

## Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 52(8) (2020) 513-516 DOI: 10.22060/mej.2019.14764.5938



# 'Effect of Initial Temperature and Cooling Practice on Thermo-Mechanical Stress of Ring Rolling

A. Negahban<sup>1\*</sup>, E. Barati<sup>2</sup>, A. Maracy<sup>2</sup>, N. Vahdatazad<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Aerospace Engineering, Aeronautical University of Science and Technology, Tehran, Iran
<sup>2</sup> Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Malek-Ashtar University of Technology, Esfahan, Iran

**ABSTRACT:** Ring rolling is a metal forming process used to forge precise, seamless, circular, shaped parts. Due to the unique properties of the produced rings, the application in the advanced industries is high. The most important advantage of the process is the uniform flow of material in the ring after the process. Usually, the working temperature of the device is high during the rolling of super alloys. The high temperature could damage the work rolls. In spite of the cooling practice, the work roll temperature and cooling practice on thermo-mechanical stresses in work roll of ring rolling mill has been investigated. The results show that the amount of produced thermo-mechanical stresses on the work rolls is completely different. In the main roll, mechanical stress has a greater effect on thermo-mechanical stresses. Unlike the mandrel, the effect of cooling practice on thermo-mechanical stresses of the main roll is negligible. The results show that cooling practice increases the amplitude of equivalent stress and reduces the mean stress in the work rolls.

## **Review History:**

Received: 2018/08/03 Revised: 2018/12/19 Accepted: 2018/12/27 Available Online: 2019/05/19

### **Keywords:**

Ring rolling Thermo-mechanical stress Cooling practice Scripting code Abaqus

## 1- Introduction

In this research, the effect of initial temperature of ring rolling work roll and cooling practice on the thermo-mechanical stresses are investigated. In order to estimate the thermo-mechanical stresses in the work rolls, it is necessary to pay attention to the transient conditions of the ring rolling process. Song et al. [1], by using of a finite-element software program, developed a coupled thermo-mechanical model for the hot ring rolling of IN718 and predicted the surface temperature of the ring and work rolls. Benasciutti et al. [2] used a 1 dimensional harmonic element which permits the analysis of plane axisymmetric structures subjected to non-axisymmetric loads and save the computational time. They investigated thermo-mechanical stress in work-roll of flat rolling. Koohbor [3] developed an integrated mathematical model to study the thermo-mechanical behavior of strips and work rolls during the warm rolling process of steels. The model was first employed to solve the thermo-mechanical response of the rolled strip under steady-state conditions and then used to apply proper boundary conditions for solving the thermomechanical response of the work roll.

## 2- Methodology

The comprehensive study of the articles in this area indicates that the evaluation of thermo-mechanical stress in work rolls with local cooling practice and partial boundary conditions has been rarely studied. It is due to complex modeling and a lot of computational time. Also, most of the analyses that have been done on rolling focus on the flat rolling. Their assumptions such as symmetry, the same contact length, work hardening, and etc. are not true for the ring rolling.

By the discretization and approximation of thermo-elastic equations with finite element method and using the Galerkinweighted residual method, the thermo-elastic finite element equations are obtained [4]:

$$[M]\{\vec{\delta}\} + [C]\{\vec{\delta}\} + [K]\{\delta\} = \{F\}$$
(1)

In Eq. (1) *M*, *C*, *K*, *F* and  $\delta$  are the generalized mass, damping and stiffness matrices, external force vectors and local unknowns (displacement vectors and temperature differences), respectively. By using the initial and boundary conditions of the model, the problem is solved.

In the simulations, the magnitude of pressure is determined according to the simulated or experimental force. The contact surface length of the work rolls and the ring is estimated according to the definition of Forouzan et al. [5]. In order to investigate the thermo-mechanical stresses in the work rolls, scripting in the Abaqus environment is used. The algorithm and the method of applying the boundary conditions and collecting the results are according to previous work of Negahban et al. [6]. In order to verify prepared code, the simulation results were compared with the research of the Benascuitti et al. [2].

### **3- Results and Discussion**

The work rolls dimensions and general simulation conditions were applied in the script code according to Table 1.

\*Corresponding author's email: A-negahban@ssau.ac.ir

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit 10.22060/mej.2019.14764.5938.

Main-roll radius (mm)	200
Mandrel radius (mm)	60
Work rolls height (mm)	200
The initial temperature of work rolls ( $^{\circ}$ C)	30-250-500
The initial temperature of the ring $(^{\circ}C)$	1050 - 5.85t
Angular velocity of main-roll (rad / s)	6.28
Angular velocity of the mandrel $(rad / s)$	13.95

Table 1. Work rolls dimensions and general simulation conditions

The main-roll is affected by mechanical stresses [6]. The magnitude of the temperature and equivalent stress on the main-roll with the initial temperature of  $250^{\circ}$ C is shown in Fig. 1.



Fig. 1. The effect of cooling practice on temperature and thermo-mechanical stress in the main roll

This figure shows that the surface temperature of the mainroll with oil cooling is approximately 1.5% less than the mainroll without surface oil cooling. Also, the effect of cooling practice on the thermo-mechanical stresses of the main-roll is not significant. In general, it reduces the equivalent stress but does not affect the magnitude of maximum stress and its location. The history of the Von-Mises stress on the mainroll surface and below it (r/R=0.985) without cooling practice is shown in Fig. 2 with the initial temperature of 250 °C. This figure shows that the stress amplitude range is almost constant, but the mean stress increases during the process.



Fig. 2. History of equivalent thermo-mechanical stress in the main roll with an initial temperature of 250 °C

The magnitude of the Von-Mises thermo-mechanical stress in the mandrel is shown in Fig. 3. In order to evaluate the effect of different loading condition on thermo-mechanical stress, the thermal, mechanical, or both are applied to the mandrel.



Fig. 3. History of Von-Mises stress in the mandrel with applying thermal, mechanical and mechanical-thermal loading

According to this figure, it is clear that by applying mechanical loads to the mandrel, the maximum equivalent stress occurs below the work roll surface. If the thermal loads are applied to the mandrel, the maximum equivalent stress occurs on the mandrel surface. If the thermal and mechanical loads are applied simultaneously on the mandrel, a different situation will occur compared with the main-roll. In the early stages of the process, when the surface temperature of the mandrel still has not increased, the maximum equivalent stress occurs below the mandrel surface. By increasing surface temperature, the maximum equivalent stress will occur on the mandrel surface. This situation is due to the higher heat penetration into the mandrel than the main-roll. So, large thermal stress will produce in the thermal boundary layer.

The estimation of thermo-mechanical stress in the mandrel at different temperatures with and without cooling has been investigated. The thermo-mechanical stress in the mandrel with the initial temperature of 250°C with and without cooling has been shown in Fig. 4. With respect to this figure, it is clear that at the beginning of the process, the thermo-mechanical stress is affected by mechanical loads. By rotating the mandrel and the higher heat penetration into the work roll, the temperature of points with dimensionless radial coordinates r/R < 1 increase. So, higher thermal stress produces in these points. The cooling practice decreases the mean stress and increases the amplitude stress in the mandrel. The Cooling of the work roll surface also causes the time of equilibrium between thermal stress and mechanical stress postpone.





Fig. 4. History of equivalent thermo-mechanical stress in the mandrel with an initial temperature of 250 °C without cooling practice

### **4-** Conclusion

The effect of cooling practice and the initial temperature was investigated by scripting. Work rolls of ring rolling mill have different thermo-mechanical stresses response. Thermal stresses are more effective on the work rolls surface. On the other hand, mechanical stress affects the inner surfaces of the work rolls. The effect of cooling practice on the thermo-mechanical stresses generated on the main-roll is negligible and only slightly different in the cooling zone. In the Mandrel, the effect of thermal stress on the amount of thermo-mechanical stresses is considerable. In order to reduce the thermal stresses, it is necessary to maintain the temperature of the work roll in the initial temperature as far as possible with proper cooling. A proper cooling minimizes the amount of thermo-mechanical stresses and the heterogeneous temperature field in the work-roll.

#### **5- References**

- J. Song, A. Dowson, M.H. Jacobs, J. Brooks, I. Beden, Coupled thermo-mechanical finite-element modeling of hot ring rolling process, Journal of Materials Processing Technology, 121(2-3) (2002) 332-340.
- [2] D. Benasciutti, F. De Bona, M.G. Munteanu, A harmonic onedimensional 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] A. Negahban, E. Barati, A. Maracy, Evaluation of Thermomechanical stress in work rolls of ring rolling mill under thermal and mechanical loading, Journal of Computational Applied Mechanics, 49(2) (2018) 323-334.

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر



نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۲، شماره ۸، سال ۱۳۹۹، صفحات ۲۰۶۳ تا ۲۰۸۰ DOI: 10.22060/mej.2019.14764.5938

# تأثیر دمای اولیه و خنککاری بر تنش ترمومکانیکی غلتکهای نورد حلقه

على نگهبان'\*، احسان براتي'، عبدالعلى مراثى' ، نادر وحدت آزاد'

<sup>۱</sup> دانشکده هوافضا، دانشگاه هوایی شهید ستاری، تهران، ایران ۲ مجتمع مکانیک و هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران

تاریخچه داوری: دریافت: ۱۲–۵۰–۱۳۹۷ بازنگری: ۲۸–۹۰–۱۳۹۷ پذیرش: ۰۶–۱۰–۱۳۹۷ ارائه آنلاین: ۲۹–۲۰–۱۳۹۸

> 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 می باشد. نورد سوپر آلیاژها لزوم کار کرد دستگاه را در دمای بالا اجتناب ناپذیر می و این امر سبب آسیب به غلتکهای نورد می شود. 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 می شود. به طور کلی این امر باعث کاهش استحکام غلتکها می شود. در این پژوهش تأثیر دماهای مختلف کاری غلتک و خنک کاری بر روی تنشهای ترمومکانیکی در غلتکهای نورد حلقه برسی شده است. نتایج نشان می دهد 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 با یکدیگر متفاوت است. در غلتک اصلی تنشهای حرارتی عامل تعیین کننده اندازه تنشهای ترمومکانیکی در آن است. تأثیر خنککاری بر روی تنشهای ترمومکانیکی در غلتک اصلی ناچیز و در مندرل قابل توجه است. همچنین مشخص می شود که خنککاری باعث افزایش دامنه تنشهای معادل و کاهش تنش متوسط در غلتکها می می در آن است.

## ۱– مقدمه

نورد حلقه فرآیندی است که در آن حلقههای بدون درز تولید میشود. رینگهای چرخ قطار در حدود یک قرن با این روش تولید میشود. اینگونه 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 قابل ملاحظه زمان تولید و مواد اشاره نمود. علاوه بر مزایای عدم وجود مواد اضافی و روایای ناخواسته که بعد از فرآیند باید با ماشین کاری برداشته شود مهم ترین مزیت این روش جریان ماده یکنواخت در جسم پس از انجام فرآیند میباشد. هنگامی که حلقه در حال شکل گرفتن است جریان

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

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) کس کو دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

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 تولیدشده به طور مناسبی شکل یافته و کیفیت سطح خوبی داشته باشد و عیوب موجود در آن با نوردهای پی در پی بهخوبی رفع گردد. تقاضا برای تولید حلقه به روش نورد حلقه بیشتر به تولید حلقههایی با سطح مقطعهای پیچیده مربوط میشود.

در حالت کلی می توان 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 می گیرد. این نوع ماشین درصد زیادی از انواع نورد حلقه را شامل می شود. در نورد حلقه شعاعی – محوری علاوه بر شعاعهای حلقه، ارتفاع آن توسط غلتکهای محوری کنترل می گردد. در

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 كاهش و ارتفاع آن افزایش می یابد. به دلیل هندسه نامتقارن نورد حلقه با شروع فرآیند، حلقه تمایل به خارج از مرکز شدن دارد که جهت جلوگیری، از غلتکهای راهنما استفاده می شود. مکان غلتکهای راهنما توسط سیستمهای کنترلی تنظیم شده و بر سطح خارجی حلقه مماس است و تا حد امکان طوری برنامهریزی می گردند 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 می شوند، توانایی جابجایی به سمت بالا و پایین را دارند. با جابجایی غلتکهای محوری حلقه با ارتفاع مدنظر تولید می شود. 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. تاكنون فعاليتهاى زيادى جهت شبيهسازى نورد حلقه صورت گرفته است و مشخص شده است که با ابعاد و جنسهای مختلف حلقه و غلتکها گوناگون این فرایند همانند فرایندی کاملاً جدید ظاهر می شود.

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 مهم ترین 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 فنّاوریهای کنترل فرایند نورد و تبیین روشهای صحیح برای بازرسی، تعمیر و نگهداری به تولید موفقیت آمیز قطعات با کمترین خطا و هزینه دست یافت. فرسایش و خردشدگی کم کم باعث تغییر در سطح و شکل پروفایل غلتک شده و درنتیجه 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 پیش بینی و شبیه سازی نیروها و گشتاورهای موردنیاز در فرآیند نورد حلقه، از نورد صفحه حاصل شدهاند. اما اکثر تحلیلهای انجام شده 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 به ندرت وجود دارد و روشهای حل تحلیلی ارائه شده باید با احتیاط استفاده شود زیرا در این گونه تحلیلها گرادیان دمایی به درستی در نظر گرفته نمی شود و بهتر است از روشهای عددی یا نرمافزارهای المان محدود استفاده شود [7].

در نورد صفحه به دلیل تقارن در غلتکها معمولاً تنها به تحلیل یک غلتک پرداخته می شود در حالی که قطر غلتک ها 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 می یابد در حالی که سطح تماس در نورد صفحه نسبت به زمان ثابت است. این ویژگی نورد حلقه باعث می شود 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 آن ها را مشکل مینماید و ایجاب مینماید تا فرآیند به صورت دینامیکی در نظر گرفته شود.

آنالیز و شبیهسازی غلتکهای دستگاه نورد به دلیل پیچیدگی شرایط مرزی معمولاً فرآیندی زمان بر می باشد. جهت کاهش حجم محاسباتی شبیه سازی 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 ساده سازی شده ای صورت گرفته است.

از اوایل دهه هشتاد میلادی و گسترش روشهای عددی فعالیتهای زیادی جهت برآورد دما در غلتکهای نورد ورق صورت گرفت [۵-۳]. با پیشرفت روشهای عددی و تجهیزات محاسباتی قدرتمندتر، اندازه گیری تنشهای حرارتی و ترمومکانیکی با شرایط مرزی ساده بررسی شد [۹–۶]. سنگ و همکاران [۱۰] از یک نرمافزار المان محدود و توسعه یک مدل کوپل ترمومکانیکی جهت شکل دهی حلقهای از جنس IN- ۷۱۸ کردند. توسط مدل دمای سطح غلتکها، دمای حلقه و بارهای لازم جهت نورد را محاسبه کردند. بناسکیوتی [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 تخمين عمر با استفاده از ميدان 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 یارامترهای 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 تحليل المان محدود و نيروها توسط روش كران بالا حاصل شدند. قیوم و همکاران [۱۵] مقدار تنشهای ترمومکانیکی تولید شده در

غلتک 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 می کند و در ادامه این مقادیر برای تعیین شرایط مرزی مناسب بر روی غلتک اعمال می گردند. 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 وهمکاران [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 می کند 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 خنککاری 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 فرضيات آنها از قبيل تقارن، سطح تماس يكسان، كار سختي و ... نیاز به تغییرات کلی دارد. جهت ارزیابی دقیق تنشهای ترمومکانیکی در دستگاه نورد حلقه می بایست وضعیت ناپایدار و گذرای حلقه، تغییر نیروهای شکلدهی در حین فرآیند، تغییرات دما ناشی از اصطکاک و تغییر شکل و ... در نظر گرفته شود. ازاینرو 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

<sup>1</sup> Song

<sup>2</sup> Benasciutti

<sup>3</sup> Na

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 می گردد؛ 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 می شوند. پایه و اساس روابط ترموالاستیک توسط داهامل <sup>۱</sup>و نیومن<sup>۲</sup> شکل گرفت و تا اواسط قرن بیستم پیشرفت قابل توجهی در روابط ایجاد نشد. نیاز به ساخت تجهیزات در صنایع مختلف که در دماهای بالا کار می کردند 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 برگشت پذیر 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[:

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

$$\left(k_{ij}\theta_{,j}\right)_{,i} - \rho c \dot{\theta} + \rho R + T_0 \beta_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij} = 0 \tag{(7)}$$

که در آنها  $C_{ijkl}$  مؤلفههای تانسور الاستیسیته،  $i_{ij}$  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 نیروهای خارجی،  $u_i$  مؤلفههای تانسور رسانایی گرمایی،  $c_i$  مؤلفههای تانسور مرانایی گرمایی،  $d_i$  مؤلفههای در واحد جرم و  $T_0$  دمای اولیه میباشند ( $i = 1, 7, \pi$ ). اندیس  $i_{i,j}$  بیانگر مشتق گیری در راستای i میباشد.

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

سیستم معادلات دیفرانسیل کوپل با مشتقات جزئی را فراهم می کنند. حل دقیق این معادلات برای مسائل کاربردی و صنعتی قابل دستیابی 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 میایست سه مؤلفه بردار جابجایی u (در راستای x) و v (در راستای میبایست سه مؤلفه بردار جابجایی u (در راستای x) و v (در راستای برای فرمول بندی 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 می شود. با فرض اینکه مقادیر گرهای تابع پیوسته از زمان باشند، گسسته سازی مکان و زمان در توابع شکل امکان پذیر است. با گسسته سازی و تقریب معادلات حرکت و انرژی با روش المان محدود و استفاده از روش باقی مانده وزنی گالرکین (تابع وزن برابر تابع شکل) معادلات به صورت زیر حاصل می گردد [۲۱]:

$$\begin{pmatrix} \int_{V^e} \rho N_l N_m dV \end{pmatrix} \ddot{U}_{mi} + \begin{pmatrix} \int_{V^e} G \frac{\partial N_l}{\partial x_j} \frac{\partial N_m}{\partial x_j} dV \end{pmatrix} U_{mi} \\ + \begin{pmatrix} \int_{V^e} G \frac{\partial N_l}{\partial x_j} \frac{\partial N_m}{\partial x_i} dV \end{pmatrix} U_{mj} + \begin{pmatrix} \int_{V^e} \lambda \frac{\partial N_l}{\partial x_i} \frac{\partial N_m}{\partial x_j} dV \end{pmatrix} - (\ragge) - (\ragge) \\ \begin{pmatrix} \int_{V^e} \beta \frac{\partial N_l}{\partial x_i} N_m dV \end{pmatrix} \theta_m = \int_{V^e} f_i N_l dV + \int_{A^e} t_i N_l dA \\ l, m = 1, 2, ..., n \qquad i, j = 1, 2, 3 \end{cases}$$

$$\left(\int_{V^{e}} k \frac{\partial N_{l}}{\partial x_{i}} \frac{\partial N_{m}}{\partial x_{i}} dV\right) \theta_{m} - \left(\int_{V^{e}} T_{0} \beta \frac{\partial N_{m}}{\partial x_{i}} N_{l} dV\right) \dot{U}_{mi} + \left(\int_{V^{e}} \rho c N_{m} N_{l} dV\right) \dot{\theta}_{m} = \int_{V^{e}} R N_{l} dV - \int_{A^{e}} (\vec{q}.\vec{n}) N_{l} dA$$
(f)

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

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

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

<sup>1</sup> Duhamel

<sup>2</sup> Neuman

میباشند. با استفاده از شرایط اولیه و مرزی مدل، ماتریسهای فوق برای تعیین مجهولات استفاده میشوند. با توجه به معادله ۵ درصورتی 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 ثابتشده و شرایط مرزی به دور آن می چرخد. با این کار حجم ماتریسهای مؤثر در حل کوچک شده و درنتیجه سرعت حل افزایش خواهد یافت.

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

$$-k_{r} \frac{\partial T}{\partial r}\Big|_{r=R} = h^{*}(T - T_{sur}) + \eta \kappa \sigma_{B} \left(T^{4} - T^{4}_{sur}\right)$$

$$\begin{cases} \eta = 0 \quad T_{Roll} = 30^{\circ} C \\ \eta = 1 \quad T_{Roll} = 500, 250^{\circ} C \end{cases}$$
(6)

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

$$p_{contact-zone} = \frac{F_n}{Ct} \qquad C = C_1 \quad or \quad C_2 \tag{A}$$

$$u_i\big|_{r=0} = 0 \tag{9}$$

 $h^*$  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 سانتی گراد 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 شعاعی برابر نصف شعاع غلتک، شرایط عایق حرارتی تعریف گردیده شعاعی برابر نصف شعاع غلتک، شرایط عایق حرارتی تعریف گردیده است. با استفاده از این فرض ناحیه لایه مرزی حرارتی و نواحی داخلی در شبیه سازی در نظر گرفته شده و از طرف دیگر ناحیه داخلی غلتک با شعاع لایک است در شبیه سازی در نظر گرفته نمی شود و

تعداد المانها کاهش مییابد [۱۲و۱۷] با توجه به ناحیه غیرمتقارن و ناپایدار در حلقه می توان سطح تماس خارجی و داخلی حلقه با غلتک اصلی  $(C_1)$  و مندرل  $(C_7)$  را بر اساس تعریف فروزان و همکاران [۲۲] طبق شکل ۱ به این صورت بیان کردند.

$$C_{1} = \left[ \left( 2R_{1} - \frac{k_{1}(2R_{m} + h + k_{1})}{2(R_{1} + R_{m} + h/2)} \right) \left( \frac{k_{1}(2R_{m} + h + k_{1})}{2(R_{1} + R_{m} + h/2)} \right) \right]^{1/2} \quad (1 \cdot)$$

$$C_{2} = \left[ \left( 2R_{2} - \frac{k_{1}(2R_{m} - h - k_{2})}{2(R_{m} - h/2 - R_{2})} \right) \left( \frac{k_{2}(2R_{m} - h - k_{2})}{2(R_{m} - h/2 - R_{2})} \right) \right]^{1/2}$$
(11)

 $k_{r}\, _{s}k_{r}$  با توجه به تغییر شکلهای کوچک در حلقه مقدار تقریبی  $k_{r}\, _{s}k_{r}$  به این صورت بیان شده است [۲۳].

$$k_1 \approx k_2 \approx \frac{\Delta h}{2} \cong \frac{H-h}{2} \tag{11}$$

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 تقسیمشده 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<sup>۱</sup> ۱۱۱۶۱ شد. مدل المان محدود شامل ۱۰۸۰۰ المان با ۱۱۱۶۱ گره است از الگوریتم صریح و المان خطی چهار گرهای CPE<sup>+</sup>RT

1 Bias



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

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  $eta, \gamma, lpha$  به ترتیب ناحیه تماس با حلقه، خنک کاری 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 می شود. هر مدل شامل چندین زیر مدل است که در طی آنالیز شرایط مرزی در آن ها تغییر خواهد کرد با این کار در هر مرحله یک مدل ساده ترمومکانیکی بررسی می شود. شرایط مرزی اولیه و متغیر در هر مرحله بر روی غلتک اعمال می گردد. شرایط مرزی متغیر از قبیل نیروی نورد، تغییر دمای حلقه و غلتک، اندازه سطوح تماس با حلقه و ناحیه خنک کاری و ... تغییر خواهد کرد. شبیه سازی در بازه زمانی مشخص شده انجام می شود و نتایج تحلیل استخراج شده و به عنوان شرایط مرزی اولیه در زیر مدل بعدی استفاده می شود. شبیه سازی غلتک با موارد ذکر شده به صورت تکراری تا اتمام زمان فرآیند انجام خواهد شد.

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

است. همان طور که در شکل مشخص است نحوه تغییرات دما در هر دو مدل یکسان می باشد بدین معنی که با ورود گره سطحی به ناحیه تماسی با صفحه ناگهان دمای آن افزایش می یابد و بیشترین دما در حین خروج از این ناحیه مشخص می شود. با خروج گره دمای آن با نرخ مشخصی به دلیل انتقال حرارت به گرههای داخلی و محیط کاهش می یابد. هنگامی که گره به ناحیه خنک کاری می رسد 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 می شود. با خروج گره از ناحیه خنک کاری 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 می کند. در سایر نقاط به طور کلی مدل دما را کمی بیشتر (کمتر از ۱٪) پیشبینی میکنند. با توجه به شکل ۳ درمجموع، مدلها در نواحی که تغییرات دمایی شدیدی اتفاق نمی افتد دمای مشابهی را پیشبینی میکنند.



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



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

۶.	شعاع مندرل (mm)
۲۰۰	شعاع غلتک اصلی (mm)
۲۰۰	ار تفاع غلتکها (mm)
$C_{1} = Y / f \Delta + T \Delta \times 1 \cdot^{-r} \cdot t$	سطح تماس بين غلتک اصلي و حلقه (mm)
$C_r = 1 \cdot / \beta \nabla - \beta \times 1 \cdot^{-r} \cdot t$	سطح تماس بين مندرل و حلقه (mm)
۶/۲۸	سرعت زاویهای غلتک اصلی (rad/s)
۱۳/۹۵	سرعت زاویهای مندرل (rad / s)
٩٠	اندازه قطاع خنککاری (deg)
12.	فاصله زاویهای بین نواحی تماس با حلقه و خنککاری (deg)
۵۰۰-۲۵۰-۳۰	دمای اولیه غلتکها ( <sup>°C</sup> )
$1 \cdot \Delta \cdot - \Delta / A \Delta t$	دمای حلقه به عنوان تابعی از زمان (C <sup>°</sup> )
٣٠	دما محیط ( <sup>°</sup> C)
۵۰۰-۲۵۰-۳۰	دما مایع خنککننده (°C)
1 • 1 • •	ضریب هدایت همرفتی (آب) ((W / (m <sup>ř</sup> .°C))
1	ضریب هدایت همرفتی (روغن) ((W / (m ̆. °C))
۵۰	ضریب هدایت همرفتی محیطی ((W/(m <sup>ř</sup> .°C))
1	ضریب رسانش تماسی ((W / (m <sup>۲</sup> .°C))

H-۱۳ جدول ۱ :شرایط شبیهسازی و ابعاد غلتکها از جنس فولاد ۲۳ Table 1. Simulation conditions and dimensions of H-13 tool steel work rolls

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 [۲۷–۲۲] تخمین زده شد و در صورت نیاز تابع مناسبی برای آن در نظر گرفته شد. این خصوصیات در جدول ۲ هرلحظه، بار فشاری مناسب بر روی سطح غلتک اعمال گردید. تاریخچه بارگذاری مطابق شکل ۴ و با استفاده از شبیهسازی جداگانهای جهت شکل دهی 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 ۲۷۸ /۰۰/۲۵ و ۲/۰۰۱۲۵ 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 می شود. زمان شکل دهی حلقه مدنظر برابر ۲۴ ثانیه در نظر گرفته شده است و لذا شبیه سازی در این بازه انجام شد. المانهای استفاده شده در این تحلیل CPE+RT و نحوه شبکه بندی همانند قسمت قبل است. نتایج حاصل در ادامه توضیح داده می شود.

## ۱–۳– غلتک اصلی

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

<sup>1</sup> hertzian stresses

۱۸۶	مدول الاستيك (GPa)
$k = \operatorname{i} \cdot \operatorname{i}^{-r} \cdot T \cdot \operatorname{i}^{r} - \operatorname{i} \cdot \operatorname{i}^{r} \cdot T \cdot \operatorname{i}^{r} + \operatorname{i} / \operatorname{vA} \times \operatorname{i} \cdot \operatorname{i}^{-r} \cdot T + \operatorname{i} \operatorname{v} / \operatorname{vA} \times \operatorname{i}^{r} \cdot T + \operatorname{i} \operatorname{v} / \operatorname{vA} \times \operatorname{i}^{r} \cdot T + \operatorname{i} \operatorname{v} / \operatorname{vA} \times \operatorname{i}^{r} \cdot T + \operatorname{i} \operatorname{v} / \operatorname{vA} \times \operatorname{i}^{r} \cdot T + \operatorname{i} \operatorname{v} / \operatorname{vA} \times \operatorname{i}^{r} \cdot T + \operatorname{v} / \operatorname{vA} \times \operatorname{v}^{r} \cdot T + \operatorname{v} / \operatorname{v} / \operatorname{v}^{r} \cdot T + \operatorname{v} / \operatorname{v} / \operatorname{v} / \operatorname{v}^{r} \cdot T + \operatorname{v} / $	ضریب رسانش به عنوان تابعی از دما ((W / (m. C)) / W)
$\alpha = T \times I \cdot I \cdot T \cdot T \cdot I \cdot T + I / \cdot I Y$	ضریب انبساط حرارتی به عنوان تابعی از دما (C° / °C)
48.	ظرفیت حرارتی ((J / (kg. °C))
۷۸۴۰	چگالی (kg / m ّ)
$\begin{split} \boldsymbol{\sigma}_{p} = & - \mathbf{Y} \mathbf{F} \mathbf{A} / \mathbf{Y} \mathbf{Y} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_{p}^{\ \mathbf{F}} + \mathbf{I} \mathbf{Y} \mathbf{A} / \mathbf{\Delta} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_{p}^{\ \mathbf{A}} - \mathbf{F} \mathbf{F} \mathbf{Y} \mathbf{F} / \mathbf{q} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_{p}^{\ \mathbf{F}} + \\ & \mathbf{A} \mathbf{q} \mathbf{A} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_{p}^{\ \mathbf{F}} - \mathbf{T} \mathbf{q} \mathbf{F} \mathbf{F} / \mathbf{Y} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_{p}^{\ \mathbf{F}} + \mathbf{I} \mathbf{T} \mathbf{T} \mathbf{F} / \mathbf{Y} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_{p} + \mathbf{F} \mathbf{q} \mathbf{T} / \mathbf{A} \end{split}$	تنش جریان به عنوان تابعی از کرنش پلاستیک (MPa)
{ 1984(""C) 1884("C) 184.("C) 184.("C)	استحکام کششی (MPa)
{ 1 μα·(ψ·" C ) 1 μα·" C ) 1 μα·" C )	استحکام تسلیم (MPa)
۰/۲۸۵	ضريب پواسون

جدول ۲ : خصوصیات فیزیکی و ترمومکانیکی غلتکها Table 2. Thermal and mechanical properties of work rolls

مقدار دما و تنش در غلتک اصلی در حالتی که دمای اولیه غلتک C° ۲۵۰ 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 می دهد. 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 C° ۲۵۰ جهت بررسی اثر خنککاری بر روی سطح خارجی با روغن نشان داده شده است. قطاع خنککاری بر روی سطح خارجی با شده است. با توجه به این شکل مشخص است که دمای سطح غلتک در حالت خنککاری با روغن تقریباً ۱/۸ ٪ کمتر از حالتی است که غلتک بدون خنککاری است. همان طور که در شکل مشخص است تأثیر خنککاری بر تنشها ترمومکانیکی زیاد نبوده و در سطح و زیر غلتک کمی تنش معادل را کاهش می دهد ولی تأثیری بر مقدار تنش ماکزیمم و محل آن ندارد.

با انجام شبیه سازی غلتک اصلی در دماهای مختلف با خنک کاری یا بدون آن بر روی اندازه تنشهای ترمومکانیکی مشخص شد خنک کاری 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 C° ۲۵۰ در سطح به مقدار MPa و 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 هرتز دارد. غلتک اصلی بیشتر تحت تأثیر تنشهای مکانیکی می باشد [۱۹].



شکل ۵ : تأثیر خنککاری بر دما و تنش ترمومکانیکی در غلتک اصلی با دمای اولیه C° ۲۵۰ 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°C b) Zoomed view in the contact area

زیر آن ( نسبت شعاع ۰/۹۹) به مقدار ۴۴۸ MPa میرسد. تاریخچه تنشهای ترمومکانیکی در غلتک اصلی با دمای اولیه C° ۲۵۰ 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.

## ۳-۲- مندرل

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

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-میزز 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. درصورتی که بارهای حرارتی به غلتک وارد شود به دلیل افزایش دما در سطح غلتک تنش معادل ماکزیمم در سطح غلتک اتفاق خواهد



Fig. 6. History of equivalent thermo-mechanical stress in the main roll with initial temperature of 250°C



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 شبیه سازی و نفوذ حرارت به افتاد. این پدیدهها در غلتک اصلی نیز مشاهده گردید. درصورتی که بارهای حرارتی و مکانیکی بهصورت 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 می افتد. در ادامه

داخل مندرل، تنش حرارتی در لایههای زیری افزایش خواهد یافت. تأثیر نیروهای مکانیکی آنی 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 می شود، بارهای حرارتی بر روی سطح و بارهای مکانیکی در زیر سطح اثر بیشتری می گذارند. ترکیب این دو نوع بارگذاری سبب می گردد تا میدان تنش در این حالت از یکنواختی بیشتری برخوردار باشد. لازم به ذکر است که مقدار تنش ون-میزز 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-میزز ندارد. عامل مهم در میزان تنش ون-میزز تانسور انحرافی تنش میباشد و هر چه بیشتر باشد، تنش- معادل ون-میزز بیشتر خواهد شد. اعمال همزمان بارهای حرارتی و مکانیکی به مندرل منجر به افزایش مؤلفههای تنش نسبت به حالات مکانیکی و حرارتی می گردد ولی در اين حالت اختلاف آنها كاهش مي يابد، لذا تنش معادل ون-ميزز نسبت به تنش حرارتی کاهش خواهد یافت.

نتایج حاصل از شبیه سازی و تخمین تنش ترمومکانیکی در مندرل در دمای C° ۲۰ به همراه خنککاری با آب حین شکل دهی 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 ۳۴٪ 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 می شود. در طی فرآیند این امر سبب انتقال مکان ماکزیمم تنش معادل به سطح به تنش حرارتی است، خنککاری باعث تغییرات ناگهانی در روند به تنش های ترمومکانیکی در سطح می شود ولی بر تنش های زیر سطح اثر کمتری دارد.

نکته قابل توجه در تاریخچه تنش ترمومکانیکی در مندرل نسبت به غلتک اصلی را می توان بدین صورت عنوان نمود؛ در مندرل به دلیل نفوذ حرارت بیشتر به داخل غلتک تنش متوسط افزایش می یابد. افزایش دما در لایه های زیری منجر به انبساط المان های داخلی شده و سبب افزایش تنش فشاری در المان ها می گردد از این رو تنش متوسط

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 C<sup>°</sup> ۲۵۰ 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 C<sup>°</sup> ۲۰ بالا رفتن دما سطح غلتک و عدم خنککاری، شار حرارتی ورودی به تر روی سطح غالب میباشند افزایش چندانی پیدا نکرده و لذا تنش معادل بر روی سطح تقریباً ثابت بماند.

درشکل 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. بهعبارتدیگر تفاضل تنشهای نرمال در رابطه ون-میزز کاهشیافته 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. ازآنجاییکه تنشهای حرارتی در طی فرآیند بزرگتر میشوند بعد از نقطه تعادل اعمال نیروهای مکانیکی باعث افزایش مؤلفه تنش هیدرواستاتیک میشود. ازاینرو بعدازاین زمان تنشهای مکانیکی که در ناحیه تماس بروز میکنند

در شکل ۱۰ تنشهای ترمومکانیکی ایجادشده در غلتک با دمای اولیه ۲<sup>°</sup> ۲۵۰ 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 ۲<sup>°</sup> ۳۰ در اواخر فرآیند به ترتیب برابر ۵۲٪، ۶۷٪ و ۳۸٪ میباشد. این مقادیر نشان میدهد که



Fig. 8. History of equivalent thermo-mechanical stress in the mandrel with initial temperature of 30°C b) Zoomed view



شکل ۹: تاریخچه تنش ترمومکانیکی معادل در مندرل با دمای اولیه C°۲۵۰ بدون خنککاری

Fig. 9. History of equivalent thermo-mechanical stress in the mandrel with initial temperature of 250 °C without cooling practice



شکل ۱۰ : تاریخچه تنش ترمومکانیکی معادل در مندرل با دمای اولیه C° ۲۵۰ با خنککاری توسط روغن Fig. 10. History of equivalent thermo-mechanical stress in the mandrel with initial temperature of 250°C with oil cooling practice

<sup>°</sup> ۵۰۰ با خنککاری کل سطح توسط روغن نشان داده شده است. تفاوت ماکزیمم تنش، تنش متوسط و دامنه تنش در این حالت نسبت به مندرل با دمای <sup>°</sup> ۳۰ در اواخر فرآیند کمتر از ۱٪ میباشد. کاهش انتقال حرارت به داخل مندرل به دلیل خنککاری سبب میشود تنش متوسط در داخل مندرل با شیب کمتری افزایش یابد. با توجه به این شکلها مشخص است، در مندرل که متأثر از تنشهای حرارتی است کمترین تغییرات و اندازه تنش وقتی اتفاق میافتد که خنککاری 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 خنککاری اتفاق خواهد افتاد. در این حالت شار حرارتی ورودی به مندرل زیاد بوده و سبب ایجاد تنشهای ترمومکانیکی بزرگی در آن میشود.

## ۴- نتیجهگیری

بررسی خنککاری موضعی بر روی غلتکهای نورد با استفاده از محیط گرافیکی معمولی نرمافزار آباکوس امکانپذیر نیست؛ از اینرو توسط اسکریپت نویسی شرایط موجود بر روی غلتک بررسی شد. غلتکها در دستگاههای نورد به طور همزمان تحت تأثیر تنشهای مکانیکی و حرارتی قرار دارند که بررسی هرکدام آز آنها بهتنهایی بر روی غلتک نتایج مختلفی را نشان خواهد داد. از سوی دیگر در اعمال خنککاری بر روی سطح غلتک مقدار تنش متوسط را در آن کاهش و دامنه تنش را افزایش میدهد. همچنین اعمال خنککاری سبب میشود تا زمان تعادل تنشهای ترمومکانیکی و حرارتی به تعویق بیفتد.

تخمین تنشهای ترمومکانیکی در مندرل با دمای C° ۵۰۰ در شکل ۱۱ نشان داده شده است. با توجه به این شکل مشخص است که تنشهای ایجاد شده در سطح مندرل نسبت به دمای °C ۳۰ بیشتر و نسبت به دمای C°۲۵۰ کمتر است. به دلیل اینکه تنشهای معادل ون-میزز ایجاد شده در سطح غلتک بیشتر مربوط به تنشهای حرارتی میباشد، هنگامیکه دمای اولیه مندرل دمای <sup>C° ۳۰</sup> است در ناحیه تماس با حلقه ناگهان دما و بالتبع تنشهای حرارتی افزایش مییابد و در ناحیه خنککاری با کاهش دما تنشهای 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 C<sup>°</sup>C است به دلیل عدم خنککاری آن دامنه تنش معادل تغییرات زیادی نداشته ولی به علت افزایش دما در مندرل بهطور کلی تنش متوسط افزایش خواهد داشت. افزایش تقریبی مقدار ماکزیمم تنش، تنش متوسط و دامنه تنش در این حالت نسبت به غلتک با دمای C°C در اواخر فرآیند به ترتیب برابر ۱۵٪، ۲۱٪ و ۴٪ می باشد. در شکل ۱۲ تاریخچه تنش ترمومکانیکی در مندرل با دمای اولیه





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 درحالی 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 می گذارند. 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 <sup>C</sup> ۵۰۰ ۲ با خنککاری کل سطح توسط روغن ب)بزرگنمایی Fig. 12. History of equivalent thermo-mechanical stress in the mandrel with initial temperature of 500°C with oil cooling practice b) Zoomed view

خنککاری متفاوت است. در مندرل تأثیر تنش حرارتی بر مقدار تنش ترمومکانیکی قابلملاحظه 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 ازلحاظ کم بودن مقادیر دامنه و متوسط تنش در وضعیتی است که غلتک دارای دمای اولیه ۲۰۰۳ یا ۲۰۰۵ باشد و روی سطح آن خنککاری انجام شود. با انجام خنککاری مناسب بر روی سطح میدان دمای ناهمگن در مندرل به حداقل خواهد رسید. درصورتی 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 می شود 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 تنش های ایجاد شده در غلتک اصلی ناچیز است و تنها کمی در ناحیه 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 rigidplastic 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 hotstrip rolling, *Journal of Engineering Mathematics*,

فهرست علائم

$$\left( \mathrm{W}\,/\,\mathrm{m}^{\mathrm{v}}
ight)$$
 مؤلفههای شار حرارتی،  $\left( \mathrm{W}\,/\,\mathrm{m}^{\mathrm{v}}
ight)$ 

(W / kg) توان منبع حرارتی در واحد جرم (
$$m W$$
 / kg)  $R$ 

(m) مۇلفەھاى جابجايى $u_i$ 

## علائم يونانى

زاویه ناحیه تماس با حلقه α اختلاف زاویهای بین ناحیه تماس یا حلقه و خنککاری γ زاویه ناحیه خنککاری ß چگالی، (kg/m<sup>°</sup>) ρ اختلاف درجه حرارت θ ضريب تشعشع ĸ ثابت لامه <sup>N / m<sup>۲</sup></sup> λ  $^{N/m^{r}}$ مدول برشی μ مؤلفههای تانسور کرنش  $\mathcal{E}_{ii}$ ثابت استفان-بولتزمن ((m<sup>r</sup>.K<sup>\*</sup>)/ W)  $\sigma_{\scriptscriptstyle R}$ مؤلفههای تانسور تنش  $\sigma_{_{ii}}$ 

## مراجع

- S. Spuzic, K. Strafford, 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, Threedimensional 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.suppliersonline.com/Research/ Property/result.asp?FamilyID=17&MetaIID=2697&Ch emical=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
- [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 nonlinear 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