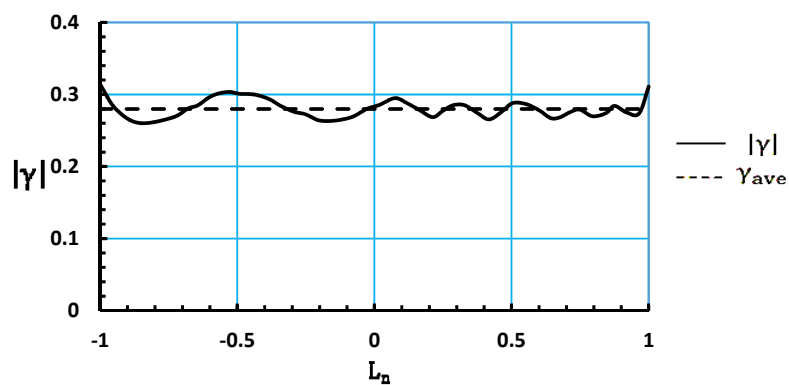
شکل ۳-۵ نمودار حد شکل‌دهی ورق فولادی زنگ نزن ۳۰۴ به ازای مقادیر مختلف نمای m

۳-۲-۵ شرح محاسبه نسبت تنش نرمال و ترسیم نمودار حد شکل‌دهی تحت فشار

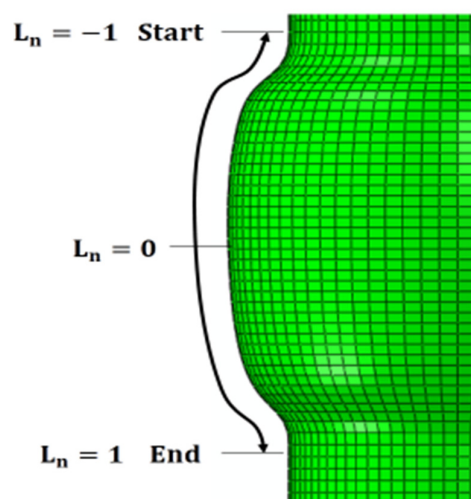
طبق رابطه (۲-۲۱)، γ به صورت نسبت فشار تماسی^۱ به تنش اصلی بیشینه^۲ تعریف می‌شود. در شکل ۵-۵ یک مسیر طولی در ناحیه‌ی بالچ تعریف شده است که در آن پارامتر L_n فاصله بی بعد شده از مرکز لوله می‌باشد، در نقطه شروع مسیر $L_n = -1$ و در نقطه پایان مسیر $L_n = 1$ می‌باشد. در مسیر تعریف شده در ناحیه‌ی بالچ قدر مطلق میانگین نسبت تنش نرمال در آستانه ترکیدگی $|\gamma_{ave}|$ به دست آمد (شکل ۴-۵). از نتایج تحلیل عددی کرنش محیطی و طولی در قله بالچ بر حسب زمان به دست آمد و در شکل ۶-۵ ترسیم شد. این شکل به درستی خطی بودن مسیر کرنش را در نقطه شروع ترکیدگی لوله تایید می‌کند.

^۱ Contact pressure

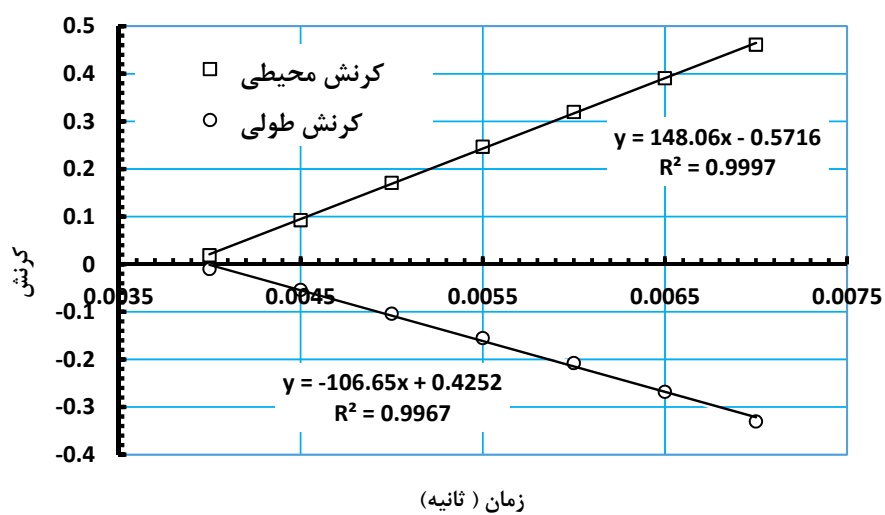
^۲ Maximum principal stress



شکل ۵-۴ نسبت فشار تماسی به تنش اصلی پیشینه در طول ناحیه بالچ

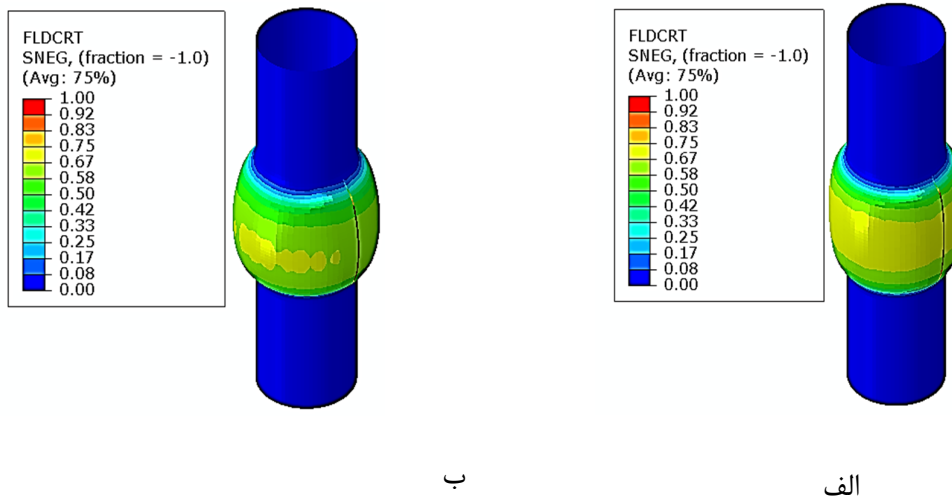


شکل ۵-۵ مسیر طولی تعریف شده در ناحیه بالچ



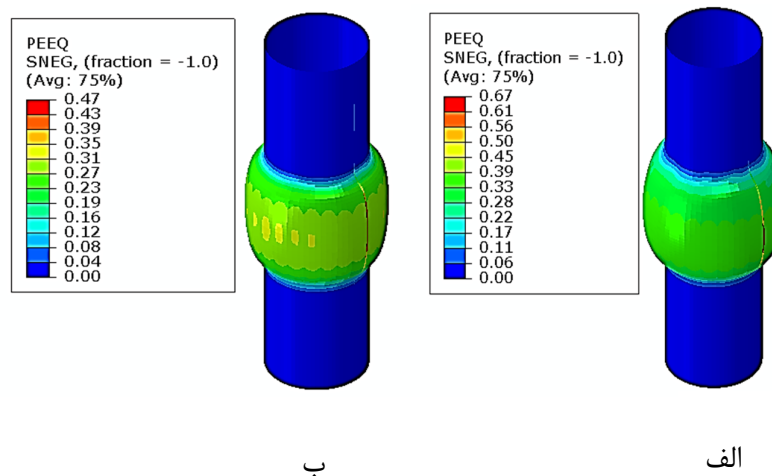
شکل ۵-۶ نمودار کرنش طولی و محیطی در قله بالچ بر حسب زمان از شبیه‌سازی عددی

نتایج پیش‌بینی ترکیدگی لوله برای انبساط‌دهی لوله فولادی زنگ‌نزن ۳۰۴ در دو حالت با اعمال اثر فشار تماسی و بدون اثر فشار تماسی بر FLD در تحلیل عددی بدست آمد. در، شکل ۵-۷، و شکل ۵-۸ توزیع کرنش موثر پلاستیک و فاکتور شکل‌پذیری w_{FLD} به ترتیب در دو حالت با فشار و بدون فشار در آستانه ترکیدگی لوله نشان داده شده است. مطابق نتایج فوق کرنش موثر پلاستیک بیشینه با اعمال اثر فشار بر منحنی حد شکل‌دهی از ۰/۴۷ به ۰/۶۷ و به میزان ۴۳ درصد افزایش یافته است.



شکل ۵-۷ توزیع فاکتور شکل‌پذیری در آستانه پارگی لوله

الف) بدون اعمال اثر فشار بر FLD، ب) با اعمال اثر فشار بر FLD

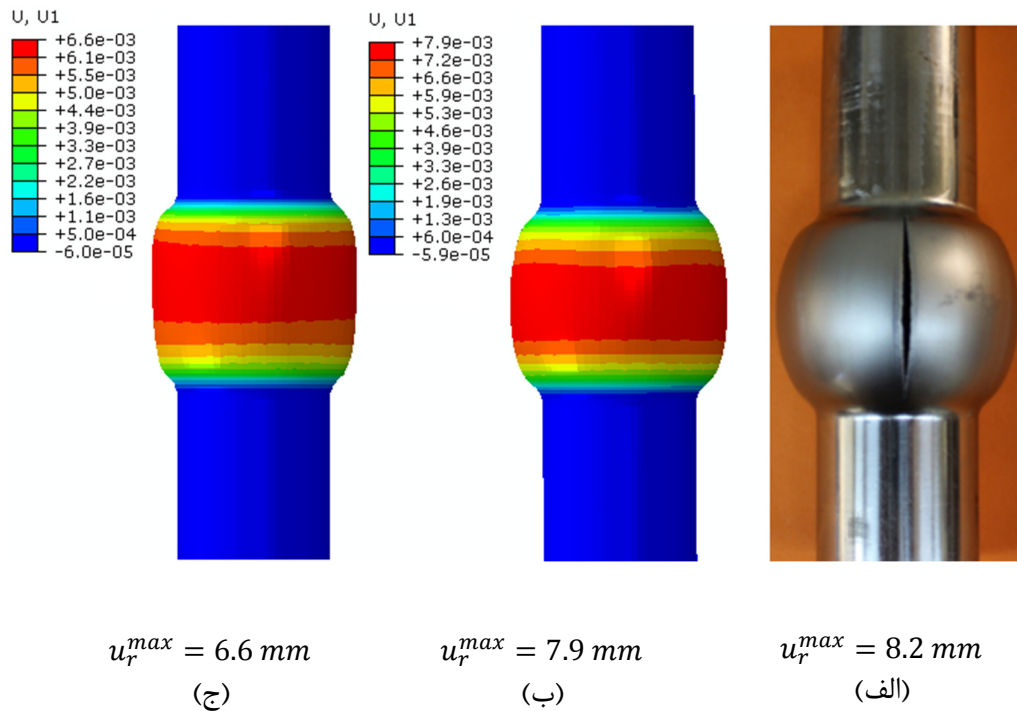


شکل ۵-۸ توزیع کرنش موثر پلاستیک در آستانه پارگی لوله

الف) با اعمال اثر فشار بر FLD، ب) بدون اعمال اثر فشار بر FLD

در شکل ۵-۹ توزیع جابجایی شعاعی در دو حالت با و بدون اعمال اثر فشار بر منحنی حد شکل‌دهی و پارگی لوله در حالت تجربی ارائه شده است. بیشترین جابجایی شعاعی در هر حالت روی شکل نشان داده شده است. از مقایسه نتایج عددی با نتایج تجربی مشخص شد که اعمال اثر فشار بر منحنی حد شکل‌دهی، دقت نتایج در خصوص پیش‌بینی پارگی افزایش می‌یابد و آستانه پارگی لوله را با دقت بیشتر می‌توان تخمین زد و با اعمال اثر فشار خطا از ۱۹/۵٪ به ۳/۷٪ کاهش پیدا کرد. درصد خطا از رابطه زیر محاسبه شده است:

$$\%error = \left| \frac{(u_r)_{EXP} - (u_r)_{FEM}}{(u_r)_{EXP}} \right| \times 100 \quad (۵-۱)$$



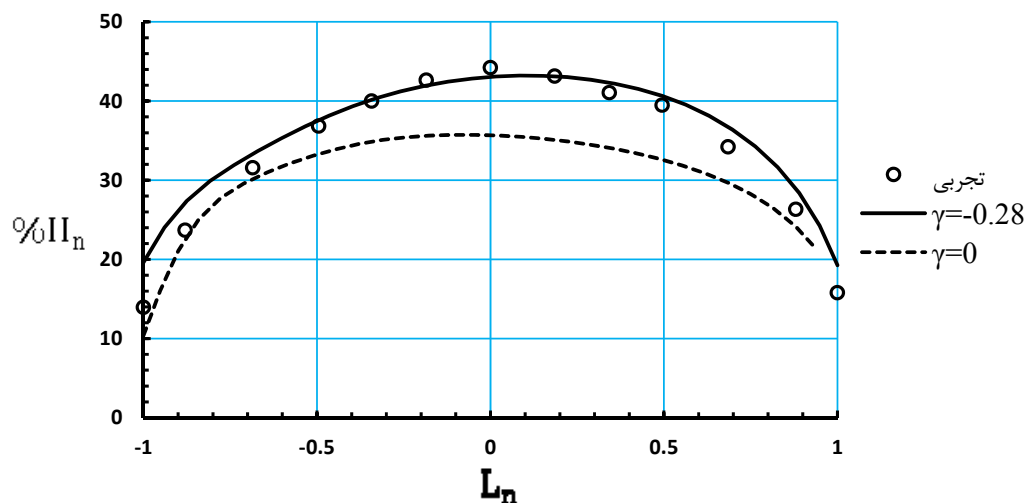
شکل ۵-۹ توزیع جابجایی شعاعی بر حسب متر

(الف) حالت تجربی [۲۸]، (ب) با اعمال اثر فشار بر FLD، (ج) بدون اعمال اثر فشار بر FLD

به منظور مقایسه هندسه ناحیه‌ی بالج در حالت تجربی و شبیه‌سازی و بررسی اثر اعمال فشار بر این

مولفه، در شکل ۵-۱۰ تغییرات عمق بالج نرماله شده $(H_n \% = \frac{\Delta D}{D_0} \times 100)$ در طول مسیر طولی از

لوله برای حالت تجربی و تحلیل عددی با و بدون اثر فشار نمایش داده شده است. با توجه به شکل ۵-۱۰ با اعمال اثر فشار بر منحنی حد شکل‌دهی، انطباق با حالت تجربی بهبود قابل توجه می‌یابد.



شکل ۵-۱۰ نمودار درصد عمق بالج به قطر اولیه در طول ناحیه بالج
برای حالت تجربی و حالت بدون و با اعمال اثر فشار در آستانه پارگی لوله

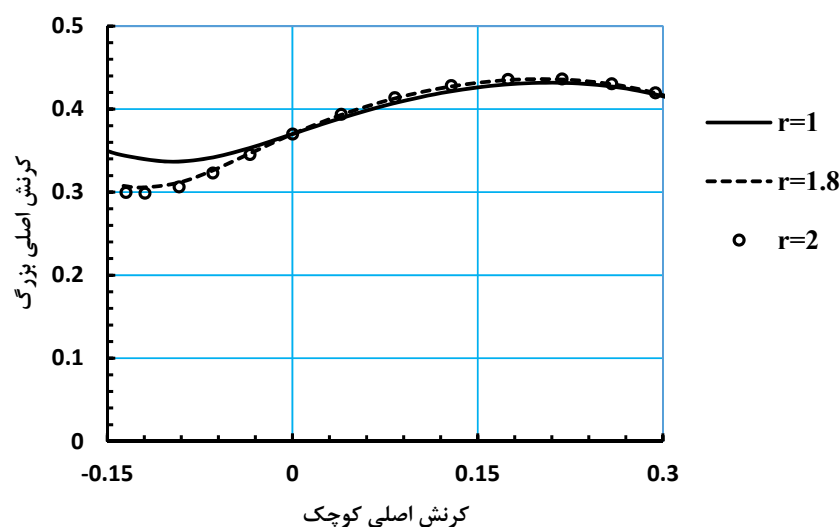
۵-۳ نتایج حل تحلیلی

در این قسمت ابتدا به بررسی نتایج پدیده غیر واقعی معیار تسلیم هیل ۴۸ پرداخته سپس از بین پنج حالت متفاوتی که برای معیار تسلیم هیل غیر درجه دو در فصل سوم شرح داده شد، حالت مناسبی که با نتایج تجربی مطابقت بیشتری دارد انتخاب می‌شود، توان مناسب برای آن استخراج شده و منحنی حد شکل‌دهی در فشارهای متفاوت ترسیم می‌شود و سپس اثر ضریب ناهمسانگردی و توان کارسختی نسبت به اثر فشار روی شکل‌پذیری بررسی می‌شود.

۵-۳-۱ مقایسه اثر ضریب ناهمسانگردی بر شکل‌پذیری فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ در معیار تسلیم هیل درجه دو و غیر درجه دو

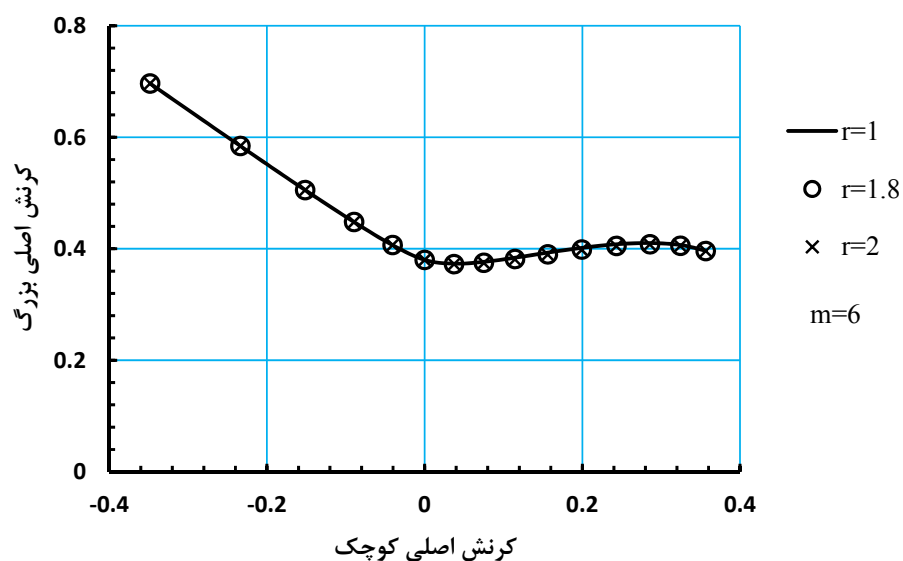
در شکل ۵-۱۱ منحنی حد شکل‌دهی ورق فولادی زنگ‌نزن ۳۰۴ با تغییر ضریب ناهمسانگردی و استفاده از معیار تسلیم هیل درجه دو ترسیم شده است. منحنی شکل ۵-۱۱ نشان می‌دهد که با افزایش ضریب ناهمسانگردی شکل‌پذیری کاهش پیدا می‌کند، اما تحقیقات تجربی نشان می‌دهد که

افزایش ضریب ناهمسانگردی تأثیری در بهبود شکل‌پذیری ندارد. در شکل ۵-۱۲ منحنی حد شکل‌دهی ورق فولادی زنگ‌زن با تغییر ضریب ناهمسانگردی با در نظر گرفتن اولین حالت از معیار تسلیم هیل غیر درجه دو با شرط تنش صفحه‌ای و فرض $m=6$ ترسیم شده است، و نشان می‌دهد که افزایش ضریب ناهمسانگردی تأثیری در بهبود شکل‌پذیری ندارد. منحنی‌های حد شکل‌دهی به نوع معیار تسلیمی که برای ترسیم آنها استفاده شده بسیار حساس‌اند.



شکل ۵-۱۱ اثر ضریب ناهمسانگردی در ورق فولادی زنگ‌زن ۳۰۴

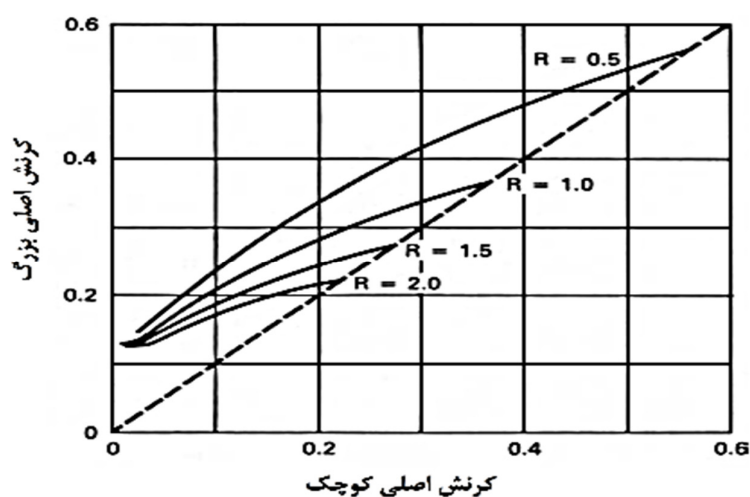
با معیار تسلیم هیل درجه دو در حالت تنش صفحه‌ای



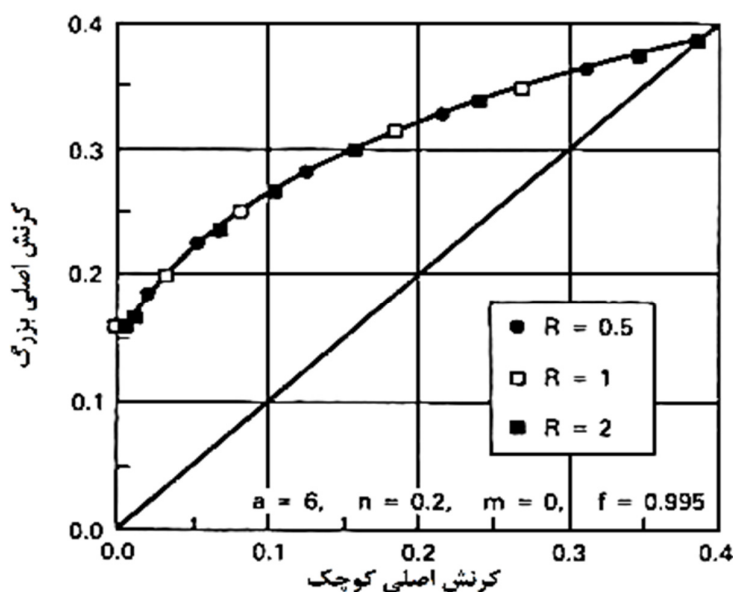
شکل ۵-۱۲ اثر ضریب ناهمسانگردی در ورق فولادی زنگ‌زن ۳۰۴

با اولین حالت از معیار تسلیم هیل غیر درجه دو

به صورت مشابه نتایج تحقیقات دیگر محققین نشان می‌دهد که منحنی‌های حد شکل‌دهی ترسیم شده با معیار تسلیم هیل درجه دو به مقدار ضریب ناهمسانگردی وابسته است (شکل ۵-۱۳). همچنین آن دسته از منحنی‌های حد شکل‌دهی که با معیار تسلیم هیل توان بالا ترسیم شده، عملاً به تغییر ضریب ناهمسانگردی وابسته نیست (شکل ۵-۱۴).



شکل ۵-۱۳ منحنی حد شکل‌دهی ترسیم شده با معیار تسلیم هیل درجه دو، به ازای مقادیر مختلف ضریب ناهمسانگردی [۸]



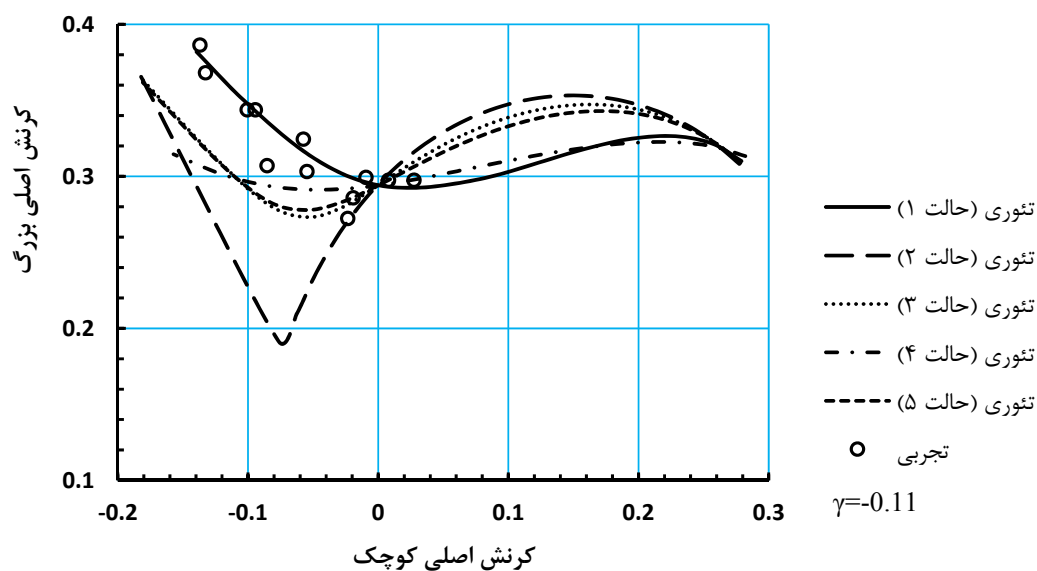
شکل ۵-۱۴ منحنی حد شکل‌دهی ترسیم شده با معیار تسلیم هیل غیر درجه دو، به ازای مقادیر مختلف ضریب ناهمسانگردی [۸]

۵-۳-۲ تعیین مدل مناسب از حالات مختلف معیار تسلیم هیل غیر درجه دو، برای ورق AA6011

در این قسمت منحنی حد شکل‌دهی ورق AA6011 به کمک معیار تسلیم هیل غیر درجه دو به‌ازای $\gamma = -0.11$ در پنج حالت ذکر شده ترسیم شده است و حالتی که بهترین انطباق را با داده‌های تجربی مرجع [۲۴] را دارد، انتخاب می‌شود (شکل ۵-۱۵). مشاهده شد که اولین حالت از معیار تسلیم هیل غیر درجه دو بهترین انطباق را با منحنی حد شکل‌دهی ورق AA6011 دارد.

جدول ۵-۱: خواص مکانیکی ورق AA6011 [۲۴]

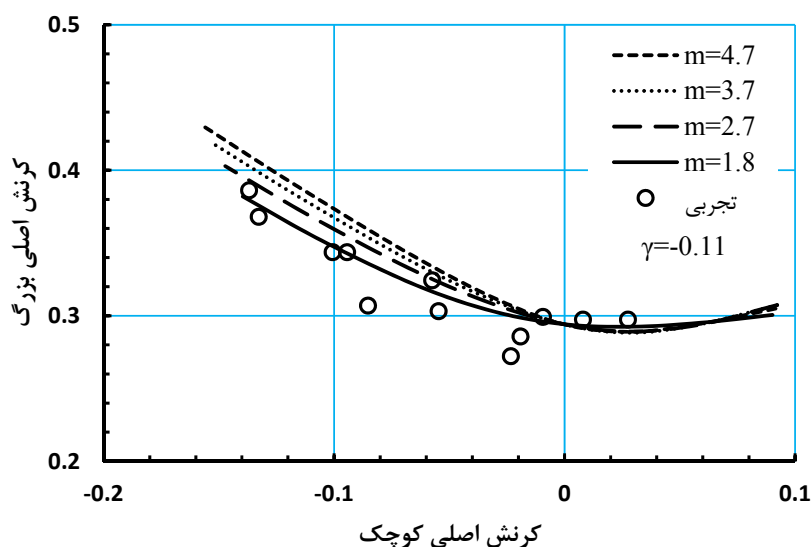
جنس ورق	ضریب استحکام K(MPa)	توان کارسختی n	ضریب ناهمسانگردی r
AA6011	۲۵۴/۹	۰/۲۶۵	۰/۵۷۴



شکل ۵-۱۵ منحنی FLD ورق AA6011 در پنج حالت از معیار تسلیم هیل غیر درجه دو

۵-۳-۳ استخراج توان مناسب معیار تسلیم هیل غیر درجه دو، برای ورق AA6011

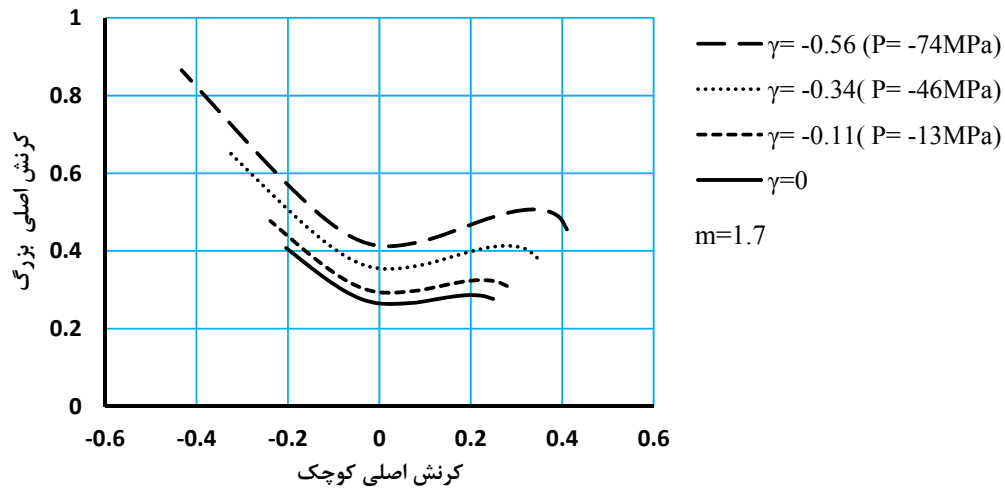
برای تخمین توان مناسب معیار تسلیم هیل غیر درجه دو، با استفاده از اولین حالت، به ازای $\gamma = -0.11$ و مقادیر مختلف m ، منحنی حد شکل‌دهی استخراج و با انطباق داده‌های تجربی توان مناسب معیار برابر $m=1.8$ بدست آمد (شکل ۵-۱۶).



شکل ۵-۱۶ نمودار حد شکل‌دهی ورق AA6011 به ازای مقادیر مختلف m

۵-۳-۴ اثر تنش نرمال بر شکل پذیری ورق AA6011، در اولین حالت از معیار تسلیم هیل غیر درجه دو

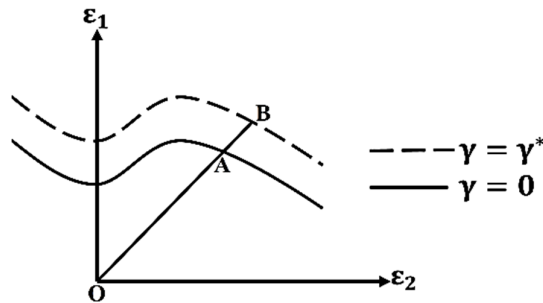
برای بررسی اثر تنش نرمال بر منحنی حد شکل دهی ورق AA6011، در چهار γ مختلف، FLD بدست آمد (شکل ۵-۱۷). میانگین مقدار فشار در هر مقدار گاما در شکل نشان داده شد است. با توجه به شکل ۵-۱۷ با افزایش فشار، سطح منحنی حد شکل دهی افزایش و شکل پذیری بهبود می یابد.



شکل ۵-۱۷ اثر نسبت تنش نرمال بر روی منحنی حد شکل دهی AA6011 در اولین حالت از معیار تسلیم هیل غیر درجه دو

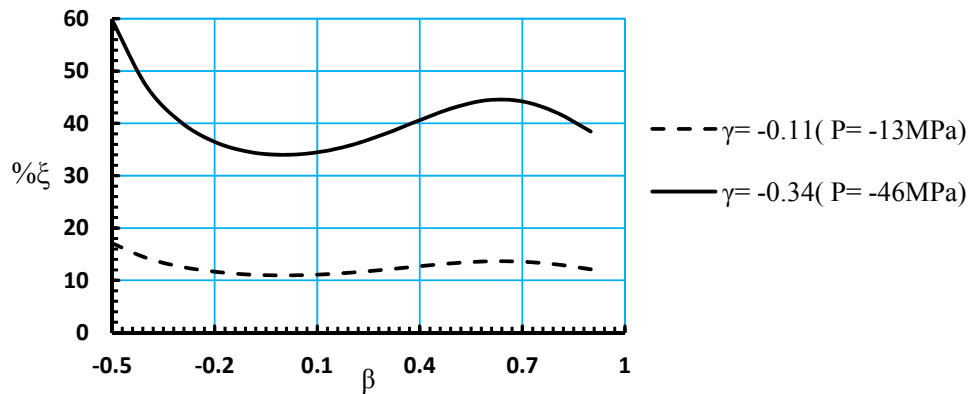
جهت بررسی میزان بهبود شکل پذیری در مسیرهای مختلف، پارامتر بهبود شکل پذیری مطابق شکل ۵-۱۸ به صورت درصد افزایش طول پاره خط OA با اعمال اثر فشار بر FLD، تعریف شده است.

$$\xi\% = \frac{OB - OA}{OA} \times 100 \quad (۵-۲)$$



شکل ۵-۱۸ تعریف پارامتر بهبود شکل پذیری در یک مسیر دلخواه روی منحنی حد شکل دهی

در شکل ۵-۱۹ نمودار پارامتر بهبود شکل پذیری (ξ) در نسبت های کرنش مختلف (β) برای ورق AA6011 ترسیم شده است، مطابق شکل، با افزایش قدرمطلق γ پارامتر بهبود شکل پذیری (ξ) افزایش می یابد که این در مسیرهای مختلف بارگذاری یکسان نیست. کمترین افزایش در مسیر $\beta = 0$ و بیشترین افزایش در مسیر $\beta = -0.5$ مشاهده شد. مقدار پارامتر ξ به ازای مقادیر مختلف γ در تمام مسیرها در جدول ۵-۲ ارائه شده است.



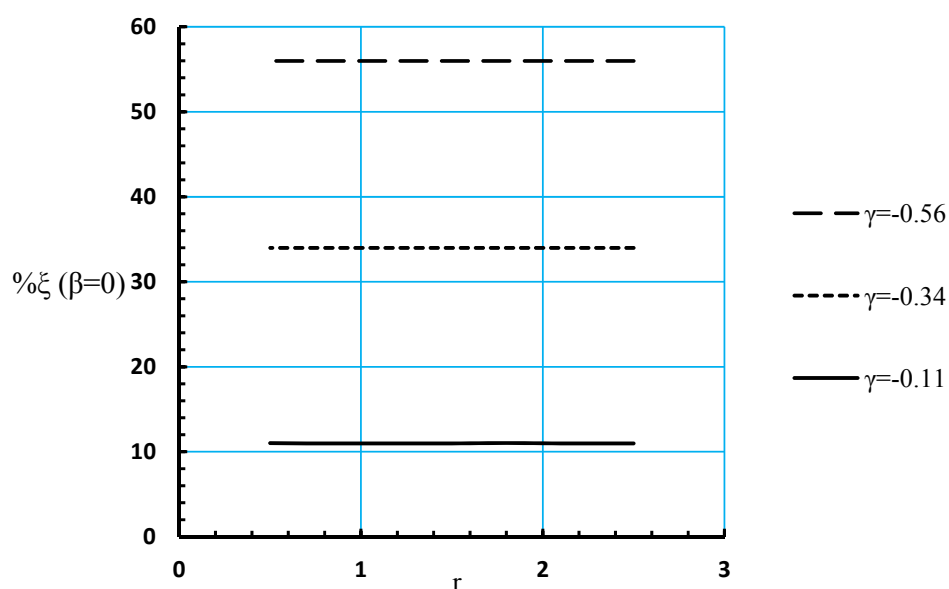
شکل ۵-۱۹ منحنی پارامتر بهبود شکل پذیری بر حسب نسبت β

در ورق AA6011 با اولین حالت از معیار تسلیم هیل غیر درجه دو

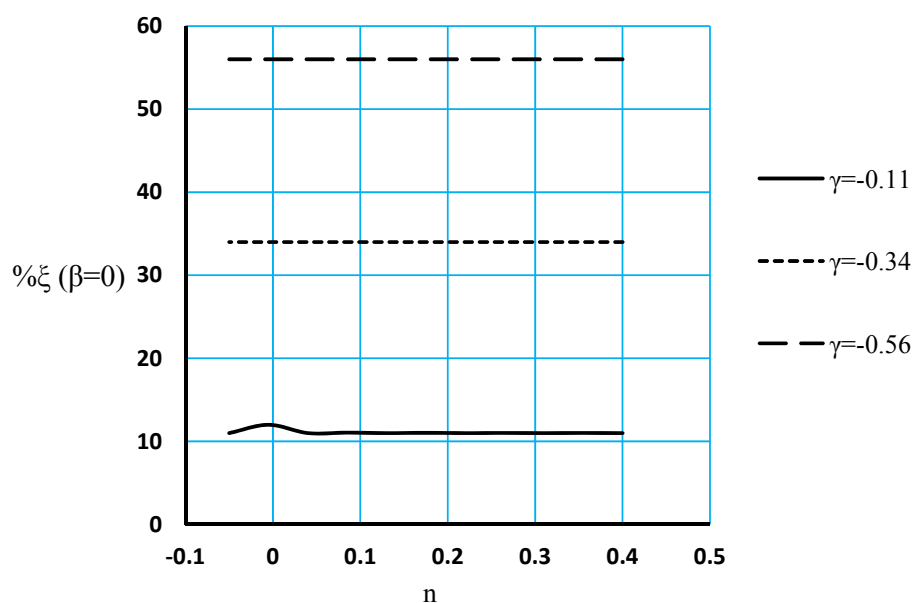
جدول ۵-۲: پارامتر بهبود شکل پذیری در مسیرهای مختلف کرنش برای ورق AA6011

β	$\xi\%$	
	$\gamma=-0.11$	$\gamma=-0.34$
0.9	12.14	38.45
0.8	13.06	42.06
0.7	13.59	44.21
0.6	13.66	44.45
0.5	13.31	43.01
0.4	12.74	40.63
0.3	12.08	38.05
0.2	11.51	35.86
0.1	11.11	34.47
0	10.98	34
-0.1	11.13	34.56
-0.2	11.68	36.47
-0.3	12.64	40.3
-0.4	14.3	47.16
-0.5	17.11	59.74

به منظور بررسی اثر ضریب ناهمسانگردی و توان کارسختی بر پارامتر بهبود شکل پذیری، منحنی $\xi\%$ در مسیر $\beta = 0$ به ازای مقادیر مختلف r و n ترسیم و به ترتیب در شکل ۵-۲۰ و شکل ۵-۲۱ ارائه شده است.



شکل ۵-۲۰ منحنی پارامتر بهبود شکل پذیری در مسیر $\beta=0$ بر حسب ضریب ناهمسانگردی



شکل ۵-۲۱ منحنی پارامتر بهبود شکل پذیری در مسیر $\beta=0$ بر حسب توان کارسختی

مشاهده می‌شود که برای هر فشار مشخص افزایش ضریب ناهمسانگردی در بهبود شکل‌پذیری اثری ندارد لذا اثر فشار برای همه ورق‌هایی که جنس یکسان اما ضریب ناهمسانگردی متفاوت دارند یکسان خواهد بود. همچنین در یک فشار مشخص، افزایش توان کارسختی بر پارامتر بهبود شکل‌پذیری تاثیری ندارد. لذا می‌توان گفت برای ورق‌هایی با توان کارسختی متفاوت، اثر فشار بر $\xi\%$ یکسان خواهد بود.

فصل ۶ نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۶-۱ نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی تحلیلی و عددی اثر تنش در راستای ضخامت بر ناپایداری پلاستیک ورق-های فلزی پرداخته شد. در قسمت حل تحلیلی برای محاسبه کرنش ناپایداری پلاستیک از روش گلوئی پخشی سوئیفت و معیار تسلیم هیل درجه دو و غیر درجه دو استفاده و نتایج حل تحلیلی با نتایج مقاله مرجع مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج کلی به دست آمده از بخش تحلیلی شامل موارد ذیل می‌باشد:

۱- با استفاده از معیار تسلیم هیل درجه دو در حالت سه بعدی رابطه صریح برای محاسبه کرنش‌های بحرانی بدست آمد.

۲- معیار تسلیم هیل درجه دو، قابلیت پیش‌بینی اثر ضریب ناهمسانگردی را بر شکل‌پذیری ندارد. زیرا با استفاده از معیار تسلیم هیل درجه دو، افزایش ضریب ناهمسانگردی، بر خلاف یافته‌های تجربی کاهش شکل‌پذیری نشان می‌دهد که این مشکل با استفاده از معیار تسلیم هیل غیر درجه دو مرتفع می‌شود. با استفاده از معیار تسلیم هیل غیر درجه دو، میزان تاثیرپذیری FLD از ضریب ناهمسانگردی بسیار کاهش می‌یابد که نتایج تجربی این موضوع را تایید می‌کند.

۳- حل تحلیلی نشان داد که شکل‌پذیری کرنش صفحه‌ای، به دو پارامتر توان کرنش‌سختی و نسبت تنش نرمال وابسته است. با افزایش قدر مطلق نسبت تنش نرمال و توان کارسختی، FLD_0 به صورت خطی افزایش می‌یابد و این افزایش در هر دو حالت معیار تسلیم هیل درجه دو و غیر درجه دو یکسان است.

۴- در مطالعه موردی ورق AA6011 مشاهده شد که از بین حالت‌های مختلف معیار تسلیم هیل غیر درجه دو، شکل FLD محاسبه شده در حالت اول و دوم از این معیار به ترتیب منجر به دقیق‌ترین و ضعیف‌ترین انطباق با نتایج تجربی خواهد شد.

۵- منحنی حد شکل‌دهی ورق AA6011 در فشارهای مختلف بدست آمد، نتایج نشان می‌دهد که افزایش تنش نرمال، سطح FLD را در تمام مسیرهای کرنش افزایش می‌دهد که بیشترین تاثیرپذیری تنش نرمال بر شکل‌پذیری در مسیر $\beta = -0.5$ می‌باشد. با افزایش β پارامتر بهبود شکل‌پذیری روند کاهشی پیدا کرده بگونه‌ای که در مسیر بارگذاری کرنش صفحه‌ای به حداقل مقدار خود می‌رسد.

۶- پارامتر بهبود شکل‌پذیری مستقل از ضریب ناهمسانگردی ورق است یعنی اثر فشار برای ورق‌هایی با ضریب ناهمسانگردی متفاوت یکسان است. این نتیجه به طور مشابه برای بیان اثر توان کارسختی قابل ذکر است، علی‌رغم اینکه افزایش توان کارسختی، سطح FLD را افزایش می‌دهد، اما تغییر آن بر روی پارامتر بهبود شکل‌پذیری در اثر فشار بی‌تاثیر است.

در قسمت عددی از طریق شبیه‌سازی اجزای محدود به تخمین پارگی در فرآیند انبساط‌دهی لوله فولادی به کمک بالشتک کشسان و FLD وابسته به فشار پرداخته شد. بدین منظور از لوله فولادی زنگ‌زن ۳۰۴ استفاده شد. اثر پارامترهای موثر بر شکل‌پذیری مورد بررسی و بحث قرار گرفت. نتایج بدست آمده از این بخش نشان داد:

۱- با استفاده از نتایج حل تحلیلی منحنی حد شکل‌دهی فولاد ۳۰۴ در حالت بدون فشار با استفاده از کد عددی بدست آمد و با مقایسه با منحنی حد شکل‌دهی تجربی این فولاد حالت اول از بین حالات مختلف معیار تسلیم هیل غیر درجه دو به عنوان حالت مطلوب تشخیص داده شد و توان مناسب معیار تسلیم $m=1.7$ بدست آمد.

- ۲- بر اساس نتایج شبیه‌سازی اولیه لوله در تحلیل فرآیند انبساط‌دهی با لاستیک قدر مطلق مقدار متوسط نسبت تنش نرمال برابر $0/28$ تعیین شد و با استفاده از کد عددی منحنی حد شکل‌دهی فولاد زنگ‌نزن 304 با نسبت تنش نرمال $\gamma = -0.28$ در دو ناحیه نقص و درز جوش بدست آمد.
- ۳- قطر بحرانی در لحظه ترکیدگی با استفاده از معیار شکست FLD در دو حالت با اعمال اثر فشار بر FLD و بدون اعمال اثر فشار بر FLD بدست آمد که نتایج نشان داد با اعمال اثر فشار نرمال بر FLD نسبت عمق بالج 27 درصد افزایش می‌یابد.
- ۴- با اعمال اثر فشار بر منحنی حد شکل‌دهی، کرنش موثر در آستانه ترکیدگی معادل 43 درصد (از $0/47$ به $0/67$) افزایش یافت.
- ۵- نتایج عددی نشان داد که با اعمال اثر فشار نرمال بر منحنی حد شکل‌دهی، دقت پیش‌بینی قطر بحرانی به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد. در این شرایط خطای تخمین از $19/5\%$ به $3/7\%$ کاهش می‌یابد.

۲-۶ پیشنهادها

- پس از انجام این پژوهش، پیشنهادهای زیر برای انجام مطالعات آینده ارائه می‌گردد:
- ۱- بررسی تحلیلی اثر فشار در راستای ضخامت برای یک ورق داری نقص با استفاده از تئوری مارسینیاک-کوزینسکی،
- ۲- در قسمت حل عددی، زیربرنامه‌ای در نرم‌افزار FEM نوشته شود که با مشخص بودن نسبت تنش نرمال کرنش‌های ناپایداری پلاستیک را محاسبه کند و پارگی با این روش تخمین زده شود،
- ۳- استفاده از FLDهای وابسته به فشار برای تخمین پارگی در دیگر فرآیندهای نوین مانند شکل‌دهی تدریجی،
- ۴- ارزیابی اثر فشار بر روی شکل‌پذیری در مسیرهای غیرخطی کرنش،
- ۵- ارزیابی اثر فشار بر روی شکل‌پذیری، در شرایطی که نرخ تنش در راستای ضخامت متغیر باشد.

منابع

- [1] D. Banabic, Sheet metal forming processes: Constitutive modelling and numerical simulation, Springer Science & Business Media, 2010.
- [2] J. Hu, Z. Marciniak, J. Duncan, Mechanics of sheet metal forming: Butterworth-Heinemann, 2002.
- [3] R. Hill, The Mathematical Theory of Plasticity, The Oxford Engineering Science Series, Oxford, 1950.
- [4] R. Hill, A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals, Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, pp. 281-297, 1948.
- [5] R. Hill, Theoretical plasticity of textured aggregates, in Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, pp. 179-191, 1979.
- [6] W. F. Hosford, On yield loci of anisotropic cubic metals, Proceedings of the seventh North American Metalworking Research Conference, pp. 191-196, 1979.
- [7] F. Barlat , O. Richmond, Prediction of tricomponent plane stress yield surfaces and associated flow and failure behavior of strongly textured FCC polycrystalline sheets ,Materials Science and Engineering, vol. 95, pp. 15-29, 1987.
- [8] W. F. Hosford, R. M. Caddell, Metal Forming, Mechanics and Metallurgy, Prentice-Hall, New York, 1983.
- [9] A. F. Avila, E. L. Vieira, Forming-limit diagram numerical predictions, yield criteria studies, Communications in numerical methods in engineering, vol. 19, pp. 223-232, 2003.
- [10] S. Panich, V. Uthaisangsuk, J. Juntaratin, S. Suranuntchai, Determination of forming limit stress diagram for formability prediction of SPCE 27 steel sheet, Journal of Met Mater Min, vol. 21, pp. 19-27, 2011.

- [11] C. Simha, R. Grantab, M. J. Worswick, Computational analysis of stress-based forming limit curves, *International Journal of Solids and Structures*, vol. 44, pp. 8663-8684, 2007.
- [12] D. Banabic, *Formability of metallic materials, Plastic anisotropy, formability testing, forming limits*, Springer Science & Business Media, 2000.
- [13] H. W. Swift, Plastic instability under plane stress, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 1, pp. 1-18, 1952.
- [14] R. t. Hill, On discontinuous plastic states, with special reference to localized necking in thin sheets, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 1, pp. 19-30, 1952.
- [15] S. Stören , J. Rice, Localized necking in thin sheets, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 23, pp. 421-441, 1975.
- [16] Z. Marciniak , K. Kuczyński, Limit strains in the processes of stretch-forming sheet metal, *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 9, pp. 609-620, 1967.
- [17] A. Ragab, C. Saleh , N. Zaafarani, Forming limit diagrams for kinematically hardened voided sheet metals, *Journal of materials processing technology*, vol. 128, pp. 302-312, 2002.
- [18] A. L. Gurson, Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth, Part I Yield criteria and flow rules for porous ductile media, *Journal of engineering materials and technology*, vol. 99, pp. 2-15, 1977.
- [19] M. Seth, V. J. Vohnout, G. S. Daehn, Formability of steel sheet in high velocity impact, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 168, pp. 390-400, 2005.
- [20] J. Imbert Boyd, Increased formability and the effects of the tool/sheet interaction in electromagnetic forming of aluminum alloy sheet, 2005.
- [21] L. Brooke, Hydroforming hits the big time, *Auto. Ind*, vol. 177, pp. 57-61, 1997.
- [22] L. Smith, R. Averill, J. Lucas, T. Stoughton, P. Matin, Influence of transverse normal stress on sheet metal formability, *International Journal of Plasticity*, vol. 19, pp. 1567 -1583, 2003.

- [23] M. Gotoh, T. Chung, N. Iwata, Effect of out-of-plane stress on the forming limit strain of sheet metals, JSME International Journal. Series A, mechanics and material engineering, vol. 38, pp. 123-132, 1995.
- [24] A. Assempour, H. K. Nejadkhaki, R. Hashemi, Forming limit diagrams with the existence of through-thickness normal stress, Computational Materials Science, vol. 48, pp. 504-508, 2010.
- [25] P. Wu, J. Embury, D. Lloyd, Y. Huang, K. Neale, Effects of superimposed hydrostatic pressure on sheet metal formability, International Journal of Plasticity, vol. 25, pp. 1711-1725, 2009.
- [26] P. Wu, X. Chen, D. Lloyd, and J. Embury, Effects of superimposed hydrostatic pressure on fracture in sheet metals under tension, International Journal of Mechanical Sciences, vol. 52, pp. 236-244, 2010.
- [27] J. Woodthorpe, R. Pearce, The anomalous behaviour of aluminium sheet under balanced biaxial tension, International Journal of Mechanical Sciences, vol. 12, pp. 341-347, 1970.
- [۲۸] ح. غفوریان. نصرتی، پایان نامه کارشناسی ارشد، "بررسی تجربی و عددی انبساطدهی لوله‌ی فلزی با استفاده از بالشتک کشسان و مقایسه نتایج با روش شکل‌دهی با سیال" دانشکده مکانیک، دانشگاه شاهرود، ۱۳۹۳.
- [۲۹] م. فلاحتی. نقیبی، پایان نامه کارشناسی ارشد، "بررسی تجربی و عددی حد شکل‌دهی در فرآیند هیدروفورمینگ لوله‌های فلزی" دانشکده مکانیک، دانشگاه شاهرود، ۱۳۹۲.

Abstract

In recent years production of complex industrial products with purpose of increasing in strength-to-weight ratio and reducing vehicle fuel consumption have been focused by researchers. In this regard, the new methods of metal forming such as high energy rate forming that included explosive forming, electrohydraulic forming and electromagnetic forming have been used. The most important feature of these processes is releasing high energy in a very short time and production very high contact pressure. The numerous experimental and theoretical researches in recent years showed that in high energy rate forming processes, under the effect of through thickness stress, the formability had been greatly increased.

In this study in order to achieve an exact analytical solution for investigate the effect of stress in thickness direction on plastic instability created in sheet metal, Swift diffuse neck theory is used. The assumption used for sheet material included rigid-plastic behavior, power law hardening equation and normal plastic anisotropy with regardless of the plane anisotropy of sheet. Driving the plastic flow rule for quadratic and non-quadratic Hill's yield criterion in the general case (with the presence of normal stress component) first the constants of yield criterion was calculated based on the anisotropy coefficients of sheet and then critical stress and strain were extracted on the eve of diffuse neck. To investigate the effect of through thickness stress on forming limit diagram of AA6011 sheet, using the experimental data of the reference article, the acceptable exponent of yield criterion and forming limit diagrams at different pressure ratios were obtained. The results of this part showed that the formability increases with increase of normal pressure. On the numerical solution, in tube bulging process using elastic pad, the prediction of tearing in steel tube, by using forming limit diagram has been carried out.

Keywords: Swift diffuse neck , Through-thickness stress , Non-quadratic Hill's yield criterion Formability , Sheet metals



University of Shahrood

Faculty of Mechanic

**Analytical and Numerical Investigation of Through-Thickness Stress Effect on
Plastic Instability of Sheet Metals**

Iman Abbasi

**Supervisor
Dr. Mahdi Gerdooei**

February 2015