



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی

پیش‌بینی کراون اولیه غلتک‌ها جهت ایجاد پروفیل دلخواه ورق در

فرآیند نورد گرم

استاد راهنما:

دکتر مهرداد پورسینا

استاد مشاور:

دکتر حمید خادم حسینی بهشتی

پژوهشگر:

هادی ثمره صلواتی پور

شهریور ماه ۱۳۸۹



دانشگاه شاهرود

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی مکانیک

پایان نامه آقای هادی ثمره صلواتی پور جهت اخذ درجه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی با عنوان: پیش‌بینی کراون اولیه غلتک‌ها جهت ایجاد پروفیل دلخواه ورق در فرآیند نورد گرم در تاریخ ۸۹/۶/۳۱ با حضور هیأت داوران زیر بررسی و با نمره ۲۰ مورد تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه دکتر مهرداد پورسینا با مرتبه‌ی علمی استادیار امضاء

۲- استاد مشاور پایان‌نامه دکتر حمید خادم حسینی بهشتی با مرتبه‌ی علمی استادیار امضاء

۳- استاد داور پایان‌نامه دکتر حسین گلستانیان با مرتبه‌ی علمی استادیار امضاء

۴- استاد داور پایان‌نامه دکتر مهدی سلمانی تهرانی با مرتبه‌ی علمی استادیار امضاء

دکتر بهزاد قاسمی

معاون پژوهشی و تحصیلات تکمیلی

دانشکده‌ی فنی و مهندسی

کلیه‌ی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات  
و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه  
متعلق به دانشگاه شهرکرد است.

## تشکر و قدردانی

خدای را سپاس که به من توفیق اعطا نمود که پژوهش حاضر را به انجام برسانم. در راستای انجام این پژوهش همواره مورد لطف و عنایات عزیزانی بوده‌ام که بر خود لازم می‌دانم مراتب قدردانی خود را نسبت به آن‌ها ابراز نمایم.

خالصانه‌ترین مراتب تقدیر و تشکر از:

- اساتید راهنما و مشاور، جناب آقای دکتر مهرداد پورسینا و جناب آقای دکتر حمید خادم حسینی بهشتی که همواره در طی این پژوهش دلسوزانه دانش و تجربیات خویش را جهت انجام رسیدن این پژوهش در اختیار اینجانب قرار دادند.
  - اساتید گرانقدر داور، جناب آقای دکتر حسین گلستانیان و جناب آقای دکتر مهدی سلمانی تهرانی که با دقت فراوان این پژوهش را مطالعه و داوری نموده‌اند.
  - اساتید محترم گروه مهندسی مکانیک دانشگاه شهرکرد و دانشگاه اصفهان که همواره از دریای علم و معرفتشان بهره برده‌ام.
  - کارشناسان محترم واحد تحقیق و توسعه و واحد نورد گرم مجتمع فولاد مبارکه اصفهان آقایان مهندس شهرام عباسی و مهندس مهدی علی اکبریان که نهایت همکاری را با اینجانب داشته‌اند.
  - کارشناسان محترم گروه مهندسی مکانیک دانشگاه اصفهان که همواره موجبات تسهیل کارها را فراهم نمودند.
  - تمامی دوستان عزیزم که صمیمانه بنده را در انجام پژوهش حاضر یاری رسانده‌اند.
- از ایزد منان توفیق روز افزون برای تمامی این عزیزان و سروران آرزو دارم.

هادی ثمره صلواتی پور- شهریور ۱۳۸۹

تقدیم به اولین مسلمان و فرشتگان زندگیم

مادر عزیز و فداکارم:

که نمی از وجودش، ایثار و گذشت کامل است

و نمی دیگر عشق و محبت

پدر عزیز و بزرگوارم:

که دل دریائش آموزش کار چگونه زیستنم بود

بردار و خواهر مهربانم:

که سلامت و موفقیتشان آرزوی همیشگی من است

## چکیده

صنعت نورد، یکی از متداول‌ترین و پر رونق‌ترین روش‌های تولید فرآورده‌های فلزی، به‌ویژه فولادهاست. به‌گونه‌ای که بیش از هشتاد درصد از فرآورده‌های فلزی در سطح جهان به این روش تولید می‌شود. نرخ و راندمان بالای تولید محصولات نورد، همچنین دقت زیاد محصولات آن باعث شده است که این صنعت از جایگاه و اهمیت خاصی در بین دیگر فرآیندهای شکل-دهی برخوردار شود. در میان سایر روش‌های فرآیند نورد، در حال حاضر واحد نورد گرم با مشکلات فراوانی در ارتباط با پیش‌بینی دقیق کراون اولیه غلتک‌های کاری جهت رسیدن به پروفیل مورد نظر ورق روبرو است. پیش‌بینی دقیق پروفیل محصول با توجه به کراون اولیه غلتک‌های کاری و همچنین لحاظ کردن اثرات انتقال حرارت، سایش و نیروهای نورد روی این غلتک‌ها امکان‌پذیر است. انجام این امر مهم در بالا بردن کیفیت محصول و ارتقای میزان تولید و کاهش ضایعات موثر خواهد بود. کاهش تعداد و زمان توقف خط تولید خود به تنهایی مشکلات بسیاری را از کارشناسان نورد گرم کاهش خواهد داد. در پروژه حاضر با در نظر گرفتن کلیه پارامترهای تاثیر گذار روی پروفیل محصول نهایی، امکان طراحی کراون اولیه غلتک‌های کاری فراهم گردیده و به دنبال آن این امکان را فراهم می‌سازد تا کارشناسان خط نورد گرم پیشاپیش از وضعیت کیفیت ابعادی محصول مطلع شوند. این امر مهم به کارشناسان خط نورد گرم این امکان را می‌دهد تا اصلاحات لازم روی غلتک را اجرا نموده و همچنین در صورت امکان منشاء این معایب را شناسایی و برطرف کنند. از جمله این موارد می‌توان به سایش غلتک، تغییر شکل ناشی از بارگذاری و همچنین تغییر ابعادی غلتک در اثر انتقال حرارت نام برد. کاهش ضایعات و کاهش تعداد سعی و خطا تا رسیدن به کیفیت ابعادی مطلوب مشتری از مهمترین محسنات پیش‌بینی درست کراون اولیه غلتک‌های کاری خط نورد گرم توسط محاسبات فنی استفاده شده در این پایان‌نامه خواهد بود.

## کلمات کلیدی

نورد گرم، کراون اولیه‌ی غلتک، کراون حرارتی غلتک، کراون سایشی غلتک، کراون خمشی غلتک، پروفیل ورق

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۹	<b>فصل اول - مقدمه و پیشینه‌ی تحقیق</b>
۹	۱-۱ مقدمه
۱۰	۲-۱ مروری بر پژوهش‌های انجام شده
۱۶	<b>فصل دوم - آشنایی با فرآیند نورد</b>
۱۶	۱-۲ مقدمه
۱۶	۲-۲ انواع نورد
۱۷	۳-۲ بخش‌های مختلف فرآیند نورد
۱۷	۱-۳-۲ ریخته‌گری پیوسته
۱۷	۲-۳-۲ کوره‌ی پیش‌گرم
۱۷	۳-۳-۲ نورد گرم
۱۸	۴-۳-۲ اسید شویی
۱۸	۵-۳-۲ نورد سرد
۱۸	۶-۳-۲ عملیات حرارتی
۱۸	۷-۳-۲ تمپر میل
۱۸	۴-۲ اجزای دستگاه نورد
۲۰	۵-۲ نورد پیوسته
۲۲	۶-۲ پارامترهای اساسی فرآیند نورد
۲۳	۷-۲ روش‌های مدل‌کردن فرآیند نورد
۲۴	۸-۲ خط نورد گرم مجتمع فولاد مبارکه
۲۶	۱-۸-۲ نورد نهایی
۲۷	۲-۸-۲ برنامه‌های نورد گرم
۲۹	<b>فصل سوم - کراون و پارامترهای مؤثر بر آن</b>
۲۹	۱-۳ مقدمه
۳۰	۲-۳ کراون
۳۱	۳-۳ پارامترهای مؤثر بر کراون
۳۲	۴-۳ اثرات پروفیل و سطح اولیه غلتک‌های کاری
۳۲	۵-۳ اثرات حرارتی و تاثیرات آن در پروفیل
۳۳	۱-۵-۳ شرایط مرزی و اولیه
۳۳	۱-۱-۵-۳ شرایط مرزی در ناحیه تماس غلتک

۳۴	شرایط مرزی در خط مرکز غلتک ۲-۱-۵-۳
۳۵	شرایط مرزی برای انتقال گرمایی همرفتی به وسیله اسپری‌های نازل ۳-۱-۵-۳
۳۶	شرایط مرزی برای انتقال حرارت همرفتی غلتک‌های کاری با آب ۴-۱-۵-۳
۳۷	شرایط مرزی برای انتقال حرارت تشعشی ۵-۱-۵-۳
۳۸	شرایط مرزی برای انتقال حرارت از اطراف بیرینگ‌ها ۶-۱-۵-۳
۳۸	شرایط مرزی بین غلتک‌های کاری و غلتک‌های پشتیبان ۷-۱-۵-۳
۳۹	شرط اولیه ۸-۱-۵-۳
۳۹	۶-۳ اثرات ساییش و تاثیرات آن در پروفیل
۴۰	۱-۶-۳ پدیده ساییش
۴۱	۲-۶-۳ ساییش در فرآیند نورد
۴۲	۳-۶-۳ عوامل موثر بر ساییش غلتک‌های کاری در نورد گرم
۴۲	۱-۳-۶-۳ غلتک
۴۴	۲-۳-۶-۳ ماده نورد شده
۴۵	۳-۳-۶-۳ برنامه ریزی نورد
۴۵	۴-۳-۶-۳ پارامترهای فرایندی نورد
۴۶	۴-۶-۳ روش‌های مدل‌سازی فرآیند ساییش
۴۶	۱-۴-۶-۳ مدل‌های ساییشی موضعی
۴۷	۲-۴-۶-۳ مدل غیر خطی
۴۸	۳-۴-۶-۳ روش‌های عددی
۴۹	۴-۴-۶-۳ روش‌های عددی آماری
۴۹	۵-۶-۳ مدل‌سازی فرآیند ساییش غلتک‌های کاری در نورد گرم
۵۰	۶-۶-۳ مدل ساییش مجتمع فولاد مبارکه
۵۱	۷-۶-۳ محاسبه ضرایب بهینه رابطه ساییش غلتک
۵۲	۸-۶-۳ نظریه تقریب
۵۳	۹-۶-۳ روش نیوتن در حل دستگاه معادلات غیر خطی
۵۴	۱۰-۶-۳ روش حذفی گاوس در حل دستگاه معادلات خطی
۵۵	۷-۳ اثرات تغییر شکل الاستیک غلتک و تاثیرات آن در پروفیل
۵۶	۱-۷-۳ نیروی نورد
۵۸	۲-۷-۳ معادله هیچکاک برای محاسبه شعاع غلتک تخت شده
۵۸	۳-۷-۳ پیش‌بینی تغییر شکل الاستیک غلتک
۵۹	۸-۳ مقادیر تجربی نیروی نورد و کراون
۵۹	۱-۸-۳ مقدرای تجربی نیروی نورد
۶۰	۲-۸-۳ مقدار تجربی کراون حرارتی
۶۱	۳-۸-۳ مقدار تجربی کراون ساییشی
۶۶	۹-۳ حل تحلیلی یا عددی

۶۷ فصل چهارم - آشنایی با تحلیل رگرسیون خطی

۶۷	۱-۴ مقدمه
۶۷	۲-۴ تابع جبری رگرسیون
۶۸	۳-۴ فرضیات اولیه مربوط به جمله خطا
۶۸	۴-۴ بررسی معنی دار بودن یک متغیر
۶۸	۵-۴ بررسی کیفیت مدل برازش شده
۶۹	۶-۴ روش انتخاب متغیر به شیوه حذف پسرو
۶۹	۷-۴ نمودار پراکندگی
۷۰	۸-۴ نرم افزار تحلیل آماری (رگرسیون)

## ۷۱ فصل پنجم - شبیه سازی پارامترهای موثر بر کران به کمک آنالیز رگرسیون و روش اجزا محدود

۷۱	۱-۵ مقدمه
۷۱	۲-۵ پارامترهای یک برنامه نورد
۷۲	۳-۵ پیش بینی نیروی نورد
۷۴	۴-۵ پیش بینی کران حرارتی و سایشی
۷۴	۱-۴-۵ آنالیز رگرسیون برای پیش بینی کران حرارتی
۷۴	۱-۴-۵ آنالیز پیش بینی کران حرارتی برای ضخامت نهایی ورق کوچکتر از چهار میلیمتر
۷۷	۲-۴-۵ آنالیز پیش بینی کران حرارتی برای ضخامت نهایی ورق بین چهار و شش میلیمتر
۷۹	۳-۴-۵ آنالیز پیش بینی کران حرارتی برای ضخامت نهایی ورق بزرگتر از شش میلیمتر
۷۹	۲-۴-۵ آنالیز رگرسیون برای پیش بینی کران سایشی
۷۹	۱-۲-۴-۵ آنالیز پیش بینی کران سایشی برای ضخامت نهایی ورق کوچکتر از چهار میلیمتر
۸۱	۲-۲-۴-۵ آنالیز پیش بینی کران سایشی برای ضخامت نهایی ورق بین چهار و شش میلیمتر
۸۳	۳-۲-۴-۵ آنالیز پیش بینی کران سایشی برای ضخامت نهایی ورق بزرگتر از شش میلیمتر
۸۳	۵-۵ تحلیل رگرسیون برای سایر قفسه‌ها
۸۳	۶-۵ پیش بینی تغییر شکل الاستیک غلتک‌ها
۸۴	۱-۶-۵ حل تحلیلی تغییر شکل الاستیک غلتک‌ها
۸۵	۲-۶-۵ شبیه سازی اجزای محدود تغییر شکل الاستیک غلتک‌ها

## ۸۹ فصل ششم - الگوریتم پیش بینی کران اولیه

۸۹	۱-۶ مقدمه
۸۹	۲-۶ اطلاعات ورودی برنامه نورد
۹۰	۱-۲-۶ مدل درصد کاهش مقطع قفسه
۹۰	۲-۲-۶ پیش بینی ضخامت ورودی به قفسه اول
۹۱	۳-۲-۶ پیش بینی دمای هر قفسه
۹۱	۳-۶ مدل پیش بینی نیروی نورد
۹۱	۴-۶ مدل کران سایشی و حرارتی قفسه
۹۱	۱-۴-۶ مدل کران سایشی و حرارتی برای ضخامت نهایی ورق کمتر از شش میلیمتر
۹۱	۱-۱-۴-۶ مدل کران سایشی

۹۲	۲-۱-۴-۶ مدل کراون حرارتی
۹۲	۲-۴-۶ مدل کراون سایشی و حرارتی برای ضخامت نهایی ورق بین چهار و شش میلیمتر
۹۲	۱-۲-۴-۶ مدل کراون سایشی
۹۲	۲-۲-۴-۶ مدل کراون حرارتی
۹۳	۳-۴-۶ مدل کراون سایشی و حرارتی برای ضخامت نهایی ورق بزرگتر از شش میلیمتر
۹۳	۱-۳-۴-۶ مدل کراون سایشی
۹۳	۲-۳-۴-۶ مدل کراون حرارتی
۹۳	۵-۶ مدل کراون تغییر شکل الاستیک و تخت شدگی سطح تماس غلتک
۹۴	۶-۶ مدل کراون کل
۹۵	۷-۶ الگوریتم حل

## ۹۶ فصل هفتم - نتیجه‌گیری و پیشنهادات

### ۹۸ پیوست - الف - داده‌های استخراج شده از مجتمع فولاد مبارکه

#### ۱۰۳ پیوست - ب - شبیه‌سازی فرآیند نورد گرم پیوسته توسط نرم‌افزار ABAQUS

۱۰۳	ب-۱ مقدمه
۱۰۳	ب-۲ مزایای نرم‌افزار ABAQUS
۱۰۴	ب-۳ نحوه عملکرد نرم‌افزار ABAQUS
۱۰۵	ب-۴ روش اجزاء محدود دینامیک صریح در نرم‌افزار ABAQUS
۱۰۶	ب-۵ روند شبیه‌سازی فرآیند نورد گرم هفت قفسه‌ای
۱۰۶	ب-۱-۵ خصوصیات هندسی مدل
۱۰۹	ب-۲-۵ خواص ماده در نظر گرفته شده
۱۱۳	ب-۳-۵ مونتاژ فرآیند
۱۱۴	ب-۴-۵ مش بندی
۱۱۶	ب-۵-۵ تعیین مراحل حل
۱۱۶	ب-۶-۵ تعریف برخوردها
۱۱۶	ب-۷-۵ تعرف بارگذاری، شرایط مرزی و شرایط اولیه
۱۱۷	ب-۶-۵ اقدامات تکمیلی جهت بهینه نمودن شبیه‌سازی
۱۱۷	ب-۶-۱ استفاده از روش ALE برای جلوگیری از تخریب المان‌ها
۱۱۸	ب-۶-۲ استفاده از مقیاس جرم

#### ۱۲۰ پیوست - ج - آشنایی با نرم‌افزار پیش‌بینی کراون اولیه غلتک‌ها ICPS

۱۲۰	ج-۱ مقدمه
۱۲۱	ج-۲ راهنمای استفاده از برنامه پیش‌بینی کراون اولیه غلتک‌ها
۱۲۱	ج-۱-۲ ایجاد برنامه تولید
۱۲۲	ج-۲-۲ افزودن برنامه تولید
۱۲۲	ج-۳-۲ اصلاح برنامه تولید

۱۲۳	ج-۲-۴ حذف برنامه تولید
۱۲۳	ج-۲-۵ خروج از برنامه تولید
۱۲۳	ج-۲-۶ انتخاب برنامه
۱۲۴	ج-۲-۷ ثبت خطوط برنامه تولید
۱۲۵	ج-۲-۸ افزودن خط جدید
۱۲۵	ج-۲-۹ اصلاح خطوط برنامه
۱۲۵	ج-۲-۱۰ حذف خطوط انتهای برنامه
۱۲۵	ج-۲-۱۱ خروج از قسمت ثبت برنامه
۱۲۶	ج-۲-۱۲ اعمال پروفیل خاص
۱۲۶	ج-۲-۱۳ ثبت اطلاعات پروفیل مورد نظر
۱۲۷	ج-۲-۱۴ محاسبه حالت‌های ممکن
۱۲۷	ج-۲-۱۵ محاسبه پروفیل سایر خطوط
۱۲۸	ج-۲-۱۵-۱ خطوط مورد نظر در محدوده مجاز
۱۲۸	ج-۲-۱۵-۲ پروفیل کلیه خطوط
۱۲۹	ج-۲-۱۵-۳ کلیه اطلاعات برنامه
۱۲۹	ج-۲-۱۶ صدور به اکسل
۱۲۹	ج-۲-۱۷ توابع محاسباتی
۱۳۱	ج-۲-۱۸ نمایش منحنی نتایج
۱۳۱	ج-۲-۱۹ اطلاعات غلتک‌ها
۱۳۲	ج-۲-۲۰ مدیریت کاربران
۱۳۳	ج-۳ اجرای برنامه پیش‌بینی کراون اولیه غلتک‌ها

## منابع و مأخذ

۱۴۰	چکیده انگلیسی
-----	---------------

## فهرست اشکال

عنوان	صفحه
شکل (۱-۱) - فرضیات مربوط به نظریه تغییر شکل همگن و ناهمگن	۱۱
شکل (۱-۲) - نمایش اجزای اصلی دستگاه نورد	۱۹
شکل (۲-۲) - نحوه‌ی استقرار غلتک‌ها در دستگاه نورد	۱۹
شکل (۳-۲) - نمایش حالت bending out در بالا و حالت bending in در پایین	۲۱
شکل (۴-۲) - چگونگی خنک‌سازی ورق در حین فرآیند نورد	۲۱
شکل (۵-۲) - تأثیر کشش از عقب و جلو بر روی میزان فشار عمودی غلتک	۲۲
شکل (۸-۲) - نمائی از خط نورد گرم مجتمع فولاد مبارکه	۲۵
شکل (۹-۲) - نمونه‌ای از برنامه تابوتی شکل	۲۷
شکل (۱-۳) - نمایش کمیت‌های مورد استفاده در تعریف کراون مرکزی	۳۰
شکل (۲-۳) - نمونه‌هایی از مقاطع ورق	۳۱
شکل (۳-۳) - نمایش شرایط مرزی در بررسی اثرات گرمایی غلتک کاری	۳۳
شکل (۴-۳) - نمایش موقعیت عایق حرارتی	۳۵
شکل (۵-۳) - نمایش زاویه چرخش نازل و الگو چرخش آنها	۳۶
شکل (۶-۳) - نمایش انتقال حرارت تشعشعی	۳۷
شکل (۷-۳) - نمایش انتهای غلتک	۳۸
شکل (۸-۳) - نمایش مختصات $z_1$ و $z_2$ و $z_3$	۳۸
شکل (۹-۳) - مکانیزم‌های مختلف سایش	۴۰
شکل (۱۰-۳) - نمایش پروفیل ساییده شده در دهانه غلتک‌ها	۴۱
شکل (۱۱-۳) - عوامل مهم متالورژیکی در ساختار غلتک	۴۳
شکل (۱۲-۳) - جدول جنس غلتک‌های نورد و ساختار لایه‌های آنان	۴۴
شکل (۱۳-۳) - عوامل مؤثر بر سایش غلتک‌های نورد گرم	۴۶
شکل (۱۴-۳) - شماتیک سایش غلتک در تماس با ورق داغ	۴۷
شکل (۱۵-۳) - نمایش ورق در تماس با غلتک محور X از مرکز غلتک	۴۸
شکل (۱۶-۳) - فلوچارت مدل سایش	۵۰
شکل (۱۷-۳) - شماتیک یک قفسه نورد	۵۶
شکل (۱۸-۳) - نیروی نورد قفسه ششم در خطوط مختلف برنامه ۰۱۶	۵۹
شکل (۱۹-۳) - مقایسه نیروی نورد واقعی و محاسبه شده توسط روش سیمز قفسه اول برای تعدادی از خطوط برنامه ۰۱۶	۶۰
شکل (۲۰-۳) - کراون حرارتی حاصل از حل تفاضل محدود	۶۱
شکل (۲۱-۳) - کراون حرارتی قفسه ششم در طول برنامه ۰۱۶ نورد گرم	۶۱
شکل (۲۲-۳) - مقایسه کراون سایشی حاصل از حل معادله اویکه و مقدار واقعی آن در قفسه ششم	۶۳

- ۶۳ شکل (۳-۲۳) - ماشین هرکولس WS450 برای اندازه‌گیری کراون سایشی غلتک
- ۶۴ شکل (۳-۲۴) - کراون غلتک قفسه ششم قبل از انجام برنامه تولید
- ۶۵ شکل (۳-۲۵) - کراون غلتک قفسه ششم بعد از انجام برنامه تولید
- ۶۵ شکل (۳-۲۶) - کراون سایشی قفسه ششم در طول برنامه ۰۱۶ نورده گرم
- ۷۰ شکل (۴-۱) - نمودار پراکندگی
- ۷۳ شکل (۵-۱) - دیاگرام پراکندگی داده‌ها در تحلیل رگرسیون نیروی ورود قفسه پنجم
- ۷۶ شکل (۵-۲) - دیاگرام پراکندگی داده‌ها در تحلیل رگرسیون کراون حرارتی قفسه پنجم (ضخامت نهایی کوچکتر از چهار)
- ۷۸ شکل (۵-۳) - دیاگرام پراکندگی داده‌ها در تحلیل رگرسیون کراون حرارتی قفسه اول (ضخامت نهایی بین چهار و شش)
- ۸۰ شکل (۵-۴) - دیاگرام پراکندگی داده‌ها در تحلیل رگرسیون کراون سایشی قفسه پنجم (ضخامت نهایی کوچکتر از چهار)
- ۸۲ شکل (۵-۵) - دیاگرام پراکندگی داده‌ها در تحلیل رگرسیون کراون سایشی قفسه پنجم (ضخامت نهایی بین چهار و شش)
- ۸۴ شکل (۵-۶) - تاثیر نیروی خمشی وارد بر چوک‌ها روی تغییر شکل الاستیک غلتک در قفسه اول
- ۸۵ شکل (۵-۷) - مقایسه تغییر شکل الاستیک غلتک در دو حالت وجود خمش و عدم خمش در هر قفسه
- ۸۶ شکل (۵-۸) - کانتور تنش ون‌مایز
- ۸۷ شکل (۵-۹) - کانتور تنش ترسکا
- ۸۸ شکل (۵-۱۰) - نیرو در جهت قائم تکیه‌گاه غلتک پشتیبان

## فهرست جداول

صفحه	عنوان
۲۶	جدول (۱-۲)- مشخصات قفسه‌های نورد نهایی
۲۶	جدول (۲-۲)- میزان تنظیمات نورد برای ورق با ضخامت ۳ میلیمتر
۶۲	جدول (۱-۳)- ضرایب بهینه معادله اویکه در قفسه ششم
۷۲	جدول (۱-۵)- دقت بدست آمده در تخمین مدل نیروی نورد قفسه پنجم
۷۲	جدول (۲-۵) ضرایب مدل نیروی نورد قفسه پنجم
۷۳	جدول (۳-۵)- آنالیز نرمالیتیه مدل
۷۵	جدول (۴-۵)- دقت بدست آمده در تخمین مدل کراون حرارتی قفسه پنجم (ضخامت نهایی کوچکتر از چهار)
۷۵	جدول (۵-۵)- ضرایب مدل کراون حرارتی قفسه پنجم (ضخامت نهایی کوچکتر از چهار)
۷۶	جدول (۶-۵)- آنالیز نرمالیتیه مدل
۷۷	جدول (۷-۵)- دقت بدست آمده در تخمین مدل کراون حرارتی قفسه پنجم (ضخامت نهایی بین چهار و شش)
۷۷	جدول (۸-۵)- ضرایب مدل کراون حرارتی قفسه پنجم (ضخامت نهایی بین چهار و شش)
۷۸	جدول (۹-۵)- آنالیز نرمالیتیه مدل
۷۹	جدول (۱۰-۵)- دقت بدست آمده در تخمین مدل کراون سایشی قفسه پنجم (ضخامت نهایی کوچکتر از چهار)
۸۰	جدول (۱۱-۵)- ضرایب مدل کراون سایشی قفسه پنجم (ضخامت نهایی کوچکتر از چهار)
۸۱	جدول (۱۲-۵)- آنالیز نرمالیتیه مدل
۸۱	جدول (۱۳-۵)- دقت بدست آمده در تخمین مدل کراون سایشی قفسه پنجم (ضخامت نهایی بین چهار و شش)
۸۲	جدول (۱۴-۵)- ضرایب مدل کراون سایشی قفسه پنجم (ضخامت نهایی بین چهار و شش)
۸۳	جدول (۱۵-۵)- آنالیز نرمالیتیه مدل
۸۸	جدول (۱۶-۵)- مقایسه نیروی نورد حاصل از شبیه‌سازی و مقدار واقعی آن
۸۹	جدول (۱-۶)- اطلاعات ارسالی هر خط برنامه از طریق واحد MIS
۹۰	جدول (۲-۶)- اطلاعات ارسالی یک برنامه از طریق واحد MIS (برای تولید ورق با پروفیل دلخواه)
۹۰	جدول (۳-۶)- پیش بینی ضخامت ورودی به قفسه اول
۹۴	جدول (۴-۶)- اطلاعات غلتک در قفسه‌های مختلف (بر حسب mm)
۹۵	جدول (۵-۶)- کراون اولیه رایج هر قفسه

## فصل اول

### مقدمه و پیشینه تحقیق

#### ۱-۱ مقدمه

صنعت نورد، یکی از متداول‌ترین و پر رونق‌ترین روش‌های تولید فرآورده‌های فلزی، به‌ویژه فولادها است و بیش از هشتاد درصد از فرآورده‌های فلزی در سطح جهان به این روش تولید می‌شود. نرخ و راندمان بالای تولید محصولات نورد، همچنین دقت زیاد محصولات آن باعث شده است که این صنعت از جایگاه و اهمیت خاصی در بین دیگر فرآیندهای شکل‌دهی برخوردار شود. در میان سایر روش‌های فرآیند نورد، در حال حاضر واحد نورد گرم با مشکلات فراوانی در ارتباط با پیش‌بینی دقیق کراون اولیه غلتک‌های کاری جهت رسیدن به پروفیل مورد نظر ورق روبرو است. پیش‌بینی دقیق پروفیل محصول با توجه به کراون اولیه غلتک‌های کاری و همچنین لحاظ کردن اثرات انتقال حرارت، سایش و نیروهای نورد روی این غلتک‌ها امکان پذیر است. انجام این امر مهم در بالا بردن کیفیت محصول و ارتقاء میزان تولید و کاهش ضایعات موثر خواهد بود. کاهش تعداد و زمان توقف خط تولید خود به تنهایی مشکلات بسیاری را از کارشناسان نورد گرم کاهش خواهد داد.

در تحقیق حاضر با در نظر گرفتن کلیه پارامترهای تاثیر گذار روی پروفیل محصول نهایی، امکان طراحی کراون اولیه غلتک‌های کاری فراهم گردیده و به دنبال آن این امکان را فراهم می‌سازد تا کارشناسان خط نورد گرم پیشاپیش از وضعیت کیفیت ابعادی محصول مطلع شوند. این امر مهم به کارشناسان خط نورد گرم این امکان را می‌دهد تا اصلاحات لازم روی غلتک را اجرا نموده و همچنین در صورت امکان منشاء این معایب را شناسایی و بر طرف کنند. از جمله این موارد می‌توان به سایش غلتک و تغییر شکل ناشی از بارگذاری و همچنین تغییر ابعادی غلتک در اثر انتقال حرارت نام برد. کاهش ضایعات و تعداد سعی و خطا تا رسیدن به کیفیت ابعادی مطلوب مشتری از مهمترین محسنات پیش‌بینی درست کراون اولیه غلتک‌های کاری خط نورد گرم توسط محاسبات فنی استفاده شده در این تحقیق خواهد بود.

در ادامه این فصل مروری بر پژوهش‌های انجام شده در زمینه فرآیند نورد صورت می‌گیرد.

در فصل دوم به شناسایی انواع نورد، بخش‌های فرآیند نورد، اجزای دستگاه نورد و پارامترهای اساسی آن، روش‌های مدل کردن فرآیند نورد و خط نورد گرم مجتمع فولاد مبارکه پرداخته خواهد شد.

در فصل سوم کرآون و پارامترهای موثر بر آن، به طور کامل بررسی می‌شود.

در فصل چهارم روش تحلیل رگرسیون برای استخراج روابط تخمین درصد کاهش مقطع هر قفسه، نیروی نورد و پارامترهای موثر بر کرآون توضیح داده شده است.

در فصل پنجم شبیه سازی پارامترهای موثر بر کرآون به کمک آنالیز رگرسیون و نرم افزار SPSS انجام می‌گیرد. همچنین در این فصل روش تحلیلی محاسبه نیروی نورد و پیش بینی تغییر شکل الاستیک غلتک‌ها توضیح داده شده است. در ادامه‌ی این فصل روش اجزا محدود شبیه سازی تغییر شکل الاستیک غلتک‌ها آورده شده است.

در فصل ششم الگوریتم پیش بینی کرآون اولیه غلتک‌ها جهت تولید ورق با پروفیل دلخواه توضیح داده شده است. در فصل هفتم نتایج حاصل از این پایان‌نامه ارائه و پیشنهاداتی در زمینه مطالعه بر روی فرآیند نورد گرم ارائه گردیده‌اند.

در پیوست الف قفسه اول خط نورد گرم هفت قفسه‌ای توسط نرم‌افزار ABAQUS به روش اجزاء محدود شبیه سازی گردیده است. صحت نتایج شبیه‌سازی توسط مقایسه با نتایج تجربی و تحلیلی تایید گردیده است و در نهایت تغییر شکل الاستیک غلتک به دست آمده است.

در پیوست ب نحوه نصب و اجرای نرم افزار پیش بینی کرآون اولیه غلتک‌ها که با همکاری کارشناسان واحد نورد گرم مجتمع فولاد مبارکه تهیه گردیده است، توضیح داده شده است.

## ۲-۱ مروری بر پژوهش‌های انجام گرفته در زمینه نورد

تحقیقات در حوزه‌ی نورد به دهه‌های ابتدایی قرن بیستم برمی‌گردد. به دلیل اهمیت و جایگاه مهم صنعت نورد در طی سال‌های گذشته، تحقیقات و پژوهش‌های متعددی در این زمینه انجام شده است. تعدادی از این تحقیقات و پژوهش‌های انجام شده مرتبط با موضوع این پایان نامه به شرح زیر می‌باشند:

در سال ۱۹۲۷ اکلوند<sup>۱</sup> بر اساس نظریه تغییرشکل همگن، فرآیند نورد را مدل کرد. وی در مدل سازی فرآیند نورد فرضیات زیر را به کار برد:

- صفحات مسطح عمود بر جهت نورد، پس از نورد، صاف باقی می‌مانند.
- توزیع تنش در راستای عمود بر جهت نورد، یکنواخت است.
- تنش در راستای عمود بر جهت نورد ثابت بوده و مستقل از زاویه‌ی تماس است.
- فرض ون کارمن برای اصطکاک در ناحیه تماس غلتکی به این صورت بود که وی اصطکاک در کل ناحیه‌ی تماس را از نوع اصطکاک خشک فرض کرد [۱].

وی در مورد اصطکاک فرض کرد که در سمت ورودی اصطکاک خشک و در سمت خروجی اصطکاک چسبنده می‌باشد.

در سال ۱۹۳۰ سیبل<sup>۲</sup> بر اساس نظریه تغییرشکل همگن، مدل خود را ارائه کرد و فرض کرد اصطکاک در کل ناحیه تماس، اصطکاک چسبنده می‌باشد.

<sup>1</sup> Ekelund

<sup>2</sup> Sieble

در سال ۱۹۳۱ نادای<sup>۱</sup> براساس نظریه تغییرشکل ناهمگن، فرآیند نورد را مدل کرد. وی در مدل خود مطابق شکل ۱-۱، از فرضیات زیر استفاده کرد:

- صفحات صاف و عمود بر جهت نورد، پس از نورد صاف باقی نمی‌مانند.

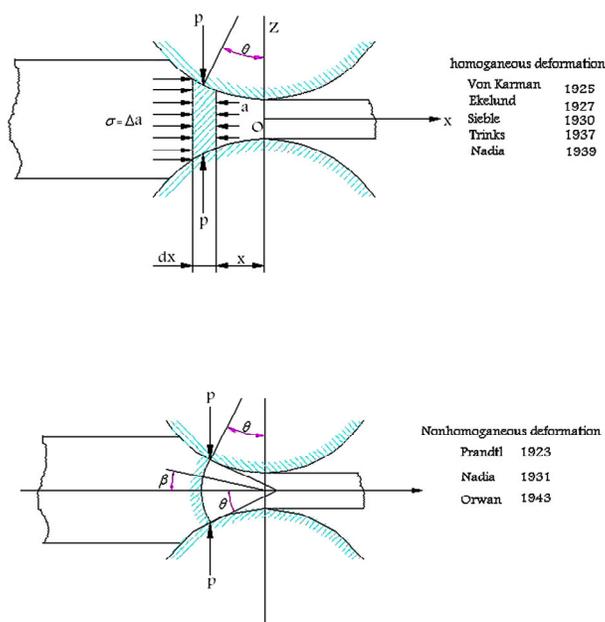
- توزیع تنش در صفحات قائم یکنواخت نیست.

- درکل ناحیه تماس، اصطکاک را ویسکوز در نظر گرفت.

نظریه تغییرشکل همگن بر خلاف نظریه تغییرشکل ناهمگن، فرآیند نورد را از سایر فرآیندها متمایز می‌داند. بدین شکل که عامل ایجاد اصطکاک بین ورق و غلتک را اختلاف سرعت بین این دو می‌داند.

در سال ۱۹۳۷ ترینکس<sup>۲</sup> و در سال ۱۹۳۹ تسلیکوف<sup>۳</sup> بر اساس نظریه تغییرشکل همگن مدل‌های خود را مطرح کردند.

در سال ۱۹۳۹ نادای بر اساس نظریه تغییر شکل همگن مدل دیگر خود را ارائه داد. وی در مدل خود، اصطکاک را در کل ناحیه‌ی تماس از نوع اصطکاک چسبنده در نظر گرفت.



شکل (۱-۱) - فرضیات مربوط به نظریه تغییر شکل همگن و ناهمگن [۲]

در سال ۱۹۴۳ اروان<sup>۴</sup> مدل خود را بر اساس نظریه تغییر شکل ناهمگن ارائه کرد. وی فرض کرد که اصطکاک در وسط ناحیه تماس غلتکی چسبنده و در نواحی ورودی و خروجی اصطکاک خشک برقرار است [۳].

در میان سایر مدل‌های ارائه شده برای نورد، مدل ارائه شده در سال ۱۹۵۲ توسط بلند<sup>۵</sup> و فورد<sup>۱</sup> به دلیل فرض غیرصلب بودن غلتک دارای اهمیت ویژه‌ای می‌باشد. آن‌ها در مدل خود فرض کردند که ناحیه‌ی تغییرشکل یافته

<sup>1</sup> Nadai

<sup>2</sup> Trinks

<sup>3</sup> Teslikov

<sup>4</sup> Orwan

<sup>5</sup> Bland

به سه زیر ناحیه‌ی الاستیک ورودی، ناحیه پلاستیک بین ورودی و خروجی و در انتها ناحیه الاستیک خروجی تقسیم می‌شود. البته این مدل بیشتر برای نورد گرم کاربرد دارد. در ضمن این دو محقق فرض کردند که پروفیل غلتک در ناحیه تماس با ورق، پس از تغییر هنوز دایروی باقی می‌ماند، اما شعاع انحنا نسبت به شعاع انحنای اولیه غلتک بزرگتر می‌شود. آن‌ها از رابطه هیچکاک<sup>۲</sup> برای محاسبه شعاع غلتک تغییر شکل یافته استفاده کردند.

در سال ۱۹۵۵ الکساندر<sup>۳</sup> مدلی بر اساس روش خطوط لغزش بیان کرد. عیب مدل وی این بود که غلتک‌ها را با وجه‌های تخت در نظر گرفت و از کار سختی و کشش صرف نظر کرد. ضمن این‌که وی فرض کرد اصطکاک در کل ناحیه تماس خشک است.

در سال ۱۹۶۲ گرین<sup>۴</sup> و والیس<sup>۵</sup> مدل خود را بر اساس روش خطوط لغزش ارائه کردند. در سال ۱۹۶۵ استون<sup>۶</sup> نشان داد تغییر شکل غلتک بر اثر نیروهای خمشی با استفاده از معادلات بر پایه نظریه تغییر شکل الاستیک، قابل محاسبه می‌باشد. وی نیز برای تعیین شعاع غلتک تغییر شکل یافته از رابطه‌ی هیچکاک استفاده نمود [۴].

در سال ۱۹۷۶ پیلسپن<sup>۷</sup> مدل خود را بر اساس روش خطوط لغزش ارائه کرد. ضمناً اصطکاک در ناحیه تماس را از نوع اصطکاک چسبنده فرض کرد.

در سال ۱۹۷۸ کانازاوا<sup>۸</sup> و مارسل<sup>۹</sup> مدل خود را بر اساس روش اجزاء محدود دو بعدی بنا نهادند. در واقع این اولین تحلیل مناسب اجزاء محدود از نورد بود. در سال ۱۹۸۴ موری<sup>۱۰</sup> و ازاکادا<sup>۱۱</sup> به کمک روش اجزاء محدود سه بعدی فرآیند نورد را تحلیل کردند.

لاهوتی با استفاده از مدل ریاضی برای دو حالت مختلف، قسمت الاستیک - پلاستیک و قسمت ترموپلاستیک توزیع دما را در غلتک و ورق با اعمال انتقال حرارت مصنوعی بر روی غلتک محاسبه کرد [۵].

تونگ<sup>۱۲</sup> نشان داد که توزیع نیروی تماس بین غلتک کار و غلتک پشتیبان یکنواخت نمی‌باشد [۷].

شوهت و تاونسند<sup>۱۳</sup> فرمولبندی جامعی برای اشکال مختلف استفاده از مکانیزم خم کننده غلتک‌ها برای کنترل ضخامت یعنی قرار گرفتن جک‌ها بین دو غلتک کار، بین غلتک‌های کار و غلتک‌های پشتیبان و یا بین دو غلتک پشتیبان ارائه نمودند که با وجود گذشت زمان هنوز هم مرجعی اساسی در این زمینه می‌باشد. از جمله مزایای دیگر کار آن‌ها بررسی پارامترهای مختلف و معرفی پارامترهای مهم و کم اثر بر روی اختلاف ضخامت در عرض ورق می‌باشد. از جمله این پارامترهای مهم می‌توان به انحنای اولیه، تحذب حرارتی و سایش غلتک‌ها اشاره کرد که انحنای اولیه و الگوی سایش غلتک‌های کار به صورت سهمی شکل در نظر گرفته شدند. از پارامترهای کم اثر می‌توان به تغییرات دما در عرض ورق و شکل مقطع ورق در ورود به زیر غلتک‌ها اشاره کرد (گرچه تغییرات شکل مقطع ورق در ورود می‌تواند تخت بودن یا شکل مقطع ورق خروجی را به میزان زیادی تحت تاثیر قرار

<sup>1</sup> Ford

<sup>2</sup> Hitchcock

<sup>3</sup> Alexander

<sup>4</sup> Green

<sup>5</sup> Wallace

<sup>6</sup> Stone

<sup>7</sup> Pilspanen

<sup>8</sup> Kanazawa

<sup>9</sup> Marcal

<sup>10</sup> Mori

<sup>11</sup> Ozakada

<sup>12</sup> Tong

<sup>13</sup> Shohet and Townsend