

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

دانشکده مهندسی مکانیک

عنوان:

بررسی تجربی و شبیه سازی اجزاء محدود اثر پیش کرنش بر نمودار

حد شکل دهی ورق آلومینیوم ۵۰۸۳

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

مهندسی مکانیک - ساخت و تولید

استاد راهنما:

دکتر سید جمال حسینی پور

اساتید مشاور:

دکتر سلمان نوروزی

مهندس عبدالحمید گرجی

نگارش:

فرهاد ژاله فر

شهریور ۱۹

تقديم به

خانواده عزيزم

## تشکر و قدردانی

پژوهش حاضر حاصل بیش از یک سال تلاش مداوم و پیوسته نگارنده بوده است که دستیابی به آن، جز با عنایت پروردگار و با راهنمایی و مساعدت دیگران ممکن نبود. در این راستا اینجانب بر خود لازم می دانم تا از استاد محترم جناب آقای دکتر حسینی پور، استاد راهنمای پایان نامه که از انجام هیچ کوششی در این پژوهش دریغ نفرمودند و همواره مشوق و پشتیبان علمی اینجانب بودند، کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم. صبر، توجه، دقت، همیاری و همفکری این بزرگوار پشتیبان اصلی اینجانب در انجام مراحل این پایان نامه بوده است.

همچنین از مساعدت‌های اساتید مشاور ارجمند، جناب آقایان دکتر نوروزی و مهندس گرجی و نیز راهنمایی‌های ارزنده و گره‌گشای آقای مهندس اصغر شمس‌ی کمال تشکر و قدردانی را دارم. در پایان بر خود وظیفه می دانم از تمامی دوستان و عزیزانی که با همفکری و مساعدت خود باعث پیشرفت مراحل پایان نامه اینجانب شدند، تشکر و قدردانی نمایم. سلامتی، سرافرازی و بهروزی همگان را آرزومندم.

فرهاد ژاله‌فر

شهریور ۸۹

## چکیده

در این تحقیق با استفاده از یک روش جدید اثر پیش کرنش دو محوره یکسان و تک محوره بر نمودار حد شکل دهی در جهات نورد و عمود بر آن مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن با نتایج مقالات مشابه مقایسه می شود. بر این اساس نمودار حد شکل دهی آلیاژ آلومینیم ۵۰۸۳ به صورت تجربی و با استفاده از تست کشش خارج از صفحه هکر برآورد می شود. همچنین به خاطر اهمیت نمودارهای حد تنش شکل دهی، با استفاده از روابط پلاستیسیته، تنشهای حدی حاصل از کرنشهای حدی تجربی و به دنبال آن منحنی حد تنش شکل دهی آلیاژ آلومینیم ۵۰۸۳ تعیین می شود. در این پژوهش به منظور پیش بینی نمودار حد کرنش (FLD) و حد تنش شکل دهی (FLSD) از شبیه سازی به کمک نرم افزار ABAQUS ۶.۹.۰.۱ استفاده شده است. برای این منظور کد نویسی در MATLAB R۲۰۰۸a انجام شده و با استفاده از رابطه تنش سیلان HILL۴۸ و معیارهای شکست نرم پیش بینی صورت گرفته است. با شبیه سازی پیش کرنش در ورق، تاثیر این پارامتر بر نمودار حد شکل دهی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاصل از شبیه سازی با نتایج تجربی مقایسه شده است. نتایج حاصل نشان می دهند که در فرآیندهای شکل دهی با پیش کرنش دو محوره یکسان، منحنی به سمت راست جا به جا شده و تراز منحنی در مسیرهای بارگذاری دومحوره و کرنش صفحه ای کاهش می یابد و تراز منحنی در مسیرهای بارگذاری مربوط به کشش تک محوره افزایش می یابد. در فرآیندهای شکل دهی با پیش کرنش تک محوره، پیش کرنش موجب جا به جایی منحنی به سمت چپ شده و تراز منحنی در مسیرهای بارگذاری دومحوره و کرنش صفحه ای افزایش می یابد و این در حالیست که تراز منحنی در مسیرهای بارگذاری مربوط به کشش تک محوره تفاوت ناچیزی خواهد داشت.

**واژگان کلیدی:** نمودار حد شکل دهی، بارگذاری غیرخطی، پیش کرنش، آلیاژ آلومینومی ۵۰۸۳

## فهرست مطالب

۱	فصل اول: مقدمه.....
۳	۱-۱ نمودار حد شکل دهی.....
۶	۲-۱ کاربرد نمودارهای حد شکل دهی در طراحی قطعه و تحلیل اجزاء محدود.....
۸	۳-۱ روش‌های بررسی شکل‌پذیری ورق‌های فلزی.....
۱۱	۴-۱ برآورد نمودار حد شکل دهی.....
۱۱	۱-۴-۱ انواع آزمون‌های مختلف برای بدست آوردن نمودارهای حد شکل دهی.....
۱۶	۲-۴-۱ شبکه بندی نمونه ها.....
۱۷	۱-۲-۴-۱ طراحی دایره ها.....
۲۰	۲-۲-۴-۱ روشهای چاپ دایره ها.....
۲۰	۳-۲-۴-۱ انتخاب دایره ها.....
۲۱	۴-۲-۴-۱ روشهای اندازه‌گیری.....
۲۲	۵-۱ نمودار حد تنش شکل دهی.....
۲۵	۶-۱ کاربردهای نمودارهای حد تنش شکل دهی.....
۲۶	۷-۱ مروری بر پژوهشهای انجام شده.....
۳۸	۸-۱ شرح مسئله و اهداف تحقیق.....
۳۹	فصل دوم: تئوری.....
۴۰	۱-۲ بررسی مدل‌های موجود برای پیش بینی پارگی.....
۴۱	۱-۱-۲ مدل باریک شوندگی پخشی.....
۴۳	۲-۱-۲ مدل باریک شوندگی موضعی.....
۴۴	۳-۱-۲ تحلیل استورن و رایس.....
۵۴	۴-۱-۲ مدل مارسینیاک - کوزینسکی (M-K).....
۴۵	۵-۱-۲ مدل دو شاخه‌ای شدن.....
۴۷	۲-۲ توابع تسلیم.....
۴۷	۱-۲-۲ معیار تسلیم هیل ۱۹۴۸ و ۱۹۷۹.....
۵۰	۲-۲-۲ معیار تسلیم هاسفورد.....
۵۰	۳-۲ تعیین نمودار حد تنش شکل دهی (FLSD) با استفاده از روابط تئوری.....
۵۲	۴-۲ بررسی معیارهای شکست نرم.....
۵۵	فصل سوم: آزمایشات.....
۵۶	۱-۳ قالب.....
۵۷	۲-۳ ماده مورد آزمایش.....
۵۹	۳-۳ آماده‌سازی نمونه‌ها.....
۶۰	۱-۳-۳ شبکه‌بندی نمونه‌ها.....
۶۳	۴-۳ نحوه انجام آزمایش.....
۶۳	۱-۴-۳ برآورد نمودار از طریق بارگذاری خطی.....

۶۴	۳-۴-۲ ایجاد پیش کرنش دومحوره یکسان.....
۶۵	۳-۴-۳ ایجاد پیش کرنش تک محوره.....
۶۸	۳-۵ نحوه اندازه گیری کرنشهای حدی.....
۷۱	فصل چهارم:مدلسازی اجزای محدود.....
۷۲	۴-۱-۴ نحوه انجام مدلسازی اجزاء محدود.....
۷۲	۴-۱-۱-۴ مدلسازی فرایند در حالت بارگذاری خطی.....
۷۳	۴-۱-۱-۱ ایجاد مدل هندسی قطعات شکل دهنده فرآیند.....
۷۴	۴-۱-۱-۲ خواص و رفتار مکانیکی ماده.....
۷۵	۴-۱-۱-۳ مونتاژ مجموعه قالب و ورق.....
۷۶	۴-۱-۱-۴ انتخاب مدل تماسی.....
۷۶	۴-۱-۱-۵ شرایط مرزی و بارگذاری.....
۷۷	۴-۱-۱-۶ شبکه بندی ورق.....
۸۰	۴-۲-۱ مدلسازی فرایند در حالت بارگذاری غیرخطی.....
۸۴	۴-۳ تعیین نمودارهای حد شکل دهی و حد تنش شکل دهی از شبیه سازی.....
۸۷	فصل پنجم: نتایج و بحث.....
۸۸	۵-۱-۱ نتایج حاصل از کار تجربی.....
۸۸	۵-۱-۱ نمودارهای حد کرنش شکل دهی.....
۹۱	۵-۱-۲ نمودارهای حد تنش شکل دهی.....
۹۵	۵-۲ نتایج حاصل از مدلسازی اجزای محدود.....
۱۰۹	فصل ششم:نتیجه گیری و پیشنهادات.....
۱۱۰	۶-۱ نتیجه گیری.....
۱۱۲	۶-۲ پیشنهادات.....
۱۱۳	فهرست مراجع.....
۱۱۷	پیوست الف: کد محاسباتی MATLAB مربوط به برآورد مقدار توان M.....
۱۱۸	پیوست ب: نتایج حاصل از مطالعات تحلیلی.....
۱۲۳	پیوست ج: نقشه ابعادی مهر ژلاتینی.....
۱۲۴	پیوست د: طراحی نوار مایلر.....
۱۲۵	پیوست ه: طراحی فیکسچر پیش کرنش تک محوره.....
۱۲۹	پیوست و: طراحی قطعه مورد استفاده در پیش کرنش تک محوره.....
۱۳۱	پیوست ز: کد مربوط به تولید فایل مولد جدید شبیه سازی در MATLAB.....

## فهرست اشکال

- شکل (۱-۱) عیوب ایجاد شده در فرایندهای شکل‌دهی [۱] ..... ۳
- شکل (۲-۱) نواحی تقسیم‌بندی شده دیاگرام حدشکل‌دهی [۱] ..... ۴
- شکل (۳-۱) مسیرهای مختلف بارگذاری در نمودار حدشکل‌دهی [۴] ..... ۷
- شکل (۴-۱) : مکان هندسی نقاط مختلف در شرایط بحرانی بر اساس کرنش‌های اصلی [۱] ..... ۸
- شکل (۵-۱) آزمون تست اولسن و اریکسون [۱] ..... ۹
- شکل (۶-۱) آزمون هکر در برآورد حد شکل‌دهی ورق‌های فلزی [۴] ..... ۱۰
- شکل (۷-۱) قالب و نمونه‌های ارائه شده توسط هکر برای پوشش محدوده کرنش [۴] ..... ۱۰
- شکل (۸-۱) نمونه‌های مورد استفاده در آزمون کشش یکطرفه [۱] ..... ۱۲
- شکل (۹-۱) تست بالچ هیدرولیکی [۱] ..... ۱۳
- شکل (۱۰-۱) شماتیک تست کشش در صفحه [۴] ..... ۱۴
- شکل (۱۱-۱) شماتیک تست کشش خارج از صفحه [۹] ..... ۱۴
- شکل (۱۲-۱) ایجاد مسیرهای کرنش متفاوت با استفاده از ۸ نمونه با هندسه‌های مختلف [۳] ..... ۱۵
- شکل (۱۳-۱) : نمونه‌های مورد استفاده در تست هاسک [۱] ..... ۱۵
- شکل (۱۴-۱) : ۱- هاسک ۲- خارج از صفحه ۳- کشش یک‌طرفه ۴- کیلر ۵- تست بالچ هیدرولیکی [۱] ..... ۱۶
- شکل (۱۵-۱) اشکال قابل استفاده به منظور شبکه‌بندی در استاندارد ISO ۱۲۰۰۴ [۷] ..... ۱۸
- شکل (۱۶-۱) اشکال قابل استفاده به منظور شبکه‌بندی در استاندارد ASTM E۲۲۱۸ [۷] ..... ۱۹
- شکل (۱۸-۱) تأثیر اندازه شبکه‌ها و شکل آنها در اندازه‌گیری کرنش [۴] ..... ۲۰
- شکل (۱۹-۱) نوار مایلر مورد استفاده برای اندازه‌گیری کرنشها [۵] ..... ۲۳
- شکل (۲۰-۱) سیستم تحلیل‌گر شبکه دایره‌ای به کمک کامپیوتر [۵] ..... ۲۳
- شکل ۱-۲۱ : نمودار حد حدتنش شکل‌دهی ورق فولادی پیش کرنش دوماحوره یکسان داده شده حاصل از مطالعه تجربی آقای گوش [۷] ..... ۲۴
- شکل (۲۲-۱) تأثیر پیش کرنش اولیه در حالت دوماحوره یکسان تست در جهت عمود بر نور در نمودار حد شکل دهی AA۶۱۱۱-T۴ حاصل از تحقیق گراف و هاسفورد ..... ۲۸
- شکل (۲۳-۱) تأثیر پیش کرنش اولیه در حالت کشش یک‌طرفه و تست مرحله بعدی هر دو در جهت عمود بر نور در نمودار حد شکل دهی AA۶۱۱۱-T۴ حاصل از تحقیق گراف و هاسفورد ..... ۲۹
- شکل (۲۴-۱) تأثیر پیش کرنش اولیه در حالت کشش یکطرفه و تغییر مسیر کرنش هر دو در جهت عمود بر نور در نمودار حد شکل دهی AA۲۰۳۶-T۳ حاصل از تحقیق گوش ..... ۳۰
- شکل (۲۵-۱) تأثیر پیش کرنش اولیه در حالت کرنش صفحه‌ای موازی جهت نور و تست در جهت عمود بر نور در نمودار حد شکل دهی AA۶۱۱۱-T۴ حاصل از تحقیق گراف و هاسفورد ..... ۳۰
- شکل ۱-۲۶ : دستگاه تست دوماحوره مورد استفاده در تحقیق کوبارا ..... ۳۱
- شکل (۱-۲۷) : تأثیر تغییرات مقادیر تنش در توابع تسلیم مختلف [۳۰] ..... ۳۴
- شکل ۱-۲۸ : مقایسه نمودارهای FLCF ورق آلومینیومی ۶۰۶۱ توسط آقایان کین هانگ ..... ۳۷
- شکل (۱-۲) ورق کامل تحت کشش تک محوری [۴۱] ..... ۴۱
- شکل (۲-۲) گلوبی پخشی در یک نوار کامل تحت کشش تک محوری [۵] ..... ۴۳
- شکل (۳-۲) ایجاد زانویی در منحنی کرنش ضخامتی بر حسب زمان [۵] ..... ۴۶
- شکل (۴-۲) تغییرات مشتق دوم کرنش ضخامتی نسبت به زمان [۵] ..... ۴۶



- شکل (۲-۴) مونتاژ مجموعه قالب و ورق ..... ۷۶
- شکل (۵-۲) ایجاد زانویی در منحنی کرنش ضخامتی بر حسب زمان [۵] ..... ۴۵
- شکل (۶-۲) تغییرات مشتق دوم کرنش ضخامتی نسبت به زمان [۵] ..... ۴۶
- شکل (۱-۳) قسمت‌های مختلف قالب- الف: سنبه ب- ماتریس ج- برآمدگی کششی ..... ۵۶
- شکل (۲-۳) نمونه مورد استفاده برای تست کشش ساده ..... ۵۷
- شکل (۳-۳) نمودار تنش-کرنش مهندسی ورق آلومینیومی ۵۰۸۳ بدست آمده از آزمون تست کشش یک طرفه ..... ۵۸
- شکل (۴-۳) نمونه تست کشش ساده‌ی المان‌بندی در جهت نورد ..... ۵۹
- جدول (۲-۳) مقادیر ضریب ناهمسانگردی آلیاژ آلومینیم ۵۰۸۳ در جهات مختلف ..... ۵۹
- شکل (۵-۳) : ابعاد نمونه‌های مورد استفاده در تست کشش خارج از صفحه [۶] ..... ۶۰
- شکل (۶-۳) مهر لاستیکی مورد استفاده برای شبکه بندی نمونه ها ..... ۶۲
- شکل (۷-۳) نمونه های شبکه بندی شده با مهر لاستیکی ..... ۶۲
- شکل (۸-۳) پرس مورد استفاده برای انجام تست کشش خارج از صفحه ..... ۶۳
- شکل (۹-۳) مجموعه قالب تست کشش خارج از صفحه ..... ۶۴
- شکل (۱۰-۳) خلاصه مراحل پیش کرنش دومحوره یکسان ..... ۶۵
- شکل ۳-۱۱ فیکسچر به همراه ورق در آزمایشگاه ..... ۶۶
- شکل ۳-۱۲ شماتیک نهایی فیکسچر ..... ۶۶
- شکل ۳-۱۳ پیش کرنش تک محوره ..... ۶۷
- شکل (۱۴-۳) منطقه گلویی ایجاد شده در نمونه پس از شکل دهی ..... ۶۸
- شکل (۱۵-۳) نمونه‌های حاصل از پیش کرنش دو محوره ..... ۶۹
- شکل (۱۶-۳) نمونه‌های نهایی حاصل از پیش کرنش دومحوره ..... ۶۹
- شکل (۱-۴) اجزای قالب مورد استفاده در شبیه سازی ..... ۷۳
- شکل (۲-۴) نمودار تنش - کرنش حقیقی آلیاژ آلومینیم ..... ۷۴
- شکل (۳-۴) مونتاژ مجموعه قالب و ورق ..... ۷۶
- شکل (۴-۴). ورق شبکه بندی شده با المانهای بسیار کوچک ..... ۷۸
- شکل (۵-۴). مجموعه شبکه بندی شده قالب و ورق ..... ۷۸
- شکل (۶-۴). نمونه ای شبیه سازی شده ..... ۷۹
- شکل ۴-۷ : تطابق میان تست کشش یکطرفه شبیه‌سازی شده و نتیجه تجربی ..... ۸۰
- شکل ۴-۸ شبیه‌سازی مراحل ایجاد پیش کرنش و معرفی المان‌ها در پیش کرنش دومحوره یکسان ..... ۸۱
- شکل ۴-۹ شبیه سازی مراحل ایجاد پیش کرنش و معرفی المانها در پیش کرنش دومحوره یکسان ..... ۸۲
- شکل ۴-۱۰ فلوجارت مربوط به روند ایجاد پیش کرنش و انجام آزمون نهایی ..... ۸۳
- شکل (۴-۱۱) فلوجارت تعیین نمودارهای حد شکل دهی از شبیه سازی ..... ۸۶
- شکل (۱-۵) منحنی حد شکل دهی برای ورق‌های اولیه ..... ۸۹
- شکل (۲-۵) منحنی حد شکل دهی برای ورق‌های پیش کرنش داده شده در مسیر دو محوره یکسان به ازای مقادیر ۰.۰۳ و ۰.۰۵ و تست شده در جهت نورد ..... ۸۹
- شکل (۳-۵) منحنی حد شکل دهی برای ورق‌های پیش کرنش داده شده در مسیر دو محوره یکسان به ازای کرنش بزرگتر ۰.۰۵ و تست شده در جهت عمود بر نورد ..... ۹۰
- شکل (۴-۵) منحنی حد شکل دهی برای ورق‌های پیش کرنش و تست شده در جهت عمود بر نورد ..... ۹۱

- شکل (۵-۵) منحنی حد شکل دهی برای ورق‌های پیش کرنش داده شده در جهت نورد در مسیر تک‌محوره به ازای ۰.۰۴ و تست شده در جهت نورد.....۹۱
- شکل (۶-۵) منحنی حد تنش شکل دهی برای ورق‌اولیه تست شده در جهت نورد به کمک تابع تسلیم هیل ۴۸ و تابع تسلیم هیل ۷۹.....۹۲
- شکل (۷-۵) منحنی حد تنش شکل دهی برای ورق‌های پیش کرنش دو محوره یکسان داده شده در جهت نورد و عمود بر آن به کمک تابع تسلیم هیل ۷۹.....۹۳
- شکل (۸-۵) منحنی حد تنش شکل دهی برای ورق‌های پیش کرنش دو محوره یکسان داده شده. در جهت عمود بر نورد به کمک تابع تسلیم هیل ۷۹.....۹۳
- شکل (۹-۵) منحنی حد تنش شکل دهی برای ورق‌های پیش کرنش تک محوره داده شده عمود بر جهت نورد تابع تسلیم هیل ۷۹.....۹۴
- شکل (۱۰-۵) منحنی حد تنش شکل دهی برای ورق‌های پیش کرنش تک محوره داده شده در جهت نورد به کمک تابع تسلیم هیل ۷۹.....۹۴
- شکل (۱۱-۵) مقایسه منحنی های بار - جابجایی تجربی و شبیه سازی.....۹۵
- شکل (۱۲-۵) مقایسه FLD حاصل از معیارهای شکست نرم با نتایج تجربی در حالت بدون پیش کرنش.....۹۶
- شکل (۱۳-۵) مقایسه FLD حاصل از معیارهای شکست نرم با نتایج تجربی در حالت بدون پیش کرنش و تست عمود بر نورد.....۹۷
- شکل (۱۴-۵) مقایسه FLD حاصل از معیارهای شکست نرم با نتایج تجربی در حالت پیش کرنش دومحوره یکسان به مقدار ۰.۰۵۱ و تست در جهت نورد.....۹۹
- شکل (۱۵-۵) مقایسه FLD حاصل از معیارهای شکست نرم با نتایج تجربی در حالت پیش کرنش دومحوره یکسان به مقدار ۰.۰۳ و تست شده در جهت نورد.....۱۰۰
- شکل (۱۶-۵) مقایسه FLD حاصل از معیارهای شکست نرم با نتایج تجربی در حالت پیش کرنش دومحوره یکسان به مقدار ۰.۰۵۱ و تست عمود بر نورد.....۱۰۱
- شکل (۱۷-۵) مقایسه FLD حاصل از معیارهای شکست نرم با نتایج تجربی در حالت پیش کرنش تک‌محوره به مقدار ۰.۰۴ و تست در جهت نورد.....۱۰۳
- شکل (۱۸-۵) مقایسه FLD حاصل از معیارهای شکست نرم با نتایج تجربی در حالت پیش کرنش تک‌محوره به مقدار ۰.۰۴ و تست در جهت عمود بر نورد.....۱۰۴
- شکل (۱۹-۵) مقایسه FLSD حاصل از معیارهای شکست نرم با نتایج تجربی برای ورق اولیه و تست شده در جهت نورد.....۱۰۵
- شکل (۲۰-۵) مقایسه FLSD حاصل از معیارهای شکست نرم با نتایج تجربی برای ورق اولیه و تست شده عمود بر جهت نورد.....۱۰۵
- شکل (۲۱-۵) مقایسه FLSD حاصل از معیارهای شکست نرم با نتایج تجربی در حالت پیش کرنش دومحوره به مقدار ۰.۰۳ و ۰.۰۵۱ تست در جهت نورد.....۱۰۶
- شکل (۲۲-۵) مقایسه FLSD حاصل از معیارهای شکست نرم با نتایج تجربی در حالت پیش کرنش دومحوره به مقدار ۰.۰۵۱ و تست عمود بر جهت نورد.....۱۰۶
- شکل (۲۳-۵) مقایسه FLSD حاصل از معیارهای شکست نرم با نتایج تجربی در حالت پیش کرنش تک‌محوره به مقدار ۰.۰۴ در جهت نورد و تست در جهت نورد.....۱۰۷
- شکل (۲۴-۵) مقایسه FLSD حاصل از معیارهای شکست نرم با نتایج تجربی در حالت پیش کرنش تک‌محوره به مقدار ۰.۰۴ عمود بر جهت نورد و تست عمود بر جهت نورد.....۱۰۷

- شکل (۷-۱) مقایسه FLD حاصل از مطالعات تحلیلی با نتایج تجربی..... ۱۲۱
- شکل (۷-۲) مقایسه FLSD حاصل از مطالعات تحلیلی با نتایج تجربی..... ۱۲۲
- شکل (۷-۳): نقشه ابعادی مهر ژلاتینی..... ۱۲۳
- شکل (۷-۴): ابعاد نوار مایلر استفاده شده ..... ۱۲۴
- شکل (۷-۵). نیروهای مفروض در مرحله اول طراحی..... ۱۲۵
- شکل (۷-۶) : نقشه فیکسچر طراحی شده..... ۱۲۷
- شکل (۷-۷)، تغییرات ضریب تمرکز تنش بر حسب نسبت شعاع فیلت..... ۱۲۸
- شکل (۷-۸): نقشه ابعادی قطعه مربوط به پیش کرنش تک محوره ..... ۱۳۰

## فهرست جداول

جدول (۱-۳) ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیم ۵۰۸۳.....	۵۷
جدول (۲-۳) مقادیر ضریب ناهمسانگردی آلیاژ آلومینیم ۵۰۸۳ در جهات مختلف.....	۵۹
جدول (۳-۳) ابعاد نمونه های مورد استفاده در تست کشش خارج از صفحه.....	۶۰
جدول (۱-۴) خواصی که در شبیه سازی به ورق نسبت داده می شوند.....	۷۵
جدول ۱-۵ مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی و تجربی در جهت نورد.....	۹۷
جدول ۲-۵ مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی و تجربی در جهت عمود بر نورد.....	۹۸
جدول ۳-۵ مقایسه نتایج حاصله در حالت پیش کرنش دومحوره-۰.۰۵۱ و تست در جهت نورد.....	۱۰۰
جدول ۴-۵ مقایسه نتایج حاصله در حالت پیش کرنش دومحوره به اندازه ۰.۰۵۱ و تست عمود بر جهت نورد.....	۱۰۱
جدول ۵-۵ مقایسه نتایج حاصله در حالت پیش کرنش دومحوره به اندازه ۰.۰۳۱ و تست در جهت نورد.....	۱۰۲
جدول ۶-۵ مقایسه نتایج حاصله در حالت پیش کرنش تکمحوره به اندازه ۰.۰۴ و تست در جهت نورد.....	۱۰۳
جدول ۷-۵ مقایسه نتایج حاصله در حالت پیش کرنش تکمحوره به اندازه ۰.۰۴ و تست عمود بر جهت نورد.....	۱۰۴

## فهرست علائم

$A$	مساحت سطح ورق بعد از کشش
$A_0$	مساحت سطح اولیه ورق تحت کشش
$A_3, A_2, A_1$	ثابتهای معیار شکست نرم وابسته به جنس ماده
$C_5, C_4, C_3, C_2, C_1$	ثابتهای معیارهای شکست نرم وابسته به جنس ماده
$D_0$	قطر اولیه دایره شبکه بندی
$D_1$	قطر بزرگ دایره تغییر شکل یافته
$D_2$	قطر کوچک دایره تغییر شکل یافته
$e$	کرنش مهندسی
$f$	تابع تسلیم
$K$	ضریب استحکام ماده
$l$	طول اولیه ورق تحت کشش
$l_0$	طول ورق بعد از کشش
$n$	توان کرنش سختی ماده
$M$	ثابت معیار تسلیم هیل ۷۹
$P$	نیرو در راستای کشش
$r$	ضریب ناهمسانگردی
$N, M, L, H, G, F$	ثابتهای مشخص کننده ناهمسانگردی
$\alpha$	نسبت تنش
$\alpha_b$	نسبت تنش تسلیم کشش تک محوری به دو محوری
$\beta$	نسبت کرنش
$\varepsilon$	کرنش حقیقی
$\varepsilon_t$	کرنش ضخامتی
$\varepsilon_{2f}, \varepsilon_{1f}$	مقادیر نهایی کرنش
$\varepsilon_{2i}, \varepsilon_{1i}$	پیش کرنش از مرحله قبل
$\bar{\varepsilon}_f$	کرنش معادلی که در آن پارگی رخ می دهد

$\varepsilon_e$	کرنش معادل
$\ddot{\varepsilon}(t)$	مشتق دوم کرنش عرضی در برابر زمان
$\varepsilon_1^*$	ماکزیمم کرنش در کشش تک محوری
$\theta$	زاویه‌ی گلوپی نسبت به جهت نورد
$\sigma_1$	تنش در راستای کشش
$\sigma_b$	تنش تسلیم در کشش دو محوری
$\sigma_e$	تنش معادل
$\sigma_u$	تنش تسلیم در کشش تک محوری
$\sigma_Y$	تنش تسلیم تک محوری
$\sigma_{Max}$	ماکزیمم تنش کششی
$\sigma_h$	تنش هیدروستاتیک
$\rho$	نسبت نرخ کرنش
$\xi(\alpha)$	تابعی از پارامترهای ماده

# فصل اول

## مقدمه

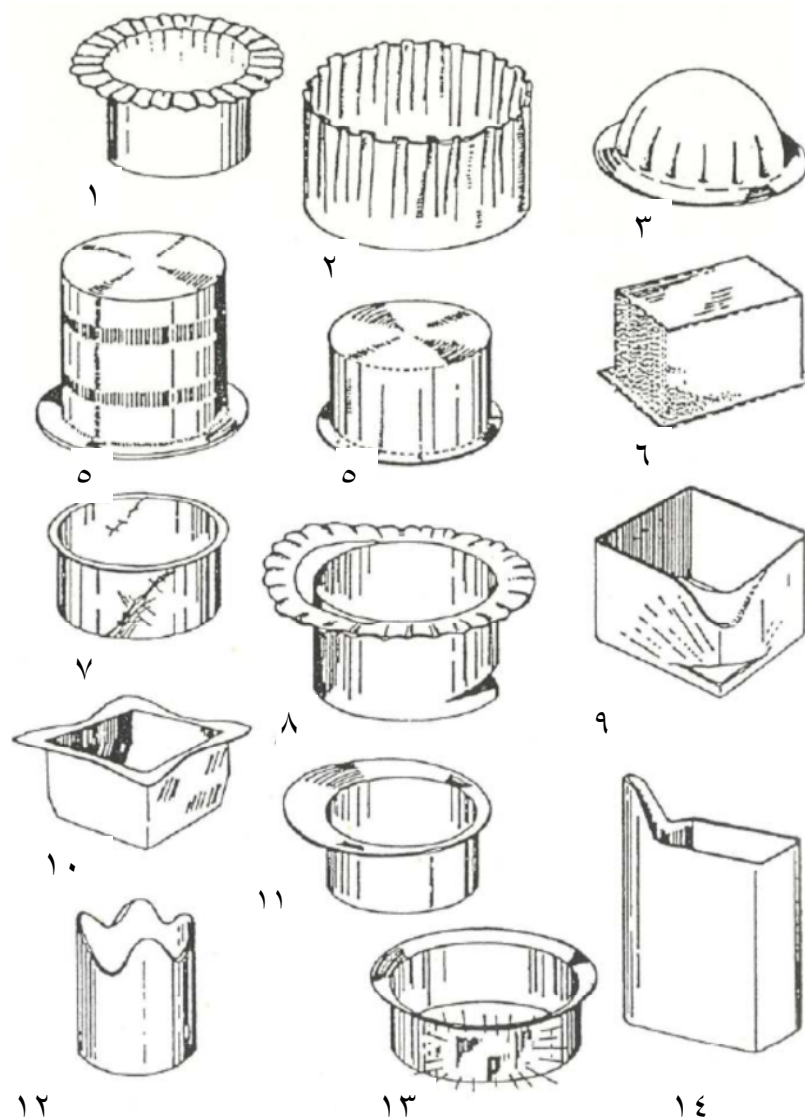
شکل پذیری ورق را می توان توانایی ورق به تغییر شکل و تبدیل شدن به شکل مورد نظر بدون پارگی و گلویی شدن، تعریف کرد. ورقها را تنها تا حد معینی می توان تغییر شکل داد که این حد با شروع گلوبی موضعی که در نهایت منجر به پارگی می شود مشخص می گردد. یکی از روشهای معروف که محدودیت های فوق را نشان می دهد نمودار حد شکل دهی می باشد. اگرچه نمودارهای حد شکل دهی روش مناسبی برای تحلیل شکل پذیری ماده می باشد اما تنها زمانی قابل استفاده است که بارگذاری متناسب باشد. به عبارت دیگر زمانی که نسبت میان کرنشهای اصلی در طول فرآیند شکل دهی ثابت باشد. در صورتیکه در اکثر فرایندهای شکل دهی نوین همانند هیدروفرمینگ، این نسبت در طول شکل دهی ثابت باقی نمانده و بارگذاری به صورت غیر خطی می باشد. یکی از راه های بررسی بارگذاری غیرخطی ایجاد پیش کرنش در قطعه است. بر همین اساس در این پایان نامه به بررسی حد شکل پذیری ورق آلیاژ آلومینیم ۵۰۸۳ تحت بارگذاری غیر خطی به صورت پیش کرنش پرداخته می شود. در فصل اول، مقدمه ای در رابطه با منحنیهای حد شکل دهی و حد تنش شکل دهی و همچنین روشهای تجربی، تئوری و شبیه سازی برای برآورد این نمودارها و در نهایت پیشینه ای از پژوهشهای انجام شده در این زمینه ارائه می شود. در فصل دوم، مدل های تئوری ارائه شده برای پیش بینی نمودارهای حد شکل دهی و حد تنش شکل دهی مورد بررسی قرار می گیرد. در فصل سوم، عملیات تجربی انجام شده برای برآورد نمودارهای حد شکل دهی و حد تنش شکل دهی ارائه می شود. در فصل چهارم، فرآیند انجام شده در قسمت تجربی، در نرم افزار المان محدود ABAQUS شبیه سازی شده و نمودارهای حد شکل دهی و حد تنش شکل دهی با استفاده از معیارهای شکست نرم استخراج می شوند. در فصل پنجم، نتایج و نمودارهای حاصل از روشهای تجربی، تئوری و شبیه سازی ارائه می شوند و مورد بحث و بررسی قرار می گیرند. در فصل ششم نیز نتیجه گیری و پیشنهادات برای پژوهشهای آتی در این زمینه ارائه می شود.



## ۱-۱ نمودار حد شکل دهی

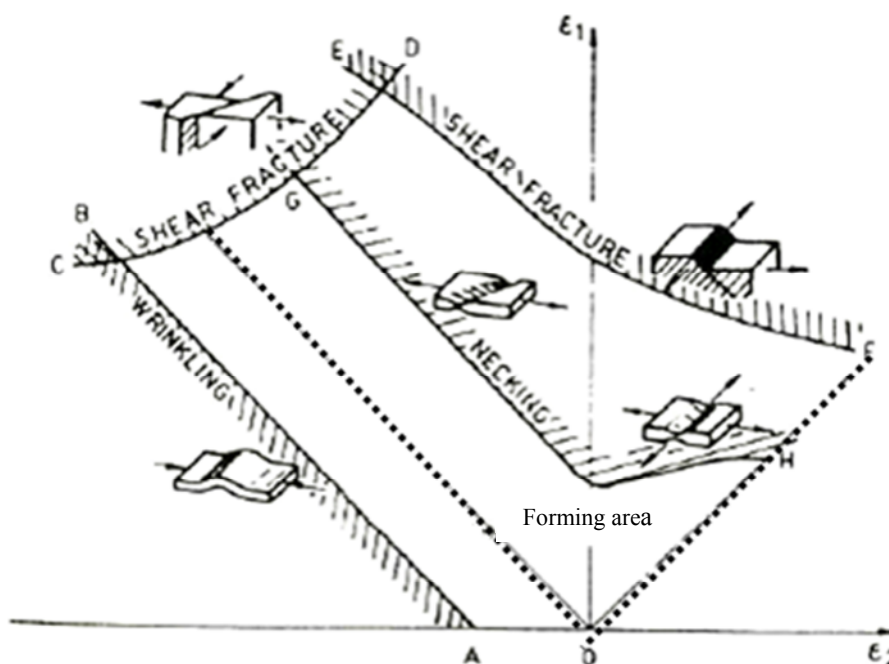
شکل پذیری یک ورق فلزی توانایی ورق در تغییر شکلهای پلاستیکی ایجاد شده بر روی آن بدون هیچ گونه عیبی می باشد. عیوب مختلفی در فرایندهای مختلف شکل دهی وجود دارند که انواع ۱۰، ۹، ۵ و ۱۴ بدلیل نقص در ساختار ابزار شکل دهی، عیوب ۱۳ و ۴ به دلیل شرایط روانکاری و عیوب ۱۲، ۱۱، ۸، ۷، ۶، ۳، ۲، ۱ بدلیل خواص متالورژیکی و مکانیکی ورق ایجاد شده اند که در شکل

(۱-۱) به طور شماتیک نشان داده شده اند. [۱]



شکل (۱-۱): عیوب ایجاد شده در فرایندهای شکل دهی [۱]

با توجه به فوق گلوبی شدن، پارگی و چروکیدگی را می‌توان به عنوان معیارهایی به منظور توصیف شکل‌پذیری ماده بیان کرد [۱]. بر همین اساس مارسینیاک<sup>۱</sup> به منظور بیان شکل‌پذیری ماده، دیاگرام حد شکلی دهی بر اساس کرنش‌های اصلی بزرگتر را با نواحی مشخصی از کرنشها بر پایه نوع عیب تقسیم بندی کرد که در شکل ۱-۲ مشاهده می‌شود [۱]. همانطور که مشاهده می‌شود نمودار به نواحی مربوط به عاری از گلوبی (ناحیه‌ی داخل نمودار ACGHO)، عاری از پارگی ((ناحیه‌ی داخل نمودار ACDFO) و عاری از چروکیدگی (ناحیه‌ی زیر نمودار AB) تقسیم بندی شده است.



شکل (۱-۲): نواحی تقسیم‌بندی شده دیاگرام حد شکل دهی [۱]

منحنی‌های حد شکل دهی در حقیقت محدوده‌ی کرنش‌هایی است که یک ورق می‌تواند تحمل نمایند و نشان دهنده ارتباط بین کرنش‌های اصلی بزرگتر و کوچکتر می‌باشند. این نمودارها در تشخیص مسائل بالفعل و بالقوه‌ی ورقکاری بسیار سودمند واقع شده‌اند. ورق‌هایی را که با شبکه‌های متشکل از دایره‌ها نشانه گذاری شده‌اند، می‌توان با استفاده از قالب‌های آزمایشی، یا قالب‌های اصلی که در تولید به کار می‌روند، شکل داد. کرنش‌های موضعی نزدیک به نقطه شکست، یا نقاط مشکوک را می‌توان سنجید و با نمودار حد شکل دهی مقایسه کرد. بدین ترتیب دستیابی به دو هدف

۱- Z. Marciniak

ممکن می شود. نخست آنکه می توان نقاط در دسر ساز را شناسایی کرده و دوم شدت مسئله را، حتی در هنگامی که شکست رخ نمی دهد سنجید. هدف دوم مقایسه کرنشهای اندازه گیری شده با نمودار حد شکل دهی، شناسایی ماهیت مسئله است. در نمودار حد شکل دهی، مینیمم مقدار نمودار در راستای عمودی در حالت کرنش صفحه ای دیده می شود، بنابراین اگر تغییر شکل در ناحیه بحرانی نزدیک به حالت کرنش صفحه ای باشد، تغییرات روانکاری در قالبها، که سبب کشیدن بیشتر می شود، سودمند خواهد بود و روانکاری بهتر و نیروی نگهداری کمتر لبه، مقدار کشش را افزایش می دهند [۲]. در شکل دهی ورقهای فلزی معمولاً حالت تنش صفحه ای در نظر گرفته می شود که دو تنش اصلی  $\sigma_1, \sigma_2$  به هر المان وارد می گردد. کرنشهایی که در جهت این تنشها هستند  $\epsilon_1, \epsilon_2$  می باشند. علاوه بر کرنشهای فوق، در جهت ضخامت هم کرنش وجود دارد لیکن مرسوم است که منحنی حد شکل پذیری بر اساس کرنشهای موجود در صفحه رسم شود و در واقع نمودار حد شکل دهی نشان دهنده ارتباط بین کرنشهای حدی در این دو جهت است. در هنگام بررسی شکل پذیری ورق اگر ترکیب کرنشهای تمام نقاط ورق در زیر منحنی حد شکل دهی واقع شود ورق بدون پارگی کشیده خواهد شد ولی اگر ترکیب کرنشها در نقاط بحرانی قطعه، بالای این منحنی قرار گیرد ورق مطمئناً پاره خواهد شد و در حقیقت برای موفقیت آمیز بودن عملیات باید ترکیب کرنشهای تمام نقاط ورق زیر منحنی حد شکل دهی واقع شود و قرار گرفتن ترکیب کرنشهای حتی یک نقطه از ورق در بالای منحنی به معنای پارگی ورق در عملیات از همان نقطه خواهد بود. در طراحی عملیات پس از مدل نمودن و به دست آوردن توزیع کرنشها، توزیع کرنشهای بدست آمده با منحنی حد شکل دهی ورق مورد نظر مقایسه می گردد، اگر ترکیب کرنشهای تمام نقاط ورق در زیر منحنی واقع شد، می توان عملیات را موفقیت آمیز دانست [۲].

## ۱-۲ کاربرد نمودارهای حد شکل دهی در طراحی قطعه و تحلیل اجزاء محدود

همانطور که در بخش ۱-۱ اشاره شد، عوامل فراوانی بر میزان شکل‌پذیری قطعه فلزی در یک فرایند شکل‌دهی دخالت دارند که یکی از آنها، حداکثر عمق کششی است که فراتر از آن در فلز پارگی و یا چروکیدگی رخ می‌دهد. اگر قبل از ساخت قالب و تولید قطعه، این مسأله برای طراح قالب روشن باشد، باعث کمتر شدن هزینه و ضایعات می‌گردد. برای نیل به این مقصود، ابتدا از یک نرم‌افزار المان محدود که وظیفه‌ی تجزیه و تحلیل ورقها را به عهده دارد، استفاده می‌گردد. از نتیجه این تجزیه و تحلیل‌ها، می‌توان کرنشها را در نمونه‌ها پیش‌بینی نمود. نتیجه بدست آمده برای هر المان خاص موجود در ورق را می‌توان توسط نمودار حد شکل دهی تجزیه تحلیل کرد و حالت آن المان خاص را بعد از عملیات کشش بدست آورد. به طور مثال اگر المان دارای کرنشهایی باشد که در نمودار حد شکل دهی در ناحیه پارگی نشان داده شده است، آن قسمت از ورق در حین تولید قطعه دارای نقص می‌گردد. لذا می‌توان با تغییر در معیارهای مؤثر در ورقکاری و شکل دهی تغییراتی در شکل و سطح نمودار حد شکل دهی داد، یا اینکه شکل و عمق کشش را تغییر داد و یا قطعه را چند مرحله مورد عملیات کشش قرار داد تا شکل نهایی را به خود بگیرد. نمودار حد شکل دهی، در پیش‌بینی ایجاد نقص در قطعه کار قبل از تولید کاربرد فراوانی دارد و نه تنها باعث کاهش هزینه در امر تولید قطعه می‌گردد، بلکه سبب بالا رفتن کیفیت ساخت قطعه و قالب مربوط نیز می‌گردد [۲]. بنابراین یکی از کاربردی‌ترین روش‌های واقع بینانه و موثر به منظور بررسی امکانپذیر بودن تولید یک قطعه و طراحی موفق در فرایندهای شکل‌دهی ورقهای فلزی، استفاده از نمودارهای حد شکل‌دهی (FLD) می‌باشد. این ابزار ما را قادر به پیش‌بینی رفتار ماده در حین فرایند شکل‌دهی می‌سازد به عنوان مثال می‌توان:

۱- مقادیر کرنشهای ممکن و مناسب برای یک فرایند کشش عمیق

۲- نواحی بحرانی و حساس در قطعه که مستعد گلوپی و پارگی هستند

۳- مقادیر کرنش ممکن در مسیرهای مختلف بارگذاری