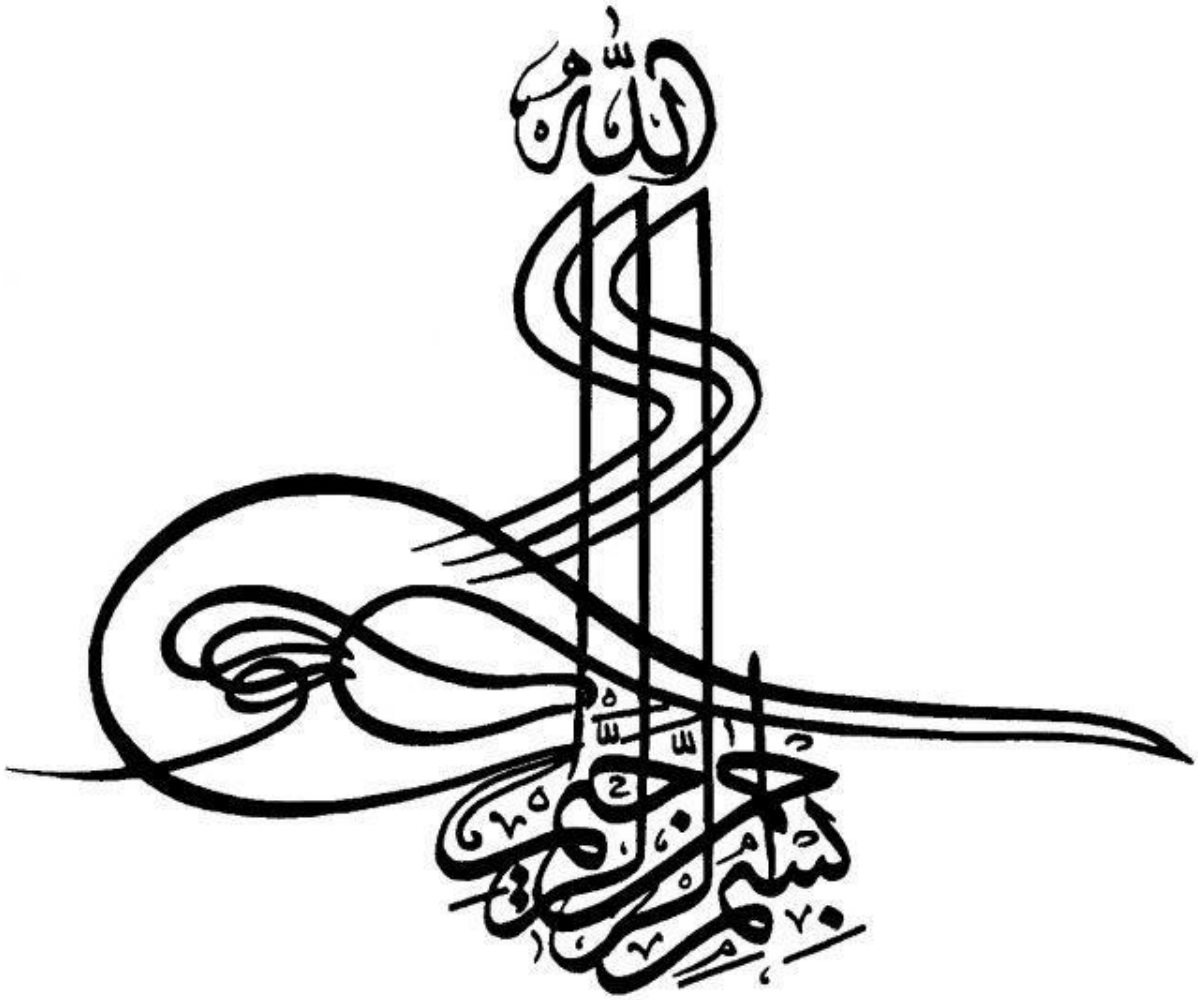

الله
بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی مکانیک

استخراج معادله ساختاری برای رفتار مکانیکی قطعه کار در دمای بالا با استفاده از مقادیر اندازه گیری شده در نوردگرم

پایان‌نامه کارشناسی ارشد طراحی کاربردی

پریا آقاصفری

استاد راهنما
دکتر محمود سلیمی

۱۳۹۲

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته طراحی کاربردی خانم پریا آقاصفری

تحت عنوان

استخراج معادله ساختاری برای رفتار مکانیکی قطعه کار در دمای بالا با استفاده از مقادیر اندازه گیری شده در نوردگرم

در تاریخ ۱۳۹۲/۶/۲۰ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان نامه	دکتر محمود سلیمی
۲- استاد مشاور پایان نامه	دکتر سعید ضیائی راد
۳- استاد داور	دکتر محمدرضا فروزان
٤- استاد داور	دکتر محمود کدخدایی
سرپرست تحصیلات تکمیلی	دکتر محمدرضا سلیم پور

**کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،
ابتکارات و نوآوریهای ناشی از تحقیق موضوع
این پایان‌نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی
اصفهان است.**

تقدیم به پدر و مادر عزیزم
واستاد مهربانم

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

چکیده ۱۲

فصل اول: مروری بر کلیات نورد و اهداف انجام پایان نامه ۱۳

۱-۱ مقدمه ۱۳

۱-۲ مروری بر کلیات نورد ۱۳

۱-۳نورد ورق ۳

۱-٤انواع نورد ورق ۳

۱-٤-۱ فرآیند نورد گرم ٤

۱-٤-۲ فرآیند نورد سرد ٦

۱-۵ روش‌های کاربردی در مدلسازی رفتار مکانیکی قطعه کار در فرآیند نورد ٦

فصل دوم: تئوری عمومی نورد ۱۰

۲-۱ مقدمه ۱۰

۲-۲ فشار و نیرو در نورد ۱۱

۲-۳توزیع فشار در فرآیند نورد ۱۲

۲-۳-۱ تأثیر اصطکاک در فشار غلتک ۱۳

۲-۳-۲ تأثیر قطر غلتک در فشار غلتک ۱٤

۲-۳-۳ تأثیر تنش‌های عقب وجلو در فشار غلتک ۱۵

۲-٤ شرایط انجام فرآیند نورد ۱۷

۲-۵ نگاهی به مدل‌های ارائه شده برای محاسبه نیرو و گشتاور نورد ۱۸

۲-۵-۱ مدل Schey ۱۸

۲-۵-۲ مدل Sims ۱۹

۲-۵-۳ مدل]Bland & Ford ۲۰

۲-۵-٤ مدل Orowan ۲۰

۲-۵-۵ مدل Roychoudhury & Lenard ۲۰

۲-۵-٦ مدل Michell ۲۱

۲-۷ مروری برفعالیتهای انجام شده در زمینه معادلات ساختاری ۲۱

فصل سوم: رفتار مکانیکی قطعه کار در نورد گرم از دیدگاه متالورژیکی و مکانیکی (تنش سیلان) ۲۳

۳-۱ مقدمه ۲۳

۳-۲ تغییرحالتهای متالورژیکی در حین فرآیند نورد گرم ۲٤

۳-۲-۱ بازیابی ۲۵

۳-۲-۲ تبلور مجدد ۲۵

۳-۳ رابطه تنش-کرنش در حضور بازیابی دینامیکی ۲۶
۳-٤ رابطه تنش-کرنش در حضور تبلور مجدد دینامیکی ۲۷
۳-۵ کرنش ۲۸
۳-٦ نرخ کرنش ۲۹
۳-٦-۱ رابطه اکلوند ۲۹
۳-۷ مدل‌های ارائه شده برای ارتباط تنش ، کرنش و نرخ کرنش ۳۱
۳-۷-۱ رابطه لودویک ۳۱
۳-۷-۲ رابطه زنر و هولمن ۳۱
۳-۷-۳ رابطه آلدر وفیلیپس ۳۱
۳-۷-٤ رابطه اینوی ۳۲
۳-۷-۵ رابطه سوزوکی ۳۲
۳-۷-٦ رابطه تارخ و سردینسکی ۳۲
۳-۷-۷ رابطه رابرتز ۳۲
۳-۸ نتیجه‌های تجربی تأثیر نرخ کرنش در تنش جریان ۳۳

فصل چهارم: شبکه‌های عصبی ۳٤

٤-۱ مقدمه ۳٤
٤-۲ تاریخچه شبکه‌های عصبی ۳۵
٤-۳ ساختمان یک سلول عصبی بیولوژیک ۳٦
٤-٤ مدل یک سلول عصبی مصنوعی ۳۷
٤-٤-۱ مدل تک ورودی ۳۷
٤-٤-۲ مدل چند ورودی ۳۸
٤-۵ انواع توابع انتقال ۳۸
٤-۵-۱ تابع محرک خطی ۳۸
٤-۵-۲ تابع محرک سیگموئید-لوجستیک ۳۹
٤-۵-۳ تابع محرک هیپربولیک – تانژانت ۳۹
٤-٦ بایاس ٤۰
٤-۷ معماری‌های شبکه ٤۰
٤-۸ شبکه‌های عصبی پرسپترون ٤۰
٤-۸-۱ آموزش شبکه‌های عصبی پرسپترون ٤۱
٤-۹ شبکه پیشخور تک لایه ٤۱
٤-۱۰ شبکه پیشخور چند لایه ٤۲
٤-۱۱ توپولوژی شبکه‌های عصبی ٤۲
٤-۱۲ الگوریتم آموزش پس انتشار خطا ٤٤

٤-١٢-١ مراحل آموزش الگوریتم پس انتشار خطا استاندارد ٤٥
٤-١٢-٢ الگوریتم آموزش BP ٤٥
٤-١٣ بهبود الگوریتم استاندارد پس انتشار خطا ٤٦
٤-١٣-١ روش ممنتم برای الگوریتم BP ٤٦
٤-١٣-٢ نرخ یادگیری متغیر ٤٧
٤-١٣-٣ الگوریتم‌های نیوتن ٤٧
٤-١٣-٤ الگوریتم گرادیان مزدوج ٤٨
٤-١٣-٥ الگوریتم پس انتشار خطای بهبود پذیر ٥٠
٤-١٣-٦ الگوریتم لونبرگ-مارکوارت ٥٠

فصل پنجم :استخراج معادله ساختاری رفتار مکانیکی قطعه کار در فرآیند نورد گرم با استفاده از روش‌های تحلیلی ٥١

٥-١ مقدمه ٥١
٥-٢ الگوریتم روش تحلیل معکوس ٥٣
٥-٢-١ مدل ریاضی تنش سیلان ٥٣
٥-٢-٢ مدل Bland & Ford برای محاسبه نیرو گشتاور نورد ٥٤
٥-٢-٣ الگوریتم نیوتن برای حل دستگاه معادلات غیر خطی ٥٥
٥-٢-٤ تخمین پارامترهای مجهول مدل ارائه شده برای تنش سیلان ٥٦
٥-٢-٥ روش مینیمم مربعات ٥٦
٥-٣ بررسی منطق رابطه ارائه شده ٥٩
٥-٤ بررسی خطای مدل ارائه شده ٦٠

فصل ششم: نتایج مدلسازی نورد گرم به روش شبکه عصبی ٦٢

٦-١ مقدمه ٦٢
٦-٢ ویژگی‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی ٦٣
٦-٢-١ قابلیت یادگیری ٦٣
٦-٢-٢ پراکندگی اطلاعات ٦٣
٦-٢-٣ قابلیت تعمیم ٦٤
٦-٢-٤ سرعت پاسخگویی بالا در هنگام استفاده ٦٤
٦-٢-٥ مقاوم بودن ٦٤
٦-٣ جمع آوری، انتخاب و تقسیم بانک داده‌ها به سری داده‌های مورد نیاز ٦٤
٦-٣-١ نگاشت زوج‌های آموزشی به حدود مناسب ٦٥
٦-٣-٢ دسته بندی و تعیین نسبت تعداد داده‌ها در سری‌های داده ای متفاوت ٦٦
٦-٤ تعیین نوع شبکه مورد استفاده و الگوریتم آموزش ٦٦
٦-٥ سنجش میزان یادگیری و عملکرد شبکه ٦٧
٦-٥-١ میانگین مربعات خطا ٦٧

٦-٥-٢ ضریب همبستگی بین خروجی‌های حقیقی و دلخواه ٦٨
٦-٦ توپولوژی شبکه عصبی مورد استفاده در این پروژه و بهینه سازی ساختار شبکه اولیه ٦٩
٦-٦-١ مرحله اول: تعیین بهترین تابع محرک و بهترین الگوریتم آموزش ٧٠
٦-٦-٢ مرحله دوم: تعیین بهترین تعداد نرون برای لایه مخفی ٧١
٦-٦-٣ مرحله سوم:آزمایش و کنترل کارآیی و دقت کلی مدل شبکه عصبی ٧٢
٦-٧ بررسی حساسیت شبکه به پارامترهای ورودی ٧٣
فصل هفتم: نتایج و پیشنهادات ٧٦
٧-١ مقایسه نتایج روش تحلیلی و مدل شبکه عصبی ٧٦
٧-٢ پیشنهادات ٧٧
مراجع ٧٩

فهرست شکل‌ها و جدول‌ها

شکل ۱-۱ شماتیک تک قفسه نورد ۳

شکل ۱-۲ شماتیک خطوط نورد گرم ٤

شکل ۲-۱ ورود وخروج ورق به داخل قفسه ۱۱

شکل ۲-۲ نیروهای شعاعی و مماسی ۱۲

شکل ۲-۳ توزیع فشار در فرآیند نورد ۱۳

شکل ۲-٤ تپه اصطکاکی در فرآیند نورد ۱۳

شکل۲-۵ تأثیر اصطکاک در توزیع فشار غلتک در طول تماس غلتک وقطعه کار ۱٤

شکل۲-٦ تأثیر قطر غلتک در توزیع فشار غلتک ۱۵

شکل۲-۷ تأثیر تنش کششی عقب وجلو ۱٦

شکل۲-۸ تأثیر تنش کششی جلو در فشار غلتک ۱٦

شکل۲-۹ چگونگی توزیع فشار غلتک برای کمیت‌های مختلف تنش‌های کششی عقب وجلو ۱۷

شکل۲-۱۰ تجزیه نیرو ۱۸

شکل ۲-۱۱ نمودار فاکتور تشدید ۱۹

شکل۲-۱۲ اصلاحات بر روی مدل Orowan ۲۱

شکل ۳-۱ مراحل مختلف در تغییر حالت بازیابی ۲۵

شکل ۳-۲ تغییرات کسر تبلور مجدد یافته بر حسب زمان ۲٦

شکل ۳-۳ منحنی تنش-کرنش در حضور بازیابی دینامیکی در نرخ کرنش‌های متفاوت ۲۷

شکل ۳-٤ منحنی تنش-کرنش در حضور تبلور مجدد دینامیکی در دماهای متفاوت ۲۸

شکل ٤-۱ نواحی اصلی یک سلول عصبی بیولوژیکی ۳۷

شکل ٤-۲ مدل ریاضی یک نرون تک ورودی ۳۷

شکل ٤-۳ یک نرون با چند ورودی **۳۸**

شکل ٤-٤ تابع محرک خطی ۳۸

شکل ٤-۵ تابع محرک سیگموئید-لوجستیک ۳۹

شکل ٤-٦ تابع محرک هیپربولیک – تانژانت ۳۹

شکل ٤- ۷ ساختار شبکه‌های پرسپترون ٤۱

شکل ٤-٨ یک شبکه پیشخور تک لایه ٤٢
شکل ٤-٩ شماتیک یک شبکه پرسپترون چند لایه ٤٢
شکل٥-١ المان مستطیلی در ناحیه تغییر شکل ٥٤
جدول ٥-١ مقادیر بدست آمده برای پارامترهای مجهول ٥٨
جدول ٥-٢ مقادیر نهایی پارامترهای مجهول ٥٨
شکل ٥-٢ نمودار تنش-کرنش در قفسه‌های نورد گرم ٥٩
شکل ٥-٣ نمودار تنش- نرخ کرنش در دما و کرنش ثابت ٦٠
شکل ٥-٤ نمودار تنش – دما در نرخ کرنش و کرنش ثابت ٦٠
شکل ٥-٥ همپوشانی مدل ارائه شده با مقادیر واقعی ٦١
شکل ٥-٦ خطای مدل ارائه شده برای محاسبه نیروی نورد ٦٢
شکل ٦-١ نگاشت زوج‌های آموزشی به حدود مناسب ٦٥
شکل ٦-٢ مدل شبکه عصبی مورد استفاده در این پروژه ٦٩
جدول ٦-١ میانگین خطای محاسبات مجدد نیرو برای توابع تحریک متفاوت والگوریتم‌های آموزش مختلف ٧٠
جدول ٦-٢ تأثیر تعداد نرون‌های لایه مخفی برروی میانگین خطای محاسبه مجدد نیرو ٧١
شکل ٦-٣ تغییرات MSE در مرحله آموزش شبکه ٧٢
شکل ٦-٤ ضریب همبستگی برای مجموعه داده‌های آموزش، تست و معتبر سازی ٧٣
شکل ٦-٥ حساسیت تنش سیلان به کرنش در مدل شبکه عصبی ٧٤
شکل ٦-٦ حساسیت تنش سیلان به نرخ کرنش در مدل شبکه عصبی ٧٤
شکل ٦-٧ حساسیت تنش سیلان به کرنش در مدل شبکه عصبی ٧٥
شکل ٧-١ میزان خطای محاسبه مجدد نیرو در مدل شبکه عصبی ٧٧
شکل ٧-٢ میزان خطای محاسبه مجدد نیرو در رابطه ارائه شده با استفاده از روش تحلیلی ٧٧

چکیده

هدف این پروژه استخراج معادله ساختاری رفتار مکانیکی قطعه کار در فرآیند نورد گرم می‌باشد. برای این منظور از دو روش تحلیلی و شبکه عصبی برای بدست آوردن مدل رفتار مکانیکی قطعه در حین تغییر شکل استفاده گردیده است.

در روش تحلیلی با استفاده از روابط ریاضی موجود بین پارامترهای تأثیرگذار بر فرآیند و با به‌کارگیری روش تحلیل معکوس مدل مورد بحث به صورت تابعی از کرنش، نرخ کرنش و دمای میانگین هر قفسه ارائه گردیده است.

برای دستیابی به مدل دقیق‌تر با درصد خطای محاسباتی کمتر نسبت به روش تحلیلی از شبکه‌های عصبی مصنوعی پیشخور چند لایه با الگوریتم آموزش پس انتشار خطا استفاده شده است.

کلیه اطلاعات لازم از خطوط نورد گرم مجتمع فولاد مبارکه به صورت مجموعه داده‌ها، دریافت گردیده است و برنامه‌های کامپیوتری با استفاده از نرم‌افزار MATLAB برای هر دو روش استفاده شده در این پروژه، نوشته شده است. در روش تحلیلی از روش مینیمم مربعات خطا برای یافتن پارامترهای مجهول مدل پیشنهادی اولیه استفاده گردیده و برای سنجش خطای رابطه پیشنهادی ، با استفاده از خروجی‌های مدل ارائه شده نیروی نورد به عنوان پارامتر پایه که مقدار واقعی آن در اختیار بوده، مجدداً محاسبه گردیده و میانگین خطاهای محاسباتی به عنوان خطای مدل پیشنهادی ارائه شده است.

جهت کاهش خطای مدل پیشنهاد شده با استفاده از روابط تحلیلی، از روش شبکه عصبی استفاده گردید. به همین منظور در مدلسازی با استفاده از شبکه‌های عصبی مدل پیشنهادی اولیه همان مدل اولیه استفاده شده در روش تحلیلی در نظر گرفته شد و کرنش، نرخ کرنش و دمای میانگین قفسه‌های نورد و یک ضریب ثابت به عنوان ورودی‌های شبکه و پارامتر تنش سیلان به عنوان خروجی شبکه منظور گردید.

جهت یافتن ساختار بهینه شبکه عصبی مورد استفاده پارامترهای مربوط به توپولوژی شبکه همچون الگوریتم‌های آموزش شبکه، تابع محرک و تعداد نرون‌های لایه مخفی در بین حالت‌های ممکن تغییر داده شد و با بررسی خطای خروجی شبکه ، بهترین ساختار شبکه برای مسئله مورد بحث ارائه گردید.

با مقایسه نتایج هر دو روش، مشاهده شد که مدل شبکه عصبی ارائه شده خطای کمتری نسبت به مدل تحلیلی ارائه می‌کند. بنابراین با وجود اینکه نتایج مدل تحلیلی نیز در محدوده قابل قبولی قرار داشت، اما مدل شبکه عصبی به عنوان مدل بهتری برای رفتار مکانیکی قطعه‌کار در فرآیند نورد گرم درنظر گرفته شد.

کلمات کلیدی: تنش سیلان، نورد ورق، روش تحلیل معکوس، میانگین مربعات خطا، شبکه‌های عصبی، بهینه سازی

فصل اول
مروری بر کلیات نورد و اهداف انجام پایان نامه

۱-۱ مقدمه

نورد عبارت است از یک فرآیند کار پلاستیک که بر روی فلز قطعه کار بین دو غلتک در حال چرخش انجام می‌گیرد. انواع نورد و روش‌های مختلف آن بر اساس شرایط و کاربردهای مختلف شکل می‌گیرند. صنعت نورد، از متداول‌ترین و پر رونق‌ترین روش تولید فرآورده‌های فلزی ، به ویژه فولادها است ، به گونه ای که بیش از ٪۸۰ از فرآورده‌های فلزی در سطح جهان به این روش تولید می‌شوند. نرخ و راندمان بالای تولید محصولات نورد، همچنین دقت زیاد آن‌ها باعث شده است که این صنعت از جایگاه و اهمیت خاصی در بین دیگر فرآیندهای شکل‌دهی برخوردار باشد.

رقابت پیوسته در صنعت فولاد، تولید کننده‌ها را برآن می‌دارد تا دقت و بازدهی تولیدات را افزایش دهند. بدین منظور، همواره تلرانس‌های هندسی و تلرانس‌های مربوط به خواص مکانیکی محدودتر و تنگ تر می‌شود. بدون شک بهترین راه برای دستیابی به بازده و دقت بیشتر و کنترل بر هر فرآیندی از جمله نورد، شناخت پارامترهای اساسی حاکم بر آن و روابط بین آن‌ها به منظور یافتن اثر هر پارامتر بر پارامترهای دیگر و بر کل فرآیند است. برای دستیابی به این هدف، بایستی فرآیند به طور کامل مورد بررسی قرار گیرد. بهترین راه به دست آوردن اطلاعات لازم از یک فرآیند، مدل کردن آن است.

۱-۲ مروری بر کلیات نورد

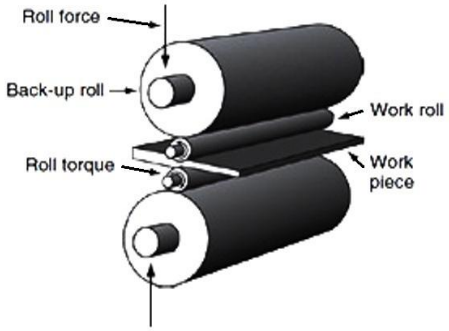
در فرآیند نورد در هنگام تغییر شکل پلاستیک فلز بین غلتک‌ها ، تنش‌های فشاری زیادی به غلتک‌ها وارد می‌شود. اعمال تنش‌های فشاری به اضافه دوران غلتک‌ها و اختلاف سرعت خطی آن‌ها و فلز، منجر به ایجاد

اصطکاک و نتیجتاً بروز تنش‌های سطحی می‌شود و این تنش‌های سطحی موجب کشیدن فلز به درون شکاف غلتکی می‌گردد.

۱-۳ نورد ورق [۱]

هدف از انجام نورد ورق کاهش ضخامت قطعه کار، از ضخامت اولیه به ضخامت از پیش تعیین شده می‌باشد،که برای این منظور از دو غلتک که به عنوان غلتک کار شناخته می‌شوند استفاده می‌شود. این غلتک‌ها در جهات مختلف یکدیگر دوران می‌کنند و ورق را به داخل فاصله بین دو غلتک[1] هدایت می‌کنند وآن را تحت تأثیر نیرو قرار می‌دهند تا زمانی که از داخله قفسه نورد خارج شود،که در طی این مدت خصوصیات مکانیکی ومتالورژیکی قطعه دست خوش تغییر قرار می‌گیرد.

در شکل(۱-۱) شماتیک قفسه نورد مشاهده می‌شود که این شکل نمایی از یک تک قفسه[2] را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱ شماتیک تک قفسه نورد[۱]

همانطور که در شکل مشاهده می‌شود غلتک‌های کار بسیار کوچک تر از غلتک‌های پشتیبان می‌باشند ودر واقع گشتاور ونیروی نورد بر یاتاقان‌های غلتک‌های پشتیبان وارد می‌شوند و سعی می‌شود تا فاصله مرکز تا مرکز یاتاقان‌ها تا آنجا که ممکن است ثابت نگه داشته شود .

۱-٤ انواع نورد ورق

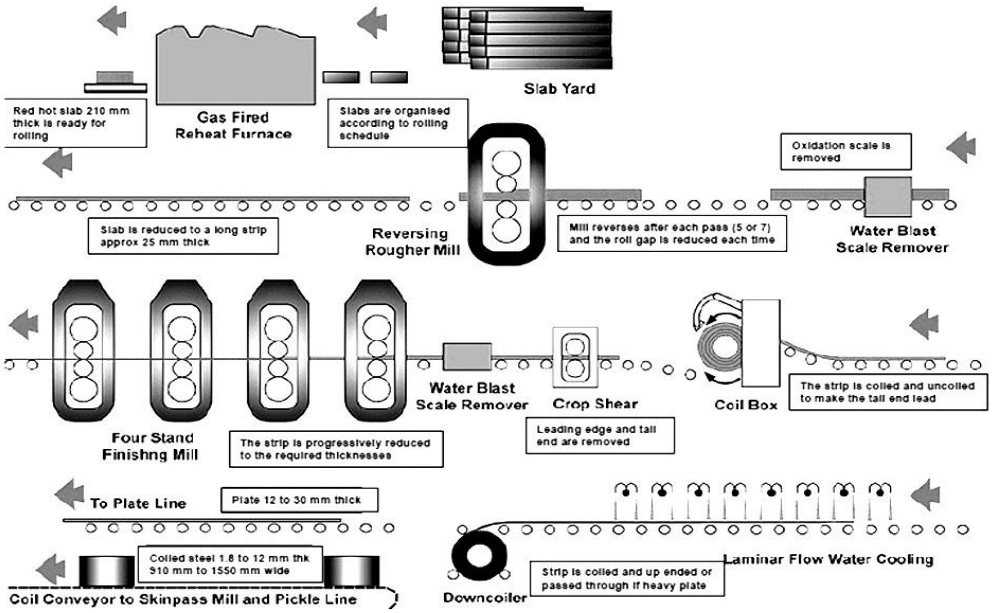
نورد به طور عمده به دو دسته نورد گرم و نورد سرد دسته بندی می‌شود. به طور کلی نورد با نورد گرم شروع می‌شود و با نورد سرد پایان می‌یابد. زمانی که فرآیند نورد در دمایی بالاتر از دمای تبلور مجدد فلز باشد به آن نورد گرم می‌گویند و وقتی زیر این دما باشد به آن نورد سرد می‌گویند.

---

1 - Roll gap
2 - single-stand

۱-٤-۱ فرآیند نورد گرم

نورد گرم معمولاً بر روی ورق یا ورقه‌های فلزی صورت می‌گیرد،که این فرآیند به نوبه خود معایب ومزایای خود را دارا می‌باشدکه می‌توان به مواردی مانند قیمت بالا، تهدید محیط زیست و همچنین انعطاف پذیری وکیفیت بالای محصول آن اشاره کرد.



شکل ۱-۲ شماتیک خطوط نورد گرم[۱]

شماتیک خطوط نورد گرم در شکل (۱-۲) نشان داده شده است اجزای اصلی خطوط نورد وترتیب انجام فرآیند به شرح زیر می‌باشد:

کوره‌های پیش گرم

بعد از فرآیند ریخته‌گری، شمش‌ها به داخل کوره‌های پیشگرم هدایت می‌شوند و دمای آنها تا ۱۳۰۰- ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد تا ساختار دندریتی آنها از بین برود.

قفسه‌های نورد خشن

قبل از اینکه فرآیند آغاز شود شمش‌ها وارد محفظه پوسته زدایی می‌شوند و پوسته هایی که در اثر افزایش درجه حرارت بر روی سطح آنها ایجاد شده است با اسپری شدن آب با فشار بالا بر روی سطح آنها از بین می‌رود. سپس شمش‌ها وارد قفسه سخت کاری می‌شوند و در این مرحله ضخامت آنها از mm ۳۰۰-۲۰۰ به mm ۵۰ پس از چندین پاس کاهش می‌یابد (معمولاً چهار یا پنج پاس). در کل فرآیند نورد ، عرض ورق ثابت در نظر گرفته می‌شود و از آنجایی که فرض می‌شود حجم قطعه در طی فرآیند ثابت است، تغییرات تنها در راستای طول قطعه صورت

می‌گیرد. قطر غلتک‌ها در فرآیند سخت کاری معمولاً ۱۰۰۰ mm می‌باشد وجنس آنها معمولاً از جنس فولاد ابزار می‌باشد. پس از پایان نورد سخت، قطعه به داخل کلاف پیچ‌ها هدایت می‌شود.

کلاف پیچ ها

کلاف پیچ‌ها بین قفسه‌های نور سخت و قفسه‌های پرداخت کاری وهمچنین در انتهای خطوط نورد قرار دارند. استفاده از کلاف پیچ‌ها بین قفسه‌ها شامل مزایای زیر می‌باشد:

کاهش طول خطوط نورد

افزایش میزان تولید

جلوگیری از اتلاف دمای ورق در خط

کنترل سرعت ورود ورق به قفسه‌های پرداخت کاری

پس از این مرحله ورق وارد قفسه‌های پرداخت کاری می‌شود.

قفسه‌های پرداخت کاری

پس از اینکه ورق به صورت کلاف درآمد ، به دمای مناسب برای ورود به قفسه پرداخت کاری خواهد رسید. کلاف باز می‌شود و ورق آماده ورود به قفسه‌های پرداخت‌کاری می‌گردد. ورق با سرعت ۵-۲/۵ m/s وارد قفسه‌های پرداخت‌کاری می‌شود. ضخامت پایانی ورق به هنگام خروج از قفسه آخر توسط گیج‌های کنترل اتوماتیک برای کنترل ضخامت خروجی اندازه گیری می‌شود. همچنین در این مرحله می‌توان دمای پایانی را هم با کنترل سرعت فرآیند تنظیم کرد.

پس از این مرحله ورق آماده ورود به محفظه خنک کاری می‌شود تا با کاهش دمای آن مانع از چسبندگی ورق در حین کلاف شدن شده و همچنین کیفیت محصول افزایش داده شود.

سیستم‌های خنک کاری

بعد از خروج از قفسه‌های پرداخت کاری ورق با دمایی در محدوده ۸۰۰-۹۰۰ °C تحت شرایط کنترل شده وارد محفظه خنک‌کاری می‌شود. طول این محفظه ممکن است بین ۲۰۰ m- ۱۵۰باشد. در این مرحله آب با نرخ ۸۰۰۰۰ -۲۰۰۰۰۰lit/min بر روی سطح اسپری می‌شود. هدف از خنک کاری علاوه برکاهش دمای ورق برای کلاف پیچی نهایی ، افزایش استحکام مکانیکی قطعه و بهبود خصوصیات ترمو مکانیکی آن می‌باشد.

کلاف پیچی نهایی

بعد از خروج از محفظه خنک کاری دمای ورق اندازه گیری می‌شود و توسط کلاف پیچ به صورت کلاف در می‌آید و به عنوان ماده خام دیگر صنایع مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۱-٤-۲ فرآیند نورد سرد

پس از انجام نورد گرم اگر نیاز به کاهش ضخامت بیشتر داشته باشیم از نورد سرد استفاده می‌کنیم. هدف از انجام نورد سرد به صورت زیر دسته بندی می‌شود:

کاهش ضخامت بیشتر

افزایش استحکام ماده با کرنش سختی

افزایش دقت ابعادی قطعه

۱-۵ روش‌های کاربردی در مدلسازی رفتار مکانیکی قطعه کار در فرآیند نورد

در فرآیند نورد همچون سایر فرآیندهای شکل‌دهی دستیابی به مدلی که رفتار مکانیکی قطعه کار را در حین تغییر شکل در اختیار قرار دهد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. برای مدل سازی رفتار مکانیکی قطعه کار در فرآیند نورد از روش‌های متنوعی استفاده می‌گردد. که می‌توان به روش‌های تحلیلی ، روش المان محدود و شبکه‌های عصبی مصنوعی اشاره کرد.

در روش‌های تحلیلی از روابط ریاضی موجود بین پارامترهای مؤثر بر فرآیند برای مدلسازی رفتار مکانیکی ماده تحت نورد استفاده می‌شود. در روش المان محدود سعی بر این است که شرایط کنترل شده فرآیند با شبیه سازی در نرم افزارهای تحلیلی به دست آورده شود. همچنین با استفاده از شبکه‌های عصبی می‌توان شبکه ای هوشمند طراحی کرد که با گرفتن پارامترهای مؤثر بر فرآیند نورد به عنوان ورودی‌های شبکه ،کنترل نسبتاً دقیقی بر خروجی فرآیند داشته باشند.

روش تازه پدیدار شده شبکه عصبی مصنوعی توانایی زیادی را برا ی مدلسازی فرآیندهای چند بعدی پیچیده از خود نشان داده است. شبکه عصبی عبارت است از یک سیستم پروسس اطلاعات که خصوصیات کاربردی و اصلی یک شبکه عصبی بیولوژیکی را دارا می‌باشد. شبکه‌های عصبی در زمینه‌های شناسائی الگو ، پردازش سیگنال، پیش بینی و مدلسازی و همچنین در رباتیک کاربرد بسیار وسیع و گسترده ای دارند. یکی از موفق ترین کاربردهای شبکه عصبی در مدلسازی وکنترل سیستم‌های غیر خطی بوده است. توانایی شبکه‌های عصبی در کاربرد آنها به عنوان یک تابع تقریب زننده کلی و عمومی، این شبکه‌ها را به ابزاری بسیار مفید در شبیه سازی این مکانیزم‌ها تبدیل کرده است.

قابلیت شبکه‌های عصبی مصنوعی در کاربردهای مختلف عددی ، شامل فرآیندهای تولید، رباتیک وکنترل، تاکنون به اثبات رسیده است. این شبکه‌ها بدین شکل عمل می‌کنند: آنها یک دسته ورودی (یک بردار ورودی) را گرفته و یک دسته خروجی مرتبط با آن را تولید می‌کنند ، به این عمل نگاشت بردار[1] گفته می‌شود. تمامی شبکه‌های عصبی موارد خاصی از نگاشت بردار هستند[۲]. روابط بین این نگاشت ، در ساختار خود این شبکه مستتر است. این ارتباط بین بردارهای ورودی و خروجی به وسیله وزن‌های داخل شبکه مشخص می‌شوند[۳].در واقع شبکه‌های عصبی امکان جدیدی را در زمینه میان یابی نتایج از روی مدل‌های عددی فراهم کرده است.

1 - Vector mapping

شبکه‌های عصبی، مسائلی که شبیه سازی آنها به وسیله تکنیک‌های تحلیلی ، منطقی یا سنتی به دلیل ندانستن قوانین حاکم بر آنها و یا وجود داده‌های ناقص و مغشوش ، بسیار پیچیده است را می‌توانند حل کنند. مبنای شبکه‌های عصبی تعییین روابط صحیح بین ورودی‌ها و خروجی‌ها می‌باشد. این روابط به وسیله ماتریس وزن توصیف می‌شوند، که ورودی‌ها را به طور عددی با خروجی‌ها مرتبط می‌کند.

این عمل با آموزش شبکه به وسیله ورودی‌ها و خروجی‌های اندازه گیری شده انجام می‌گیرد. بنابراین حین آموزش ، وزن‌های بین نرون ها، که اجزای اصلی شبکه عصبی هستند، به سمت مقادیر صحیح حرکت می‌کنند. شبکه عصبی به وسیله داده هایی که در فرآیند آموزش شرکت نداشته اند، تست می‌شوند. معمولاً خطای تست با بهینه کردن فرآیند آموزش کاهش می‌یابد. شایان ذکر است، زمانی که شبکه در حال آموزش است چنانچه مقدار خطای تست به مقدار از پیش تعیین شده ای رسید، آموزش متوقف می‌شود.

در صنایع نورد کنترل بر اساس بازخورد خروجی فرآیند صورت می‌گیرد. با کنترل فشار اعمالی بر غلتک‌های کار برای ایجاد تغییر شکل که تحت عنوان نیروی لازم برای انجام فرآیند نورد مطرح می‌گردد ، دقت ابعادی قطعه کار مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور شبکه‌های عصبی طراحی می‌شوند که خروجی آن‌ها نیرو وگشتاور فرآیند نورد می‌باشد. همچنین با توجه به میزان درصد عناصر موجود در ترکیبات شیمیایی فلز تحت نورد می‌توان رفتار مکانیکی قطعه کار در فرآیند را مدلسازی نمود . در این مورد نیز شبکه هایی طراحی می‌شوندکه درصد عناصر تشکیل دهنده ماده قطعه کار، وردی‌های شبکه را تشکیل می‌دهند و خروجی پارامترهای تعیین کننده رفتار مکانیکی می‌باشد.

در سالهای اخیر تألیفات متعددی در مورد کاربرد شبکه عصبی در فرآیند نورد صورت گرفته است. در سال ۲۰۰۷، ژانگ و همکارانش با در نظر گرفتن درصد عناصر کربن و منگنز ، ضخامت‌های ورودی و خروجی ، دمای فرآیند و عرض ورق به عنوان ورودی شبکه عصبی خود سعی بر یافتن نیروی نورد نموده اند[۴]. در سال ۲۰۰۸، لین وهمکارانش با در نظر گرفتن پارامترهایی مثل دما ، نرخ کرنش ، لگاریتم نرخ تغییر شکل ، تأخیرزمانی انجام فرآیند در هر مرحله و درجه تغییر شکل[1] به عنوان ورودی‌های شبکه خود تنش سیلان به دست آمده برای 42CrMo در تست کشش گرم را مدل نموده اند[۵]. در سال ۲۰۱۱ ، قیصری وهمکارانش با در نظر گرفتن درصد تغییر ضخامت[2]، دمای ورق به هنگام کلاف[3] شدن ، دمای پرداخت کاری و درصد عناصر تشکیل دهنده، مدل شبکه عصبی ای تولید کرده اند که خروجی مطلوب آن استحکام تسلیم ، تنش کششی نهایی و کشیدگی ورق می‌باشد[۶]. در سال ۲۰۱۲ ، باقری پور و همکارانش با در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر بر نورد همچون سرعت غلتک ها، درصدکاهش ضخامت، دمای ورودی و ضریب اصطکاک ، نیرو و گشتاور به دست آمده از روش المان محدود را با شبکه عصبی مدل نموده اند تا بر ابعاد و پروفیل خروجی ورق نظارت داشته باشند[۷].

---

1 - Deformation degree
2 - Reduction
3 - Coil

در این پروژه نشان داده شده است که برای خطوط نورد گرم، امکان پیش بینی نسبتاً دقیق خواص مکانیکی ورق با استفاده از روش‌های تحلیلی و مدلسازی شبکه‌های عصبی مصنوعی ومقادیر اندازه گیری شده فرآیند وجود دارد. در روش تحلیلی با استفاده از روش مینیمم مربعات رابطه تنش جاری به صورت تابعی از کرنش، نرخ کرنش و دما ارائه گردیده است. در ادامه پروژه، مدلسازی توسط شبکه‌های عصبی پیش خور چند لایه[1] با استفاده از الگوریتم پس انتشار خطا، با به کار بردن داده‌های اندازه گیری شده فرآیند خطوط نورد گرم هفت قفسه ای مجتمع فولاد مبارکه، صورت گرفته است. برای این مدلسازی کرنش ، نرخ کرنش اعمالی به قطعه کار در هر قفسه و دمای میانگین هر قفسه به عنوان ورودی‌های شبکه FFNN و تنش سیلان تحت عنوان خروجی شبکه در نظر گرفته شده است.

با توجه به در دست نداشتن مقادیر واقعی تنش جاری در فرآیند ، از محاسبه مجدد نیرو با استفاده از مقادیر بدست آمده از مدل‌های ارائه شده جهت تخمین خطاهای محاسباتی استفاده گردیده است. برای بهینه سازی مدل شبکه عصبی ارائه شده پارامترهای مربوط به شبکه همچون الگوریتم‌های آموزش شبکه، تابع انتقال و تعداد نرون‌های لایه مخفی شبکه تغییر داده شد وتأثیر هر یک از آنها بر روی خطای محاسباتی بررسی گردیده است ودرنهایت حساسیت مدل‌های ارائه شده نسبت به پارامترهای ورودی مورد بررسی قرار گرفت و معلوم گردید مدل‌های ارائه شده از دقت قابل قبولی برخوردار می‌باشند.

از آنجا که رفتار مکانیکی اهمییت زیادی در این فرایند دارد در این پایان نامه توجه خود را به این جنبه ازموضوع نورد معطوف می کنیم.

دستیابی به یک معادله ساختاری که روند مقاومت جسم در برابر تغییر شکل هنگام عبور از قفسه‌های مختلف را نشان دهد ممکن است از روشهای مختلفی بدست آید. ما در این پایان نامه از دو روش زیر برای تعیین این رابطه استفاده می کنیم:

الف- روش تحلیلی بر مبنای وابستگی نیرو و گشتاور به تنش سیلان در قفسه‌های نورد و بدست آوردن یک تنش جاری عمومی با توجه به مینیمم مربعات خطا ی حاصله.

ب- استفاده از شبکه عصبی مصنوعی در تخمین تنش سیلان با توجه به عملکرد آن در قفسه‌های نورد.

روند کلی در این پروژه به شرح زیر است:

در فصل دوم ابتدا به توضیح اجمالی در مورد تئوری عمومی نورد و روابط موجود در تحلیل فرآیند نورد پرداخته شده است ودر ادامه روش‌های مختلف ارائه شده برای تحلیل فرآیند نورد ارائه گردیده است.

فصل سوم به بررسی مفهوم تنش سیلان پرداخته است و پارامترهای مؤثر بر آن همچون کرنش، نرخ کرنش، دما و تغییرحالت‌های متالورژیکی در حین فرآیند نورد گرم مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در ادامه اثر هریک از پارامترها بر تنش سیلان ماده مورد بررسی قرار گرفته است.

در فصل چهارم در مورد کلیات شبکه‌های عصبی بحث شده است. در مورد ساختارهای این شبکه‌ها و الگوریتم‌های آموزش آنها و نحوه دستیابی به ساختار بهینه برای شبکه‌های عصبی توضیحاتی ارائه شده است.

---

1 - Multi layer Feed-forwar Neural networks (FFNN)

در فصل پنجم، با استفاده از روش تحلیلی معادله ساختاری رفتار مکانیکی قطعه کار در فرآیند نورد گرم استخراج گردیده است. میزان دقت رابطه ارائه شده نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

در فصل ششم با استفاده از شبکه‌های عصبی پیش‌خور چندلایه با الگوریتم پس انتشار خطا رفتار مکانیکی قطعه کار در فرآیند نورد گرم فولاد مدل گردیده است. بهترین ساختار شبکه بدست آمده است و میزان کارایی و عملکرد شبکه مورد بررسی قرار گرفته است.

در فصل هفتم مقایسه ای بین دو روش به کار رفته صورت گرفته و مدل دقیقتر ارائه گردیده است.