

## شبیه‌سازی فرایند نورد حلقه قطعات فرم‌دار پیچیده با استفاده از روش اجزا محدود

عبدالعلی مراثنی<sup>۱\*</sup> محمد سالم<sup>۲</sup>

\* نویسنده مسئول: a\_maracy@mut-es.ac.ir

### چکیده

هدف اصلی این مقاله محاسبه نیروها و گشتاورهای هریک از غلتک‌های فرایند نورد حلقه با هدف طراحی و ساخت دستگاه نورد حلقه برای تولید دو پوسته موتور هواپیما است. برای محاسبه نیروها و گشتاورها، شبیه‌سازی فرایند نورد حلقه شعاعی-محوری دو پوسته موتور هواپیما با استفاده از روش اجزا محدود صورت گرفت. برای اطمینان از نتایج شبیه‌سازی، خروجی‌های حاصل از شبیه‌سازی نورد یک حلقه ساده از جنس Ti-۶Al-۴V با نتایج تجربی مقایسه می‌شود. پارامترهای مورد مقایسه دمای حلقه و شکل مقطع آن است و مقایسه نتایج حاکی از دقت خوب نتایج و میزان خطای ناچیز آنهاست. همچنین در این مقاله روش جدیدی برای شبیه‌سازی غلتک‌های راهنما بیان شده است که نسبت به روش‌های گذشته دارای سادگی و کارایی بیشتری است.

**واژه‌های کلیدی:** نورد حلقه شعاعی-محوری، روش اجزا محدود، غلتک‌های راهنما، Ti-۶Al-۴V.

۱- استادیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر.  
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان.

## ۱- مقدمه

یکی از فرایندهایی که امروزه در بسیاری از صنایع به ویژه صنایع نظامی و هوا فضا مورد استفاده قرار می‌گیرد فرایند نورد حلقه است. این فرایند شامل غلتک اصلی، مندرل، غلتک‌های راهنما و غلتک‌های مخروطی است. با نزدیک شدن مندرل به غلتک اصلی، نورد شعاعی صورت می‌گیرد و قطر خارجی حلقه زیاد شده و ضخامت شعاعی آن کم می‌شود. با نزدیک شدن دو غلتک مخروطی به یکدیگر، نورد محوری انجام می‌شود و ضخامت محوری حلقه تنظیم می‌شود. این فرایند در تولید حلقه‌های بدون درز جوش کاربرد دارد و به دلیل همین خصوصیت مورد توجه انواع صنایع قرار گرفته است. البته این روش دارای مزایای دیگری مانند هزینه بسیار پایین تولید، توانایی در تولید انواع مقاطع، کیفیت بهتر محصولات از لحاظ متالورژیکی و ریز ساختار و کاهش دور ریز ماده اولیه است. این روش به دلیل تولید حلقه‌هایی بدون درز جوش و کاهش دور ریز ماده اولیه بهترین و مناسب‌ترین روش جهت تولیدات متقارن صنایع نظامی و هوا فضا است. شکل‌دهی پوسته در برگیرنده موتور هواپیما یکی از مواردی است که از حساسیت بالایی برخوردار است و پوسته باید بدون درز جوش تولید شود. جنس این پوسته از آلیاژ Ti-6Al-4V است که یکی از آلیاژهای پر کاربرد در صنایع هوا فضا است و آلیاژی گران قیمت محسوب می‌شود. تاکنون تولید پوسته‌های موتور هواپیما با استفاده از روش‌های ماشینکاری و با استفاده از فرزهای چهار و پنج محوره انجام می‌شده است که این روش موجب هدر رفتن بسیار زیاد ماده اولیه و همچنین افزایش بسیار زیاد زمان تولید می‌شود. در راستای کاهش میزان ماشینکاری و افزایش سرعت تولید، صنایع هوا فضا به استفاده از فرایند نورد حلقه جهت تولید این پوسته‌ها روی آورده‌اند. برای طراحی و ساخت دستگاه نورد حلقه به محاسبه نیروها و گشتاور غلتک‌ها نیاز است. این کار به روش اجزا محدود صورت می‌گیرد.

مقالات بسیاری در زمینه فرایند نورد حلقه و شبیه‌سازی آن در نرم افزارهای اجزا محدود وجود دارد. لی و همکارانش [۱] روش جدیدی برای هدایت غلتک‌های راهنما بیان کردند و با استفاده از روش اجزا محدود به شبیه‌سازی فرایند نورد حلقه با مقطع مستطیل به مقطع T شکل پرداخته و سپس نتایج حاصل از شبیه‌سازی را با نتایج آزمایش عملی مقایسه کردند. آل ود [۲] روش جدیدی برای نورد حلقه بیان کرده است که نسبت به حالت مرسوم این فرایند دارای انعطاف‌پذیری بیشتری است. همچنین حالات گوناگون استفاده از این روش در این مقاله بیان شده است. جون و همکارانش [۳] روش جدیدی جهت پیش‌بینی تقریبی تغییر شکل ماده در فرایند نورد حلقه ارائه کرده‌اند. در این مقاله فرایند نورد حلقه به صورت دو بعدی و متقارن محوری<sup>۱</sup> شبیه‌سازی شده است. یانگ و ریو [۴] با استفاده از روش حد بالایی<sup>۲</sup> به بررسی اثر پارامترهای مختلف نورد بر روی نیرو و گشتاور پرداخته‌اند. ونگ و همکارانش [۵] به شبیه‌سازی فرایند نورد حلقه به صورت داغ و برای حلقه ساده پرداختند. سپس نتایج شبیه‌سازی با استفاده از آزمایش‌های عملی اعتبار سنجی شد و پارامترهای کلیدی فرایند تعیین شدند. هوا و همکارانش [۶] برای بررسی شرایط اصلی در نورد حلقه با شیار توپی و بررسی پارامترهای نفوذ پلاستیکی، به شبیه‌سازی فرایند نورد حلقه به صورت سه بعدی در نرم‌افزار ABAQUS پرداختند. سونگ و همکارانش [۷] به شبیه‌سازی فرایند نورد حلقه به صورت حرارتی مکانیکی و با استفاده از نرم‌افزار MARC/MENTAT پرداختند. در این شبیه‌سازی جنس حلقه Inconel ۷۱۸ بوده است. هوا و همکارانش [۸] فرایند نورد حلقه به صورت سرد و برای تولید حلقه L شکل را شبیه‌سازی کردند. هدف از این شبیه‌سازی بررسی نفوذ پلاستیکی در نورد حلقه L شکل بود. این شبیه‌سازی در نرم‌افزار ABAQUS صورت گرفت. کیم و همکارانش [۹] فرایند نورد حلقه برای حلقه با

۱- Axisymmetric

۲- Upper bound method

(با غلتک‌های مخروطی) انجام می‌شود. همچنین طراحی جدید جهت استفاده از غلتک‌های راهنما در شبیه‌سازی‌ها ارائه می‌گردد که شبیه‌سازی آنها را آسان کرده و زمان حل را کاهش می‌دهد. قابل ذکر است قطعات مورد نظر این مقاله مربوط به پوسته موتور هواپیماست که دارای پیچیدگی است و تاکنون شبیه‌سازی برای این پوسته‌ها صورت نگرفته است. در پایان برای اطمینان از نتایج شبیه‌سازی، مقایسه‌ای بین نتایج استخراج شده از نرم افزار ABAQUS با نتایج آزمایش‌های عملی صورت گرفته است. هدف اصلی این مقاله استخراج نیروهای غلتک‌ها در جهت‌های مختلف برای طراحی و ساخت دستگاه نورد حلقه شعاعی محوری است. دلیل بررسی دو پوسته موتور هواپیما، تعیین بیشترین نیروها و گشتاورها از بین دو پوسته، برای طراحی دستگاه با ضریب اطمینان لازم در مراحل بعد است.

## ۲- نحوه مدل سازی غلتک‌های راهنما در فرایند نورد حلقه

برای بیان نحوه شبیه‌سازی غلتک‌های راهنما در نرم‌افزار ABAQUS لازم است مکانیزم عملکرد آنها بررسی شود. مکانیزمی که موقعیت غلتک‌های راهنما را تعیین می‌کند مکانیزم تطبیق نام دارد. این مکانیزم در شکل (۱) نشان داده شده است. مکانیزم تطبیق دو وظیفه را بر عهده دارد. اول تماس دائم غلتک‌های راهنما با سطح حلقه و دوم کنترل گردی و دایروی بودن حلقه در حین فرایند با استفاده از عملگر هیدرولیکی وصل شده به غلتک‌های راهنما. این عملگر با ایجاد فشار هیدرولیکی قابل تنظیم از غیر هم مرکزی حلقه جلوگیری می‌کند و در عین حال، مانع انبساط حلقه نمی‌شود [۱۱]. همانطور که از شکل (۱) مشخص می‌شود، هر غلتک راهنما به یک نقطه لولا شده و از طرف دیگر با نیرویی به سطح حلقه تماس دارد. برای شبیه‌سازی غلتک‌های راهنما نیز از روش مشابهی استفاده شده است. ابتدا دو نقطه تعریف شدند و غلتک‌های راهنما حول آن دو نقطه لولا شدند. سپس با اعمال نیروی اندک به نقاط مرجع<sup>۴</sup>

پروفیل خاص، قطر بزرگ و از جنس استیل را بررسی کردند. پروفیل حلقه نهایی به شکل یک شیار در قطر خارجی حلقه بود. شبیه‌سازی این فرایند در نرم افزار MSC/SUPERFORM انجام گرفت. ونگ و همکارانش [۱۰] به شبیه‌سازی فرایند نورد حلقه به صورت داغ پرداختند و مواردی همچون تماس، شرایط مرزی و حرارتی، نحوه کنترل غلتک‌های راهنما و مقیاس‌دهی جرم<sup>۱</sup> را بررسی کردند. فروزان و همکارانش [۱۱] روش جدیدی جهت شبیه‌سازی غلتک‌های راهنما بیان کردند که به‌عنوان روش میله‌های حرارتی نامگذاری شده است. این روش موجب پایداری و سرعت حل بیشتر در شبیه‌سازی فرایند نورد حلقه شده است. چابین و همکارانش [۱۲] فرایند نورد حلقه را در نرم افزار FORGE و برای حلقه با جنس Inconel ۷۱۸ شبیه‌سازی کرده‌اند و بعضی از نتایج شبیه‌سازی را با نتایج آزمایش‌های عملی مقایسه نموده‌اند. مون<sup>۲</sup> و همکارانش [۱۳] با استفاده از روش اجزا محدود عیب چند ضلعی شدن حلقه در فرایند نورد حلقه را بررسی کرده‌اند. همچنین با ریزکردن مش‌ها تنها در ناحیه نزدیک به محل نورد، هزینه‌های محاسباتی را کاهش دادند. کی ان و همکارانش [۱۴] به بررسی نحوه گیرش<sup>۳</sup> در فرایند نورد حلقه‌های فرم‌دار پرداختند. هدف اصلی آنها بررسی گیرش در فرایند نورد حلقه قاب یا تاقان بر اساس اصول نورد حلقه بود.

در تمامی فرایندهای شبیه‌سازی شده نورد حلقه، یکی از مشکلات اصلی نحوه کنترل غلتک‌های راهنماست. در اکثر شبیه‌سازی‌ها از غلتک‌های راهنما چشم پوشی شده است. همچنین در بسیاری از مقاله‌ها از غلتک‌های مخروطی صرف نظر می‌شود و تنها شبیه‌سازی نورد شعاعی حلقه صورت می‌گیرد. از طرف دیگر، شکل حلقه نهایی در تمامی شبیه‌سازی‌ها شکل ساده‌ای بوده و پیچیدگی‌چندانی در آن وجود ندارد. در این مقاله ابتدا شبیه‌سازی نورد شعاعی-محوری

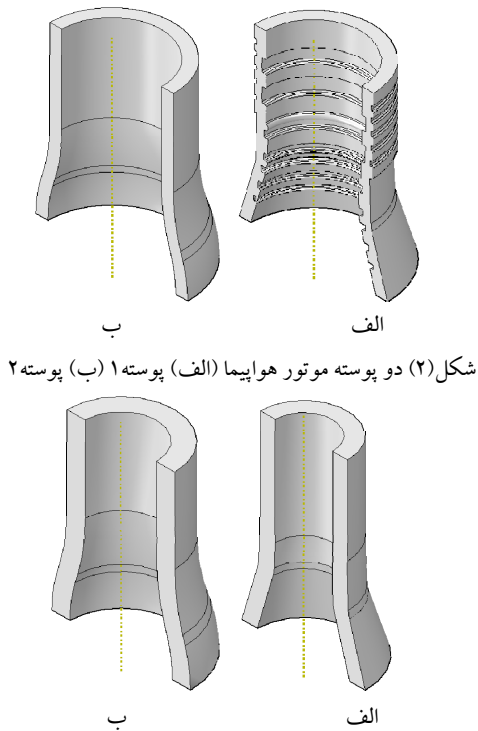
۱- Mass scaling

۲- Moon

۳- Gripping

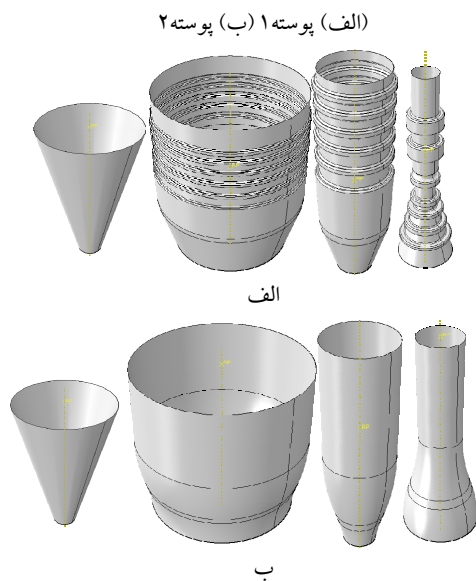
۴- Reference Point

حلقه‌های پیش فرم قبل از نورد حلقه را نشان می‌دهد. حلقه‌های پیش فرم شده به روش‌های گوناگون ایجاد می‌گردند که یکی از آن‌ها ریخته‌گری به فرم مورد نظر می‌باشد. شکل (۴) غلتک‌های استفاده شده جهت نورد دو حلقه را نشان می‌دهد.



شکل (۲) دو پوسته موتور هواپیما (الف) پوسته ۱ (ب) پوسته ۲

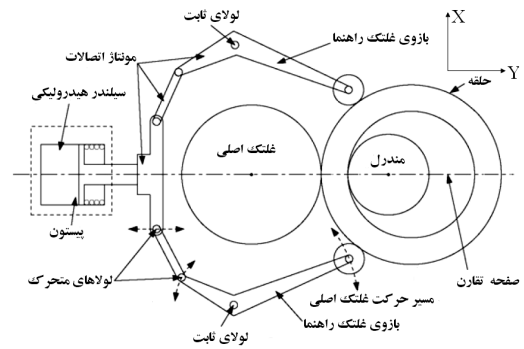
شکل (۳) حلقه‌های پیش فرم جهت انجام فرایند نورد حلقه بر روی آن‌ها



شکل (۴) غلتک‌های طراحی شده جهت تولید پوسته‌های موتور هواپیما

(الف) غلتک‌های پوسته ۱ (ب) غلتک‌های پوسته ۲

غلتک‌های راهنما این نقاط با سطح حلقه تماس پیدا کردند. البته این نیرو، نیروی واقعی نبوده و فقط برای تماس دائم غلتک راهنما به حلقه در شبیه‌سازی است. برای محاسبه نیروی واقعی، پس از شبیه‌سازی اول، مسیر حرکت غلتک‌های راهنما در جهت‌های X و Y استخراج شده و سپس با اعمال این مسیر حرکت‌ها به غلتک‌های راهنما، بار دیگر شبیه‌سازی صورت می‌گیرد. در این شبیه‌سازی نیروهای مورد نیاز جهت طراحی غلتک‌ها استخراج می‌شود. همچنین می‌توان با تغییر نیروها در شبیه‌سازی اول نیز به نیروهای واقعی دست یافت ولی این روش بسیار وقت‌گیر بوده و مقرون به صرفه نیست.



شکل (۱) مکانیزم تطبیق و نحوه عملکرد غلتک‌های راهنما [۱]

### ۳- شبیه‌سازی پوسته موتور هواپیما

در این بخش هدف شبیه‌سازی دو پوسته نشان داده شده در شکل (۲) است. پوسته (۱) که در شکل (۲-الف) نشان داده شده است پوسته جلوی موتور هواپیما است و پوسته (۲) در شکل (۲-ب) پوسته عقب موتور هواپیما است. این پوسته‌ها در مرحله بعد از نورد حلقه ماشینکاری شده و برای استفاده در هواپیماها آماده می‌شوند. برای دستیابی به فرم‌های نشان داده شده در شکل (۲) باید فرم خارجی حلقه بر روی غلتک‌های راهنما و غلتک اصلی ایجاد شود و فرم داخلی حلقه‌ها نیز بر روی مندرل ایجاد شود. غلتک‌ها باید با حلقه بیشترین تماس را داشته باشند تا حلقه بر اثر اصطکاک بین غلتک اصلی و مندرل با آن بچرخد و عملیات نورد بر روی آن انجام شود. به همین دلیل حلقه‌های اولیه باید دارای پیش فرم باشند. شکل (۳)

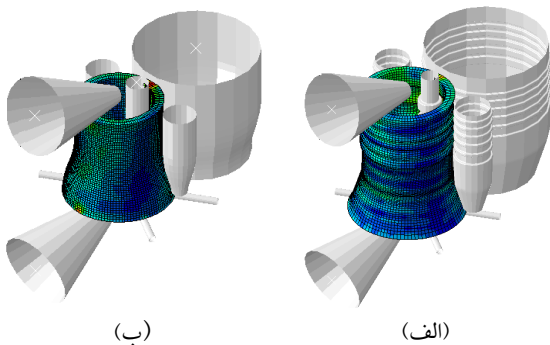
شبه‌سازی شده حاصل از دو حلقه به همراه تمامی غلتک‌ها در شکل (۵) نشان داده شده است. همانطور که در شکل (۶) مشخص است، هر دو حلقه کاملاً دایروی بوده و اعوجاج مش‌ها بسیار کم است. شکل (۷) مقطع محوری دو حلقه در ابتدا و انتهای فرایند را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل مشخص است، فرم‌های مورد نظر بر روی حلقه‌ها به وجود آمده‌اند.

جدول (۱) هدایت حرارتی و گرمای ویژه آلایژ تیتانیوم Ti-۶Al-۴V در دماهای مختلف [۱۵].

دما (°C)	هدایت حرارتی (W/mK)	گرمای ویژه (J/kg.K)
۱۷/۷۸	۶/۹۲	۳۸۷/۵۶
۹۳/۳۴	۷/۴۴	۴۰۶/۹۳
۲۰۴/۴۴	۸/۶۵	۴۲۶/۳۱
۴۲۶/۶۷	۱۱/۹۴	۴۷۴/۷۶
۵۳۷/۷۸	۱۳/۶۷	۵۱۷/۳۹
۹۵۸/۲۲	۱۸	۶۹۷/۶۱

جدول (۲) مدول یانگ، چگالی، انبساط حرارتی و ضریب پواسون آلایژ تیتانیوم Ti-۶Al-۴V در دماهای مختلف [۱۵].

دما (°C)	ضریب پواسون	مدول یانگ (GPa)	چگالی (kg/m <sup>۳</sup> )	انبساط حرارتی (μm/m°C)
۲۱/۱۱	۰/۳۱	۱۱۷/۲۱	۴۴۳۰	۱۱/۳
۲۰۴/۴۴	۰/۳۱	۱۰۶/۸۷	۴۴۳۰	۱۱/۳
۴۲۶/۶۷	۰/۳۱	۹۵/۱۵	۴۴۳۰	۱۱/۳
۶۴۸/۸۹	۰/۳۱	۸۲/۷۲	۴۴۳۰	۱۱/۳



شکل (۵) پوسته‌های موتور هواپیما در پایان شبه‌سازی

(الف) پوسته ۱ (ب) پوسته ۲.

برای شبه‌سازی از نرم افزار ABAQUS استفاده شده است. غلتک‌ها همگی به صورت صلب تحلیلی<sup>۱</sup> و حلقه تغییر شکل پذیر<sup>۲</sup> در نظر گرفته شدند. جنس قطعه کار از آلایژ تیتانیوم (Ti-۶Al-۴V) است که خواص مکانیکی و حرارتی آن در جداول (۱) و (۲) آورده شده است. همچنین نمودارهای تنش کرنش این آلایژ در دماهای مختلف و با نرخ کرنش‌های متفاوت در بخش خواص مواد نرم افزار ABAQUS وارد شد [۱۵]. سرعت چرخشی غلتک اصلی ۴/۰۶ رادیان بر ثانیه و سرعت خطی مندرل ۰/۶۲۵ میلیمتر بر ثانیه تعریف شد [۵]. مندرل حول محور خود هرزگرد بوده و با چرخش حلقه، می‌چرخد. جابه‌جایی غلتک مخروطی بالا در جهت عمودی ۵ میلیمتر تعریف شد تا عیب بشقابی شدن حاصل از نورد شعاعی برطرف شود. غلتک‌های راهنما طبق روند بخش قبل مدل شدند. روش حل، دینامیکی صریح جابجایی- حرارتی<sup>۳</sup> و دمای حلقه ۹۹۰ درجه سانتیگراد تعریف شدند [۵]. دمای غلتک‌های راهنما، غلتک اصلی و غلتک‌های مخروطی ۵۰ درجه سانتیگراد و دمای مندرل ۲۰۰ درجه سانتیگراد تعریف شدند [۵]. در شبه‌سازی برای افزایش سرعت حل از مقیاس دهی جرم استفاده شد و در پایان شبه‌سازی میزان انرژی جنبشی و انرژی داخلی مقایسه گردید تا انرژی جنبشی کمتر از ۵ تا ۱۰ درصد انرژی داخلی باشد [۵]. غلتک‌ها به دلیل صلب بودن نیاز به شبکه بندی نداشته و حلقه نیز با استفاده از مش C<sup>۲</sup>DART مش‌ریزی شد. در هر دو شبه‌سازی، الگوریتم ALE فعال بوده تا اعوجاج مش‌ها به حداقل برسد. در سطح‌زیری هر دو حلقه از غلتک‌های هرزگرد جهت نگهداشتن و چرخش حلقه‌ها استفاده شد که همانند روش مورد استفاده در صنعت است. ضریب اصطکاک بین حلقه و غلتک اصلی و حلقه و مندرل ۰/۵ تعریف شد [۵]. فرایند

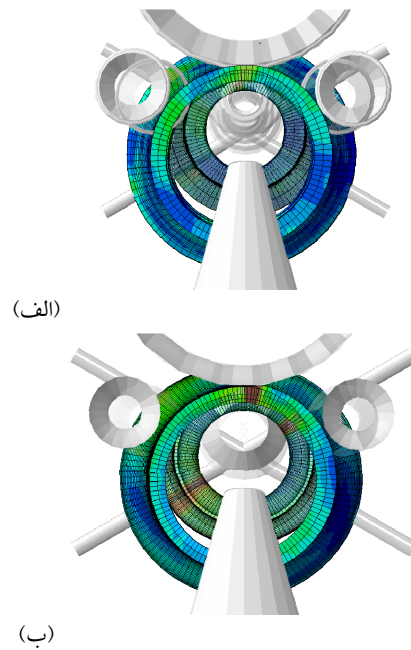
۱- Analytical Rigid

۲- Deformable

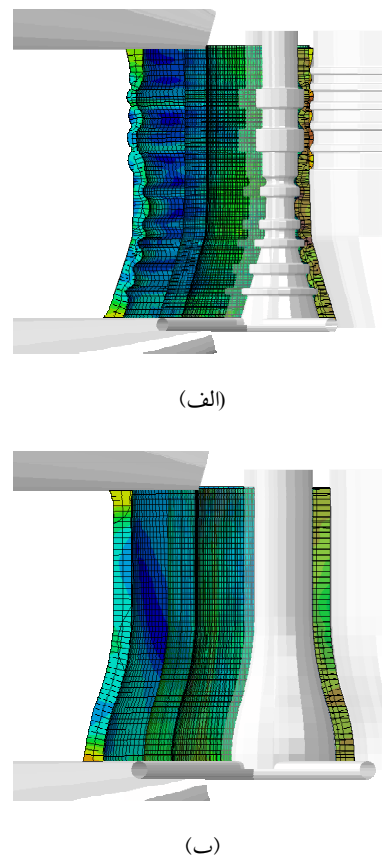
۳- Dynamic Temperature Displacement Explicit

#### ۴- اعتبار سنجی نتایج شبیه‌سازی

پس از انجام شبیه‌سازی‌ها لازم است تا صحت نتایج شبیه‌سازی بررسی شود. برای بررسی صحت نتایج، شبیه‌سازی فرایند نورد حلقه ساده انجام گرفت و با نتایج آزمایش‌های عملی مرجع [۵] مقایسه شد. جنس حلقه آلیاژ تیتانیوم Ti-۶Al-۴V است و مشخصات نورد حلقه ساده جهت مقایسه با آزمایش‌های عملی عبارت‌اند از: سرعت چرخشی غلتک اصلی  $3/3$  رادیان بر ثانیه، پیشروی مندرل  $0/68$  میلیمتر بر ثانیه، دمای حلقه از جنس تیتانیوم  $990$  درجه سانتیگراد، دمای غلتک اصلی و غلتک‌های راهنما  $50$  درجه سانتیگراد، دمای مندرل  $200$  درجه سانتیگراد، ضریب اصطکاک  $0/5$ ، دمای محیط  $20$  درجه سانتیگراد، شعاع غلتک اصلی، مندرل و غلتک‌های راهنما به ترتیب  $408$ ،  $75$ ،  $130$  میلیمتر، شعاع خارجی و داخلی حلقه به ترتیب  $165$  و  $85$  میلیمتر و ارتفاع حلقه  $50$  میلیمتر. پارامترهای مقایسه شده، دمای حلقه در موقعیت‌های مختلف و شکل مقطع در پایان شبیه‌سازی است. دمای نقاط  $1$ ،  $2$ ،  $3$  و  $4$  در دو حالت شبیه‌سازی و آزمایش عملی مقایسه شدند. دماهای به دست آمده در حالت شبیه‌سازی در چهار نقطه نشان داده شده به ترتیب:  $731$ ،  $843$ ،  $752$  و  $829$  درجه سانتیگراد بوده و در آزمایش عملی، به ترتیب  $761$ ،  $868$ ،  $760$  و  $830$  درجه سانتیگراد هستند. همچنین ارتفاع سه نقطه  $1$ ،  $2$  و  $3$  نسبت به سطح بالای حلقه قبل از شروع عملیات، در دو حالت شبیه‌سازی و آزمایش عملی مقایسه شدند که این ارتفاع‌ها در حالت شبیه‌سازی به ترتیب برابر  $0/2$ ،  $0/9$  و  $15/34$  میلیمتر و در آزمایش عملی به ترتیب برابر  $0/5$ ،  $0/8$  و  $12/9$  میلیمتر می‌باشند. با مقایسه دمای حلقه در حالت شبیه‌سازی با نتایج آزمایش عملی، ماکزیمم خطای  $3/9$  درصد مشاهده شد و با مقایسه شکل مقطع در دو حالت، ماکزیمم خطای  $18/9$  درصد مشاهده شد. این میزان خطا دقت خوب شبیه‌سازی‌ها را نشان می‌دهد و با در نظر گرفتن بیشینه خطا، می‌توان از نیروهای به دست آمده از شبیه‌سازی پوسته‌ها جهت طراحی دستگاه نورد حلقه ساده نشان نمود. در شکل (۹) شبیه‌سازی فرایند نورد حلقه ساده نشان داده شده است.

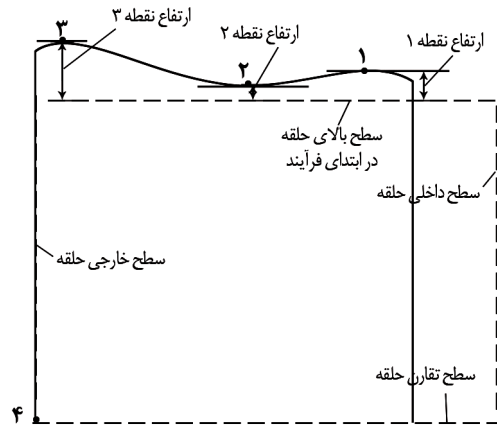


شکل (۶) دایروی بودن پوسته‌ها بعد از شبیه‌سازی  
(الف) پوسته ۱ (ب) پوسته ۲

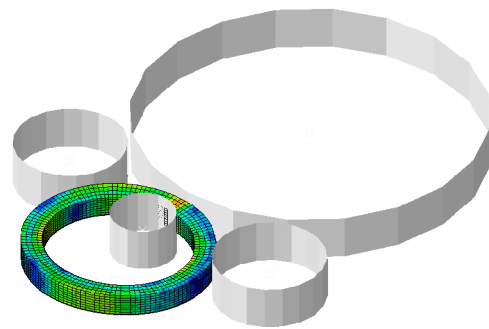


شکل (۷) مقطع محوری دو پوسته در ابتدا و انتهای فرایند  
(الف) پوسته ۱ (ب) پوسته ۲

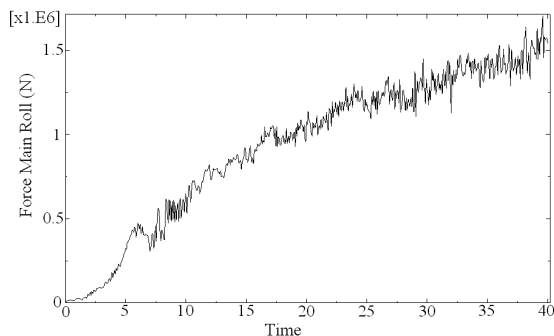
بیشینه مقدار خویش برسند. بیشترین نیروها در جهت شعاعی مربوط به پوسته (۱) می‌باشند. نیروی وارد به غلتک اصلی در پوسته (۱) برابر ۱۵۰ تن و به مندرل برابر ۱۲۵ تن است. همچنین نیروهای در راستای محوری وارده به غلتک‌های مخروطی در هر دو پوسته تقریباً برابر بوده و به بیشترین مقدار ۱۲ تن می‌رسد. با توجه به روش بیان شده جهت مدل نمودن غلتک‌های راهنما، برآیند نیروی‌های وارده به غلتک‌های راهنما در پوسته ۱، ۲ تن و در پوسته ۲، ۱/۴ تن محاسبه می‌شود که این نیروها در دو شکل (۱۶) و (۱۷) نشان داده شده‌اند. همانطور که بیان گردید این نیرو جهت حفظ گردی و دایروی بودن حلقه لازم است و در مراحل پایانی این نیرو کاهش می‌یابد تا با نازک شدن حلقه، دایروی بودن آن بر اثر نیروی هیدرولیک وارده به غلتک‌های راهنما از بین نرود.



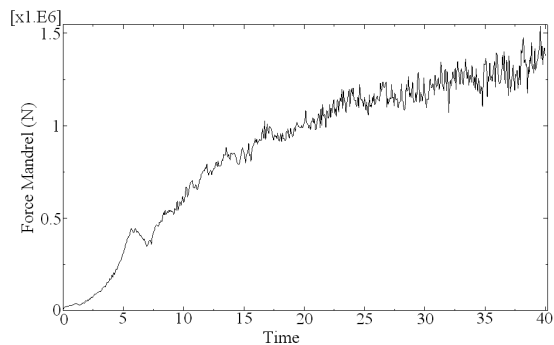
شکل (۸) نقاط تعیین شده جهت مقایسه دما و شکل مقطع در دو حالت شبیه‌سازی و نتایج عملی.



شکل (۹) فرآیند شبیه‌سازی شده نورد حلقه ساده



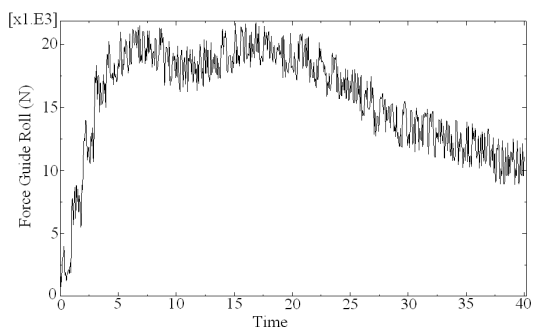
شکل (۱۰) نیروی وارد شده به غلتک اصلی در راستای نورد شعاعی (پوسته ۱).



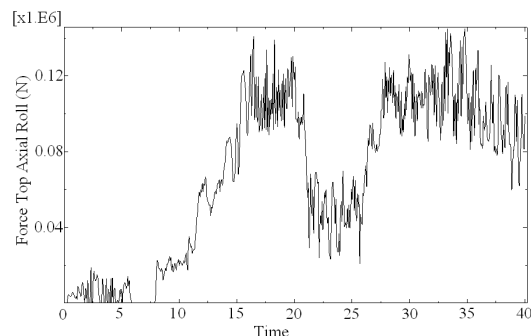
شکل (۱۱) نیروی وارد شده به مندرل در راستای نورد شعاعی (پوسته ۱).

### ۵- نتایج حاصل از شبیه‌سازی

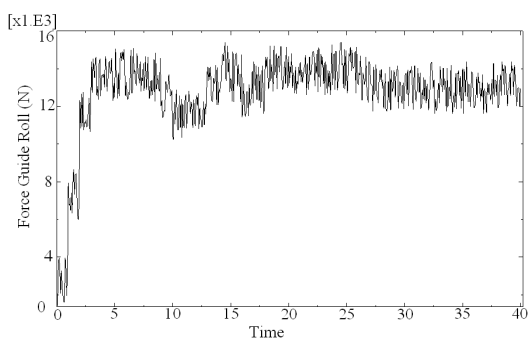
در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) نیروهای غلتک اصلی و مندرل مربوط به پوسته ۱ در جهت نورد شعاعی نشان داده شده است. در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) محور X زمان فرآیند را نشان می‌دهد و محور Y نیروی نورد شعاعی را در جهت کاهش ضخامت حلقه نشان می‌دهد. شکل (۱۲) نیروی غلتک مخروطی بالا در جهت نورد محوری و مربوط به پوسته (۱) را نشان می‌دهد. در این شکل نیز محور X زمان انجام فرآیند و محور Y نیروی نورد محوری در جهت کاهش ارتفاع حلقه را نشان می‌دهد. شکل‌های (۱۳)، (۱۴) و (۱۵) نیروهای غلتک اصلی، مندرل و غلتک مخروطی پوسته ۲ را در جهت نورد شعاعی و محوری نشان می‌دهند. همانطور که از شکل‌ها مشخص می‌شود، نیروها از ابتدای فرآیند تا انتهای آن افزایش یافته‌اند تا در پایان فرآیند به



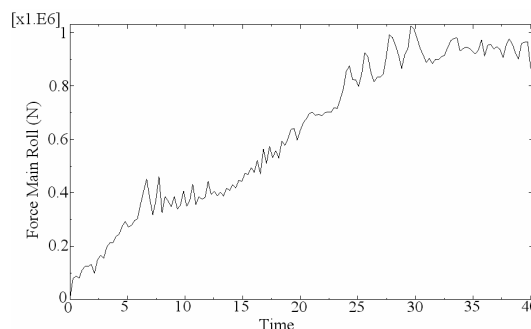
شکل (۱۶) نیروی وارد شده به غلتک راهنما (پوسته ۱).



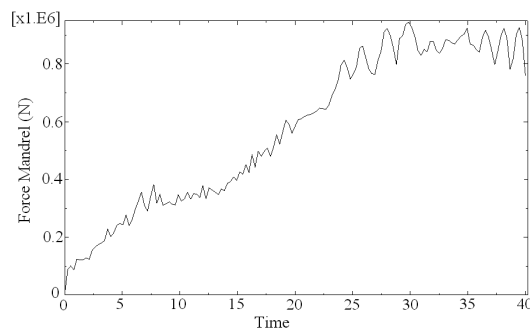
شکل (۱۲) نیروی وارد شده به غلتک مخروطی در راستای نورد محوری (پوسته ۱).



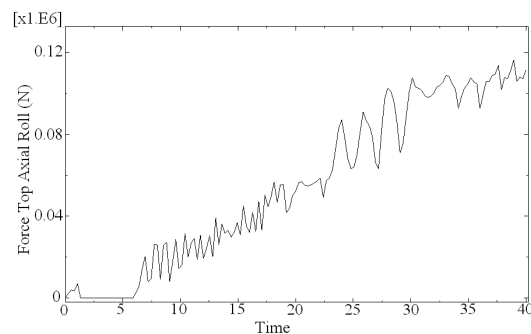
شکل (۱۷) نیروی وارد شده به غلتک راهنما (پوسته ۲).



شکل (۱۳) نیروی وارد شده به غلتک اصلی در راستای نورد شعاعی (پوسته ۲).



شکل (۱۴) نیروی وارد شده به مندرل در راستای نورد شعاعی (پوسته ۲).



شکل (۱۵) نیروی وارد شده به غلتک مخروطی در راستای نورد محوری (پوسته ۲).

### ۶- نتیجه گیری و جمع بندی

در این مقاله ابتدا روشی جدید جهت مدل نمودن و محاسبه نیروهای غلتک‌های راهنما بیان گردید. سپس شبیه‌سازی فرایند نورد حلقه جهت تولید دو پوسته موتور هواپیما صورت گرفت. نورد به صورت شعاعی-محوری است و تمامی غلتک‌های اصلی، مندرل، راهنما و مخروطی در شبیه‌سازی‌ها وارد شدند. برای اطمینان از نتایج شبیه‌سازی، یک حلقه ساده نیز شبیه‌سازی شد و نتایج حاصل از آن با نتایج تجربی مقایسه شد. مقایسه نتایج حاکی از خطای قابل قبول شبیه‌سازی‌ها است و می‌توان با در نظر گرفتن خطای ناشی از شبیه‌سازی، از نتایج اجزا محدود به دست آمده در موارد لازم استفاده کرد.



## مراجع

- [10] Wang M., H., Yang Z., Sun 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.
- [11] 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.
- [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] Moon H. K., Lee M. C., Joun M. S., Predicting polygonal-shaped defects during hot ring rolling using a rigid-viscoplastic finite element method, *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 50, no. 2, 2008, pp. 306-314.
- [14] Qian D., L., Hua L., Research on gripping conditions in profile ring rolling of raceway groove, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, no. 6, 2009, pp. 2794-2802.
- [15] DEFORM-3D Software, Version 6.1, 2007.
- [1] Li L., H., Yang L. Guo et al., A control method of guide rolls in 3D-FE simulation of ring rolling, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 205, no. 1-3, 2008, pp. 99-110.
- [2] Allwood J. M., A Structured Search for Novel Manufacturing Processes Leading to a Periodic Table of Ring Rolling Machines, *Journal of Mechanical Design*, vol. 129, no. 5, 2007, pp. 502-511.
- [3] 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.
- [4] Yang D. Y., Ryoo J. S., An Investigation into the Relationship between Torque and Load in Ring Rolling, *Journal of Engineering for Industry*, vol. 109, no. 3, 1987, pp. 190-196.
- [5] M. Wang, H. Yang, Z. C. Sun et al., Analysis of coupled mechanical and thermal behaviors in hot rolling of large rings of titanium alloy using 3D dynamic explicit FEM, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, no. 7, 2009, pp. 3384-3395.
- [6] 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.
- [7] Song J. L., Dowson A. L., Jacobs et al. M. H., Coupled thermo-mechanical finite-element modelling of hot ring rolling process, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 121, no. 2-3, 2002, pp. 332-340.
- [8] Hua L., Qian D., Pan L., Deformation behaviors and conditions in L-section profile cold ring rolling, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, no. 11, 2009, pp. 5087-5096.
- [9] Kim K. H., Suk H. G., Huh M. Y., Development of the profile ring rolling process for large slewing rings of alloy steels, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 187-188, 2007, pp. 730-733.