

## بررسی شبیه‌سازی دوبعدی نورد حلقه داغ و تأثیر پارامترهای مختلف بر روی فرایند شکل‌دهی اسپول موتور

نگهبان، علی<sup>1</sup>، مراثی، عبدالعلی<sup>2\*</sup>، براتی، احسان<sup>2</sup>

1- دانشجوی دکتری مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر

2- استادیار مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر

(دریافت مقاله: 94/04/14 تاریخ پذیرش 95/06/08)

### چکیده

فرایند نورد حلقه جهت تولید حلقه‌های بدون درز جوش می‌باشد که در صنایع مختلف به ویژه ماشین‌سازی، هوافضا و هسته‌ای کاربرد دارد. از مزایای قابل توجه در فرایند نورد حلقه، صرفه‌جویی در ماده اولیه، کاهش زمان تولید و انرژی می‌باشد. با توجه به ماهیت پیچیده فرایند نورد حلقه و پارامترهای تأثیرگذار بر روی آن لازم است تا قبل از ساخت حلقه‌های طرح‌دار به جای آزمایشات عملی شرایط کلی شکل‌دهی بر روی آن‌ها با روش‌های عددی بررسی گردد. در این پژوهش فرایند نورد حلقه داغ آلیاژ Ti6Al4V جهت تولید اسپول موتور در نرم‌افزار آباکوس مورد توجه قرار گرفته است و به دلیل طرح پیچیده پوسته و زمان طولانی شبیه‌سازی از مدل ساده شده‌ای جهت بررسی شرایط حاکم بر شبیه‌سازی صحیح فرایند استفاده شده است. با مقایسه مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی مشخص شد که دقت حالت دوبعدی با در نظر گرفتن پارامترهایی بر اساس ابعاد غلتک‌ها و حلقه و همچنین سرعت شکل‌دهی می‌تواند کم یا زیاد باشد که در این مطالعه بازه قابل قبول برای آن‌ها تعیین گردید. در مدل مورد نظر با توجه به مقادیر این پارامترها شبیه‌سازی از دقت قابل قبولی برخوردار است. در ادامه روش‌های افزایش سرعت حل در آباکوس، تأثیر عوامل موثر بر روی شبیه‌سازی حلقه از جمله خصوصیات مکانیکی ماده مورد نظر، وجود غلتک‌های راهنما بر نتایج خروجی فرایند و امکان جداسازی معادلات ترمومکانیکی، بررسی گردید. نتایج حاصل را می‌توان در شبیه‌سازی نورد حلقه داغ آلیاژهایی با خصوصیات مشابه با Ti6Al4V به طور مناسبی استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: نورد حلقه داغ، اسپول موتور، کرنش صفحه‌ای، کرنش صفحه‌ای تعمیر یافته، نرم‌افزار آباکوس

## Investigation of 2-D Hot Ring Rolling Simulation and Effects of Different Parameters on Forming Process of Jet's Spool

### Abstract

The ring rolling process is widely used to manufacture seamless ring-shaped parts for automotive, aerospace and nuclear industry such as aero-engines and nuclear reactors parts. In addition, the savings in time, energy and material during the production of ring shaped parts have been instrumental in reducing the overall cost. Due to the complexity and high nonlinearity of the process, it is obviously difficult to investigate the process purely by analytical and experimental methods, more attention is paid to the finite-element method to explore and develop the advanced ring rolling technologies. In this research, simulation of hot ring rolling of titanium alloy (Ti6Al4V) has been investigated. For the sake of time, the effects of rolls dimension, their velocities and some assumptions in rolling process with two dimensional models were conducted. The results of 2-D and 3-D models might agree or disagree, depending on the key parameters. In this paper, according to the values of the key parameters, the 2-D models have been used as an appropriate case for simulation and analysis. The effects of some relaxing assumptions on ring rolling process, like material properties and guide rolls existence, have been studied. The results provide guidelines for hot ring rolling simulation of Ti6Al4V alloy.

**Keywords:** Hot ring rolling, jet engine's spool, key parameter, mass scaling, ABAQUS software

مقدمه

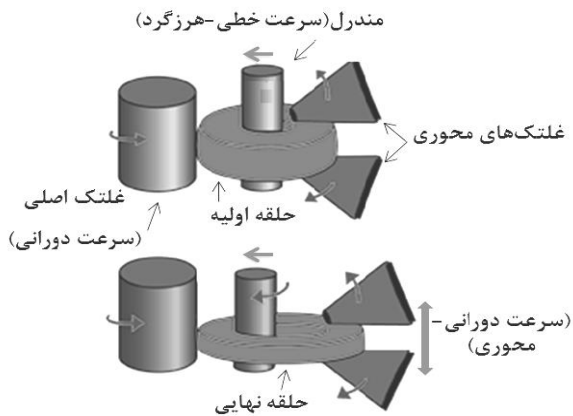
فرآیند نورد حلقه امروزه در بسیاری از صنایع به ویژه صنایع نظامی و هوافضا مورد استفاده قرار می‌گیرد. این فرآیند به منظور تولید حلقه‌های بدون درز جوش کاربرد دارد و به دلیل همین خصوصیت مورد توجه انواع صنایع قرار گرفته است. البته مزایای دیگر این روش عبارتند از: هزینه‌های بسیار پایین تولید، توانایی در تولید انواع مقاطع، کیفیت بهتر محصولات از لحاظ متالورژیکی و ریز ساختار، تلورانس کوچک ابعاد و کاهش دور ریز ماده اولیه. این روش جهت تولید قطعات حلقوی بزرگ و کوچک که دارای تقارن محوری هستند، همچون رینگ‌های با مقاطع خاص همچون حلقه بیرینگ‌ها، قطعات دقیق موتورهای جت، توربین‌ها و حلقه‌های تقویت سازه به وزن 30 تن به کار می‌رود [1]. با پیشرفت دستگاه‌های نورد حلقه امکان تولید حلقه‌هایی با نسبت ضخامت دیواره به ارتفاع 16 به 1 و 16 به 1 با یک دستگاه امکان پذیر شده است و در صورت گرمایش مجدد در طی فرآیند این نسبت تا 1 به 28 قابل افزایش می‌باشد [2].

علاوه بر مزایای عدم وجود مواد اضافی و زوایای ناخواسته که بعد از فرآیند باید با ماشین‌کاری برداشته شود، مهم‌ترین مزیت این روش جریان یکنواخت ماده در جسم پس از انجام فرآیند می‌باشد. هنگامی که حلقه در حال شکل گرفتن می‌باشد جریان ماده از انحنای حلقه تبعیت می‌کند و ساختاری تشکیل می‌دهد که در 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 صورت مناسب شکل یافته و کیفیت سطح خوبی داشته باشد و عیوب موجود در آن با نورد‌های پی‌درپی به خوبی رفع گردد. برای تولید دیسکی با شکل خاص با روش نورد حلقه به نیروی 30 مگانیوتن احتیاج است در حالی که همین قطعه با آهن‌گری به نیروی معادل 120 مگانیوتن احتیاج دارد [3].

بسیاری از روش‌های تحلیلی که برای پیش‌بینی نیروها و گشتاورهای مورد نیاز نورد حلقه استفاده می‌شوند از روابط فرآیندهای ساده‌تر نظیر نورد داغ ورق حاصل گشته‌اند، ولی این روابط به تنهایی جوابگوی مسائل مطرح در نورد حلقه نیستند. فاکتورهایی که وضعیت را در طی فرآیند نورد حلقه پیچیده

می‌نمایند به طور خلاصه در ادامه ذکر گردیده و در شکل 1 نشان داده شده است:

- عدم تقارن نورد به خاطر تفاوت در شعاع‌های غلتک‌ها (در راستای شعاعی)
  - غلتک‌های غیر استوانه‌ای و تغییر در قطر غلتک‌ها (در راستای محوری)
  - وجود یک غلتک با سرعت دورانی و یک غلتک با سرعت خطی (در راستای شعاعی)
  - تغییر قطر حلقه نسبت به زمان و تغییر در سطح تماس حلقه و غلتک‌ها
  - کاهش یا افزایش پیوسته ضخامت و ارتفاع با توجه به شکل نهایی مورد نظر
- 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، بنابراین هنوز تقاضا برای این گونه شبیه‌سازی‌ها بالاست ولی زمان طولانی جهت محاسبه دقیق این فرآیند کاربرد آن را محدود و باعث می‌شود از یکسری فرضیات ساده‌کننده جهت کاهش هزینه محاسباتی بهره ببرند که می‌توان به ساده‌سازی‌هایی در مورد خصوصیات جنس مواد یا هندسه حلقه اشاره نمود.



شکل 1- شماتیک نورد حلقه توسط دستگاه شعاعی-محوری

اولین تحلیل اجزا محدود نورد حلقه توسط یانگ و کیم<sup>1</sup> [4] در قالب یک شبیه‌سازی دوبعدی با فرض کرنش صفحه‌ای ارائه شده است. چون<sup>2</sup> و همکارانش [5] روش جدیدی جهت پیش‌بینی تقریبی تغییر شکل ماده در فرآیند

بناسکیوتی<sup>14</sup> و همکارانش [17] تقریبی عددی بر پایه المان محدود جهت اندازه‌گیری تنش‌های حرارتی غلتک در نورد داغ ورق را ارائه دادند. به منظور کاهش پیچیدگی و هزینه محاسباتی از یک مدل دو بعدی در المان محدود استفاده کردند که قطعه کار در سطح تماس به صورت سیکلی توسط رسانش گرم شده و سپس توسط آب خنک می‌شد. سنبلی و سراج‌زاده مدلی [18] تحلیلی-عددی جهت تعیین تنش ترمومکانیکی در غلتک‌های نورد ورق 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. فعالیت‌های بسیار زیاد دیگری نیز جهت شبیه‌سازی نورد حلقه به صورت دو بعدی یا سه بعدی با فرضیات مختلف تاکنون صورت گرفته است. برای تولید مناسب، اقتصادی و سرمایه‌گذاری جهت ساخت حلقه با این روش موارد زیر باید مد نظر قرار گرفته شوند [19-20].

- کارپذیری و جریان تنش در ماده تغییرشکل پذیر
  - دمای قطعه کار و غلتک‌ها در طی فرایند مخصوصاً در نورد حلقه داغ
  - نیرو، گشتاور و انرژی لازم جهت هندسه مورد نیاز و ماده
  - تلورانس‌های مورد نیاز در ساخت قطعه
  - میزان تولید
- با توجه به نحوه شکل‌دهی حلقه این فرایند می‌بایست به صورت سه‌بعدی بررسی گردد ولی چنین تحلیلی برای حلقه-های طرح‌دار و یا آنالیزهای کوپل بسیار زمان‌بر می‌باشد و از سوی دیگر تحلیل‌های دوبعدی در مواردی خطاهای زیادی را به تحلیل تحمیل می‌کند بنابراین در این پژوهش در ابتدا محدوده قابل قبول برای استفاده از فرضیات دوبعدی ارزیابی گردید و در ادامه تأثیر شرایط مختلف جهت شکل‌دهی حلقه‌ای از جنس Ti6Al4V بررسی شد.

### بررسی مدل‌سازی دوبعدی نورد حلقه

#### فرض کرنش صفحه‌ای در حلقه:

یکی از مباحث مهم در شکل‌دادن فلزات میزان کرنش پلاستیک ایجاد شده در قطعات می‌باشد. هر چه این مقدار در کل قطعه یکنواخت‌تر باشد، تنش‌های پسماند ناخواسته در قطعه کمتر می‌شود. اکثر روابط تحلیلی در رابطه با مسائل نورد

نورد حلقه ارائه کرده‌اند. در این پژوهش نورد حلقه را به صورت دوبعدی و متقارن محوری شبیه‌سازی شده است. سنگ<sup>3</sup> و همکارانش [6] از یک نرم‌افزار المان محدود و توسعه یک مدل کوپل ترمومکانیکی جهت شکل‌دهی IN-718 به صورت حلقه استفاده کردند و توسط آن دمای سطح غلتک‌ها، دمای حلقه و بارهای لازم جهت نورد را محاسبه نمودند. کیان<sup>4</sup> و همکارانش [7] کاربرد روش مقیاس‌دهی جرم در شبیه‌سازی سه بعدی المان محدود نورد حلقوی را بررسی نمودند. زائو<sup>5</sup> و همکارانش [8] شبیه‌سازی توزیع تغییر شکل‌های پلاستیک و تنش‌های پسماند را در نورد حلقوی شعاعی انجام دادند و به منظور انجام این بررسی، آن‌ها دامنه و توزیع تغییر شکل پلاستیک را به ازای سرعت‌های متفاوت تغذیه مندرل بررسی کردند. هوا<sup>6</sup> و همکارانش [9] برای بررسی نورد حلقه شیاردار و بررسی پارامترهای نفوذ پلاستیکی به بررسی آن به صورت سه بعدی در نرم افزار آباکوس<sup>7</sup> پرداختند. وانگ<sup>8</sup> و همکارانش [10] به شبیه‌سازی نورد داغ حلقه‌های ساده پرداختند و تأثیر دما و سرعت غلتک‌ها را بر روی فرایند بررسی کردند. همچنین در پژوهش دیگری وانگ و همکارانش [11] تأثیر و بهینه‌سازی ابعاد غلتک‌ها در نورد داغ حلقه‌های بزرگ آلیاژهای تیتانیوم را بررسی کردند. چابین<sup>9</sup> و همکارانش [12] فرایند نورد حلقه را در نرم‌افزار فورج<sup>10</sup> برای حلقه‌ای از جنس IN-718 شبیه‌سازی کردند و نتایج را با آزمایش‌های عملی مقایسه نمودند.

جهت بررسی غلتک راهنما بر روی فرایند نورد و شبیه‌سازی با استفاده از آن فروزان و همکارانش [13] روش جدیدی جهت شبیه‌سازی غلتک‌های راهنما بیان کردند و با استفاده از آن پایداری و سرعت حل را افزایش دادند. وانگ و همکارانش [14] نیز با فرض افزایش یکنواخت شعاع حلقه رابطه‌ای ساده جهت مکان غلتک‌های راهنما ارائه دادند و به شبیه‌سازی حلقه پرداختند. لی<sup>11</sup> و همکارانش [15] روشی جهت کنترل موقعیت غلتک‌های راهنما در نورد حلقه شعاعی-محوری ارائه دادند و با استفاده از نرم افزار فورج و آزمایش بر روی آلیاژ 42CrMo4 به بررسی این روش پرداختند.

آنالیز کوپل ترمومکانیکی در فعالیت‌های گوناگون با فرضیات مختلف بررسی شده است. لی<sup>12</sup> و همکارانش [16] بر اساس معادلات رسانایی حرارتی میدان دمای سه بعدی را در غلتک نورد ورق با کمک نرم‌افزار انسیس<sup>13</sup> بدون در نظر گرفتن گرمایش ناشی از تغییرشکل پلاستیک بررسی کردند.

البته در این مدل دوبعدی با بررسی تأثیر سرعت مندرل بر کرنش پلاستیک معادل در سطح مقطع حلقه با توجه به شکل 2 مشخص می‌گردد با افزایش سرعت مندرل کرنش پلاستیک معادل در سطح مقطع حلقه یکنواخت‌تر می‌شود که با نتایج تحلیل سه‌بعدی هماهنگی دارد اما در حالت کرنش صفحه‌ای به دلیل خطای زیاد در سطوح داخلی و خارجی یکنواختی بیشتری را نشان می‌دهد که با حالت واقعی در تناقض است. در پیش‌بینی کرنش پلاستیک معادل با فرض کرنش صفحه‌ای و مقایسه آن با حالت سه‌بعدی در سرعت  $8 \text{ (mm/s)}$  بیشترین خطا در سطح خارجی حلقه (70% خطا) و کمترین آن در سطح میانی (37% خطا) مشاهده گردید. با کاهش سرعت مندرل میزان کرنش پلاستیک معادل در

جدول 1- ابعاد و مشخصات مدل دوبعدی نورد حلقه داغ آلیاژ

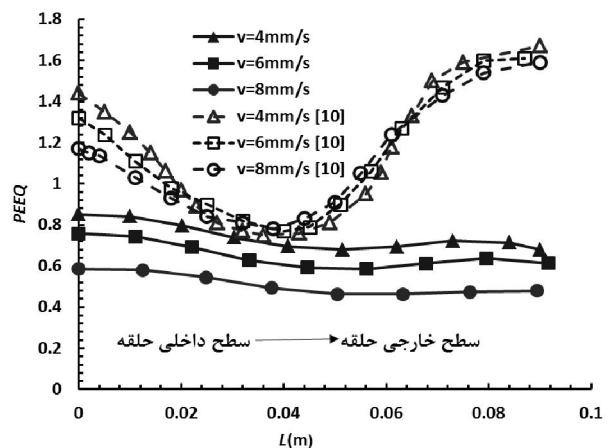
Ti6Al4V	
مقدار	پارامتر شکل‌دهی
225	شعاع غلتک اصلی (mm)
160	شعاع مندرل (mm)
397/5	شعاع خارجی حلقه اولیه (mm)
210	شعاع داخلی حلقه اولیه (mm)
80	ارتفاع حلقه و غلتک‌ها
4/21	(فرض کرنش صفحه‌ای) (mm)
8-6-4	سرعت دورانی غلتک اصلی ( $\text{rad.s}^{-1}$ )
0/5	سرعت مندرل ( $\text{mm.s}^{-1}$ )
0/5	ضریب اصطکاک
Ti6Al4V	جنس حلقه
880	دمای اولیه حلقه ( $C^0$ )
250	دمای اولیه غلتک اصلی و مندرل ( $C^0$ )
30	دمای محیط ( $C^0$ )
50	ضریب انتقال حرارت همرفتی ( $\text{W}/(\text{m}^2.C^{-1})$ )
4000	ضریب رسانش تماسی ( $\text{W}/(\text{m}^2.C)$ )

یک شعاع مشخص حلقه افزایش می‌یابد و در سطوح داخلی حلقه پیش‌بینی کرنش پلاستیک معادل به حالت سه‌بعدی نزدیک‌تر می‌شود. با مقایسه دو حالت در سرعت  $4 \text{ (mm/s)}$  بیشترین خطا در سطح خارجی حلقه (59% خطا) و کمترین خطا در سطح میانی (5% خطا) مشاهده گردید.

جهت بررسی دما در حلقه با فرض کرنش صفحه‌ای پروفیل دمایی حلقه در انتهای فرایند با سرعت‌های مختلف مندرل در سطوح مختلف از سطح داخلی به خارجی در شکل 3 نشان داده شده است. با توجه به این شکل مشخص می‌شود

با فرض کرنش صفحه‌ای استخراج شده است و تاکنون پژوهش‌های زیادی جهت بررسی نورد حلقه با فرض کرنش صفحه‌ای صورت گرفته است. به دلیل پیچیدگی فرایند و سطوح با شرایط تماس مختلف همان‌طور که قبلاً عنوان شد معمولاً حل‌های عددی سه‌بعدی زمان‌بر می‌باشند بنابراین در ابتدا به بررسی فرض کرنش صفحه‌ای جهت شبیه‌سازی حلقه پرداخته شد. وانگ و همکارانش [10] شکل‌دهی حلقه‌های بزرگ از جنس آلیاژ Ti6Al4V را به روش عددی مورد بررسی قرار دادند و شرایط مختلف بر روی شکل‌دهی حلقه را بررسی کردند. جهت بررسی میزان کرنش پلاستیک در حالت دوبعدی و مقایسه آن با حالت سه‌بعدی از پژوهش انجام شده توسط آن‌ها بر روی حلقه‌ای با مشخصات ارائه شده در جدول 1 که خصوصیات و نتایج آن به طور کامل در پژوهش وجود دارد، استفاده گردید و مقدار کرنش پلاستیک در طول ضخامت حلقه  $L \text{ (m)}$  بررسی شد. در این مدل از المان 4 گره‌ای کوپل مکانیکی-حرارتی CPE4RT برای حلقه و المان دو بعدی R2D2 جهت غلتک‌ها استفاده گردید.

با مقایسه مدل کرنش صفحه‌ای و سه‌بعدی طبق شکل 2 مشخص می‌گردد که حالت کرنش صفحه‌ای میزان کرنش پلاستیک معادل<sup>15</sup> را کمتر پیش‌بینی می‌کند و بیشترین خطا در سطوح داخلی و خارجی حلقه بروز می‌نماید. این خطا به دلیل ماهیت سه‌بعدی فرایند و امکان تغییر شکل محوری حلقه در سطوح داخلی و خارجی می‌باشد. در این مدل حالت کرنش صفحه‌ای به دلیل عدم امکان تغییر شکل محوری در این سطوح،



شکل 2- مقایسه میزان کرنش پلاستیک معادل در مدل دوبعدی کرنش صفحه‌ای و سه‌بعدی

کرنش پلاستیک معادل را به مراتب کمتر پیش‌بینی می‌کند.

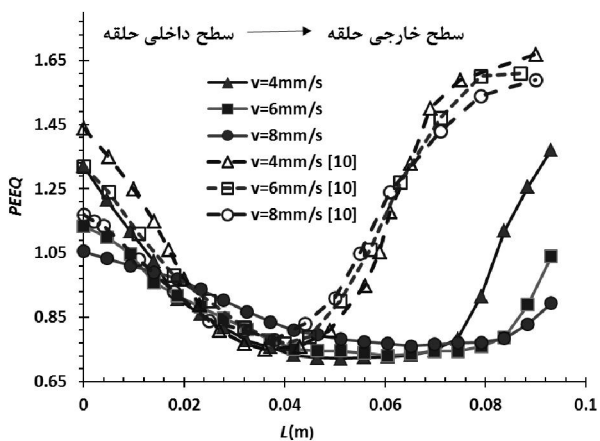
پلاستیک و دما از دقت بالایی برخوردار نیست بنابراین استفاده از فرض کرنش صفحه‌ای در مسائل نورد حلقه تنها در شرایط خاصی امکان پذیر است از این رو در ادامه به بررسی بیشتر این فرض و حالت تعمیم یافته آن پرداخته شد.

**بررسی کرنش پلاستیک معادل با فرض کرنش صفحه‌ای تعمیم یافته در حلقه:**

با بررسی شکل 2 مشخص می‌شود فرض کرنش صفحه‌ای در سطوح آزاد بیشترین خطا را دارد. حالت کرنش صفحه‌ای تعمیم یافته بر خلاف کرنش صفحه‌ای که در آن کرنش در راستای محوری صفر فرض می‌شود به ماده اجازه می‌دهد در راستای محوری جابه‌جا شود و لذا کرنش در راستای محوری نیز وجود خواهد داشت.

تحلیل کرنش صفحه‌ای تعمیم یافته تنها در اباکوس استاندارد موجود است. کرنش در راستای محوری به صورت خطی با توجه به جابه‌جایی دو صفحه که ماده بین آن‌ها قرار گرفته است محاسبه می‌شود [21].

با اطلاعات مندرج در جدول 1 مدل در آباکوس استاندارد آماده گردید و نقطه مرجع جهت محاسبه کرنش محوری در نیمه ضخامت حلقه انتخاب گردید. حلقه توسط المان چهار گره‌ای CPEG4R و غلتک‌ها به وسیله المان دو بعدی R2D2 مش‌بندی گردید. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در شکل 4 نشان داده شده است.



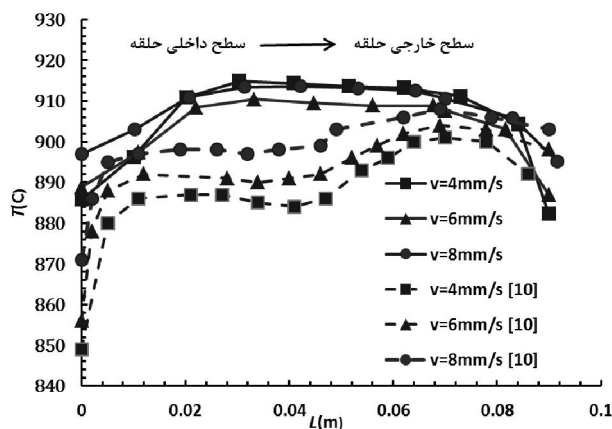
شکل 4- مقایسه میزان کرنش پلاستیک معادل در مدل کرنش صفحه‌ای تعمیم یافته و سه‌بعدی

با توجه به شکل 4 مشخص می‌شود دقت نتایج حاصل از تحلیل کرنش صفحه‌ای تعمیم یافته با افزایش سرعت مندرل همانند حالت کرنش صفحه‌ای کاهش می‌یابد. در تحلیل سه-

که حالت کرنش صفحه‌ای در این مدل پروفیل دمایی را در مجموع بیشتر پیش‌بینی می‌کند که با توجه به حالت دوبعدی و عدم خنک‌کاری در سطح میانی منطقی است اما بر خلاف مدل سه‌بعدی در سطح داخلی دما را بیشتر و در سطح خارجی دما را مقداری کمتر پیش‌بینی می‌کند که علت آن ناشی از گرمای ایجاد شده توسط تغییرشکل پلاستیک می‌باشد. در ضمن در سطوح میانی مدل سه‌بعدی به دلیل تشعشع و همرفت دما کاهش می‌یابد و در نقاطی به دلیل غلبه گرمای ناشی از تغییرشکل بر اتلاف حرارت به محیط، دما افزایش یافته است اما در مدل دوبعدی چنین حالتی به دلیل عدم انتقال حرارت در سطوح داخلی مشاهده نمی‌شود.

با توجه به شکل 2 مشخص می‌شود که در حالت دوبعدی مقدار کرنش پلاستیک معادل در سطح داخلی بیشتر از سطح خارجی است که بر خلاف شبیه‌سازی سه‌بعدی می‌باشد. لذا در سطح داخلی به دلیل تغییرشکل بیشتر گرمای بیشتری تولید شده و دما در سطح داخلی بیشتر از سطح خارجی می‌گردد. با شبیه‌سازی دوباره بدون اتلاف حرارت و گرمای ناشی از تغییرشکل و اصطکاک مشخص شد که با این فرضیات نیز پروفیل دمایی به درستی پیش‌بینی نمی‌شود. البته در این مدل نیز با کاهش سرعت مندرل افت دما در سطوح داخلی و خارجی بیشتر می‌شود که منطبق با حالت سه‌بعدی است و بالعکس.

با توجه به شکل‌های 2 و 3 مشخص می‌شود که در حلقه شبیه‌سازی شده فرض کرنش صفحه‌ای کلیاتی در مورد نحوه شکل‌گیری حلقه ارائه می‌دهد ولی در پیش‌بینی کرنش



شکل 3- مقایسه پروفیل دمایی در سطح مقطع حلقه در مدل دوبعدی و سه‌بعدی

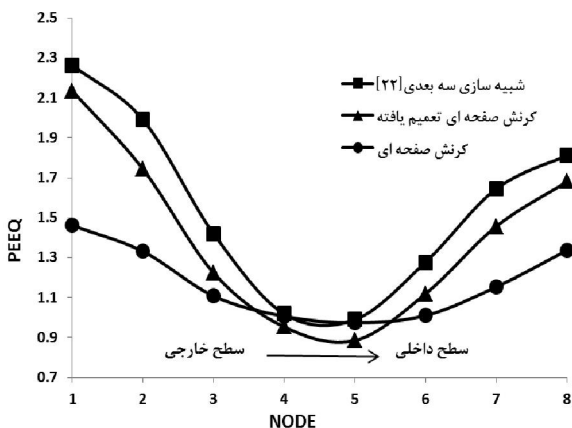
معادل از دقت پایینی برخوردار است. از این رو محدوده استفاده از این فرض در نورد حلقه محدودتر از کرنش صفحه‌ای تعمیم یافته است. حل مسئله مذکور توسط کامپیوتر با مشخصات کلی زیر:

(Intel Core i7 , CPU 3.6GHz , RAM 16GB)

با فرض کرنش صفحه‌ای در کمتر از 3 ساعت انجام گرفت و با فرض کرنش صفحه‌ای تعمیم یافته در حدود 25 ساعت زمان برد. علاوه بر زمان طولانی‌تر تحلیل، مدل تعمیم یافته برای تحلیل‌های کوپل ترمومکانیکی در نرم افزار آباکوس پیش-بینی نشده است ولی در مقابل مدل کرنش صفحه‌ای امکان دسترسی به دامنه وسیعی از تحلیل‌ها را فراهم می‌کند لذا با توجه به محدودیت استفاده از این فرض در نورد حلقه به محدوده قابل قبول برای استفاده از فرض کرنش صفحه‌ای پرداخته می‌شود.

#### بررسی مدل‌سازی با فرض کرنش صفحه‌ای:

در بررسی‌هایی که تاکنون بر روی نورد حلقه صورت گرفته، مشخص شده است که بیشترین مقدار کرنش پلاستیک



شکل 5- مقایسه میزان کرنش پلاستیک معادل در مدل‌های دو بعدی و سه بعدی

معادل در نقاط مختلفی از حلقه رخ می‌دهد که با بررسی ابعاد حلقه و غلظت‌های شبهه‌سازی شده می‌توان به یک خط مشی کلی دست یافت. اوتسونومیا<sup>16</sup> و همکارانش [23] در بررسی عددی نورد سرد حلقه به این نتیجه رسیدند که بیشترین کرنش پلاستیک معادل در سطح خارجی و کمترین در سطح میانی حلقه رخ می‌دهد. زو<sup>17</sup> و همکارانش [24] و لیم<sup>18</sup> و همکارانش [25] نیز این پدیده را در نورد حلقه داغ مشاهده نمودند در حالی که سنگ و همکارانش [6] و وانگ و

بعدی این حلقه با سرعت‌های مختلف مندرل کرنش پلاستیک در سطح خارجی بیشتر از سطح داخلی حلقه است در حالی که در سرعت 8 (mm/s) مندرل در مدل دو بعدی عکس این حالت پیش‌بینی می‌شود. با کاهش سرعت مندرل پیش‌بینی حاصل از تحلیل دوبعدی به تحلیل سه‌بعدی نزدیک شده و مقدار آن در سطوح داخلی تقریباً به صورت مماس با کمترین مقدار کرنش پلاستیک معادل در مدل سه‌بعدی می‌باشد و مقدار آن را 4% بیشتر پیش‌بینی می‌کند. در سطح داخلی و خارجی حلقه به ترتیب مقدار کرنش پلاستیک معادل 8% و 17% کمتر نسبت به شبیه‌سازی سه‌بعدی پیش‌بینی می‌شود.

از آنجایی که در روش کرنش صفحه‌ای تعمیم یافته، حل مستقل از موقعیت محوری است کرنش برشی در آن وجود ندارد [21]، بنابراین در سطوحی که کرنش قابل ملاحظه‌ای رخ می‌دهد به دلیل نبود اثر کرنش برشی در تغییرشکل پلاستیک مقدار کرنش پلاستیک معادل کمتر پیش‌بینی می‌شود. لذا هر چه تغییرشکل‌ها کمتر باشد دقت حل بیشتر می‌شود. در مراحل اولیه فرایند شکل دهی به دلیل تغییرشکل‌های کوچک پروفیل تغییرشکل پلاستیک همانند حالت سه‌بعدی می‌باشد. جهت بررسی بیشتر اثر سرعت بر دقت شبیه‌سازی از مدل سه‌بعدی نورد حلقه فولاد AISI-1045 استفاده گردید و با حالت کرنش صفحه‌ای تعمیم یافته مقایسه گردید. خصوصیات حلقه شبهه‌سازی بر طبق مرجع [22] می‌باشد. در این مدل سرعت مندرل 0/7 (mm/s) است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در شکل 5 نشان داده شده است. با توجه به شکل مشخص است که در این حالت مدل کرنش صفحه‌ای تعمیم یافته از دقت خوبی برخوردار است و متوسط خطا در حدود 10% است. در این حالت کمترین و بیشترین خطا به ترتیب برابر 5 و 13 درصد نسبت به شبیه‌سازی سه بعدی می‌باشد. با شبیه‌سازی حلقه با فرض کرنش صفحه‌ای متوسط خطا در حدود 21% و کمترین و بیشترین خطا به ترتیب برابر 1 و 35 درصد نسبت به شبیه‌سازی سه بعدی حاصل گردید.

با دقت بیشتر بر روی شکل 5 مشخص می‌شود با کاهش سرعت مندرل دقت فرض‌های دو بعدی به مراتب بیشتر شده است ولی در حالت کرنش صفحه‌ای هنوز تفاوت زیادی با مدل سه بعدی مشاهده می‌شود با توجه به اینکه در این مدل حلقه تغییرشکل تقریباً قابل ملاحظه‌ای داشته مدل کرنش صفحه‌ای به دلیل نداشتن مؤلفه کرنش محوری در کرنش پلاستیک

همکارانش [14] کرنش پلاستیک کمتری را در سطح خارجی نسبت به سطح داخلی مشاهده نمودند.

این تفاوت را می‌توان با ضریب انتشار میزان تغذیه ( $\gamma$ ) در طول فرایند توجیه نمود که به وسیله هو<sup>19</sup> و همکارانش [26] توسط رابطه (1) ارائه شده است.

$$\gamma = \frac{\Delta h_1}{\Delta h_2} = \frac{(1/R_1) + (1/R_i)}{(1/R_2) - (1/r_i)} \quad (1)$$

که در آن  $\Delta h_1$  و  $\Delta h_2$  میزان تغذیه از سطح خارجی و داخلی (m)،  $R_1$  و  $R_2$  شعاع غلتک اصلی و مندرل،  $r_i$  و شعاع خارجی و داخلی حلقه (m) در طی زمان می‌باشند. مقدار خاصی برای ضریب انتشار وجود دارد که در مقادیر بزرگ‌تر از آن بیشترین کرنش پلاستیک معادل در سطح خارجی حلقه و در مقادیر کوچک‌تر از آن در سطح داخلی حلقه اتفاق می‌افتد. جهت بررسی مدل با فرض کرنش صفحه‌ای به مقایسه این ضریب در مدل‌ها پرداخته شد.

مقدار متوسط این ضریب برای حلقه 1 در حدود 2/21 و برای حلقه 3 در همان پژوهش در حدود 0/66 است. با بررسی و پیش‌بینی رفتار کرنش پلاستیک در حلقه 3 مشخص می‌شود فرض کرنش-صفحه‌ای رفتار مشابه‌ای نسبت به حالت سه‌بعدی ارائه می‌دهد. با شبیه‌سازی‌های حلقه‌های مختلف مشخص شد در صورتی که این ضریب کمتر از 1 و تغییرات آن در طی فرایند کم باشد (تغییرشکل کوچک)، شبیه‌سازی حلقه با فرض کرنش صفحه‌ای دقیق‌تر است.

با توجه به شکل‌های 4 و 5 مشخص می‌گردد که هر چه سرعت مندرل کم‌تر باشد میزان کرنش پلاستیک معادل با فرض کرنش صفحه‌ای تعمیم‌یافته به حالت سه‌بعدی نزدیک‌تر می‌شود. اما دقت حل در فرض کرنش صفحه‌ای علاوه بر کاهش سرعت مندرل به مقدار ضریب انتشار و تغییرات آن در طی فرایند بستگی دارد. با بررسی این شرایط و ارضای آن‌ها در تغییرشکل حلقه، فرض کرنش صفحه‌ای شباهت بیشتری به حالت سه‌بعدی دارد لذا می‌توان ضریب انتشار میزان تغذیه و سرعت مندرل را پارامترهای کلیدی در دقت فرض کرنش صفحه‌ای عنوان نمود.

#### بررسی کرنش پلاستیک و دما در حالت کرنش صفحه‌ای:

تخمین دمای سطحی حلقه و غلتک‌ها در فرایند نورد داغ از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با داشتن این مقادیر میزان

خنک‌کاری، عمر مفید و جنس مورد نیاز غلتک‌ها قابل پیش‌بینی است.

فرضیات دوبعدی در مکان‌هایی که تغییرشکل‌های کوچک رخ می‌دهد به حالت سه‌بعدی نزدیک می‌شوند از سوی دیگر در سرعت‌های کم مندرل دقت نتایج کرنش صفحه‌ای تعمیم یافته با تحلیل‌های سه‌بعدی خطای کمی ارائه می‌دهد. جهت بررسی تأثیر پارامترهای ذکر شده از مدلی استفاده گردید که در محدوده قابل قبول برای فرض کرنش صفحه‌ای باشد لذا از یک نمونه حل شده نورد حلقه آلیاژ IN-718 استفاده گردید که شرایط شبیه‌سازی مطابق با مرجع [14] می‌باشد. با محاسبه و میانگین‌گیری بین حالات اولیه و نهایی حلقه مقدار ضریب انتشار در حدود 0/55 حاصل می‌شود و تغییرات آن در طی فرایند نیز کم می‌باشد همان‌طور که قبلاً مشاهده گردید فرض کرنش صفحه‌ای می‌بایست از دقت کافی برخوردار باشد.

در مسئله مذکور میزان کرنش پلاستیک معادل در حلقه با فرضیات دوبعدی بررسی گردید. نتایج در شکل 6 نشان داده شده است. با توجه به شکل مشخص می‌شود دقت تحلیل با فرض کرنش صفحه‌ای به میزان قابل قبولی بهبود می‌یابد. در این مدل به دلیل سرعت کم مندرل (0/6 mm/s) و تغییرشکل‌های کوچک در حلقه مدل‌های دو بعدی نتایج تقریباً یکسانی در کرنش پلاستیک معادل ارائه می‌دهند همچنین مشخص می‌شود با افزایش تغییرشکل در حلقه دقت فرض کرنش صفحه‌ای کاهش می‌یابد. متوسط خطا در ثانیه 5-ام در حدود 5% و در ثانیه 20ام در حدود 15% است.

همان‌طور که قبلاً اشاره شد از مدل کرنش صفحه‌ای تعمیم یافته جهت بررسی دما و آنالیزهای حرارتی در اباکوس استاندارد نمی‌توان استفاده نمود لذا جهت بررسی دما تنها از مدل کرنش صفحه‌ای استفاده گردید.

پروفیل دمای تجربی و تحلیل سه‌بعدی در نقاط ارائه شده با مدل دوبعدی مقایسه گردید که در شکل 7 نشان داده شده است. با مقایسه بین دو شیوه حل، مشخص می‌شود مدل دوبعدی به طور کلی مقدار دما را بیشتر پیش‌بینی می‌کند که دلیل آن ناشی از فرض کرنش صفحه‌ای و عدم خنک‌کاری در سطوح آزاد می‌باشد. با توجه به شکل 6 افت دما در نقطه 3 نسبت به نقطه 1 کمتر است که دلیل آن دمای بالاتر مندرل و همچنین افزایش بیشتر دما در سطح آن به دلیل افزایش سطح تماس در طی فرایند و توانایی کمتر در جذب انرژی حرارتی

انرژی مکانیکی ناشی از تغییرشکل بر واحد حجم، برابر سطح زیر نمودار تنش کرنش می‌باشد که طبق رابطه (2) می‌باشد:

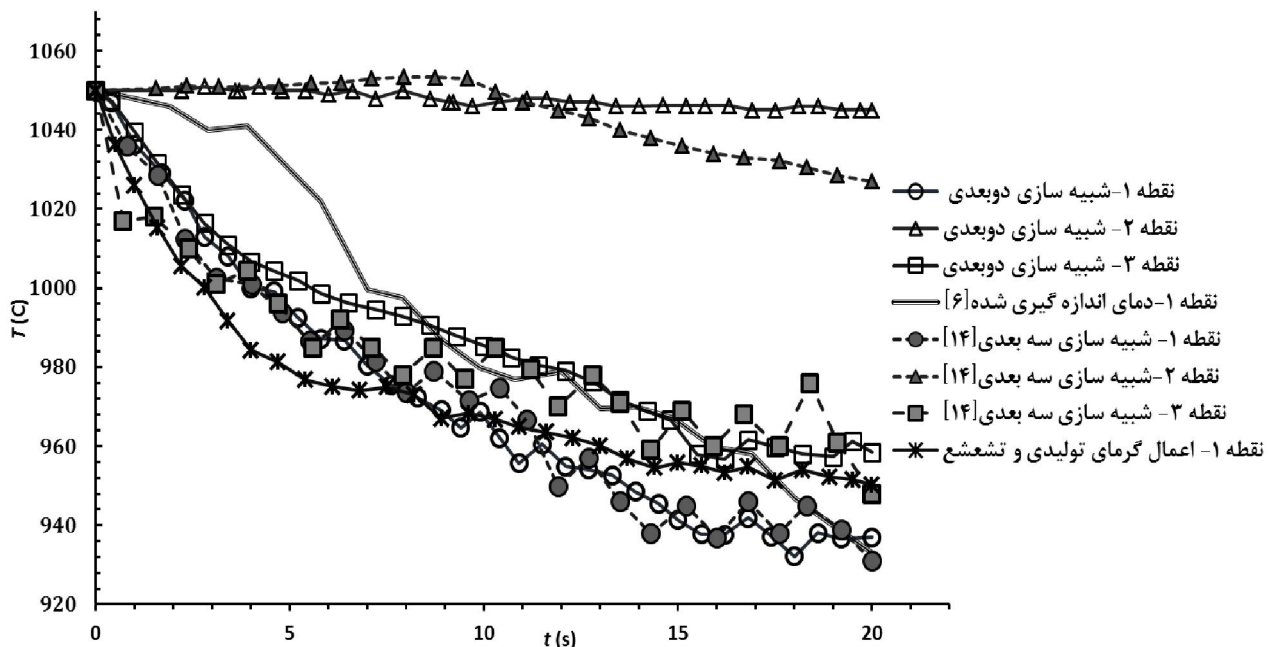
که  $\bar{\sigma}$  تنش موثر (MPa)،  $\bar{\epsilon}$  کرنش موثر می‌باشد. تنها مقدار کمی از این انرژی در داخل جسم ذخیره می‌شود (اصولاً ناشی از نابجایی‌ها و حفرها) این انرژی در حدود 1 الی 5 درصد می‌باشد. بقیه این انرژی به صورت حرارت آزاد می‌شود. جهت سهولت در امر محاسبه نرخ گرما تغییرشکل راحت‌تر است تا از رابطه (3) استفاده شود [27].

$$w = \int_0^{\bar{\epsilon}} \bar{\sigma} d\bar{\epsilon} \quad (2)$$

$$\dot{q} = \alpha \bar{\sigma} \cdot \bar{\dot{\epsilon}} \quad (3)$$

که در آن  $\bar{\sigma}$  تنش موثر (MPa)،  $\bar{\dot{\epsilon}}$  نرخ کرنش موثر ( $s^{-1}$ ) و  $\alpha$  ضریب تبدیل می‌باشد. در آباکوس نیز از این رابطه جهت محاسبه گرمای تولید شده ناشی از تغییرشکل استفاده می‌گردد. از سوی دیگر فرض می‌گردد گرمای ایجاد شده توسط اصطکاک نیز به صورت مساوی بین حلقه و غلتک تقسیم می‌شود [18].

با توجه به شکل 7 مقدار دمای نقطه 1 در ابتدا به دلیل

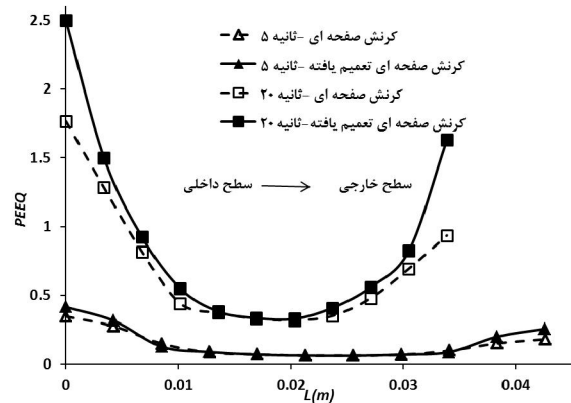


شکل 7- مقایسه دمای فرض کرنش صفحه‌ای با مدل سه بعدی و تجربی

(نقاط 1 و 2 و 3 به ترتیب نقاطی بر روی سطح خارجی، میانی و داخلی)

ناشی از ابعاد کوچک‌تر نسبت به غلتک اصلی می‌باشد بنابراین در مراحل ابتدایی افت دما بیشتر و با پیشرفت فرایند و افزایش دمای مندرل این افت دما کاهش می‌یابد که با فیزیک مسئله سازگار است.

جهت بررسی دقیق‌تر نورد حلقه داغ به صورت دوبعدی تأثیر تشعشع و گرمای تولید شده ناشی از اصطکاک و تغییرشکل بر روی مدل پیشین بررسی گردید. دما فلز به علت کار مکانیکی انجام شده بر روی آن افزایش می‌یابد که به صورت منبع حرارتی در معادله انتقال حرارت ظاهر می‌شود.

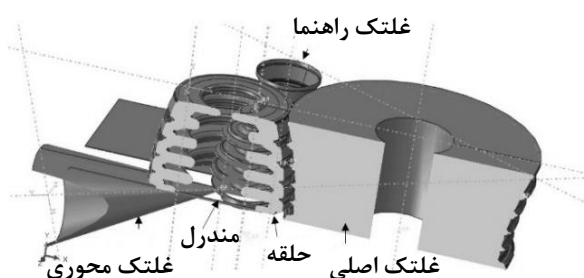


شکل 6- مقایسه میزان کرنش پلاستیک فرضیات دوبعدی در زمان‌های 5 و 20 ثانیه



یکسان در نظر گرفته شد. بقیه شرایط در جدول 2 نشان داده شده است.

شبیه‌سازی کوپل ترمومکانیکی سه‌بعدی نورد حلقه طرح-دار، جهت تخمین نیرو و گشتاور مورد نیاز و روند شکل‌گیری حلقه با توجه به شکل 8 با یک شبکه‌بندی متوسط توسط نرم-افزار با استفاده از پردازش موازی توسط سه گره (هر گره شامل چهار هسته AMD Optron 2.4GHz و RAM 8GB) در حدود 1 ماه به طول می‌انجامد و در صورتی که کیفیت و تعداد المان‌ها را در نقاط تیز غلتک‌ها افزایش دهیم این حل با توجه به برآوردهای اولیه نرم‌افزار به چندین ماه زمان احتیاج خواهد



شکل 8- مدل سه‌بعدی برش خورده اسپول موتور در دستگاه نورد حلقه

جدول 2- ابعاد و مشخصات مدل دوبعدی نورد حلقه داغ آلیاژ

Ti6Al4V	
مقدار	پارامتر شکل‌دهی
200	شعاع غلتک اصلی (mm)
60	شعاع مندرل (mm)
120	شعاع خارجی حلقه اولیه (mm)
80	شعاع داخلی حلقه اولیه (mm)
200	ارتفاع حلقه و غلتک‌ها (mm)
6/28	سرعت دورانی غلتک اصلی ( $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ )
0/33	سرعت مندرل ( $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ )
0/5	ضریب اصطکاک
Ti6Al4V	جنس حلقه
H13	جنس غلتک اصلی و مندرل
1050	دمای اولیه حلقه ( $^{\circ}\text{C}$ )
500	دمای اولیه غلتک اصلی و مندرل ( $^{\circ}\text{C}$ )
30	دمای محیط ( $^{\circ}\text{C}$ )
50	ضریب انتقال حرارت همرفتی ( $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{C}^{-1})$ )
10000	ضریب رسانش تماسی ( $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{C})$ )

داشت. لذا با توجه به پیچیدگی مدل و نیاز به شبکه‌بندی خیلی کوچک جهت تحلیل دقیق اسپول شرایط استفاده از

تشعشع افت بیشتری داشته ولی به مرور افزایش می‌یابد که به علت انتقال حرارت ناشی از تغییرشکل از المان‌های داخلی به سطح حلقه می‌باشد. به دلیل دو بعدی بودن مسئله و عدم انتقال حرارت به محیط بیرونی (با تشعشع و همرفت) در المان-های داخلی بیشترین دمای آن‌ها تا 1126 درجه سانتی‌گراد نیز افزایش می‌یابد. در ضمن در انتهای فرایند دما از مقدار اندازه-گیری شده بیشتر پیش‌بینی می‌شود که می‌توان این تفاوت را اول ناشی از انتقال حرارت از المان‌های داخلی با دمای پیش‌بینی شده بالاتر به المان‌های سطحی و دوم به علت خطا در محاسبات عددی ناشی از فرضیات آلیاژ مورد نظر و غلتک‌ها و همچنین اندازه‌گیری دما با وجود لایه اکسید در سطح خارجی حلقه دانست.

از سوی دیگر عدم اعمال گرمای ناشی از تغییرشکل و اصطکاک در این مسئله دوبعدی دقت حل را به حالت سه‌بعدی نزدیک‌تر می‌کند که نشان می‌دهد خطاهای ناشی از تحلیل دوبعدی با خطای ناشی از در نظر نگرفتن این فرضیات در حل تقریباً در تعادل است.

با استفاده از کامپیوتر شخصی با مشخصات کلی زیر

(Intel Core i5, CPU 2.5GHz, RAM 6GB)

تحلیل در حدود 2 ساعت زمان احتیاج دارد که نسبت به

تحلیل‌های سه بعدی فوق‌العاده کوتاه است و از سوی دیگر دقت قابل قبول در پیش‌بینی دمای سطح درگیر حلقه با غلتک‌ها (بیشترین خطا در حدود 3 درصد) استفاده از فرض کرنش صفحه‌ای در محدوده مجاز جهت پیش‌بینی دمای سطحی حلقه از لحاظ هزینه محاسباتی در کاربردهای عملی قابل قبول است.

### آماده‌سازی مدل در نرم‌افزار آباکوس

جهت شبیه‌سازی نورد حلقه داغ آلیاژ مورد نظر لازم است تا فرایند به صورت سه‌بعدی و کوپل ترمومکانیکی در نظر گرفته شود ولی در چنین حالتی بررسی فرایند و مقایسه شرایط مختلف و تأثیرگذار بر روی شکل‌دهی آلیاژ Ti6Al4V به دلیل زمان حل طولانی از لحاظ هزینه محاسباتی اقتصادی نیست. مدل اولیه دوبعدی با استفاده از مدل سه‌بعدی اسپول موتور که در شکل 8 نشان داده شده است، آماده گردید. شعاع داخلی و خارجی حلقه دو بعدی از شعاع متوسط حلقه طرح‌دار سه‌بعدی استخراج گردید و ارتفاع حلقه نیز با ارتفاع اسپول

شکل دهی حلقه استفاده گردید.

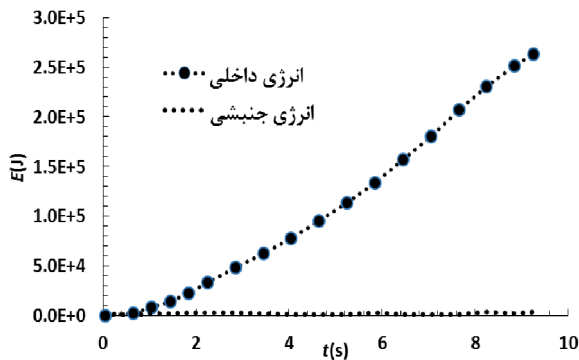
### بررسی پارامترهای مختلف بر روی شکل دهی حلقه کاهش زمان شبیه سازی نورد حلقه:

میزان گام زمانی پایدار در نرم افزار آباکوس به وسیله تخمین آن بر روی تک تک المان ها و سپس انتخاب کوچک ترین گام زمانی تعیین می گردد به همین دلیل در صورتی که در مدل از المان های بسیار کوچک استفاده شده باشد یا به هر دلیلی قسمتی از مدل به دلیل تغییر شکل های پیچیده، طول مشخصه کوچکی را به اپراتور صریح تحمیل کند، مقدار گام زمانی بسیار کوچک می گردد و در نتیجه تعداد گام زمانی مورد نیاز برای کل زمان شبیه سازی و به دنبال آن زمان صرف شده برای شبیه سازی بسیار طولانی می شود.

در آباکوس با افزایش مصنوعی چگالی المان گام زمانی پایدار افزایش می یابد [21]. آباکوس صریح با استفاده از همین اصل، روشی را برای کاهش زمان شبیه سازی ارائه می دهد که به مقیاس دهی به جرم معروف است.

با توجه به ماهیت پیچیده و گذرای فرایند نورد حلقه معمولاً شبیه سازی این نوع شکل دهی مدت زمان زیادی را در بر خواهد گرفت لذا لازم است تا با مقیاس دهی به جرم مقدار گام های زمانی پایدار را افزایش داده تا زمان شبیه سازی کاهش یابد، لذا با مقادیر مختلف مقیاس دهی جرم (10-25-35-50-100) شبیه سازی انجام گرفت و نتایج بررسی شد تا بهترین مقدار حاصل شود. در این مرحله غلتک ها به صورت صلب در نظر گرفته شد تا سرعت حل بیشتر شود.

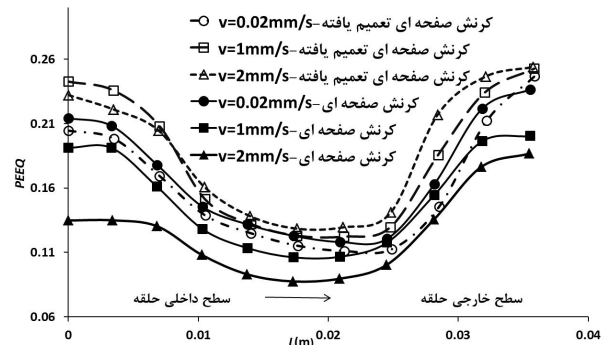
در ابتدا با مقیاس 150 شبیه سازی اجرا گردید و مقدار انرژی داخلی و جنبشی در شکل 10 نشان داده شده است. با



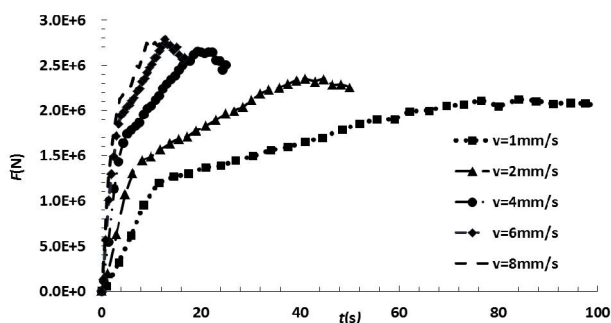
شکل 10- مقایسه انرژی داخلی و جنبشی مدل

فرض کرنش صفحه ای و کرنش صفحه ای تعمیم یافته در این مسئله خاص مورد توجه قرار گرفت. در این مدل مقدار متوسط ضریب انتشار در حدود 0/57 می باشد.

همان طور که قبلاً عنوان گردید در سرعت های پایین مندرل نتایج تحلیل کرنش صفحه ای تعمیم یافته به حالت سه بعدی نزدیک می شود از این رو میزان کرنش پلاستیک در دو حالت کرنش صفحه ای و کرنش صفحه ای تعمیم یافته با یکدیگر مقایسه گردید و نتایج در شکل 9 نشان داده شده است. با توجه به این شکل طبق نتایج قبل مشخص می شود با کاهش سرعت مندرل نتایج حاصل از دو تحلیل به یکدیگر نزدیک می شوند. در سرعت های خیلی پایین کرنش صفحه ای مقدار کرنش پلاستیک بیشتری را پیش بینی می کند که می توان دلیل آن را این گونه توجیه نمود که در فرض کرنش صفحه ای به دلیل محصور بودن ماده در راستای محوری تغییر شکل های کوچک باعث می شود ماده وارد محدوده پلاستیک شود ولی در حالت تعمیم یافته با حرکت مندرل کرنش الاستیک در راستای محوری صفر نبوده و به دلیل تغییر شکل های کوچک، ماده دیرتر وارد محدوده پلاستیک می شود بنابراین به همین دلیل در تغییر شکل های کوچک فرض کرنش صفحه ای مقدار کرنش پلاستیک معادل بیشتری را پیش بینی می کند. در ضمن با توجه به شکل با افزایش سرعت مندرل تفاوت حالت کرنش صفحه ای با حالت تعمیم یافته زیادتر می شود. با توجه به سرعت مندرل و وضعیت شکل دهی نهایی حلقه تفاوت فرضیات دو بعدی ناچیز و از سوی دیگر به حالت سه بعدی نزدیک می شود. بنابراین به دلیل امکان استفاده از حل کوپل ترمومکانیکی در حالت کرنش صفحه ای و زمان کوتاه تحلیل نسبت به حالت تعمیم یافته از این فرض جهت بررسی شرایط مختلف بر روی



شکل 9- مقایسه کرنش صفحه ای و کرنش صفحه ای تعمیم یافته



شکل 12- مقایسه نیروی اعمالی به مندرل در سرعت‌های مختلف مندرل

مواد حساس به نرخ کرنش کاربرد چندانی ندارد ولی در کاربرد-های عملی نورد داغ حلقه جهت کاهش زمان فرایند به دلیل جلوگیری از اتلاف حرارت در صورت افزایش سرعت مندرل می‌توان شکل‌دهی را در زمان کوتاه‌تری انجام داد ولی خصوصیات نهایی حلقه و مقدار نیرو و گشتاور جهت شکل‌دهی تحت تأثیر آن قرار می‌گیرد که باید مورد توجه قرار گیرد. کاهش زمان حل با افزایش سرعت مندرل و مقدار نیروی وارده به مندرل بدون اتلاف حرارت در حلقه شماره 1 مرجع [10] در شکل 12 نشان داده شده است. فرض رفتار کاملاً پلاستیک:

به دلیل نورد داغ حلقه و رفتار آلیاژ تیتانیوم در دمای مد نظر جهت شکل‌دهی در نظر نگرفتن پدیده کارسختی دور از واقعیت نیست [28 و 29]. لذا جهت حلقه مدل ارتجاعی-خمیری کامل<sup>20</sup> در نظر گرفته شد.

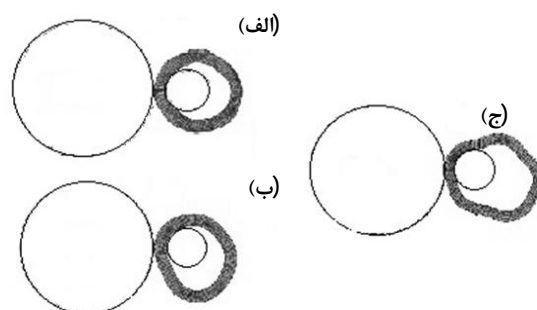
با انجام شبیه‌سازی مشخص گردید چنین فرضی در شبیه‌سازی حلقه باعث بروز تغییر شکل‌های ناخواسته در حلقه می‌گردد، در حالی که چنین رفتاری در دیگر پدیده‌های شکل-دهی در صورت رعایت توازن انرژی اتفاق نمی‌افتد لذا این فرض در نورد حلقه جوابگوی حل مسائل نیست (شکل 13).

آلیاژهای تیتانیوم معمولاً به نرخ کرنش و دما حساس هستند، کارسختی و استحکام تسلیم این آلیاژ با افزایش دما کاهش و با افزایش نرخ کرنش افزایش می‌یابد. جهت نورد داغ آلیاژ مورد نظر لازم است تا رفتار ماده اصلاح گردد. از آنجایی که رفتار نمونه تست آلیاژ Ti6Al4V به محل نمونه‌برداری ماده از ورق نورد شده بستگی دارد، رفتار و خصوصیات مختلفی در منابع ارائه شده است و جهت دستیابی به بهترین برآورد از منابع مختلفی استفاده گردید. با توجه به منابع [28-31] مقدار استحکام تسلیم وابسته به دما و نرخ کرنش در

توجه به این نمودار مشخص گردید که مقدار انرژی جنبشی تقریباً 1 درصد انرژی داخلی است و حالت شبه استاتیک در مسئله صادق است. آباکوس در چنین شرایطی حل به روش شبه استاتیک را با دقت بالایی جهت اکثر فرایندهای شکل‌دهی ارائه می‌کند [21].

نکته قابل توجه در این شبیه‌سازی عدم شکل‌دهی درست حلقه با این مقیاس‌دهی است. علی‌رغم نسبت درست انرژی جنبشی و داخلی نسبت به هم با انجام شبیه‌سازی بعد از سپری شدن چند ثانیه از شبیه‌سازی شکل حلقه تغییر کرده و در نهایت به دلیل جمع شدن خطاها حل متوقف می‌گردد (شکل 11). بنابراین کنترل شکل نهایی علاوه بر مقایسه انرژی‌ها جهت صحت مقیاس‌دهی جرم در فرایند نورد حلقه لازم است.

با مقیاس‌های 100، 50، 35، 25 و 10 دوباره شبیه‌سازی انجام داده شد. بهترین مقیاس با در نظر گرفتن مقیاس انرژی-ها و شکل نهایی حلقه مقدار 25 (در 20 ثانیه فرایند شکل-دهی) و مقدار 10 (در 30 ثانیه فرایند شکل‌دهی) می‌باشد. با توجه به این مقادیر جهت مقیاس جرم مشخص می‌شود که مقدار دقیق مقیاس جرم در نورد حلقه می‌بایست با توجه به



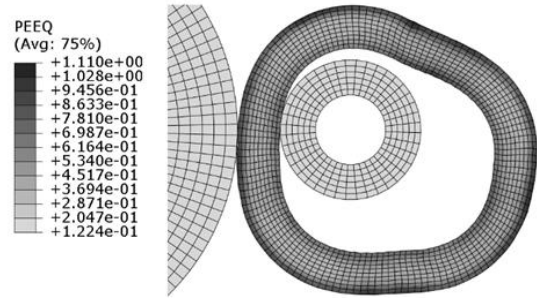
شکل 11- شکل حلقه در طی فرایند با مقیاس جرم 150 الف: 6/2 ثانیه ب: 9/3 ثانیه ج: 11 ثانیه

زمان شبیه‌سازی، مقیاس انرژی‌ها و شکل نهایی حلقه تعیین شود. با یک آنالیز ساده و رصد کردن نقطه مرجع حلقه که در مرکز آن واقع شده است می‌توان از شروع اغتشاشات در حلقه آگاهی یافته و درستی مقدار مقیاس‌دهی جرم را تا زمان نهایی شبیه‌سازی بررسی نمود.

آلیاژ Ti6Al4V دارای رفتار وابسته به نرخ کرنش می‌باشد و از روش مقیاس‌دهی نرخ بارگذاری نمی‌توان استفاده کرد، زیرا کم کردن زمان وقوع فرایند باعث تغییر نرخ کرنش‌ها و در نتیجه تغییر رفتار ماده می‌گردد. افزایش سرعت حل در

با کاهش دما حلقه تا 500 درجه سانتی‌گراد و به دنبال آن افزایش کارسختی آلیاژ، طبق شکل 15 شکل‌گیری حلقه به مراتب بهتر بوده و به دایره مورد نظر نزدیک‌تر است اما مقدار نیرو جهت نورد تقریباً چهار برابر نسبت به حالت قبل افزایش می‌یابد.

با مقایسه تفاوت کرنش پلاستیک معادل هر المان نسبت به مقدار متوسط کرنش پلاستیک در کل مدل در دماهای 500 و 1050 درجه سانتی‌گراد مشخص شد با افزایش دما این مقدار کاهش می‌یابد که دلیلی بر یکنواختی کرنش پلاستیک در حلقه می‌باشد از این رو لازم است تا شکل‌دهی آلیاژ در دمای

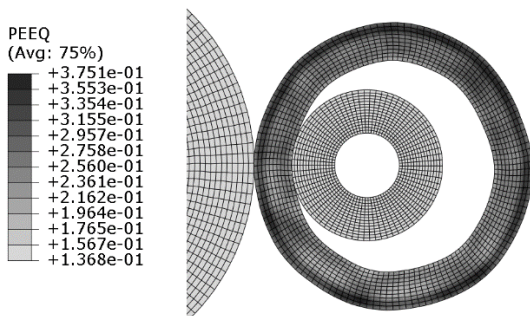


شکل 13- شکل حلقه با فرض رفتار کاملاً پلاستیک آلیاژ Ti6Al4V در ثانیه 10

مقادیر مختلف کرنش پلاستیک محاسبه شد که در جدول 3

جدول 3- استحکام تسلیم وابسته به دما و نرخ کرنش آلیاژ Ti6Al4V

دما (C°)	نرخ کرنش (s <sup>-1</sup> )	کرنش پلاستیک	استحکام تسلیم (MPa)	دما (C°)	نرخ کرنش (s <sup>-1</sup> )	کرنش پلاستیک	استحکام تسلیم (MPa)	دما (C°)	نرخ کرنش (s <sup>-1</sup> )	کرنش پلاستیک	استحکام تسلیم (MPa)
850	0	0	102	900	0.204	0.5	271	1000	0.005	0	35.4
850	0	0.5	277	900	0.995	0	141	1000	0.005	0.5	135
850	0.001	0	114	900	0.995	0.5	291	1000	0.204	0	49.11
850	0.001	0.5	289	950	0	0	26.5	1000	0.204	0.5	149
850	0.005	0	137	950	0	0.5	152	1000	0.995	0	55.1
850	0.005	0.5	312	950	0.001	0	49.1	1000	0.995	0.5	155
850	0.204	0	168	950	0.001	0.5	174	1050	0	0	15
850	0.204	0.5	343	950	0.005	0	66.1	1050	0	0.5	56
850	0.995	0	194	950	0.005	0.5	191	1050	0.001	0	24.3
850	0.995	0.5	369	950	0.204	0	75.1	1050	0.001	0.5	74.3
900	0	0	55.2	950	0.204	0.5	200	1050	0.005	0	29.2
900	0	0.5	205	950	0.995	0	85.8	1050	0.005	0.5	79.2
900	0.001	0	84.2	950	0.995	0.5	211	1050	0.204	0	42.9
900	0.001	0.5	234	1000	0	0	16.6	1050	0.204	0.5	92.2
900	0.005	0	94.5	1000	0	0.5	117	1050	0.995	0	49.1
900	0.005	0.5	244	1000	0.001	0	31.2	1050	0.995	0.5	99.1
900	0.204	0	121	1000	0.001	0.5	131				



شکل 14- شکل‌دهی حلقه با اعمال کارسختی آلیاژ در دمای 1050°C

نشان داده شده است. ضرایب انتقال حرارت رسانایی و انبساط حرارتی و همچنین مدول یانگ نیز تابع دما طبق مراجع ذکر شده در نرم‌افزار استفاده گردید.

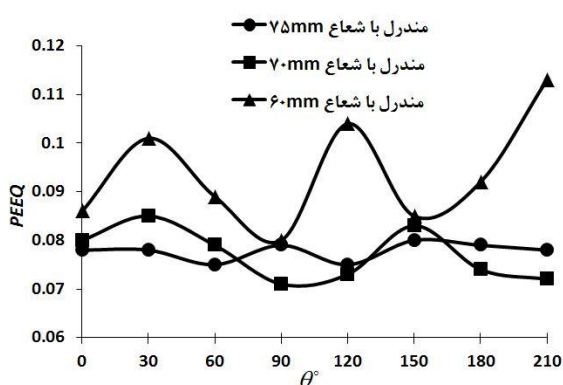
با انجام این اصلاحات و انجام شبیه‌سازی در دمای مورد نظر و فرض کارسختی ایزوتروپیک آلیاژ، حلقه نسبت به شرایط قبل بهتر شکل می‌گیرد ولی به دلیل کارسختی کم در دمای 1050 درجه سانتی‌گراد جریان فلز از انحنای مورد نظر تبعیت نکرده و کرنش‌های پلاستیک معادل متفاوتی در یک شعاع معین از حلقه به وجود می‌آید (شکل 14).

قطر مندرل شکل‌دهی بهتر صورت می‌گیرد. مقدار کرنش پلاستیک معادل در ثانیه 10ام شکل‌دهی در شعاعی مابین شعاع داخلی و خارجی حلقه در شکل 16 نشان داده شده است. جهت مقایسه تأثیر قطر غلتک اصلی بر روی شکل‌دهی حلقه نهایی مشخص شد که با افزایش قطر غلتک شرایط به دلیل سرعت بیشتر در ناحیه تماس بدتر شده و قطعه سریع‌تر دچار اعوجاج می‌گردد. با کاهش قطر غلتک نسبت به حالت مرجع نیز بهبودی در شکل‌دهی مشاهده نگردید.

در مجموع هر چه اندازه مندرل و حلقه نزدیک‌تر باشند حلقه نهایی یکنواخت‌تر شکل می‌گیرد. این پیشنهاد در ساخت حلقه‌های کوچک با طرح پیچیده منطقی است تا با کم‌ترین غلتک درگیر در نورد، حلقه نهایی شکل داده شود اما استفاده از چنین دستگاهی هزینه‌بر بوده و برای تولید هر حلقه نیاز به غلتکی با ابعادی نزدیک به آن می‌باشد لذا کاربرد عملی چنین دستگاه از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نیست و منطقی به نظر می‌رسد که از غلتک‌های راهنما و سیستم کنترلی دقیقی برای کنترل آن‌ها در طی فرایند بهره برده شود.

#### غلتک راهنما و تعیین مکان آن در هر لحظه:

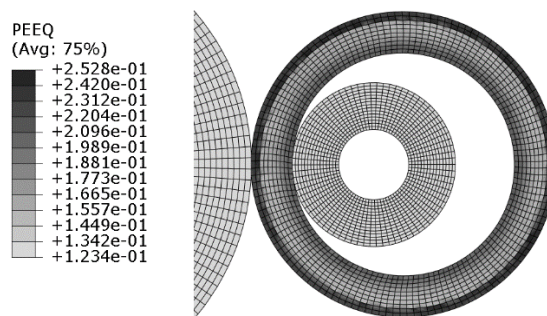
با استفاده از غلتک‌های راهنما می‌توان محدوده وسیعی از حلقه‌ها را توسط یک دستگاه تولید نمود. استفاده از غلتک راهنما معایبی نیز دارد که یکی از مهم‌ترین آن‌ها لزوم طراحی خاص علاوه بر طراحی غلتک اصلی و مندرل برای شکل‌دهی حلقه‌های طرح‌دار می‌باشد که این موضوع هزینه ساخت غلتک-



شکل 16- کرنش پلاستیک معادل در یک شعاع معین در زوایای مختلف

ها را افزایش می‌دهد. از سوی دیگر مشکلات مربوط به خنک کاری و تأثیر بر ریز ساختار حلقه ناشی از تماس با آن و سیستم کنترلی دقیق جهت جابجایی غلتک راهنما از چالش-

بالا صورت ببذیرد و شکل‌گیری نامناسب حلقه با تمهیداتی بر طرف گردد.



شکل 15- شکل‌دهی حلقه با کارسختی در دمای 500 C°

#### تأثیر قطر غلتک بر روی فرایند شکل‌دهی:

با توجه به دمای شکل‌دهی مورد نظر جهت شبیه‌سازی دقیق و مناسب فرایند لازم است تأثیر ابعاد غلتک‌ها بر شبیه‌سازی بررسی گردد. با دقت بیشتر به شکل 14 مشخص می‌گردد که در یک شعاع معین تغییر شکل حلقه به صورت یکسان نبوده و کرنش پلاستیک معادل در بعضی نواحی حلقه کم و در بعضی نواحی دیگر زیاد می‌باشد. علت این امر را می‌توان در ماهیت نامتقارن نورد حلقه جستجو نمود. بر طبق فرضیه نورد حلقه، ماده خام تمایل دارد تا به سمت مندرل که هرزگرد است و قطر کوچک‌تری نسبت به غلتک اصلی دارد انحناء یابد و تغییر شکل بیشتری بدهد ولی به دلیل پیوسته بودن حلقه این امر لحظه‌ای بوده و دوباره حلقه مجبور است به مسیر اصلی خود برگردد. با برگشتن حلقه به جایگاه صحیح خود دوباره حلقه تمایل به انحناء به سمت مندرل را خواهد داشت. این روند تکرار می‌شود و با بزرگ‌تر شدن حلقه و سپری شدن زمان در طی فرایند شکل‌دهی، این شرایط بیشتر خودنمایی می‌کند، از این رو جهت شکل‌دهی صحیح حلقه و تغییر شکل یکسان لازم است تا از غلتک‌های راهنما استفاده شود تا از جابجایی ناخواسته حلقه جلوگیری کند اما درگیری حلقه داغ با تعداد غلتک‌های بیشتر، باعث پیچیده‌تر شدن مدل و افزایش زمان حل می‌گردد از این رو باید سعی نمود تا حد امکان از غلتک‌های درگیر کمتری استفاده نمود.

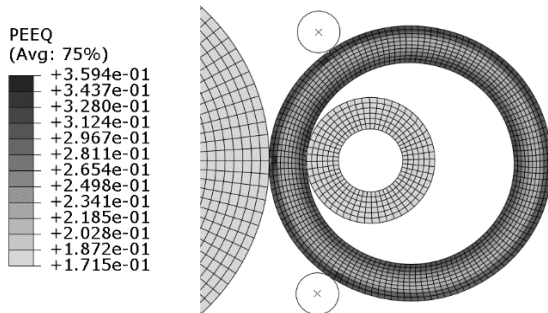
با انجام شبیه‌سازی در چند حالت مختلف مشاهده گردید با افزایش قطر غلتک مندرل، از اعوجاج‌های ناشی از جابجایی متناوب حلقه کاسته شده و در یک زمان مشخص با افزایش



- هر چه ضخامت حلقه بیشتر باشد به دلیل نفوذ کمتر تغییرشکل پلاستیک در هر گام این ضریب کوچکتر می-شود.
- با زیادتر شدن سرعت غلتک اصلی این ضریب کوچکتر می-شود.
- با افزایش میزان تغذیه مندرل این ضریب افزایش می-یابد.
- این ضریب در حین تغییرشکل حلقه نسبت به زمان ثابت نیست.

با استفاده از رابطه 10 و چندین مورد شبیه‌سازی مشخص گردید این ضریب معمولاً می‌بایست کمتر از 0/5 در نظر گرفته شود. مکان غلتک‌های راهنما در مدل شبیه‌سازی گردید. در شبیه‌سازی انجام شده این مقدار در ابتدا حدود 0/2 در نظر گرفته شد تا حرکت غلتک راهنما با افزایش شعاع حلقه مناسب باشد. در ضمن مقدار ضریب تصحیح می‌بایست در طول زمان تغییر کند و مقدار ثابتی نمی‌تواند داشته باشد زیرا با افزایش شعاع حلقه مقدار سرعت دورانی آن کاهش یافته و در یک بازه زمانی مشخص میزان تغییر شعاع حلقه نسبت به ابتدای فرایند کاهش می‌یابد در صورتی که این مقدار تغییر نکند غلتک‌های راهنما بعد از مدتی از حلقه فاصله گرفته و شبیه‌سازی با مشکل مواجه می‌شود. بنابراین این مقدار به صورت تابعی از زمان در نظر گرفته شد و از 0/2 تا 0/1 با پیشرفت فرایند تغییر نمود. با استفاده از این روش حلقه در دمای 1050 درجه سانتی‌گراد به درستی شکل یافته و در مقاطع شعاعی کرنش پلاستیک برابری در حلقه ایجاد شد (شکل 17).

جهت بررسی روش فوق حلقه‌ای با نصف ضخامت شبیه‌سازی گردید. با کاهش ضخامت حلقه، صلبیت آن کاهش یافته و به هنگام شکل‌دهی به راحتی دچار اعوجاج می‌شود. در مورد حلقه چنین هندسه و دمایی امکان شبیه‌سازی درست آن بدون



شکل 17- شکل‌دهی حلقه در دمای 1050 C° با استفاده از غلتک راهنما

های پیش‌رو جهت استفاده از غلتک‌های راهنما می‌باشد و تاکنون پژوهش‌های زیادی جهت پیش‌بینی دقیق مکان این غلتک‌ها صورت گرفته است.

سیستم‌های کنترلی در عمل با استفاده از سنسورهای نیرویی در هر لحظه مکان مناسب غلتک‌های راهنما را تعیین می‌کند ولی پیاده‌سازی چنین حالتی در نرم‌افزار هزینه محاسباتی را افزایش می‌دهد لذا جهت کاهش زمان شبیه‌سازی معمولاً از روابط ساده‌سازی شده استفاده می‌گردد. در صورت شکل‌دهی دو بعدی و فرض عدم گسترش حلقه در راستای محوری و همچنین ثابت ماندن حجم می‌توان سرعت حرکت غلتک‌های راهنما و محل آن‌ها را تعیین نمود این سرعت طبق رابطه 4 به صورت زیر می‌باشد [14]:

$$v_R = \frac{1}{2} \left[ \frac{(R_0 + r_0)H_0}{(H_0 - vt)^2} - 1 \right] v \quad (4)$$

که  $R_0$ ،  $r_0$  و  $H_0$  به ترتیب شعاع خارجی، داخلی و ضخامت حلقه اولیه (mm)،  $v$  و  $v_R$  سرعت مندرل و غلتک راهنما (mm/s) می‌باشند. با دانستن محل قرارگیری غلتک‌های راهنما (مقدار مناسب زاویه 60° نسبت به محور عبوری از مرکز غلتک‌ها-x و عمود بر آن-y در مرکز حلقه [32]) می‌توان حرکت غلتک راهنما را طبق رابطه 5 در جهات دلخواه تجزیه نمود.

$$v_{gx} = kv_R \cos \theta \quad (5)$$

$$v_{gy} = kv_R \sin \theta$$

$v_{gx}$ ،  $v_{gy}$  سرعت غلتک راهنما در جهت X و Y می‌باشد.

مقدار مناسب ضریب تصحیح (k) به روش صحیح و خطا بین 0 و 1 در نظر گرفته می‌شود.

رابطه ارائه شده در ضخامت و شبیه‌سازی مورد نظر مقدار دقیقی را پیش‌بینی نمی‌کند. علت خطا را می‌توان بدین صورت عنوان نمود که در این رابطه افزایش شعاع حلقه وابسته به تغییرشکل در فاصله مابین غلتک‌ها است و با فرض ثابت بودن حجم این رابطه استخراج شده است و این در حالی است که به اندازه تغییرشکل در ناحیه بین غلتک‌ها شعاع افزایش نمی‌یابد و شعاع متوسط حلقه از مقدار محاسبه شده کمتر است.

با انجام شبیه‌سازی‌های مختلف و بررسی شرایط گوناگون یک خط مشی کلی با فرض شعاع ثابت غلتک‌ها می‌توان ارائه نمود:

جهت بررسی میزان درگیری معادلات با یکدیگر شبیه‌سازی به صورت هم‌دما انجام گردید تا تأثیر گرمای تولیدی ناشی از اصطکاک و تغییرشکل به صورت مجزا بر روی مدل ارزیابی گردد تا امکان جداسازی معادلات بررسی شود.

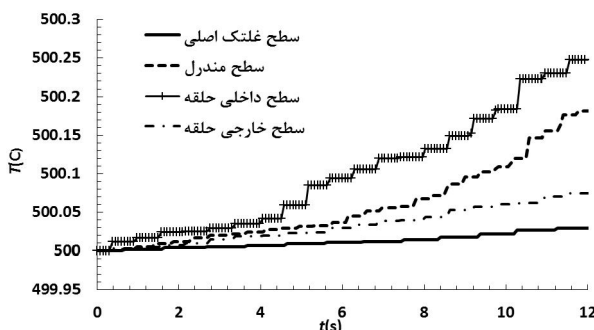
#### - تغییر دما ناشی از اصطکاک بین غلتک و حلقه

اصطکاک یکی از عوامل مهم در فرایندهای نورد می‌باشد و کار ناشی از آن به صورت گرما دفع می‌گردد لذا تأثیر و مقدار حرارت تولید شده توسط آن در مدل دوبعدی بررسی گردید. در این حالت فرض گردید نیمی از حرارت وارد حلقه و نیم دیگر آن وارد غلتک می‌شود [18].

مدل در حالت هم‌دما و بدون گرمای ناشی از تغییرشکل آماده گردید تا بتوان تأثیر آن را به تنهایی و بدون حضور هیچ‌گونه عامل دیگری بررسی کرد همچنین هیچ‌گونه خنک‌کاری در مدل صورت نگرفت. نتایج حاصل نشان می‌دهد که گرما حاصل از اصطکاک در مدل هم‌دما اندک است. نتایج برای المان‌های واقع در سطح خارجی غلتک‌ها و سطوح داخلی و خارجی حلقه در شکل 19 نشان داده شده است. با توجه به شکل مشخص می‌شود که دما در سطح مندرل نسبت به سطح غلتک اصلی بیشتر افزایش می‌یابد که به علت سطح درگیر بیشتر با حلقه است. البته افزایش دما در کلیه قطعات مدل ناشی از گرمای ایجاد شده توسط اصطکاک بسیار کم است و در نورد داغ حلقه قابل چشم‌پوشی است.

#### تغییر دما ناشی از تغییرشکل

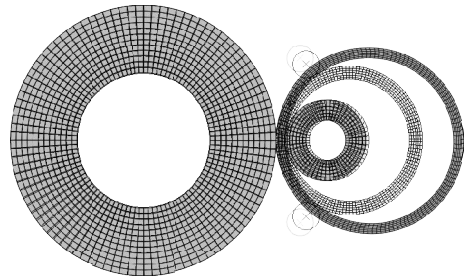
جهت بررسی تغییر دمای حلقه به علت کار مکانیکی انجام شده بر روی آن و همچنین انتقال این حرارت به غلتک‌ها از مدل دوبعدی بدون حضور گرمای ناشی از اصطکاک استفاده گردید.



شکل 19- افزایش دما در غلتک‌ها و حلقه ناشی از اصطکاک در

مدل هم‌دما (500°C)

غلتک راهنما میسر نیست. با انجام شبیه‌سازی به وضوح مشخص گردید که با استفاده از غلتک راهنما و تعیین مکان آن‌ها توسط روش ذکر شده، حلقه به درستی شکل گرفته و دچار اعوجاج نمی‌گردد (شکل 18). در ضمن با کمک غلتک‌های راهنما می‌توان مقدار مقیاس جرم را تا 100 افزایش داده بدون اینکه بر روی نتایج نهایی تأثیر گذارد.



شکل 18- شکل دهی حلقه‌ای با نصف ضخامت اولیه توسط غلتک‌های راهنما

#### آنالیز کاملاً کوپل تنش-حرارت

آنالیز کاملاً کوپل تنش حرارت وقتی اجرا می‌شود که حل‌های تنش و حرارت بر روی یکدیگر به شدت تأثیر داشته و یا درجات آزادی حرارت و جابجایی در مدل موجود باشد لذا لازم است تا حل‌ها با یکدیگر هم‌زمان بررسی شوند.

در اکثر فرایندهای شکل‌دهی به دلیل کار مکانیکی صورت گرفته بر روی قطعه کار مقداری حرارت تولید می‌شود که در معادلات انتقال حرارت به صورت منبع حرارتی ظاهر می‌شود. حل معادلات ترمومکانیکی در آباکوس صریح توسط تفاضل مرکزی و پیشرو حاصل می‌گردد لذا حل انتقال حرارت و بارهای مکانیکی به وسیله روش کوپل صریح حاصل می‌شود. از سوی دیگر انتگرال‌گیری صریح در رابطه با تماس از لحاظ محاسباتی سریع‌تر و راحت‌تر می‌باشد. در صورتی که مقدار حرارت تولید شده از کار مکانیکی ناچیز باشد می‌توان معادلات مکانیکی-حرارتی را با دقت قابل قبولی از یکدیگر جدا نمود [21]. دقت حل و الگوریتم مورد استفاده وابستگی زیادی به درگیری میدان‌های تنش و حرارت به یکدیگر دارد همچنین با توجه به شرایط نورد حلقه و تغییر شرایط مرزی در هر لحظه و پیچیدگی‌های ناشی از تحلیل سه بعدی، جهت سهولت در تحلیل لازم است تا تأثیر هر کدام از عوامل در کوپل نمودن شرایط بررسی گردد تا در صورت ناچیز بودن تأثیرشان در فرایند حل، آن‌ها به صورت مستقل بررسی گردند.

به صورت سه‌بعدی بررسی شود اما در بعضی مواقع به دلیل پیچیدگی مدل و زمان طولانی تحلیل امکان بررسی پارامترهای مختلف بر روی شبیه‌سازی هزینه‌بر می‌باشد بنابراین جهت بررسی مدل نورد حلقه اسپول موتور فرضیات دو بعدی در آن بررسی گردید و بعد از اعتبار سنجی این فرضیات شرایط شبیه‌سازی در آن بررسی شد. نتایج حاصل را به طور خلاصه می‌توان بدین صورت عنوان نمود:

1- فرضیات دو بعدی در سرعت‌های زیاد مندرل دقت چندانی ندارند و با کاهش سرعت مندرل دقت نتایج بهبود می‌یابد.

2- با کاهش سرعت مندرل (در حدود  $1 \text{ mm/s}$  و کمتر) دقت نتایج کرنش صفحه‌ای تعمیم یافته به طور قابل قبولی به نتایج تحلیل سه‌بعدی نزدیک می‌شود.

3- دقت فرض کرنش صفحه‌ای با توجه پارامترهای کلیدی سرعت مندرل و ضریب انتشار میزان تغذیه (وابسته به هندسه مدل) متغیر است و هر چه این مقادیر کوچک‌تر باشند نتایج حاصل از فرض کرنش صفحه‌ای به حالت سه بعدی نزدیک‌تر است.

4- ضریب انتشار میزان تغذیه تأثیر بیشتری نسبت به سرعت مندرل در دقت فرض کرنش صفحه‌ای دارد و در مقادیر بزرگ آن کرنش پلاستیک معادل را در سطوح داخلی و خارجی حلقه کاملاً متفاوت پیش‌بینی می‌کند زیرا در این نواحی ماهیت سه‌بعدی فرایند بیشتر نمایان است.

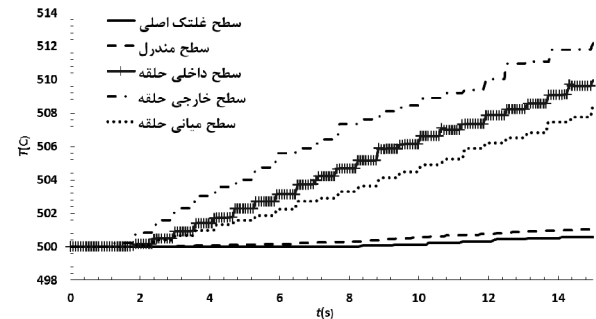
5- در صورتی که پارامترهای کلیدی در محدوده قابل قبول باشند فرض کرنش صفحه‌ای در مقایسه با حالت سه‌بعدی در مجموع دما را بیشتر و کرنش پلاستیک معادل را کمتر پیش‌بینی می‌کند ولی روند تغییرات با حالت سه‌بعدی در توافق است.

6- با فرض کرنش صفحه‌ای و پارامترهای کلیدی مناسب نزدیک‌ترین پیش‌بینی به مدل‌های سه بعدی در مکان‌های مختلفی اتفاق می‌افتد. دما در سطوح داخلی و خارجی و کرنش پلاستیک در سطوح میانی حلقه بهتر پیش‌بینی می‌شود.

7- با ارضای شرایط فرضیات دوبعدی بررسی شرایط مختلف بر روی شبیه‌سازی به طور قابل ملاحظه‌ای در زمان کمتری نسبت به حالت سه‌بعدی قابل بررسی است.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی در شکل 20 نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است افزایش دما ناشی از تغییر شکل پلاستیک زیاد نیست و علت آن نیز تغییر شکل‌های کوچک در هر مرحله می‌باشد. در ضمن به ترتیب بیشترین دمای حلقه در سطح خارجی، داخلی و نقطه میانی می‌باشد که با توجه به ماهیت تغییر شکل‌های انجام شده در نورد آلیاژ مورد نظر و پارامترهای کلیدی شبیه‌سازی قابل پیش‌بینی بود. در ضمن دمای سطحی مندرل از دمای سطح غلتک اصلی کمی بالاتر پیش‌بینی می‌شود که ناشی از تماس بیشتر با حلقه و ظرفیت حرارتی پایین‌تر نسبت به غلتک اصلی می‌باشد. از سوی دیگر به دلیل تماس کم غلتک‌ها با حلقه و مدت زمان کوتاه آن مقدار کمی از این دما به غلتک‌ها انتقال پیدا می‌کند. همچنین میزان افزایش دما در مندرل به دلیل تماس بیشتر با حلقه کمی بیشتر افزایش می‌یابد.

با توجه به میزان افزایش دمای حلقه ناشی از کار مکانیکی و مباحث مطرح شده می‌توان نتیجه گرفت که میزان کوپل بودن معادلات ناشی از تغییر شکل در دمای مورد نظر با دقت مناسبی قابل چشم‌پوشی است.



شکل 20- افزایش دما در اجزای مدل ناشی از تغییر شکل در مدل هم دما ( $500 C^0$ )

### نتیجه‌گیری

شاید ظاهر فرآیند نورد حلقه بیشتر به نورد تخت ورق شباهت داشته باشد اما تفاوت‌های مهم بین این دو فرآیند باعث می‌شود تحلیل مورد استفاده در نورد ورق نتیجه مطلوبی در نورد حلقه نداشته باشد و همچنین کارهای تحلیلی در این حوزه به دلیل ساده‌سازی‌های زیاد در آن از دقت کافی برخوردار نبوده است و روش‌های عددی بهترین نتایج را تاکنون ارائه نموده‌اند. جهت بررسی دقیق نورد حلقه، این فرایند باید



- 14-Benasciutti
- 15-Equivalent plastic strain(PEEQ)
- 16-Utsunomiya
- 17-Xu
- 18-Lim
- 19-Hua
- 20-Elastic-perfectly plastic

#### مراجع

- [1] Szabo, Z.J. and Dittrich, E., "Manufacturing systems for the production seamless rolled rings", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 60, 1996, pp. 67-72.
- [2] Keeton, R.C., "ASM Metals Handbook, Vol. 14: Forming and Forging", 9th Edn, Ohio, ASM International Metals Park, 1988, pp. 108-127.
- [3] Machinenbau, T., Dortmund, W., "Precision forgings produced on axial closed die rolling lines", FIA's Forge Fair, 1988, pp.88.
- [4] Yang, D.Y., and Kim, K.H., "Rigid-plastic finite element analysis of plan strain ring rolling", int. J. Mech. Sci, Vol. 30, 1988, pp. 517-580.
- [5] Joun, M.S., Chung, J.H., Shivpuri, R., "An axisymmetric forging approach to preform design in ring rolling using a rigid-viscoplastic finite element method", International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 38, no. 10-11, 1998, pp. 1183-1191.
- [6] Song, J.L., Dowson, A.L., Jacobsa, M.H., et al., "Coupled Thermo-mechanical finite-element modeling of hot ring rolling process", J. Mater. Process. Technol, vol. 121, 2002, pp. 332-340.
- [7] Qian, D.S., Hua, L., Zuo, Z.J. and Yuan, Y.L., "Application of mass scaling in simulation of ring rolling by three-dimensional finite element method", Journal of Plasticity Engineering, Vol. 12, Issue. 5, 2005, pp. 86-91+100.
- [8] Zhao, X., Zhang, Y., Zhang, H., "Simulation analysis of plastic deformation and residual stress distribution of radial ring rolling", Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Vol. 34, Issue. 9, 2008, pp.1088-1091.
- [9] Hua, L., Qian, D., "Analysis of plastic penetration in process of groove ball-section ring rolling", Journal of Mechanical Science and Technology", vol. 22, no. 7, 2008, pp. 1374-1382.
- [10] Wang, M., Yang, H., Sun, Z.C., Guo, L.G., "Analysis of coupled mechanical and thermal behaviors in hot rolling of large rings of titanium alloy using 3D dynamic explicit

- 8- در صورت شکل‌دهی حلقه بدون استفاده از غلتک راهنما لازم است تا قطر داخلی حلقه و مندرل تا حد امکان به یکدیگر نزدیک باشد. تفاوت قطرها هر چه کمتر باشد، کرنش پلاستیک ایجاد شده در سطوح مختلف حلقه یکنواخت‌تر است.
- 9- برای افزایش سرعت حل توسط روش مقیاس‌دهی جرم لازم است که جهت صحت شبیه‌سازی علاوه بر مقایسه انرژی‌ها، شکل حلقه نیز بررسی شود تا به دلیل افزایش گام‌های زمانی پایدار، حلقه از حالت دایره‌ای خارج نشود.
- 10- میزان مقیاس جرم در نورد حلقه می‌بایست با توجه به زمان شبیه‌سازی، مقایسه انرژی‌ها، شکل نهایی حلقه تعیین شود. در صورت استفاده از غلتک‌های راهنما می‌توان میزان مقیاس جرم را بیشتر افزایش داده و سرعت حل را با کمترین خطا چندین برابر نمود.
- 11- جهت شبیه‌سازی دقیق شکل‌دهی حلقه آلیاژ Ti6Al4V لازم است که پدیده کارسختی در نظر گرفته شود و در دماهای بالا به دلیل کاهش کارسختی استفاده از غلتک‌های راهنما اجتناب ناپذیر است.
- 12- روش ارائه شده جهت مکان غلتک‌های راهنما و همچنین خط مشی‌های بیان شده جهت تعیین ضریب تصحیح یکی از راحت‌ترین رویکردها جهت شبیه‌سازی مکان غلتک راهنما می‌باشد که با کمترین هزینه محاسباتی می‌توان از آن در شبیه‌سازی نورد حلقه استفاده نمود.
- 13- در مدل مورد مطالعه مشخص گردید که تأثیر گرمای تولید شده ناشی از اصطکاک و تغییر شکل در مقایسه با دمای حلقه ناچیز بوده و می‌توان با دقت بالایی از حل کوپل معادلات در مدل‌های سه‌بعدی پرهیز نمود.

#### پی‌نوشت

- 1- Yang and Kim
- 2- Joun
- 3- Song
- 4- Qian
- 5- Zhao
- 6- Hua
- 7- Abaqus
- 8- Wang
- 9- Chabin
- 10- Forge
- 11- Lee
- 12- Li
- 13- Ansys

- [21] ABAQUS, "Abaqus Analysis User's Guide", version 6.13, Abaqus Inc, 2013.
- [22] Wu, M., Hua, L., Shao, Y.C., Zhou, Q.J., "Influence of the annealing cooling rate on the microstructure evolution and deformation behaviours in the cold ring rolling of medium steel", *Materials And Design.*, 2011, pp. 2292-2300.
- [23] Utsunomiya, H., Saito, Y., Shinoda, T., et al., "Elastic-plastic finite element analysis of cold ring rolling process", *J. Mater. Process. Technol.*, pp. 125-126, 613-618, 2002.
- [24] Xu, S.G., Weinmam, K.J., Yang, D.Y., et al., "Simulation of the hot ring rolling process by using a thermo-coupled three-dimensional rigid-viscoplastic finite element method", *J. Manuf. Sci. Eng.* Vol. 119, 1997, pp. 542-549.
- [25] Lim, T., Pillinger, I., Hartley, P., "A finite-element simulation of profile ring rolling using a hybrid mesh model", *J. Mater. Process. Technol.*, 1998, pp. 80-81, 99-205.
- [26] Hua, L., Huang, X.G., Zhu, C.D., "Theory and Technology of Ring Rolling", Mechanical Industry Press, Beijing, 2001.
- [27] Hosford, W.F., Caddell, R.M., "Metal Forming Mechanics and Metallurgy", Cambridge University Press, 2007.
- [28] Yatnalkar, R.S., "Experimental Investigation of Plastic Deformation of Ti-6Al-4V under Various Loading Conditions", MSc Thesis, Graduate School of the Ohio State University, Ohio, 2010.
- [29] Hammer, J.T., "Experimental Investigation of Plastic Deformation of Ti-6Al-4V under Various Loading Conditions", MSc Thesis, Graduate School of the Ohio State University, Ohio, 2012.
- [30] Lim, T., Pillinger, I., Hartley, P., "A finite-element simulation of profile ring rolling using a hybrid mesh model", *Journal of Materials Processing Technology*, 1998, pp. 80 - 81, 199 - 205.
- [31] Sha, W., Malinoy, S., "Titanium alloys: modelling of microstructure, properties and application", pp. 257-259, New York: CRC Press LLC, 2009.
- [32] Xu, S.G., Lian, J.C., "Best position of guide rolls in ring rolling", *J. Metal Forming Machinery*, 1991, pp. 22-25.
- [11] Wang, M., Yang, H., Guo, L., Sun, Z., "Effects and optimization of roll sizes in hot rolling of large rings of titanium alloy, *Rare Metal Materials and Engineering*", Vol. 38, Issue.3, 2009, pp. 393-397.
- [12] Chabin, D., Emptas, P.Y., Bouzaiane, M., "Numerical simulation of ring rolling process, Application to superalloy 718 parts", *AIP Conference Proceedings*, vol. 907, no. 1, 2007, pp. 1366-1371.
- [13] Forouzan, M.R., Salimi, M., Gadala, M.S., "Guide roll simulation in FE analysis of ring rolling", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 142, no. 1, 2003, pp. 213-223.
- [14] Wang, M., Yang, H., Sun, Z., et al., "Dynamic explicit FE modeling of hot ring rolling process", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 16, no. 6, 2006, pp. 1274-1280.
- [15] Lee, K., Ko, D., Kim, D., Lee, S., Sung, N., Kim, B., "Control Method for Centering Rolls in Radial-Axial Ring Rolling Process", *International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing*, Vol. 15, No. 3, 2014, pp. 535-544.
- [16] . Li, C.S, Yu, H.L., Deng, G., Liu, X., Wang, G., "Numerical Simulation of Temperature Field and Thermal Stress Field of Work Roll during Hot Strip Rolling", *Journal of Iron and Steel Research*, 2007, pp. 18-21.
- [17] Benasciutti, D., Brusa, E., Bazzaro, G., "Finite elements prediction of thermal stresses in work roll of hot rolling mills", *Procedia Engineering*, 2010, pp. 707-716.
- [18] Sonboli, A., Serajzadeh, S., "A model for evaluating thermo-mechanical stresses within work-rolls in hot-strip rolling", *J. Eng. Math*, 2012, pp. 73-85.
- [19] Shivpuri, R., Eru, E., Shiao Y.C., Altan, T., "Proc. of ASM Meeting on Net Shape Manufacturing", Ohio, Columbus, 1988.
- [20] Eru, E., Shivpuri, R., "Ring rolling process optimization via simulation", *Engineering Research Center at The Ohio State University*, Report ERCINSM-B-90-02, 1990.