

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۱۴.....	چکیده
۱۵.....	فصل اول
۱۵.....	مقدمه
۱۵.....	۱-۱ دسته بندی فرآیندهای نور
۱۶.....	۲-۱ دستگاه های نور
۲۰.....	۳-۱ تاریخچه و فعالیت های انجام شده در زمینه پیش بینی تاج حرارتی
۲۳.....	۴-۱ تغییرات در پروفیل حرارتی غلتک در کلاف های مختلف
۲۷.....	۵-۱ اندازه گیری لحظه به لحظه پروفیل گرمایی غلتک
۲۸.....	۶-۱ اهمیت پروژه و اهداف
۲۹.....	۷-۱ ساختار پایان نامه
۳۱.....	فصل دوم
۳۱.....	اثرات تاج حرارتی بر کیفیت ورق
۳۱.....	۱-۲ معیار ایجاد موج در ورق
۳۴.....	۲-۲ موج و عیوب شکلی در محصولات نور و بررسی عوامل مؤثر بر آن
۳۷.....	۱-۲-۲ تعریف شکل ورق
۳۸.....	۲-۲-۲ تعریف تختی ورق
۴۰.....	۳-۲ اثر انبساط حرارتی غلتک روی تاج ورق
۴۱.....	فصل سوم

- تئوری انتقال حرارت در غلتک های نورد ۴۱
- ۱-۳ مدل شکل حرارتی ۴۱
- ۲-۳ مدل سازی دو بعدی حرارتی غلتک ۴۱
- ۳-۳ انقباض و انبساط حرارتی غلتک ۴۳
- ۴-۳ معادلات دیفرانسیل انرژی حاکم بر غلتک ۴۵
- ۵-۳ شرایط مرزی حاکم بر مسئله ۴۸
- ۱-۵-۳ شرط مرزی انتقال حرارت از قسمت ما بین ورق و غلتک ۴۹
- ۲-۵-۳ شرط مرزی انتقال حرارت بین غلتک کاری و پشتیبان ۵۸
- ۳-۵-۳ شرط مرزی انتقال حرارت در فاصله ای از سطح غلتک ۶۰
- ۴-۵-۳ شرط مرزی جابجایی از طریق خنک کن های اجباری ۶۲
- ۵-۵-۳ شرط مرزی جابجایی سطح غلتک با آب ۶۴
- ۶-۵-۳ شرط مرزی تشعشع از ورق به غلتک ۶۵
- ۷-۵-۳ شرط مرزی انتقال حرارت از یاتاقان ها ۶۹
- ۸-۵-۳ شرط اولیه درجه حرارت غلتک ۷۱
- فصل چهارم ۷۲
- تعریف مسئله و روش عددی برای حل آن ۷۲
- ۱-۴ فرمول بندی ریاضی مدل تاج حرارتی ۷۲
- ۲-۴ انتقال حرارت در غلتک های کاری در برنامه حاضر ۷۳
- ۱-۲-۴ معادله دیفرانسیل انتقال حرارت ۷۳
- ۲-۲-۴ شرایط مرزی در پژوهش حاضر ۷۶
- ۳-۴ انتقال حرارت در گردن غلتک کار ۸۵

۸۶	..... ۱-۳-۴ معادله دیفرانسیل
۸۷	..... ۴-۴ انتقال حرارت در غلتک پشتیان
۸۷	..... ۱-۴-۴ معادله دیفرانسیل
۸۹	..... ۵-۴ روش عددی
۹۰	..... ۱-۵-۴ شبکه بندی
۹۱	..... ۲-۵-۴ معادله گسسته سازی
۹۳	..... ۳-۵-۴ حل تکراری معادلات جبری
۹۴	..... ۶-۴ توصیف برنامه کامپیوتری
۹۸	..... فصل پنجم
۹۸	..... نتایج و پیشنهادها
۹۸	..... ۱-۵ نتایج حاصل از برنامه کامپیوتری
۹۹	..... ۱-۱-۵ دمای غلتک
۱۰۲	..... ۲-۱-۵ تاج حرارتی غلتک
۱۰۲	..... ۲-۵ تاثیر پارامترهای مختلف بر تاج حرارتی غلتک
۱۰۲	..... ۱-۲-۵ تاثیر سرعت زاویه ای غلتک بر تاج حرارتی آن
۱۰۳	..... ۲-۲-۵ تاثیر ضخامت ورودی بر تاج حرارتی غلتک
۱۰۴	..... ۳-۲-۵ تاثیر شعاع غلتک بر تاج حرارتی آن
۱۰۴	..... ۳-۵ بررسی صحت نتایج
۱۰۷	..... ۴-۵ نتیجه گیری و پیشنهادها
۱۰۹	..... مراجع :

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: اجزاء دستگاه نورد با دو غلتک ۱۷
- شکل ۲-۱: قفسه نورد با ۲ غلتک کاری ۲ غلتک پشتیبان ۱۸
- شکل ۳-۱: نمایی از پاشش آب توسط غلتک ۱۹
- شکل ۴-۱: تأثیر زمان تماس غلتک بر انبساط مرکزی غلتک‌های بالا و پایین [۲۱] ۲۴
- شکل ۵-۱: پروفیل انبساط متوسط برای انبساط مرکزی واحد در مقادیر مختلف پهنای ورق [۲۱] ۲۴
- شکل ۶-۱: نمایش تاج جزئی و کلی ۲۵
- شکل ۷-۱: تغییرات تاج حرارتی غلتک به صورت تابعی از زمان [۲۲] ۲۶
- شکل ۸-۱: رابطه بین تاج حرارتی غلتک و نرخ پیمایش خط [۲۲] ۲۶
- شکل ۹-۱: شکل پروفیل حرارتی در برنامه‌های نورد مختلف [۲۳] ۲۷
- شکل ۱۰-۱: افزایش شعاع غلتک در قفسه‌های F_6, F_4, F_2 در یک خط ورق گرم به عرض ۵۸ اینچ در طول زمان نورد یک کلاف [۲۵] ۳۲
- شکل ۱-۲: چگونگی اثر شکل غلتک بر ایجاد موج در ورق ۳۳
- شکل ۲-۲: پارامترهایی که برای مشخص کردن هندسه ورق استفاده می‌شوند ۳۳
- شکل ۳-۲: نمایش گرافیکی معیار معادله ۱-۲ ۳۴
- شکل ۴-۲: پدیده‌هایی که روی پروفیل غلتک‌های کاری اثر می‌گذارد ۳۵
- شکل ۵-۲: نحوه و اثر اعمال بارهای مختلف روی غلتک و ورق ۳۶
- شکل ۶-۲: اصلی‌ترین عیوب شکلی ورق‌های نورد شده ۳۶
- شکل ۷-۲: انواع اصلی شکل ورق ۳۸

- شکل ۳-۱: افزایش دمای غلتک در زمان نورد گرم [۳۱]..... ۴۳
- شکل ۳-۲: منحنی های سرد شدن برای غلتک های کاری از جنس چدن که در محیط هوا سرد می شوند. برای مقادیر انبساط اولیه ۰/۰۱ و ۰/۰۲ و ۰/۰۳ اینچ [۲۱].....
- ۴۵
- شکل ۳-۳: موقعیت ورق و غلتک و شرایط مرزی مختلف در موقع نورد..... ۴۸
- شکل ۳-۴: مقادیر سرعت خروجی و ورودی ورق در لحظه عبور از بین غلتک ها..... ۵۴
- شکل ۳-۵: موقعیت عایق حرارتی..... ۶۱
- شکل ۳-۶: اثر پاشش نازل در ربع اول مثلثاتی بر روی غلتک..... ۶۳
- شکل ۳-۷: ناحیه ورود تشعشع از ورق به غلتک و نمودار انتقال حرارتی این ناحیه..... ۶۵
- شکل ۳-۸: انتهای سمت راست غلتک کاری در تماس با گردن غلتک..... ۷۰
- شکل ۴-۱: طرح کلی نمایی از غلتک ها..... ۷۳
- شکل ۴-۲: غلتک های کاری و مختصات مرجع آن ها..... ۷۴
- شکل ۴-۳: کمان تماس بین غلتک و ورق..... ۷۶
- شکل ۴-۴: توزیع فشار بین غلتک و ورق..... ۸۰
- شکل ۴-۵: تغییر شکل سطوح واصل بین غلتک ها..... ۸۲

- شکل ۴-۶: انتهای سمت راست غلتک کار ۸۵
- شکل ۴-۷: انتهای سمت چپ غلتک کار ۸۵
- شکل ۴-۸: شبکه بندی غلتک کار ۹۰
- شکل ۴-۹: حجم کنترل برای انتگرال گیری از معادله دیفرانسیل ۹۱
- شکل ۴-۱۰: تقسیم بندی غلتک در جهت θ ۹۴
- شکل ۵-۱: دمای سطح غلتک ۹۹
- شکل ۵-۲: دمای سطح داخلی غلتک ۱۰۰
- شکل ۵-۳: موقعیت سطوح داخلی غلتک ۱۰۱
- شکل ۵-۴: دمای میانگین افزایشی غلتک ۱۰۱
- شکل ۵-۵: تاج حرارتی غلتک ۱۰۲
- شکل ۵-۶: تأثیر سرعت زاویه ای غلتک بر تاج حرارتی ورق ۱۰۳
- شکل ۵-۷: تأثیر ضخامت ورودی روی تاج حرارتی غلتک ۱۰۳
- شکل ۵-۸: تأثیر شعاع غلتک بر تاج حرارتی آن ۱۰۴
- شکل ۵-۹: نمودار تغییرات دمای غلتک [۴۱] ۱۰۵
- شکل ۵-۱۰: تغییرات دما در لایه های مختلف غلتک برای یک دور چرخش [۴۳] ۱۰۵
- شکل ۵-۱۱: دمای غلتک در سطوح مختلف آن و در یک دور چرخش غلتک ۱۰۶
- شکل ۵-۱۲: تغییرات دمای میانگین غلتک [۴۳] ۱۰۶
- شکل ۵-۱۳: تاج حرارتی اندازه گیری شده برای یک برنامه نورد [۴۴] ۱۰۷

فهرست جداول

جدول ۱-۳: ترکیب شیمیایی برای نوعی از غلتک های کاری و پشتیبان [۲۱].....	۴۴
جدول ۲-۳۱: ضرایب a_4 و a_5 برای شرایط مختلف.....	۵۰
جدول ۳-۳: مقادیر ضریب k_1 برای سرعت های مختلف غلتک.....	۵۷
جدول ۱-۵: پارامتر های نورد.....	۹۹

چکیده:

نیاز روز افزون صنایع به تولید ورق های با کیفیت بالاتر زمینه های تحقیقات گسترده ای را در کارخانه های نورد پدید آورده است. میزان تختی ورق یکی از جنبه های مهم کیفیت برای مصرف کنندگان است. عیوب ابعادی ورق مانند محدب یا مقعر بودن پروفیل و یا موج کناری و مرکزی باعث کاهش کیفیت محصولات می شود. پروفیل نهایی ورق، حاصل تاج^۱ اولیه غلتک، تاج خمشی و تخت شدگی غلتک، تاج سایشی غلتک و تاج حرارتی غلتک می باشد. در فرآیند نورد ورق، تاج حرارتی غلتک های کاری به عنوان یک عامل مؤثر برای دستیابی به تختی مطلوب محصولات مطرح است. با دانستن تاج حرارتی غلتک و عوامل دیگری که باعث ایجاد تاج در غلتک می شوند می توان به کمک عملگرهای مختلف که اغلب صنایع نورد به برخی از آن ها مجهز می باشند، پروفیل و تختی ورق را کنترل نمود. این پایان نامه فرمول بندی ریاضی ایجاد تاج حرارتی را ارائه می کند. با توجه به حرارت انتقال یافته به غلتک در سطح تماس با ورق و همچنین حرارت ناشی از تابش انرژی حرارتی به غلتک و حرارت دفع شده ناشی از پاشش آب توسط نازل ها و انتقال حرارت به محیط در هر لحظه به صورت دینامیکی، وضعیت دمای غلتک کار قابل محاسبه است. بر اساس فرمول بندی ریاضی یک برنامه کامپیوتری نوشته شده است که دمای غلتک کار و در نتیجه تاج حرارتی آن را محاسبه می کند. مقایسه نتایج حاصل از این برنامه با سایر منابع در دسترس انطباق خوبی را نشان می دهد؛ به این ترتیب امکان بکارگیری این برنامه در خط نورد فراهم می گردد.

¹ crown

فصل اول

مقدمه

فرآیند نورد از فرآیندهای شناخته شده برای تولید فرآورده های فلزی به ویژه فولادها با شکل ها و ابعاد مختلف است. از میان انواع مختلف فرآیندهای نورد، نورد تخت از پرکاربردترین فرآیندهاست به طوری که در کشورهای صنعتی ۴۰ تا ۶۰ درصد محصولات حاصل از فرآیندهای مختلف نورد، به وسیله نورد تخت ایجاد می شود [۱ و ۲].

فرآیند نورد به فرآیندی گفته می شود که به کمک حرکت خلاف جهت دو غلتک و فشار حاصل از غلتک ها تغییر ضخامت برای قطعه کار مورد نظر حاصل می شود. در این فرآیند ماده خام ورودی به کمک نیروهای وارد شده از طرف غلتک ها به شکل ها و ابعاد دلخواه تغییر می یابد. این فرآیند حداقل با دو غلتک انجام می شود که این غلتک ها نسبت به قطعه کار بسیار بزرگ تر و سنگین تر هستند و برای به چرخش در آوردن آن ها نیاز به توان زیادی است از این رو در بعضی مواقع از غلتک هایی کوچک که به وسیله غلتک هایی بزرگ تر پشتیبانی می شوند استفاده می گردد [۱].

نورد از متداول ترین فرایندهای فلز کاری است، زیرا ظرفیت تولید آن بسیار زیاد است و همچنین دقت زیادی در کنترل کیفی و کمی محصول نهایی دارد. در تغییر شکل پلاستیک فلز بین غلتکها و بر اثر اعمال فشار غلتکها، تنش های فشاری زیادی به قطعه وارد می شود.

اعمال تنشهای فشاری به همراه دوران غلتکها و اختلاف سرعت خطی غلتک ها و فلز، منجر به ایجاد اصطکاک و نتیجتاً بروز تنش های سطحی می شود و همچنین تنش های سطحی سبب کشیدن فلز به درون شکاف غلتکی (فاصله میان دو غلتک) می گردد.

۱-۱ دسته بندی فرایندهای نورد

نورد عبارت است از یک فرایند کار پلاستیک که بر روی فلز بین دو غلتک در حال چرخش انجام می گیرد.

انواع نورد و روش های مختلف آن براساس شرایط و کاربردهای مختلف شکل می گیرند، که عبارتند از:

- ۱) جهت نورد (نورد طولی، نورد عرضی و نورد پیچی)
- ۲) وضعیت حرکت غلتک های نورد (پیوسته و یا رفت و برگشتی)
- ۳) وضعیت حرارتی (دما) فلز (نورد سرد، نورد گرم و نورد داغ)
- ۴) شکل محصول نورد شده (ورق، شمش یا مقاطع ساختمانی)

چنانچه محورهای غلتک ها موازی بوده و دارای قطر و سرعت دورانی یکسان باشند و در خلاف جهت هم دیگر چرخش کنند و قطعه کار از نظر خواص مکانیکی همگن باشد و تنها با نیرو و گشتاور غلتک ها حرکت کند، فرایند نورد طولی نامیده می شود و بسته به این که غلتک های کاری صاف و یا فرم دار باشند، محصول نهایی ورق یا مقاطع ساختمانی خواهد بود.

اگر یک فرایند شکل دهی در دمایی چنان بالا انجام گیرد که در آن دما، نرخ نرم شدن ناشی از حرارت با نرخ کار سختی حاصل از فرایند قابل مقایسه باشد، یک فرایند گرم کاری (کار گرم) نامیده می شود.

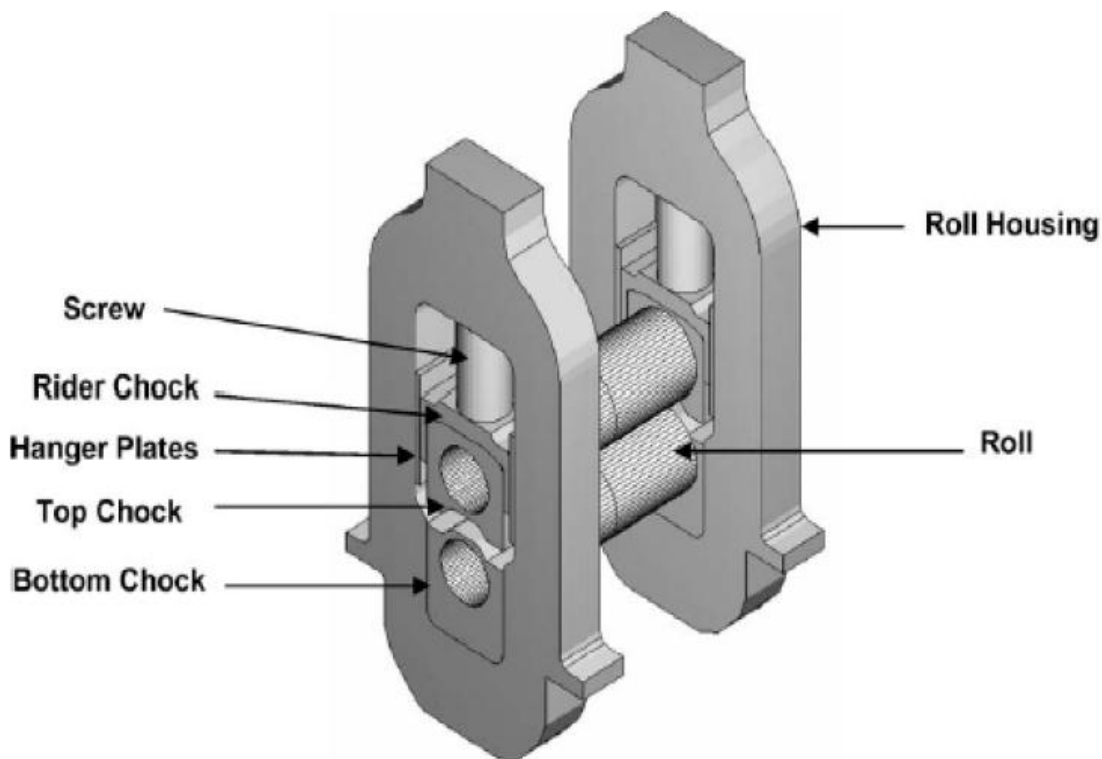
از سویی دیگر کار سرد عبارتی است که برای فرایندهای شکل دهی که در آن نرم شدگی ناشی از حرارت در برابر افزایش کار سختی فلز به طور قابل ملاحظه ای کمتر باشد، به کار می رود. بسته به این که فرایند نورد گرم، شمش و تختال با عبور از قفسه های مختلف نورد در نهایت به ورق، میلگرد، مفتول، لوله، ریل یا دیگر مقاطع ساختمانی تبدیل می شوند.

در ادامه خط نورد، ورق تبدیل شده در نورد گرم، وارد خط نورد سرد می شود. نورد سرد فلزات در صنعت در موقعیت مهمی قرار دارد. نورد سرد محصولاتی چون ورق، تسمه و فویل را با صیقل سطح نهایی خوب و استحکام مکانیکی زیاد تولید می کند. ضمن اینکه کنترل دقیقی نیز بر ابعاد محصول اعمال می شود. در نوردهای گرم یا سرد متداول، هدف عمده کاهش ضخامت فلز است. معمولاً تغییر اندازه پهنای ورق بسیار کم است، به طوری که تقریباً تمام این کاهش ضخامت به افزایش طول ورق منجر می شود. فاصله بین غلتک ها طوری تنظیم می شوند که شکاف غلتکی صحیح را برای بدست آوردن کاهش ضخامت مطلوب بدست دهد.

۱-۲ دستگاه های نورد

دستگاه نورد عمدتاً شامل غلتک ها، یاتاقان ها، محفظه ای برای نگه داشتن این قطعات و محرکی برای اعمال قدرت به غلتک ها و سیستم کنترل سرعت آنهاست [۱]. نیروهای درگیر در نورد به راحتی به چند هزارتن می رسند. بنابراین برای تحمل این نیروها و ایجاد قدرت لازم، سازه بسیار صلب تجهیزات و موتورهای پر قدرت مورد نیاز است.

غلتک ها محورهای توپر استوانه ای هستند. در دو طرف آنها قطر غلتک کم می شود که به آن گردن غلتک^۱ می گویند. بر روی این roll-neck ها یا تاقان ها یا چوک های مناسبی نصب می شوند تا بتوانند نیروی سنگینی را که برای ایجاد تغییر شکل فلز نیاز است، اعمال نمایند. چوک ها داخل دو نوع پوسته قرار گرفته اند، پوسته های بالایی به صورت کشویی حرکت می کنند و بدین ترتیب توانایی اعمال نیروی عمودی و تنظیم فاصله بین غلتک ها به وسیله چرخ دنده مخصوصی^۲ را دارند (شکل ۱-۱). از آنجایی که غلتک مثل یک تیر دو سردرگیر تغییر شکل می دهد، بایستی تا حد ممکن صلب باشد. با استفاده از غلتک های با قطر کوچک که دارای کمان تماسی کوتاه تری بین ورق و غلتک می باشد، نیرو و قدرت لازم برای نورد به مقدار زیادی کاهش می یابد. اما چون غلتک های با قطر کوچک نسبت به غلتک های با قطر بزرگ استحکام و صلیبت کمتری دارند، به منظور اجتناب از خیز و انحراف غلتک های کاری، توسط غلتک های با قطر بزرگتر پشتیبانی می شوند که این غلتک ها، غلتک های پشتیبان^۳ نامیده می شوند.



شکل ۱-۱ اجزاء یک دستگاه نورد با دو غلتک

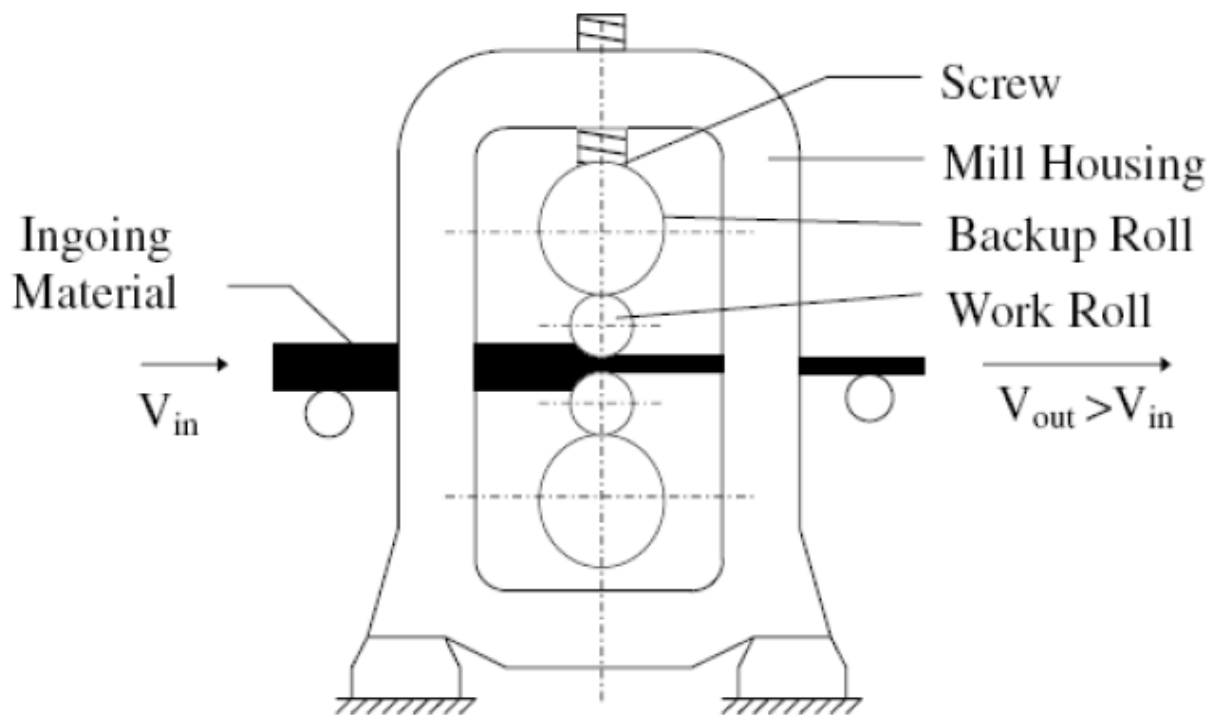
ساده ترین نمونه از این نوع دستگاه ها، نورد ۴ تایی است. شکل ۲-۱ در مواردی به ازای هر غلتک کاری دو یا بیشتر غلتک پشتیبان وجود دارد. در بعضی از قفسه ها هر غلتک کاری ۹ غلتک پشتیبان دارد. (قفسه ۲۰ غلتکی)

^۱ Roll neck

^۲ Screw down

^۳ Support roll

برای تولیدات با حجم بالا متداول است که قفسه های متعددی را به دنبال هم قرار دهند. بنابراین هنگامی که فلز به طور پیوسته نورد می شود، در هر قفسه ای کاهش ضخامت متفاوتی اعمال می شود و سرعت نورد به تدریج با کاهش سطح مقطع افزایش می یابد. این روش که در آن ورق از تمام قفسه ها به طور همزمان رد می شود، نورد پیوسته یا تاندم نامیده می شود. مقدار مشخصی کشش بین قفسه ای در ورق به منظور کنترل فرایند و جلوگیری از جمع شدن ورق در فاصله بین قفسه ها و همچنین کاهش نیروی نورد اعمال می شود.



شکل ۱-۲ قفسه نورد با ۲ غلتک کاری و ۲ غلتک پشتیبان

طراحی و عملکرد فرایند نورد ورق به دلیل تعداد زیاد پارامترها و خصوصیات پیرامونی نورد، مشکلات و پیچیدگی های زیادی را شامل می شود. به همین دلیل، پارامترهای اساسی فرایند، اغلب به وسیله روش ها و راه حل های تقریبی بدست می آید. مدل ریاضی یک فرایند نورد با کمک گرفتن از سرعت کامپیوتر در زمینه طراحی تجهیزات و فرایند نورد و در جهت دستیابی به پارامترهای کاربردی، بسیار مؤثر می باشد. تغییر شکل پلاستیک اغلب به صورت غیرهمگن است. حتی تحت شرایط کرنش صفحه ای، تئوری پلاستیسیته برای فرایند نورد، معمولاً تغییر شکل را همگن فرض می کند.

مقاطع عمودی در قطعه کار در حین تغییر شکل همچنان عمودی باقی می ماند و هیچ تنش کششی ثانویه ای در هنگام نورد و هیچ تنش پسماندی در قطعه به وجود نمی آید. به بیان دیگر معادلات تغییر شکل پلاستیک در فرایند

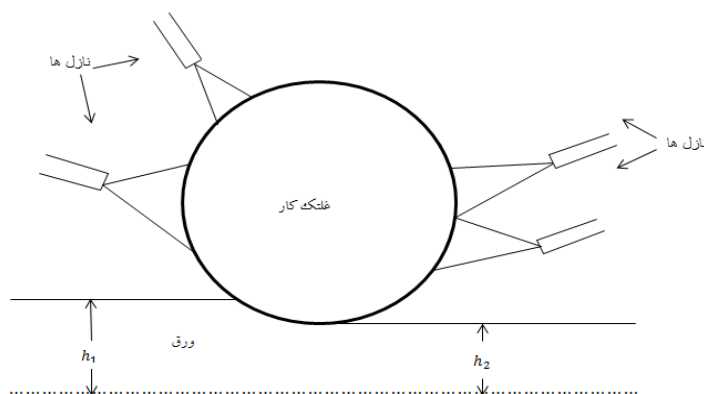
نورد در دو بعد، تحلیل و بررسی می شوند. منحنی توزیع فشار در کمان تماسی، اثر اصطکاک بین غلتک و قطعه کار را به شکل تپه اصطکاکی نمایان می کند. تپه اصطکاکی در صفحه خنثی، جایی که سرعت قطعه کار و سرعت غلتک برابر می شوند، اتفاق می افتد. بین صفحه ورودی و صفحه خنثی لغزش رو به عقب و بین صفحه خنثی و صفحه خروجی لغزش رو به جلو وجود دارد. زمانی که اصطکاک بیشتر می شود، تنش برشی در کمان تماسی ممکن است از تنش جریان ماده در برش بیشتر شود، نتیجتاً از حرکت ماده در شکاف غلتکی جلوگیری می شود و تغییر شکل ناشی از برش در قطعه کار ایجاد می شود.

ورق با پهنای b ، ضخامت ورودی h_1 ، داخل فضای بین غلتک ها (شکاف غلتکی) می شود و با ضخامت h_2 از آن خارج می شود. کاهش ضخامت آن، I چنین تعریف می شود:

$$r = \frac{h_2 - h_1}{h_1} * 100 \quad (1-1)$$

برای پیش گیری از افزایش دمای غلتک کاری در نورد گرم به دلیل تماس آن با قطعه کار، پاشش آب توسط نازل هایی صورت می گیرد تا به این ترتیب از افزایش دمای غلتک کار پیشگیری و امکان سایش آن را کاهش دهند. (شکل ۱-۳)

با توجه به اینکه در نورد گرم، غلتک ها با ورق با عرض ها، کاهش ضخامت، زمان و دماهای مختلف و شرایط پاشش مایع خنک کننده مختلف در تماس هستند، برای پیش بینی نسبتاً دقیق تاج حرارتی غلتک ها احتیاج به مدل سازی دقیق ریاضی دارد تا بر مبنای آن بتوان وضعیت دمای غلتک ها را محاسبه نمود.



شکل ۱-۳ نمایی از پاشش آب توسط غلتک

۱-۳ تاریخچه و فعالیت های انجام شده در زمینه پیش بینی تاج حرارتی:

درجه حرارت ورق و غلتک از مهمترین عوامل برای تولید محصول با کیفیت مناسب در روند تولید می باشد. ارائه یک مدل حرارتی مناسب به منظور بدست آوردن توزیع دما در ورق و غلتک هدف تعدادی از محققان بوده و فرضیاتی را برای محاسبه خود منظور نموده اند، فرضیاتی نظیر تماس کامل بین ورق و غلتک، درجه حرارت یکنواخت و یا توزیع دمای معین، خواص ترموفیزیکی یکنواخت و مستقل از درجه حرارت از جمله این فرضیات می باشد.

دیو اداس و سامراسکرا [۳] با استفاده از روش ریاضی اختلاف محدود، معادلات انتقال حرارت غلتک را در جهت شعاع و شرایط غیر دائم حل نموده است که در این حل از انتقال حرارت در جهت طول و محیط صرف نظر کرده و با استفاده از عایق حرارتی در فاصله هایی از سطح غلتک حجم محاسبات را کاهش داده اند. در شرایط دائم دیو اداس و سامراسکرا بیشینه و کمینه درجه حرارت غلتک را بدست آورده اند و اثر روغنکاری بین ورق و غلتک بر درجه حرارت ورق و غلتک و تاثیر اضافه کردن نمک های کلسیم بر درجه حرارت ماکزیمم غلتک را تخمین زده اند.

همچنین اثر درجه حرارت ورق بر درجه حرارت غلتک نیز مورد بررسی قرار گرفته است. ضریب انتقال حرارت مربوط به اثر روغن کاری به وسیله میوراتا و همکاران [۴] بدست آمده و اثر لایه اکسیدی نیز بر ضریب انتقال حرارت در نظر گرفته شده است. پاولسکی [۵] نیز با استفاده از روش تحلیلی و ریاضی معادلات انتقال حرارت بین ورق و غلتک را حل نموده و ضریب انتقال حرارت بین غلتک و ورق را بدست آورده است. پاولسکی ضریب انتقال حرارت را به سرعت غلتک، ضخامت لایه اکسیدی، زمان تماس و شرایط فیزیکی ورق و غلتک مرتبط کرده است.

ویلموت و میگنون [۶] معادلات دیفرانسیل انتقال حرارت را در جهت شعاع و طول غلتک در حالت غیر دائم به روش اختلاف محدود حل نموده و اثر فشار آب، دبی آب و زاویه پاشش را بر درجه حرارت غلتک بدست آورده است. همچنین مقدار تاج حرارتی غلتک را در هر لحظه محاسبه نموده و مقدار محاسبه شده را با تست آزمایشگاهی انجام شده مورد مقایسه قرار داده است. ویلموت و میگنون همچنین وابستگی تاج حرارتی را با زمان بیکاری غلتک (فاصله ته ورق و سر ورق بعدی)، فشار آب و مقدار تغییر شکل را مورد بحث قرار داده اند.

یی و سامراسکرا [۷] نیز معادلات انتقال حرارت را در جهت شعاع و طول غلتک در حالت غیر دائم به روش اختلاف محدود حل نموده و اثر موقعیت هدر بر درجه حرارت غلتک به دست آمده است.

یونن [۸ و ۹] به روش تحلیلی در حالت غیر دائم در جهت شعاع و محیطی غلتک را حل نموده است. با استفاده از توابع کلونین در جهت شعاع و بهره گیری از بسط فوریه در جهت محیطی و با فرض ثابت بودن توزیع دما، مسئله را حل نموده است. در این مقالات تاثیر لایه پوسته روی ورق و انتقال گرما در غلتک مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته [۱۰] و اثر آن بر درجه حرارت بیشینه سطح غلتک بدست آمده است. همچنین اثر سرمایش روی غلتک را با پارامترهایی نظیر موقعیت و حالت پاشش آب خنک کننده، دبی آب و اثر آن بر درجه حرارت غلتک مورد بررسی قرار داده اند [۸].

یونن [۱۱] همچنین با استفاده از روش اختلاف محدود، غلتک را در حالت دو بعدی و غیر دائم حل نموده و اثر عوامل مختلف نظیر درجه حرارت آب خنک کننده، دبی آب و همچنین اضافه کردن هدر و اثر آن بر شکل پروفیل حرارتی مورد بحث و بررسی قرار داده است. در این مدل ضریب انتقال حرارت پاشش آب به صورت ثابت فرض شده است. پارک و بیکر [۱۲] یک روش محاسباتی به منظور بررسی درجه حرارت در حالت غیر دائم در غلتک ها مورد استفاده قرار داده اند که به وسیله آن حالت بهینه طراحی پاشش آب خنک کننده را مورد بررسی دقیق تر قرار داده اند. در این روش اثر زاویه پاشش آب و سطح اثر ایجاد شده بر غلتک، بر درجه حرارت سطح و درجه حرارت در لایه های مختلف غلتک مورد بررسی قرار گرفته است.

ون استدن و تلمن [۱۳] نیز با توجه به اهمیت بهینه کردن سیستم خنک کاری غلتکها در کمترین زمان های بین دو ورق و به تلفیق نتایج عملی و محاسبات کامپیوتری یک سیستم جدید خنک کاری غلتک طراحی کرده اند.

در روش استدن و تلمن معادلات انتقال حرارت غلتک در دو مرحله حل می شود یعنی در جهت محیطی و محور غلتک در حالت غیر دائم، معادلات حل می گردد. استدن و تلمن ضریب انتقال حرارت جابجایی پاشش آب را تابعی از فاصله نازل تا غلتک، فشار آب، دبی آب، زاویه نازل نسبت به غلتک در نظر گرفته و با استفاده از نتایج آزمایشگاهی ضریب انتقال حرارت در شرایط مختلف به دست آمده است. استدن و تلمن با استفاده از تغییر نوع نازل و طرز قرار گرفتن آن و همچنین موقعیت هدرها بهترین شرایط خنک کاری غلتک (بالاترین ضریب انتقال حرارت) را به منظور رسیدن به پروفیل تخت حرارتی و کاهش کراون حرارتی و بالا بردن انعطاف پذیری سیستم خمش غلتک ها را بدست آورده اند. نتایج حاصل از این تحقیق در کارخانه نورد هوگون اجرا شده است.

هانگ، جون و کانگ [۱۴] با استفاده از روش المان محدود در حالت دائم توزیع درجه حرارت را در ورق و غلتک بدست آورده و جریان عبور ورق های مختلف با سرعت های متفاوت و فشار غلتک را مورد بررسی قرار داده است. در این روش اثر اصطکاک بین ورق و غلتک مورد بررسی قرار گرفته و از عوامل نظیر سرعت غلتک، درجه حرارت ورق، ضریب انتقال حرارت بین غلتک و ورق، زاویه پاشش و مقدار تغییر ضخامت بر درجه حرارت غلتک و ورق به دست آمده است.

نوکس و موره [۱۵] با استفاده از روش اختلاف محدود در جهت شعاع و محور غلتک در حالت غیر دائم غلتک را حل نموده و با استفاده از شرایط خاص؛ ضریب انتقال حرارت پاشش آب را ثابت فرض کرده و از نتایج به دست آمده توسط این مدل برای کنترل پروفیل و موج ورق استفاده کرده اند.

گینزبرگ، باختر و عیسی [۱۶] با استفاده از مدل cool flex که به روش اختلاف محدود در جهت شعاع و محور غلتک در حالت غیر دائم به منظور حل معادلات انتقال حرارتی غلتک نوشته شده است، تاثیر حالت های مختلف نور و پارامترهای مختلف در خنک کاری غلتک ها در شرایط غیر دائم را مورد بررسی قرار داده اند. در این مدل با استفاده از نتایج دیگران در زمینه ضرایب انتقال حرارت پاشش آب و ضریب انتقال حرارت در ناحیه تماس ورق و غلتک از یک سری ضرایب کالیبراسیون، نتایج کامپیوتری را به نتایج عملی نزدیک کرده اند. نتایج به دست آمده به وسیله این مدل با نتایج آزمایشگاهی مطابقت دارد.

گینزبرگ، اعظم و عیسی [۱۷] یک سیستم کنترل کراون حرارتی غلتک را طراحی نموده اند تا به وسیله آن کنترل دقیق تری بر پروفیل ورق داشته باشند. در این سیستم ها از هدرهای RTC استفاده شده است. در این مدل شرایط مرزی مختلف از جمله انتقال حرارت از یاتاقان ها نیز در نظر گرفته شده است.

کریزا، دونینی و روتی [۱۸] با استفاده از حل معادلات دیفرانسیل با شرایط مرزی مختلف به روش اختلاف محدود در شرایط غیر دائم و استفاده از سیستم RTC، نحوه کنترل پروفیل حرارتی را مورد بحث قرار داده از این سیستم در مورد آلگوما استفاده کرده اند.

مینگو [۱۹] نیز از روش تحلیلی با استفاده از انتگرال گیری لاپلاسی معادلات دو بعدی غیر دائم غلتک را حل نموده و با استفاده از شرایط مرزی ساده درجه حرارت غلتک و کراون حرارتی را بدست آورده است.

پالون [۲۰] نیز به روش تحلیلی در جهت محور غلتک و در شرایط غیر دائم و با استفاده از انتگرال گیری لاپلاسی غلتک را حل کرده است. در این روش زاویه پاشش آب جزو متغیرهای خنک کاری غلتک می باشد.

۱-۴ تغییرات در پروفیل حرارتی غلتک در کلافهای مختلف

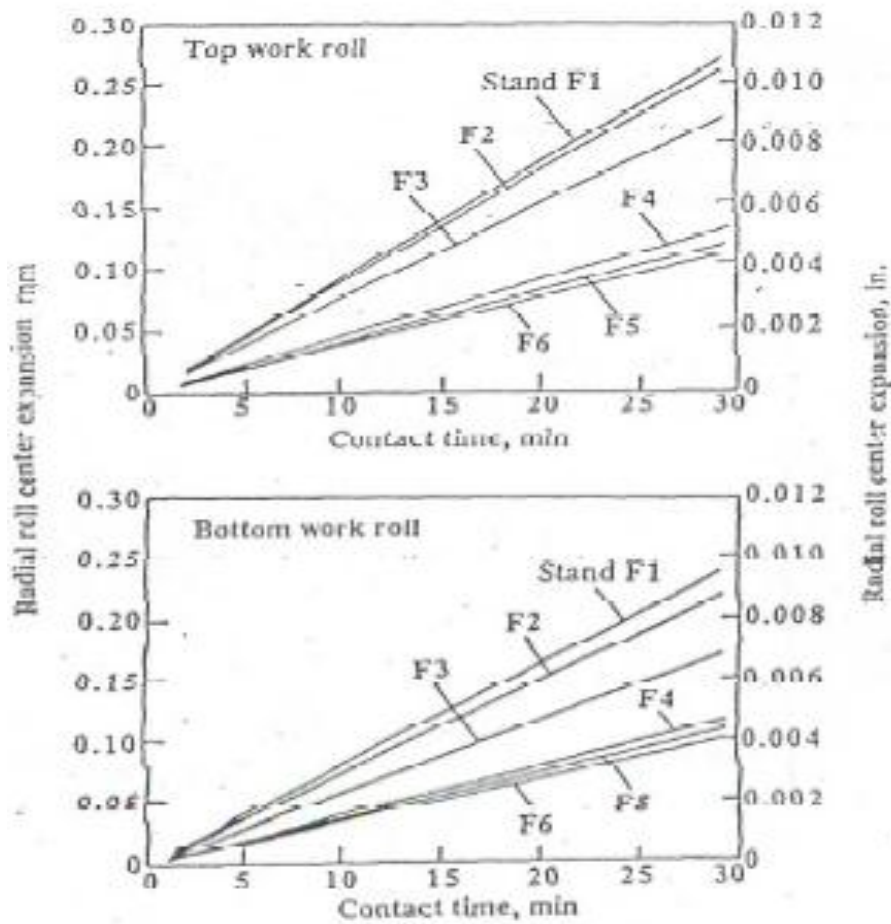
براساس تحلیل آماری داده های بدست آمده در زمان نورد در یک خط نورد گرم ورق با عرض ۵۸ اینچ، سیباکین و همکاران [۲۱] به نتایج زیر رسیده اند:

۱- میزان انبساط حرارتی در مرکز غلتک کاری، به طور عمده به وسیله زمان تماس غلتک در طول مدت سی دقیقه ای که بلافاصله قبل از اندازه گیری انبساط غلتک است تعیین می شود. یعنی توسط نرخ فرایند نورد در مدت این دوره زمانی مجموع زمان فرایند نورد اثر بسیار کمی بر انبساط غلتک دارد. به این ترتیب طول مدت دوره گرم شدن خط تقریباً یک ساعت است و مطمئناً از یک ساعت بیشتر نیست. غلتک های پشتیبان تقریباً در دمای محیط باقی می مانند.

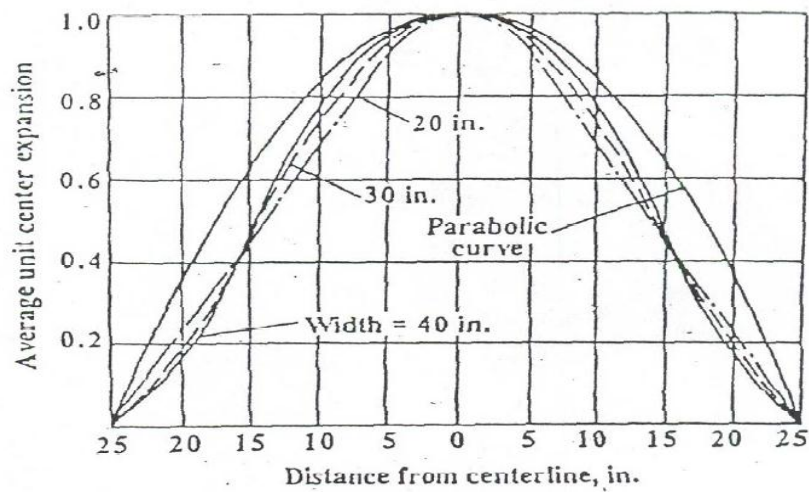
۲- انبساط حرارتی مرکز غلتک در طول اولین سی دقیقه به طور خطی متناسب با زمان تماس است (شکل ۱-۴) و مقدار آن برای ایستگاه های اولیه خط نورد بزرگتر است.

تغییرات انجام شده در سیستم خنک کننده در طول آزمایش ها که شامل افزایش فشار آب، افزایش تعداد پاشش ها و تغییر نوع نازل ها بود منتج به کاهش انبساط حرارتی غلتک نشد.

۳- توزیع انبساط در طول غلتک که تقریباً متناسب با توزیع دما است، به دست آمده است. پهنای نورد شده متوسط در طول دوره زمانی نیم ساعته متقدم، بر روی این توزیع انبساط اثر دارد در حالی که مقدار انبساط در مرکز اثر بسیار کمی دارد. مقایسه این توزیع با یک توزیع سهموی نشان می دهد که گرادیان دما در این توزیع در نزدیکی دو انتهای غلتک کوچکتر و در همسایگی لبه ورق نسبت به توزیع سهموی بزرگتر است. (شکل ۱-۵)

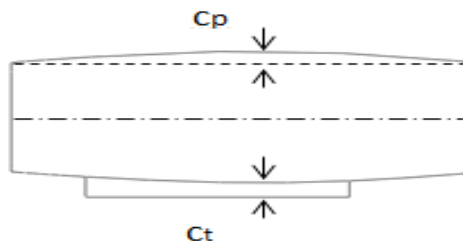


شکل ۴-۱ تأثیر زمان تماس غلتک بر انبساط مرکزی غلتک های بالا و پایین [۲۱]



شکل ۵-۱ پروفیل انبساط متوسط برای انبساط مرکزی واحد در مقادیر مختلف پهنای ورق [۲۱]

تحقیقات تئوری و آزمایشگاهی بر روی پروفیل های گرمایی توسط ویل موت و میگنون برای خط ورق گرم انجام شده و دو نوع تاج حرارتی غلتک تعیین شده است. تاج جزئی غلتک، C_p ، به صورت اختلاف بین قطرهای غلتک در مرکز و در لبه ورق تعریف می شود. تاج کلی غلتک، C_t ، به صورت اختلاف بین قطرهای غلتک در مرکز و در لبه محفظه بشکه ای شکل غلتک تعریف می شود (شکل ۶-۱).



شکل ۶-۱ نمایش تاج جزئی و کلی

ویل موت و میگنون [۲۲] براساس تحقیق خود به نتایج زیر رسیدند:

۱- تغییرات تاج حرارتی جزئی و کلی غلتک به صورت نمایی است. (شکل ۷-۱)

مقدار مجانب منحنی پس از دو ساعت، بدون توجه به مدت زمان چرخه نورد یا فاصله زمانی ایجاد شده بین نورد کلاف ها، بدست می آید.

۲- تاج حرارتی غلتک متناسب با نرخ فرایند نورد است.

۳- منحنی معرف تغییرات تاج حرارتی غلتک توسط رابطه زیر به ضریب نرخ پیمایش خط، K ، (شکل ۸-۱) مربوط می شود.

$$k = \frac{t_{rol}}{t_{rol} + t_{int}}$$

(۲-۱)

که در این رابطه:

t_{rol} : زمان فرایند نورد