بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه تربیت مدرس

دانشکده فنی و مهندسی

بخش مهندسی مکانیک/گروه ساخت و تولید

پایان نامه کارشناسی ارشد

مهندسی مکانیک - ساخت و تولید

بررسی عددی و تجربی عیب پیچش در فرآیند شکل دهی غلتکی سرد برای مقاطع یو شکل

نگارنده:

مجتبی لشگرو

استاد راهنما:

دکتر حسن مسلمی نائینی

استاد مشاور:

دکتر مهدی تاجداری

اسفند ۸۹

بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه

آقای مجتبی لشگرو پایان نامه ٦ واحدی خود را **با عنوان بررسی عددی و تجربی عیب پیچش در فرایند شکل دهی غلتکی سرد لوله برای مقطع یوشکل** در تاریخ ۱۳۸۹/۱۲/۲۳ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این پایان نامه را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک - ساخت وتولید پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر حسن مسلمی نائینی	استاد	
استاد مشاور	دکتر مهدی تاجداری	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر غلامحسین لیاقت	استاد	
استاد ناظر	دکتر کارن ابری نیا	دانشیار	
مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی)	دکتر غلامحسین لیاقت	استاد	

آیین نامه چاپ پایان‌نامه (رساله)های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله)های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه،دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله)ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد/ رساله دکتری نگارنده در رشته مهندسی مکانیک است که در سال ۱۳۸۹ در دانشکده فنی مهندسی دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی سرکار خانم/جناب آقای دکتر حسن مسلمی نایینی ، مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر مهدی ناجداری و مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت‌چاپ) را به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر درمعرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده رابه عنوان خسارت به دانشگاه تربیت‌مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواندخسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده‌نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب مجتبی لشگرو دانشجوی رشته مهندسی مکانیک مقطع کارشناسی ارشد

تعهد فوق وضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: مجتبی لشگرو

تاریخ و امضا: ۹۰/۱۰/۱۹

دستورالعمل حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیات علمی، دانشجویان، دانش آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی که با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد ذیل را رعایت نمایند:

ماده ۱- حقوق مادی و معنوی پایان نامه‌ها / رساله‌های مصوب دانشگاه متعلق به دانشگاه است و هرگونه بهره‌برداری از آن باید با ذکر نام دانشگاه و رعایت آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های مصوب دانشگاه باشد.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و استاد راهنما مسئول مکاتبات مقاله باشد.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب حاصل از نتایج پایان نامه / رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با مجوز کتبی صادره از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه و بر اساس آئین نامه های مصوب انجام می‌شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این دستورالعمل در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۱۳۸۴/۴/۲۵ در شورای پژوهشی دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب لازم الاجرا است و هرگونه تخلف از مفاد این دستورالعمل، از طریق مراجع قانونی قابل پیگیری می شود.

نام و نام خانوادگی

امضاء

۹۰/۱۰/۱۹

تقدیم به:

پدر و مادر عزیزم

تقدیر و تشکر

در اینجا لازم می‌دانم از آقای دکتر حسن مسلمی نائینی به واسطهٔ رهنمودها و راهنمائی‌های سودمند و با ارزش، نظارت و پیگیری همه جانبه و کمکهای دلسوزانه‌شان و نیز از زحمات آقای دکتر مهدی تاجداری به واسطه مشاوره و راهنمائی‌های مفید و بجا و بذل توجهشان کمال تشکر و سپاسگذاری را بعمل آورم. از همیاری و همفکری‌های دوست عزیزم آقای مهندس سید یاسر دریاباری ، مهندس روح الله عزیزی تفتی، دکتر سیامک مزدک، مهندس سیدجلال هاشمی قیری، مهندس عماد رحیمی، مهندس رسول صفدریان، مهندس سید کاشی و مهندس مهدی کسایی کمال تشکر و قدردانی می‌گردد.

همچنین از زحمات و حمایت های بی دریغ خانواده ام به ویژه پدر و مادر عزیزم که در تمام مراحل تحصیلم بدون هیچ چشم داشتی صبورانه مرا حمایت و پشتیبانی کرده اند، تشکر می کنم.

چکیده

فرآیند شکل دهی غلتکی سرد فرآیندی است که در آن ورق با عبور از بین مجموعه ایی از غلتک های دوار به پروفیلی با سطح مقطع مشخص تبدیل می شود . که توانایی تولید انواع لوله و پروفیل را به صورت پیوسته دارد.

چون مقطع متقارن پیچش ندارد برای بررسی عیب پیچش از مقطع نامتقارن استفاه شده است. وهمچنین برای بررسی عیب پیچش به پارامتر هایی که روی عیب تاثیر گذار بودند مورد مطالعه قرار گرفت. که این پارامتر ها عبارتند از فاصله بین ایستکاهها ، ضخامت ورق ، زاویه غلتک ها ، پهنای بال و پهنای کف مقطع می باشد.

بهترین ابزار برای بررسی این پارامترها کرنش طولی لبه می باشد وهمچنین به خاطر نامتقارن بودن قطعه، یکی از ابزار ها برای بررسی پیچش ، اختلاف کرنش طولی دو لبه می باشد. فرآیند تولید یک مقطع کانالی که از مقاطع پایه‌ای در شکل‌دهی غلتکی سرد است در نرم‌افزار اجزای محدود مارک‌منتات شبیه‌سازی شد. سپس با یکنواخت‌سازی شکل‌دهی در ایستگاه‌های مختلف بر اساس کرنش طولی در لبه ورق، بهینه‌ترین الگوی گل به دست آمد. برای یک مرحله از الگوی گل مذکور، غلتک‌های شکل‌دهی ساخته شد و اثر پهنای بال و ضخامت ورق بصورت تجربی آزمایش شد و با نتایج شبیه سازی مقایسه شد که همخوانی خوبی بین آنها وجود داشت.

واژگان کلیدی: فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد، مقطع کانالی شکل،کرنش طولی لبه.

فهرست مطالب

عنوان ..... صفحه
فصل ۱ مقدمه‌ای بر فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد ۱
۱-۲-انواع محصولات قابل تولیدبه روش شکل دهی غلتکی سرد ۴
۱-۳-چند مورد از مزایا و مشکلات شکل دهی غلتکی سرد ۵
۱-۴- مشکلات شبیه سازی فرآیند ۵
۱-۵- مروری بر پژوهش های پیشین ۶
۱-۶- اهداف این پایان‌نامه ۱۰
۱-۷- ساختار این پایان‌نامه ۱۱
فصل ۲ برسی عیوب هندسی محصول و پارامترهای موثر ۱۲
۲-۱- مقدمه ۱۳
۲-۱-۱-عیبب کمانش محلی ۱۵
۲-۱-۲-عیب موج دار شدن لبه ۱۵
۲-۱-۳-پیچش ۱۶
۲-۱-۴- باز شدن لبه خروجی ۱۷
۲-۱-۵-انحنای طولی (شمشیری شدن) ۱۸
۲-۲- پارامترهای موجود در فرآیند شکل دهی غلتکی سرد ۱۹
۲-۲-۱- بررسی تحقیق هان ۱۹
۲-۳- بررسی بیو و پانتت ۲۳
فصل ۳ مدل‌سازی خط تولید و شبیه‌سازی اجزای محدود فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد ۲۷
۳-۱- مقدمه ۲۸
۳-۲- تعریف صورت مسئله ۲۸
۳-۳- مدل‌سازی فرآیند ۲۹
۳-۳-۱- انتخاب نرم افزار مارک منتات به عنوان یکی از نرم افزارهای اجزای محدود ۳۰
۳-۳-۲-- غلتک های شکل دهی ۳۰
۳-۳-۲-۱- روش انجل ۳۱
۳-۳-۲-۲- روش ارتفاع شکل‌دهی مساوی ۳۲
۳-۳-۲-۳- روش تغییر زاویه‌های شکل‌دهی مساوی ۳۴

۳-۳-۴- مشخصات غلتک ها ۳۵
۳-۳-۵- ورق ۳۶
۳-۳-۶- غلتک‌های نگهدارنده ۳۷
۳-۳-۷- سوار کردن اجزای خط تولید ۳۷
۳-۳-۸- آماده سازی برای شبیه‌سازی اجزای محدود ۳۹
۳-۳-۸-۱- شبکه‌بندی ۳۹
۳-۳-۸-۲- انتخاب نوع المان ۴۰
۳-۳-۸-۳-جنس ورق ۴۰
۳-۳-۸-۵- سرعت غلتک‌ها ۴۱
۳-۴- مدل‌سازی و شبیه‌سازی خط تولید ۴۲
۳-۴-۱- انتخاب تعداد ایستگاه‌های شکل‌دهی ۴۲
۳-۴-۲- تعیین زاویه‌های شکل‌دهی ۴۲
۳-۴-۳-نکات مهم در مورد شبیه سازیهای اجزای محدود ۴۵
فصل ۴ انجام آزمایش عملی ۴۷
۴-۲- روش کار در آزمایش عملی ۴۸
۴-۳- مشخصات دستگاه ۴۸
۴-۴- غلتک‌ها ۴۹
۴-۴-۱- ابعاد غلتک‌ها ۴۹
۴-۴-۲- جنس غلتک‌ها ۵۱
۴-۴-۳- کنترل غلتک‌ها ۵۱
۴-۴-۵- جاخارها ۵۱
۴-۴-۶-- سوارکردن غلتک‌ها روی دستگاه ۵۱
۴-۷- آماده‌سازی نمونه‌ها ۵۳
۴-۷-۱- کنترل ابعادی ۵۵
۴-۷-۲- جنس نمونه‌ها ۵۶
۴-۸- کنترل حرکت ورق به ایستگاه شکل‌دهی ۵۶
۴-۹- شکل‌دهی نمونه‌ها ۵۷
۴-۱۰- سرعت شکل‌دهی ۵۸
۴-۱۱- انجام آزمایش CMM بر روی نمونه‌های تولیدشده ۶۰

فصل ۵ نتایج وبحث ۶۳
۵-۱- مقدمه ۶۴
۵-۲- بررسی کرنش‌های مختلف در ورق ۶۵
۵-۲-۱- کرنش‌های طولی در ورق ۶۵
۵-۲-۲- کرنش‌های عرضی در ورق ۶۵
۵-۲-۳- کرنش‌های در راستای ضخامت در ورق ۶۶
۵-۳- صحت‌سنجی شبیه‌سازی‌های اجزای محدود ۶۶
۵-۴- بررسی اثر پارامترهای موجود در فرآیند شکل دهی غلتکی سرد مقطع یو شکل ۶۹
۵-۴-۱- اثر افزایش زاویه شکل دهی ۶۹
۵-۴-۲- مقایسه تاریخچه کرنش‌های طولی در لبه ورق ۷۲
۵-۴-۲-۱- کرنش‌های طولی بیشینه در لبه ورق ۷۲
۵-۴-۲-۲- کرنش‌های طولی باقی‌مانده در لبه ورق ۷۴
۵-۵- فاصله بین ایستگاه های شکل دهی ۷۸
۵-۶- پهنای لبه بیرونی (پهنای بال) ۷۹
۵-۷- ضخامت ورق ۸۱
۵-۸- بررسی نتایج کار عملی ۸۲
۵-۸-۱- انجام آزمایش برای تولید نمونه‌ها ۸۴
۵-۸-۲- بررسی زاویه‌های ایجادشده در نمونه‌ها ۸۵
فصل ۷ نتیجه‌گیری و پیشنهادها برای ادامه کار ۹۳
۷-۱- نتیجه‌گیری ۹۴
۷-۲- پیشنهادها برای ادامه کار ۹۶
مراجع ۹۷
لیست مقالات ارائه شده ۹۹

فهرست جدول‌ها

صفحه .....

جدول (۲-۱) : مهمترین پارامتر های شکل دهی ۲۰

جدول (۳-۱) : کمیت‌های مستقل و وابسته در مقطع کانالی شکل ۲۹

جدول (۳-۲) :نتایج محاسبات به روش انجل برای مقاطع کانالی شکل..... ۴۳

جدول (۳-۳) : زاویه‌های انتخاب شده برای ایستگاه‌های اول و دوم جهت شبیه‌سازی‌های اجزای محدود ۴۳

جدول (۴-۱) : مشخصات نمونه‌های آزمون‌های کشش عمود بر هم و خلاصه نتایج آنها..... ۵۴

جدول (۴-۲) : توان کرنش‌سختی برای منحنی تنش حقیقی- کرنش حقیقی طولی و عرضی..... ۵۶

جدول (۴-۳) : اندازه‌گیری سرعت خطی با کولیس دیجیتال ۵۹

جدول (۴-۴) : اندازه‌گیری سرعت خطی با تاکومتر ۶۰

جدول (۵-۱) : شرایط کاری تحلیل انجام شده برای اعتبار سنجی نتایج شبیه سازی با نتایج تجربی ۶۷

جدول (۵-۲) : نتایج کرنش طولی در لبه ورق برای شبیه‌سازی‌های اجزای محدود و نتایج تجربی موجود در [۲۵] ۶۹

جدول (۵-۳) : شرایط انجام شبیه سازی برای بررسی اثر زاویه غلتک ها بر کرنش طولی لبه..... ۷۰

جدول (۵-۴) : نتایج مقدار پیچش برای زاویه های مختلف ۷۷

جدول (۵-۵) : نتایج مقدار پیچش برای قطعه ای با کف مقطع ۱۰ ..... ۷۸

جدول (۵-۶) : نتایج کار عملی برای ضخامت های مختلف..... ۸۷

جدول (۵-۷) : مقدار پیچش نمونه ها ۸۸

جدول (۵-۸) : نتایج کار عملی برای پهنای بال ۹۰

فهرست شکل‌ها

عنوان ..... صفحه
شکل (۱-۱) : نمایی ازتولید پروفیل با فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد ۲
شکل (۱-۲) : نمایش شماتیک طول تغییر شکل در شکل دهی کانال متقارن ۳
شکل (۱-۳) : نمونه‌ای از محصولات بدون درز جوش ۴
شکل (۱-۴) : شبیه سازی پروفیل مقطع کانال در سه ایستگاه ۷
شکل (۱-۵) : مدل شکل دهی غلتکی سرد ۸
شکل (۱-۶) : شکل‌دهی پروفیل در چند ایستگاه از یک ورق تخت تا محصول نهایی ۹
شکل (۲-۱) : نمایش شماتیک از هندسه تغییر شکل یافته نوار ورق قبل از ایستگاه اول ،در شکل دهی کانال متقارن ۱۴
شکل (۲-۲) : نمایش شمشیری شدن محصول خروجی از ایستگاه اول و تغییر مکان قائم به پایین ۱۵
شکل (۲-۳) : مشکل موج دار شدن لبه ورق ۱۵
شکل (۲-۴) : عیب پیچش در فرآیند شکل دهی غلتکی سرد مقاطع باز ۱۶
شکل (۲-۵) : :عیب باز شدن لبه خروجی در محصولات فرآیند شکل دهی غلتکی ۱۷
شکل (۲-۶) : عیب انحنای طولی در یک پروفیل تولید شده در فرآیند شکل دهی غلتکی سرد ۱۸
شکل (۲-۷) : اثر زاویه خم ۲۰
شکل (۲-۸) : اثر ضخامت ورق ۲۰
شکل (۲-۹) : اثرتنش تسلیم ۲۱
شکل (۲-۱۰) : اثر پهنا ی بال ۲۲
شکل (۲-۱۱) : اثر پهنای کف مقطع ۲۲
شکل (۲-۱۲) : اثرفاصله بین ایستگاهها ۲۳
شکل (۲-۱۳) : کرنش طولی در فاصله mm ۱/۵ از لبه ورق ۲۴
شکل (۲-۱۴) : زاویه شکل‌دهی در طول فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد ۲۵
شکل (۲-۱۵) : برگشت فنری بیشتر برای مواد با استحکام بالاتر ۲۵
شکل (۲-۱۶) : کاهش کرنش‌های طولی در نتیجه افزایش فاصله بین ایستگاه‌ها ۲۶
شکل (۲-۱۷) : برگشت‌فنری و رابطه آن با افزایش فاصله بین ایستگاه ۲۶
شکل (۳-۱) : (الف) محصول کانالی‌شکل نامتقارن، (ب) کمیت‌های مهم در مقطع کانالی‌شکل ۲۸
شکل (۳-۲) : تغییر ارتفاع مساوی برای حالتی خاص شامل پنج ایستگاه شکل‌دهی ۳۳

شکل (۳-۳) : ارتفاع تغییرشکل و تغییر زاویه در هر ایستگاه برای حالتی خاص شامل پنج ایستگاه شکل‌دهی ۳۴
شکل (۳-۴) : روش تغییر زاویه‌های شکل‌دهی متناسب برای حالتی خاص شامل چهار ایستگاه شکل‌دهی ۳۴
شکل (۳-۵) : نمایی از غلتک‌های شکل‌دهی:(الف) غلتک پایینی، (ب)غلتک بالایی، (ج)سوارشده غلتک‌های بالایی و پایینی ۳۵
شکل (۳-۶) : غلتک‌های بالا و پایین به همراه جزئیات آنها ۳۶
شکل (۳-۷) : مدلی از غلتک‌ها و ورق در یک ایستگاه، نمای ایزومتریک..... ۳۶
شکل (۳-۸) : نمایی از غلتک‌های صاف قبل از ایستگاه‌های شکل‌دهی..... ۳۷
شکل (۳-۹) : عیب شمشیری شدن..... ۳۸
شکل (۳-۱۰) : نمایی از خط تولید ایجاد شده در نرم‌افزار مارک‌منتات ۳۹
شکل (۳-۱۱) : نمایی از ورق شبکه‌بندی‌شده ۴۰
شکل (۳-۱۲) : منحنی تنش حقیقی-کرنش پلاستیک حقیقی ۴۱
شکل (۳-۱۳) : هندسه غلتک ها در آزمایش باتاچاریا و اسمیت(ابعاد بر حسب mm) ۴۴
شکل(۳-۱۴) : موقعیت کرنش سنج ها و هندسه مقطع در آزمایش باتاچاریا و اسمیت ۴۴
شکل (۳-۱۵) : آرایش اولیه مدل مورد استفاده برای اعتبار سنجی نتایج تحلیل ۴۵
شکل (۴-۱) : نمایی از دستگاه مورد استفاده برای آزمایش عملی..... ۴۸
شکل (۴-۲) : نقشه‌های ساخت غلتک‌های بالایی و پایینی: (الف) غلتک بالایی، (ب) غلتک پایینی ۵۰
شکل (۴-۳) : دستگاه به همراه غلتک‌های جدید، (ب) وضعیت غلتک‌ها نسبت به هم..... ۵۲
شکل (۴-۴) : ابعاد نمونه ها برای بررسی پهنای بال..... ۵۳
شکل (۴-۵) :منحنی های تنش مهندسی - جابه‌جایی در جهت: (الف)عرضی، (ب)طولی ۵۴
شکل (۴-۶) : منحنی‌های تنش حقیقی – کرنش حقیقی در جهت: (الف)عرضی، (ب)طولی..... ۵۵
شکل (۴-۷) راه‌حل برای کنترل ورق در ایستگاه شکل‌دهی ۵۶
شکل (۴-۸) : نمونه اولیه در ورود به ایستگاه شکل‌دهی، (ب) نمونه در خروج از ایستگاه شکل‌دهی، (ج) نمونه شکل‌یافته در برگشت..... ۵۷
شکل (۴-۹) : قطعات تولید شده ۵۸
شکل (۴-۱۰) : اندازه‌گیری سرعت خطی غلتک‌ها..... ۵۹
شکل (۴-۱۱) : آماده‌سازی نمونه‌ها جهت آزمایشCMM..... ۶۰
شکل (۴-۱۲) : آماده‌سازی نمونه‌های دارای جهت آزمایش CMM..... ۶۱

شکل (۵-۱) : فلوچارت مراحل انجام شبیه سازی ها ۶۴
شکل (۵-۲) : نمایی از کرنش‌های طولی در ورق ۶۵
شکل (۵-۳) : نمایی از کرنش‌های طولی در ورق ۶۵
شکل (۵-۴) : نمایی از کرنش‌های طولی در ورق ۶۶
شکل (۵-۵) : نمونه ایی از یک مدل در حال تحلیل ۶۷
شکل (۵-۶) : کرنش‌های طولی در لبه ورق: (الف) $^{\circ}$۲۰، (ب) $^{\circ}$۳۰، (ج) $^{\circ}$۴۰، (د) $^{\circ}$۵۰..... ۶۸
شکل (۵-۷) : مسیر انتخاب شده برای محاسبه پیچش ۷۱
شکل (۵-۸) : مختصات گره‌های روی مسیر ۷۲
شکل (۵-۹) : اختلاف کرنش‌های طولی بیشینه لبه ها..... ۷۳
شکل (۵-۱۰) : کرنش‌های طولی بیشینه در خطوط نزدیک به بهینه. ۷۳
شکل (۵-۱۱) : اختلاف کرنش‌های طولی باقیمانده برای زاویه های مختلف..... ۷۵
شکل (۵-۱۲) : کرنش‌های طولی باقیمانده در خطوط نزدیک به بهینه. ۷۵
شکل (۵-۱۳) : کرنش طولی ۷۶
شکل (۵-۱۴) : تغییرات کرنش طولی لبه برای فاصله ایستگاه های مختلف ۷۹
شکل (۵-۱۵) : اختلاف کرنش برای فاصله بین دو ایستگاههای شکل دهی ۸۰
شکل (۵-۱۶) : تغییرات کرنش طولی لبه برای مقادیر مختلف پهنای بال ۸۰
شکل (۵-۱۷) : اختلاف کرنش دو لبه برای ضخامت های مختلف ۸۱
شکل (۵-۱۸) : تغییرات کرنش طولی لبه برای مقادیر مختلف پهنای کف مقطع..... ۸۲
شکل (۵-۱۹) : اختلاف کرنش دو لبه برای پهنای کف مختلف..... ۸۳
شکل (۵-۲۰) : تغییرات کرنش طولی لبه برای مقادیر مختلف ضخامت ورق..... ۸۳
شکل (۵-۲۱) : اختلاف کرنش دو لبه برای ضخامت های مختلف ۸۴
شکل (۵-۲۲) : فایل خروجی از آزمایش CMM برای یکی از نمونه‌ها..... ۸۵
شکل (۵-۲۳) : نقاط اولیه، خطوط حاصل از وصل کردن نقاط و خطوط نهایی در یک مسیر عرضی۸۶
شکل (۵-۲۴) : زاویه‌های به‌دست‌آمده از آزمایش CMM ۸۶
شکل (۵-۲۵) : زاویه θ_4 در مسیرهای سه‌گانه در نمونه‌های مختلف برای سه ضخامت ۸۸
شکل (۵-۲۶) : زاویه θ_1 در مسیرهای سه‌گانه در نمونه‌های مختلف برای سه ضخامت ۸۹
شکل (۵-۲۷) : شکل (الف) مربوط به زاویهθ_1 و شکل (ب) مر بوط به زاویه θ_4 مسیرهای سه‌گانه در نمونه‌های مختلف برای پهنای بال ۹۱
شکل (۵-۲۸) : تغییر شکل‌های ناخواسته در لبه جلویی ورق در شبیه‌سازی اجزای محدود ۹۲

شکل (۵-۲۹): تغییر شکل‌های ناخواسته در لبه جلویی ورق در یک نمونه عملی..... .....۹۲

نمادها

وزن ارتباطی نورون‌های i و j	w_{ij}
زاویه خم	θ
ضخامت ورق	t
شعاع خم در لایه میانی ورق	r
شعاع خم در لایه خارجی ورق	r_{out}
شعاع خم در لایه داخلی ورق	r_{in}
عرض ورق اولیه	w_{Sheet}
عرض لبه کانال	w_{Flange}
عرض کف کانال	w_{Web}
شعاع پایه در غلتک بالایی	R_{Top_Roll}
شعاع پایه در غلتک پایینی	R_{Bottom_Roll}
طول شکل‌دهی	F
ارتفاع مقطع	H
فاصله بین ایستگاه‌ها	L_{Inter_Stand}
ارتفاع شکل‌دهی در ایستگاه iام	H_i
زاویه شکل‌دهی در ایستگاه iام	$_i\theta$
تغییر زاویه ایجاد شده در ایستگاه iام	$_i\theta\Delta$
ارتفاع کلی معادل	Y_i
جابه‌جایی کل لبه در راستای افقی	X
جابه‌جایی افقی معادل لبه	X'
سرعت دورانی غلتک‌ها	ω
سرعت شکل‌دهی(خطی)	V
میانگین مربعات خطاها	MSE
نرماله‌شده میانگین مربعات خطاها به پراکندگی داده‌های آزمایشی	NMSE
میانگین مقدار مطلق خطاها	MAE
کوچکترین مقدار مطلق خطاها	Min Abs Error
بزرگترین مقدار مطلق خطاها	Max Abs Error
تنش حقیقی	σ
کرنش حقیقی	ε
تنش مهندسی	σ_{nom}
کرنش مهندسی	ε_{nom}
کرنش پلاستیک حقیقی	σ_p

فصل ۱

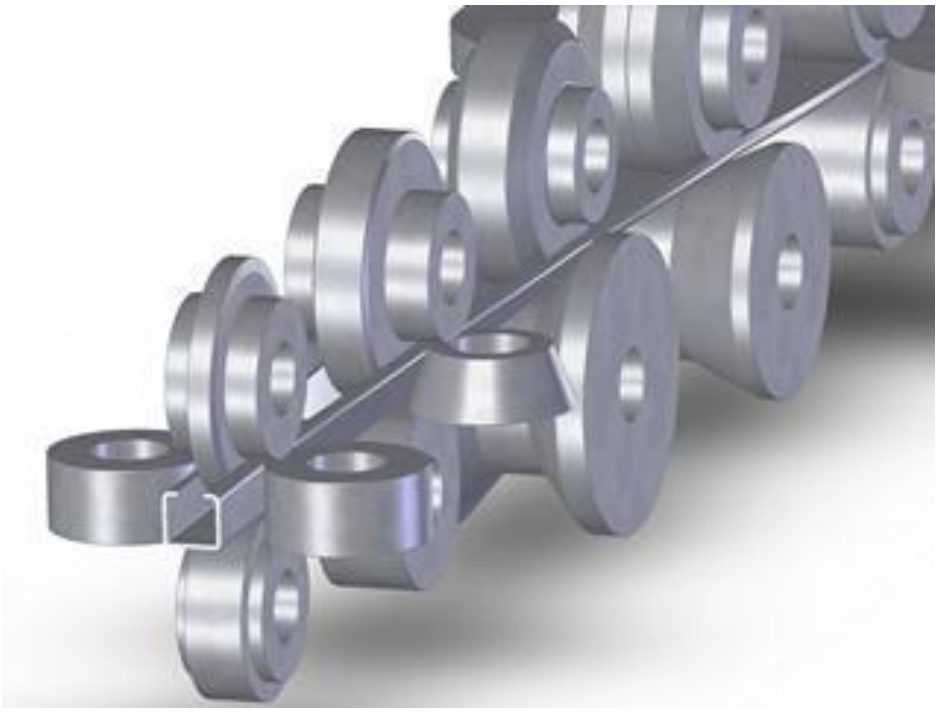
مقدمه

۱-۱- مقدمه

شکل‌دهی غلتکی سرد یک روش برای ایجاد خم‌های پیوسته و متوالی در نوار فلزی است. این تغییر شکل‌ها بوسیله عبور دادن نوار از بین یک مجموعه غلتک‌های دوّار می‌باشد. در این فرآیند محصول یک نوار فلزی با پروفیل به سطح مقطع یکنواخت است. یک تفاوت مهم این فرآیند با نورد ثابت ماندن ضخامت در آن می‌باشد[۱] .

در این فرآیند میزان شکل‌دهی شدید و ناگهانی نیست و غلتک‌ها به گونه‌ای طراحی می‌شوند که جریان پیوسته و ملایم فلزی از یک مرحله به مرحلهٔ بعدی را فراهم می‌کنند. به طور کلی هر چه شکل مقطع پیچیده‌تر باشد، برای انجام عمل شکل‌دهی به تعداد مراحل تغییر شکل بیشتری نیاز است. در هر مرحلهٔ شکل‌دهی حداقل دو غلتک وجود دارد که ایستگاه را تشکیل می‌دهند[۲].

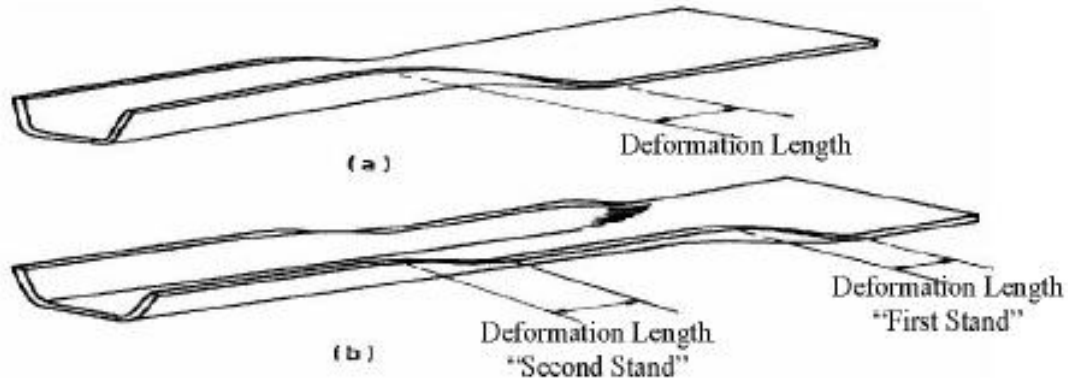
در شکل ۱-۱ نمایی ازتولید پروفیل با فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد آورده شده است.



شکل ۱-۱: نمایی ازتولید پروفیل با فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد[۲]

تعداد مراحل شکل‌دهی به پیچیدگی شکل پروفیل مورد نظر بستگی دارد. شکل دادن بین مراحل باید آرام و بدون تغییرات شدید باشد[۱] .

در شکل دهی غلتکی سرد برخلاف بسیاری از فرایندهای شکل دهی فلزات، شکل دهی به صورت شدید و ناگهانی نیست. زیرا تغییر شکل شدید می تواند سبب آسیب رساندن به غلتک ها و حتی بروز برخی عیوب هندسی در محصول نهایی شود. به همین دلیل کنترل آهنگ تغییر شکل در انجام موفقیت آمیز فرایند بسیار مهم است. «طول تغییر شکل» یکی از پارامترهای مهم این فرایند است که در تعیین فاصله ایستگاه ها و آهنگ تغییر شکل نقش اساسی دارد. طول تغییر شکل به فاصله بین نقطه شروع تغییر شکل، پیش از ایستگاه، تا ایستگاه گفته می شود (شکل۱-۲).



شکل ۱-۲: نمایش شماتیک طول تغییر شکل در شکل دهی کانال متقارن[۳]

وقتی که فاصله افقی بین ایستگاه ها در مقایسه با طول تغییر شکل خیلی زیاد باشد، برگشت فنری اتفاق می افتد. از طرف دیگر، هنگامی که فاصله بین ایستگاهها خیلی کم باشد، کمانش اتفاق خواهد افتاد. باتاچاریا برای نخستین بار ضمن معرفی طول تغییر شکل، رابطه بسته ای برای محاسبه این طول، در شکل دهی کانال متقارن به دست آورد[۳].