

## تأثیر دمای اولیه و خنک کاری بر تنش ترمومکانیکی غلتک‌های نورد حلقه

علی نگهبان<sup>۱\*</sup>، احسان براتی<sup>۲</sup>، عبدالعلی مراثنی<sup>۲</sup>، نادر وحدت آزاد<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده هوافضا، دانشگاه هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

<sup>۲</sup> مجتمع مکانیک و هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۵-۱۲

بازنگری: ۱۳۹۷-۰۹-۲۸

پذیرش: ۱۳۹۷-۱۰-۰۶

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۲-۲۹

### کلمات کلیدی:

نورد حلقه

خنک کاری

تنش ترمومکانیکی

کد اسکریپت

آباکوس

**خلاصه:** نورد حلقه یک فرآیند شکل‌دهی فلزات است که برای آهنگری قطعات حلقوی شکل با ابعاد دقیق و بدون درز به کار می‌رود. به دلیل خصوصیات منحصر به فرد حلقه‌های تولید شده به این روش کاربرد آن‌ها در صنایع پیشرفته زیاد است. علاوه بر مزایای عدم وجود مواد اضافی و زوایای ناخواسته، مهم‌ترین مزیت تولید حلقه با این روش جریان یکنواخت ماده در حلقه پس از انجام فرآیند می‌باشد. نورد سوپر آلیاژها لزوم کارکرد دستگاه را در دمای بالا اجتناب‌ناپذیر می‌کند و این امر سبب آسیب به غلتک‌های نورد می‌شود. از سوی دیگر جهت جلوگیری از تغییر ناگهانی دمای سطحی و ایجاد پدیده سرد شدن ناگهانی در حلقه داغ، معمولاً دمای کاری غلتک‌ها بالا برده می‌شود. به طور کلی این امر باعث کاهش استحکام غلتک‌ها می‌شود. در این پژوهش تأثیر دماهای مختلف کاری غلتک و خنک کاری بر روی تنش‌های ترمومکانیکی در غلتک‌های نورد حلقه بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که تنش‌های ترمومکانیکی ایجاد شده در غلتک‌ها کاملاً با یکدیگر متفاوت است. در غلتک اصلی تنش‌های مکانیکی اثر بیشتری بر روی تنش ترمومکانیکی دارند اما در مندرل به دلیل سطح تماس بیشتر با حلقه داغ، تنش‌های حرارتی عامل تعیین کننده اندازه تنش‌های ترمومکانیکی در آن است. تأثیر خنک کاری بر روی تنش‌های ترمومکانیکی در غلتک اصلی ناچیز و در مندرل قابل توجه است. همچنین مشخص می‌شود که خنک کاری باعث افزایش دامنه تنش‌های معادل و کاهش تنش متوسط در غلتک‌ها می‌شود.

### ۱- مقدمه

برابر ترک‌های سطحی مقاومت می‌کند. در مقایسه با آهنگری، نورد حلقه از کیفیت بهتری برخوردار است زیرا علاوه بر جریان یکنواخت ماده در سطح مقطع این یکنواختی در محیط پیرامونی نیز وجود دارد. این یکنواختی باعث می‌شود تا قطعه تولید شده به طور مناسبی شکل یافته و کیفیت سطح خوبی داشته باشد و عیوب موجود در آن با نوردهای پی در پی به خوبی رفع گردد. تقاضا برای تولید حلقه به روش نورد حلقه بیشتر به تولید حلقه‌هایی با سطح مقطع‌های پیچیده مربوط می‌شود.

در حالت کلی می‌توان ماشین‌های نورد حلقه را در دو نوع شعاعی و شعاعی - محوری تقسیم بندی نمود. در نورد حلقه شعاعی با غلتک‌های موجود در آن، کنترل تنها بر شعاع داخلی و خارجی حلقه صورت می‌گیرد. این نوع ماشین درصد زیادی از انواع نورد حلقه را شامل می‌شود. در نورد حلقه شعاعی - محوری علاوه بر شعاع‌های حلقه، ارتفاع آن توسط غلتک‌های محوری کنترل می‌گردد. در

نورد حلقه فرآیندی است که در آن حلقه‌های بدون درز تولید می‌شود. رینگ‌های چرخ قطار در حدود یک قرن با این روش تولید می‌شود. این گونه حلقه‌ها در صنایع پیشرفته از جمله هوافضا و هسته‌ای کاربرد خاص و فراوانی دارد. در دیگر صنایع می‌توان به یاتاقان‌ها و همچنین چرخ‌دنده‌ها با ابعاد گوناگون که با روش‌های دیگر امکان تولید آن‌ها نیست، اشاره نمود. از دیگر مزایای تولید حلقه به این شیوه علاوه بر دقت بالا می‌توان به کاهش قابل‌ملاحظه زمان تولید و مواد اشاره نمود. علاوه بر مزایای عدم وجود مواد اضافی و زوایای ناخواسته که بعد از فرآیند باید با ماشین‌کاری برداشته شود مهم‌ترین مزیت این روش جریان ماده یکنواخت در جسم پس از انجام فرآیند می‌باشد. هنگامی که حلقه در حال شکل گرفتن است جریان ماده از انحناء حلقه تبعیت می‌کند و ساختاری تشکیل می‌دهد که در

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: a-negahban@ssau.ac.ir



ماشین‌های نورد حلقه به طور معمول غلتک اصلی ثابت بوده و دارای سرعت دورانی است در حالی که مندرل هرزگرد بوده و دارای سرعت خطی است. با نزدیک شدن مندرل به غلتک اصلی ضخامت دیواره حلقه کاهش و ارتفاع آن افزایش می‌یابد. به دلیل هندسه نامتقارن نورد حلقه با شروع فرآیند، حلقه تمایل به خارج از مرکز شدن دارد که جهت جلوگیری، از غلتک‌های راهنما استفاده می‌شود. مکان غلتک‌های راهنما توسط سیستم‌های کنترلی تنظیم شده و بر سطح خارجی حلقه مماس است و تا حد امکان طوری برنامه‌ریزی می‌گردند تا کمترین نیرو را به حلقه وارد کنند. غلتک‌های محوری که جهت به حداقل رساندن تفاوت سرعت در سطوح آزاد حلقه به شکل مخروطی طراحی می‌شوند، توانایی جابجایی به سمت بالا و پایین را دارند. با جابجایی غلتک‌های محوری حلقه با ارتفاع مدنظر تولید می‌شود. با توجه شرایط ذکر شده مشخص است که فرآیند نورد حلقه با دیگر فرآیندهای نورد متفاوت است. از تفاوت‌های اساسی موجود می‌توان به عدم تقارن شعاعی نورد به خاطر تفاوت در شعاع‌های غلتک‌ها، غلتک‌های غیر استوانه‌ای، غلتک‌ها با شرایط مرزی و سرعت‌های مختلف، تغییر قطر حلقه و سطوح تماس نسبت به زمان و کاهش یا افزایش پیوسته ضخامت و ارتفاع با توجه به شکل نهایی حلقه اشاره نمود. تاکنون فعالیت‌های زیادی جهت شبیه‌سازی نورد حلقه صورت گرفته است و مشخص شده است که با ابعاد و جنس‌های مختلف حلقه و غلتک‌ها گوناگون این فرآیند همانند فرآیندی کاملاً جدید ظاهر می‌شود.

آسیب‌های مختلفی بر دستگاه‌هایی که در دماهای بالا کار می‌کنند بروز می‌کند و با در نظر گرفتن پیچیدگی فیزیکی و عدم وجود رابطه مستقیمی برای حل آن‌ها در نظر گرفتن تمامی این پدیده‌ها با یکدیگر آنالیز و تحلیل را بسیار مشکل ساخته تا جایی که گاهی حل را غیرممکن می‌سازد. از این رو لازم است تا مهم‌ترین آسیب‌ها مشخص شده تا تحلیل بر پایه آن‌ها شکل بگیرد. در دماهای بالا عواملی از جمله اکسیداسیون، خوردگی، خزش، خستگی حرارتی، سایش و ... بر عمر قطعه تأثیر می‌گذارند. به تجربه ثابت شده است که تنش‌های ترمومکانیکی در غلتک‌های نورد تأثیر بسزایی در طول عمر آن‌ها دارند. آگاهی از رفتار اساسی مواد و غلتک‌ها در طی نوردکاری و همچنین بازرسی‌های عمیق، آنالیز تنش، کنترل دقیق شرایط سیستم باعث خواهد شد تا از شرایط کاری فرآیند اطلاعات جامعی حاصل شده

و با اتصال این دانش با جدیدترین فناوری‌های کنترل فرایند نورد و تبیین روش‌های صحیح برای بازرسی، تعمیر و نگهداری به تولید موفقیت‌آمیز قطعات با کمترین خطا و هزینه دست یافت. فرسایش و خردشدگی کم کم باعث تغییر در سطح و شکل پروفایل غلتک شده و در نتیجه باعث تعویض غلتک می‌شود. هزینه‌های توقف کار، کارهای مربوط به تعویض غلتک، تراش غلتک، عملیات حرارتی و همچنین هزینه خود غلتک مهم‌ترین هزینه‌ها در دستگاه‌های نورد می‌باشند. ۵ تا ۱۵ درصد هزینه کل نورد مربوط به مصرف غلتک می‌باشد [۱]. بسیاری از تحلیل‌های تئوری که برای پیش‌بینی و شبیه‌سازی نیروها و گشتاورهای موردنیاز در فرآیند نورد حلقه، از نورد صفحه حاصل شده‌اند. اما اکثر تحلیل‌های انجام‌شده در نورد صفحه برای تحلیل نورد حلقه صادق نیستند و نیاز به تغییرات کلی دارد. بنابراین لازم است تا جهت تخمین تنش‌های ترمومکانیکی وضعیت ناپایدار و گذرای حلقه در طی زمان توجه کافی شود. در این حوزه معمولاً حل‌های تحلیلی به‌ندرت وجود دارد و روش‌های حل تحلیلی ارائه شده باید با احتیاط استفاده شود زیرا در این‌گونه تحلیل‌ها گرادین دمای به درستی در نظر گرفته نمی‌شود و بهتر است از روش‌های عددی یا نرم‌افزارهای المان محدود استفاده شود [۲].

در نورد صفحه به دلیل تقارن در غلتک‌ها معمولاً تنها به تحلیل یک غلتک پرداخته می‌شود در حالی که قطر غلتک‌ها در نورد حلقه با یکدیگر متفاوت است و فرض تقارن دیگر برای آن صادق نیست و هر کدام از آن‌ها نیاز به تحلیل جداگانه‌ای دارند. در فرآیند نورد حلقه تغییر سطح تماس در حلقه و غلتک‌ها در هر لحظه روی می‌دهد، بدین معنی که به مرور زمان سطح تماس حلقه با مندرل کاهش و با غلتک اصلی افزایش می‌یابد در حالی که سطح تماس در نورد صفحه نسبت به زمان ثابت است. این ویژگی نورد حلقه باعث می‌شود تا نیروها و گشتاورهای اعمالی نسبت به زمان تغییر کنند که بر تنش‌های ترمومکانیکی اعمالی به غلتک تأثیر خواهد داشت. جهت ارزیابی دقیق‌تر فرآیند باید خصوصیات ترمومکانیکی فلز(چگالی، ضرایب انتقال حرارت، گرمای ویژه) وابسته به دما در نظر گرفته شود. با در نظر گرفتن مواردی که عنوان شد مشخص است که فرآیند نورد حلقه بسیار پیچیده و وابستگی زیادی به زمان داشته و در هر لحظه غلتک‌ها و حلقه در وضعیت خاصی قرار دارند که تحلیل آن‌ها را مشکل می‌نماید و ایجاب می‌نماید تا فرآیند به صورت دینامیکی در نظر گرفته شود.

غلطک از جنس H-۱۱ در نورد سرد و داغ ورق‌های برنجی را به کمک نرم‌افزار آباکوس بررسی کردند. بناسکیوتی و همکاران [۱۶] با معرفی یک المان یک بعدی هارمونیک به بررسی غلتک نورد داغ به صورت دوبعدی پرداخته و تنش‌های ترمومکانیکی را در غلتک محاسبه نمودند. آن‌ها توانستند با استفاده از المان یک بعدی زمان تحلیل را نسبت به کارهای قبلی خود کاهش دهند. کوهبر [۱۷] با استفاده از روش المان محدود دو بعدی تنش‌های ترمومکانیکی در نورد گرم ورق را بررسی کرد. مدل المان محدود در ابتدا برای شرایط پایدار، پاسخ ترمومکانیکی ورق را محاسبه می‌کند و در ادامه این مقادیر برای تعیین شرایط مرزی مناسب بر روی غلتک اعمال می‌گردند. با استفاده از مدل مقدار تنش‌های ترمومکانیکی در غلتک نورد گرم را بررسی کرد و مشخص شد که در نواحی تماس و خنک کاری این تنش‌ها قابل ملاحظه است. کوهبر و معاون [۱۸] اثر پارامترهای مختلف از جمله روغن کاری و سرعت نورد و ... را بر روی پاسخ ترمومکانیکی غلتک و ورق در نورد سرد برگشتی بررسی کردند. نگهبان و همکاران [۱۹] مدل یکپارچه المان محدود با استفاده از نرم‌افزار آباکوس جهت بررسی تنش‌های ترمومکانیکی غلتک نورد ارائه دادند و با استفاده از آن به بررسی غلتک‌های نورد حلقه با شرایط مرزی متغیر پرداختند. مرور مقالات در این حوزه مشخص می‌کند بیشتر تحقیقات صورت گرفته مربوط به نورد صفحه است و فرضیات مختلفی را در آن در نظر گرفته‌اند که جهت نورد حلقه صحیح نبوده و با ماهیت فیزیکی آن در تناقض است. ارزیابی تنش ترمومکانیکی در غلتک‌های نورد با خنک کاری موضعی به دلیل مدل‌سازی پیچیده و زمان محاسباتی زیاد کمتر بررسی شده است. همچنین اکثر تحلیل‌هایی که تاکنون در نورد صفحه صورت گرفته جهت تحلیل نورد حلقه صادق نبوده و فرضیات آن‌ها از قبیل تقارن، سطح تماس یکسان، کار سختی و ... نیاز به تغییرات کلی دارد. جهت ارزیابی دقیق تنش‌های ترمومکانیکی در دستگاه نورد حلقه می‌بایست وضعیت ناپایدار و گذرای حلقه، تغییر نیروهای شکل‌دهی در حین فرآیند، تغییرات دما ناشی از اصطکاک و تغییر شکل و ... در نظر گرفته شود. از این رو کمبود تحقیقات صورت گرفته جهت تخمین میدان دما و تنش در غلتک دستگاه‌های نورد با در نظر گرفتن شرایط واقعی کاملاً مشهود است و این کمبود به دلیل شرایط پیچیده‌تر در نورد حلقه مشخص‌تر می‌باشد و نیاز است تا در این حوزه فعالیت‌های دقیق‌تری صورت گیرد. در این پژوهش اثر

آنالیز و شبیه‌سازی غلتک‌های دستگاه نورد به دلیل پیچیدگی شرایط مرزی معمولاً فرآیندی زمان‌بر می‌باشد. جهت کاهش حجم محاسباتی شبیه‌سازی معمولاً به تحلیل دمایی و تنش‌های حرارتی آن‌ها پرداخته شده است و به ندرت به تحلیل ترمومکانیکی توجه شده است و این موارد عمدتاً جهت نورد صفحه بوده و در رابطه با تحلیل دقیق غلتک‌ها در نورد حلقه کارهای بسیار کم و ساده‌سازی شده‌ای صورت گرفته است.

از اوایل دهه هشتاد میلادی و گسترش روش‌های عددی فعالیت‌های زیادی جهت برآورد دما در غلتک‌های نورد ورق صورت گرفت [۳-۵]. با پیشرفت روش‌های عددی و تجهیزات محاسباتی قدرتمندتر، اندازه‌گیری تنش‌های حرارتی و ترمومکانیکی با شرایط مرزی ساده بررسی شد [۶-۹]. سنگ<sup>۱</sup> و همکاران [۱۰] از یک نرم‌افزار المان محدود و توسعه یک مدل کوپل ترمومکانیکی جهت شکل‌دهی حلقه‌ای از جنس IN-۷۱۸ کردند. توسط مدل دمای سطح غلتک‌ها، دمای حلقه و بارهای لازم جهت نورد را محاسبه کردند. بناسکیوتی<sup>۲</sup> [۱۱] با استفاده از حل المان محدود دو بعدی به تخمین عمر ناشی از تنش‌های حرارتی در نورد داغ ورق پرداخت. وی با استفاده از نرم‌افزار انسیس و کد نوشته شده شرایط مرزی و خنک‌کاری را بر روی غلتک مدل نمود. در ابتدا تحلیل حرارتی انجام گرفت و سپس تنش‌ها محاسبه شد و بالتبع تخمین عمر با استفاده از میدان تنش حاصل گردید. سنبلی و سراج‌زاده [۱۲] مدلی تحلیلی-عددی جهت تعیین تنش ترمومکانیکی در غلتک‌ها در حین کار ارائه دادند و گرمای تولید شده ناشی از تغییر شکل و اصطکاک را در نظر گرفتند و پارامترهای مختلف از قبیل دمای قطعه، میزان کاهش سطح مقطع و سرعت غلتک را بر تنش ترمومکانیکی و نحوه انتشار آن بررسی کردند. نا<sup>۳</sup> و همکاران [۱۳] تنش‌های حرارتی و دما را در غلتک نورد داغ ورق بررسی کردند و با استفاده از آن زمان استراحت بحرانی در طی فرآیند را برای غلتک ارائه دادند. صیادی و سراج‌زاده [۱۴] با استفاده از کوپل المان محدود و روش کران بالا رفتار حرارتی و نیروی نورد را در نورد داغ ورق بررسی کردند. توزیع دما در ورق و غلتک توسط تحلیل المان محدود و نیروها توسط روش کران بالا حاصل شدند. قیوم و همکاران [۱۵] مقدار تنش‌های ترمومکانیکی تولید شده در

- 
- 1 Song
  - 2 Benasciutti
  - 3 Na

سیستم معادلات دیفرانسیل کوپل با مشتقات جزئی را فراهم می‌کنند. حل دقیق این معادلات برای مسائل کاربردی و صنعتی قابل‌دستیابی نیست و در تعداد محدودی شرایط مرزی غیرواقعی حل شده است. این گونه مسائل معمولاً به کمک روش‌های عددی حل می‌شوند که روش المان محدود از مقبولیت مناسبی برخوردار است. در حالت سه‌بعدی می‌بایست سه مؤلفه بردار جابجایی  $u$  (در راستای  $x$ ) و  $v$  (در راستای  $y$ )،  $w$  (در راستای  $z$ ) و همچنین اختلاف درجه حرارت مشخص شود. برای فرمول‌بندی المان محدود یک المان در نظر گرفته می‌شود و تابع میدان با کمک توابع شکل درون المان تقریب زده می‌شود.

با توجه به اصول کلی روش اجزاء محدود، مجهولات محلی و تابع شکل مناسب مشخص می‌شود. با فرض اینکه مقادیر گره‌ای تابع پیوسته از زمان باشند، گسسته‌سازی مکان و زمان در توابع شکل امکان‌پذیر است. با گسسته‌سازی و تقریب معادلات حرکت و انرژی با روش المان محدود و استفاده از روش باقی‌مانده وزنی گالرکین (تابع وزن برابر تابع شکل) معادلات به صورت زیر حاصل می‌گردد [۲۱]:

$$\left( \int_{V^e} \rho N_l N_m dV \right) \ddot{U}_{mi} + \left( \int_{V^e} G \frac{\partial N_l}{\partial x_j} \frac{\partial N_m}{\partial x_j} dV \right) U_{mj} + \left( \int_{V^e} G \frac{\partial N_l}{\partial x_j} \frac{\partial N_m}{\partial x_i} dV \right) U_{mj} + \left( \int_{V^e} \lambda \frac{\partial N_l}{\partial x_i} \frac{\partial N_m}{\partial x_j} dV \right) - \left( \int_{V^e} \beta \frac{\partial N_l}{\partial x_i} N_m dV \right) \theta_m = \int_{V^e} f_i N_l dV + \int_{A^e} t_i N_l dA \quad (3)$$

$l, m = 1, 2, \dots, n \quad i, j = 1, 2, 3$

$$\left( \int_{V^e} k \frac{\partial N_l}{\partial x_i} \frac{\partial N_m}{\partial x_i} dV \right) \theta_m - \left( \int_{V^e} T_0 \beta \frac{\partial N_m}{\partial x_i} N_l dV \right) \dot{U}_{mi} + \left( \int_{V^e} \rho c N_m N_l dV \right) \dot{\theta}_m = \int_{V^e} R N_l dV - \int_{A^e} (\bar{q} \cdot \bar{n}) N_l dA \quad (4)$$

که در آن  $N$  تابع شکل،  $l$  و  $m$  تعدادگره‌ها در المان،  $G$  مدول برشی،  $f_i$  و  $t_i$  به ترتیب مؤلفه‌های بردار نیروهای حجمی و سطحی می‌باشند. با مرتب کردن روابط (۳) و (۴) به صورت ماتریسی معادله کوپل المان محدود حاصل می‌گردد.

$$[M] \{\dot{\delta}\} + [C] \{\delta\} + [K] \{\delta\} = \{F\} \quad (5)$$

که  $[M]$ ،  $[C]$ ،  $[K]$  به ترتیب ماتریس سفتی، دمپینگ و جرم هستند. ماتریس‌های  $F$ ،  $\delta$  به ترتیب بردارهای نیروی خارجی و مجهولات محلی (بردارهای جابجایی و اختلاف درجه حرارت)

دمای اولیه غلتک‌های نورد حلقه و خنک‌کاری سطحی جهت ارزیابی تنش‌های ترمومکانیکی تولید شده در آن‌ها بررسی شده است.

## ۲- آماده‌سازی مدل المان محدود و شبیه‌سازی

تجهیزات مکانیکی به‌طورمعمول در حین کارکرد تحت تأثیر نیروهای مکانیکی-حرارتی قرار دارند. این بارها معمولاً به‌صورت همزمان بر تجهیزات اعمال می‌گردد؛ لذا میدان دما و جابجایی با یکدیگر ارتباط نزدیکی پیدا می‌کنند. این امر ایجاب می‌کند تا دو میدان به‌صورت همزمان بررسی شود. فرآیندهای ترمومکانیکی به‌وسیله معادلات پایه ترمودینامیک و مکانیک محیط پیوسته شرح داده می‌شوند. پایه و اساس روابط ترموالاستیک توسط داهامل<sup>۱</sup> و نیومن<sup>۲</sup> شکل گرفت و تا اواسط قرن بیستم پیشرفت قابل‌توجهی در روابط ایجاد نشد. نیاز به ساخت تجهیزات در صنایع مختلف که در دماهای بالا کار می‌کردند باعث پیشرفت ناگهانی این حوزه گردید. این علم در ساخت هواپیماهای سرعت‌بالا، فضاپیما، موتورهای جت، توربین‌های بزرگ و ساخت راکتورهای هسته‌ای مورد استفاده قرار گرفت. محققان فراوانی با بررسی‌های خود بر روی مسائل گوناگون باعث پیشرفت روابط ترموالاستیک خطی بر پایه ترمودینامیک برگشت‌پذیر شدند. با استفاده از معادله حرکت، معادله انرژی و استفاده از معادلات اساسی بین تنش، کرنش، دما، شارحرارتی و آنتروپی می‌توان به روابط ترموالاستیک کلی زیر رسید [۲۰]:

$$(C_{ijkl} \varepsilon_{kl})_{,j} + (\beta_{ij} \theta)_{,j} + F_i - \rho \ddot{u}_i = 0 \quad (1)$$

$$(k_{ij} \theta_{,j})_{,i} - \rho c \dot{\theta} + \rho R + T_0 \beta_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij} = 0 \quad (2)$$

که در آن‌ها  $C_{ijkl}$  مؤلفه‌های تانسور الاستیسیته،  $\varepsilon_{ij}$  مؤلفه‌های تانسور کرنش،  $\beta_{ij}$  مؤلفه‌های تانسور ترموالاستیسیته،  $\theta$  اختلاف درجه حرارت،  $\rho$  چگالی ماده،  $F_i$  مؤلفه‌های بردار نیروهای خارجی،  $u_i$  مؤلفه‌های بردار جابجایی،  $k_{ij}$  مؤلفه‌های تانسور رسانایی گرمایی،  $c$  ظرفیت حرارتی،  $R$  توان منبع حرارتی در واحد جرم و  $T_0$  دمای اولیه می‌باشند ( $i, j = 1, 2, 3$ ). اندیس  $i$  بیانگر مشتق‌گیری در راستای  $i$  می‌باشد.

معادلات (۱) و (۲) شکل کلی روابط ترموالاستیک می‌باشند که یک

1 Duhamel  
2 Neuman

تعداد المان‌ها کاهش می‌یابد [۱۷ و ۱۲] با توجه به ناحیه غیرمتمقارن و ناپایدار در حلقه می‌توان سطح تماس خارجی و داخلی حلقه با غلتک اصلی ( $C_1$ ) و مندرل ( $C_p$ ) را بر اساس تعریف فروزان و همکاران [۲۲] طبق شکل ۱ به این صورت بیان کردند.

$$C_1 = \left[ \left( 2R_1 - \frac{k_1(2R_m + h + k_1)}{2(R_1 + R_m + h/2)} \right) \left( \frac{k_1(2R_m + h + k_1)}{2(R_1 + R_m + h/2)} \right) \right]^{1/2} \quad (10)$$

$$C_2 = \left[ \left( 2R_2 - \frac{k_1(2R_m - h - k_2)}{2(R_m - h/2 - R_2)} \right) \left( \frac{k_2(2R_m - h - k_2)}{2(R_m - h/2 - R_2)} \right) \right]^{1/2} \quad (11)$$

با توجه به تغییر شکل‌های کوچک در حلقه مقدار تقریبی  $k_p$  و  $k_1$  به این صورت بیان شده است [۲۳].

$$k_1 \approx k_2 \approx \frac{\Delta h}{2} \cong \frac{H - h}{2} \quad (12)$$

مقدار بار فشاری با توجه به اندازه نیرو و سطح تماس غلتک و حلقه تعیین می‌شود. اندازه نیرو می‌تواند با روش‌های تحلیلی یا عددی محاسبه شود. شرایط مرزی تکیه‌گاهی در مرکز غلتک تعریف شده است. با کوپل کردن شعاع داخلی غلتک با مرکز آن در نرم‌افزار شرایط مرزی تکیه‌گاهی برای سطح داخلی غلتک اعمال می‌شود. جهت بررسی تنش‌های ترمومکانیکی و اعمال خنک‌کاری موضعی از اسکریپت نویسی در محیط آباکوس استفاده گردید و الگوریتم و نحوه اعمال شرایط مرزی و فراخوانی نتایج طبق مرجع [۱۹] است. با توجه به کمبود تحلیل و شبیه‌سازی‌های ترمومکانیکی در نورد حلقه جهت بررسی و صحت‌سنجی کد آماده شده، از داده‌های نورد ورق استفاده گردید و نتایج با مقاله بناسکیوتی و همکاران [۱۶] مقایسه شد.

بعد از بررسی کیفیت مش سطح بیرونی غلتک به ۳۶۰ جزء تقسیم شده است. این تعداد از این جهت است که انتخاب سطوح اعمال بار با دقت ۱ درجه صورت گیرد. همانطور که پیشتر ذکر گردید به دلیل تغییرات شدید دما در نواحی نزدیک به سطح، لازم است تا اندازه المان‌ها در این ناحیه ریزتر گردد. جهت حفظ یکنواختی مش، تقسیم‌بندی شعاعی توسط ۲۰ نقطه با نسبت تقسیم و تمایل ۱۵ انجام شد. مدل المان محدود شامل ۱۰۸۰۰ المان با ۱۱۱۶۱ گره است از الگوریتم صریح و المان خطی چهار گره‌ای CPE4RT

می‌باشند. با استفاده از شرایط اولیه و مرزی مدل، ماتریس‌های فوق برای تعیین مجهولات استفاده می‌شوند. با توجه به معادله ۵ در صورتی که امکان صرف‌نظر کردن از سرعت و شتاب در تحلیل ترمومکانیکی وجود داشته باشد، حجم محاسبات کاهش خواهد یافت. این استراتژی برای شبیه‌سازی شرایط مرزی متغیر در غلتک‌ها استفاده شده است بدین معنی که غلتک در فضا ثابت شده و شرایط مرزی به دور آن می‌چرخد. با این کار حجم ماتریس‌های مؤثر در حل کوچک شده و در نتیجه سرعت حل افزایش خواهد یافت.

شرایط مرزی جهت غلتک اصلی که به صورت دوبعدی مدل می‌شود به صورت زیر است:

$$-k_r \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = h^*(T - T_{sur}) + \eta \kappa \sigma_B (T^4 - T_{sur}^4) \quad (6)$$

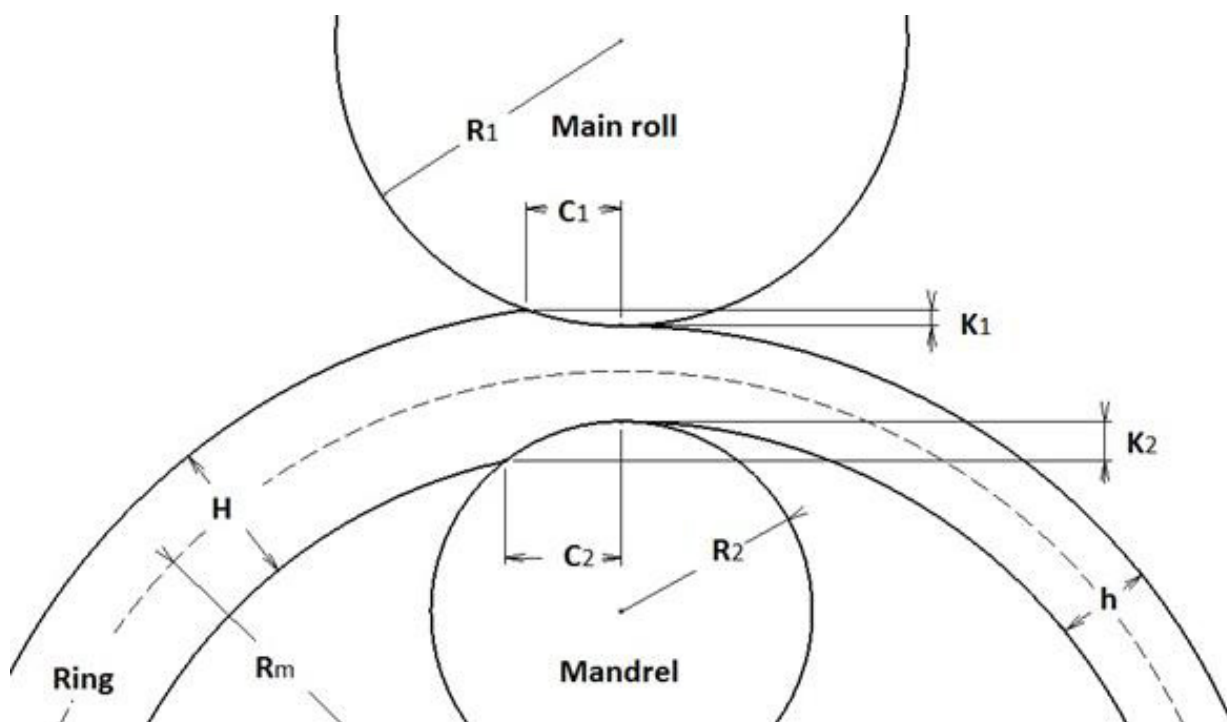
$$\begin{cases} \eta = 0 & T_{Roll} = 30^\circ C \\ \eta = 1 & T_{Roll} = 500, 250^\circ C \end{cases}$$

$$-k_r \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0.5R} = 0 \quad (7)$$

$$p_{contact-zone} = \frac{F_n}{C t} \quad C = C_1 \text{ or } C_2 \quad (8)$$

$$u_i \Big|_{r=0} = 0 \quad (9)$$

$h^*$  ضریب انتقال حرارت همرفتی است که در نواحی مختلف از قبیل ناحیه تغییر شکل، ناحیه تماس با هوا و ناحیه خنک‌کاری موضعی با مایع خنک‌کننده مقادیر متفاوتی دارد. در حالتی که دمای غلتک ۲۵۰ یا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد است به دلیل دمای بالای غلتک انتقال حرارت تشعشعی در نظر گرفته می‌شود.  $K$  ضریب تشعشع و  $\sigma_B$  ثابت استفان-بولتزمن می‌باشند. در حین کارکرد دستگاه، بعد از مدتی دمای نواحی داخلی غلتک به حالت پایدار رسیده و از آن پس تغییرات دمایی شدید در لایه نازکی از سطح غلتک روی می‌دهد. این لایه به لایه مرزی حرارتی مشهور است. از این رو در معادله (۷) در شعاعی برابر نصف شعاع غلتک، شرایط عایق حرارتی تعریف گردیده است. با استفاده از این فرض ناحیه لایه مرزی حرارتی و نواحی داخلی در شبیه‌سازی در نظر گرفته شده و از طرف دیگر ناحیه داخلی غلتک با شعاع  $r < 0.5R$  که به میزان خیلی کمی تحت تأثیر تغییرات دمای سطح غلتک است در شبیه‌سازی در نظر گرفته نمی‌شود و



شکل ۱: تعریف پارامترهای مختلف در نورد حلقه

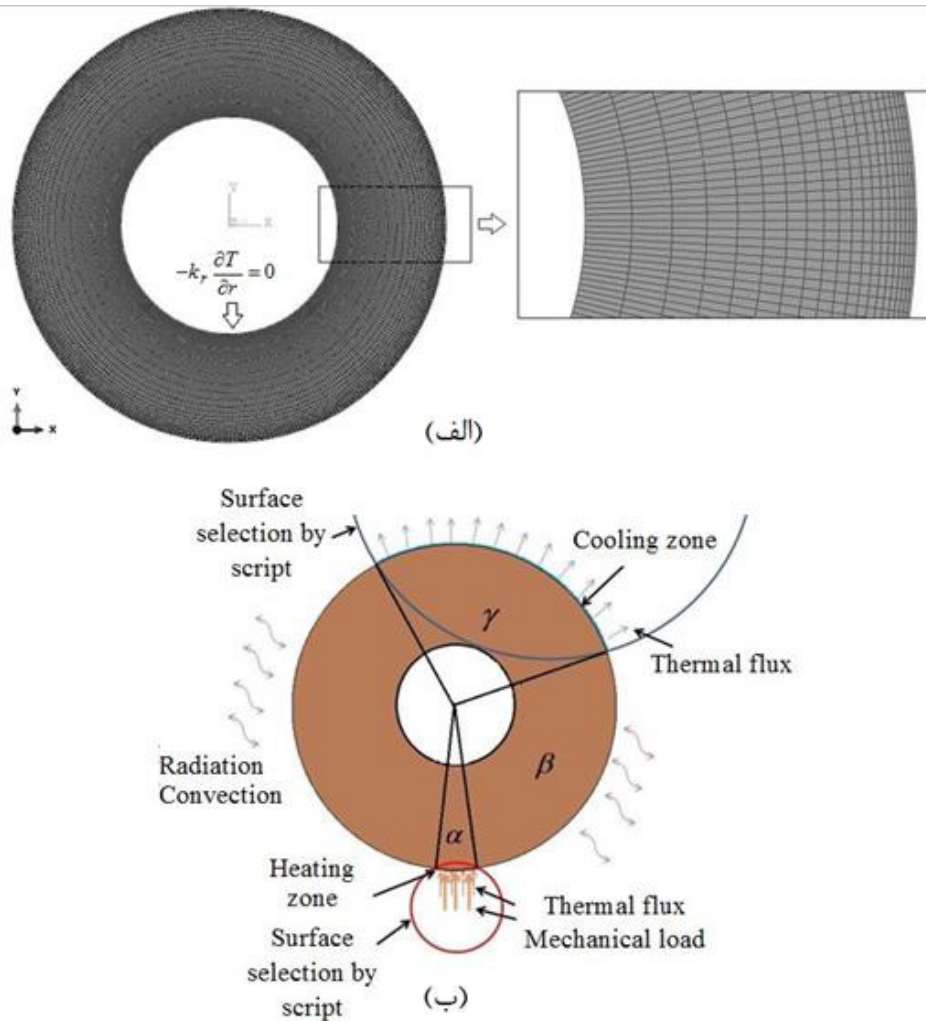
Fig. 1. The definition of various geometrical parameters on ring rolling

است. همان‌طور که در شکل مشخص است نحوه تغییرات دما در هر دو مدل یکسان می‌باشد بدین معنی که با ورود گره سطحی به ناحیه تماسی با صفحه ناگهان دمای آن افزایش می‌یابد و بیشترین دما در حین خروج از این ناحیه مشخص می‌شود. با خروج گره دمای آن با نرخ مشخصی به دلیل انتقال حرارت به گره‌های داخلی و محیط کاهش می‌یابد. هنگامی که گره به ناحیه خنک‌کاری می‌رسد با ورود به این منطقه نرخ کاهش دما در آن بیشتر شده و شیب نمودار تغییر می‌کند لذا در ابتدای ناحیه خنک‌کاری در نمودار دمایی شکستی پدیدار می‌شود. با خروج گره از ناحیه خنک‌کاری به دلیل کاهش دمای بیشتر نسبت به گره‌های داخلی جهت شار حرارتی تغییر کرده و دمای گره به‌مرور افزایش خواهد یافت. در ناحیه تماس ورق با غلتک جایی که بیشترین دما رخ می‌دهد، مدل کمی بیشتر دما را نسبت به پژوهش بناسکیوتی پیش‌بینی می‌کند. در سایر نقاط به‌طور کلی مدل دما را کمی بیشتر (کمتر از ۱٪) پیش‌بینی می‌کنند. با توجه به شکل ۳ در مجموع، مدل‌ها در نواحی که تغییرات دمایی شدیدی اتفاق نمی‌افتد دمای مشابهی را پیش‌بینی می‌کنند.

استفاده شد. در شکل ۲ نحوه شبکه‌بندی غلتک و همچنین انتخاب سطوح مختلف در طی شبیه‌سازی با استفاده از کد اسکریپت نشان داده شده است. زوایای  $\alpha, \gamma, \beta$  به ترتیب ناحیه تماس با حلقه، خنک‌کاری و اختلاف زاویه‌ای بین دو ناحیه هستند.

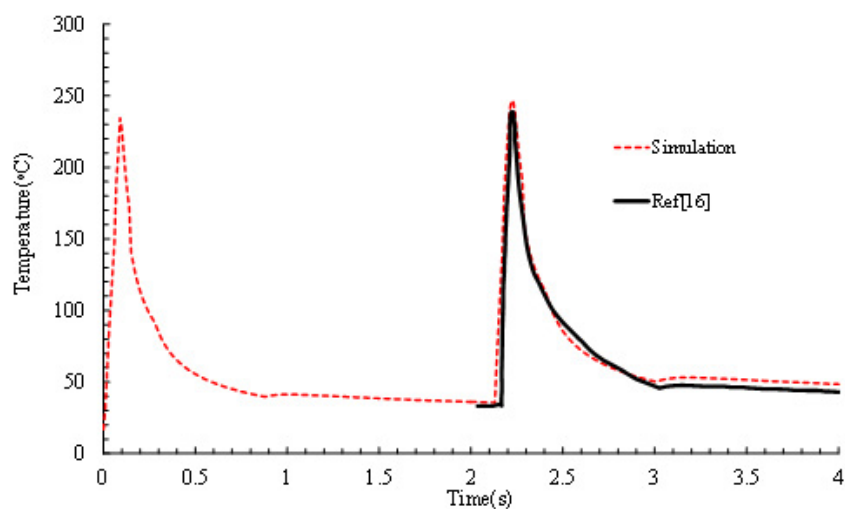
طبق الگوریتم در ابتدا مدل و شرایط مرزی آن توسط کد اسکریپت آماده شده و داده‌های موردنیاز مشخص می‌شود. هر مدل شامل چندین زیر مدل است که در طی آنالیز شرایط مرزی در آن‌ها تغییر خواهد کرد با این کار در هر مرحله یک مدل ساده ترمومکانیکی بررسی می‌شود. شرایط مرزی اولیه و متغیر در هر مرحله بر روی غلتک اعمال می‌گردد. شرایط مرزی متغیر از قبیل نیروی نورد، تغییر دمای حلقه و غلتک، اندازه سطوح تماس با حلقه و ناحیه خنک‌کاری و ... تغییر خواهد کرد. شبیه‌سازی در بازه زمانی مشخص شده انجام می‌شود و نتایج تحلیل استخراج شده و به‌عنوان شرایط مرزی اولیه در زیر مدل بعدی استفاده می‌شود. شبیه‌سازی غلتک با موارد ذکر شده به صورت تکراری تا اتمام زمان فرآیند انجام خواهد شد.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی در شکل ۳ نشان داده شده است. تغییرات دمایی یک گره واقع بر روی سطح طی زمان مشخص شده



شکل ۲: الف) مدل المان محدود غلتک ب) نحوه انتخاب سطوح جهت اعمال بار حرارتی، مکانیکی

Fig. 2. a) Finite elements model of work roll b) The method of selecting surface in order to apply mechanical and thermal loads



شکل ۳: مقایسه دمای سطح غلتک

Fig. 3. Comparison of the work roll's surface temperature

جدول ۱: شرایط شبیه‌سازی و ابعاد غلتک‌ها از جنس فولاد H-13  
 Table 1. Simulation conditions and dimensions of H-13 tool steel work rolls

۶۰	شعاع مندرل (mm)
۲۰۰	شعاع غلتک اصلی (mm)
۲۰۰	ارتفاع غلتک‌ها (mm)
$C_1 = 7/45 + 25 \times 10^{-7} \cdot t$	سطح تماس بین غلتک اصلی و حلقه (mm)
$C_2 = 10/63 - 6 \times 10^{-7} \cdot t$	سطح تماس بین مندرل و حلقه (mm)
۶/۲۸	سرعت زاویه‌ای غلتک اصلی (rad/s)
۱۳/۹۵	سرعت زاویه‌ای مندرل (rad/s)
۹۰	اندازه قطاع خنک‌کاری (deg)
۱۲۰	فاصله زاویه‌ای بین نواحی تماس با حلقه و خنک‌کاری (deg)
۵۰۰-۲۵۰-۳۰	دمای اولیه غلتک‌ها (°C)
۱۰۵۰-۵/۸۵t	دمای حلقه به عنوان تابعی از زمان (°C)
۳۰	دما محیط (°C)
۵۰۰-۲۵۰-۳۰	دما مایع خنک‌کننده (°C)
۱۰۱۰۰	ضریب هدایت همرفتی (آب) ( $W / (m^2 \cdot ^\circ C)$ )
۱۰۰۰	ضریب هدایت همرفتی (روغن) ( $W / (m^2 \cdot ^\circ C)$ )
۵۰	ضریب هدایت همرفتی محیطی ( $W / (m^2 \cdot ^\circ C)$ )
۱۰۰۰۰	ضریب رسانش تماسی ( $W / (m^2 \cdot ^\circ C)$ )

### ۳- بررسی دما و تنش‌های ترمومکانیکی در غلتک

جهت ارزیابی تنش‌های حرارتی و ترمومکانیکی در غلتک‌ها بارگذاری حرارتی و مکانیکی به صورت تابعی از زمان در نظر گرفته شد. تغییرات دمایی در حلقه با استفاده مقادیر تجربی در پژوهش سنگ و همکارانش و تغییرات سطوح تماس بین حلقه و غلتک‌ها نیز با استفاده از روابط موجود و تغییرات آن در ابتدا و انتهای فرآیند به صورت خطی مدل شدند. شرایط شبیه‌سازی و ابعاد غلتک‌ها طبق جدول ۱ در کد اسکریپت اعمال شد. خصوصیات فیزیکی و ترمومکانیکی غلتک‌ها با استفاده از منابع موجود [۲۴-۲۷] تخمین زده شد و در صورت نیاز تابع مناسبی برای آن در نظر گرفته شد. این خصوصیات در جدول ۲ و در ضمیمه ذکر گردیده است. با توجه به مقدار نیرو و اندازه سطح در هر لحظه، بار فشاری مناسب بر روی سطح غلتک اعمال گردید. تاریخچه بارگذاری مطابق شکل ۴ و با استفاده از شبیه‌سازی جداگانه‌ای جهت شکل‌دهی حلقه مورد نظر حاصل گشته است.

مدت زمانی که در هر مرحله برای آنالیز غلتک و تحلیل یک مسئله ساده ترمومکانیکی در نظر گرفته می‌شود تأثیر مستقیمی بر

خروجی‌ها دارد. زمان هر مرحله برای آنالیز غلتک اصلی و مندرل به ترتیب برابر ۰/۰۰۲۷۸ و ۰/۰۰۱۲۵ ثانیه در نظر گرفته شده است. با استفاده از این مقادیر جابجایی زاویه‌ای غلتک‌ها در هر مرحله تقریباً برابر ۱ درجه خواهد بود. با این کار امکان انتخاب یکنواخت سطوح در حین فرآیند فراهم می‌شود. زمان شکل‌دهی حلقه مدنظر برابر ۲۴ ثانیه در نظر گرفته شده است و لذا شبیه‌سازی در این بازه انجام شد. المان‌های استفاده شده در این تحلیل CPE4RT و نحوه شبکه‌بندی همانند قسمت قبل است. نتایج حاصل در ادامه توضیح داده می‌شود.

#### ۳-۱- غلتک اصلی

به هنگام تماس دو سطح با سطوح خمی‌ده مقدار ماکزیمم تنش معادل ون - میز به زیر سطح منتقل می‌شود که ناشی از افزایش تنش‌های برشی در زیر سطح است. تنش‌های ناشی از تماس به تنش‌های هرترز<sup>۱</sup> مشهور است. این پدیده در غلتک‌های نورد معمولاً گزارش نشده است. مشخص است که در غلتک‌های نورد، بیشترین تغییرات دما در

1 hertzian stresses



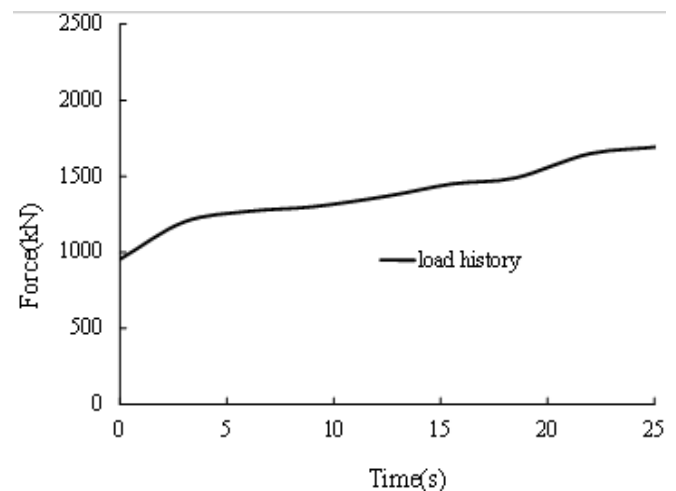
جدول ۲: خصوصیات فیزیکی و ترمومکانیکی غلتک‌ها

Table 2. Thermal and mechanical properties of work rolls

۱۸۶	مدول الاستیک (GPa)
$k = 10^{-7} \cdot T^2 - 10^{-4} \cdot T^3 + 5/78 \times 10^{-7} \cdot T + 16/131$	ضریب رسانش به عنوان تابعی از دما (W / (m·C))
$\alpha = 3 \times 10^{-7} \cdot T^2 - 10^{-4} \cdot T + 1/0.971$	ضریب انبساط حرارتی به عنوان تابعی از دما (10 <sup>-6</sup> / °C)
۴۶۰	ظرفیت حرارتی (J / (kg·C))
۷۸۴۰	چگالی (kg / m <sup>۳</sup> )
$\sigma_p = -268/72 \cdot \epsilon_p^6 + 1795/50 \cdot \epsilon_p^5 - 4676/90 \cdot \epsilon_p^4 + 59950 \cdot \epsilon_p^3 - 3943/20 \cdot \epsilon_p^2 + 1334/70 \cdot \epsilon_p + 693/0.5$	تنش جریان به عنوان تابعی از کرنش پلاستیک (MPa)
$\left\{ \begin{array}{l} 1625(30^\circ\text{C}) \\ 1480(250^\circ\text{C}) \\ 1200(500^\circ\text{C}) \end{array} \right.$	استحکام کششی (MPa)
$\left\{ \begin{array}{l} 1350(30^\circ\text{C}) \\ 1242(250^\circ\text{C}) \\ 985(500^\circ\text{C}) \end{array} \right.$	استحکام تسلیم (MPa)
۰/۲۸۵	ضریب پواسون

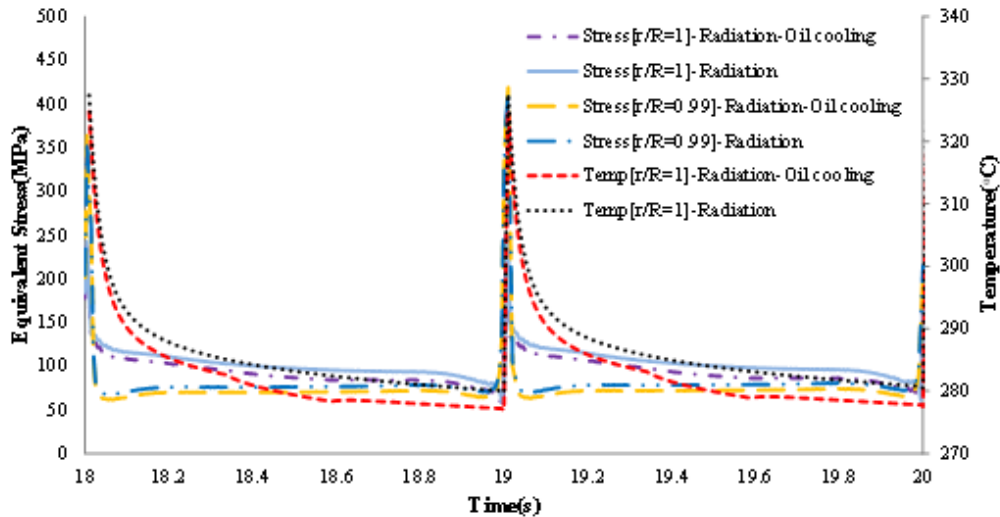
مقدار دما و تنش در غلتک اصلی در حالتی که دمای اولیه غلتک  $250^\circ\text{C}$  در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به این شکل مشخص شده است که در غلتک اصلی ماکزیمم تنش ترمومکانیکی در زیر سطح رخ می‌دهد. در زیر سطح به دلیل افزایش تنش ون-میزز، امکان جوانه‌زنی ترک و رشد آن به سطح وجود دارد. در این شکل تاریخچه دمایی و تنش‌های ترمومکانیکی معادل در غلتک اصلی با دمای  $250^\circ\text{C}$  جهت بررسی اثر خنک‌کاری بر روی سطح خارجی با روغن نشان داده شده است. قطاع خنک‌کاری  $90^\circ$  درجه در نظر گرفته شده است. با توجه به این شکل مشخص است که دمای سطح غلتک در حالت خنک‌کاری با روغن تقریباً  $1/5\%$  کمتر از حالتی است که غلتک بدون خنک‌کاری است. همان‌طور که در شکل مشخص است تأثیر خنک‌کاری بر تنش‌ها ترمومکانیکی زیاد نبوده و در سطح و زیر غلتک کمی تنش معادل را کاهش می‌دهد ولی تأثیری بر مقدار تنش ماکزیمم و محل آن ندارد.

با انجام شبیه‌سازی غلتک اصلی در دماهای مختلف با خنک‌کاری یا بدون آن بر روی اندازه تنش‌های ترمومکانیکی مشخص شد خنک‌کاری در روی سطح تأثیر داشته و بر تنش‌های ایجاد شده در سطح تأثیر کمتری دارد. مقدار ماکزیمم تنش در انتهای فرآیند در غلتک با دمای اولیه  $250^\circ\text{C}$  در سطح به مقدار  $30.3\text{ MPa}$  در

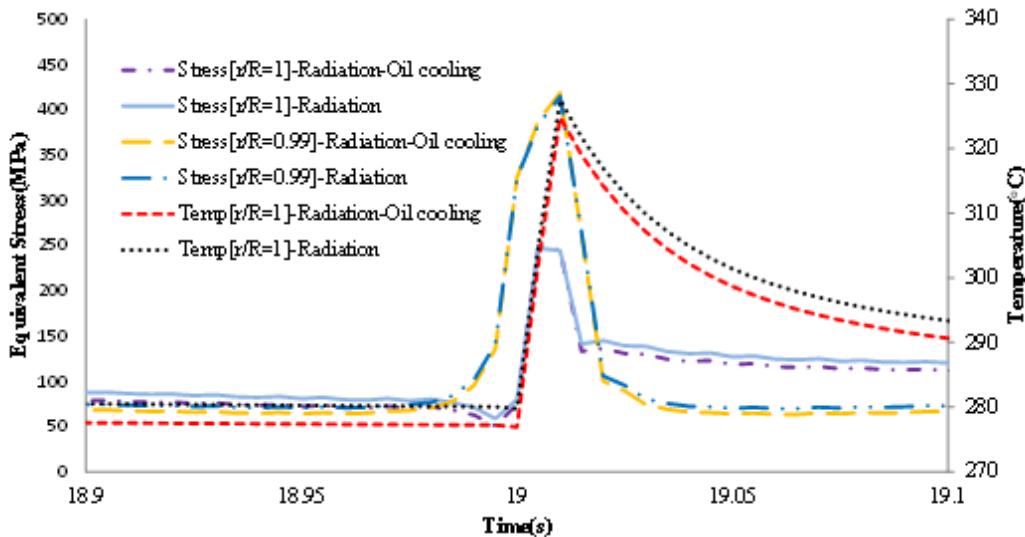


شکل ۴: تاریخچه بارگذاری برای اعمال نیروی فشاری به غلتک  
Fig. 4. Load history to apply compressive force on work roll's surface

سطح غلتک اتفاق می‌افتد و سطوح زیرین تغییرات دمایی کمتری را تجربه می‌کنند. تغییرات دمای شدید و ماکزیمم دما منجر به ایجاد تنش‌های حرارتی بزرگ‌تری در سطح می‌شوند. با بررسی‌هایی که بر روی غلتک‌های نورد حلقه انجام شده، مشخص گردیده است که تنش‌های حرارتی بر روی غلتک اصلی تأثیر کمتری نسبت به تنش‌های هرترز دارد. غلتک اصلی بیشتر تحت تأثیر تنش‌های مکانیکی می‌باشد [۱۹].



(الف)



(ب)

شکل ۵: تأثیر خنک‌کاری بر دما و تنش ترمومکانیکی در غلتک اصلی با دمای اولیه  $250^{\circ}\text{C}$  (ب) بزرگنمایی در ناحیه تماس

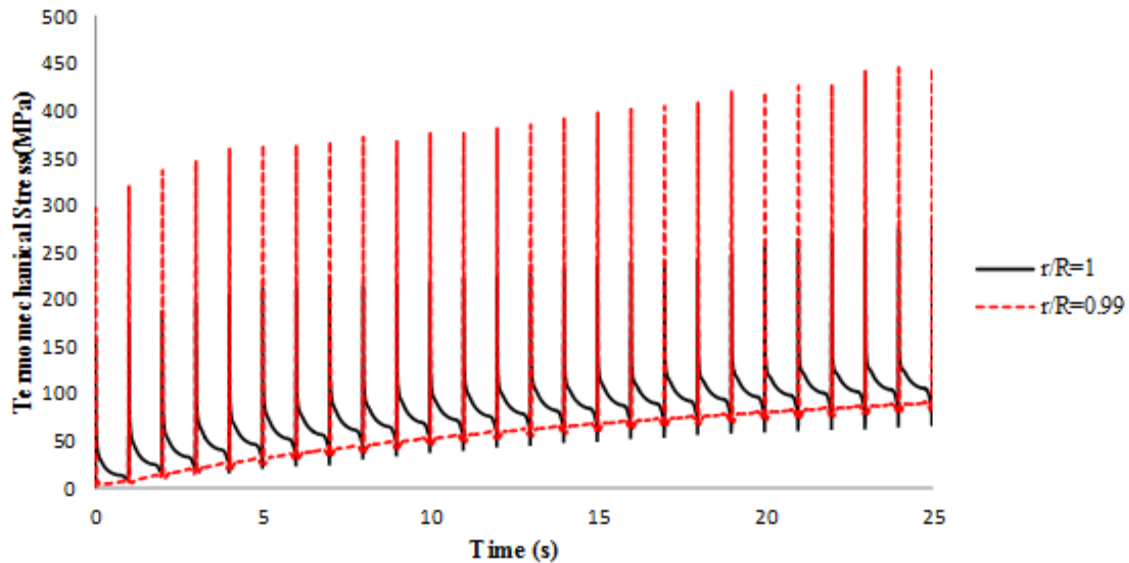
Fig. 5. a) The effect of cooling practice on temperature and thermo-mechanical stress in the main roll with initial temperature of  $250^{\circ}\text{C}$  b) Zoomed view in the contact area

این امر موجب ایجاد تنش‌های حرارتی بزرگ‌تر در مندرل خواهد شد. از سوی دیگر به دلیل افزایش سطح تماس، فشار تماسی کمتر شده و تنش‌های مکانیکی تأثیر کمتری بر روی مندرل ایجاد خواهد کرد. مقدار تنش ون-میز در مندرل در حالتی که بارهای حرارتی، مکانیکی یا هر دو به غلتک اعمال می‌شود در شکل ۷ نشان داده شده است. با توجه به این شکل مشخص است که با اعمال نیروهای مکانیکی به غلتک ماکزیمم تنش در زیر سطح غلتک اتفاق می‌افتد. در صورتی که بارهای حرارتی به غلتک وارد شود به دلیل افزایش دما در سطح غلتک تنش معادل ماکزیمم در سطح غلتک اتفاق خواهد

زیر آن (نسبت شعاع ۰/۹۹) به مقدار  $448\text{ MPa}$  می‌رسد. تاریخچه تنش‌های ترمومکانیکی در غلتک اصلی با دمای اولیه  $250^{\circ}\text{C}$  بدون خنک‌کاری در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به این شکل مشخص است که دامنه تنش در طی فرآیند تقریباً ثابت است ولی به مرور تنش متوسط افزایش می‌یابد.

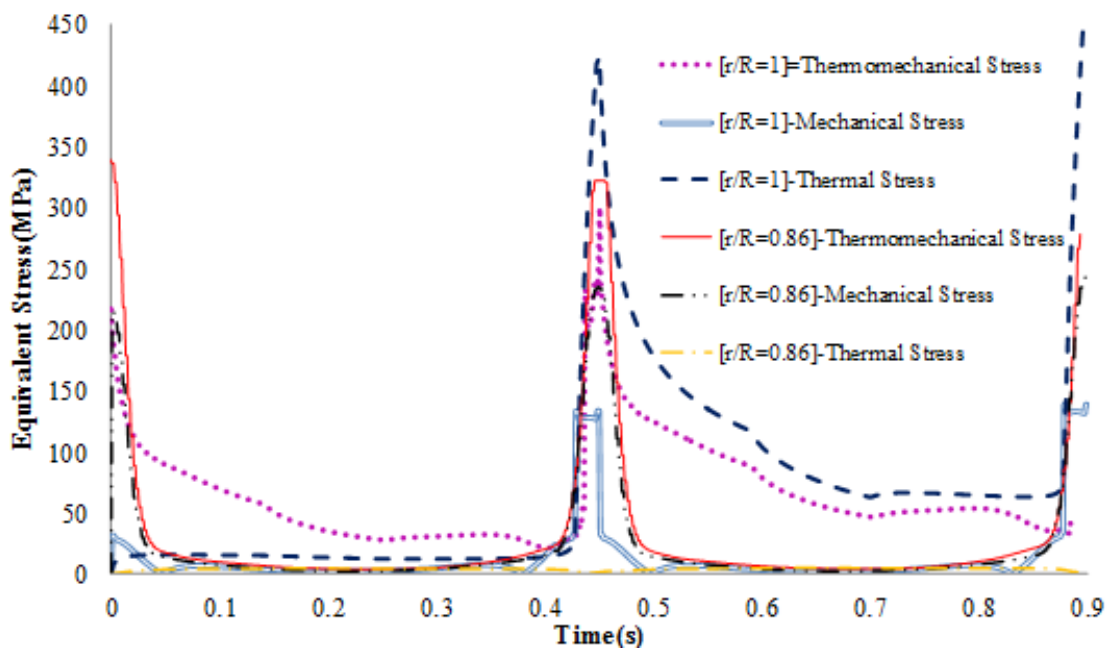
### ۲-۳- مندرل

با توجه به شعاع کمتر مندرل نسبت به غلتک اصلی و سطح تماس بیشتر با حلقه نفوذ حرارت به داخل مندرل بیشتر است،



شکل ۶: تاریخچه تنش ترمومکانیکی معادل در غلتک اصلی با دمای اولیه  $250^{\circ}\text{C}$

Fig. 6. History of equivalent thermo-mechanical stress in the main roll with initial temperature of  $250^{\circ}\text{C}$



شکل ۷: تاریخچه تنش ون-میزز در مندرل با اعمال بار حرارتی، مکانیکی و مکانیکی-حرارتی

Fig. 7. History of Von-Mises stress in the mandrel with applying thermal, mechanical and mechanical-thermal loading

فرآیند به دلیل نفوذ حرارت بیشتر به داخل مندرل و ایجاد تنش‌های حرارتی بزرگ‌تر در لایه‌مرزی حرارتی، ماکزیمم تنش معادل در سطح مندرل به وجود می‌آید. در این شکل بیشترین تنش معادل ون-میزز مربوط به تنش حرارتی و در سطح مندرل، و کمترین نیز مربوط به آن و در لایه زیرین مندرل می‌باشد. در ادامه شبیه‌سازی و نفوذ حرارت به

افتاد. این پدیده‌ها در غلتک اصلی نیز مشاهده گردید. در صورتی که بارهای حرارتی و مکانیکی به صورت هم‌زمان بر مندرل اعمال گردد حالت متفاوتی نسبت به غلتک اصلی اتفاق خواهد افتاد. در اوایل فرآیند و زمانی که هنوز دمای سطح غلتک افزایش نیافته است ماکزیمم تنش معادل ون-میزز در زیر سطح اتفاق می‌افتد. در ادامه

افزایش می‌یابد. این درحالی‌که در غلتک اصلی نیروهای مکانیکی اثر لحظه‌ای داشته و روی تنش متوسط تأثیر کمی دارند.

در شکل ۹ تاریخچه تنش ترمومکانیکی در مندرل با دمای اولیه  $250^{\circ}\text{C}$  بدون انجام خنک‌کاری نشان داده شده است. در این حالت هیچ‌گونه خنک‌کاری بر روی سطح انجام نمی‌شود و مندرل از طریق تشعشع و همرفتی با محیط تبادل حرارتی دارد. به دلیل اختلاف درجه حرارت زیاد بین مندرل و حلقه شار حرارتی ورودی به مندرل زیاد است و از سوی دیگر به دلیل اینکه خنک‌کاری بر روی سطح انجام نمی‌شود به سرعت تنش‌های حرارتی و بالتبع تنش‌های ترمومکانیکی افزایش خواهد یافت. افزایش تقریبی مقدار ماکزیمم تنش، تنش متوسط و دامنه تنش در این حالت نسبت به غلتک با دمای  $30^{\circ}\text{C}$  در اواخر فرآیند به ترتیب برابر  $70\%$ ،  $90\%$  و  $30\%$  می‌باشد. به دلیل بالا رفتن دما سطح غلتک و عدم خنک‌کاری، شار حرارتی ورودی به آن کاهش می‌یابد. این امر سبب می‌گردد تا تنش‌های حرارتی، که بر روی سطح غالب می‌باشند افزایش چندانی پیدا نکرده و لذا تنش معادل بر روی سطح تقریباً ثابت بماند.

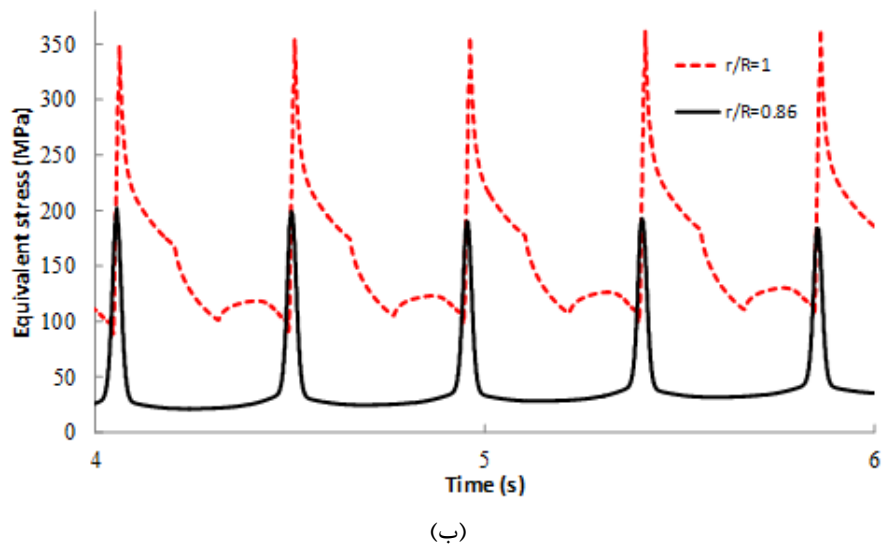
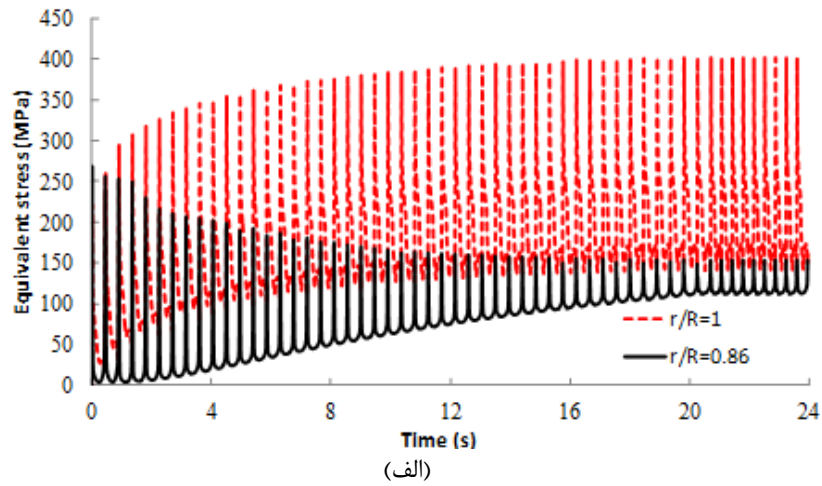
در شکل ۹ مقدار تنش در سطح زیری غلتک در اوایل فرآیند به دلیل نیروی مکانیکی ناگهان افزایش می‌یابد. با بالا رفتن دمای غلتک در حین فرآیند مؤلفه‌های تنش حرارتی در آن افزایش می‌یابد. این امر سبب می‌شود در نواحی غیر تماسی میزان تنش معادل افزایش یابد. با افزایش تنش متوسط معادل تأثیر تنش‌های مکانیکی کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر تفاضل تنش‌های نرمال در رابطه ون-میزر کاهش یافته که نتیجه این امر کاهش تنش معادل نسبت به مرحله قبل خواهد بود. این اتفاق تا زمانی که تنش‌های حرارتی و مکانیکی به تعادل برسند ادامه خواهد یافت. از آنجایی که تنش‌های حرارتی در طی فرآیند بزرگ‌تر می‌شوند بعد از نقطه تعادل اعمال نیروهای مکانیکی باعث افزایش مؤلفه تنش هیدرواستاتیک می‌شود. از این رو بعد از این زمان تنش‌های مکانیکی که در ناحیه تماس بروز می‌کنند سبب کاهش ناگهانی تنش معادل خواهند شد.

در شکل ۱۰ تنش‌های ترمومکانیکی ایجاد شده در غلتک با دمای اولیه  $250^{\circ}\text{C}$  با انجام خنک‌کاری بر روی آن نشان داده شده است. در این حالت نیز افزایش تقریبی مقدار ماکزیمم تنش، تنش متوسط و دامنه تنش نسبت به غلتک با دمای  $30^{\circ}\text{C}$  در اواخر فرآیند به ترتیب برابر  $57\%$ ،  $67\%$  و  $38\%$  می‌باشد. این مقادیر نشان می‌دهد که

داخل مندرل، تنش حرارتی در لایه‌های زیری افزایش خواهد یافت. تأثیر نیروهای مکانیکی آبی بوده و باعث به وجود آمدن تنش در ناحیه نزدیک به تماس خواهد شد. هنگامی که بارهای حرارتی و مکانیکی به صورت همزمان به غلتک وارد می‌شود، بارهای حرارتی بر روی سطح و بارهای مکانیکی در زیر سطح اثر بیشتری می‌گذارند. ترکیب این دو نوع بارگذاری سبب می‌گردد تا میدان تنش در این حالت از یکنواختی بیشتری برخوردار باشد. لازم به ذکر است که مقدار تنش ون-میزر معادل وابسته به تفاضل مؤلفه‌های تنش می‌باشد و تانسور تنش به دو مؤلفه تقسیم می‌شود: تانسور هیدرواستاتیکی یا کروی و تانسور انحرافی تنش. افزایش تنش هیدرواستاتیکی به معنی افزایش متوسط مؤلفه‌های تنش می‌باشد و تأثیری بر تنش ون-میزر ندارد. عامل مهم در میزان تنش ون-میزر تانسور انحرافی تنش می‌باشد و هر چه بیشتر باشد، تنش- معادل ون-میزر بیشتر خواهد شد. اعمال هم‌زمان بارهای حرارتی و مکانیکی به مندرل منجر به افزایش مؤلفه‌های تنش نسبت به حالات مکانیکی و حرارتی می‌گردد ولی در این حالت اختلاف آن‌ها کاهش می‌یابد، لذا تنش معادل ون-میزر نسبت به تنش حرارتی کاهش خواهد یافت.

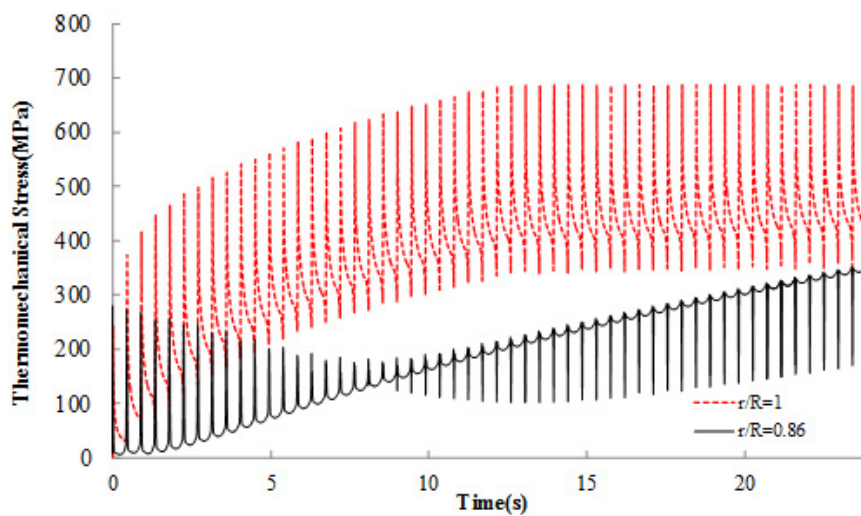
نتایج حاصل از شبیه‌سازی و تخمین تنش ترمومکانیکی در مندرل در دمای  $30^{\circ}\text{C}$  به همراه خنک‌کاری با آب حین شکل‌دهی حلقه در شکل ۸ نشان داده شده است. با توجه به این شکل مشخص است که در ابتدای فرآیند تنش ایجاد شده در مندرل متأثر از نیروهای مکانیکی است و تقریباً  $34\%$  بیشتر از تنش در سطح مندرل است. با چرخش غلتک و نفوذ حرارت به داخل غلتک به سرعت دمای سطح و زیر آن افزایش یافته و منجر به تولید تنش حرارتی می‌شود. در طی فرآیند این امر سبب انتقال مکان ماکزیمم تنش معادل به سطح می‌گردد. با توجه به اینکه تنش‌های ایجاد شده در سطح بیشتر مربوط به تنش حرارتی است، خنک‌کاری باعث تغییرات ناگهانی در روند تنش‌های ترمومکانیکی در سطح می‌شود ولی بر تنش‌های زیر سطح اثر کمتری دارد.

نکته قابل توجه در تاریخچه تنش ترمومکانیکی در مندرل نسبت به غلتک اصلی را می‌توان بدین صورت عنوان نمود؛ در مندرل به دلیل نفوذ حرارت بیشتر به داخل غلتک تنش متوسط افزایش می‌یابد. افزایش دما در لایه‌های زیری منجر به انبساط المان‌های داخلی شده و سبب افزایش تنش فشاری در المان‌ها می‌گردد از این رو تنش متوسط



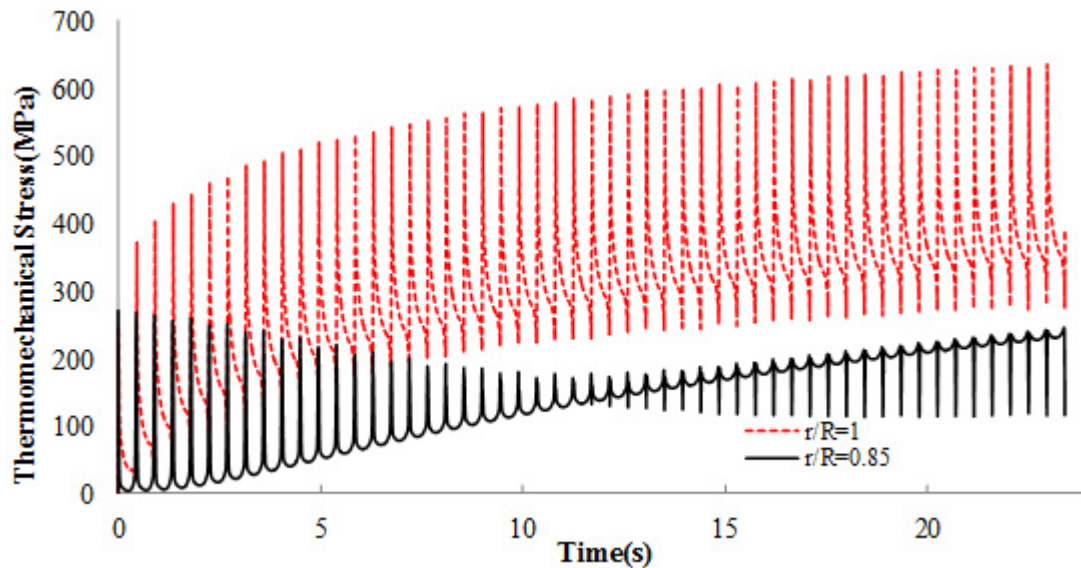
شکل ۸: الف) تاریخچه تنش ترمومکانیکی معادل در مندرل با دمای اولیه  $30^{\circ}\text{C}$  ب) بزرگنمایی

Fig. 8. History of equivalent thermo-mechanical stress in the mandrel with initial temperature of  $30^{\circ}\text{C}$  b) Zoomed view



شکل ۹: تاریخچه تنش ترمومکانیکی معادل در مندرل با دمای اولیه  $250^{\circ}\text{C}$  بدون خنککاری

Fig. 9. History of equivalent thermo-mechanical stress in the mandrel with initial temperature of  $250^{\circ}\text{C}$  without cooling practice



شکل ۱۰: تاریخچه تنش ترمومکانیکی معادل در مندرل در دمای اولیه  $250^{\circ}\text{C}$  با خنک کاری توسط روغن

**Fig. 10. History of equivalent thermo-mechanical stress in the mandrel with initial temperature of  $250^{\circ}\text{C}$  with oil cooling practice**

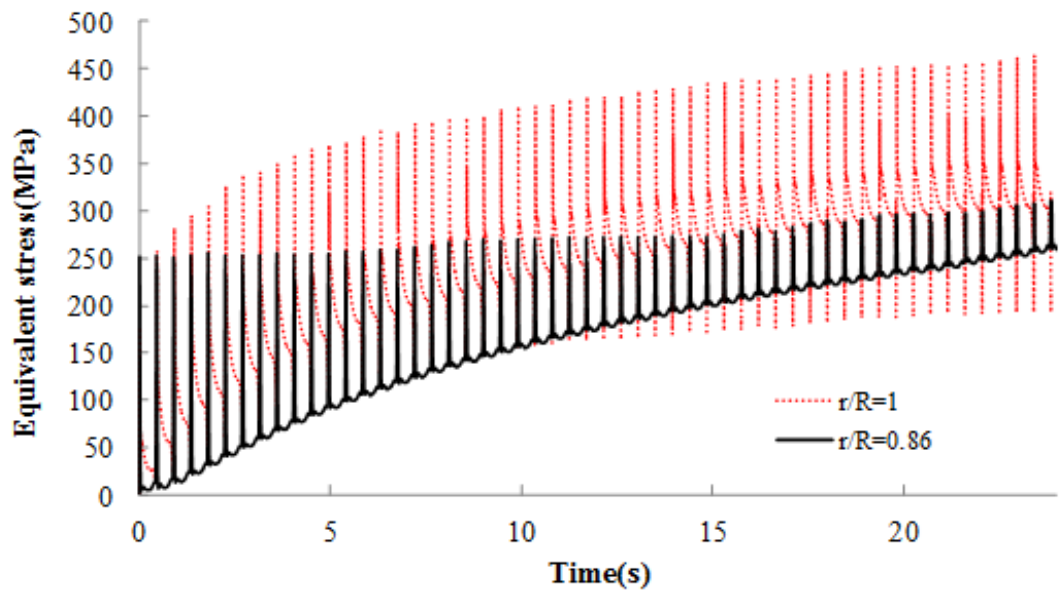
$500^{\circ}\text{C}$  با خنک کاری کل سطح توسط روغن نشان داده شده است. تفاوت ماکزیمم تنش، تنش متوسط و دامنه تنش در این حالت نسبت به مندرل با دمای  $30^{\circ}\text{C}$  در اواخر فرآیند کمتر از ۱٪ می باشد. کاهش انتقال حرارت به داخل مندرل به دلیل خنک کاری سبب می شود تنش متوسط در داخل مندرل با شیب کمتری افزایش یابد. با توجه به این شکل ها مشخص است، در مندرل که متأثر از تنش های حرارتی است کمترین تغییرات و اندازه تنش وقتی اتفاق می افتد که خنک کاری مناسبی بر روی آن انجام شود. با این کار میدان دمای ناهمگن در مندرل به حداقل خواهد رسید. بدترین حالت نیز در دمای کم مندرل بدون خنک کاری اتفاق خواهد افتاد. در این حالت شار حرارتی ورودی به مندرل زیاد بوده و سبب ایجاد تنش های ترمومکانیکی بزرگی در آن می شود.

#### ۴- نتیجه گیری

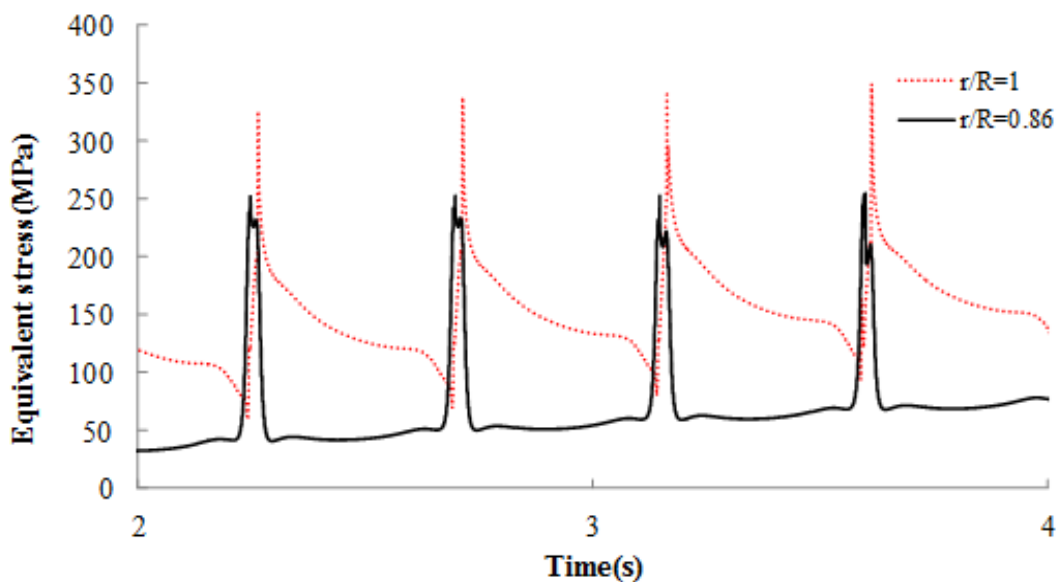
بررسی خنک کاری موضعی بر روی غلتک های نورد با استفاده از محیط گرافیکی معمولی نرم افزار آباکوس امکان پذیر نیست؛ از این رو توسط اسکریپت نویسی شرایط موجود بر روی غلتک بررسی شد. غلتک ها در دستگاه های نورد به طور همزمان تحت تأثیر تنش های مکانیکی و حرارتی قرار دارند که بررسی هر کدام از آن ها به تنهایی بر روی غلتک نتایج مختلفی را نشان خواهد داد. از سوی دیگر در

اعمال خنک کاری بر روی سطح غلتک مقدار تنش متوسط را در آن کاهش و دامنه تنش را افزایش می دهد. همچنین اعمال خنک کاری سبب می شود تا زمان تعادل تنش های ترمومکانیکی و حرارتی به تعویق بیفتد.

تخمین تنش های ترمومکانیکی در مندرل با دمای  $500^{\circ}\text{C}$  در شکل ۱۱ نشان داده شده است. با توجه به این شکل مشخص است که تنش های ایجاد شده در سطح مندرل نسبت به دمای  $30^{\circ}\text{C}$  بیشتر و نسبت به دمای  $250^{\circ}\text{C}$  کمتر است. به دلیل اینکه تنش های معادل ون-میزز ایجاد شده در سطح غلتک بیشتر مربوط به تنش های حرارتی می باشد، هنگامی که دمای اولیه مندرل دمای  $30^{\circ}\text{C}$  است در ناحیه تماس با حلقه ناگهان دما و بالتبع تنش های حرارتی افزایش می یابد و در ناحیه خنک کاری با کاهش دما تنش های حرارتی کاهش زیادی خواهند داشت. این تفاوت تنش حرارتی در نواحی مختلف منجر به افزایش دامنه تنش معادل خواهد شد. در حالتی که دمای مندرل  $500^{\circ}\text{C}$  است به دلیل عدم خنک کاری آن دامنه تنش معادل تغییرات زیادی نداشته ولی به علت افزایش دما در مندرل به طور کلی تنش متوسط افزایش خواهد داشت. افزایش تقریبی مقدار ماکزیمم تنش، تنش متوسط و دامنه تنش در این حالت نسبت به غلتک با دمای  $30^{\circ}\text{C}$  در اواخر فرآیند به ترتیب برابر ۱۵٪، ۲۱٪ و ۴٪ می باشد. در شکل ۱۲ تاریخچه تنش ترمومکانیکی در مندرل با دمای اولیه



(الف)



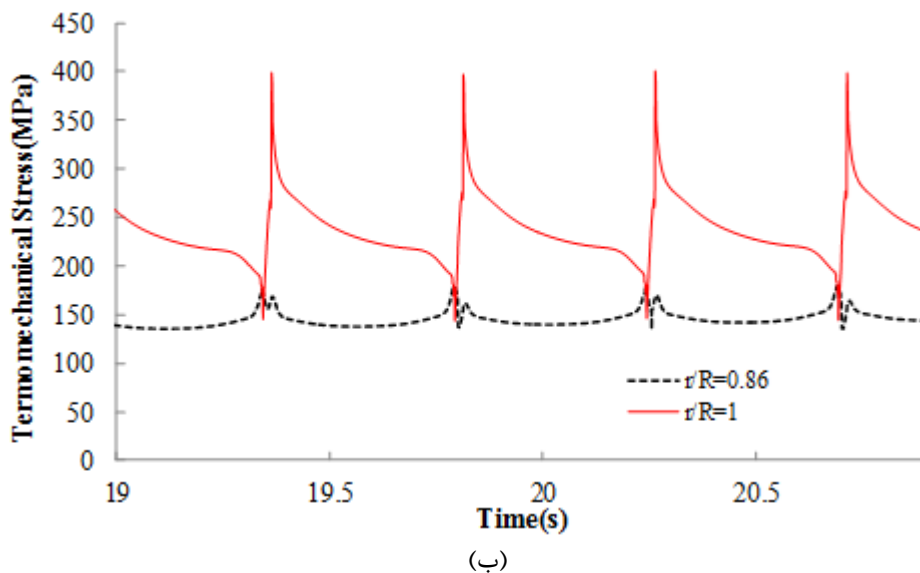
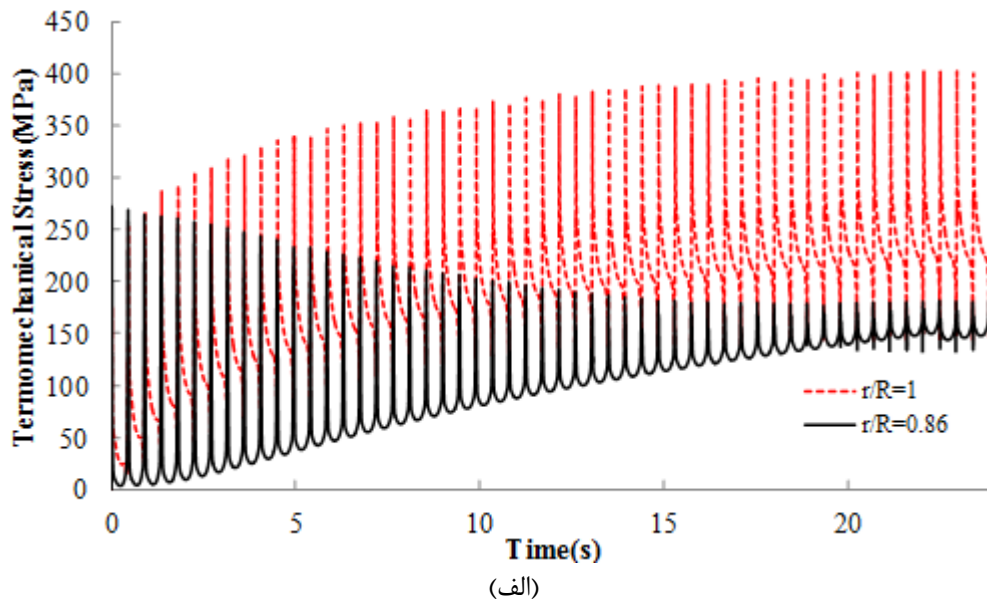
(ب)

شکل ۱۱: الف) تاریخچه تنش ترمومکانیکی معادل در مندرل با دمای اولیه  $500^{\circ}\text{C}$  ب) بزرگنمایی

Fig. 11. History of equivalent thermo-mechanical stress in the mandrel with initial temperature of  $500^{\circ}\text{C}$  b) Zoomed view

به ماکزیمم مقدار خود می‌رسد. مقدار این تنش‌ها در سطوح مختلف باعث می‌شود تا تنش معادل ون-میزز در زیر سطح به مقدار ماکزیمم خود برسد که با تئوری تنش‌های هرتز در توافق است. در غلتک اصلی تنش‌های ترمومکانیکی معادل در لایه داخلی بیشتر است در حالی که در مندرل سطح آن دارای تنش ون-میزز ماکزیمم می‌باشد. این بدان معناست که میزان بارهای مکانیکی و نفوذ حرارت به داخل غلتک محل ماکزیمم تنش را تعیین می‌کند.

غلتک‌های دستگاه نورد حلقه تأثیر تنش‌های حرارتی و مکانیکی متفاوت است. تنش‌های حرارتی تأثیر بیشتری بر روی سطح غلتک دارند زیرا تغییرات دمایی شدید در این قسمت اتفاق می‌افتد. در سطوح زیری به دلیل تغییرات کمتر دما تغییرات تنش‌های حرارتی کاهش می‌یابد. از سوی دیگر تنش‌های مکانیکی بر روی سطوح داخلی غلتک اثر می‌گذارند. با اعمال نیروهای مکانیکی بر سطح غلتک، ماکزیمم تنش‌های نرمال در سطح رخ می‌دهد، ولی تنش برشی در زیر سطح



شکل ۱۲: الف) تنش ترمومکانیکی معادل در مندرل با دمای اولیه  $500^{\circ}\text{C}$  با خنک کاری کل سطح توسط روغن ب) بزرگنمایی

**Fig. 12. History of equivalent thermo-mechanical stress in the mandrel with initial temperature of  $500^{\circ}\text{C}$  with oil cooling practice a) History b) Zoomed view**

خنک کاری متفاوت است. در مندرل تأثیر تنش حرارتی بر مقدار تنش ترمومکانیکی قابل ملاحظه است. جهت کاهش تنش‌های حرارتی می‌بایست تا حد امکان دمای غلتک در محدوده دمای اولیه حفظ شود. در این حالت اندازه تنش‌های ترمومکانیکی کوچک‌تر خواهد بود. بهترین حالت از لحاظ کم بودن مقادیر دامنه و متوسط تنش در وضعیتی است که غلتک دارای دمای اولیه  $30^{\circ}\text{C}$  یا  $500^{\circ}\text{C}$  باشد و روی سطح آن خنک کاری انجام شود. با انجام خنک کاری مناسب بر روی سطح میدان دمای ناهمگن در مندرل به حداقل خواهد رسید.

در صورتی که ماکزیمم تنش معادل در سطوح داخلی اتفاق بیفتد، جوانه‌زنی و رشد ترک از این ناحیه شروع شود و به سمت سطح حرکت خواهد کرد. این اتفاق باعث می‌شود تا خرابی ناشی از خستگی ترمومکانیکی در این حالت به صورت ناگهانی اتفاق بیفتد که با مشاهدات تجربی هماهنگ است. در غلتک اصلی مقدار ماکزیمم تنش، دامنه و متوسط تنش معادل متأثر از نیروهای مکانیکی است. مقادیر تنش معادل به دست آمده در ناحیه تماسی مستقل از دمای اولیه غلتک بوده و تقریباً ثابت است. تأثیر خنک کاری بر روی تنش‌های ایجاد شده در غلتک اصلی ناچیز است و تنها کمی در ناحیه



فهرست علائم

علائم انگلیسی

- temperature and stress fields developing in rolls during hot rolling, *Journal of materials processing technology*, 150(3) (2004) 263-269.
- [3] G. Lahoti, S. Shah, T. Altan, Computer-aided analysis of the deformations and temperatures in strip rolling, *Journal of Engineering for Industry*, 100(2) (1978) 159-166.
- [4] D.M. Parke, J.L. Baker, Temperature effects of cooling work rolls, *Iron Steel Eng.*, 49(12) (1972) 83-88.
- [5] S. Wilmotte, J. Mignon, Thermal variations of the camber of the working rolls during hot rolling, *C. R. M.*, (34) (1973) 17-34.
- [6] D.F. Chang, Thermal stresses in work rolls during the rolling of metal strip, *Journal of materials processing technology*, 94(1) (1999) 45-51.
- [7] P. Gratacos, P. Montmitonnet, C. Fromholz, J. Chenot, A plane-strain elastoplastic finite-element model for cold rolling of thin strip, *International journal of mechanical sciences*, 34(3) (1992) 195-210.
- [8] A. Kumar, I. Samarasekera, E. Hawbolt, Roll-bite deformation during the hot rolling of steel strip, *Journal of materials processing technology*, 30(1) (1992) 91-114.
- [9] K. Yamada, S. Ogawa, S. Hamauzu, Two-dimensional thermo-mechanical analysis of flat rolling using rigid-plastic finite element method, *ISIJ international*, 31(6) (1991) 566-570.
- [10] J. Song, A. Dowson, M.H. Jacobs, J. Brooks, I. Beden, Coupled thermo-mechanical finite-element modelling of hot ring rolling process, *Journal of Materials Processing Technology*, 121(2-3) (2002) 332-340.
- [11] D. Benasciutti, On thermal stress and fatigue life evaluation in work rolls of hot rolling mill, *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 47(5) (2012) 297-312.
- [12] A. Sonboli, S. Serajzadeh, A model for evaluating thermo-mechanical stresses within work-rolls in hot-strip rolling, *Journal of Engineering Mathematics*,

$c$	ظرفیت حرارتی، (J / (kg.°C))
$C$	سطح تماس غلتک با حلقه، (m)
$C_{ijkl}$	مؤلفه‌های تانسور الاستیسیته
$E$	مدول الاستیسیته، N/m <sup>2</sup>
$F$	بردار نیروهای خارجی بر واحد جرم
$h^*$	ضریب انتقال حرارت همرفتی، (W / (m <sup>2</sup> .°C))
$H, h$	ضخامت حلقه، (m)
$k_{ij}$	مؤلفه‌های تانسور رسانایی گرمایی
$n, l, m$	تعداد گره المان
$q_i$	مؤلفه‌های شار حرارتی، (W / m <sup>2</sup> )
$R$	توان منبع حرارتی در واحد جرم (W / kg)
$T$	دما (°C)
$u_i$	مؤلفه‌های جابجایی (m)

علائم یونانی

$\alpha$	زاویه ناحیه تماس با حلقه
$\gamma$	اختلاف زاویه‌ای بین ناحیه تماس یا حلقه و خنک‌کاری
$\beta$	زاویه ناحیه خنک‌کاری
$\rho$	چگالی، (kg / m <sup>3</sup> )
$\theta$	اختلاف درجه حرارت
$\kappa$	ضریب تشعشع
$\lambda$	ثابت لامه N / m <sup>2</sup>
$\mu$	مدول برشی N / m <sup>2</sup>
$\varepsilon_{ij}$	مؤلفه‌های تانسور کرنش
$\sigma_B$	ثابت استفان-بولتزمن (W / (m <sup>2</sup> .K <sup>4</sup> ))
$\sigma_{ij}$	مؤلفه‌های تانسور تنش

مراجع

- [1] S. Spuzic, K. Stafford, C. Subramanian, G. Savage, Wear of hot rolling mill rolls: an overview, *Wear*, 176(2) (1994) 261-271.
- [2] F. Fischer, W. Schreiner, E. Werner, C. Sun, The

- mill under thermal and mechanical loading, *Journal of Computational Applied Mechanics*, 49(2) (2018) 323-334.
- [20] M. Balla, Formulation of coupled problems of thermoelasticity by finite elements, in: *Periodica Polytechnica. Engineering. Mechanical Engineering*, 33(1-2) (1989), 59-70.
- [21] M.R. Eslami, Hetnarski, R.B., J. Ignaczak, N. Noda, N. Sumi, Y. Tanigawa, *Theory of Elasticity and Thermal Stresses: Explanations, Problems and Solutions* (Solid Mechanics and Its Applications, vol. 197), Springer, Dordrecht, 2013.
- [22] M.R. Forouzan, M. Salimi, M.S. Gadala, Three-dimensional FE analysis of ring rolling by employing thermal spokes method, *International journal of mechanical sciences*, 45(12) (2003) 1975-1998.
- [23] H. Lin, Z.Z. Zhi, The extremum parameters in ring rolling, *International journal of mechanical processing technology*, 1(69) (1997) 273-276.
- [24] <https://www.supplieronline.com/Research/Property/result.asp?FamilyID=17&MetalID=2697&Chemical=1&Physical=1&Mechanical=1>
- [25] [https://www.efunda.com/materials/alloys/tool\\_steels/show\\_tool.cfm?ID=AISI\\_H13&show\\_prop=all&Page\\_Title=AISI%20H13](https://www.efunda.com/materials/alloys/tool_steels/show_tool.cfm?ID=AISI_H13&show_prop=all&Page_Title=AISI%20H13)
- [26] J.C. Benedyk, *high performance alloys database(H-13)*, 2008.
- [27] H. Yan, G. Qian, Q. Hu, Development of flow stress of AISI H13 die steel in hard machining, *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 22(2) (2007) 187-190.
- 72(1) (2012) 73-85.
- [13] D.-H. Na, C.-H. Moon, Y. Lee, Thermal stress evolution of the roll during rolling and idling in hot strip rolling process, *Journal of Thermal Stresses*, 37(8) (2014) 981-1001.
- [14] H. Sayadi, S. Serajzadeh, Prediction of thermal responses in continuous hot strip rolling processes, *Production Engineering*, 9(1) (2015) 79-86.
- [15] F. Qayyum, M. Shah, S. Manzoor, M. Abbas, Comparison of thermomechanical stresses produced in work rolls during hot and cold rolling of Cartridge Brass 1101, *Materials Science and Technology*, 31(3) (2015) 317-324.
- [16] D. Benasciutti, F. De Bona, M.G. Munteanu, A harmonic one-dimensional element for non-linear thermo-mechanical analysis of axisymmetric structures under asymmetric loads: The case of hot strip rolling, *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 51(7) (2016) 518-531.
- [17] B. Koohbor, Finite element modeling of thermal and mechanical stresses in work-rolls of warm strip rolling process, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 230(6) (2016) 1076-1086.
- [18] B. Koohbor, K. Moaven, Finite-element modeling of thermal aspects in high speed cold strip rolling, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 231(8) (2017) 1350-1362.
- [19] A. Negahban, E. Barati, A. Maracy, Evaluation of Thermo-mechanical stress in work rolls of ring rolling