



تحلیل و شبیه سازی توزیع دما بر پیکره غلتک در طی فرآیند نورد گرم با در نظر گرفتن پاشش سیال خنک کن

امیرحشمت خدمتی بازکیانی^{۱*}، علی سوزنگر^۲

۱. گروه مهندسی مکانیک، واحد سوسنگرد، دانشگاه آزاد اسلامی، سوسنگرد، ایران.

۲. مهندس مکانیک، مهندس تعمیرات گروه ملی صنعتی فولاد ایران، اهواز، ایران.

* نویسنده مسول: khedmati_amir@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۲۹

چکیده

صنعت نورد، متداولترین و پر رونق‌ترین روش تولید فرآورده‌های فلزی است. نخستین هدف فرآیند نورد، کاهش سطح مقطع و یا ضخامت قطعه کار است، این عمل به دو صورت نورد گرم و سرد انجام می پذیرد، فلز از بین دو غلتک عبور نموده تا شکل شیار (کالیبر) غلتک را بگیرد، بدین جهت غلتک‌های نورد اجزاء مهمی در کارخانجات نوردی می‌باشند. هدف از انجام این پژوهش تحلیل انتقال حرارت در شرایط کارکرد نورد گرم و یافتن توزیع حرارت در غلتک‌های نورد با استفاده از شبیه سازی اجزاء محدود می‌باشد، شبیه سازی به صورت غیر خطی بوده و فرض گردیده که غلتک همگن، همسانگرد، بدون ترک و کرنش حرارتی و دمای محیط برابر دمای اتاق در نظر گرفته شده است. توزیع حرارت در غلتک در این پژوهش به دو صورت با استفاده از سیستم خنک‌کاری پاششی و بدون استفاده از این سیستم بدست آمده و پس از آن نتایج بدست آمده از شبیه سازی اجزاء محدود را با داده‌های آزمایشگاهی استخراج شده، مورد صحت سنجی قرار گرفته شده است که بالاترین میزان درصد خطای نسبی در پیشبینی ۰۸/۳۳۴ درصد بوده که بیانگر تطبیق نتایج حاصله از حل عددی با داده استخراجی بوده است.

کلمات کلیدی: فرآیند نورد، اجزاء محدود، توزیع حرارت.

مقدمه

نورد، یکی از مهمترین تکنیک‌های شکل‌دهی حجمی بوده که تغییر شکل پلاستیک فلز از طریق عبور آن از بین غلتک‌ها صورت می‌پذیرد. که با اعمال نیروهای فشاری باعث کاهش سطح مقطع اولیه و کسب مقاطعی با شکل مورد نظر به کار می‌رود. در فرآیند نورد، شمش با عبور پیوسته از بین حداقل دو غلتک در حال چرخش، تغییر شکل می‌یابد. محصول نورد ممکن است فرآورده پایانی و یا مرحله‌ای از شکل دادن فلز باشد. از جمله محصولات نورد می‌توان به ورق، میلگرد و انواع پروفیل با مقاطع I, T, H, ... اشاره کرد. نخستین هدف فرآیندهای نورد کاهش در سطح مقطع و یا ضخامت قطعه کار است. این مهم ممکن است به هر دو صورت نورد گرم یا سرد انجام پذیرد. برگزیدن روش به نوع، اندازه، ویژگی‌های ماده و شکل پایانی فرآورده بستگی دارد.

صابونچی و همکاران [۱] تغییر هندسه پاشش آب به غلتک نورد و اثر آن بر درجه حرارت را بررسی نمودند و در آن به منظور تعیین حالت هندسی بهینه برای خنک‌کاری با استفاده از بالاترین ضریب انتقال حرارت و جلوگیری از پاشش آب به اطراف، معادلات انتقال حرارت غلتک در حالت غیر دائم با شرایط مرزی متغییر برای انواع وضعیت‌های پاشش و عبور ورق‌های متعدد با شرایط مختلف به روش اختلاف محدود حل شده و اثر هر یک از پارامترها بر درجه حرارت غلتک مورد بحث قرار گرفته است. حاجیان‌نژاد و همکاران [۲] با ارائه یک مدل ریاضی غیرآنی به توزیع دمای بار در طول خط نورد گرم ورق مجتمع فولاد مبارکه پرداختند. بدین منظور، معادلات انتقال حرارت دوبعدی را با فرض غیردائم همراه با شرایط مرزی مناسب برای هر قسمت خط نورد گرم استخراج نموده و با استفاده از روش عددی اختلاف محدود و شبکه‌بندی غیریکنواخت نتایج را محاسبه نمودند. در این پژوهش نتایج حاصله را نسبت به پارامترهای سرعت بار، ضخامت نسبی کاهشی در هر پاس، دمای اولیه بار، اثر



پوسته‌های اکسیدی، تاخیرهای زمانی هر مرحله بدست آورده است. صابونچی و همکاران [۳] شبیه‌سازی حرارتی غلتک‌های نورد گرم به‌منظور تخمین اثرات تغییر جنس غلتک بر توزیع دما پرداختند. آنها با استفاده از یک شبیه‌سازی عددی-تجربی اثر تغییر جنس غلتک بر روی توزیع دما برای انواع غلتک‌ها در مراحل نورد را محاسبه نموده و نتایج توزیع دما و کراون حرارتی غلتک را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه نمودند. نتایج بیانگر این امر بوده جنس غلتک، پارامتری مهم در شبیه‌سازی نخواهد بود. فروزان و اکبرزاده [۴] بمنظور پیش‌بینی خواص مکانیکی آلیاژ AA3004 با استفاده از شبکه عصبی، به تحلیل ترمومکانیکی فرآیند نورد پرداختند. نتایج حاصل از تطبیق مناسبی با داده‌های آزمایشگاهی داشته و آنالیز حساسیت بیانگر این موضوع بوده که دمای محصول نهایی نورد را با کنترل شرایط پیش‌گرم می‌توان کنترل نمود. سنبلی و سراج‌زاده [۵] بمنظور دستیابی به عمر مفید غلتک، توزیع دمایی غلتک را طی فرآیند نورد داغ را مورد بررسی قرار دادند. بدین منظور معادلات انتقال حرارت پایدار با شرایط مرزی گذرای دو بعدی را با استفاده از روش اجزا محدود بررسی نموده و نتایج حاصله را با داده‌های آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار داده و نتایج از تطبیق مناسب برخوردار بوده است. قره‌داغی و همکاران [۶] شبیه‌سازی عددی حرارتی مرحله خشن‌کاری نورد میله گرد کارخانه کوثر را با استفاده از نرم‌افزار اجزا محدود ABAQUS مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش نمودار تغییرات دما را نسبت به زمان نورد در ۱۲ قفسه اول را برای نقاط وسط و بالای شمش را نشان داده و نتایج حاصله را با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه نموده که بیانگر صحت نتایج بوده است. کرمانپور و همکاران [۷] با ارائه مدل کوپله مکانیکی-حرارتی برای پیش‌بینی رفتار حرارتی و مکانیکی، به بررسی خط نورد میلگرد فولادهای ساختمانی پرداختند. مدل ارائه شده توانایی شبیه‌سازی کاهش دما توسط هوا، تشعشع و تماس با غلتک، افزایش دما در اثر کار پلاستیک و اصطکاک و تعیین نحوه توزیع تنش و کرنش، محاسبه توان غلتک‌ها و سیلان ماده را دارا بوده و همچنین توزیع تنش، کرنش و درجه حرارت را در منطقه تغییر شکل و بین قفسه‌ها، مقادیر توان مصرفی قفسه‌ها و نیز اصطکاک بر دمای شمش و تغییر شکل آن را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج حاصله با نتایج تجربی و پژوهش‌های پیشین مطابقت خوبی دارد. یانگ و همکاران [۸] فرآیند نورد گرم آلیاژ تیتانیوم با معرفی مدل ۳ بعدی ترمومکانیکی را مورد بررسی قرار دادند و نتایج حاصل از شبیه‌سازی را ارائه نمودند. با اعمال نتایج بدست آمده و پیش‌بینی حالات مختلف، توانستند کیفیت محصول نهایی را افزایش داده و بازده تولید را افزایش دهند. باستی و همکاران [۹] با استفاده از روش اجزای محدود به بررسی تاثیر پارامترهایی چون سرعت غلتک، شعاع غلتک، تاثیر ضخامت ورودی قطعه کار، تاثیر درصد کاهش ضخامت و ... را بر فرآیند نورد گرم در محصول نهایی پرداختند. شاهانی و همکاران [۱۰] با استفاده از روش عددی اجزای محدود و شبکه عصبی با ارائه مدل ترمو-ویسکوپلاستیک به بررسی تاثیر پارامترهای موثر در فرآیند نورد گرم در آلیاژ آلومینیوم AA5083 پرداختند. توزیع دما، تنش و کرنش در غلتک را محاسبه نموده و خواص مکانیکی بهینه استخراج شده است. نتایج استخراجی از روش عددی و به روز شدن خواص دارای خطای ۳/۵ درصد با نتایج آزمایشگاهی بوده است. بیناسیتی و همکاران [۱۱] به بررسی شبیه‌سازی تنش‌های حرارتی غلتک در نورد گرم پرداختند. آنها با استفاده از روش عددی اجزای محدود شبیه‌سازی و با فرض اینکه بزرگترین شیب حرارتی در منطقه کوچک تماس غلتک با فلز نوردی بوده به حل معادلات پرداختند. برای صحت‌سنجی نیز از نتایج موجود در پژوهش‌های پیشین استفاده نمودند. روی‌بین و همکاران [۱۲] نیز، با استفاده از روش اجزای محدود، توزیع حرارت در نوار حاصل از فرآیند نورد گرم را محاسبه نمودند. بمنظور تحلیل این فرآیند مدل‌سازی نزدیک به شرایط کارکرد صورت پذیرفته و نرخ حرارت تولیدی نیز در فرآیند تخمین زده و حرارت توزیعی در پیکره، نوارها با ضخامت گوناگون مورد مطالعه قرار گرفته شده است. هه‌سو و همکاران [۱۳] به بررسی فرآیند نورد ممتد مفتول تیتانیومی پرداختند. بمنظور مدل‌سازی عددی فرآیند در نرم‌افزار DeForm از استاندارد JIS استفاده نموده و نتایج را برای پاس اول تا هفتم ارائه شده است. نتایج حاصله از توزیع حرارت در پیکره را با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار داده و صحت آنان را تایید نمودند. دینگ و همکاران [۱۴] فرآیند ورق نوردگرم آلیاژ منیزیم را با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود مورد مطالعه قرار داده و توزیع درجه حرارت را در امتداد ضخامت ورق تولیدی در حین فرآیند بدست آوردند. با استفاده از نتایج بدست آمده و تطابق آنها با داده‌های آزمایشگاهی، رابطه خطی بین ثابت حرارت انتقالی درونی و فشار میانگین غلتش معرفی نمودند. چن و همکاران [۱۵] بمنظور بررسی تاثیر حرارت محصول نهایی حاصل از نوردگرم بر میکرو ساختار و خواص مکانیکی به تحلیل انتقال حرارت در



فرآیند نورد گرم پرداختند. نتایج حاصله نشان داده که در دمای نهایی محصول بین ۹۶۶ تا ۱۰۸۳ درجه سانتیگراد اندازه ریزدانه‌های موجود در محصول بین ۸/۵ تا ۱۷/۳ میکرومتر بوده است. خدمتی بازکیائی و همکاران [۱۶] با ارائه مدل مجزا ترمو-ویسکو هاپیرالاستیک، میزان حرارت تولیدی در یک لاستیک تحت بار مکانیکی متناوب را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش پس از حل نیمه تحلیلی با استفاده از تابع گرین، نتایج حاصله با حل اجزای محدود و نتایج آزمایشگاهی مورد صحت‌سنجی قرار گرفت.

در پژوهش حاضر پس از بیان مقدمه و مروری بر پژوهش‌های مرتبط صورت گرفته، شبیه‌سازی کارکرد غلتک گرم بیان شده و پس از آن توزیع حرارت در پاس اول تا ششم بدون در نظر گرفتن سیستم خنک‌کاری مورد بررسی قرار گرفته شده است. در ادامه با در نظر گرفتن سیستم خنک‌کاری پاششی، نتایج حاصله از شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده و در انتها نیز به بیان نتایج حاصل از پژوهش اشاره شده است.

بررسی و شبیه‌سازی کارکرد غلتک نورد گرم تولید تیر آهن

در فرآیندهای نورد، حجیم بودن فرآورده‌ها و تغییر شکل‌های بزرگ پلاستیک آنها سبب می‌شود که فشار و نیروی ایجاد شده در نورد که به وسیله غلتک‌ها وارد می‌شود نیز بسیار بزرگ باشند. در این بخش سعی شده است که با استفاده از روش عددی اجزای محدود شبیه‌سازی کامپیوتری، به بررسی انتقال حرارت در شرایط مختلف کارکرد خط نورد گرم پرداخته و اثر پارامترهای مختلف بر روی انتقال حرارت و توزیع حرارت در پیکره غلتک، مورد ارزیابی قرار گیرد. اولین قفسه از سه قفسه مورد استفاده در تولید تیر آهن در شرکت گروه ملی خوزستان، شبیه‌سازی و مورد تحلیل قرار گرفته شده است. علت این موضع فشار بیشتر وارد به این قفسه و همچنین گزارش‌های خرابی ارائه شده است.

به منظور شبیه‌سازی حرکت غلتک‌ها و فرآیند نورد، نیاز به تعیین دقیق پارامترهای مهم از جمله سرعت غلتک‌ها، فاصله بین دو غلتک و پارامترهای دیگر می‌باشد. از این رو با هماهنگی واحد نورد شرکت فولاد، کلیه اطلاعات واقعی نورد استخراج و در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت. در جدول (۱) پارامترهای مورد نیاز برای شبیه‌سازی قفسه اول معرفی شده است.

جدول (۱): اطلاعات واقعی هندسی و نحوه حرکت غلتک‌ها در قفسه اول

شماره پاس	شماره کالیبر	نوع قرارگیری	سرعت (m/s)	قطر کاری غلتک (mm)	سرعت چرخش (RPM)	فاصله دو غلتک (mm)	نوع شیار
۱	۴	H	۳/۰۸	۶۲۰	۹۵	۱۶۰	Square
۲	۴	H	۳/۰۸	۶۲۰	۹۵	۱۵۳	Flat
۳	۲	H	۲/۶۲	۵۲۶	۹۵	۶۰	Flat
۴	۲	H	۲/۶۲	۵۲۷	۹۵	۴۲	Box
۵	۱	H	۲/۷۳	۵۴۹	۹۵	۵۹	Box
۶	۱	H	۲/۶۹	۵۴۰	۹۵	۱۵	Shape
۷	۴	H	۳/۲۷	۶۵۷	۹۵	۱۳۷	Shape

پس از استفاده از اطلاعات و پارامترهای طراحی قفسه اول، اقدام به مدل‌سازی اولیه آن در نرم‌افزار مناسب نموده و برای این امر، فاصله اولیه دو غلتک به دقت تنظیم گشته و شمشال مورد استفاده در شبیه‌سازی با ابعاد ۲۰۰ در ۲۰۰ میلیمتر و طول ۲ متر درون آن قرار گرفت. شکل (۱) نمای کلی از قفسه آماده‌سازی شده جهت شبیه‌سازی در پاس ۱ را نشان می‌دهد.



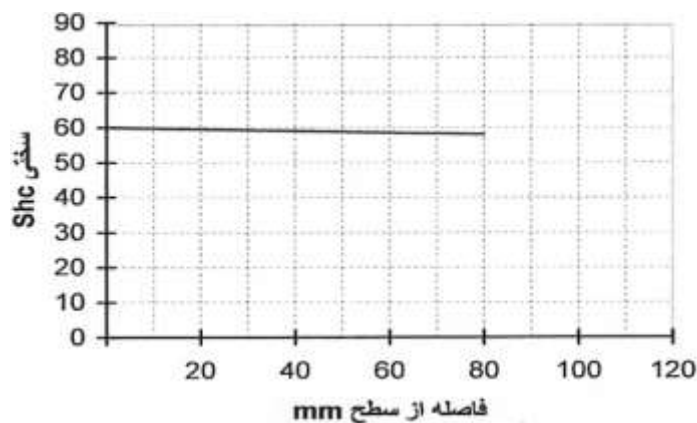
شکل (۱): مدل شبیه‌سازی شده فرآیند نورد در پاس اول در نرم‌افزار Solidworks.

جنس غلتک‌ها از چدن بوده سخت کاری شده و جنس شمشال از فولاد بوده است. در جدول (۲) خواص مکانیکی مواد استفاده شده در این شبیه‌سازی بیان شده است.

جدول (۲): خواص مکانیکی غلتک‌ها و شمشال.

جنس	مدول الاستیسیته (mPa)	ضریب انتقال حرارت (W/mK)	ضریب انبساط حرارتی ($10^{-6}/K$)	چگالی ($kg.m^{-3}$)	نسبت پواسون
Cast Iron SG	۲۹۰	۳۲	۱۰	۷۱۲۰	۰/۲۶
AISI 1055	۲۱۰	۵۴	۱۱	۷۸۵۰	۰/۳

در شکل (۲) نمودار مربوط به سختی سطحی موجود در غلتک‌ها را نشان داده شده است.

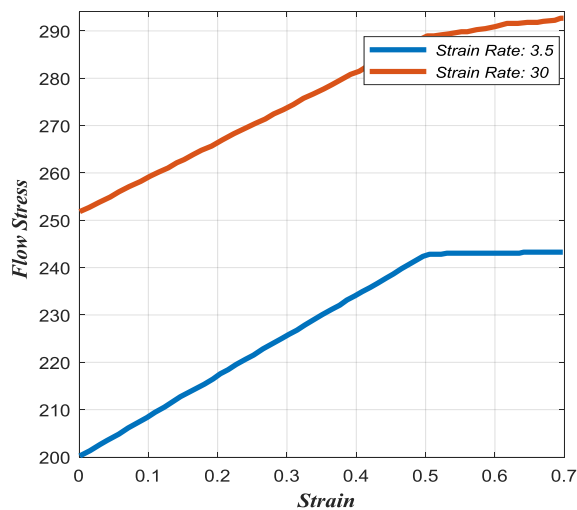


شکل (۲): نمودار سختی سطحی غلتک‌های شبیه‌سازی شده در فرآیند نورد گرم [۱۸].

یکی از مهمترین پارامترهای مورد استفاده در ناحیه پلاستیک مواد، تنش جریان است. این تنش مقدار لحظه‌ای تنش مورد نیاز برای ادامه تغییر شکل پلاستیک، به منظور نگهداری جریان یافتن فلز است. روابط مختلفی برای تنش جریان بیان شده است که حالت کلی این روابط را می‌توان در رابطه ۱ مشاهده نمود.

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T) \quad (1)$$

در رابطه فوق، $\bar{\sigma}$ تنش جریان، ε کرنش پلاستیک موثر، $\dot{\varepsilon}$ نرخ کرنش موثر و T نیز دما است. شکل (۳) نمودار تنش جریان بر حسب کرنش برای ماده AISI 1055 ترسیم گردیده است که در تمام نواحی پلاستیک صادق است.

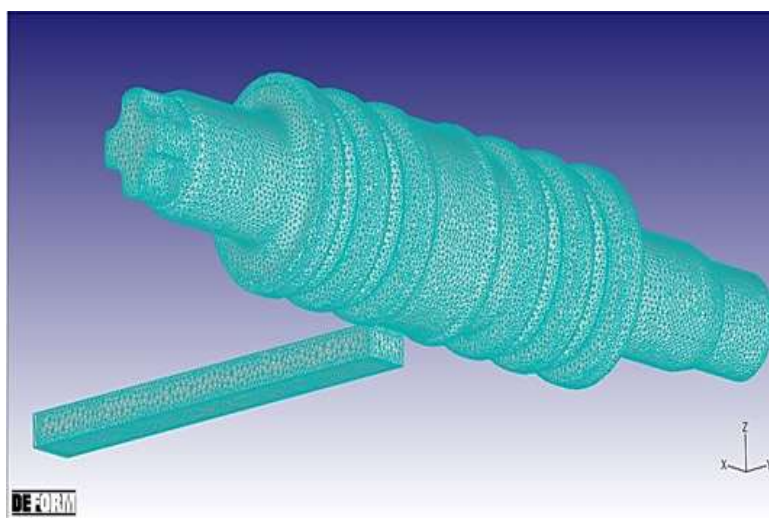


شکل (۳): نمودار جریان تنش- کرنش برای ماده سازنده شمشال AISI 1055.

شبیه‌سازی انتقال حرارت در فرآیند نورد

توزیع حرارت بدون در نظر گرفتن خنک‌کاری

از لحاظ تجربی و با بررسی انجام شده، مشخص گردید که انتقال حرارت به دو صورت و با دو مکانیزم مختلف بین غلتک‌ها و شمشال وجود داشته که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته شده است. در بخش اول هیچگونه روش سرد کننده‌ای برای غلتک‌ها در نظر گرفته نشده و انتقال حرارت فقط بین شمشال و غلتک در نظر گرفته شده است. شکل (۴) نمایی کلی از نرم‌افزار DeForm را نشان داده که در آن آماده‌سازی حل حرارتی صورت گرفته است. تعداد المان‌های در نظر گرفته شده برای غلتک ۳۳۸۷۷۲ بوده که این تعداد المان دارای ۷۲۸۶۱ گره می‌باشند. همچنین تعداد المان مورد استفاده برای شبکه‌بندی شمشال برابر ۱۶۴۸۲ بوده که شامل ۴۱۴۸ گره می‌باشند. این تعداد المان پس از آزمون استقلال از شبکه در نظر گرفته شدند. شرط مرزی انتقال حرارت موجود شامل انتقال حرارت جابجایی میان شمشال و غلتک نورد با محیط اطراف و همچنین انتقال حرارت هدایتی میان شمشال و غلتک می‌باشد. دمای محیط برابر ۳۳ درجه سانتی‌گراد و ضریب همرفت نیز برابر $0.02 \text{ W/m}^2\text{K}$ می‌باشد. ضریب انتقال حرارت هدایتی میان غلتک و شمشال نیز برابر $50 \text{ W/m}^2\text{K}$ در نظر گرفته شده است.

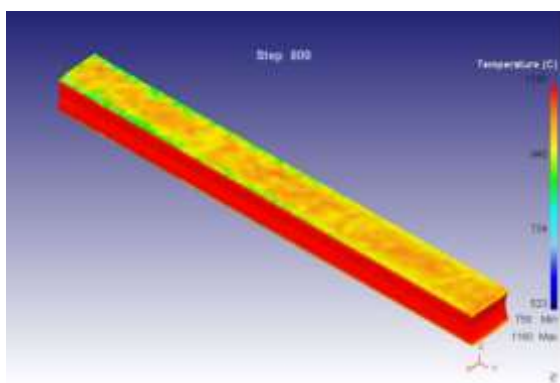


شکل (۴): مدل آماده‌سازی شده در نرم‌افزار DeForm به منظور تحلیل حرارتی.

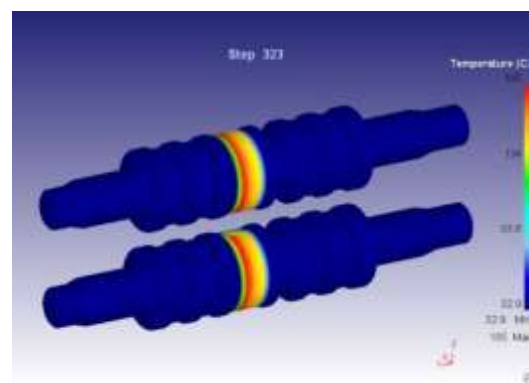


توزیع حرارت در پاس اول

باتوجه به توضیحات داده شده در شرایط شبیه‌سازی و پس از اعمال آنها، توزیع حرارت در میان غلتک و شمشال را می‌توان محاسبه نمود. شکل (۵-الف) توزیع دمای دو غلتک را در زمان انتهایی پاس اول نشان می‌دهد. بیشترین دمای به وجود آمده برابر ۱۸۵ درجه سانتی‌گراد بوده که در دور دوم حرکت غلتک بوقوع پیوسته است. علت کم بودن این دما را می‌توان مدت زمان کم درگیری و سرعت زیاد عبور شمشال از غلتک دانست که زمان کافی برای انتقال حرارت را مهیا نمی‌کنند. به عبارت دیگر با وجود عدم استفاده از عوامل خنک‌کنندگی در این پاس، به دلیل زمان بسیار کم برخورد دمای غلتک تا حد زیادی بالا نمی‌رود هر چند دمای حدود ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد به دلیل متمرکز بودن آن، می‌تواند تنش‌های حرارتی بزرگی در غلتک ایجاد کند. همچنین در شکل (۵-ب) می‌توان توزیع دما در شمشال را مشاهده نمود. همانطور که در شکل دیده می‌شود، دمای سطحی که با غلتک در تماس بوده به دلیل انتقال حرارت نوع هدایتی میان غلتک و شمشال کاهش یافته است.



ب



الف

شکل (۵): توزیع دما پس از انجام پاس اول (الف) بر روی غلتک‌ها (ب) بر روی شمشال.

توزیع حرارت در پاس دوم

در پاس دوم به مانند پاس اول شمشال از کالیبر چهارم قفسه اول عبور می‌کند با این تفاوت که در این پاس فاصله دو غلتک از ۱۶۰ میلی‌متر به ۱۵۳ میلی‌متر تغییر می‌کند. در واقع این پاس نیز مانند پاس اول صرفاً جهت کاهش ضخامت شمشال ورودی به قفسه مورد استفاده قرار می‌گیرد. شمشال پس از خروج از پاس اول و پس از انتقال حرارت و تغییر شکل مربوط به این پاس، وارد پاس دوم از قفسه اول می‌شود. پس از آماده‌سازی پاس دوم جهت شبیه‌سازی، اقدام به حل مساله با شرایط جدید گردید.

توزیع حرارت در پاس سوم

در این پاس، از کالیبر دوم قفسه اول جهت عبور شمشال استفاده می‌شود. در این پاس، فاصله دو غلتک از ۱۵۳ میلی‌متر به ۶۰ میلی‌متر کاهش می‌یابد. در واقع این پاس علاوه بر کاهش ضخامت شامل گرد کردن گوشه‌های شمشال نیز می‌گردد. شمشال پس از خروج از پاس دوم و پس از اینکه انتقال حرارت و تغییر شکل مربوط به این پاس را انجام داد، وارد پاس سوم از قفسه اول می‌شود.

توزیع حرارت در پاس چهارم

در پاس چهارم نیز مانند پاس سوم از کالیبر ۲ جهت عبور شمشال استفاده می‌شود. در این پاس فاصله دو غلتک از ۶۰ میلی‌متر به ۴۲ میلی‌متر کاهش می‌کند. در واقع این پاس هم علاوه بر کاهش ضخامت، گوشه‌های شمشال را نیز گرد تر می‌کند. در این پاس همانطور که پیشتر بیان شد دقیقاً از همان کالیبر پاس سوم استفاده شده و شمشال به صورت برگشتی از



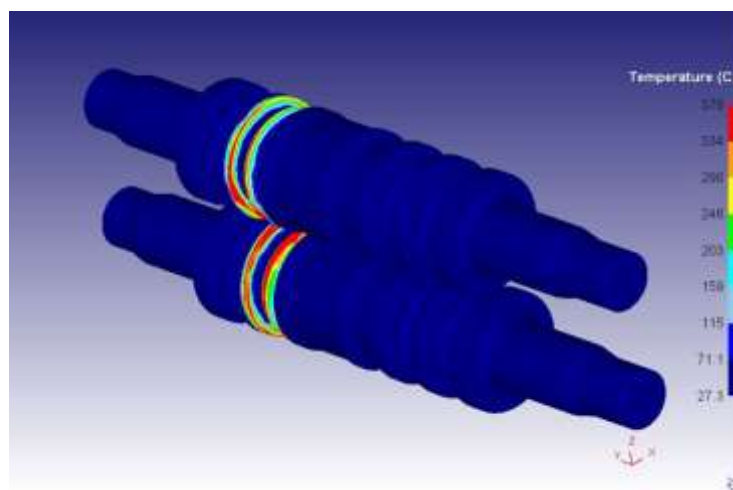
پاس سوم از این پاس عبور می‌کند. تنها تفاوت، نزدیکتر شدن ۱۸ میلی‌متری دو غلتک به یکدیگر بوده که سهم هر کدام از غلتک‌ها ۹ میلی‌متر است. پس نباید انتظار تغییر دمای زیادی را نسبت به پاس سوم داشت.

توزیع حرارت در پاس پنجم

در پاس پنجم از کالیبر اول جهت عبور شمشال استفاده می‌شود. در این پاس فاصله دو غلتک از ۴۲ میلی‌متر به ۵۹ میلی‌متر تغییر می‌کند. در واقع این پاس علاوه بر کاهش ضخامت شامل شکل دهی اولیه به شمشال است. تفاوت این پاس با پاس قبلی علاوه بر تغییر کالیبر، دور شدن ۱۷ میلی‌متری دو غلتک به یکدیگر بوده که سهم هر کدام ۸/۵ میلی‌متر خواهد بود.

توزیع حرارت در پاس ششم

در پاس ششم نیز مانند پاس پنجم از کالیبر اول قفسه اول جهت عبور شمشال استفاده شده است. در این پاس فاصله دو غلتک از ۵۹ میلی‌متر به ۱۵ میلی‌متر تغییر یافته و شمشال پس از خروج از پاس پنجم و پس تغییر شکل مربوط به این پاس، وارد پاس ششم از قفسه اول شده است. تنها تفاوت، نزدیکی ۴۴ میلی‌متری دو غلتک به یکدیگر است. شکل (۶) تغییر دمای غلتک‌ها را در انتهای پاس ششم نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده شده، بیشترین دمای بوجود آمده در غلتک برابر ۳۷۶ درجه سانتی‌گراد است.



شکل (۶): توزیع دما توزیع دما بر روی غلتک‌ها بعد از انجام پاس ششم نورد گرم.

شبیه‌سازی انتقال حرارت در فرآیند نورد بین شمشال و غلتک‌ها به همراه سیستم خنک‌کاری

به دلیل ماهیت فرآیند نورد گرم، شمشال در دمای بین ۱۳۰۰-۸۵۰ درجه سانتی‌گراد در قسمت‌های مختلف خط تولید قرار گرفته و از اینرو غلتک‌ها در حین تماس با شمشال در معرض انتقال حرارت با مکانیزم‌های گوناگون قرار می‌گیرند. در نتیجه شیوه خنک‌کاری غلتک‌ها و عوامل مؤثر بر آن در کیفیت محصول تولیدی و همچنین طول عمر غلتک‌ها در قفسه‌های مختلف نورد، بسیار حائز اهمیت بوده است. غلتک‌های استفاده شده در شرکت گروه ملی خوزستان نیز توسط آب پاش خنک‌سازی می‌گردند. شکل (۷) مقایسه‌ای بین خنک‌سازی انجام شده در شرکت گروه ملی و شماتیک مدل‌سازی انجام شده از این فرآیند در نرم‌افزار صورت گرفته است. همانطور که شکل (۷-الف) مشخص شده است آب با دبی زیاد و دمای ۳۳ درجه سانتی‌گراد بر روی غلتک‌ها پاشش شده و سبب کاهش دمای غلتک‌ها می‌شود. به منظور شبیه‌سازی خنک‌سازی غلتک‌ها به هنگام عبور شمشال و قبل و بعد آن، (شکل ۷-ب)) انتقال حرارت از نوع جابجایی بر روی محل‌هایی که آب پاشش می‌شود در نظر گرفته شد. ضریب انتقال حرارت آب با توجه به دبی و نحوه پاشش آب برابر $60 \text{ (W/m}^2\text{K)}$ و دمای آب نیز برابر ۳۰ درجه در نظر گرفته شد.



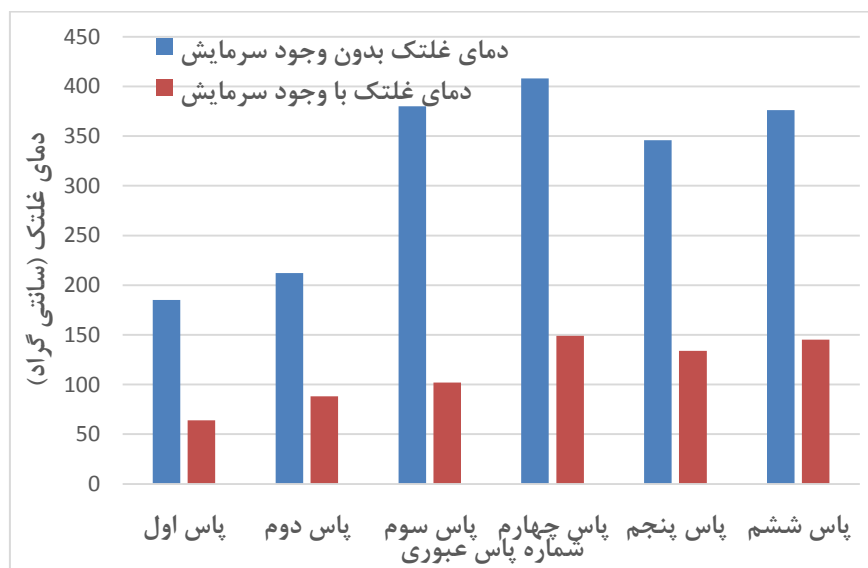
ب



الف

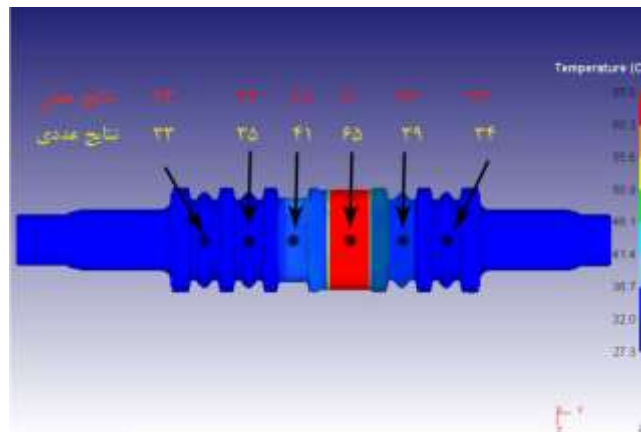
شکل (۷): الف) مکانیزم خنک‌کاری غلتک‌های قفسه اول ب) شماتیک پاشش سیال به منظور خنک‌کاری غلتک‌های قفسه اول.

پس از اعمال شرایط مرزی حرارتی جدید بر روی غلتک‌ها، مشاهده شد که دمای غلتک‌ها در انتهای هر پاس به طور چشمگیری کاهش یافته که علت آن را می‌توان دمای پایین آب و دبی بالای آن دانست. با وجود پاشش شدید آب خنک بر روی غلتک‌ها، دمای غلتک‌ها به سرعت پایین آمده است. در شکل (۸) نتایج حاصل از نقایسه دمای غلتک با وجود سامانه خنک‌کاری و بدون وجود آن ارائه شده است.



شکل (۸): مقایسه دمای بیشینه غلتک در دو حالت خنک‌کاری آن و بدون خنک‌کاری.

بمنظور صحت سنجی نتایج حاصله از شبیه‌سازی از نتایج آزمایشگاهی استفاده شده است. نتایج آزمایشگاهی استخراج شده در پژوهش حاضر با استفاده از ترموکوپل لیزری ساخت کمپانی OPTEX مدل ۵۱۴۰ بوده است. به منظور بدست آوردن دماهای مورد نیاز از کارکرد غلتک‌های قفسه اول، شش نقطه بر روی غلتک به منظور استخراج دماهای مربوطه تعیین گردید. دماهای مورد نظر در این شش نقطه توسط ترموکوپل تعیین گردیدند و پس از آن مقایسه‌ای میان هر دو حالت تجربی و عددی انجام شد. قیاس بین نتایج حاصل در شکل (۹) نشان داده شده است. این مقایسه برای پاس ۱ از قفسه اول در حالی صورت پذیرفت که خنک‌سازی نیز بر روی غلتک انجام گرفته است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود تطابق خوبی میان نتایج عملی و شبیه‌سازی عددی وجود داشته است.



شکل (۹): مقایسه نتایج دمایی شبیه‌سازی و نتایج عملی محاسبه شده از قفسه اول.

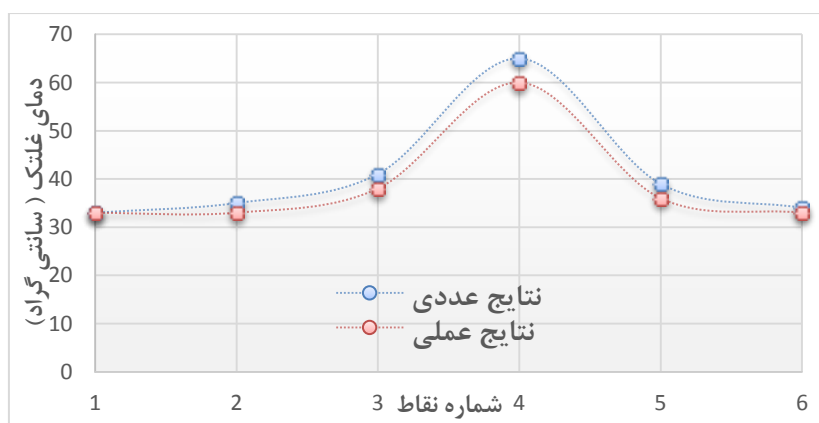
در جدول (۳) میزان درصد خطای بدست آمده از مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی و نتایج آزمایشگاهی نشان داده شده است. میزان درصد خطا نیز از معادله (۲) محاسبه شده که در آن y مقدار حاصل از شبیه‌سازی و \hat{y} مقدار آزمایشگاهی بوده است.

$$Error = \left| \frac{\hat{y} - y}{\hat{y}} \right| \times 100 \quad (2)$$

جدول (۳): بیان درصد خطا بین نقاط نشان داده شده در شکل (۹).

	نقطه ۱	نقطه ۲	نقطه ۳	نقطه ۴	نقطه ۵	نقطه ۶
مقدار تجربی	۳۳	۳۳	۳۸	۶۰	۳۶	۳۳
مقدار شبیه‌سازی	۳۳	۳۵	۴۱	۶۵	۳۹	۳۴
درصد خطا	۰/۰	۰۶/۰۶۱	۰۷/۸۹۵	۰۸/۳۳۳	۰۸/۳۳۳	۰۳/۰۳۰

علت خطای بیان شده در جدول (۳)، میان نتایج عملی و عددی، را می‌توان خطای اندازه‌گیری دانست. بدان معنا که زمان استفاده از ترموکوپل مقداری سیال خنک‌سازی بر روی غلتک وجود داشته که با خود غلتک کاملاً هم‌دما نیست. برای بررسی بهتر نتایج، می‌توان گرادیان دمایی حاصل از نتایج حل عددی و آزمایشگاهی را در راستای طولی غلتک بالایی قفسه اول بررسی نمود. در شکل (۱۰) گرادیان بین این دو نتایج نشان داده شده است.



شکل (۱۰): مقایسه نتایج دمایی شبیه‌سازی و نتایج عملی محاسبه شده از قفسه اول.



همانطور که شکل (۱۰) مشاهده شده، گرادپان دمایی به دست آمده در دو حالت تقریباً مشابه است.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر به بررسی انتقال حرارت و توزیع حرارت بر غلتک، در شرایط کارکرد و فرآیند نورد گرم تولید تیر آهن پرداخته شد. به منظور شبیه‌سازی و بررسی تاثیر هر کدام از پارامترهای مذکور از نرم‌افزار Deform3D استفاده شده است. بمنظور دستیابی به توزیع حرارت در پیکره جسم، دو حالت مختلف برای کارکرد نورد گرم در نظر گرفته شد. در روش اول هیچگونه خنک‌کاری در حین فرآیند نورد صورت نگرفته و در روش دوم به هر کدام از غلتک‌ها سیال خنک‌کننده پاشش شده است. با بررسی شبیه‌سازی انجام شده و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی می‌توان به موضوعات زیر اشاره نمود:

- (۱) سه مکانیزم انتقال حرارت یعنی جابجایی، هدایت و تشعشع در فرآیند نورد گرم تیر آهن مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد که بیشترین تاثیر را مکانیزم هدایت در توزیع دمایی ایجاد شده در غلتک‌ها دارد.
- (۲) به دلیل سرعت چرخش بالای غلتک‌ها و متعاقب آن عبور شمش از درون آن، مشاهده شد که عمق نفوذ حرارت به درون غلتک کم می‌باشد. این موضوع اهمیت موضوع پرداخت سطح در ساخت این غلتک‌ها را دو چندان می‌نماید.
- (۳) مشخص شد که خنک‌کاری پارامتر بسیار مهمی در تعدیل پیک‌های دمایی بالای به وجود آمده در غلتک‌ها بوده و توزیع دمایی را بر روی غلتک به مقدار قابل توجهی کاهش می‌دهد.
- (۴) مشاهده شد که در صورت اعمال خنک‌کاری مناسب بر روی غلتک‌ها، می‌توان افزایش دمایی غلتک‌ها را کاهش داده و شوک‌های حرارتی را کاهش داد.

مراجع

- [۱] صابونچی، ا.، عباسپور، م.، گنجه‌زاده، ا.، (۱۳۷۹)، حل عددی معادلات انتقال حرارت غلتک نورد در حالت غیردائم و شرایط مرزی متغیر، سمپوزیوم فولاد ۷۹، ص. ۶۵۷-۶۶۸.
- [۲] حاجیان‌نژاد، ع.، توانگر، م.، گنجه‌زاده، ا.، (۱۳۷۹)، شبیه‌سازی کامپیوتری تغییرات دمایی بار در خنک‌نورد گرم ورق، سمپوزیوم فولاد ۷۹، ص. ۲۹۵-۳۰۷.
- [۳] صابونچی، ا.، خردمند، س.، مدرس، ف. ق.، کی‌یگانه، ع.، (۱۳۸۴)، شبیه‌سازی حرارتی غلتک‌های نورد گرم بمنظور تخمین اثرات تغییر جنس غلتک بر توزیع دما و کراون حرارتی غلتک کاری، سمپوزیوم فولاد ۸۴، ص. ۳۲۲-۳۳۲.
- [4] Forouzan, S., Akbarzadeh, A., (2007), Prediction of effect of thermo-mechanical parameters on mechanical properties and anisotropy of aluminum alloy AA3004 using artificial neural network, *Materials and Design* (28), pp 1678-1684.
- [۵] سنبلی، ع.، سراج‌زاده، س.، (۱۳۸۶)، تعیین تنش‌های حرارتی-مکانیکی در غلتک طی فرآیند نورد داغ ورق، سمپوزیوم فولاد ۸۶، ص. ۵۲۱-۵۲۸.
- [۶] قره‌داغی، س.، کرمانپور، ا.، ضیایی‌راد، س.، حسن‌پور، ک.، ذاکر، م.، (۱۳۸۶)، شبیه‌سازی عددی مکانیکی-حرارتی مرحله خنک‌کاری نورد کیلگرد کارخانه کوثر، سمپوزیوم فولاد ۸۶، ص. ۷۷۳-۷۸۱.
- [۷] کرمانپور، ا.، ضیایی‌راد، س.، حسن‌پور، ک.، طرقي-نژاد، م. ر.، قره‌داغی، س.، ذاکر، م.، (۱۳۸۷)، تحلیل خط نورد میلگرد فولادهای ساختمانی کارخانه کوثر توسط شبیه‌سازی عددی، سمپوزیوم فولاد ۸۷، ص. ۸۴۱-۸۴۸.
- [8] Yang, H., Wang, M., Guo, L. G., Sun, Z. C., (2008), 3D coupled thermo-mechanical FE modeling of blank size effects on the uniformity of strain and temperature distributions during hot rolling of titanium alloy large rings, *Computational Materials Science* 44(2), pp 611-621.
- [۹] باستی، ع.، خلیلی‌راد، ا.، سندی، م. ج.، (۱۳۸۸)، بررسی اثرات پارامترهای فرآیند نورد گرم در محصول نهایی به روش اجزای محدود، دهمین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید ایران، ۱۰.



- [10] Shahani, A.R., Setayeshi, S., Nodamaie, S.A., Asadi, M.A., Rezaie, S., (2009), Prediction of influence parameters on the hot rolling process using finite element method and neural network, *Journal of Materials Processing Technology* 209(4), pp 1920-1935.
- [11] D. Benasciuttia, D., Brusab, E., Bazzaro, G., (2010), Finite elements prediction of thermal stresses in work roll of hot rolling mills, *Procedia Engineering* 2(1), pp 707-716.
- [12] Rui-bin, M., Chnag-sheng, L., Xiang-hua, L., Bin. H., (2010), Analysis of strip temperature in hot rolling process by finite element method, *International Journal of Iron and Steel Research* 17(2), pp 17-21.
- [13] Hsu, Y., Lin, Y., Sun, K., Wu, S., (2012), Development of a Continuous Rolling Process for Titanium Wires, *China Steel Technical Report* 25(1), pp 28-35.
- [14] Ding, Y., Zhu, Q., Le, Q., Zhang, Zh., Bao, L., Cui, J., (2015), Analysis of temperature distribution in the hot plate rolling of Mg alloy by experiment and finite element method, *Journal of Materials Processing Technology* 225, pp 286-294.
- [15] Chen, J., Dong, F., Jiang, H., Liu, Zh., Wang, G., (2018), Influence of final rolling temperature on microstructure and mechanical properties in a hot-rolled TWIP steel for cryogenic application, *Materials Science & Engineering A* 724(1), pp 330-334.
- [16] Bazkiaei, A.K., Shirazi, K. H., Shishesaz, M., (2021), Thermo-hyper-viscoelastic analysis of a rubber cylinder under cyclic deformation, *Journal of Rubber Research* 24(1), pp 13-26.

[۱۷] آزاد، م.، (۱۳۸۹)، آشنایی با نورد فلزات، اداره آموزش و توسعه منابع انسانی شرکت گروه ملی صنعتی فولاد ایران.