بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه گیلان

دانشکده فنی و مهندسی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

تخمین عددی آسیب، به کمک معیار حد شکل‌دهی دینامیکی در فرآیند شکل‌دهی ورق‌های فلزی با سرعت بالا

از:

مرتضی سرادار

استاد راهنما:

دکتر علی باستی

اسفند ۹۲

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی مکانیک

(طراحی کاربردی)

تخمین عددی آسیب، به کمک معیار حد شکل‌دهی دینامیکی در فرآیند شکل‌دهی ورق‌های فلزی با سرعت بالا

از:

مرتضی سرادار

استاد راهنما:

دکتر علی باستی

اسفند ۹۲

تقدیم به پدر بزرگوار و مادر مهربانم:

آن دو فرشته ای که از خواسته هایشان گذشتند، سختی‌ها را به جان خریدند و خود را سپر بلای مشکلات و ناملایمات کردند تا من به جایگاهی که اکنون در آن ایستاده ام برسم.

با سپاس فراوان از راهنمائی‌ها و زحمات استاد محترم و گرانقدرم جناب آقای دکتر علی باستی که از ابتدای راه و در طی انجام این تحقیق، با راهنمائی‌های خود مرا در نگارش این اثر یاری نمودند.

و همچنین قدردانی و تقدیر از دوست عزیزم، جناب آقای سید محمد زعیمی که با هدایت و حمایت‌های بی دریغشان یاری‌ام نمودند.

چکیده فارسی:

عنوان پایان‌نامه: تخمین عددی آسیب، به کمک معیار حد شکل‌دهی دینامیکی در فرآیند شکل‌دهی ورق‌های فلزی با سرعت بالا
نگارنده: مرتضی سرادار

سرعت یکی از مهم‌ترین پارامترها در فرآیندهای ساخت و تولید می‌باشد که عملکرد، هزینه، بهره وری، انرژی، راندمان و علاوه بر آن، موارد محیطی و ایمنی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. با مرور تاریخچه‌ای از گذر فرآیندهای تولید، مشاهده می‌شود که فرآیندهای که همراه با سرعت بالا بوده اند، (همانند براده برداری)، جایگزین فرآیندهای قدیمی شده است. در این پایان نامه، علاوه بر مطالعه بر روی رفتار الاستیک پلاستیک ماده، به چگونگی بدست آوردن معیار آسیب FLD، برای تحلیل شکست طی فرآیند شکل‌دهی عمیق ورق در حالت شبه استاتیک پرداخته می‌شود. سپس با بررسی اثرات نرخ کرنش بر رفتار شکل‌دهی ورق‌های فلزی، معیار آسیب FLD جداگانه ای استخراج و تحلیل می‌شود. با به کار بردن نرم افزار تجاری اجزای محدود، همانند ABAQUS، شکل‌دهی بر روی یک قطعه، به صورت مطالعه موردی، مورد بررسی قرار می‌گیرد. بر این اساس، کارآیی هر دو مدل در حالت استاتیک و دینامیک، تخمین زده و مقایسه می‌گردد. با مقایسه بین دو معیار آسیب استاتیکی و دینامیکی، مشخص می‌شود که معیار آسیب استاتیکی قادر به پیشبینی آسیب برای فرآیندهایی که دارای نرخ کرنش قابل توجهی هستند نبوده و برای این گونه موارد باید از معیار حد شکل‌دهی دینامیکی استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: آسیب، شکست، اجزای محدود، نرخ کرنش.

فهرست مطالب

فهرست جداول ..... ح...

فهرست شکل ها ..... ح....

علائم اختصاری: ..... ذ

چکیده فارسی ..... ز

چکیده انگلیسی: ..... ژ

۱ فصل اول ۲

۱-۱ ضرورت انجام پژوهش ۱

۱-۲ اهداف پایان نامه ۳

۱-۳ مراحل انجام پایان نامه ۳

۱-۳-۱ قسمت عددی ۳

۱-۳-۲ قسمت تجربی ۳

۱-۳-۳ قسمت شبیه سازی ۴

۱-۴ مروری بر پژوهش های پیشین ۴

۱-۵ پایان نامه در یک نگاه ۴

۲ فصل دوم ۷

۲-۱ مقدمه ۷

۲-۲ مفاهیم پر کاربرد در شکلدهی فلزات ۷

۲-۲-۱ ناپایداری ۷

۲-۲-۱-۱ ناپایداری یک بعدی ۸

۲-۲-۱-۲ ناپایداری در مسائل دوبعدی ۹

۲-۲-۲ اثر ناهمگنی ها ۱۱

۲-۲-۳ ناهمسانگردی ۱۲

۲-۲-۴ باریک شدگی پخشی و باریک شدگی موضعی ۱۳

۲-۳ نمودار حد شکلدهی ۱۴

۲-۳-۱ تعیین نمودار حد شکلدهی به روش تجربی ۱۶

۲-۳-۲ الگوریتم نوشتاری نمودار حد شکلدهی با استفاده از مدل (M-K) در این پژوهش ۲۰

۲-۳-۲-۱ فرمول بندی مدل ۲۰

۲-۳-۲-۲ روش نیوتن رافسون ۲۵

۲-۳-۲-۳ روش نیوتن رافسون اصلاح یافته ۲۷

۲-۳-۲-۴ بررسی تاثیر زاویه شیار برروند حل ۲۹

۲-۴ مقایسه با مراجع معتبر: ۳۱
۲-۴-۱ تاثیر ضریب ناهمگنی اولیه بر نمودار حد شکلدهی ۳۲
۲-۵ تاثیر مشخصات مکانیکی روی نمودار حد شکلدهی ۳۳
۲-۵-۱ تاثیر ناهمسانگردی در نمودارحد شکلدهی ۳۳
۲-۵-۱-۱ تاثیر ناهمسانگردی روی FLD_0 ..... ۳۳
۲-۵-۱-۲ تاثیر ناهمسانگردی روی FLDs ۳۳
۲-۵-۲ تاثیرنمای کرنش سختی روی نمودار حد شکلدهی ۳۶
۲-۶ خلاصه فصل ۳۶
۳ فصل سوم ۳۹
۳-۱ مقدمه ۳۹
۳-۲ نرخ کرنش ۳۹
۳-۳ تاثیر نرخ کرنش در ناهمگنی ها ۴۳
۳-۴ تاثیر نرخ کرنش و ضریب حساسیت به نرخ کرنش روی نمودار حد شکلدهی ۴۴
۳-۵ نمودار حد شکلدهی وابسته به نرخ کرنش ۴۵
۳-۶ نمودار حد شکلدهی دینامیکی ۴۷
۳-۷ نمودار حدشکلدهی غیر وابسته به نرخ کرنش، وابسته به نرخ کرنش و نمودار حدشکلدهی دینامیکی برای فولاد St13 ۴۸
۳-۷-۱ روش بدست آوردن نماد کرنش سختی، ضریب استحکام، پیش کرنش در جهت نورد ۴۸
۳-۷-۲ ضریب حساسیت به نرخ کرنش ۴۹
۳-۷-۳ ضرایب ناهمسانگردی ۵۰
۳-۷-۴ انواع نمودارهای حد شکلدهی برای St13 ..... ۵۳
۳-۸ خلاصه فصل ۵۶
۴ فصل چهارم ۵۸
۴-۱ مقدمه ۵۸
۴-۲ کشش عمیق ۵۸
۴-۳ مراحل فرآیندکشش عمیق ۵۹
۴-۴ طراحی قالب کشش ۶۱
۴-۴-۱ تعیین ابعاد بلانک اولیه ۶۲
۴-۴-۲ محاسبه لقی بین سنبه و ماتریس: ۶۲
۴-۵ طراحی سنبه و شعاع سر سنبه ۶۳
۴-۵-۱ تعیین قطر سنبه ۶۳
۴-۵-۲ تعیین شعاع سر سنبه ۶۳

۴-۵-۳ طراحی ماتریس و شعاع سر ماتریس: ۶۳
۴-۵-۳-۱ تعیین قطر ماتریس: ۶۳
۴-۵-۳-۲ تعیین شعاع سر ماتریس: ۶۳
۴-۵-۴ تعیین نیروی ورق گیر ۶۳
۴-۶ دستگاه چکش ضربه ای ۶۶
۴-۷ خلاصه فصل ۶۷
۵ فصل پنجم ۶۹
۵-۱ مقدمه ۶۹
۵-۲ آسیب ۶۹
۵-۲-۱ پاسخ تنش- کرنش تک محوره یک فلز نرم در Abaqus ۷۰
۵-۲-۲ وابستگی به مش ۷۰
۵-۳ متغیر آسیب ۷۱
۵-۴ انواع معیارهای آسیب تعریف شده درAbaqus ۷۲
۵-۴-۱ مدل آسیب FLD ۷۳
۵-۴-۲ مدل آسیب MSFLD ۷۳
۵-۵ شبیه سازی فرآیند کشش عمیق سرعت بالا در نرم افزار Abaqus ۷۵
۵-۵-۱ تعریف هندسه قطعات ۷۵
۵-۵-۱-۱ ماتریس، سنبه و ورقگیر ۷۵
۵-۵-۱-۲ ورق ۷۵
۵-۵-۲ تعریف ماده و مشخصات آن و نسبت دادن مقطع به هندسه ۷۵
۵-۵-۲-۱ تعریف مشخصات ورق ۷۶
۵-۵-۲-۲ تعیین مقطع ونسبت دادن آن به هندسه ۷۷
۵-۵-۳ مونتاژ قطعات ۷۷
۵-۵-۴ تعیین نوع حلگر، زمان حل و مشخص کردن خروجی های شبیه سازی ۷۷
۵-۵-۵ تعیین نوع تماس بین اجزای قالب ۷۷
۵-۵-۶ تعیین شرایط مرزی و بارگذاری ۷۸
۵-۵-۷ مش بندی اجزای قالب ۷۸
۵-۵-۸ حل مساله ۷۹
۵-۵-۹ نتیجه گیری ۷۹
۵-۶ خلاصه فصل ۷۹
۶ فصل ششم ۸۱

۶-۱ مقدمه ۸۱
۶-۲ مقایسه ۸۱
۶-۳ اعتبارسنجی شبیه سازی ۸۵
۷ نتایج ۸۷
۸ پیشنهادات ۸۸
مراجع ۸۹

فهرست جداول

جدول ۲-۱، خلاصه ای از بررسی محققان روی نمودار حد شکلدهی مواد مختلف ۲۹
جدول ۲-۲، مشخصات مکانیکی مواد در مراجع مختلف ۳۱
جدول ۳-۱، مشخات مکانیکی فولاد AKDQ ۴۶
جدول ۳-۲، مشخصات مکانیکی St13 در جهتهای مختلف نسبت به نورد ۵۲
جدول ۳-۳، مشخات مکانیکی میانگین St13 ..... ۵۳
جدول ۴-۱، ابعاد قطعه موردنظر ۶۲
جدول ۴-۲، مشخصات فولاد Vcn150 ..... ۶۴
جدول ۴-۳، ابعاد محاسبه شده از روابط برای طراحی اعضای قالب کشش عمیق ۶۴
جدول ۵-۱، خلاصه ای از تحقیقات انجام شده روی فرآیند کشش عمیق با استفاده از نرم افزار Abaqus ۷۳

فهرست شکل‌ها

شکل ۲-۱، بار بیشینه در حالتی که $\frac{d\sigma}{d\varepsilon}=\sigma$ ۶
شکل ۲-۲، آغاز ناپایداری در حالتی که $\frac{d\sigma}{de}=\frac{\sigma}{1+e}$ ۹
شکل ۲-۳، حالت تنش دو محوره ۹
شکل ۲-۴، نمونه آزمون کششی ۱۱
شکل ۲-۵، کرنش کاهش بافته به ازای ضرایب محتلف ناهمگنی ۱۲
شکل ۲-۶، اثر ضریب ناهمگنی روی کرنش کاهش یافته ε_b^* ۱۲
شکل ۲-۷، جهت گیری نمونه تست کشش در جهت نورد ۱۳
شکل ۲-۸، الف: باریک شدگی پخشی، ب: باریک شدگی موضعی ۱۴
شکل ۲-۹، نمودار حد شکلدهی ۱۵
شکل ۲-۱۰، بارگذاری های مختلف در نمودار حد شکلدهی ۱۵
شکل ۲-۱۱، نمودار کیلر- گودوین ۱۶
شکل ۲-۱۲، دایره های حکاکی شده روی سطح ورق ۱۷
شکل ۲-۱۳، پیدایش باریک شدگی موضعی روی سطح ورق ۱۷
شکل ۲-۱۴، نمونه های ورق استفاده شده بوسیله [moshksar & mansourzade, 2003] ۱۸
شکل ۲-۱۵، نحوه قرار گرفتن آینه و دو دوربین برای اندازه گیری کرنش ها در [Ala Hijazi & Nikhil Yardi, 2004] ۱۸
شکل ۲-۱۶، پرس هیدرولیک و قالب ۱۹
شکل ۲-۱۷، فرآیند هیدروفرمینگ با کمک دیسک شناور ۱۹
شکل ۲-۱۸، فرض وجود شیار درمدل [Marciniak & Kuczynski, 1967] ۲۰
شکل ۲-۱۹، ناهمگرایی در حل معادلات غیرخطی مربوط به پیش بینی حدود کرنش بوسیله روش نیوتن-رافسون بدون الگوریتم ارجاع دهنده ۲۹
شکل ۲-۲۰، همگرایی در حل معادلات غیرخطی مربوط به پیش بینی حدود کرنش بوسیله روش نیوتن-رافسون همراه با الگوریتم ارجاع دهنده ۲۹
شکل ۲-۲۱، الگوریتم نوشته شده برای مدل M-K در این پژوهش ۳۰
شکل ۲-۲۲، نمودار حد شکلدهی بدست آمده در این پژوهش برای T6iAl4V ۳۲
شکل ۲-۲۳، نمودار حد شکلدهی بدست آمده برای St12 در این پژوهش ۳۲

شکل ۲-۲۴، تاثیر ضریب ناهمگنی اولیه روی نمودار حد شکلدهی [Ganjiani & Assempour, 2008] ۳۳
شکل ۲-۲۵، پایین ترین نقطه در نمودار حد شکلدهی در سه نوع فولاد مختلف [Ahmadi, et al, 2008]..... ۳۴
شکل ۲-۲۶، تاثیر ناهمسانگردی بر FLDs سه نوع فولاد مختلف [S.Ahmadi, A.R.Eivani, 2008]..... ۳۵
شکل ۲-۲۷، تاثیر ضریب ناهمسانگردی روی نمودار حد شکلدهی برای آلومینیوم [Assempour & Nurcheshmeh, 2003] ۳۶
شکل ۲-۲۸، تاثیر نمای کرنش سختی بر نمودار حد شکلدهی برای فولاد [Assempour & Nurcheshmeh, 2003] ۳۶
شکل ۳-۱، نمودار تنش و کرنش یک فلز دلخواه در نرخ کرنش های مختلف و در دمای اتاق ۴۱
شکل ۳-۲، اثر نرخ کرنش بر تنش تسلیم در ضریب های مختلف حساسیت به نرخ کرنش ۴۱
شکل ۳-۳، دو منحنی تنش و کرنش در نرخ کرنش های مختلف در کرنش ثابت..... ۴۲
شکل ۳-۴، ایجاد تغییرات ناگهانی در نرخ کرنش در زمان انجام آزمایش ۴۲
شکل ۳-۵، تغییرات ضریب حساسیت به نرخ کرنش با نسبت دمای $\frac{T}{T_m}$ ۴۳
شکل ۳-۶، شکل شماتیک نمونه تست کشش ۴۳
شکل ۳-۷، کرنش های نسبی در مقاطع کاهش نیافته ε_b و کاهش یافته ε_a به ازای مقادیر مختلف m..... ۴۴
شکل ۳-۸، اثر ضریب حساسیت به نرخ کرنش روی نمودار حد شکلدهی فولاد ۴۵
شکل ۳-۹، تاثیر ضریب حساسیت به نرخ کرنش روی نمودارحدشکلدهی [A.Rezaee & H.noori, 2011] ۴۶
شکل ۳-۱۰، مقایسه بین نمودارهای حد شکلدهی بدست آمده از مدل گوشه در [M.Jie & C.H.Cheng , 2009] و نمودارشکلدهی بدست آمده از مدل (M-K) در این پژوهش..... ۴۷
شکل ۳-۱۱، نمودار حد شکلدهی برای فولاد AKDQ در نرخ کرنش ۰.۴ برثانیه با استفاده از مدل (M-K) در این پژوهش ۴۸
شکل ۳-۱۲، نمودار تنش و کرنش فولاد St13 در جهت نورد..... ۴۹
شکل ۳-۱۳، ضریب حساسیت به نرخ کرنش بدست آمده با استفاده از نمودار لگاریتم تنش بر حسب لگاریتم نرخ کرنش ... ۵۰
شکل ۳-۱۴، نمودار تنش و کرنش فولاد St13 ، ۹۰ درجه نسبت به نورد ۵۰
شکل ۳-۱۵، نمودار تنش و کرنش حقیقی St13، ۴۵ درجه نسبت به نورد..... ۵۱
شکل ۳-۱۶، تاثیر نرخ کرنش روی نسبت تنش تسلیم به تنش نهایی St13 در جهت های مختلف نورد ۵۱
شکل ۳-۱۷، تاثیر نرخ کرنش روی تغییر طول نسبی St13 در جهت های مختلف نسبت به نورد..... ۵۲
شکل ۳-۱۸، نمودار حد شکلدهی غیر وابسته به نرخ کرنش برای فولاد St13..... ۵۳
شکل ۳-۱۹، نمودار حد شکلدهی وابسته به نرخ کرنش برای فولاد St13..... ۵۳
شکل ۳-۲۰، مقایسه بین دو نمودار حد شکلدهی وابسته و غیر وابسته به نرخ کرنش برای فولاد St13 ..... ۵۴
شکل ۳-۲۱، نمودار حد شکلدهی دینامیکی برای فولاد St13 ..... ۵۵
شکل ۳-۲۲، رفتار St13 در نرخ کرنش های مختلف..... ۵۵
شکل ۳-۲۳، تاثیر ناهمسانگردی روی نمودار حد شکلدهی St13 ..... ۵۶
شکل ۴-۱، سینک ظرفشویی تولید شده از طریق فرآیند کشش عمیق ۵۸
شکل ۴-۲، الف: فرآیند کشش عمیق استوانه ای، ب: پارامترهای فرآیند کشش عمیق ۵۹
شکل ۴-۳، مرحله اول فرآیند..... ۵۹
شکل ۴-۴، مرحله دوم فرآیند ۶۰
شکل ۴-۵، مرحله سوم فرآیند ۶۰
شکل ۴-۶، مرحله چهارم فرآیند ۶۰
شکل ۴-۷، اجزای قالب کشش عمیق..... ۶۱
شکل ۴-۸، قالب کشش عمیق طراحی شده در نرم افزار solidworks..... ۶۴
شکل ۴-۹، قالب کشش عمیق طراحی شده ۶۵
شکل ۴-۱۰، ماتریس متصل شده به کفشک پایین و میله راهنما..... ۶۵

شکل ۴-۱۱، فنر مونتاژ شده روی ورقگیر ۶۶
شکل ۴-۱۲، دستگاه چکش ضربه ای..... ۶۷
شکل ۵-۱، مراحل ایجاد ترک ۶۹
شکل ۵-۲، بخش های مختلف نمودار تنش کرنش تک محوره..... ۷۰
شکل ۵-۳، نیروی وارد شده بر یک المان ۷۱
شکل ۵-۴، محاسبه پارامتر آسیب در معیار FLD..... ۷۳
شکل ۵-۵، انتقال منحنی FLD به MSFLD..... ۷۴
شکل ۵-۶، هندسه اعضای صلب، الف: ماتریس، ب: نگهدارنده ورق، ج: سنبه..... ۷۶
شکل ۵-۷، نمودار تنش وکرنش St13 در جهت نورد ۷۶
شکل ۵-۸، مونتاژ قطعات ۷۷
شکل ۵-۹، جابجایی سنبه در طول انجام فرآیند ۷۸
شکل ۵-۱۰، مش بندی اجزای قالب کشش عمیق ۷۹
شکل ۶-۱، نمودار نیروی سنبه بر حسب زمان انجام فرآیند..... ۸۱
شکل ۶-۲، ورق شکل داده شده از جنس St13 با ضخامت ۱ میلیمتر با استفاده از چکش ضربه ای..... ۸۲
شکل ۶-۳، نتیجه پیشبینی شده توسط معیار FLD (نمودار حد شکلدهی استاتیکی)..... ۸۲
شکل ۶-۴، نتیجه پیشبینی شده توسط معیار MSFLD (نمودار حد شکلدهی دینامیکی) ۸۳
شکل ۶-۵، ورق شکل داده شده از جنس St13 با ضخامت ۰.۸ میلیمتربا استفاده از چکش ضربه ای ۸۳
شکل ۶-۶، نتیجه پیشبینی شده توسط معیار FLD (نمودار حد شکلدهی استاتیکی)..... ۸۴
شکل ۶-۷، نتیجه پیشبینی شده توسط معیار MSFLD (نمودار حد شکلدهی دینامیکی) ۸۴
شکل ۶-۸، پارامترآسیب دومعیار آسیب استاتیکی و دینامیکی بر حسب زمان انجام فرآیند ۸۵
شکل ۶-۹، عمق وقوع پارگی در شبیه سازی انجام شده و اندازه گیری آن از کف قطعه ۸۵
شکل ۶-۱۰، انرژی جنبشی در زمان انجام فرآیند..... ۸۶
شکل ۶-۱۱، انرژی درونی فرآیند بر حسب زمان انجام فرآیند ۸۶

علائم اختصاری:

شعاع سر سنبه (m)	r_m
قطر سنبه (m)	D_p
تنش تسلیم موثر (MPA)	$\overline{\sigma}_y$
ضریب نسبیت	$d\lambda$
کرنش عرضی	ε_W
کرنش ضخامتی	ε_T
ضریب ناهمسانگردی ، عمود بر جهت نورد	r_{90}
ضریب ناهمگنی اولیه	f_0
پیش کرنش	ε_0
کرنش کمتر	ε_{Minor}
تنش هیدروستاتیک(MPA)	σ_H
ضریب استحکام (MPA)	K
ضریب حساسیت به نرخ کرنش	m
نرخ کرنش (1/s)	$\dot{\varepsilon}$
تنش انحرافی در جهت ۱ (MPA)	σ'_{11}
تنش انحرافی در جهت ۳ (MPA)	σ'_{33}
نمو کرنش در راستای n	$d\varepsilon_{nn}$
نمو کرنش برشی در صفحه nt	$d\varepsilon_{nt}$
تنش اصلی در جهت ۲(MPA)	σ_{22}
نموکرنش در جهت ۱	$d\varepsilon_{11}$
نموکرنش در جهت ۳	$d\varepsilon_{33}$
تنش در راستای t (MPA)	σ_{tt}
تنش برشی در صفحه xy (MPA)	τ_{xy}
تنش برشی در صفحه xz (MPA)	τ_{xz}
تنش انحرافی در جهت ۲ (MPA)	σ'_{22}
نمو زاویه	$d\theta$
نمو کرنش در راستای t	$d\varepsilon_{tt}$
تنش اصلی در جهت ۱(MPA)	σ_{11}
تنش اصلی در جهت ۳(MPA)	σ_{33}
نموکرنش در جهت ۲	$d\varepsilon_{22}$
تنش در راستای n (MPA)	σ_{nn}
تنش برشی در صفحه nt (MPA)	σ_{nt}

تنش برشی در صفحه zy (MPA)	τ_{zy}
کرنش شکست	ε_f
نیروی ورقگیر (N)	F_h
قطرماتریس (m)	D_m
نمو کرنش موثر	$d\overline{\varepsilon}$
تنش میانگین (MPA)	σ_m
کرنش طولی	ε_L
ضریب ناهمسانگردی در جهت نورد	r_0
ضریب ناهمسانگردی، ۴۵ درجه نسبت به نورد	r_{45}
ضریب ناهمگنی	f
کرنش بیشتر	ε_{Major}
ضخامت (m)	t
مساحت $\left(m^2\right)$	A
نماد کرنش سختی	n
نموکرنش مهندسی	de
نرخ کرنش مهندسی(1/s)	$\dot{e}$

فصل اول

مقدمه

فصل اول

مقدمه

۱-۱ ضرورت انجام پژوهش

امروزه شکل‌دهی فلزات[۱] به خوبی نقش خود را در صنعت مدرن پیدا کرده است. با پیشرفت این تکنولوژی، نیاز هرچه بیشتر به بهینه سازی آن احساس می‌شود. بهینه سازی بدون استفاده از ریاضیات و کامپیوتر میسر نمی‌باشد. به طور عمده به منظور جلوگیری از هدر رفتن زمان، کمترکردن هزینه، جلوگیری از بین رفتن مواد، بهبود کنترل کیفیت، افزایش دقت و بسیاری از عوامل دیگر، از رایانه جهت بهبود کار در شکل‌دهی فلزات استفاده می‌کنند.

استفاده از مدل‌سازی ریاضی در شکل‌دهی فلزات سبب بوجود آمدن یک روال مشخص در عیب‌یابی شده و همین عامل تاثیر فوق العاده زیادی در کاهش زمان تولید و سپس کاهش هزینه دارد. بنابراین محققان سعی در پیدا کردن روش‌های مختلف برای بهینه کردن فرآیندهای مختلف دارند.

در فرآیندهای مختلف شکل‌دهی فلزات مانند کشش عمیق[۲]، موضوع آسیب[۳] یا پارگی یکی از مهم‌ترین موارد می‌باشد، به طوری که پیش‌بینی این ناپایداری یکی از ضروری ترین موارد جهت بهینه کردن آن می‌باشد. این امر به این علت است که با پیش‌بینی کردن آسیب و پارگی می‌توان هزینه ساخت قالب را به طور چشمگیری کاهش داد. در واقع این بدان معناست که بدون انجام آزمایش می‌توان با استفاده از رایانه تمام فرآیند مزبور را شبیه سازی نموده و حتی امکان وقوع آسیب را پیش‌بینی نمود.

برای پیش‌بینی امکان وقوع آسیب در فرآیند های مختلف، از ابزاری به نام نمودار حد شکل‌دهی[۴] استفاده می‌شودکه توانایی مدل کردن انواع مختلف بارگذاری را دارد. بدست آوردن این نمودار گامی بسیارمهم برای بهبود فرآیندهای شکل‌دهی می‌باشد. لازم به ذکر است که نمودار حد شکل‌دهی توانایی پیش‌بینی برای فرآیندهایی را دارد که حالت تنش صفحه ای[۵] برای آن‌ها برقرار است.

اما امروزه سرعت یکی از مهم‌ترین پارامترها در فرآیندهای ساخت وتولید می‌باشد که عملکرد، هزینه، بهره وری، انرژی، راندمان و علاوه بر آن، موارد محیطی و ایمنی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. امروزه فرآیندهای سرعت بالا و شکل‌دهی با سرعت زیاد جایگزین فرآیندهای قدیمی شده است که پارامتر نرخ کرنش[۶] در آن‌ها قابل ملاحظه نیست. از نمودار حد شکل‌دهی برای بررسی آسیب در فرآیندهای قدیمی و با سرعت پایین می‌توان استفاده کرد و این در حالیست که امروزه بدلیل اهمیت پارامتر سرعت، نیاز به معیاری که بتواند به بررسی آسیب در فرآیندهای سرعت بالا بپردازد به شدت احساس می‌شود. بدست آوردن نمودار حد شکل‌دهی دینامیکی[۷] (نمودار حد شکل‌دهی با در نظر گرفتن پارامتر نرخ کرنش) و کاربرد این معیار در فرآیند شکل‌دهی کشش عمیق، ضرورت انجام این پژوهش می‌باشد.

---

[۱] Metal Forming
[۲] Deep Drawing
[۳] Damage
[۴] Forming Limit Diagram (FLD)
[۵] Plane Stress
[۶] Strain rate
[۷] Dynamic Forming Limit Diagram (DFLD)

۱-۲ اهداف پایان نامه

هدف این پایان نامه، بررسی اثر نرخ کرنش روی نمودار حد شکل‌دهی و ایجاد یک معیار مستقل به عنوان نمودار حد شکل‌دهی دینامیکی می‌باشد. این معیار علاوه بر داشتن فواید نمودار حد شکل‌دهی استاتیکی، می‌تواند برای فرآیندهای مختلف در سرعت بالا نیز کاربرد داشته باشد. در واقع دراین پایان نامه می‌خواهیم علاوه بر بدست آوردن نمودار حد شکل‌دهی دینامیکی، اعتبار نمودار حد شکل‌دهی معمولی را در فرآیندهای سرعت بالا مورد بررسی قرار دهیم.

برای اعتبارسنجی هر دو معیار استاتیکی و دینامیکی، لازم است که یک فرآیند شکل‌دهی در سرعت بالا به صورت آزمایش انجام شود، برای این امر، فرآیند کشش عمیق به دلیل این‌که حالت تنش صفحه ای درآن برقرار است مورد آزمایش قرار گرفت. همچنین برای تامین نیروی لازم برای کشش ورق در فرآیند کشش عمیق و برای ایجاد سرعت بالا(نسبت به فرآیند کشش عمیق معمولی) و مطابق با آن نرخ کرنش بالا، از دستگاه چکش ضربه ای[۱] استفاده شده است.

۱-۳ مراحل انجام پایان نامه

این پایان نامه شامل سه قسمت عمده می‌باشد که به ترتیب شامل قسمت عددی، قسمت تجربی و قسمت شبیه‌سازی است. قسمت عددی در فصول دوم و سوم مورد بررسی قرارگرفته، در حالی که قسمت تجربی در فصل چهارم و قسمت شبیه سازی در فصل پنجم مورد بررسی قرار گرفته اند. فصل ششم نیز به مقایسه بین نتایج حاصل از آزمایش تجربی و شبیه سازی پرداخته است.

۱-۳-۱ قسمت عددی

روند انجام قسمت عددی به شرح زیر می‌باشد:

- مطالعات اولیه روی پارامترهای تاثیرگذار در شکل‌دهی فلزات
- نوشتن الگوریتم بدست آوردن نمودار حد شکل‌دهی برای هر فلز دلخواه بدون در نظر گرفتن پارامتر نرخ کرنش با استفاده از مدل M-K
- اعتبار سنجی برنامه نوشته شده با استفاده از مراجع معتبر
- تاثیر مشخصات مکانیکی نظیر نماد کرنش سختی، ناهمسانگردی روی نمودار حد شکل‌دهی
- بررسی پارامتر نرخ کرنش
- تاثیر پارامتر نرخ کرنش در نمودار حد شکل‌دهی و بدست آوردن نمودار حد شکل‌دهی دینامیکی
- بدست آوردن نمودار حد شکل‌دهی غیروابسته به نرخ کرنش، وابسته به نرخ کرنش و نمودار حد شکل‌دهی دینامیکی برای فولاد St13

۱-۳-۲ قسمت تجربی

مراحل انجام قسمت تجربی به شرح زیر می‌باشد:

- بررسی فرآیند کشش عمیق
- طراحی قالب کشش عمیق بر اساس روابط موجود در هندبوک‌های مهندسی که خود شامل طراحی سنبه، ماتریس، شعاع سر سنبه، شعاع سر ماتریس و نیروی ورق‌گیر می‌باشد.
- مدلسازی قالب طراحی شده در نرم افزار solidwork
- ساخت قالب

[۱] Drop Hammer

- انجام فرآیند کشش عمیق با استفاده از چکش ضربه ای روی ورق از جنس فولاد St13

۱-۳-۳ قسمت شبیه‌سازی

روند انجام قسمت شبیه‌سازی به شرح زیر است:

- بررسی پارامتر آسیب در نرم افزار Abaqus
- شبیه سازی آزمایش فرآیند کشش عمیق با استفاده از دستگاه چکش ضربه‌ای و وارد کردن نتایج بدست آمده برای نمودارهای حد شکل‌دهی فولاد St13 درداخل نرم افزار

۱-۴ مروری بر پژوهش‌های پیشین

[Marciniak & Kuczynski, 1967] اولین مدل ریاضی در تشکیل نمودار حد شکل‌دهی به روش نظری را ارائه کردند. فرض شد که باریک شوندگی از یک ناحیه ناهمگن اولیه و به صورت یک نقص ضخامتی، عمود برراستای تنش و کرنش اصلی آغاز می‌گردد. زمانی که نسبت ضخامت شیار به ضخامت ناحیه همگن کمتر از یک مقدار بحرانی شود، باریک شوندگی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در واقع این ناهمگنی را می‌توان ناشی از ناهمواری سطح و یکسان نبودن خواص پلاستیک در نواحی مختلف ورق دانست. [Sowerby & Duncan, 1971] نشان دادند که حدود کرنش پیش بینی شده توسط این مدل، وابستگی زیادی به ضرایب ناهمسانگردی دارد. [Gosh, 1978] به این نتیجه رسید که بعد از نقطه ماکزیمم در نمودار تنش محوری-کرنش محوری، حساسیت به نرخ کرنش ماده در پیش بینی نمودار حد شکل‌دهی از اهمیت بالایی برخوردار است. [Hutchinson & Neale, 1978] با استفاده از تئوری تغییر شکل، مدل M-K را برای تمام محدوده‌های حالت تنش صفحه‌ای بسط دادند. که نتیجه آن سازگاری بهتر با نتایج آزمایشگاهی می‌باشد. اهمیت نقش معادلات ساختاری و تئوری پلاستیسیته در پیش بینی حدود شکل‌دهی بر اساس کار آنها معرفی گردید.

[Cao et al, 2000] نشان دادند که مدل M-K حتی برای ناحیه سمت چپ نمودار حد شکل‌دهی نیز می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد، اما راستای شیاری که به ازای آن کرنش‌های حدی مینیمم را می‌توان پیش بینی کرد دیگر عمود بر راستای تنش اصلی نخواهد بود و حتی در حین فرایند زاویه راستای شیار تغییر می‌کند.

۱-۵ پایان نامه در یک نگاه

فصل دوم در این پایان نامه، ابتدا به تعریف چند مفهوم مهم در شکل‌دهی فلزات پرداخته، سپس به بررسی روش‌های تجربی بدست آوردن نمودار حد شکل‌دهی معمولی می‌پردازد. در ادامه، فرمول بندی لازم جهت نوشتن الگوریتم بدست آوردن این معیار بدون در نظر گرفتن پارامتر نرخ کرنش ارائه می‌شود. سپس با مراجعه به مراجع معتبر و برای چند ماده خاص، صحت الگوریتم نوشته شده اعتبار سنجی می‌شود، در پایان تاثیر عوامل مختلف نظیر نماد کرنش سختی و ناهمسانگردی روی نمودار حد شکل‌دهی بررسی می‌شود. به طور کلی تمرکز اصلی این فصل بررسی روش نظری برای بدست آوردن معیار حد شکل‌دهی بر مبنای مدل M-K می‌باشد.

فصل سوم در ابتدا به تعریف پارامتر نرخ کرنش پرداخته و تاثیر این پارامتر را روی مشخصات مکانیکی ماده بررسی می‌کند، سپس در ادامه با در نظر گرفتن این پارامتر در الگوریتم نوشته شده، نمودار حد شکل‌دهی وابسته به نرخ کرنش و مطابق با آن نمودار حد شکل‌دهی دینامیکی بدست می‌آید. همچنین برای بررسی کاربرد این نمودار به صورت عملی برای یک ماده خاص نظیر St13، نمودارهای حد شکل‌دهی غیر وابسته به نرخ کرنش، وابسته به نرخ کرنش و نمودارحد شکل‌دهی دینامیکی بدست می‌آیند.

فصل چهارم به فعالیت‌های تجربی می‌پردازد که شامل نحوه ساخت قالب کشش عمیق است که برای انجام آزمایش با استفاده از دستگاه چکش ضربه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. این فصل در ابتدا فرآیند کشش عمیق را مورد بررسی قرار داده، سپس

به طراحی قالب کشش عمیق پرداخته است. طراحی این قالب با استفاده از روابط موجود در هندبوک‌های مختلف مهندسی بوده و همچنین این قالب قبل از ساخت، در نرم افزار مدلسازی solidworks مدلسازی شده و با استفاده از نقشه‌های گرفته شده از این نرم افزار ساخته می‌شود. در پایان نیز این قالب با استفاده از دستگاه چکش ضربه ای، آزمایش کشش عمیق را انجام می‌دهد.

فصل پنجم به شبیه‌سازی فرآیند آزمایش شده در فصل چهارم می‌پردازد. این شبیه سازی با استفاده از نرم افزار المان محدود Abaqus بوده و با وارد کردن داده‌های مربوط به نمودارهای حد شکل‌دهی بدست آمده در فصل سوم برای فولاد St13 به بررسی آسیب روی ورق با دو ضخامت ۱ و ۰.۸ میلی‌متر می‌پردازد.

فصل ششم به مقایسه نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی و شبیه سازی پرداخته و توانایی هردومعیار حد شکل‌دهی استاتیکی و دینامیکی در پیش‌بینی آسیب مورد سنجش قرار می‌گیرد.