شبیه‌سازی تنش‌های حرارتی در فرآیند نورد گرم و تاثیر آن‌ها بر شکست غلتک

امیرحشمت خدمتی بازکیائی[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: ۱۴۰۲/۱۰/۰۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۰۳

چکیده

فرایند نورد، در واقع شکل‌دهی فولاد می‌باشد که در آن از غلتک‌هایی برای ایجاد تغییر شکل، بهبود خواص مکانیکی مواد و از بین بردن یکنواختی فلز استفاده می‌گردد. فولاد را می‌توان در دو فرم گرم و سرد نورد نمود، که هر یک از آنها ویژگی‌های خاص خود را دارند. هدف از انجام این پژوهش بررسی تاثیر تنش‌های حرارتی حاصله در حین فرآیند نورد بر شکست غلتک‌ها با استفاده از شبیه‌سازی اجزاء محدود بوده است. این شبیه‌سازی 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. در این پژوهش تاثیر خنک‌کاری اصولی و دقیق در حین فرآیند نورد نیز مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده در شش پاس نورد گرم با توجه به بیشترین دمای غلتک‌ها و میزان تنش فون‌مایزز ایجاده شده در غلتک‌ها نشان داده شده و میزان نقش تنش‌های حرارتی بر شکست غلتک‌ها بیان شده است.

کلمات کلیدی: فرآیند نورد، اجزاء محدود، شکست.

مقدمه

نورد یکی از روش‌های شکل‌دهی مواد دارای قابلیت موم‌سانی بوده است. در دماهای پایین و نزدیک به دمای اتاق تنها فلزات و برخی از پلیمرها توان موم‌سانی مناسب از خود نشان می‌دهند برای افزایش این قابلیت و همچنین شکل‌دهی موادی که در دماهای پایین نورد آن‌ها امکان‌پذیر نیست، از انواع نورد استفاده می‌شود. نورد یک فرآیند فلزکاری است که شامل عبور دادن یک فلز از میان یک جفت رول برای کاهش ضخامت آن، تغییر خواص مکانیکی آن یا دستیابی به شکل دلخواه است. این فرآیند به‌طور گسترده در تولید محصولات فلزی مختلف از جمله ورق‌ها، صفحات، میله‌ها و اشکال ساختاری استفاده می‌شود. نورد یک مرحله کلیدی در ساخت فولاد و سایر فلزات است که شمش یا بیلت را به اشکال قابل استفاده‌تر تبدیل می‌کند.

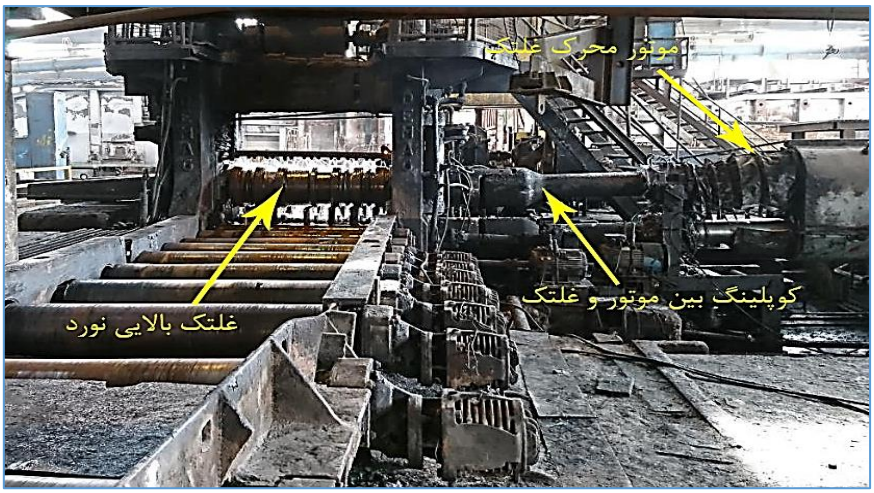
صابونچی و همکاران[۱] تغییر هندسه پاشش آب به غلتک نورد و اثر آن بر درجه حرارت را بررسی نمودند و در آن به منظور تعیین حالت هندسی بهینه برای خنک‌کاری با استفاده از بالاترین ضریب انتقال حرارت و جلوگیری از پاشش آب به اطراف، معادلات انتقال حرارت غلتک در حالت غیر دائم با شرایط مرزی متغییر برای انواع وضعیت‌های 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 ارایه یک مدل ریاضی غیرآنی به توزیع دمای بار در طول خط نوردگرم ورق مجتمع فولاد مبارکه پرداختند. بدین منظور، معادلات انتقال حرارت دوبعدی را با فرض غیردائم همراه با شرایط مرزی مناسب برای هر قسمت خط نوردگرم 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 نمودند. نتایج بیانگر این امر بوده جنس غلتک، پارامتری مهم در شبیه‌سازی نخواهد بود. کویتی و همکاران[۴] به تحلیل فونی و ارتقاء کوره های پیش‌گرم نورد گرم فولاد

مبارکه اصفهان از دیدگاه مصرف انرژی پرداخته و ضمن معرفی و بررسی آن، ممیزی انرژی کوره شماره یک را به‌طور کامل مورد تحلیل قرار داده است. در این پژوهش تلفات حرارتی کوره از بخش‌های مختلف مورد محاسبه و بررسی کامل و در ادامه نتایج محاسباتی با استفاده از نمودارهای بدست آمده در هر بخش، مورد مقایسه با شرایط طراحی کوره قرار گرفته، علت عدول شرایط موجود از شرایط طراحی را با استفاده از دیاگرام های سانکی مشخص، راهکارهای کاهش مصرف سوخت و انرژی که موجب برطرف نمودن موانع توسعه خط نورد گرم، افزایش تولید و کاهش نشر آلاینده های زیست محیطی می شود ارایه گردیده است. زائرین[۵] با استفاده از بسط مدل ریاضی، دمای غلتک حین نورد گرم، معادله انتقال حرارت آن مکانیزم خستگی حرارتی سطح غلتک، پیش بینی و تخمین تنش‌حرارتی، توسعه دما و تنش‌حرارتی در غلتک تحت سیستم های مختلف خنک‌کاری را محاسبه نمود. ایشان بیان داشتند که شیوه خنک‌کاری غلتک‌ها و عوامل مؤثر بر آن، در کیفیت محصول تولیدی و همچنین طول عمر غلتک‌ها در قفسه‌های مختلف نورد، بسیار حائز اهمیت خواهد بود. بهلولی و همکاران[۶] برای بررسی مکانیزم تغییر شکل حفره‌ها از مدل‌های المان محدود دینامیکی غیر خطی سه بعدی استفاده نمودند. در این پژوهش از مقایسه نتایج آزمایشگاهی با مدل المان محدود سه بعدی برای صحت سنجی استفاده شده است و کرنش پلاستیک، توزیع تنش های اصلی در اطراف حفره و نسب کاهش حفره‌ها به عنوان پارامترهای مورد بررسی در نظر گرفته شده است. نتایج نشان داده‌اند که حفره‌ها از شکل کروی به بیضوی تغییر می‌یابند و با افزایش پاس نورد کوچک‌تر و نامنظم‌تر می‌شوند. سطوح بالایی و پایینی حفره‌ها بعد از پاس آخر نورد به هم متصل شده و تغییر شکل حفره‌های با اندازه‌های متغیر به یک شکل است اما با تحلیل ادغام هیدرواستاتیکی مشاهده گردید که حفره‌های کوچک بسیار سریع‌تر از حفره‌های بزرگ پیوند خوردند. یونسی توابع و همکاران[۷] با بهره از یک مدل المان محدود سه بعدی مزدوج مکانیکی حرارتی به تحلیل فرآیند نورد گرم آلومینیم AA1100 پرداختند. در پژوهش ایشان اثرات پارامترهای دما و سرعت شکل‌دهی بر روی پارامترهای خروجی نظیر نیرو و گشتاور نورد بررسی شده و جهت صحت سنجی نتایج اجزاء محدود با داده‌های تجربی مرجع معتبر مقایسه شده است و تطابق خوبی میان این دو برقرار بوده است. شهری و همکاران[۸] به کمک روش اجزاء محدود و با استفاده از نرم افزار آباکوس، به شبیه‌سازی نورد گرم ۵ پاسه که به صورت رفت و برگشتی توسط دو غلتک بر نمونه‌ای تخت از جنس فولاد میکرو آلیاژی نایابیوم دار که عرض آن طی نورد ثابت بوده، پرداختند. ایشان با مقایسه نتایج به‌دست آمده از روش مطالعه عددی با نتایج تجربی، تغییرات مقدار نیرو و گشتاور عکس العمل وارده به غلتک‌ها در طی فرایند نورد گرم را محاسبه نمودند. پرستش و موگویی[۹] با توسعه یک مدل اجزاء محدود به شبیه‌سازی رفتار لرزهای قاب ترکیبی گرم نورد ترکیب شده درعرض قاب سرد نورد سبک فولادی پرداختند. برای صحت سنجی مدل اجزاء محدود ارایه شده، از قیاس با نتایج آزمایشگاهی استفاده شده است. نتایج مدل اجزاء محدود توسعه داده شده نشان داد که این مدل توانایی پیش بینی رفتارلرزه ای قاب ترکیبی فولادی گرم نورد و سرد نورد در عرض را با دقت بسیار بالایی دارد. خدمتی بازکیائی و همکاران[۱۰] با ارایه مدل مجزا ترمو-ویسکو هایپرالاستیک، تاثیر حرارت ایجاد شده در لاستیک را بر اثر بارگزاری متناوب بر خرابی لاستیک مورد بررسی قرار داده و پس از حل نیمه تحلیلی با استفاده از تابع گرین، نتایج حاصله با حل اجزاء محدود و نتایج آزمایشگاهی مورد صحت‌سنجی قرار گرفت. خدمتی و سوزنگر[۱۱] به بررسی توزیع دما بر روی غلتک‌های موجود در قفسه اول نورد تیرآهن شرکت گروه ملی پرداختند. به منظور بررسی اثرات خنک‌سازی بر روی غلتک‌ها در حین نورد، شبیه‌سازی انجام گرفته در دو حالت با و بدون مایع خنک کننده صورت پذیرفت. بدین منظور برای هر پاس از قفسه اول خط نورد دو شبیه‌سازی انجام گرفت و به منظور شبیه‌سازی سیال خنک‌ساز، از اثر آن بر روی غلتک‌ها استفاده شده است. پس از مقایسه نتایج، مشخص گردید که خنک‌سازی باعث کاهش توزیع دمای روی غلتک شده و کارکرد آنها بهبود یافته است. بینا و همکاران[۱۲] به شبیه‌سازی عددی فرایند نورد گرم یک تیر با جنس فولاد ۶Cr۱۰۰ برای یک پاس در نرم افزار آباکوس پرداختند و تاثیر سرعت دوران غلتک بر روی گشتاور و توان مصرفی فرآیند محاسبه نمودند. نتایج بدست آمده نشان داد که با افزایش سرعت دوران غلتک، مدت زمان انجام فرایند نورد کاهش و گشتاور عکس‌العمل غلتک و به تبع آن توان مصرفی در فرایند نورد افزایش می یابد.

در پژوهش حاضر، پس از بیان مقدمه و مروری بر پژوهش‌های مرتبط صورت گرفته، در ادامه پژوهش [۱۱]، بررسی کارکرد غلتک گرم، شبیه‌سازی فرآیند صورت گرفته و تنش‌های حرارتی پدیدار شده در حین نورد در غلتک‌ها محاسبه می‌گردد. پس ازمحاسبه تنش‌حرارتی، میزان تاثیر این پدیده بر شکست غلتک‌ها بیان شده است.

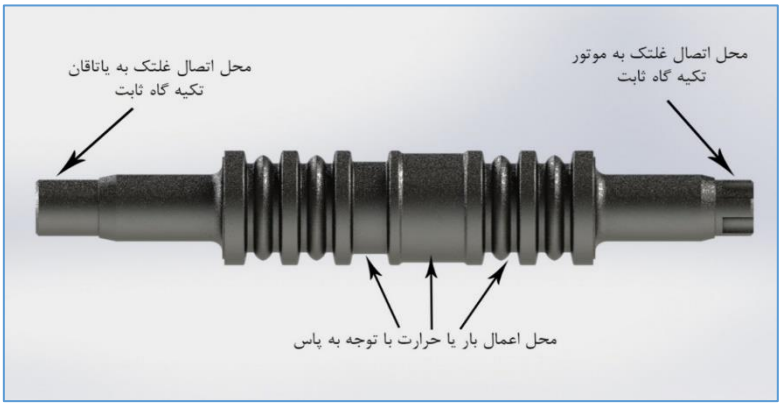
تعیین تنش‌های حرارتی غلتک‌ها در حین نورد

در این بخش، به‌منظور بررسی تاثیر تنش‌های حرارتی به وجود آمده در غلتک‌ها بر روی شکست آنها، شبیه‌سازی در حین فرآیند نورد انجام شده است. غلتک‌های نورد در معرض دو نوع تنش و در واقع بار خارجی قرار داشته که در این پژوهش به بررسی، تنش‌های حرارتی پرداخته شده است. شکل (۱) نمایی از نحوه اتصال موتورهای چرخاننده غلتک را نشان می‌دهد. اگر از شتاب اولیه شروع حرکت صرف نظر شود، به دلیل ثابت بودن سرعت چرخش غلتک‌ها می‌توان محل اتصال غلتک ها به موتور را به صورت تکیه ثابت در نظر گرفت.



شکل ۱: نمای کلی از نحوه اتصال غلتک‌ها به موتور گرداننده و یاتاقان

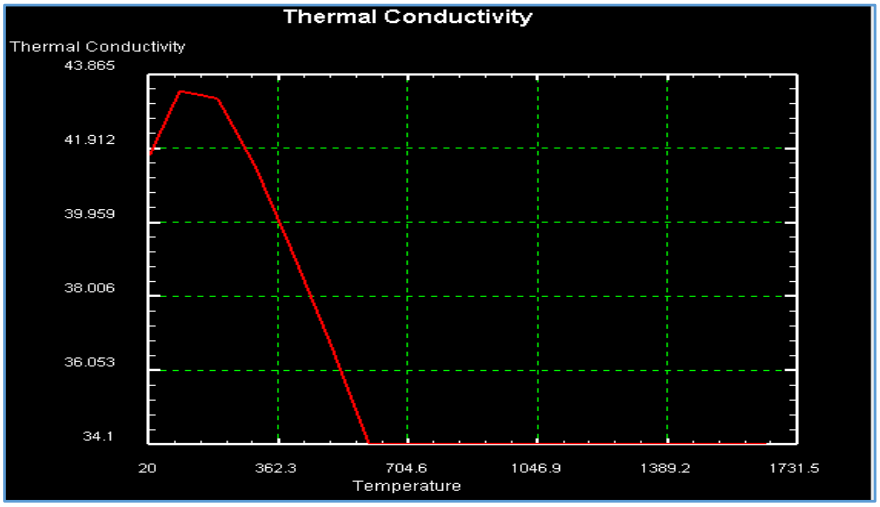
شکل (۲) شرایط مرزی حرکتی جهت تحلیل و بررسی تنش‌های حرارتی غلتک‌ها را نشان داده شده است. این نوع قیدگذاری با توجه شرایط حاکم در شرایط واقعی کارکرد در نظر گرفته شده است.



شکل ۲: شرایط مرزی حرکتی اعمالی به غلتک به همراه بارگذاری حرارتی

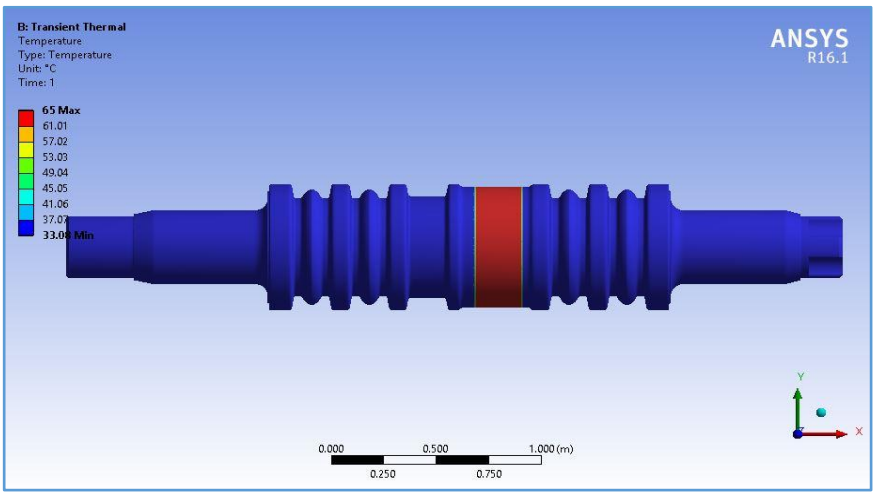
پس از اعمال شرایط مرزی، با توجه به حرارت وارده به غلتک‌ها در پاس‌های مختلف اقدام به شبیه‌سازی تنش‌های به وجود آمده در غلتک‌ها، با توجه به توزیع حرارت در آنها گردید. شبیه‌سازی انجام گرفته برای هر شش پاس و در شرایط دمایی مربوط

به هر پاس، صورت گرفت که در تمام مراحل غلتک‌ها توسط آب خنک‌کاری شده‌اند. به منظور تحلیل تنش در این پژوهش از نرم‌افزار انسیس استفاده شده است. بدین صورت که کانتور دمایی به دست آمده به همراه ابعاد اتصال شمشال و غلتک و همچنین اعمال شرایط مرزی و آماده‌سازی مدل در این نرم‌افزار، اقدام به شبیه‌سازی و استخراج تنش‌های به وجود آمده در غلتک گردید. شکل (۳) تغییرات ضریب انتقال حرارت ماده Cast Iron SG را با توجه به تغییرات دمایی نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌گردد ضریب انتقال حرارت متغیر با دما فرض شده و مقدار آن برای دمای بالای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد ثابت و برابر ۳۴/۱ (W/m2K) می‌باشد.

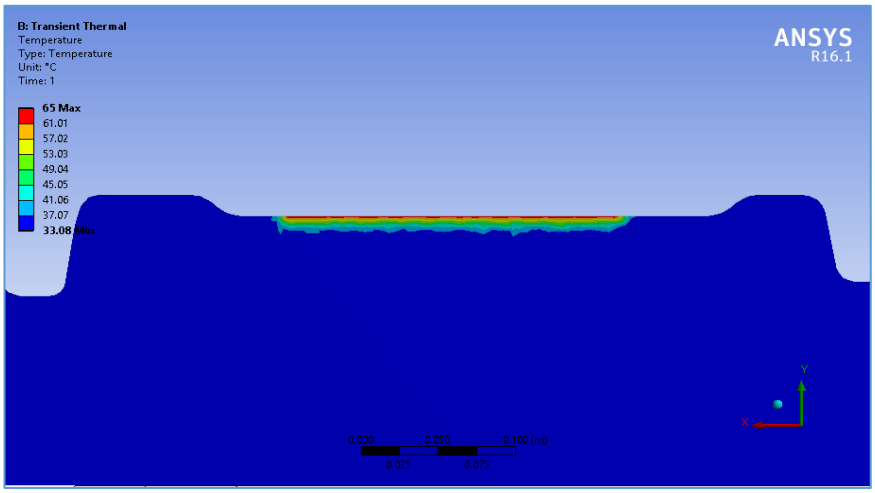


شکل ۳: تغییرات ضریب حرارتی ماده Cast Iron SG با تغییرات دمای محیط

شکل (۴) مدل وارد شده به نرم افزار انسیس را به منظور شبیه‌سازی پاس اول نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود دماهای وارده به محیط نرم افزار کاملا مشابه نتایج به دست آمده از مرجع [۱۱] می‌باشد همچنین در شکل (۵) می‌توان عمق نفوذ حرارت به غلتک را مشاهده نمود.

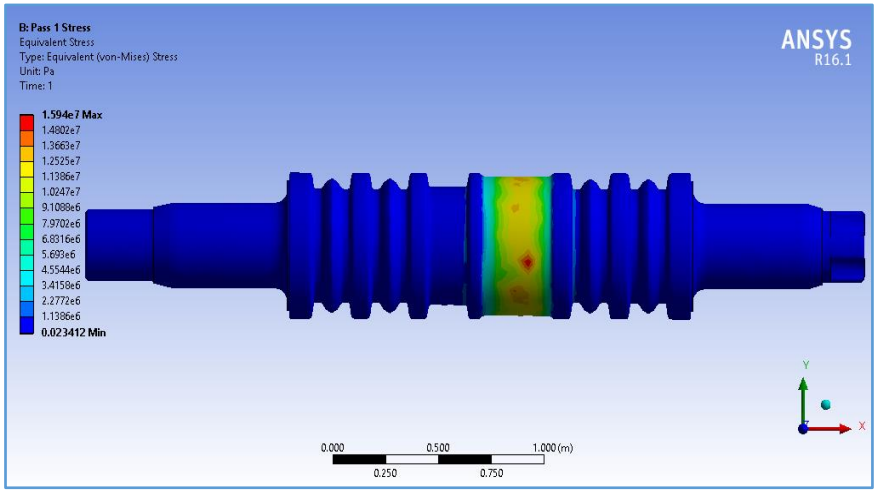


شکل ۴: بارگذاری دمایی در نرم‌افزار به منظور بررسی تنش‌های حرارتی



شکل ۵: نفوذ عمقی حرارت به غلتک در فرآیند نورد در پاس اول

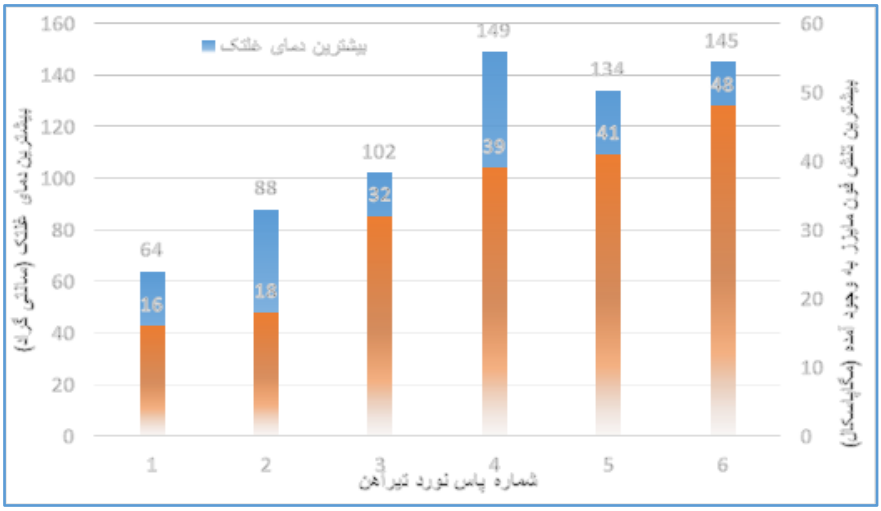
مدل آماده‌سازی شده جهت شبیه‌سازی تنش‌های به وجود آمده در غلتک برای پاس اول بارگذاری از نوع حرارتی بود و دو طرف غلتک با استفاده از تکیه گاه ثابت بی‌حرکت شده است. پس از بارگذاری و اعمال شرایط مرزی اقدام به حل مساله گردیده و شکل (۶) تنش‌های فون‌مایزز به وجود آمده در غلتک را برای پاس اول نشان می‌دهد. بیشترین تنش فون‌مایزز ایجاد شده در پاس اول در اثر بار حرارتی به وجود آمده در سطح غلتک، برابر حدود ۱۶ مگاپاسکال بوده که مقداری بسیار کم است (شکل ۶). به صورت مشابه اقدام به شبیه‌سازی حرارتی سازه‌ای کلیه پاس‌های نورد تیرآهن در قفسه اول شرکت گروه ملی خوزستان گردیده است.



شکل ۶: تنش‌های فون‌مایزز ناشی از بار حرارتی وارده از پاس اول

بیشترین دمای به‌وجود آمده در پاس سوم با وجود سیال خنک‌کننده برابر ۱۰۲ درجه سانتی‌گراد است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، می‌توان مشاهده نمود که بیشترین تنش فون‌مایزز حرارتی به وجود آمده در پاس سوم از قفسه اول نورد تیرآهن، برابر ۳۲ مگا پاسکال بوده که مشابه پاس اول مقداری اندک می‌باشد. مشابه مراحل بیان شده پیشین در این قسمت، برای کلیه پاس‌های قفسه اول انجام گردید.

در شکل (۷) نمودار مربوط به تنش‌های حرارتی را نشان داده شده است. این تنش‌ها با توجه به میزان حرارت وارده به غلتک‌ها و شرایط مرزی اعمالی به غلتک ترسیم شده‌اند.



شکل ۷: بیشینه دماها و تنش‌های فون‌مایزز به وجود آمده در غلتک‌ها در پاس‌های مختلف

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر به بررسی تنش‌های حرارتی بوجود آمده در غلتک‌های فرآیند نورد گرم تولید تیرآهن و تاثیر آن بر شکست غلتک پرداخته شد. به منظور شبیه‌سازی و بررسی تاثیر تنش‌های حرارتی از نتایج حاصل از نرم‌افزار دیفرم پژوهش [۱۱] استفاده شده است. با توجه به دمای وارده به غلتک، مشاهده گردید به دلیل خنک‌کاری غلتک‌ها توسط مایع، تنش‌های ایجاد شده در غلتک پایین است. به عبارت دیگر با توجه به حجم غلتک مورد استفاده در فرآیند نورد و همچنین جنس چدن سختی که در ساخت این غلتک‌ها استفاده می شود، این تنش‌ها نمی‌توانند تاثیری در شکست داشته باشند. ذکر این نکته نیز الزامی است که در صورت عدم خنک‌کاری اصولی و دقیق در فرآیند نورد، دمای غلتک‌ها به شدت بالا رفته و موجبات شکست به دلیل تنش‌های حرارتی بالا در غلتک‌ها فراهم می‌گردد. در نتیجه باتوجه کوچک بودن تنش‌های حرارتی نسبت به استحکام تسلیم ماده سازنده غلتک، از آنها می‌توان در تحلیل شکست غلتک‌ها چشم پوشی نمود.

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 دمای بار در خز نوردگرم 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.

[۴] کویتی، ع.، هراتیان، م.، احمدی، ح.، (۱۳۸۹)، بررسی بهینه سازی مصرف انرژی با استفاده از آنالیز حرارتی و تحلیل مصرف ویژه سوخت در کوره‌های پیشگرم نورد گرم فولاد مبارکه اصفهان، ماهنامه نفت و انرژی، ۵۰، ص. ۴۹۰-۴۹۹.

[۵] زائرین، ا.، (۱۳۹۴)، بررسی پدیده انتقال حرارت غلتک حین نورد گرم فولاد و ارایه شیوه خنک کاری غلتک ها، اولین کنفرانس ملی رویکردهای نوین و کاربردی در مهندسی مکانیک، https://civilica.com/doc/492112.

[۶] بهلولی، ح.، صفامنش، ع.، کرمانی، ع.، (۱۳۹۴)، پیش بینی و رفع خطاهای حفره ای در نورد سرد و گرم با استفاده ازروش المان محدود، اولین همایش ملی پیشرفت ها و چالش ها در علوم، مهندسی و فوناوری، https://civilica.com/doc/ / 560291.

[۷] یونسی توابع، ر.، عزیزی تفتی، ر.، خداداد سریزدی، م.، (۱۳۹۴)، بررسی عددی اثر دما و سرعت شکلدهی بر فرآیند نورد گرم آلومینیم AA1100، چهاردهمین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید ایران، https://civilica.com/doc/713541.

[۸] شهری، م.، بنی مصطفی عرب، ن.، پورگللو، م.، میراحمدی خاکی، د.، (۱۳۹۷)، تحلیل المان محدود نیرو وگشتاور عکس العمل وارده به غلتک ها در نورد گرم فولاد میکروآلیاژینایابیوم دار، سومین کنفرانس بین المللی مهندسی مکانیک و هوافضا، https://civilica.com/doc/788828.

[۹] پرستش، ح.، موگویی، ب.، (۱۳۹۹)، توسعه یک مدل اجزاء محدود برای شبیه‌سازی رفتار لرزه ای قاب گرم نورد ترکیب شده درعرض قاب فولادی سبک سرد نورد، سومین کنفرانس بین المللی مهندسی عمران، معماری و شهرسازی https://civilica.com/doc/1039368،.

[10] 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.

[۱۱] خدمتی بازکیائی، ا. و سوزنگر، ع.، (۱۴۰۱)، تحلیل و شبیه‌سازی توزیع دما بر پیکره غلتک در طی فرآیند نورد گرم با در نظرگرفتن پاشش سیال خنک‌کن ، یافته‌های نوین کاربردی و محاسباتی در سیستم‌های مکانیکی، ص. ۱۲-۲۲.

[۱۲] بینا، ع.، مسلمانی، ر.، مهدیه، م.، نظری، ف.، (۱۴۰۲)، بررسی تاثیر سرعت دوران غلتک بر توان مصرفی در فرایند نورد تیر، دومین کنفرانس بین المللی و ششمین کنفرانس ملی مواد، متالورژی و معدن ،https://civilica.com/doc/ 1642483.