

# حل عددی فرایند فورج شعاعی چندپاسه سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ و مقایسه آن با نتایج تجربی

محمد شاهرخ، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف‌آباد

mohammad.sh1364@yahoo.com

اعظم قاسمی، استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف‌آباد

a\_ghassemi@pmc.iaun.ac.ir

مهران مرادی، استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف‌آباد

moradi@cc.iut.ac.ir

## چکیده

فرایند فورج شعاعی از جمله فرایندهای فورج قالب‌باز است که برای افزایش استحکام و کاهش عیوب داخلی استفاده می‌شود. از این فرایند جهت کاهش قطر محورها، محورهای پله‌دار و ساخت لوله‌هایی با پروفیل داخلی استفاده می‌گردد. هدف از این مقاله، شبیه‌سازی یک مدل ترمومکانیکی به‌صورت یک آنالیز کوپل دینامیک - حرارت جهت پیش‌بینی نیروی لازم انجام فرایند فورج اینکونل ۷۱۸، تأثیر دمای اولیه بر نیروی مورد نیاز فورج، بررسی تغییرات دما در طول کل فرایند و به‌دست آوردن توزیع کرنش ذخیره‌شده در پاس‌های مختلف می‌باشد. در این مقاله به‌دلیل شکل‌دهی داغ، آلیاژ اینکونل ۷۱۸ به‌صورت یک ماده الاستو - ویسکوپلاستیک مدل‌سازی شده است. همچنین جهت تعیین تماس‌ها از یک ترکیب اصطکاک کولمب و تنش برشی محدودشونده استفاده شده است. در نهایت نتایج به‌دست آمده با نتایج آزمون تجربی مقایسه شده که تطابق خوبی میان نتایج شبیه‌سازی المان محدود با نتایج عملی دیده شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقادیر کرنش اعمالی به سطح قطعه‌کار در فرایند فورج شعاعی به‌مراتب بیشتر از کرنشی است که به مرکز قطعه‌کار اعمال شده است. همچنین با افزایش دمای اولیه قطعه‌کار و افزایش تعداد مراحل فورج، نیروی لازم جهت انجام فرایند کاهش می‌یابد.

**واژگان کلیدی:** فورج شعاعی، اینکونل ۷۱۸، توزیع کرنش، نیروی فورج، ترمومکانیکی، المان محدود

## مقدمه

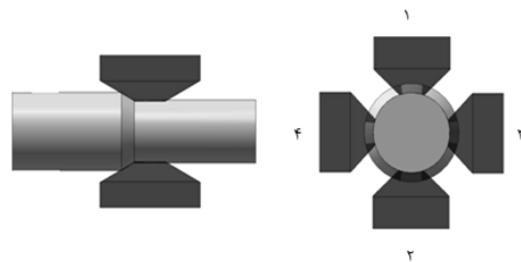
عالی تا دماهای بالا و همچنین مقاومت در برابر تشکیل ترک پس از جوشکاری و جز این‌ها از جمله آلیاژهای پرکاربرد در صنایعی چون ساخت توربین‌های گاز،

سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ به‌دلیل استحکام بسیار زیاد، مقاومت در برابر خوردگی و استحکام گسیختگی خزشی

موتورهای هواپیما، سفینه‌های فضایی، صنایع نفت و گاز، راکتورهای هسته‌ای، ابزارآلات و جز این‌ها می‌باشند، که البته این ویژگی‌ها سبب شده است تا فرم‌دهی آنها پیچیده‌تر از دیگر آلیاژها باشد.

یکی از روش‌های مرسوم شکل‌دهی این سوپرآلیاژ، فورج شعاعی چهارچکشه است. طرح اولیه فورج شعاعی نخستین بار در سال ۱۹۴۶ م در استرلیا مطرح شد. نخستین موارد استفاده از آهنگری شعاعی برای فورج قطعات کوچک به صورت داغ و فورج سیلندرها به صورت سرد بوده است. در حال حاضر، آهنگری شعاعی جهت کاهش قطر شمش‌های ریخته‌گری شده، شمش‌های پیش‌فورج شده، ساخت محور و محورهای پله‌دار و آهنگری سیلندرها با پروفیل داخلی متفاوت استفاده می‌شود. این فرایند می‌تواند به صورت گرم یا سرد روی فلزاتی چون فولادهای ساختمانی، فولادهای پرآلیاژ و آلیاژهای مقاوم به حرارت (پایه نیکل و کبالت) انجام شود. خواص محصولات به دست آمده از این فرایند عبارت‌اند از [۱]:

۱. تیرانس دقیق
  ۲. کیفیت سطح مطلوب
  ۳. افزایش استحکام محصول
  ۴. ساختار یکنواخت دانه‌ها
  ۵. سیکل زمانی کوتاه جهت تولید محصول
- شکل ۱ اصول فرایند فورج یک قطعه کار توسط ماشین آهنگری شعاعی چهار چکشه را نمایش می‌دهد.



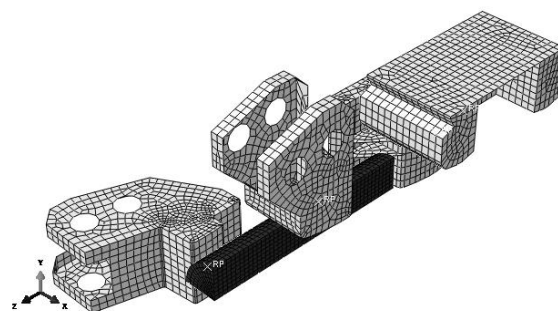
شکل ۱. اصول ماشین فورج شعاعی چهارچکشه [۲]

قائی و همکارانش، در سال ۲۰۰۵ م اثر شکل قالب بر تغییر شکل و نیروی فورج را با روش اسلب بررسی کردند

[۲]. نتایج نشان می‌دهد که در صورت استفاده از سطح محدب، صفحه خنثی به محل پیش‌فرم اولیه نزدیک و سبب افزایش نیروی مورد نیاز فورج می‌شود. همچنین در صورت استفاده از سطح مقعر صفحه خنثی به محل فورج شده نزدیک و سبب کاهش نیروی فورج می‌شود. لورنس و همکارانش، در سال ۱۹۹۲ فرایند فورج شعاعی آلیاژ اینکونل ۷۱۸ را به منظور بررسی کرنش‌ها شبیه‌سازی کردند [۴]. نتایج نشان می‌دهد که کرنش اعمالی به سطح نمونه به مراتب بیشتر از کرنش مرکز قطعه کار است. فوده و همکارانش نیز فرایند فورج شعاعی داغ را به منظور بررسی اثر پارامترهای مؤثر بر نیروی فورج شبیه‌سازی کردند [۵]. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش درصد کاهش سطح مقطع و ضریب اصطکاک، نیروی فورج به صورت غیرخطی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش زاویه ورودی قالب و کاهش نرخ تغذیه پیشروی، نیروی مورد نیاز فورج کاهش می‌یابد. سنجرى و همکارانش، در سال ۲۰۰۷، فرایند فورج شعاعی را جهت کاهش نیروی فورج توسط بهینه‌کردن صفحه خنثی به روش آپراند آنالیز کردند [۶]. نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش زاویه قالب، محل صفحه خنثی به ناحیه شروع منطقه فورج نزدیک شده و نیروی لازم جهت انجام فرایند کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش ضریب اصطکاک، موقعیت صفحه خنثی به ناحیه شروع منطقه فورج نزدیک و سبب افزایش نیروی فورج می‌گردد. در این مقاله آلیاژ اینکونل ۷۱۸ در چهار مرحله، توسط دستگاه آهنگری شعاعی SX55 فورج می‌گردد. هدف از این مقاله، پیش‌بینی نیروی مورد نیاز جهت فورج سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ و بررسی امکان تولید این محصول با دستگاه مورد نظر می‌باشد. همچنین تغییرات دما در کل فرایند جهت جلوگیری از تغییرات متالورژیکی و توزیع کرنش در هر مرحله مورد بررسی قرار گرفته شده است. در نهایت نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی با نتایج عملی مقایسه شده است که تطابق خوبی میان نتایج شبیه‌سازی و عملی وجود دارد.

## مدلسازی فرایند فورج شعاعی

فرایند فورج شعاعی از جمله فرایندهایی است که تحت تنش‌های حرارتی و تغییر شکل قرار دارد. در این مقاله، برای پیش‌بینی نیروهای مورد نیاز فورج از آنالیز کوپل حرارت به‌همراه جابه‌جایی استفاده شده است. همچنین پارامترهایی چون سرعت پیشروی قطعه‌کار، ماکزیمم سرعت قالب و شکل هندسی قالب‌ها ثابت در نظر گرفته شده است. در این مقاله به‌منظور مدلسازی فرایند فورج شعاعی به‌صورت یک‌چهارم مدل شده است. در نتیجه نیروهای به‌دست آمده از واکنش قالب‌ها، دو برابر در نظر گرفته شده است. در این مقاله، به‌منظور مدلسازی فرایند فورج شعاعی و تعیین اثر حرارت بر نیروهای فورج از نرم‌افزار تجاری المان محدود آباکوس<sup>۲</sup> استفاده شده است. در شکل ۲ مدل المان محدود برای شبیه‌سازی فرایند آهنگری شعاعی چهارچکشیه نمایش داده شده است.



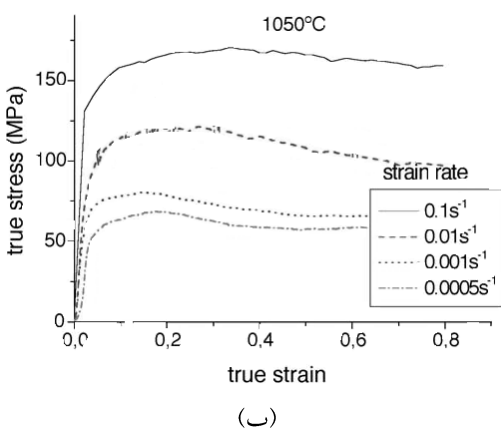
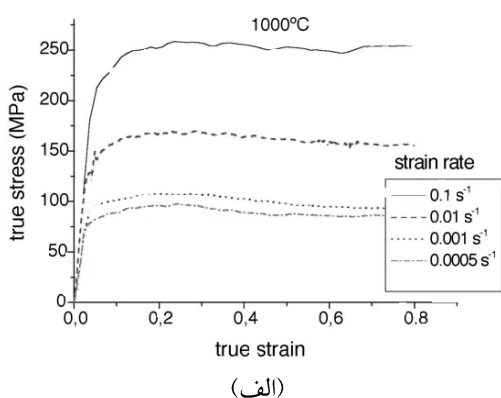
شکل ۲. مدل المان محدود فرایند فورج شعاعی چهارچکشیه

جهت تعیین تماس قالب‌ها و قطعه‌کار از ترکیب اصطکاک کولمب و تنش برشی محدودشونده استفاده شده است. در فرایندهای شکل‌دهی داغ، ضریب اصطکاک کولمب یا خشک، برابر ۰/۸ در نظر گرفته می‌شود و تنش برشی محدودشونده از رابطه شماره ۱ محاسبه می‌شود:

$$\tau = \frac{m \bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \quad (1)$$

به‌طوری‌که در این رابطه  $\bar{\sigma}$  میانگین تنش جریان و  $m$  ثابت اصطکاک است که معمولاً برای فرایندهای شکل‌دهی سرد ۰/۱۵ [۷] و برای فرایندهای داغ ۱ منظور می‌شود [۸].

شبیه‌سازی فرایندهای شکل‌دهی داغ به پارامترهایی چون شکل اولیه قطعه‌کار، شکل قالب‌ها، رفتار ماده، دمای اولیه قطعه‌کار، اصطکاک و جز این‌ها وابسته است. در این مقاله، رفتار ماده جهت شبیه‌سازی با استفاده از آزمون دیلاتومتر، که نوع آزمون فشاری داغ است، در دما و نرخ کرنش‌های مختلف تعیین می‌گردد. آزمایش‌های انجام‌شده در دماهای ۱۰۰۰ و ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد با نرخ کرنش‌های ۰/۱، ۰/۰۱، ۰/۰۰۱ و ۰/۰۰۰۵ بر ثانیه در شکل ۳ نمایش داده شده است [۹].



شکل ۳. نمایش رفتار الاستو-ویسکوپلاستیک

اینکونل ۷۱۸ در فرایند شکل‌دهی داغ

الف) دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد

ب) دمای ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد [۹]

چگالی آلیاژ اینکونل ۷۱۸ برابر ۸۲۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب است که برای استفاده در شبیه‌سازی نیز همین عدد

استفاده شده است. ضریب پواسون  $0/3$  و ضریب تبدیل کار به گرما  $0/9$  انتخاب شده است. مابقی داده‌ها به‌عنوان تابعی از دما در جدول ۱ ارائه شده است [۱۰]. در هر مرحله از فورج، انتقال حرارت تشعشع با ضریب  $0/8$ ، انتقال حرارت همرفت با ضریب ۱۱ وات بر متر مربع کلونین و انتقال حرارت هدایتی در زمان تغییر شکل اتفاق می‌افتد. همچنین، جهت انجام شبیه‌سازی مورد نظر، در هنگام فورج، انتقال حرارت هدایت تماسی بین تمامی اجزاء از جمله قالب‌ها،

قطعه‌کار و بازوی مکانیکی در نظر گرفته شده است. در محاسبات، مدت زمان خروج قطعه‌کار از کوره تا دستگاه، ۵۰ ثانیه در نظر گرفته شده است. همچنین، ضریب انتقال حرارت بین قالب‌ها و قطعه‌کار  $9000$  وات بر متر مربع کلونین و ضریب هدایت بین فک‌ها و قطعه‌کار  $3000$  وات بر متر مربع کلونین لحاظ شده است [۱۲]. اطلاعات اصلی دستگاه و قطعه‌کار در جدول شماره ۲ آمده است.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و مکانیکی اینکونل ۷۱۸ [۱۰-۱۱]

مدول یانگ پاسکال	ضریب انبساط طولی	ضریب رسانایی گرمایی وات بر متر کلونین	دما درجه سانتی‌گراد
$2/05 \times 10^{11}$	$1/26 \times 10^{-5}$	۱۱/۱	۲۰
$1/99 \times 10^{11}$	$1/34 \times 10^{-5}$	۱۲/۲	۱۰۰
$1/92 \times 10^{11}$	$1/34 \times 10^{-5}$	۱۳/۶	۲۰۰
$1/87 \times 10^{11}$	$1/38 \times 10^{-5}$	۱۵/۲	۳۰۰
$1/81 \times 10^{11}$	$1/41 \times 10^{-5}$	۱۷	۴۰۰
$1/75 \times 10^{11}$	$1/44 \times 10^{-5}$	۱۸/۹	۵۰۰
$1/69 \times 10^{11}$	$1/48 \times 10^{-5}$	۲۰/۸	۶۰۰
$1/61 \times 10^{11}$	$1/54 \times 10^{-5}$	۲۲/۴	۷۰۰
$1/50 \times 10^{11}$	$1/68 \times 10^{-5}$	۲۴/۴	۸۰۰
$1/36 \times 10^{11}$	$1/68 \times 10^{-5}$	۲۶/۱	۹۰۰
$1/20 \times 10^{11}$	$1/70 \times 10^{-5}$	۲۸	۱۰۰

جدول ۲. اطلاعات اصلی دستگاه آهنگری شعاعی و قطعه‌کار

اینکونل ۷۱۸	ماده
۱۲۰۰ تن	نیرو به ازای هر قالب
۴	تعداد قالب‌ها
۱۱۲۰ درجه سانتی‌گراد	دمای اولیه قطعه‌کار
۳۵۰ درجه سانتی‌گراد	دمای اولیه قالب‌ها
۴۰۰ درجه سانتی‌گراد	دمای اولیه بازوی مکانیکی
۲۰۰ بر دقیقه	تعداد ضربه قالب‌ها
۲ متر در دقیقه	سرعت پیشروی دستگاه

حرکت قالب‌ها به‌صورت یک تابع هارمونیک توسط یک سازوکار لنگ با شعاع لنگ ۱۹ میلی‌متر انجام می‌شود.

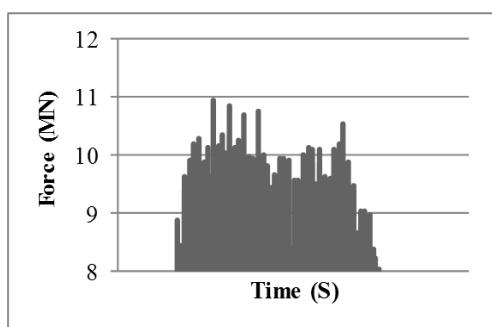
دستگاه‌های آهنگری شعاعی، با توجه به ابعاد و ظرفیت تناژ دستگاه به انواع گوناگونی تقسیم می‌شوند. دستگاه مورد

نظر در این مقاله دستگاه SX55 با ظرفیت تناژ ۱۲۰۰ تن به ازای هر چکش یا قالب می‌باشد. در شکل ۴ دستگاه آهنگری شعاعی چهارچکشه SX55 نمایش داده شده است.



شکل ۴. دستگاه آهنگری شعاعی SX55

کاهش خواص مکانیکی، همچنین انتخاب دمای کمتر از دمای مجاز سبب کاهش کارپذیری و افزایش نیروی مورد نیاز جهت انجام فرایند می‌شود. این محدوده دمایی بین دمای ۹۲۰ درجه سانتی‌گراد تا نقطه ذوب موضعی قرار دارد. پس لازم است همواره دمای هر نقطه از شمش در این محدوده قرار داشته باشد. همان‌گونه که قبلاً اشاره شد مدت زمان انتقال قطعه‌کار از کوره تا دستگاه ۵۰ ثانیه در نظر گرفته شده است. در این مدت قطعه‌کار به‌طور آزادانه انتقال حرارت تابشی و همرفتی با محیط اطراف انجام می‌دهد. شکل ۶ کانتور دما پس از گذشت زمان ۵۰ ثانیه را نمایش می‌دهد.



شکل ۵. نیروی لازم برای انجام فرایند از طریق شبیه‌سازی در دمای ۱۱۲۰ درجه سانتی‌گراد

## نتایج

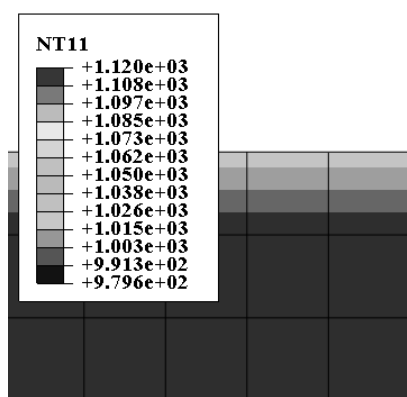
همان‌گونه که اشاره شد، در این طرح انجام‌پذیری فرایند با شرایط ذکرشده بررسی شده است. بر این اساس لازم است تا پارامترهای تأثیرگذار در فرایند استخراج و مورد بررسی قرار گیرد.

## اثر دمای اولیه قطعه‌کار بر نیروی فورج

دمای اولیه قطعه‌کار یکی از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در نیروی مورد نیاز فورج و تأمین خواص مکانیکی محصول مورد نظر است. در این مقاله فرایند آهنگری شعاعی با چهار دمای اولیه ۱۱۲۰، ۱۰۸۰، ۱۰۲۰ و نهایتاً ۹۸۰ درجه سانتی‌گراد در پاس اول شبیه‌سازی شده است که البته با توجه به شرایط ذکرشده، دمای ۱۱۲۰ درجه سانتی‌گراد مناسب‌ترین دما بوده است. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود ماکزیمم نیرو در دمای اولیه ۱۱۲۰ درجه سانتی‌گراد برابر با ۱۰/۹ مگانیوتن بوده است که این مقدار نیرو در محدوده تناژ دستگاه مورد نظر می‌باشد.

## بررسی دما و تغییرات آن در حین فرایند

در این فرایند لازم است تا دما همواره در محدوده مشخصی کنترل شود. افزایش دما منجر به تغییرات متالورژیکی و

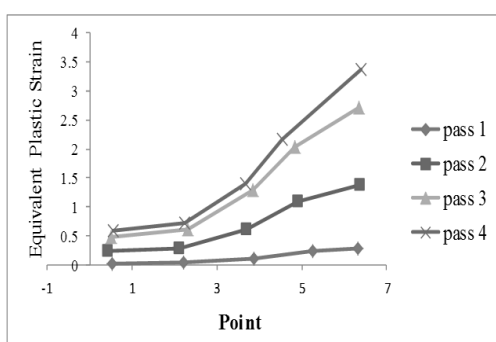


شکل ۶. نمایش کانتور دمای قطعه‌کار پس از گذشت ۵۰ ثانیه

همان‌طور که از شکل مشخص است، دمای سطح قطعه‌کار در شبیه‌سازی بین ۱۰۶۲ تا ۱۰۷۳ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. پس از انجام فرایند به‌صورت عملی، دمای

## توزیع کرنش ذخیره شده

در فرایندهای مختلف شکل دهی، علاوه بر شکل نهایی، خواص قطعه کار نیز جزء پارامترهای مورد نظر است. در واقع برای رسیدن به خواص مورد نظر باید کرنش ذخیره شده در هر نقطه از قطعه کار از یک حد بحرانی بیشتر باشد. شکل ۸ کرنش ذخیره شده در قطعه کار طی چهار پاس فرایند آهنگری شعاعی را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود کرنش ذخیره شده در ماده از سطح قطعه کار به مغز آن کاهش می یابد.



شکل ۸ نمایش کرنش ذخیره شده در قطعه کار

این نتایج با تحقیقاتی که توسط لورنس انجام شده است تطابق خوبی دارد و بیان کننده این مطلب است که میزان کرنش اعمالی به قطعه کار از سطح به مغز آن کم می شود.

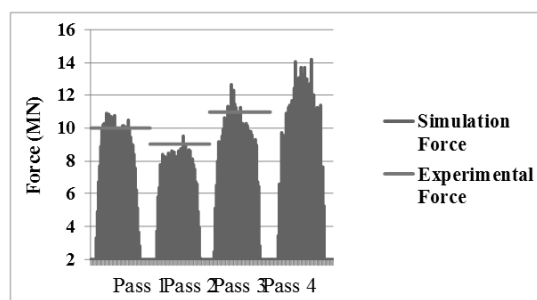
## جمع بندی

نتایج حاصل از این مقاله نشان داد که با افزایش دمای اولیه قطعه کار و همچنین حفظ دما در محدوده کارگرم، نیروی وارده به دستگاه کاهش می یابد. همچنین نتایج به دست آمده از انجام شبیه سازی و عملی نشان داد که بزرگی نیروی محاسبه شده در مرحله سوم به حد نهایی دستگاه نزدیک می باشد و احتمال قطع فرایند وجود دارد. در عمل طبق پیش بینی شبیه سازی در پاس چهارم دستگاه متوقف گردید. لذا توصیه می گردد در پاس سوم و چهارم، مقدار کاهش سطح مقطع و یا مقدار پیشروی قطعه کمتر در نظر گرفته شود. لازم به ذکر است که دستگاه SX55 برای

اندازه گیری شده برابر ۱۰۶۰ درجه سانتی گراد بوده که تطابق خوبی را با نتیجه شبیه سازی دارد. مقدار دما در طول کل فرایند شبیه سازی بین ۹۲۰ تا ۱۱۸۰ درجه سانتی گراد قرار داشت که این دما در محدوده مجاز کارگرم سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ قرار دارد.

## نیروی لازم برای انجام فرایند

برای بررسی امکان تولید عملی سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸، باید نیروهای به دست آمده از شبیه سازی، از نیروهای قابل اعمال توسط دستگاه کمتر باشد. برای این منظور، نیروهای مراحل مختلف فرایند آهنگری شعاعی توسط نرم افزار استخراج شده و همراه با نیروهای به دست آمده از آزمایش عملی در شکل ۷ نمایش داده شده است



شکل ۷. نیروی لازم برای انجام فرایند از طریق شبیه سازی و عملی

همان طور که مشاهده می شود نیروها به صورت پالس هایی نشان داده شده اند. هر پالس با اولین تماس چکش با قطعه شروع و با جداشدن از قطعه به پایان می رسد. با توجه به اینکه دستگاه در هر دقیقه دوپست ضربه به قطعه کار می زند، در هر دقیقه دوپست پالس برای نیرو ثبت می شود. در پاس چهارم نیروی به دست آمده از شبیه سازی برابر با ۱۴ مگانیوتن بود که در واقعیت در پاس چهارم به علت بالارفتن نیروها در حد بیشتر از ظرفیت دستگاه، باعث توقف دستگاه شد.

در سایر مراحل شبیه سازی، همان طور که از شکل مشاهده می شود، نیروی محاسبه شده با استفاده از نرم افزار تطابق بسیار نزدیکی با مقدار واقعی آن دارد.

- [7] G. D. Lahoti, T. Altan, "Analysis of the radial forging process for manufacturing of rods and tubes", *ASME J. Eng. Ind.*, 98, PP. 265-271, 1976.
- [8] Joseph P., Domblesky., Rajiv Shivpuri. "Development and validation of a finite element model for multiple-pass radial forging", *Journal of Material Processing Technology* 55, P. 433, 1995.
- [9] Thomas.A., Wahabi M. EI., Cabrera J. M., Prado J. M., "High temperature deformation of INCONEL 718", *Journal of Material processing technology* 177, p.47, (2006.
- [10] Special Metals, www.specialmetals.com (accessed Aug 30, 2013)
- [11] Department of Defense, *Handbook Metallic Materials and Elements for Aerospace Vehicle Structure*, January 2003
- [12] Harrer O., Wallner S., Wieser V., Sommitsch C., "Radial forging of a nickel base alloy at different temperatures", steel grips 4, NO. 5, PP. 340-344, 2006.

#### پی‌نوشت

1. Inconel 718
2. Abaqus FEA<sup>®</sup>

حرکت بدون بار خود حدود ۴/۵ تا ۵ مگانیوتن نیرو مصرف می‌کند. این مقدار نیرو صرف شتاب‌دادن چکش‌ها، محور خارج از مرکز و دیگر قطعات ارتباطی میان موتور و چکش‌ها می‌باشد. بر همین اساس به نیروهای محاسبه‌شده توسط نرم‌افزار این مقدار افزوده شده است. همچنین طبق تحقیق انجام‌شده، مقدار کرنش ذخیره‌شده در فرایند فورج شعاعی چهارچکشه از سطح قطعه‌کار به‌طرف مرکز آن کاهش می‌یابد.

#### مآخذ

- [1] G. D. Lahoti, and T. Altan, "Analysis and optimization of the radial forging process for gun barrels", *U.S. Army Report*, p. 12, September 1974.
- [2] S. Khayatzaheh, M. Poursina, H. Golestanian, "A Simulation of Hollow and Solid Products in Multi-Pass Hot Radial Forging Using 3D – FEM Method", *Springer/ESAFORM*, pp. 371-374, 2008.
- [3] Ghaei A, Movahhedy M. R, and Karimi Taheri A, "Study of the effects of die geometry on deformation in the radial forging process", *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 156-163, 2005.
- [4] Laurence A., Jackman M. S., Ramesh and Robin Forbes Jones "Development of a Finite Element Model for Radial Forging of Super alloys", *the minerals, Metals & Materials Society*, pp.103-113, 1992.
- [5] Foode P., Poursina M., Fadaei Tehrani A. "A parametric study on a hot radial forging force".
- [6] Sanjari M., Karimi Taheri A., Ghaei A., "Prediction of neutral plane and effects of the process parameters in radial forging using an upper bound solution", *Journal of Materials Processing Technology* 186, pp. 147-153, 2007.

