مجله مهندسی مکانیک مدرس، آذر 1395، دوره 16، شماره 9، ص‌ص 366-374

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

مطالعه ماشینکاری سوپر-آلیاژ اینکونل 718 و عوامل مؤثر در فرآیند با کمک طراحی آزمایش

مجید خدادادی[1]، حسین امیرآبادی[2*]، سیدمحمدحسین سیدکاشی[3]

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه بیرجند، بیرجند
2- دانشیار، مهندسی مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه بیرجند، بیرجند
3- استادیار، مهندسی مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه بیرجند، بیرجند
* بیرجند، صندوق پستی 97175/376، hamirabadi@birjand.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 03 تیر 1395
پذیرش: 26 مرداد 1395
ارائه در سایت: 03 مهر 1395

کلید واژگان:
ماشینکاری متعامد
اینکونل 718
شکل براده
طراحی آزمایش

چکیده

آلیاژهای اینکونل، خانواده‌ای از سوپرآلیاژهای پایه نیکل هستند که محدوده وسیعی از ترکیب‌ها و خواص را در برمی‌گیرند. اینکونل 718 جزئی از این سوپر آلیاژها می‌باشد که به دلیل خواص مکانیکی مناسب مانند استحکام خزشی و مقاومت در برابر خوردگی در دمای بالا، در صنایع هوافضا مورد استفاده قرار می‌گیرد. علیرغم این مزیت‌ها، اینکونل 718 به‌سختی ماشینکاری می‌شود. در این مقاله فرآیند ماشینکاری متعامد اینکونل 718 به منظور بررسی پارامترهای موثر بر نیرو، دما و شکل براده شبیه‌سازی شده‌است. شبیه‌سازی به صورت دو بعدی و با کمک نرم-افزار آباکوس انجام گردید. برای تعیین رفتار ماده از ضرایب جانسون-کوک، و برای مدل‌سازی شرایط اصطکاکی از فاکتور برشی ثابت (m) در سطح تماس براده-ابزار استفاده شد. سپس نتایج حاصل از شبیه‌سازی با مقادیر تجربی مقایسه گردید که تطابق خوبی بین آن‌ها وجود داشت. پس از اعتبار سنجی نتایج شبیه‌سازی، به کمک روش طراحی آزمایش‌ها، میزان اثر ضریب اصطکاک، سرعت برشی، پیشروی و زاویه براده ابزار بر روی نیروی وارد بر ابزار، دمای لبه برنده ابزار و شکل براده بدست آمد. طبق نتایج بدست‌آمده، پارامترهای پیشروی با 30% و ضریب اصطکاک با 19% بیشترین تاثیر را بر روی نیروی وارد بر ابزار دارند. پارامترهای زاویه براده با 31%، سرعت برشی با 21% و پیشروی با 20% بیشترین تاثیر را بر روی دمای لبه برنده ابزار دارند. همچنین پارامترهای ضریب اصطکاک و پیشروی با 25% بیشترین تاثیر را بر روی شکل براده دارند.

Study on Machining of Inconel 718 Super Alloy and Effective Process Parameters Using Design of Experiment Method

Majid Khodadadi, Hossein Amirabadi*, Seyed Mohammad Hossein Seyedkashi

Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran
* P.O.B. 97175/376, Birjand, Iran, hamirabadi@birjand.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 23 June 2016
Accepted 16 August 2016
Available Online 24 September 2016

Keywords:
Orthogonal cutting
Inconel 718
Chip morphology
Design of Experiment

ABSTRACT

Inconel alloys are a family of nickel-based superalloys that consist of a wide range of compositions and properties. Inconel 718 is one of the superalloys used in the aerospace industry due to its good mechanical properties; such as high corrosion and creep resistance at high temperatures. Despite these advantages, Inconel 718 is among the most difficult materials to be machined. In this paper, a finite element model for orthogonal machining of Inconel 718 was developed in order to investigate the effective parameters on the force, temperature and chip morphology. The plastic behavior of material was simulated with Johnson-cook material model, and constant shear friction factor (m) is used to model the friction between chip and tool interface. Then, the simulation results were compared with experimental values and good agreement was found between them. After validating the simulation results, the effect of coefficient friction, cutting speed and rake angle, on cutting edge temperature, force on the tool and chip morphology was achieved by using design of experiments (DOE) method. According to the results, feed rate (30% contribution) and friction coefficient (19% contribution) have the greatest impact on the force on the tool. Rake angle (31% contribution), cutting speed (21% contribution) and feed rate (20% contribution) are the most effective parameters on the cutting edge temperature. The friction coefficient and feed rate (both with 25% contribution) have the greatest impact on the chip geometry.

1- مقدمه

فرایندهای ماشینکاری به دلیل قابلیت‌های منحصر به‌فرد هنوز به عنوان عمومی‌ترین روش تولید به‌کار می‌روند. علیرغم مزایای شناخته شده این فرآیند، انتخاب پارامترهای موثر در فرآیند معمولاً با روش سعی و خطا انجام می‌شود. این امر باعث افزایش هزینه و زمان تدارک محصول می‌گردد. از طرفی برخی از خروجی‌ها را نمی‌توان به صورت دقیق از آزمایش‌های تجربی

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
M. Khodadadi, H. Amirabadi, S. M. H. Seyedkashi, Study on Machining of Inconel 718 Super Alloy and Effective Process Parameters Using Design of Experiment Method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 9, pp. 366-374, 2016 (in Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-17]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.9.28.7]

بدست آورد و بعضی از این خروجی‌ها مانند توزیع تنش بر روی قطعه‌کار را نمی‌توان از آزمایش‌های تجربی بدست آورد. لذا روش اجزای محدود برای مدلسازی و شبیه‌سازی فرایند برش پیشنهاد گردیده است.

در صنایع هوافضا، به دلیل کارکرد قطعات تحت شرایط دمایی و تنش‌های بسیار بالا، نیاز به آلیاژهایی است که از ویژگی‌های مکانیکی و مقاومت بالا برخوردار باشند. یکی از آلیاژهایی که به‌طور گسترده در صنایع هوافضا مورد استفاده قرار می‌گیرد، اینکونل 718 از خانواده سوپر-آلیاژهای پایه نیکل است که جزء موادی هستند که به سختی ماشینکاری می‌شوند. این آلیاژها در دمای بالا نیز استحکام خود را حفظ می‌کنند و بنابراین ماشینکاری آن‌ها در مقایسه با فولاد نیاز به نیروهای بالاتری دارد. از طرفی طول تماس بین براده و ابزار نیز کوچک است که باعث افزایش تنش‌های وارد بر ابزار می‌شود. کارسختی که تا 30 هم می‌رسد، مشکل دیگر در ماشینکاری این آلیاژها می‌باشد که باعث فرسایش شدید در پهلوی ابزار می‌شود. انتقال حرارت پایین که باعث بالا رفتن دما در قطعه‌کار و ابزار می‌شود نیز مشکل دیگر است زیرا دما نسبت به فولاد خیلی افزایش می‌یابد [2,1]. بنابراین بسیار مهم است که فرآیند ماشینکاری این آلیاژ به‌دقت بررسی شده و پارامترهای موثر بر آن مشخص شوند.

موسو و همکاران [3] فرآیند ماشینکاری اینکونل 718 را با نرم‌افزار دفرم[1] شبیه‌سازی و اثر سرعت برشی و شعاع نوک ابزار را بر روی توزیع تنش، کرنش و دما بررسی کردند. کوربن و همکاران [4] از جت پرفشار آب در فرآیند ماشینکاری اینکونل 718 استفاده کردند و اثر آن را بر دما و نیروی فرآیند، ضخامت براده، طول تماس براده با ابزار و تنش‌های تماسی مورد مطالعه قرار دادند. جعفریان و همکاران [5] ضرایب مختلف جانسون-کوک را که از مراجع بدست آمده برای اینکونل 718 به‌کار برده، نتایج شبیه‌سازی را با نتایج تجربی مقایسه و مناسبترین ضرایب را انتخاب کردند. سپس با انتخاب این ضرایب در شبیه‌سازی اجزای محدود، تغییرات میکروساختاری را در این آلیاژ بررسی نمودند. این محققین در پژوهشی دیگر [6] با کمک الگوریتم ژنتیک و شبکه‌های عصبی، اثر سرعت برشی، عمق برش و پیشروی را بر تنش باقیمانده و زبری سطح بررسی و مقادیر بهینه آن را بدست آوردند. کورتاباریا و همکاران [7] اثر پیشروی و عمق برش را بر روی تنش باقیمانده با روش اجزاء محدود بررسی کردند. خویی و همکاران [8] به صورت تجربی و با کمک روش طراحی آزمایش، اثر پارامترهای سرعت برشی، پیشروی و جنس ابزار را بر روی نیروی برش، زبری سطح و سایش سطح آزاد ابزار مورد مطالعه قرار دادند. اوزل و همکاران [9] به‌کمک نرم‌افزارهای آباکوس[2] و دفرم به شبیه‌سازی سه‌بعدی فرآیند ماشینکاری اینکونل 718 پرداخته و نتایج آن دو را با هم مقایسه کردند. همچنین برای مدل‌سازی رفتار ماده از ضرایب جانسون-کوک و جانسون-کوکِ اصلاح‌شده استفاده کرده و در نهایت اثر سرعت برش را بر روی توزیع تنش، کرنش و دما مورد ارزیابی قرار دادند. تاکور و همکاران [10] ماشینکاری اینکونل 718 را در سرعت‌های زیاد مورد بررسی قرار دادند و به‌کمک روش تاگوچی پارامترهای موثر بر فرآیند را مشخص نمودند. در این تحقیق سرعت برشی، پیشروی و عمق برش به عنوان پارامترهای ورودی در نظر گرفته شده و اثر آن‌ها بر روی نیروهای ماشینکاری مورد بررسی قرار گرفت. هادی و همکاران [11] فرزکاری اینکونل 718 را در شرایط فرزکاری موافق و مخالف مورد بررسی قرار دادند. سپس اثر عمق برش، پیشروی و سرعت برشی را بر روی سایش ابزار و شکل براده بررسی و نتایج را در دو حالت فرزکاری مقایسه نمودند. رانا و همکاران [12] ماشینکاری اینکونل 718 را به کمک نرم‌افزار دفرم و به صورت دوبعدی شبیه‌سازی نموده و اثر سرعت برشی را بر روی نیروهای ماشینکاری، شکل براده و خصوصیات سطح (سختی و اندازه دانه) بررسی نمودند. جعفریان و همکاران [13] به کمک الگوریتم بهینه‌سازی، ضرایب جدیدی برای معادله جانسون-کوک اینکونل 718 بدست آورده و از آن در شبیه‌سازی فرآیند ماشینکاری این سوپر آلیاژ استفاده نمودند. سپس به کمک معادله زنر-هولومون و هال-پچ و نتایج شبیه‌سازی، اندازه دانه‌ها و سختی را پیش‌بینی نمودند. همچنین اثر شکل لبه برنده بر روی تغییرات میکروساختاری سطح ماشینکاری بررسی شد. جعفریان و همکاران [14] تنش‌های باقیمانده را در ماشینکاری اینکونل 718 بررسی نمودند و به کمک شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک اثر سرعت برش، عمق برش و پیشروی را بر روی تنش باقیمانده پیش‌بینی کرده و حالت بهینه این پارامترها را بدست آوردند. جعفریان و همکاران [15] بارهای حرارتی و لایه تغییر ساختار یافته را مورد بررسی قرار دادند. ابتدا فرآیند را به کمک نرم‌افزار دفرم و در حالت‌های مختلف سرعت برش، پیشروی و عمق برش شبیه‌سازی نموده و سپس تاثیر شعاع لبه ابزار، شعاع نوک ابزار و اثر سختی قطعه‌کار، بر روی دما و عمق لایه تغییر ساختاریافته مورد بررسی قرار گرفت.

همانطور که اشاره شد، در تحقیقات گذشته اثر پارامترهای فرآیند بر روی ابزار و شکل براده به‌طور کامل بررسی نشده‌است. شناخت دقیق فرایند ماشینکاری و پیش‌بینی تأثیر پارامترهای مختلف بر آن، قبل از انجام آزمایش‌های تجربی اهمیت بسیاری دارد. با دانستن و کنترل پارامترهای مؤثر در فرایند، می توان مدل‌هایی ارائه داد که نتایج را به خوبی پیش‌بینی کرده و برای بسیاری از فرایندهای ماشینکاری قابل استفاده باشد. به همین منظور در این مقاله فرآیند ماشینکاری متعامد بر روی قطعه‌ای از جنس اینکونل 718 صورت گرفت و سپس فرآیند به‌کمک نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شد و نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی مقایسه شد و تطابق بین نتایج بررسی شد. سپس با کمک روش طراحی آزمایش و با استفاده از یک طرح عاملی دوسطحی (2^k)، اثر ضریب اصطکاک، سرعت برشی، نرخ پیشروی و زاویه براده ابزار بر روی نیرو، دمای لبه برنده ابزار و شکل براده بررسی شد. سپس یک معادله رگرسیونی برای پیش‌بینی مقادیر نیرو، دمای لبه برنده ابزار و شکل براده ارائه گردید.

2- مدل‌سازی اجزاء محدود

در این تحقیق از نرم‌افزار آباکوس برای شبیه‌سازی فرآیند ماشینکاری قطعه-کاری از جنس اینکونل 718 استفاده شده‌است. شبیه‌سازی به صورت دوبعدی و با فرض برش متعامد و تحلیل انجام شده از نوع کوپل مکانیکی-حرارتی می‌باشد. به‌منظور تحلیل کوپل مکانیکی-حرارتی از یک ضریب ثابت 0.9 که ضریب تبدیل کار پلاستیکی به گرما می‌باشد، استفاده شد که معمولا در شبیه‌سازی ماشینکاری همین ضریب به‌کار می‌رود [4]. ابزار در مقایسه با قطعه‌کار و به منظور سهولت در شبیه‌سازی، به عنوان جسم صلب در نظر گرفته شده‌است. جهت شبیه‌سازی شرایط تماسی، از ضریب اصطکاک μ و فاکتور اصطکاک برشی ثابت (m) استفاده شده‌است. تمام انرژی اصطکاکی به گرما تبدیل می‌شود که از این گرما 80% به قطعه‌کار و 20% به ابزار منتقل می‌شود [16]. خواص مکانیکی و حرارتی قطعه‌کار در جدول 1 نشان داده شده‌است.

جهت مش‌بندی قطعه‌کار از 3600 المان از نوع CPE4RT استفاده شده-است. از آنجا که قطعه‌کار در طی فرآیند ماشینکاری در محل تماس با ابزار،

[1] DEFORM
[2] ABAQUS

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-17]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.9.28.7]

دما و نرخ کرنش‌های بالایی را تجربه می‌کند، به‌کارگیری صحیح منحنی تنش سیلان نقش مهمی در صحت نتایج شبیه‌سازی فرآیند ماشینکاری ایفا می‌کند. یکی از معروف‌ترین و پرکاربردترین روابط، معادله جانسون-کوک می‌باشد که تغییر شکل پلاستیک ماده را تحت شرایط دمایی، کرنشی و نرخ کرنشی مختلف بیان می‌کند. تقریبا در اکثر تحقیقاتِ انجام‌شده، از این رابطه جهت شبیه‌سازی فرآیند براده برداری استفاده شده‌است. رابطه (1) معادله جانسون-کوک را نمایش می‌دهد که از سه بخش تشکیل شده و به ترتیب از چپ به راست، تاثیرات کرنش‌سختی، اثرات نرخ کرنشی و نرم شدن حرارتی را در برمی‌گیرد. در رابطه (1)، σ مقدار تنش سیلان قطعه‌کار، $\dot{\varepsilon}$ نرخ کرنش موثر، $\dot{\varepsilon}_0$ نرخ کرنش مرجع، ε معرف کرنش قطعه‌کار و T نیز معرف دمای فعلی قطعه‌کار می‌باشد. پارامتر A معرف تنش تسلیم، B معرف ضریب استحکام، C معرف ضریب حساسیت به آهنگ کرنش، n معرف ضریب کرنش سختی و m ضریب نرم شدن حرارتی می‌باشند که از آزمون فشار هاپکینسون به‌دست می‌آیند و در جدول 2 آمده‌است. در جدول 3 نیز ضرایب آسیب قطعه‌کار آورده شده‌است.

$$\sigma = [A + B\varepsilon^n]\left[1 + C\ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right]\left[1-\left(\frac{T - T_{\text{room}}}{T_{\text{melt}} - T_{\text{room}}}\right)^m\right] \quad (1)$$

نتایج شبیه‌سازی جهت اعتبار سنجی، با کاری تجربی مقایسه شده‌است. نتایج تجربی بر روی یک میله با قطر اولیه 347 میلیمتر و با استفاده از یک ماشین تراش کنترل عددی انجام شده‌است. برای ماشینکاری از ابزار سندویک[1] با یک براده شکن استفاده گردید. این ابزار بر روی یک ابزارگیر سندویک[2] نصب شده به‌طوریکه زاویه براده 6- درجه و زاویه آزاد 4 درجه ایجاد شود. میله به کمک ابزار شیار، به چند دیسک با فاصله 4 میلیمتر و با ضخامت 2 میلیمتر تقسیم می‌شود که از هر دیسک برای یک آزمایش استفاده می‌شود. عملیات ماشینکاری از نوع روتراشی و به صورت متعامد می‌باشد که لبه ابزار به صورت عمود بر جهت پیشروی می‌باشد و در شکل 1-a نشان داده شده‌است. مطابق شکل 1-b یک دینامومتر پیزوالکتریکی کیستلر[3] جهت اندازه‌گیری نیروی برش و یک ترموکوپل نوع K جهت اندازه‌گیری دما به‌کار رفته است. سرعت پیشروی 0.05 میلیمتر در هر دور و سرعت برش 60 متر بر دقیقه انتخاب شده‌است.

جدول 1 خواص مکانیکی و حرارتی قطعه‌کار [17]

Table 1 Thermal and mechanical properties of work piece [17]

قطعه‌کار	اینکونل718
چگالی	8190 kg/m^3
ضریب انتقال حرارت	11 W/mc
ضریب انبساط حرارتی	8×10^{-6} /°C
گرمای ویژه	435 J/kg°C
مدول الاستیک	185 GPa
ضریب پواسون	0.33
دمای ذوب	1300 °C

جدول 2 ضرایب جانسون-کوک برای مدل‌سازی رفتار پلاستیک اینکونل718 [5]

Table 2 Constant parameters of the Johnson-Cook material model for Inconel 718 [5]

ضریب	مقدار
A	1290 MPa
B	895 MPa
n	0.526
C	0.016
m	1.55

جدول 3 ضرایب آسیب جانسون-کوک برای اینکونل 718 [17]

Table 3 The failure parameters of the Johnson-Cook model for Inconel 718 [17]

ضریب	مقدار
d_1	0.11
d_2	0.75
d_3	-1.45
d_4	0.04
d_5	0.89

3- نتایج حاصل از شبیه‌سازی

در فرآیند براده برداری بوجود آمدن تنش‌های کششی در ناحیه تغییر شکل اولیه منجر به لغزش صفحات کریستالی ماده و جدا شدن براده از قطعه‌کار می‌شود. در ماشینکاری مواد سخت مانند اینکونل 718، این تنش‌های کششی تا سطح آزاد قطعه ادامه می‌یابند و سبب شکست موضعی قطعه و در نهایت شکل‌گیری براده دندانه اره‌ای می‌گردد. این شکستگی موجب می‌شود که دندانه براده با تغییر شکل کم، شکل گیرد. در حالیکه در ناحیه برشی تغییر شکل پلاستیک شدیدی همراه با تغییر اندازه دانه اعمال می‌گردد که اصطلاحاً این ناحیه، باند آدیاباتیکِ برشی نامیده می‌شود. در این حالت، براده دندانه اره‌ای شکل می‌گیرد که مرکب از یک ناحیه کوچک با تغییر شکل زیاد ماده و یک ناحیه بزرگتر است که در آن از تغییر شکل ماده می‌توان چشم‌پوشی کرد. این پدیده به خاطر نرم شدن حرارتی توأم با تبلور مجدد دینامیکی اتفاق می‌افتد [18]. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نیز تشکیل براده دندانه اره‌ای را به‌خوبی نشان می‌دهد (شکل 2). در جدول 4 نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی مقایسه شده تا از درستی نتایج اطمینان حاصل شود. اختلاف ناچیز بین آن‌ها، نشان از صحت مدل شبیه‌سازی دارد.

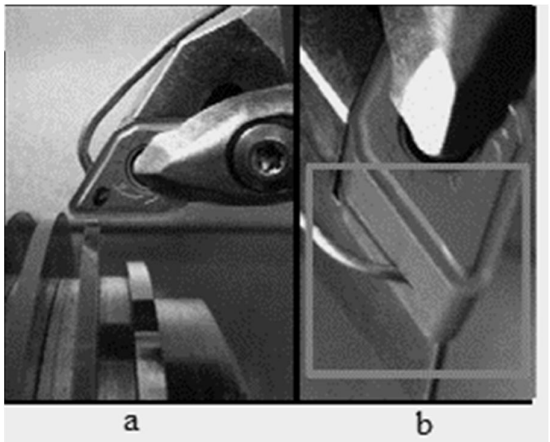

Fig. 1 Experimental test equipment; (a) the orthogonal machining test, (b) embedded thermocouple for measuring the temperature

شکل 1 تجهیزات آزمایش تجربی؛ a) عملیات روتراشی و موقعیت ابزار و قطعه‌کار در ماشینکاری متعامد b) ترموکوپل استفاده شده برای اندازه‌گیری دما

[1] DNMG150616 Sandvik
[2] DDJNR/L Sandvik
[3] Kistler9257

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-17]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.9.28.7]

در این مقاله پارامترهای خروجی (پاسخ‌ها)، نیروی وارد بر ابزار، دمای لبه برنده ابزار و شکل براده می‌باشند. جهت بررسی اثر هر یک از پارامترهای ورودی بر این پاسخ‌ها، از روش طراحی آزمایش‌ها با استفاده از طرح عاملی 2^k استفاده گردید. در این طرح عاملی، برای هر پارامتر دو سطح در نظر گرفته می‌شود و k تعداد عوامل ورودی است که در این تحقیق چهار عامل در نظر گرفته‌شد (k=4). این چهار عامل عبارتند از ضریب اصطکاک، سرعت برشی، پیشروی و زاویه براده ابزار. بنابراین تعداد 16 آزمایش طراحی و انجام گردید. در جدول5، این عوامل و سطوح آن‌ها آورده شده‌است. برای بررسی صحت فرضیه خطی بودن اثر پارامترها، نقاط مرکزی[1] نیز در نظر گرفته شده‌است. برای بررسی رابطه بین متغیرهای خروجی با پارامترهای ورودی از روش تحلیل واریانس با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب نسخه 17.1.0 استفاده شد.

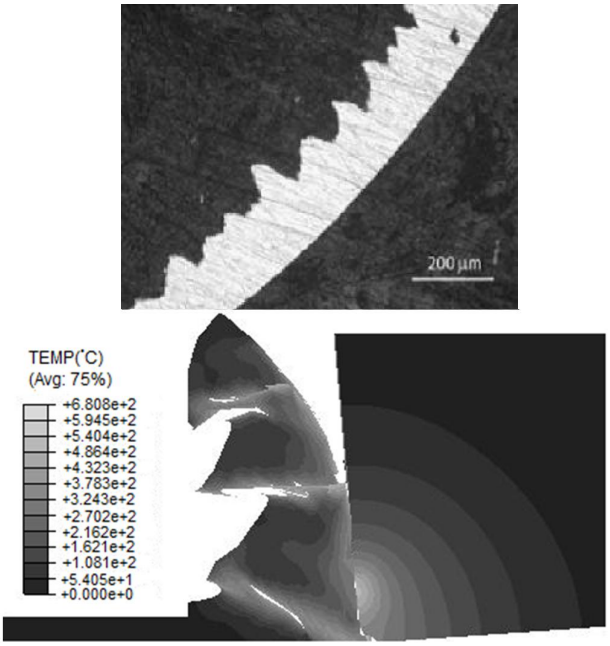

Fig. 2 Sawtooth chip formation in simulated and experimental
شکل 2 تشکیل براده دندانه ارهای در شبیه‌سازی و کار تجربی

جدول 4 مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی و نتایج تجربی

Table 4 Compare the simulation and experimental results

نتایج به ازای	نیروی وارد بر ابزار(kN)		دمای لبه برنده ابزار(^{0}C)	
پیشروی	0.05mm/rev	0.1mm/rev	0.05mm/rev	0.1mm/rev
تجربی	472.6	541.5	793	969
شبیه‌سازی	403.2	451.2	681	823
خطا	14.7%	16.6%	14.1%	15%

جدول 5 پارامترهای فرآیند ماشینکاری و سطوح آن‌ها

Table 5 Parameters and levels of machining process

علامت	پارامتر	سطح پایین(-)	سطح بالا(+)
A	ضریب اصطکاک (μ)	0.1	0.5
B	سرعت برشی (v – متر بر دقیقه)	60	120
C	پیشروی (f – میلیمتر بر دور)	0.05	0.1
D	زاویه براده (α)	-8	8

[1] Center point

3-1- بررسی نیروی وارد بر ابزار

پس از انجام شبیه‌سازی فرآیند و استخراج میزان نیروی وارد بر ابزار برای هر آزمایش، جدول تحلیل واریانس را بدست آورده که در جدول 6 نشان داده شده‌است. در تحلیل واریانس ابتدا باید نرمال بودن توزیع داده‌ها اثبات شود که از نمودار احتمال نرمال مانده‌ها می‌توان کمک گرفت. در این نمودار مانده‌ها باید در اطراف یک خط راست قرار گیرند که در شکل 3 نشان داده شده‌است و نرمال بودن توزیع داده‌ها را نشان می‌دهد.

در این تحلیل، سطح اطمینان[2] 95% انتخاب شده، یعنی نتایج تحلیل با ضریب اطمینان 95% صحیح است. بدین‌ترتیب پارامتری معنادار است که مقدار P آن کمتر از 0.05 باشد. مطابق جدول 6، پارامترهای μ، f، α و اثرات متقابل $v\times f$، $\mu\times v$ و $\mu\times\alpha$ معنادارند و بقیه پارامترها اثر ناچیزی بر نیروی وارد بر ابزار دارند. همچنین برای پارامتر انحناء در جدول 6 مقدار P=0.206 بدست آمد که نشان می‌دهد نقاط میانی موثر واقع نشده‌اند. لذا نتایج خروجی طراحی آزمایش و فرضیه خطی بودن اثر پارامترها، صحیح می‌باشد. ستون آخر در جدول تحلیل واریانس، درصد مشارکت و میزان تاثیر هر یک از پارامترها بر تغییرات نیرو است. در شکل 4 نمودار پرتو نشان داده شده که این نمودار بیانگر میزان تاثیر هریک از پارامترها بر تغییرات نیرو می‌باشد. مطابق شکل 4 و جدول 6 پارامترهای پیشروی با 30%، ضریب اصطکاک با 19% و اثر متقابل $\mu\times v$ با 12% بیشترین تاثیر را بر روی نیرو دارند.

ضریب تعیین R^2 نیز جهت بررسی دقت پیش‌بینی مدل رگرسیونی، در انتهای جدول 6 آمده‌است. ضریب تعیین، درصدی است که میزان تغییرپذیری خروجی را به‌وسیله کل پارامترهای ورودی توجیه می‌کند [19]. با توجه به ضریب تعیین بدست‌آمده، حدود 98.15% تغییرپذیری در نیروی وارد بر ابزار به‌وسیله پارامترهای موثر مشخص‌شده در بالا توجیه می‌شود که نشان از مناسب بودن تحلیل دارد.

برای بررسی اثر هر پارامتر بر روی متغیر خروجی ابتدا باید اثرات متقابل را بررسی نمود. شکل 5 اثر متقابل $\mu\times v$، شکل 6 اثر متقابل $\mu\times\alpha$ و شکل 7 اثر متقابل $v\times f$ را نشان می‌دهد. با توجه به شکل 5 در هر دو سرعت برشی 60 و 120 متر بر دقیقه، با افزایش ضریب اصطکاک نیروهای اصطکاکی افزایش و در نتیجه نیروی وارد بر ابزار افزایش می‌یابد. در ضریب اصطکاک

جدول 6 جدول تحلیل واریانس برای نیروی وارد بر ابزار

Table 6 Analysis of variance for force on the tool (N)

منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار P	درصد مشارکت
μ	1	19009.5	56.81	0.001	19
v	1	937.9	2.8	0.155	4
f	1	46991.4	140.43	0.000	30
α	1	4280.4	12.79	0.016	9
$\mu\times v$	1	8014.7	23.95	0.004	12
$\mu\times f$	1	2206.7	6.59	0.050	6.5
$\mu\times\alpha$	1	3083.0	9.21	0.029	7.7
$v\times f$	1	3507.6	10.48	0.023	8
$v\times\alpha$	1	2.6	0.01	0.933	0.2
$f\times\alpha$	1	263.3	0.79	0.416	2
Curvature	1	705.0	2.11	0.206	
Error	5	334.6			
Total	16				
R-Sq=98.15%					

[2] Confidence level

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-17]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.9.28.7]

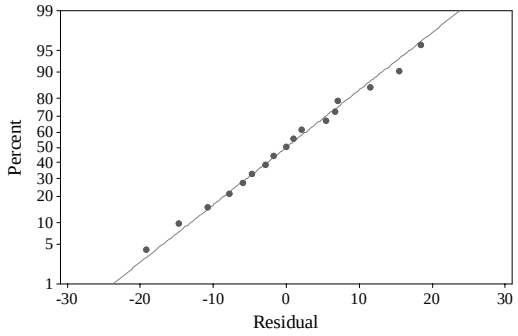

Fig. 3 Normal probability plot of residuals for force on the tool

شکل3 نمودار احتمال نرمال مانده‌ها برای نیروی وارد بر ابزار

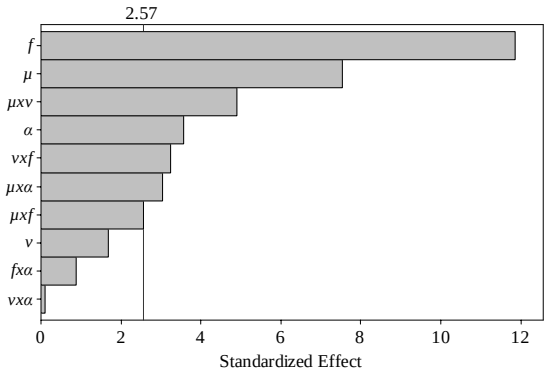

Fig. 4 Pareto chart of force on the tool

شکل 4 نمودار پرتو برای نیروی وارد بر ابزار

0.1 با افزایش سرعت برشی نیرو افزایش می‌یابد، اما در ضریب اصطکاک 0.5 نیرو با افزایش سرعت برشی کاهش می‌یابد. با افزایش سرعت برشی دو عمل متضاد روی می‌دهد. یکی سخت شدن فلز در حین عمل برش و دیگری عمل بازیابی. این تضاد را این‌گونه می‌توان توجیه کرد که در حالت اصطکاک 0.1 عمل سخت شدن بر عمل بازیابی چیره می‌شود اما در اصطکاک 0.5 به دلیل افزایش دمای حاصل از اصطکاک زیاد، عمل بازیابی بر سخت شدن فلز غلبه کرده و نیرو کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه نیروی وارد بر ابزار باید کم باشد تا عمر ابزار افزایش یابد، لذا برای رسیدن به حداقل نیرو باید سرعت برشی در سطح پایین و ضریب اصطکاک در سطح بالا باشد. با افزایش زاویه براده، ابزار تیزتر شده و راحت‌تر به داخل قطعه‌کار نفوذ می‌کند و در نتیجه تغییر شکل پلاستیکی براده و نیروی وارد بر ابزار کاهش می‌یابد که در شکل 6 این موضوع نشان داده شده‌است. همچنین مطابق شکل 7 با افزایش مقدار پیشروی ضخامت براده‌ی تغییرشکل نیافته، افزایش می‌یابد و در زمان کوتاه‌تر مواد بیشتری از قطعه‌کار جدا می‌گردد که سبب افزایش نیرو می‌شود. با توجه به شکل 6 باید زاویه براده ابزار در سطح بالا، و مطابق شکل 7 سرعت پیشروی در سطح پایین خود باشند تا نیروی وارد بر ابزار کم شود. با توجه به اینکه اثر همه پارامترها با استفاده از اثرات متقابل مشخص شد، نیاز به بررسی اثرات اصلی نمی‌باشد.

در صورتی که بین متغیرها رابطه وجود داشته باشد، می توان آن را با الگوهای ریاضی بیان کرد. معمولا چنین الگویی ممکن است از نوع خطی یا غیر خطی باشد که به آن معادله رگرسیون می‌گویند. در رگرسیون هدف آن است که با استفاده از معادله رگرسیون و به کمک یک نمونه تصادفی و بعضی روش‌های آماری، رفتار متغیر وابسته را با آگاهی از مقادیر و مشخصات متغیرهای مستقل، پیش بینی کنیم [20]. با حذف پارامترهای غیر موثر، معادله رگرسیون برای نیرو بدست می‌آید که به‌کمک این معادله می‌توان نیروی وارد بر ابزار را برحسب پارامترهای موثر پیش‌بینی کرد. رابطه (2) معادله رگرسیون نیرو را نشان می‌دهد.

$$\begin{aligned}\text{force}(N) = {} & 50.5 + 331.9\mu + 2.344v + 3240f \\ & + 0.558\alpha - 3.73\mu \times f - 8.68\mu \\ & \times \alpha - 19.74v \times f\end{aligned} \quad (2)$$

3-2- بررسی دمای لبه برنده ابزار

جدول تحلیل واریانس مربوط به دمای لبه برنده ابزار در جدول 7 نشان داده شده‌است. همان‌طور که از جدول 7 پیداست پارامترهای v، f، α و اثر متقابل $\mu\times f$ معنادارند و بقیه پارامترها اثر ناچیزی بر دمای لبه برنده ابزار دارند. همچنین برای پارامتر انحناء در جدول 7 مقدار P=0.193 بدست آمد که نشان می‌دهد نقاط میانی موثر واقع نشده‌اند و فرآیند را می‌توان با در نظر گرفتن دو سطح برای پارامترهای ورودی، بررسی و تحلیل نمود. توزیع نرمال داده‌ها نیز با کمک نمودار احتمال نرمال مانده‌ها انجام می‌شود. مطابق ستون آخر جدول7 و نمودار پرتو در شکل 8، پارامترهای زاویه براده با 31%، سرعت برشی با 21%، پیشروی با 20% و اثر متقابل $\mu\times f$ با 11% بیشترین تاثیر را بر روی دمای ابزار دارند. در انتهای جدول 7 ضریب تعیین آمده‌است. با توجه به ضریب تعیین بدست‌آمده در حدود 98.84% تغییرپذیری در دمای لبه برنده

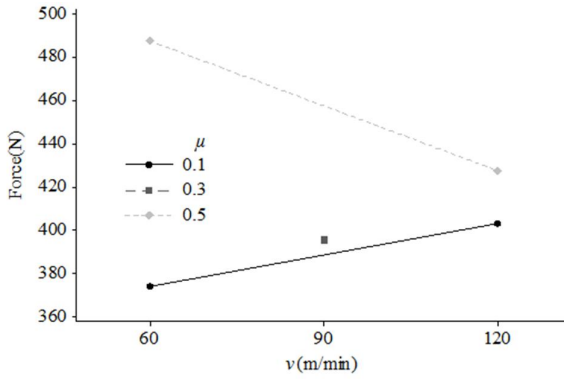

Fig. 5 Interaction plot of friction and federate on force on the tool

شکل 5 نمودار اثر متقابل ضریب اصطکاک و سرعت برشی بر نیروی وارد بر ابزار

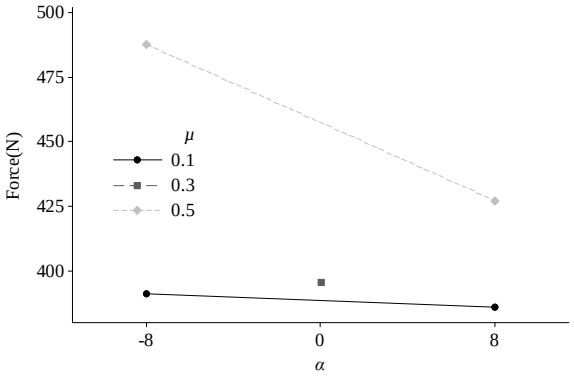

Fig. 6 Interaction plot of friction coefficient-rake angle on force on the tool

شکل 6 اثر متقابل ضریب اصطکاک و زاویه براده بر نیروی وارد بر ابزار

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-17]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.9.28.7]

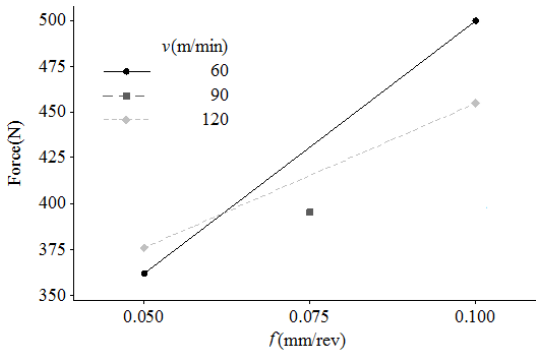

Fig. 7 Interaction plot of federate-cutting speed on force on the tool

شکل 7 اثر متقابل سرعت برشی و پیشروی بر نیروی وارد بر ابزار

ابزار، به‌وسیله پارامترهای موثر مشخص‌شده در بالا توجیه می‌شود و دقت مناسب مدل رگرسیونی توجیه می‌شود.

اثر متقابل $\mu \times f$ در شکل 9 نشان داده شده‌است. با توجه به شکل 9 با افزایش مقدار پیشروی، سطح تماس ابزار و براده افزایش یافته و در اثر افزایش نیروهای اصطکاکی دما نیز بالا می‌رود. بنابراین به‌منظور کاهش دمای لبه برنده ابزار، ضریب اصطکاک باید در سطح بالا و پیشروی در سطح پایین باشند. اثرات اصلی v و α در شکل 10 نشان داده شده‌است. با توجه به شکل 10 مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت برشی و کاهش زاویه براده، دمای لبه برنده ابزار افزایش می‌یابد. زیرا با افزایش سرعت برشی انتقال حرارت در نواحی برش کاهش یافته و منجر به افزایش دما در ناحیه برش و لبه برنده ابزار می‌شود. از طرفی با کاهش زاویه براده، هنگام جدا شدن براده، تغییر شکل پلاستیکی بیشتری در ناحیه برش بوجود می‌آید که منجر به افزایش دما در ناحیه برش می‌شود.

معادله رگرسیون دما مطابق رابطه (3) بدست آمد که رابطه بین دما و پارامترهای موثر بر دما را نشان می‌دهد.

$$\text{temp} = 354.2 - 188.1\mu + 0.815v + 156f - 4.555\alpha + 2637\mu \times f \quad (3)$$

3-3- بررسی شکل براده

جهت بررسی شکل براده از کمیتی با عنوان میزان اره‌ای شدن[1] استفاده

جدول 7 جدول تحلیل واریانس برای دمای لبه برنده ابزار

Table 7 Analysis of variance for temperature of the cutting edge

منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار P	درصد مشارکت
μ	1	60.1	0.58	0.482	1.7
v	1	9555.1	91.73	0.000	21
f	1	8977.6	86.19	0.000	20
α	1	21243.1	203.94	0.000	31
$\mu \times v$	1	232.6	2.23	0.195	3
$\mu \times f$	1	2782.6	26.71	0.004	11
$\mu \times \alpha$	1	495.1	4.75	0.081	4.8
$v \times f$	1	540.6	5.19	0.072	4.6
$v \times \alpha$	1	3.1	0.03	0.871	0.3
$f \times \alpha$	1	248.1	2.38	0.183	3
Curvature	1	235.3	2.26	0.193	
Error	5	104.2			
Total	16				
R-Sq=98.84%					

[1] Degree of segmentation

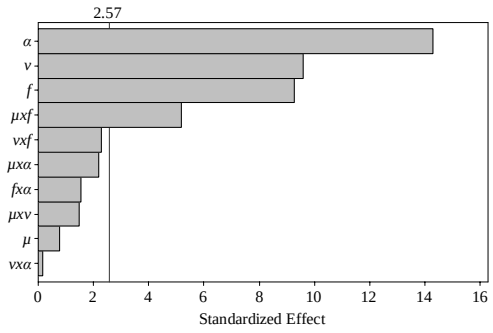

Fig. 8 Pareto chart of temperature of the cutting edge

شکل 8 نمودار پرتو برای دمای لبه برنده ابزار

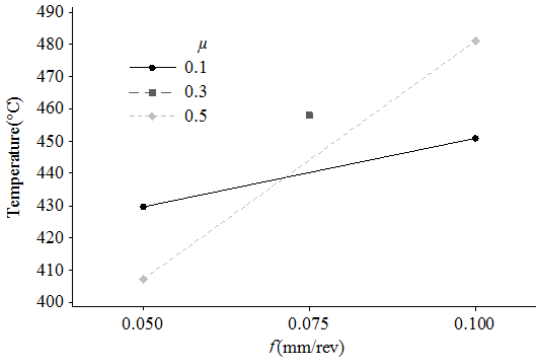

Fig. 9 Interaction plot of friction coefficient and feedrate on temperature of the cutting edge

شکل 9 اثر متقابل ضریب اصطکاک و پیشروی بر دمای لبه برنده ابزار

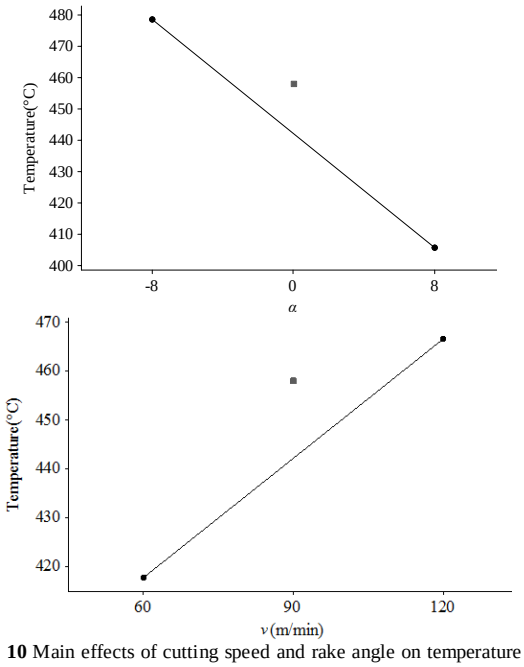

Fig. 10 Main effects of cutting speed and rake angle on temperature of the cutting edge

شکل 10 نمودار اثرات اصلی سرعت برشی و زاویه براده بر دمای لبه برنده ابزار

می‌شود که از رابطه (4) به شرح زیر بدست می‌آید [21].

$$DOS = (d_1 - d_2)/d_1 \quad (4)$$

در رابطه (4)، d_1 ارتفاع قله و d_2 گودی براده را نشان می‌دهد. هر چه مقدار

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-17]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.9.28.7]

DOS بیشتر باشد، ارتفاع دندانه بیشتر است که این خود باعث ایجاد نیروی متغیر و کاهش عمر ابزار می‌شود. جدول تحلیل واریانس مربوط به شکل براده (*DOS*) در جدول 8 نشان داده شده‌است.

مطابق جدول 8، پارامترهای μ و f و اثرات متقابل $\mu\times\alpha$ و $f\times\alpha$ معنادارند و بقیه پارامترها اثر ناچیزی بر شکل براده دارند. همچنین برای پارامتر انحناء در جدول 8 مقدار P=0.788 بدست آمد که نشان می‌دهد نقاط میانی موثر واقع نشده‌اند. با کمک نمودار احتمال نرمال مانده‌ها توزیع نرمال داده‌ها بررسی می‌شود. با توجه به ستون آخر جدول 8 و نمودار پرتو در شکل 11، پارامترهای ضریب اصطکاک و پیشروی با 25% و اثرات متقابل $f\times\alpha$ و $\mu\times\alpha$ به‌ترتیب با 16% و 12% بیشترین تاثیر را بر روی *DOS* دارند. با توجه به ضریب تعیین بدست‌آمده که در حدود 94.56% است، مناسب بودن مدل مشخص می‌شود.

نمودار اثر متقابل $\mu\times\alpha$ در شکل 12 و اثر متقابل $f\times\alpha$ در شکل13 آمده است. با افزایش مقدار *DOS* مقدار نیروی متغیر بیشتر می‌شود که باعث کاهش عمر ابزار و کیفیت سطح قطعه‌کار خواهد شد. لذا تا حد امکان باید مقدار *DOS* کم باشد. برای این منظور با توجه به شکل 12 و 13 باید ضریب اصطکاک و زاویه براده، کاهش یابد (در سطح پایین خود باشند) و مقدار پیشروی افزایش یابد.

معادله رگرسیون برای *DOS* به صورت رابطه (5) می‌باشد که مقدار آن بر حسب پارامترهای موثر بدست می‌آید.

$$DOS = 0.1711 + 0.1992\,\mu - 1.556\,f + 0.01318\,\alpha - 0.01173\,\mu\times\alpha - 0.1288\,f\times\alpha \quad (5)$$

جدول 8 جدول آنالیز واریانس برای *DOS*

Table 8 Analysis of variance for *DOS*

منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار P	درصد مشارکت
μ	1	0.025402	30.87	0.003	25
v	1	0.004111	5.00	0.076	10
f	1	0.024202	29.41	0.003	25
α	1	0.000000	0.00	0.996	0
$\mu\times v$	1	0.000511	0.62	0.466	3.6
$\mu\times f$	1	0.000058	0.07	0.802	1.3
$\mu\times\alpha$	1	0.005634	6.85	0.047	12
$v\times f$	1	0.000378	0.46	0.528	3.1
$v\times\alpha$	1	0.000586	0.71	0.437	3.8
$f\times\alpha$	1	0.010617	12.90	0.016	16
Curvature	1	0.000066	0.08	0.788	
Error	5	0.000823			
Total	16				
R-Sq=94.56%					

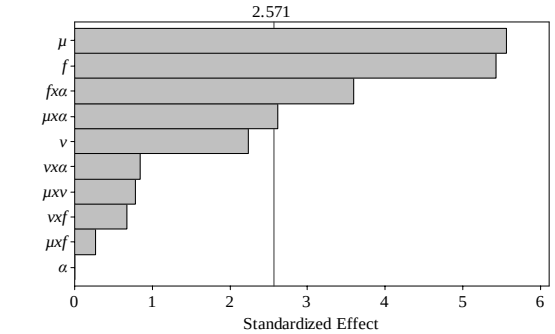

Fig. 11 Pareto chart for *DOS*

شکل 11 نمودار پرتو برای *DOS*

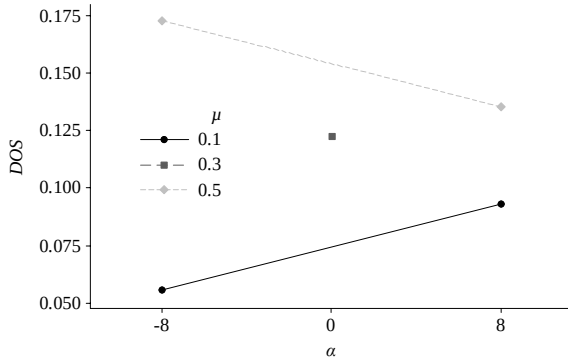

Fig. 12 Interaction plots of friction coefficient and rake angle on *DOS*

شکل 12 نمودااثرمتقابل ضریب اصطکاک-زاویه براده بر *DOS*

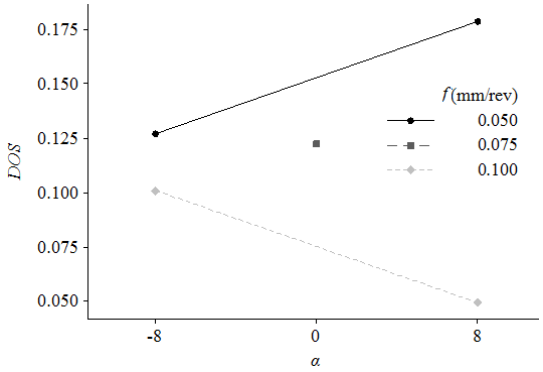

Fig. 13 Interaction plots of feedrate and rake angle on *DOS*

شکل 13 اثر متقابل پیشروی و زاویه براده بر *DOS*

3-4- بهینه‌سازی پارامترها

در بخش‌های قبلی، هر پاسخ خروجی به‌طور جداگانه بررسی گردید و پارامترهای موثر بر هر خروجی مشخص شد و تنظیمات مربوط به هر عامل ورودی برای بهینه کردن پاسخ بدست آمد. اما به دلیل وجود اثرات متقابل، تغییر در یک عامل ورودی می‌تواند در راستای بهبود یک پاسخ عمل کند درحالیکه اثر عکس بر روی پاسخ دیگر داشته باشد. با استفاده از بهینه‌سازی پاسخ[1] که بر اساس روش بهینه‌سازی مطلوبیت عمل می‌کند، می‌توان حالتی را پیدا کرد که در آن مجموعه‌ای از متغیرهای ورودی، یک پاسخ یا مجموعه‌ای از پاسخ‌ها را بهینه می‌کنند. در واقع، در این روش، از بین سطوح انتخاب‌شده، بهترین تنظیمات برای رسیدن به هدف مطلوب تعیین می‌شوند. در این فرایند، دستیابی به حداقل نیروی ابزار، حداقل دمای لبه برنده و حداقل *DOS* می‌باشد. حالت هر یک از متغیرها که بتوان هر سه پاسخ خروجی را بهینه کرد، در شکل 14 نشان داده شده‌است. با توجه به شکل 14 با قرار دادن مقدار ضریب اصطکاک در مقدار 0.1، سرعت برشی در مقدار 60 دور در دقیقه، پیشروی در مقدار 0.05 دور بر میلیمتر و زاویه براده در مقدار 8 درجه، هر سه خروجی نیروی وارد بر ابزار، دمای لبه برنده ابزار و *DOS* به حالت بهینه می‌رسند. با توجه به این تنظیمات، مقدار بهینه برای نیرو 318.5 نیوتن، برای دما 358 درجه سانتیگراد و برای *DOS* مقدار 0.169 بدست می‌آید. برای ارزیابی بهینه کردن یک پاسخ از پارامتر مطلوبیت فردی[2] (d) و برای ارزیابی بهینه کردن یک مجموعه از پاسخ‌ها از پارامتر مطلوبیت مرکب[3]

[1] Response optimizer
[2] Individual desirability
[3] Composite desirability (D)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-17]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.9.28.7]

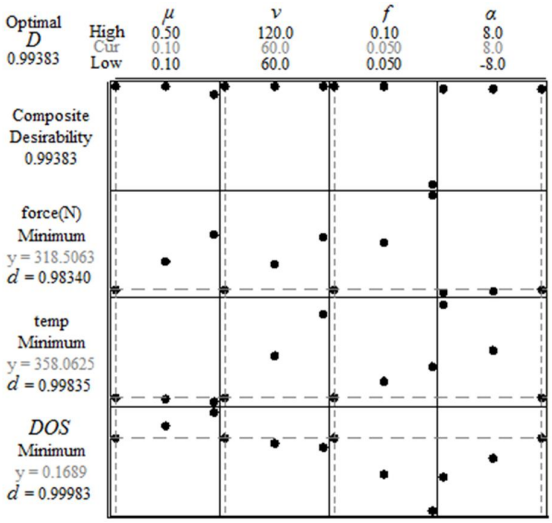

Fig. 14 Response optimizer plot

شکل 14 نمودار بهینه‌سازی پاسخ

(D) استفاده می‌شود که مقدار آن بین صفر و یک می‌باشد. مقدار یک نشان دهنده حالت ایده‌آل و مقدار صفر نشان دهنده این است که یک یا چند پاسخ خارج از محدوده قابل قبول است.

4- نتیجه‌گیری

در این مقاله فرآیند ماشینکاری اینکونل 718 به‌کمک نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شد. سپس با مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی مدل عددی مورد صحت‌سنجی قرار گرفت. سپس با روش طراحی آزمایش عاملی 2^k همراه با نقاط مرکزی، اثر پارامترهای ضریب اصطکاک، سرعت برشی، پیشروی و زاویه براده ابزار بر روی نیروی وارد بر ابزار، دمای لبه برنده ابزار و شکل براده بررسی شد. مشخص گردید که نقاط مرکزی موثر واقع نیستند. برای بررسی رابطه بین متغیرهای خروجی با پارامترهای ورودی از روش تحلیل واریانس و نرم‌افزار مینی‌تب استفاده شد. نتایج حاصل از تحلیل واریانس به شرح زیر می‌باشد:

- پارامترهای μ، f، α و اثرات متقابل $\mu\times\nu$، $\nu\times f$ و $\mu\times\alpha$ بر نیروی وارد بر ابزار اثر معنادار دارند. پارامترهای پیشروی با 30%، ضریب اصطکاک با 19% و اثر متقابل $\mu\times\nu$ با 12% بیشترین تاثیر را بر روی نیرو دارند. برای اینکه نیرو در کمترین مقدار خود باشد، باید سرعت برشی، ضریب اصطکاک و پیشروی در کمترین مقدار خود، و زاویه براده ابزار در بیشترین مقدار باشند.

- پارامترهای ν، f، α و اثر متقابل $\mu\times f$ پارامترهای موثر بر دمای لبه برنده ابزارمی‌باشند. زاویه براده با 31%، سرعت برشی با 21%، پیشروی با 20% و اثر متقابل $\mu\times f$ با 11% بیشترین تاثیر را بر روی دمای ابزار دارند. به‌منظور کاهش دمای لبه برنده ابزار، ضریب اصطکاک باید در سطح بالا و پیشروی در سطح پایین باشند. همچنین با کاهش سرعت برشی و افزایش زاویه براده، دمای لبه برنده ابزار کاهش می‌یابد.

- پارامترهای μ و f و اثرات متقابل $\mu\times\alpha$ و $f\times\alpha$ نیز پارامترهای موثر بر DOS (شکل براده) هستند. ضریب اصطکاک و نرخ پیشروی با 25% و اثرات متقابل $f\times\alpha$ و $\mu\times\alpha$ به‌ترتیب با 16% و 12% بیشترین تاثیر را بر روی شکل براده دارند. با کاهش ضریب اصطکاک و کاهش زاویه براده و افزایش مقدار پیشروی، مقدار DOS کاهش می‌یابد (دندانه‌ها ریزتر می‌شوند).

- در ضریب اصطکاک 0.1، سرعت برشی 60 دور در دقیقه، پیشروی 0.05 دور بر میلیمتر و زاویه براده 8 درجه، هر سه خروجی نیروی وارد بر ابزار، دمای لبه برنده ابزار و DOS به حالت بهینه می‌رسند. با توجه به این تنظیمات، از بین سطوح انتخاب شده، مقدار بهینه برای نیرو 318.5 نیوتن، برای دما 358 درجه سانتیگراد و برای DOS مقدار 0.169 بدست آمد.

5- مراجع

[1] J. Lorentzon, N. Ja¨rvstra, Modelling tool wear in cemented-carbide machining alloy 718, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* , Vol. 48, No. 10, pp. 1072– 1080, 2008.

[2] A. Jawaid, S. Koksal, S. Sharif, Cutting performance and wear characteristics of PVD coated and uncoated carbide tools in face milling Inconel 718 aerospace alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 116, No. 1, pp. 2-9, 2001.

[3] E. Muthu1, K. Senthamarai, S. Jayabal, Finite element simulation in machining of Inconel 718 nickel based super alloy, *International Journal of Advanced Engineering Applications*, Vol. 5, No. 3, pp. 22-27, 2012.

[4] C. Courbon, V. Sajn, D. Kramar, J. Rech, F. Kosel, J. Kopac, Investigation of machining performance in high pressure jet assisted turning of Inconel 718: A numerical model, *International Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 211, No. 11, pp. 1834– 1851, 2011.

[5] F. Jafarian, M. ImazCiaran, D. Umbrello, P. J. Arrazola, L. Filice, H.Amirabadi, Finite element simulation of machining Inconel 718 alloy including microstructure changes, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 88, November 2014, pp. 110–121, 2014.

[6] F. Jafarian, H. Amirabadi, M. Fattahi, Improving surface integrity in finish machining of Inconel 718 alloy using intelligent systems, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 71, No. 5, pp. 817–827, 2014.

[7] A. Kortabarria, P.J. Arrazola, K. Ostolaza, Multi revolution finite element model to predict machining induced residual stresses in Inconel 718, *Procedia CIRP*, Vol. 8, pp. 111 – 116, 2013.

[8] A. Khuii, H. Fathi, M. Farahnakian, M. Razfar, Machinability investigation of Inconel 657 in High-speed turning, *Journal of Modern Processes in Manufacturing and Production*, Vol. 3, No. 1, pp. 27-34, 2014.

[9] T. Ozel, I. Lianos, J. Soriano, P. J. Arrazola, 3D finite element modeling of chip formation process for machining inconel 718: comparison of FE software predictions, *Machining Science and Technology*, Vol. 15, No. 1, pp. 21-46, 2011.

[10] D. Thakur, B. Ramamoorthy, L. Vijayaraghavan, Optimization of high speed turning parameters of superalloy Inconel 718 material using Taguchi technique, *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, Vol. 16, No. 1, pp. 44-50, 2009.

[11] M. A. Hadi, J.A. Ghani, C.H. Che Haron, M. S. Kasim, Comparison between up-milling and down-milling operations on tool wear in milling Inconel 718, *Procedia Engineering*, Vol. 68, pp. 647-653, 2013.

[12] K. Rana, S. Rinaldi, S. Imbrogno, G. Rotellab, D. Umbrello, R. M. Saoubi, S. Ayvar-Soberanis, 2D FE prediction of surface alteration of Inconel 718 under machining condition, *Procedia CIRP*, Vol. 48, pp. 227-230, 2016

[13] F. Jafarian, D. Umbrello, B. Jabbaripour, Identification of new material model for machining simulation of Inconel 718 alloy and the effect of tool edge geometry on microstructure changes, *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 66, pp. 273-284, 2016.

[14] F. Jafarian, H. Amirabadi, J. Sadri, Experimental measurement and optimization of tensile residual stress in turning process of Inconel718 superalloy, *Measurement*, Vol. 63, pp. 1-10, 2015.

[15] F. Jafarian, H.Soleimani, H.Amirabadi, H. Soleimani, R. Soleimani, Experimental investigation and 3D simulation of machining of Inconel 718 for evaluation of thermal loads and depth of the affected layer, Modares Mechanical Engineering, *Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 19-23, 2015 .(in Persian فارسی)

[16] F. Zemzemi, J. Rech, W. Ben Salem, A. Dogui, P. Kapsa, Identification of a friction model at tool/chip/workpiece interfaces

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-17]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.9.28.7]

in dry machining of AISI4142 treated steels, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 8, pp. 3978-3990, 2009.

[17] B. E. Echavarri, Flow and Fracture Behaviour of High Performance Alloys,Ph. D. Tesis, *Universidad Politécnica de Madrid*, 2012.

[18] J. C. Aurich, H. Bil, 3D Finite Element Modelling of Segmented Chip Formation, *Annals of the CIRP*, Vol. 55, No. 1, pp. 47-50, 2006.

[19] D. C. Montgomery, *Design and analysis of experiments*, John Wily & Sons, pp. 221-222, 1991.

[20] A. Rezaei, A. Soltani, *An Introduction to applied regression analysis*, Isfahan University of Technology, pp. 1-7, 2013. (in Persian فارسی)

[21] G. Chen, C. Ren, X. Yang, X. Jin, T. Guo, Finite element simulation of high-speed machining of titanium alloy (Ti–6Al–4V) based on ductile failure model, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 56, No. 9, pp. 1027-1038, 2011.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-17]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.9.28.7]