



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مکانیک

پیش‌بینی توزیع دمای ورق نورد گرم در فرآیند نورد نهایی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد تبدیل انرژی

محمد جواد امینی

استاد راهنما

دکتر احمد صابونچی



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی آقای محمدجواد امینی
تحت عنوان

پیش بینی توزیع دمای ورق نورد گرم در فرآیند نورد نهایی

در تاریخ ۱۳۸۹/۱۲/۲۲ توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

دکتر احمد صابونچی

۱- استاد راهنمای پایان نامه

دکتر احمد رضا پیشه‌ور

۲- استاد مشاور پایان نامه

دکتر علی اکبر عالم رجیبی

۳- استاد داور

دکتر محمد رضا سلیم پور

۴- استاد داور

دکتر سعید ضیایی راد

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده

بر خود لازم می‌دانم که از توجه و راهنمایی اساتید ارجمند جناب آقای
دکتر احمد صابونچی و جناب آقای دکتر احمد رضا پیشه‌ور
سپاسگزاری کنم.

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

تقديم به :

پدر و مادر عزيزم

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
هشت	فهرست مطالب
یازده	فهرست نمادها و نشانه‌ها
۱	چکیده
	فصل اول: مقدمه
۲	۱-۱ فرآیند نورد گرم
۳	۲-۱ مطالعه کارهای انجام شده در زمینه مدل‌سازی نورد گرم
۵	۳-۱ اهداف و اهمیت کار حاضر
	فصل دوم: مدل‌سازی گرمایی نورد نهایی
۷	۱-۲ تعریف مساله
۷	۲-۲ معادله انرژی حاکم در انتقال حرارت ورق فولاد
۱۰	۳-۲ معادله انرژی حاکم در انتقال حرارت غلتک
۱۲	۴-۲ تولید گرما در ورق در نورد گرم
۱۴	۵-۲ بررسی لایه اکسید روی ورق فولاد در نورد گرم
۱۴	۵-۲-۱ رشد لایه اکسید بر روی ورق فولاد در دمای بالا
۱۶	۵-۲-۲ فرضیات موجود برای تشکیل لایه اکسید روی ورق فولاد
۱۷	۵-۲-۳ تاثیر لایه اکسید بر روی انتقال حرارت ورق فولاد
۱۸	۶-۲ انتقال حرارت از طریق تشعشع و جابجایی
۱۹	۷-۲ حرارت ناشی از کار اصطکاکی
۲۰	۸-۲ انتقال حرارت در ناحیه نورد
۲۱	۸-۲-۱ شار حرارتی معلوم روی مرز تماس
۲۲	۸-۲-۲ ضریب انتقال حرارت جابجایی معلوم روی مرز تماس
۲۳	۸-۲-۳ مقاومت گرمایی معلوم در ناحیه تماس
۲۴	۸-۲-۴ ضریب انتقال حرارت در ناحیه تماس
۲۵	۸-۲-۵ ضریب انتقال حرارت بین دو سطح فلزی در تماس
۲۶	۸-۲-۶ ضریب انتقال حرارت بین سطوح فلزی و سیال موجود
۲۶	۸-۲-۷ انتقال حرارت تشعشعی بین سطوح
۲۷	۸-۲-۸ تاثیر لایه اکسید
	فصل سوم: مدل‌سازی عددی نورد نهایی
۲۸	۱-۳ مشخصات هندسه دامنه حل
۲۸	۱-۱-۳ مشخصات هندسه ورق
۳۰	۲-۱-۳ مشخصات هندسه غلتک
۳۰	۲-۳ شبکه‌سازی

۳۱	..... شبکه‌سازی ورق..... ۱-۲-۳
۳۵	..... شبکه‌سازی غلتک..... ۲-۲-۳
۳۶	..... گسسته‌سازی معادلات حاکم..... ۳-۳
۳۷	..... روش جبری کردن معادلات با استفاده از روش حجم محدود..... ۱-۳-۳
۳۸	..... گسسته‌سازی جملات جابجایی..... ۲-۳-۳
۴۰	..... گسسته‌سازی جملات دیفیوژن..... ۳-۳-۳
۴۲	..... روشهای میانبایی..... ۴-۳-۳
۴۲	..... روش بالادست..... ۵-۳-۳
۴۳	..... روش مرکزی..... ۶-۳-۳
۴۳	..... روش تصحیح تاخیری..... ۷-۳-۳
۴۳	..... گسسته‌سازی جمله چشمه..... ۸-۳-۳
۴۴	..... گسسته‌سازی معادله دیفرانسیل مربوط به ورق..... ۴-۳
۴۵	..... جملات جابجایی..... ۱-۴-۳
۴۶	..... جملات دیفیوژن..... ۲-۴-۳
۴۷	..... میانبایی دما، ضریب هدایت و گرمای ویژه روی سطوح حجمهای کنترل..... ۳-۴-۳
۴۹	..... گسسته‌سازی معادله دیفرانسیل مربوط به غلتک..... ۵-۳
۵۰	..... جملات جابجایی..... ۱-۵-۳
۵۰	..... جملات دیفیوژن..... ۲-۵-۳
۵۰	..... میانبایی دما، ضریب هدایت و گرمای ویژه روی سطوح حجمهای کنترل..... ۳-۵-۳
۵۰	..... تولید حجمهای کنترل روی شبکه ساخته شده..... ۶-۳
۵۲	..... بررسی شرایط مرزی ورق..... ۷-۳
۵۲	..... شرایط مرزی در جهت حرکت ورق..... ۱-۷-۳
۵۳	..... شرایط مرزی در جهت ضخامت ورق..... ۲-۷-۳
۵۴	..... دمای سطح..... ۳-۷-۳
۵۶	..... شرایط مرزی در جهت عرض ورق..... ۴-۷-۳
۵۷	..... بررسی شرایط مرزی غلتک..... ۸-۳
۵۷	..... شرط مرزی در جهت حرکت غلتک..... ۱-۸-۳
۵۷	..... شرایط مرزی در جهت شعاع غلتک..... ۲-۸-۳
۵۸	..... روش حل عددی معادلات غیرخطی..... ۹-۳
۶۱	..... روشهای تکرار..... ۱۰-۳
۶۱	..... روش نقطه به نقطه گوس - سایدل..... ۱-۱۰-۳
۶۲	..... روش خط به خط..... ۲-۱۰-۳
۶۳	..... زیر تخفیف و فوق تخفیف..... ۳-۱۰-۳
۶۵	..... تخفیف از طریق اینرسی..... ۴-۱۰-۳

۶۵	..... ۳-۱۰-۵ معیار همگرایی در روشهای تکرار
	فصل چهارم: ارائه نتایج و بحث درباره آنها
۶۶	..... ۴-۱ نحوه محاسبه ضریب انتقال حرارت در ناحیه تماس
۶۹	..... ۴-۲ بررسی شبکه حل
۶۹	..... ۴-۲-۱ بررسی شبکه حل ورق
۷۲	..... ۴-۲-۲ بررسی شبکه حل غلتک
۷۵	..... ۴-۳ بررسی صحت نتایج
۷۹	..... ۴-۴ بررسی پارامترهای تاثیرگذار روی توزیع دمای ورق
۷۹	..... ۴-۴-۱ بررسی اثر سرعت نورد
۸۱	..... ۴-۴-۲ بررسی اثر گرمای حاصل از تغییر شکل ورق
۸۲	..... ۴-۴-۳ بررسی اثر گرمای حاصل از اصطکاک
۸۴	..... ۴-۴-۴ بررسی اثر لایه اکسید
۸۷	..... ۴-۴-۵ بررسی اثر انتقال حرارت هدایتی در جهت حرکت بار در نورد گرم
۸۸	..... ۴-۴-۶ بررسی اثر انتقال حرارت هدایتی در جهت عرض بار در نورد گرم
۹۲	..... ۴-۵-۱ توزیع دمای ورق در هفت قفسه نورد نهایی
۹۳	..... ۴-۵-۱ نحوه رشد لایه اکسید در طول نورد نهایی
۹۵	..... ۴-۵-۲ توزیع دمای غلتک قفسه دوم نورد نهایی
۹۷	..... ۴-۵-۳ توزیع دمای ورق نورد گرم در طول نورد نهایی
۹۹	..... ۴-۶ نتیجه گیری
۱۰۰	..... ۴-۷ پیشنهادات
۱۰۱	..... مراجع

فهرست نمادها و نشانه‌ها

عدد بیو	Bi
گرمای ویژه	c
ضخامت موثر غلتک	d
ضریب انتقال حرارت جابجایی بین سطح و محیط	h_{conv}
ضریب انتقال حرارت جابجایی در حین خنک کاری با آب	h_w
نصف ضخامت ورودی	H_1
نصف ضخامت خروجی	H_2
ضخامت در نقطه خنثی	H_n
ضریب هدایت حرارتی	k
ضریب هدایتی معادل	k_h
ضریب هدایتی سیال	k_m
نرم دوم مقادیر شیب سطوح	m_q
مقدار سختی	M
فشار در سطح تماس	p
عدد پکله	Pe
جمله چشمه انرژی	\dot{q}
شعاع غلتک	R
مقدار متوسط زبری سطوح	R_a
دمای سطح	T_b

دمای آب خنک کاری	T_w
دمای محیط	T_∞
افزایش دما در اثر کار پلاستیک	ΔT_{def}
سرعت در جهت حرکت ورق	u
سرعت در جهت ضخامت ورق	v
سرعت نقطه خنثی	V_n
سرعت نسبی ورق و غلتک	V_{rel}
سرعت در جهت عرض ورق	w
نصف عرض ورق	W
بیانگر مکان افقی نسبی نقطه خنثی	x_n
ضخامت متوسط فضای خالی	δ_m
ضخامت اکسید	δ_{sc}
ضریب صدور تشعشعی	ε
کل زاویه تماس	θ_0
زاویه تماس در نقطه خنثی	θ_n
ضریب اصطکاک	μ_f
سرعت چرخشی غلتک	ω
چگالی	ρ
تنش تسلیم فلز	σ

چکیده

در فرآیند نورد گرم پیش‌بینی توزیع دما در ورق از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا دما یک پارامتر مهم متالورژیکی در جریان نورد است. خواص فولاد تولیدی، توان مورد نیاز غلتکها و ابعاد ورق تولیدی به توزیع دما بستگی دارند. این پایان‌نامه در پی آن است که مدل جامعی را برای پیش‌بینی توزیع دمای ورق در فرآیند نورد نهایی ارائه کند. این مدل سه‌بعدی بوده و در آن از هیچ یک از مکانیزمهای انتقال حرارت صرف‌نظر نمی‌شود. میدان سرعت در ناحیه تماس به‌طور کامل مدل شده و سرعت در راستای ضخامت ورق حذف نمی‌شود. انتقال حرارت غلتک نیز به‌طور همزمان با انتقال حرارت ورق مدل می‌شود تا دمای ورق با دقت بیشتری محاسبه شود. یکی از پارامترهای مهم در فرآیند نورد گرم، نحوه خنک‌کاری غلتکهای نورد گرم است. ضریب انتقال حرارت در بخشهایی از سطح غلتک که پاشش آب وجود دارد، وابسته به کمیت‌هایی مانند زاویه پاشش، فاصله جت آب تا سطح غلتک و فشار آب است. در فرآیند نورد، در نتیجه استفاده از غلتک برای تغییر شکل ورق، یک سطح تماس بین غلتک و ورق ایجاد می‌گردد. روشهای زیادی برای مدل کردن انتقال حرارت در ناحیه تماس ورق با غلتک وجود دارد. در این پایان‌نامه به مهم‌ترین این روشها اشاره شده و معایب و برتری هر یک از این روشها بررسی شده‌است. همچنین این مدل مبتنی بر روابط تجربی به‌منظور در نظر گرفتن ضرایب انتقال حرارت جابجایی در هر منطقه از ورق، ضریب اصطکاک در ناحیه تماس بین ورق و غلتک، فشار متوسط غلتکها، ضریب صدور تشعشعی و نحوه تغییر خواص فیزیکی فلز با دما است. در این مدل، گرمای حاصل از اصطکاک بین ورق و غلتکها، تولید گرما از طریق کار پلاستیک، اتلاف گرمایی به‌دلیل وجود آب برای خنک‌کاری غلتکها، اتلاف از طریق تشعشع و جابجایی، سرعت نورد، کاهش پیوسته ضخامت ورق در طول نورد نهایی و اثر رشد لایه اکسید روی ورق مورد بررسی قرار گرفته‌است. با استفاده از روش عددی حجم محدود معادلات دیفرانسیل حاکم گسسته شده و به کمک روشهای تکرار دستگاه معادلات جبری حل شده‌است. استقلال جوابها از شبکه محاسباتی با تغییر سائز شبکه مورد استفاده نشان داده شده‌است. به‌علاوه صحت جوابها در مقایسه با نتایج چاپ شده برای شرایط خاص بررسی شده‌است. تاثیر سرعت نورد، گرمای حاصل از اصطکاک بین ورق و غلتکها، تولید گرما از طریق کار پلاستیک، لایه اکسید و انتقال حرارت هدایتی در راستای طول و عرض ورق، بر روی چگونگی توزیع دمای ورق نشان داده شده‌است. جهت بررسی نتایج حاصل از مدل‌سازی هفت قفسه نورد نهایی مجتمع فولاد مبارکه اصفهان، مقایسه‌ای بین نتایج بدست آمده با نتایج عددی و تجربی موجود انجام گرفته‌است.

کلمات کلیدی: ۱- فرآیند نورد نهایی ۲- توزیع دمای ورق ۳- مدل‌سازی گرمایی ۴- مدل‌سازی عددی

فصل اول

مقدمه

۱-۱ فرآیند نورد گرم

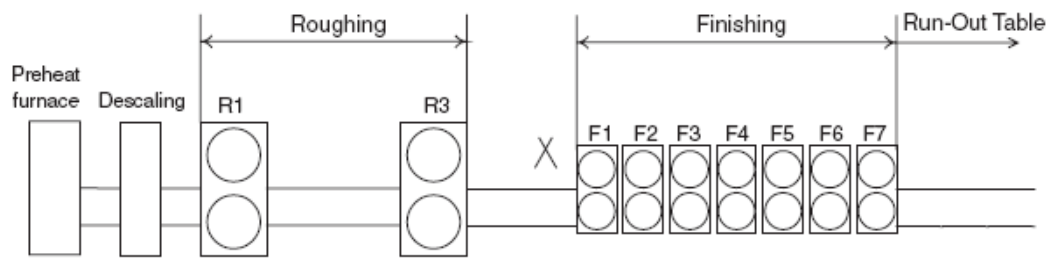
نورد گرم یکی از روشهای تولید ورقهای فلزی با ضخامت کم است. در این روش ابتدا تختال تولید شده در کوره پیشگرم با دمای بالا قرار می‌گیرد. پس از خروج تختال از کوره پیش گرم یک پوسته اکسیدی روی سطح تختال تشکیل می‌شود. به منظور برطرف ساختن این پوسته اکسیدی، عملیات پوسته شویی انجام گرفته که تاثیر زیادی بر افت دمای سطح تختال دارد.

نورد خشن^۱ مرحله پس از پوسته شویی است. در این مرحله قطعه کار چندین مرتبه از بین غلتکها عبور می‌کند تا به تدریج به ابعاد مورد نظر برسد. در طی این فرآیند توزیع دمای بار تحت تاثیر چند عامل از جمله انتقال حرارت به محیط و گرمای ناشی از تغییر شکل پلاستیک قرار می‌گیرد و ضخامت تختال ۱۵ تا ۳۰ درصد کاهش می‌یابد. نورد خشن دارای ۲ تا ۳ قفسه است. پس از آخرین قفسه نورد خشن، ورق وارد مرحله نورد نهایی^۲ می‌گردد.

بار عبوری از میز انتقال به منظور تولید ورق به سمت قفسه‌های نورد نهایی فرستاده می‌شود. این خط از ۵ تا ۷ قفسه تشکیل شده است، که در آن ضخامت ورق به ۱/۸ تا ۳ میلیمتر کاهش می‌یابد. دمای ورق در خروج از نورد نهایی تا حدود ۹۰۰ سانتیگراد کاهش می‌یابد. مراحل خط نورد گرم در شکل ۱-۱ نشان داده شده است.

^۱ Roughing Mill

^۲ Finishing Mill



شکل ۱-۱ مراحل خط نورد گرم

مکانیزم انتقال حرارت را در فرآیند نورد نهایی به صورت زیر دسته‌بندی کرده‌اند:

- اتلاف گرمایی از طریق تشعشع بین ورق، غلتک و محیط
- اتلاف گرمایی از طریق جابجایی بین ورق، غلتک و محیط
- اتلاف گرمایی به دلیل وجود آب برای خنک کاری غلتکها
- اتلاف گرمایی از طریق هدایت بین ورق و غلتک در ناحیه تغییر شکل
- تولید گرما در بخش نورد از طریق کار پلاستیک
- تولید گرما در بخش نورد از طریق کار اصطکاک

برای مطالعه حرارتی، به توزیع درجه حرارت ورق و غلتک نیاز است. برای تخمین صحیح درجه حرارت واقعی ورق در حال حرکت و غلتک در حال گردش، آثار خنک کنندگی غلتکهای در حال کار و دمای حاصل از حرارت تولید شده ناشی از اصطکاک سطح در حال تماس و دمای حاصل از تغییر شکل پلاستیک ورق در ناحیه تماس باید کاملاً توصیف و بررسی شوند.

۲-۱ مطالعه کارهای انجام شده در زمینه مدل سازی نورد گرم

در سالهای اخیر، فرایند نورد گرم توسط محققین بسیاری تحت بررسی قرار گرفته است. به عنوان مثال افراد زیر تحقیقاتی در این زمینه انجام داده‌اند.

دو اداس و سامارایسکرا^۱ [۱] با استفاده از روابط تجربی و روش اختلاف محدود، توزیع دما در ورق و غلتکها را پیش‌بینی کرده‌اند. کرنی^۲ [۲] و استیون^۳ [۳] توزیع دما و تنشهای حرارتی را در نورد بررسی کرده‌اند. براون^۴ [۴] توزیع دما را به کمک روش المان محدود نیمه تحلیلی با فرض خواص فیزیکی ماده مستقل از درجه حرارت و توزیع

^۱.Devadas & Samarasekera

^۲.Cerni

^۳.Steven

^۴.Brawn

کرنش همگن در منطقه تغییر شکل، محاسبه نمود. هوانگ و جوان و کانگ^۱ [۵] با استفاده از روش المان محدود، توزیع کرنش، دما و نیروی لازم برای نورد ورق را محاسبه کرده‌اند. لاسرواس^۲ [۶] توزیع دما را توسط روش تفاضل محدود بدست آورده و به وسیله نتیجه حاصل، ساختار نهایی فلز را پیش‌بینی کرده‌است. کمپ^۳ [۷] توزیع کرنش و توزیع دما را در حین نورد گرم میل‌گرد به کمک روش تفاضل محدود محاسبه نموده‌است. لاهوتی^۴ [۸] به کمک روش تفاضل محدود توزیع کرنش و دما را در نقاط مختلف ورق پیش‌بینی کرده‌است. وساتوسکی^۵ [۹] روابطی را برای تعیین کرنش و توزیع دما در مراحل مختلف نورد گرم میل‌گرد پیشنهاد کرده‌است. جسویت و زو^۶ [۱۰] به صورت آزمایشگاهی، درجه حرارت و شار حرارتی و ضریب هدایت حرارتی را در طول فرآیند نورد اندازه‌گیری نموده‌اند.

سراج زاده، کریمی و موکیاروی [۱۱] در سال ۲۰۰۲ به بررسی توزیع دمای تختال در نورد گرم پرداختند. آنها با ارائه یک مدل ریاضی به روش المان محدود توزیع دما و تغییرات متالورژیکی در فولاد را حین نورد پیش‌بینی کردند. ولادیمیر پانکوویک^۷ [۱۲] در سال ۲۰۰۷ با استفاده از یک مدل گرمایی یک بعدی و به کمک روش عددی اختلاف محدود، توزیع دمای ورق در نورد گرم را محاسبه نمود و با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه کرد. وی رشد لایه اکسید^۸ روی ورق فولاد در حین نورد نهایی را در مدل خود مدنظر قرار داد.

امیر همایون مقدادی [۱۳] در سال ۱۳۸۴ توزیع دما در تختال را در فرآیند نورد خشن شبیه‌سازی نمود. وی دمای نهایی تختال پس از عبور از ناحیه پوسته‌شویی و عبور از اولین قفسه نورد خشن را با استفاده از یک مدل گرمایی یک بعدی و روش عددی حجم محدود محاسبه نمود.

چرچیل^۹ [۱۴] بر اساس تئوری لایه مرزی آرام روابط خود را برای جریان جابجایی مرکب جهت بدست آوردن عدد نوسلت موضعی ارائه داده است. او با ترکیب عدد نوسلت موضعی برای جریان اجباری خالص و عدد نوسلت موضعی برای جریان آزاد خالص عدد نوسلت برای مرکب را بدست آورد. این کار برای صفحات قائم و افقی و نیز کروی انجام شده است.

¹ .Kong & Joun & Hwang

² .Lausraous

³ .Kemp

⁴ .Lahoti

⁵ .Wasatowski

⁶ .Jeswiet & Zo

⁷ .Vladimir Panjkovic

⁸ .scale layer

⁹ Cherchill

آرمالی و چن^۱ [۱۵] روابط خود را جهت بدست آوردن نوسلت موضعی و نوسلت متوسط برای جریان جابجایی مرکب آرام برای صفحه قائم مایل و افقی با شدت انتقال حرارت ثابت، ارائه داده اند. نتایج آنها برای اعداد پرانتل بین ۰/۱ تا ۱۰۰ قابل قبول است و برای هر دو جریان موافق و مخالف بدست آمده است.

در زمینه نحوه مدل کردن ناحیه تماس کارهای زیادی توسط محققان انجام شده است. برخی از محققان فقط ورق یا غلتک را مدل کرده و برخی دیگر ورق و غلتک را به طور همزمان شبیه سازی کرده اند. پیرامون این موضوع و محققانی که در این زمینه کار کرده اند، در فصل دوم توضیحات کاملی ارائه خواهد شد.

برای محاسبه ضریب انتقال حرارت در قسمتهایی که خنک کاری غلتکها وجود دارد، مطالعات گسترده ای انجام شده است. تسنگ^۲ و همکاران [۱۶] مقدار این ضریب را بین ۱ تا ۱۱ کیلووات بر مترمربع سانتیگراد، در شرایطی که دمای سطح زیر ۱۰۰ درجه سانتیگراد باشد و ۶ تا ۴۰ کیلووات بر مترمربع سانتیگراد، در شرایطی که دمای سطح بیشتر از ۱۰۰ درجه سانتیگراد باشد، گزارش کرده اند.

۱-۳ اهداف و اهمیت کار حاضر

این پایان نامه در پی آن است که توزیع دمای ورق در فرآیند نورد نهایی را پیش بینی کند. بدین منظور، ابتدا معادلات فیزیکی حاکم در نورد نهایی استخراج شده، و در ادامه با استفاده از روش عددی، مدل ریاضی انتقال حرارت حل گردیده و در نهایت توزیع دما در فرآیند نورد ورق محاسبه می شود. این مدل مبتنی بر روابط تجربی به منظور در نظر گرفتن ضرایب انتقال حرارت جابجایی در هر منطقه از ورق، ضریب اصطکاک در ناحیه تماس بین ورق و غلتک، فشار متوسط غلتکها، ضریب صدور تشعشعی و نحوه تغییر خواص فیزیکی فلز با دما است. برای بدست آوردن دمای ورق با دقت بیشتر، غلتک نیز به طور همزمان شبیه سازی شده و معادلات انتقال حرارت ورق و غلتک با هم حل می شوند. در نتیجه با داشتن توزیع دمای سطح غلتک در ناحیه تماس می توان دمای ورق را با دقت بیشتری بدست آورد.

هر کدام از محققانی که در زمینه نورد گرم مطالعه نمودند در مدل های خود با استفاده از فرضهایی به ساده سازی مدل خود پرداختند، تفاوت این پایان نامه با کارهای انجام شده قبلی در آنست که به دنبال معرفی یک مدل کاملتر می باشد که بیش از پیش بیانگر واقعیت فیزیکی حاکم بر نورد گرم است. بنابراین معادله انتقال حرارت در حالت سه بعدی در نظر گرفته شده و از انتقال حرارت در جهت حرکت و همچنین از انتقال حرارت در جهت عرض ورق صرف نظر نشده است. میدان سرعت در ناحیه تماس به طور کامل مدل شده و سرعت در راستای ضخامت ورق حذف نمی شود.

¹ Armaly & Chen

² Tseng

در این مدل، گرمای حاصل از اصطکاک بین ورق و غلتکها، تولید گرما از طریق کار پلاستیک، اتلاف حرارتی به دلیل وجود آب برای خنک کاری غلتکها، اتلاف از طریق تشعشع و جابجایی، سرعت نورد، کاهش پیوسته ضخامت ورق در طول نورد نهایی و اثر رشد لایه اکسید روی ورق مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

در فرآیند نورد گرم پیش‌بینی توزیع دما در ورق از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا دما یک پارامتر مهم متالورژیکی در جریان نورد است. خواص فولاد تولیدی، توان مورد نیاز غلتکها و ابعاد ورق تولیدی به توزیع دما بستگی دارند.

محتوای فصلهای بعدی بدین صورت است که در فصل دوم نحوه مدل‌سازی گرمایی نورد نهایی و در فصل سوم چگونگی مدل‌سازی عددی نورد نهایی توضیح داده خواهد شد. در نهایت نیز در فصل چهارم نتایج بدست آمده ارائه شده و درباره آنها بحث خواهد شد.

فصل دوم

مدل سازی گرمایی نورد نهایی

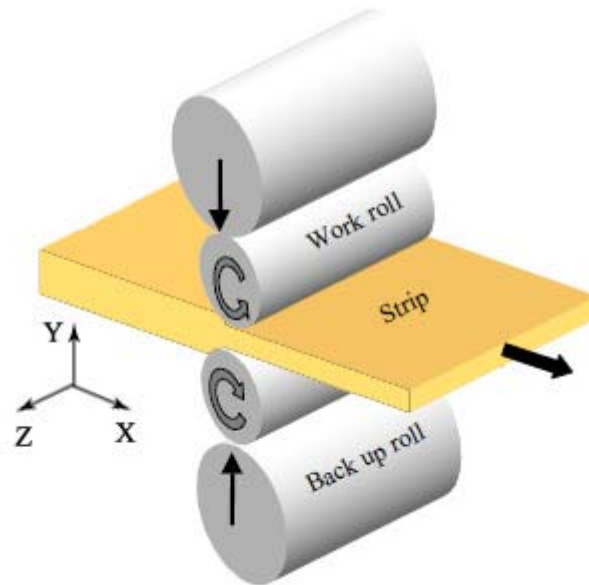
۲-۱ تعریف مساله

در این پروژه با استفاده از یک مدل ریاضی انتقال حرارت و به کمک روش حل عددی، توزیع درجه حرارت در مسأله نورد نهایی ورق پیش‌بینی خواهد شد. این مدل مبتنی بر روابط تجربی برای در نظر گرفتن ضرایب انتقال حرارت جابجایی در هر منطقه از ورق، ضریب اصطکاک در ناحیه تماس بین ورق و غلتک، فشار متوسط غلتکها، ضریب صدور در انتقال حرارت تشعشعی و چگونگی تغییر خواص فیزیکی فلز با دما است. این مدل همچنین شامل مواردی چون اثر انتقال حرارت جابجایی و تشعشعی، حرارت تولید شده در اثر اصطکاک بین ورق و غلتک، حرارت ناشی از تغییر شکل پلاستیک، اثر سرعت ورق و تاثیر لایه اکسید است. فرض بر این است که ورق با دمای مشخص وارد ناحیه نورد نهایی می‌شود و پس از فرآیند نورد، از آن خارج می‌شود. این پروژه در پی آن است که توزیع دمای ورق حین عبور از قفسه‌های نورد نهایی را محاسبه کند.

۲-۲ معادله انرژی حاکم در انتقال حرارت ورق فولاد

ابتدا معادله انرژی در حالت کلی در دستگاه کارترین بیان شده و سپس با توجه به فرضیاتی که شرح داده خواهد شد به ساده‌سازی جملات آن پرداخته می‌شود. پس از آن معادله دیفرانسیل حاصله را جبری نموده و این معادله را برای

تمام گره‌های داخلی ناحیه شبکه‌بندی شده ورق در نظر گرفته می‌شود. آنگاه دستگاه معادلات حاصله با یک روش معمول حل می‌گردد. در فصل بعد جزئیات این مراحل توضیح داده خواهد شد.



شکل ۱-۲ طرح شماتیک سه‌بعدی فرآیند نورد ورق

معادله انرژی در حالت کلی و سه‌بعدی در دستگاه کارترین در نگاه اویلری به صورت زیر است.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_s \frac{\partial T_s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_s \frac{\partial T_s}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_s \frac{\partial T_s}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho_s c_s \left(u \frac{\partial T_s}{\partial x} + v \frac{\partial T_s}{\partial y} + w \frac{\partial T_s}{\partial z} + \frac{\partial T_s}{\partial t} \right) \quad (1-2)$$

که در آن \dot{q} جمله تولید و یا چشمه انرژی در واحد حجم، k ضریب هدایت فولاد، ρ چگالی فولاد، c گرمای ویژه فولاد و u ، v و w به ترتیب سرعت ورق در جهات X و Y و Z است. جهات ذکر شده در شکل ۱-۲ قابل مشاهده است. در این پروژه ضریب هدایت و گرمای ویژه وابسته به دما و چگالی مستقل از دما فرض می‌شود. حال با در نظر گرفتن فرضیهایی، معادله انرژی ساده می‌گردد.

معادله انرژی در حالت پایا مورد نظر بوده و در نتیجه جمله $\partial T_s / \partial t$ از رابطه ۱-۲ حذف خواهد شد.

ورق فقط در جهت طولی یا محور X حرکت دارد ولی در حین نورد، ورق در حال تغییر شکل بوده و در لایه‌های سطحی، جرم در جهات دیگر نیز حرکت می‌کند. در عمل سرعت جریان در جهت Z صفر است. مقدار سرعت در جهت طولی در ناحیه تماس ورق با غلتک ثابت نبوده و در حال تغییر است. مقدار این سرعت را می‌توان با کمک سرعت نقطه خنثی مشخص نمود. نقطه خنثی به جایی گفته می‌شود که سرعت ورق با سرعت غلتک برابر می‌شود. بنابراین سرعت نقطه خنثی، V_n به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$V_n = R \cdot \omega \quad (۲-۲)$$

در رابطه بالا R و ω به ترتیب شعاع و سرعت چرخشی غلتک است. در نتیجه مقدار سرعت در جهت طولی، u در سراسر نورد از رابطه زیر بدست می آید.

$$u = \frac{V_n H_n}{H} \quad (۳-۲)$$

در رابطه بالا H ضخامت مکانی است که سرعت در آن نقطه مجهول بوده و H_n ضخامت در نقطه خنثی است. روابط مختلفی برای محاسبه ضخامت نقطه خنثی موجود است. رابطه زیر یکی از روابط ساده برای محاسبه ضخامت نقطه خنثی است [۱۷].

$$H_n = \frac{H_1 + 3H_2}{4} \quad (۴-۲)$$

همچنین می توان از رابطه زیر استفاده نمود. این رابطه پیچیدگیهای هندسی ناحیه تماس را در نظر گرفته است [۱۷].

$$H_n = H_2 + R \theta_n^2 \quad (۵-۲)$$

در رابطه بالا θ_n مربوط به زاویه تماس در نقطه خنثی است. θ_n از رابطه زیر محاسبه می شود [۱۷].

$$\theta_n = \cos^{-1} \left(1 - \frac{(H_1 - H_2)x_n^2}{R} \right) \quad (۶-۲)$$

در رابطه بالا x_n بیانگر مکان افقی نسبی نقطه خنثی بوده و از رابطه زیر حاصل می شود [۱۷].

$$x_n = 0.475 \left(1 - 3.054 \sqrt{\frac{H_1 - H_2}{R}} \right) \quad (۷-۲)$$

لازم به ذکر است، نتایج حاصل از روابط ۲-۴ و ۲-۵ بسیار نزدیک به هم است.

در ناحیه تماس، مقدار سرعت در جهت محور y نسبت به سرعت در جهت حرکت ورق کوچک بوده و عمدتاً در کارهای انجام شده از آن صرف نظر شده است. عملاً با حذف این سرعت، نحوه واقعی جریان جرم در ناحیه تماس ورق با غلتک به درستی مدل نمی شود. به همین علت می توان به کمک معادله پیوستگی و با حذف سرعت در جهت z مقدار سرعت در جهت محور y را بدست آورد. معادله پیوستگی در حالت دوبعدی به صورت زیر است.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (۸-۲)$$

با جایگذاری رابطه ۲-۳ در رابطه بالا، سرعت در جهت محور y به صورت زیر بدست می آید.

$$v = \left(\frac{V_n \times H_n}{H^2} \right) \left(\frac{dH}{dx} \right) y \quad (۹-۲)$$

بدیهی است که مقدار سرعت در جهت محور y در قبل و بعد از ناحیه تماس صفر است.