



## مدل سازی و بهینه سازی نیروی ماشین کاری و زبری سطح در فرایند فرزکاری سوپر آلیاژ اینکونل 738 با کمک شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک

لیلا ایمانی<sup>1</sup>، علی رحمانی هنزکی<sup>2\*</sup>، رضا حمزه لوی<sup>2</sup>، بهنام داودی<sup>3</sup>

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

2- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

3- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

\*تهران، صندوق پستی 1678815811، [a.rahmai@sru.ac.ir](mailto:a.rahmai@sru.ac.ir)

### چکیده

### اطلاعات مقاله

فرزکاری یکی از مهم ترین و متداول ترین روش های براده برداری بوده و از دیرباز مطالعات زیادی بر روی آن انجام شده است. ضرورت مطالعه ماشین کاری سوپر آلیاژهای پایه نیکل به علت استحکام بالا و کاربردهای مختلفی که در صنایع هوا فضا، نیروگاهی و ... دارند همچنان احساس می گردد. نیروی ماشین کاری و زبری سطح بدست آمده دو پارامتر مهم قابلیت ماشین کاری سوپرآلیاژها هستند که به دلیل اهمیت بالای آن مورد مطالعه قرار گرفته است. در این پژوهش نیز برای به منظور بررسی زبری سطح اینکونل 738 در فرایند فرزکاری پرداخته شده و جهت بدست آوردن پارامترهای بهینه پس از مدل سازی و پیش بینی اثر پارامترهای ورودی بر زبری سطح، بهینه سازی پارامترها جهت رسیدن به حداقل زبری صورت گرفته است. بدین منظور چهار پارامتر سرعت برشی، پیشروی، عمق برش محوری و وجود یا عدم وجود خنک کننده به عنوان متغیرهای تحقیق در نظر گرفته شده است. سرعت برشی و پیشروی هر یک در چهار سطح و عمق برش محوری و خنک کننده در دو سطح انتخاب گردیده، در مجموع 64 آزمایش بصورت فاکتوریل کامل انجام و مورد مطالعه قرار گرفت. از شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک به ترتیب جهت پیش بینی و بهینه سازی پارامترهای ماشین کاری بهره گرفته شد. از مدل بدست آمده برای بررسی تأثیر پارامترهای مختلف و پیش بینی پارامترهای بهینه فرزکاری جهت بدست آوردن نیرو و صافی سطح مطلوب استفاده گردید. مقایسه نتایج حاصل از مدل شبکه عصبی و نتایج تجربی نشان دهنده پیش بینی با دقت 97 درصد مدل سازی شبکه و همچنین دقت بالای بهینه سازی می باشد.

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 5 آذر 1397  
پذیرش: 19 اسفند 1397  
ارائه در سایت: مهر 1398

### کلیدواژگان:

مدل سازی و بهینه سازی  
نیروی ماشین کاری  
زبری سطح  
اینکونل 738  
شبکه عصبی

## Modeling and optimization of cutting force and surface roughness in the milling process of Inconel 738 by Neural Network and Genetic Algorithm

Lila Imani<sup>1</sup>, Ali Rhmani Hanzaki<sup>1\*</sup>, Reza Hamzeloo<sup>1</sup>, Behnam Davoodi<sup>2</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

\*P.O.B. 1678815811, Tehran, Iran, [a.rahmani@sru.ac.ir](mailto:a.rahmani@sru.ac.ir)

### Article Information

Original Research Paper  
Received 26 November 2018  
Accepted 10 March 2019  
Available September 2019

### Keywords:

Modeling and Optimization  
Cutting force  
Surface roughness  
Inconel 738  
Neural network

### Abstract

Milling is an important and conventional method of metal Cutting, in which many studies have been fulfilled so far. Study of machining the nickel-based superalloys is felt to be essential due to their high strength and various applications in the power plants, aerospace industries etc. Cutting force and surface roughness are two of the important factors in machinability that due to the high importance of it, has been studied. In this article, the influence of four parameters of machining nickel-based superalloys, namely, cutting speed, feed rate, depth of cut and presence or absence of cooling as research inputs on the milling of Inconel 738 were investigated. In total, 64 experiments have been completed as full factorial design. By measuring cutting forces and surface roughness of the samples after the milling process, the obtained models were utilized to predict the effect of various above parameters, to optimize the milling parameters and to obtain the desired surface finish. In addition, the artificial intelligence techniques such as neural network and genetic algorithm were employed to predict the output parameter and to find the optimum milling parameters. The comparison of the experimental and predicted results shows the success of the modeling with 97 percent accuracy and a precise optimization.

### 1- مقدمه

خود را در دماهای بالا حفظ کنند. این آلیاژها همچنین مقاومت خوبی به خوردگی و اکسایش، و مقاوم زیادی به خزش

سوپر آلیاژها، آلیاژهای مقاوم به گرما بوده و قادرند استحکام

### Please cite this article using:

L. Imani, A. Rhmani Hanzaki, R. Hamzeloo, B. Davoodi, Modeling and optimization of cutting force and surface roughness in the milling process of Inconel 738 by Neural Network and Genetic Algorithm, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 6, No. 5, pp. 25-38, 2019 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

ماشین‌کاری پره از آلیاژ LC 738 با ابزار سرکروی به صورت تجربی پرداختند [5].

همواره محققان علم ماشین‌کاری به دنبال راه‌حلی برای بالا بردن راندمان فرایند هستند. چون این آلیاژها از مواد سخت ماشین‌کاری شونده محسوب می‌شوند و دارای خوردگی ابزار بالا هستند، پژوهشگرانی از جمله پاریدا و همکارانش بر روی نرم کردن حرارتی قبل از ماشین‌کاری توسط لیزر و گاز تحقیقاتی را انجام داده‌اند [6]. به علاوه ماشین‌کاری سوپرآلیاژها با حالت‌های خاص نیز مورد توجه قرار گرفته است. سوجی‌هارا و انوموتو ماشین‌کاری با سرعت بالای اینکونل 718 را مورد مطالعه قرار دادند [7]. امینی و ناطق نیز بر روی تراشکاری به کمک ارتعاشات التراسونیک اینکونل 738 مطالعه نمودند [8].

پیش‌بینی و مدل‌سازی پارامترهای خروجی ماشین‌کاری فلزات نیز مورد توجه قرار گرفته است. از جمله مصطفی‌پور و رازفر به پیش‌بینی عمر ابزار به کمک شبکه عصبی با استفاده از پارامترهای موتور اسپیندل (جریان مورد استفاده و دور موتور) دستگاه فرز در فرایند کف تراشی پرداختند [9]. آن‌ها این روش محاسبه خوردگی ابزار را اقتصادی دانسته و شبکه عصبی را نیز روشی قدرتمند در بین روش‌های پیش‌بینی و مدل‌سازی معرفی نمودند. سورش و همکارانش با انجام 81 آزمایش که حاصل از در نظر گرفتن سه سطح برای چهار پارامتر ورودی شامل شعاع نوک اینسرت، سرعت برشی، پیشروی و عمق برش بود، به پیش‌بینی و بهینه‌سازی پارامترهای ماشین‌کاری برای رسیدن به حداقل زبری سطح با کمک الگوریتم ژنتیک پرداختند [10]. اوکتم و همکارانش در دو تحقیق مطالعه‌ای جامع بر روی زبری سطح در خلال فرایند فرزکاری جهت بهینه‌سازی انجام دادند [11، 12]. ماده مورد مطالعه آنها AISI 1040 و ابزار یکپارچه کاربیدی با روکش TiAlN<sup>1</sup> بود. آنها با استفاده از الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی به بهینه‌سازی و پیش‌بینی زبری سطح پرداخت و در مقاله خود از روش‌های آماری چون آنالیز واریانس و رگرسیون نیز استفاده نمودند. همانطور که ذکر شد مطالعه و تحقیق بر روی ماشین‌کاری سوپرآلیاژها به دلیل مقاومت بالا تا فشار و دماهای بالا سخت می‌باشد، لذا بررسی تمامی پارامترها در تمامی سطوح و مقادیر آنها کار طاقت‌فرسا می‌باشد. از این رو سعی بر طراحی آزمایش و پیش‌بینی اثرگذاری پارامترها بر روی خروجی مورد نظر می‌باشد.

با توجه به بررسی پیشینه پژوهش و پی بردن به ضرورت مطالعه ماشین‌کاری سوپرآلیاژ اینکونل 738، در این مقاله با

و شکست در دماهای بالا دارند. این آلیاژها به‌منظور بکارگیری در دماهای بالا، معمولاً دماهای بالای 540 درجه سلسیوس، تنش‌های مکانیکی نسبتاً زیاد و مواقعی که به پایداری سطحی بالایی احتیاج می‌باشد، طراحی و توسعه یافته‌اند. اینکونل 738 یک سوپر آلیاژ پایه نیکل می‌باشد که به سبب استحکام و خواص منحصر بفردی که دارد، کاربرد گسترده‌ای در صنایع نیروگاهی یافته است. توانایی حفظ خواص مکانیکی در درجه حرارت‌های بالا قابلیت ماشین‌کاری این آلیاژ را تحت تأثیر قرار داده است و به عنوان مواد با قابلیت سخت ماشین‌کاری شناخته می‌شود. کیفیت سطح یکی از مهم‌ترین پارامترهای کارکردی قطعات مکانیکی و همچنین یکی از محدودیت‌ها در انتخاب پارامترهای براده‌برداری در طراحی فرایند می‌باشد. کیفیت سطح در بارگذاری خستگی، انطباق‌های دقیق، نرخ سایش و مقاومت خوردگی تأثیرگذار می‌باشد. به دلیل قابلیت ماشین‌کاری پایین سوپر آلیاژها، انتخاب شرایط بهینه و پارامترهای ماشین‌کاری بسیار مهم است و محدودی سرعت‌های پیشروی و برشی که عمر ابزار مناسبی را تأمین می‌کند، محدود است. پارامترهای فرایند که عموماً مورد مطالعه محققان قرار می‌گیرد به صورت زیر هستند [1]:

الف) پارامترهای وابسته به ابزار: شامل هندسه ابزار (قطر، تعداد دندان، زوایای مارپیچ و پوشش ابزار)؛

ب) پارامترهای وابسته به فرایند: از جمله سرعت برشی، پیشروی و عمق برش؛

در این راستا، فرهادی و همکاران در [2] اثر تغییر در پارامترهای تراشکاری اینکونل 738 بر زبری و نیروی ماشین‌کاری را مورد مطالعه قرار دادند. داودی و همکاران زبری سطح حاصل از تراشکاری اینکونل 738 با ابزار کاربید پوشش داده شده را مورد مطالعه قرار دادند [3]. آنها نشان دادند که نرخ پیشروی حداکثر تأثیر را بر زبری سطح دارد. سرعت برشی نیز بعد از پیشروی قابل تأثیرترین پارامتر بوده است. دوپلز و همکاران در [4] تنش پسماند و زبری سطح سوپر آلیاژ 718 را مورد مطالعه قرار دادند. آنها تأثیر تراشکاری خیس (با روغن گیاهی) و خشک را در سرعت‌های برشی مختلف در شرایط نیمه پرداخت مورد مطالعه قرار دادند. در تحقیق آنها گزارش شد که زبری سطح حاصل از تراشکاری خشک با ابزار کاربیدی پوشش‌دار دارای نتیجه بهتری است. همچنین تنش پسماند و میکروسختی حاصل در منطقه ماشین‌کاری دارای مقادیری برابر با حالت ماشین‌کاری خیس در حالت بهینه است.

کینکلا و همکارانش به مطالعه پروفایل سطح بدست آمده در

<sup>1</sup> Titanium aluminum nitride

جدول 1 سطوح طراحی آزمایش

Table 1 Defining the factors and the levels for DOE

سطح‌های آزمایش	تعداد سطوح	پارامتر
30 - 35 - 40 - 45	4	1 سرعت برشی (m/min)
0/15 - 0/2 - 0/25 - 0/3	4	2 نرخ پیشروی (mm/rev)
0/1 - 0/2	2	3 عمق برش محوری (mm)
On - off	2	4 مایع خنک کننده

جدول 2 ترکیب شیمیایی آلیاژ اینکونل IN-738

Table 2 The chemical composition of IN-738

عناصر	Min	Max	عناصر	Min	Max
	درصد			درصد	
C	0/09	0/13	Al	3/20	3/70
Co	3/00	9/00	Ti	3/20	3/70
Cr	15/70	16/30	Al+Ti	6/50	70/20
Mo	1/50	2/00	B	0/007	0/012
Tn	2/40	2/80	Zr	0/03	0/08
Ta	1/50	2/00	Ir	--	0/05
Nb	0/60	1/10	Mn	--	0/02
Si	--	0/3	S	--	0/015
Ni	balance				

جدول 3 خواص مکانیکی IN-738

Table 3 The mechanical properties of IN-738

IN-738	خواص مکانیکی
8110	چگالی (Kg/m <sup>3</sup> )
1230 - 1315	محدوده دمای ذوب (°C)
0/28	ضریب پواسون (ν)
35 - 37	سختی (HRc)
138000	استحکام تسلیم (Psi)
159000	استحکام کششی (Psi)

2-3- ابزار

برای فرزکاری نمونه‌ها از فرز سی‌ان‌سی سه محوره دکل<sup>2</sup> استفاده گردیده است. کنترل این دستگاه از نوع زیمنس 810D می‌باشد. برنامه‌نویسی مسیر حرکت ابزار انگشتی توسط کدهای مربوطه در بخش‌های برنامه‌نویسی دستی انجام شده است. لازم به ذکر است که قدرت موتور این دستگاه 5/5 کیلو وات و سرعت اسپیندل آن 3150 rpm می‌باشد. مخروط اسپیندل آن از جنس ST40 و سرعت پیشروی محورها از 2 تا 3000 میلی‌متر بر دقیقه است. شکل 1 دستگاه فرز مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد. در این تحقیق از سیال متداول خنک کننده آب و روغن با غلظت 5 درصد استفاده شده است. در تمامی آزمون‌های تجربی انجام شده تحت شرایط براده

تغییر در پارامترهای فرایند فرزکاری چون سرعت برشی، نرخ پیشروی، عمق برش محوری و وجود یا عدم وجود سیال خنک کننده بر اساس طراحی آزمایش با روش فاکتوریل کامل و با انجام آزمونهای تجربی و مدل‌سازی شبکه عصبی بر روی تغییرات زبری سطح و نیروی حین ماشین‌کاری این آلیاژ مورد مطالعه قرار گرفته و همچنین با کمک الگوریتم ژنتیک بهینه سازی پارامترهای ورودی به منظور به حداقل رساندن زبری سطح صورت می‌گیرد.

2- آزمایش‌های تجربی

2-1- طراحی آزمایش

در این پژوهش، به منظور فرزکاری قطعه‌ای از جنس اینکونل 738 از محدوده مناسبی از پارامترهای ماشین‌کاری برای تعیین زبری سطح استفاده می‌شود و اثر تغییرات پارامترهای ماشین‌کاری بر مقدار زبری سطح بحث می‌گردد. سطوح آزمایش به‌خصوص در مورد سرعت برشی براساس محدودیت‌های ماشین‌کاری و براساس کاتالوگ ابزار برای ماشین‌کاری فلزات فوق سخت و همچنین مطالعه پیشینه تحقیق انتخاب شد. بدین منظور، 64 آزمایش از تغییر چهار پارامتر سرعت برشی، نرخ پیشروی در چهار سطح و عمق برش محوری و سیال خنک کننده در دو سطح بصورت فاکتوریل کامل طرح ریزی و انجام شد که در تمام این حالات، براده برداری بحالت فرزکاری مخالف انجام گردید. جدول 1 جدول طراحی آزمایش مورد مطالعه در این پژوهش است.

2-2- ماده

آلیاژهای پایه نیکل دارای پیچیده‌ترین ترکیبات شیمیایی می‌باشند که در دماهای بالا به کار گرفته می‌شوند. مهم‌ترین آلیاژ بدست آمده از ترکیب نیکل، کروم و آهن، سوپر آلیاژ اینکونل می‌باشد. از جمله موارد استفاده از این گروه از سوپر آلیاژها، استفاده در مبدل‌های حرارتی، پره‌های توربین و قطعاتی که تحت شرایط خزش شدید کار می‌کنند را می‌توان نام برد. آلیاژ مورد بررسی در این مقاله، سوپر آلیاژ اینکونل 738 بوده که شاخه‌ای از آلیاژهای پایه نیکل می‌باشد. این آلیاژ تحت خلاء ذوب و ریخته‌گری شده و به روش رسوب سختی<sup>1</sup> استحکام می‌یابد. در جدول 2 ترکیب شیمیایی حاصل از انجام آزمایش و در جدول 3 خواص مکانیکی این آلیاژ نشان داده شده است. جهت انجام آزمون‌های تجربی از بلوک‌های اینکونل 738 به ابعاد 180×110×67 میلی‌متر استفاده گردید. این بلوک‌های اولیه به کمک برش وایرکات جدا شدند.

<sup>2</sup>DECKEL

<sup>1</sup> Aging heat treatment

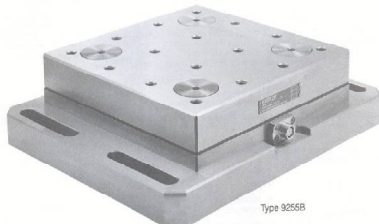


Fig. 3 Dynamometer Kistler 9255B

شکل 3 دینامومتر کیستلر 9255B

### 3- هوش مصنوعی

#### 3-1- شبکه عصبی

شبکه عصبی مصنوعی یک الگوریتم است که می‌تواند اطلاعات تجربی را بخاطر بسپارد و آموزش ببیند. شبکه عصبی پس انتشار<sup>5</sup> که یک نوع شبکه عصبی مصنوعی<sup>6</sup> است، در این مقاله بعنوان الگوریتم آموزشی استفاده شد، زیرا رفتار تطابقی مناسبی در پیش‌بینی مسائل پیچیده دارد [14].

مدل‌های ساخته شده توسط شبکه عصبی دارای معماری چند لایه‌ای (شبکه پرسپترون چند لایه) می‌باشد که متشکل از لایه ورودی، لایه خروجی و یک یا چند لایه پنهان بین دو لایه ورودی و خروجی است. لایه‌ها شامل چندین واحد پردازش به نام نورون هستند. نورون‌ها به یکدیگر با تعیین وزن متغیر متصل‌اند. در شبکه، ورودی هر نورون تمام خروجی‌های نورون‌های لایه‌ی قبل است و دارای عملکرد مشابه هستند. مدل ریاضی یک نورون در معادله (1) آورده شده است.

$$y_k = f \left( \sum_{j=1}^p w_{kj} x_j - \theta_k \right) \quad (1)$$

که  $X_1, X_2, \dots, X_p$  ورودی‌های نورون و  $w_{k1}, w_{k2}, \dots$  مقادیر وزن‌های نورون  $K$ ام است.  $\theta_k$  مقادیر آستانه‌ای و  $f$  تابع فعالیت و  $y_k$  خروجی نورون است. توابع فعالیت مختلف مانند تانژانت می‌گردد. انتخاب تابع فعالیت بستگی به مسئله مورد نظر دارد. معمولاً شبکه عصبی توسط توابع مختلف آموزش داده می‌شود تا به بهترین جواب ممکن برسد. معادلات (2) و (3) به ترتیب نشان دهنده‌ی توابع سیگموئید و لگاریتمی می‌باشد. همچنین شکل‌های 4 و 5 به ترتیب نشان‌دهنده توابع انتقال غیرخطی و خطی می‌باشند.

$$Y = f(a) = \frac{1}{1 + e^{-a}} \quad (2)$$

$$Y = f(a) = \frac{e^a - e^{-a}}{e^a + e^{-a}} \quad (3)$$

تابع انتقال مورد استفاده در مدل‌سازی این مقاله هم از نوع

برداری مختلف و به‌منظور به‌دست آوردن زبری سطح حاصل از ماشین‌کاری آلیاژ مورد مطالعه در این تحقیق، از ابزار سر تخت دو لبه با اینسرت کاربایدی پوشش‌دار مربعی شکل R390 با شعاع گوشه 0/4 میلی‌متر شرکت سندویک دارای پوشش Ti-N به قطر 16mm استفاده شده است [13].

به‌منظور زبری‌سنجی، دستگاه زبری‌سنج تیلور هابسون<sup>1</sup> که در شکل 2 نشان داده شده است، مورد استفاده قرار گرفت. طول کات آف<sup>2</sup> و طول کل قسمت اندازه‌گیری به ترتیب 0/02 و 2/5 میلی‌متر انتخاب شده است. به‌منظور اندازه‌گیری نیروها، از دینامومتر کیستلر<sup>3</sup> 9255B استفاده شد که قبل از شروع آزمایش‌ها صحت کالیبراسیون آن چک گردید (شکل 3).

این دینامومتر دارای قدرت اندازه‌گیری نیرو در محورهای X و Y از -20(KN) تا +20(KN) و در محور Z از -10 (KN) تا +40 (KN) می‌باشد. بورد کامپیوتری اخذ اطلاعات CIO-DAS 1602/12 جهت ارتباط دستگاه شارژ آمپلی‌فایر و دینامومتر با کامپیوتر و نرم‌افزار مربوطه (دایناور<sup>4</sup>) نیز استفاده گردید.



Fig. 1 Milling machine, tool and work-piece

شکل 1 ماشین‌فرز، ابزار و قطعه کار



Fig. 2 Roughness measurement of the samples Taylor Hobson (model Surtronic-25)

شکل 2 دستگاه زبری‌سنج تیلور هابسون (مدل سورترونیک 25)

<sup>1</sup> Taylor Hobson (model Surtronic-25)

<sup>2</sup> Cut off

<sup>3</sup> Kistler 9255B

<sup>4</sup> (Dyno Ware)

<sup>5</sup> BPN

<sup>6</sup> Artificial neural network

آزمایش هم برای نتایج نیرو و هم برای نتایج زبری، از نرم‌افزار آماری مینی تب<sup>1</sup> استفاده گردید و این نمودارها در هر بخش ارائه شده است. به‌علاوه نتایج حاصل گردآوری و در پیوست الف آورده شده است.

#### 4-1- اثر پارامترهای مختلف بر نیروی ماشین‌کاری

شکل 6 تأثیر پارامترهای ورودی بر نیرو را نشان داده است. این نمودار، نمودار اثرات اصلی بوده و نمودار اثرات متقابل در شکل 7 آورده شده است.

در برخی از آزمایش‌ها ممکن است اختلاف مشاهده شده بین پاسخ‌های حاصل از سطوح یک عامل، به ازای تمام سطوح عامل دیگر یکسان نباشد. در چنین مواقعی گفته می‌شود بین عوامل اثر متقابل وجود دارد. به‌طور کلی زمانیکه اثر متقابل بزرگ باشد، اثرات اصلی متناظر، اهمیت کمتری خواهند داشت. با توجه به شکل 7 می‌توان فهمید که اثرات متقابل در برخی پارامترها وجود ندارد و در برخی نیز از لحاظ مقدار، بسیار جزئی می‌باشند. پس می‌توان نمودار اثرات اصلی را با اطمینان مورد بررسی قرار داد.

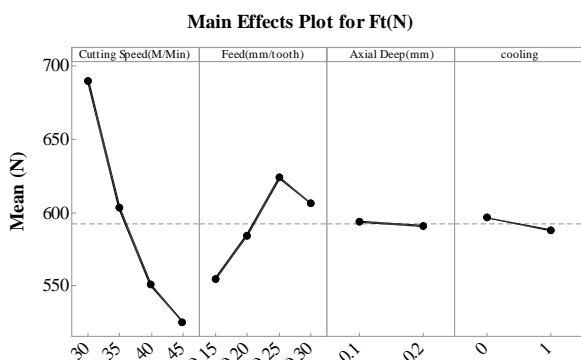


Fig. 6 Main effects plot of cutting force

شکل 6 نمودار اثرات اصلی نیروی برش

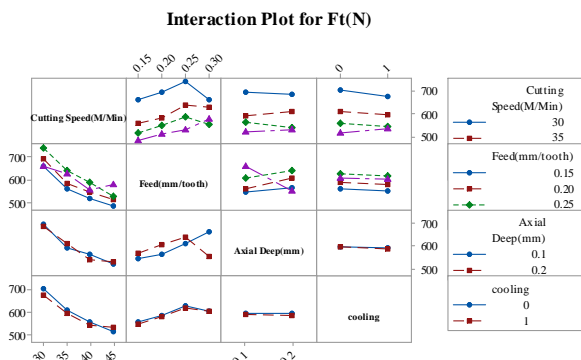


Fig. 7 Interaction plot of cutting force

شکل 7 نمودار اثرات متقابل نیروی برشی

<sup>1</sup> Minitab

خطی در انتقال اولیه و هم غیرخطی در انتقال بعدی بوده که در بخش نتایج توضیح داده خواهد شد.

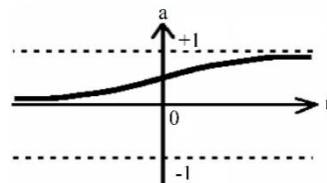


Fig. 4 Nonlinear Transformation Function [15]

شکل 4 تابع انتقال غیر خطی [15]

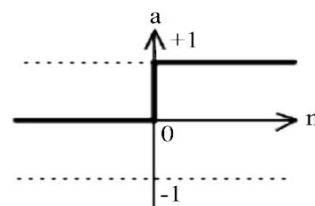


Fig. 5 Linear Transformation Function [15]

شکل 5 تابع انتقال خطی [15]

#### 3-2- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یک روش بهینه‌سازی الهام گرفته از طبیعت است، که یکی از بهترین و پرکاربردترین آنها به شمار می‌رود. اصول اولیه الگوریتم ژنتیک توسط جان هلند در دانشگاه میشیگان ایالت متحده در سال 1962 ارائه شد.

پس از این گزارش اولیه، تحقیق در جهت توسعه چهارچوب ریاضی و زمینه‌های کاربرد الگوریتم ژنتیک ادامه یافت. از اوایل دهه 1980 به بعد، مقاله‌ها و رساله‌های بسیاری در تأیید تکنیک بهینه‌سازی توابع توسط این الگوریتم انتشار یافت [16]. در بخش نتایج نحوه بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک تشریح می‌گردد.

#### 4- نتایج و بحث

بر اساس طراحی آزمایش صورت گرفته، 64 آزمایش اجرا شد. برای اندازه‌گیری نیرو، نرم‌افزار میانگین سیگنال را به عنوان خروجی در هر جهت ارائه داده و پس از سه بار اندازه‌گیری این مقدار در هر جهت استخراج شده و از برآیند آنها نیز برای نتایج خروجی و مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است. برای هر آزمون زبری در سه نقطه از قطعه اندازه‌گیری شده و متوسط آنها به عنوان خروجی در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است چون سایش ابزار بر روی زبری سطح تأثیرگذار است، ابزار مورد استفاده بعد از انجام هر آزمون جهت عدم سایش مورد بررسی قرار گرفت. جهت بررسی تأثیر عوامل مختلف بر خروجی مورد

## 4-1-1- اثر سرعت برشی

سرعت برشی از مهمترین پارامترهای ماشین‌کاری است که تأثیر بسیار زیادی بر راندمان ماشین‌کاری، کیفیت سطح تمام شده، زمان و هزینه کلی ماشین‌کاری دارد. در این تحقیق، به منظور فرزکاری قطعه‌ای از جنس اینکونل 738، از محدوده نسبتاً وسیع سرعت برشی استفاده می‌شود و اثر تغییرات سرعت برشی بر روی مقداری میانگین نیروهای ماشین‌کاری بحث می‌گردد. در نهایت محدوده‌ی سرعت برشی مناسب برای ماشین‌کاری متداول این ماده و این شرایط ماشین‌کاری تعیین و معرفی می‌شود.

پس از اندازه‌گیری نیروی تجربی و استفاده از نرم‌افزار داینور، میانگین هر 3 مؤلفه‌ی نیروهای فرزکاری در جهت X, Y, Z اندازه‌گیری شد. در شکل 8 تأثیر سرعت برشی بر نیروهای ماشین‌کاری نمایش داده شده‌است. در همه‌ی آزمونها، عمق برش محوری 1/0 میلی‌متر و نرخ پیشروی 3/0 میلی‌متر بر دور بود. تغییر سرعت برشی، تأثیر بسزایی بر نیروهای ماشین‌کاری دارد. دلایل فراوانی برای این اثرات وجود دارد.

با افزایش سرعت، دمای منطقه ماشین‌کاری افزایش یافته و این افزایش دما، نیروی اصطکاک سطح تماس ابزار و قطعه‌کار را کاهش می‌دهد. با اینکه به خاطر کاهش ضخامت براده‌ی برداشته شده و افزایش زاویه‌ی برش در اثر افزایش سرعت برشی، تغییر شکل براده راحت‌تر صورت می‌گیرد. این دلایل، درست و منطقی است، اما برای توجیه تأثیر سرعت برشی بر نیروهای ماشین‌کاری ناکافی به نظر می‌رسد.

برای بررسی روند تغییرات منحنی، تغییرات را باید به 3 بخش تقسیم کرد. در بخش اول مشاهده می‌شود که از سرعت برشی 30 تا 35 متر بر دقیقه، با افزایش سرعت برشی، نیروهای میانگین ماشین‌کاری کاهش می‌یابند.

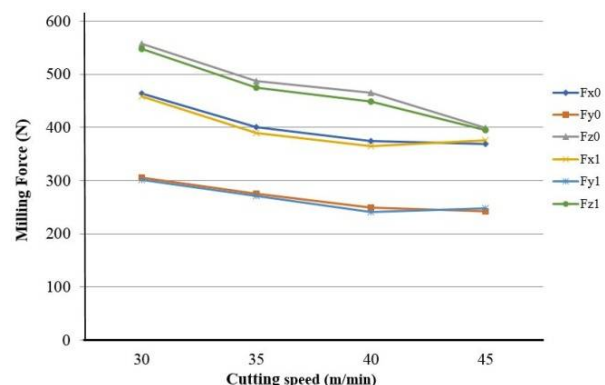


Fig. 8 Effect of changes cutting speed on cutting force

شکل 8 تأثیر تغییرات سرعت برشی بر روی نیروی فرزکاری

این مسأله می‌تواند به‌علت افزایش دما در فصل مشترک ابزار و براده به‌دلیل افزایش سرعت برشی باشد. آن قسمت از قطعه‌کار که در ناحیه برش قرار دارد، نرم شده تغییر فرم براده را آسان می‌کند و در نتیجه عمل براده‌برداری راحت‌تر و با نیروی کمتری انجام می‌شود. با افزایش سرعت برشی پس از یک حد معین، نیروها با شیب بیشتری کاهش می‌یابند.

در این پژوهش با توجه به شرایط ماشین‌کاری جنس و هندسه ابزار و جنس قطعه‌کار، آن حد معین، سرعت برشی  $40 \text{ (m/min)}$  (سرعت اسپیندل  $697 \text{ (rpm)}$ ) می‌باشد. این‌گونه می‌توان توجیه کرد که عواملی مانند افزایش دما در فصل مشترک ابزار-براده، رخ دادن پدیده بازیابی و نرم شدن قطعه کار، همچنین کاهش نیروی اصطکاک، بر عوامل افزایش دهنده‌ی نیرو مثل پدیده‌ی کار سختی و نیروهای مومنتم، غلبه کرده و موجب می‌شود که پس از این حد، نیروهای ماشین‌کاری کاهش یابند. به طور کلی وقتی که سرعت ماشین‌کاری از حد معینی بالاتر رود دمای برش در لبه‌های برنده به شدت افزایش می‌یابد و کاهش نیروهای ماشین‌کاری مشاهده می‌شود که این پدیده را سطح تأثیر گذار می‌گویند. در نتیجه، بازه ماشین‌کاری سرعت بالا، برای سوپرآلیاژ پایه نیکل با این ابزار و شرایط ماشین‌کاری عبارت است از:  $40 \text{ (m/min)}$  تا  $45 \text{ (m/min)}$  در این بازه‌ی ماشین‌کاری، نیروها و زمان کاهش و نرخ براده‌برداری افزایش می‌یابد.

## 4-1-2- اثر سرعت پیشروی

نرخ پیشروی از مهمترین پارامترهای ماشین‌کاری است که بر راندمان ماشین‌کاری تأثیر دارد. با افزایش مقادیر پیشروی، طول ماشین‌کاری کاهش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد در نرخ پیشروی‌های بالا به خاطر تولید حرارت کمتر نسبت به سرعت‌های برشی بالا، و نیز کم بودن ضریب هدایت گرمایی اینکونل 738، بحث ماشین‌کاری نرخ پیشروی بالا در مورد ماشین‌کاری سوپرآلیاژها مطرح شده است.

شکل 9 نمایانگر تغییرات پیشروی بر روی نیروهای فرزکاری بوده است. بررسی نتایج تجربی حاصل از تغییرات نرخ پیشروی بر نیروی ماشین‌کاری نشان می‌دهد، با افزایش نرخ پیشروی، نیروها در حالت کلی افزایش می‌یابند. افزایش نیرو به هنگام افزایش نرخ پیشروی باعث افزایش بار براده است.

از نرخ پیشروی 15/0 تا 2/0 این افزایش در نیروها دارای روند تقریباً یکنواختی است از نرخ پیشروی 2/0 تا 25/0 شیب

دلیل اینکه نیرو در این حالت دو برابر می‌شود این است که سطح اصطکاک در قسمت سطح آزاد قلم نیز دو برابر شده است. رابطه (4) نیروی برش با عمق تراش و نمودار با افزایش دو برابر شدن عمق تغییرات نیرو محسوس نمی‌باشد.

$$F_t = c_1(a_p)^x \quad (4)$$

#### 4-1-4- اثر سیال خنک کننده بر نیروی برش

روان کار یا سیال خنک کننده (منظور همان روان کار با درصد بالای آب) باعث کاهش اصطکاک و همچنین افزایش در نیروی ماشین‌کاری می‌گردد. لذا نیروی تراش و در نتیجه انرژی مخصوص تراش کاهش می‌یابد و از طرفی با ازدیاد سرعت برشی اثر روان کار کمتر می‌شود.

#### 4-2- اثر پارامترهای مختلف بر زبری سطح

شکل 11 تأثیر پارامترهای ورودی بر خروجی مورد مطالعه مقاله را نشان داده است. این نمودار، نمودار اثرات اصلی بوده و نمودار اثرات متقابل در شکل 12 آورده شده است.

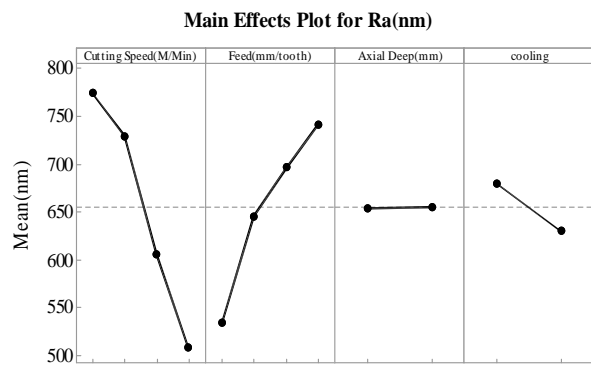


Fig. 11 The effects of research variables on surface roughness

شکل 11 تأثیر متغیرهای تحقیق بر زبری سطح

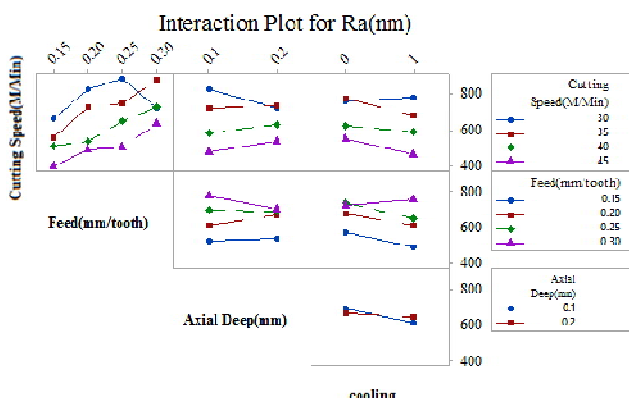


Fig. 12 Interaction effects of parameters

شکل 12 نمودار اثرات متقابل پارامترها

این روند رفته رفته افزایش می‌یابد. در این بازه افزایش در نیروهای فرزکاری، با افزایش بار براده ناچیز است. با افزایش نرخ پیشروی (در حالی که سرعت برشی ثابت است)، دما به تدریج در موضع ماشین‌کاری افزایش می‌یابد. این افزایش حرارت، باعث کاهش استحکام تسلیم ماده شده، در نتیجه فرایند برش راحت تر صورت می‌گیرد، پس می‌توان گفت که پدیده‌ی متضاد، افزایش حرارت موضع ماشین‌کاری است.

با این توضیحات بازه‌ی ماشین‌کاری با نرخ پیشروی بالا برای سوپرآلیاژ پایه نیکل با ابزار سر تخت کاربایدی روکش‌دار TiAlN به قطر 16 میلی‌متر و این شرایط ماشین‌کاری عبارت است از: 2/0 تا 3/0 میلی‌متر بر دندانه در این بازه‌ی 8/٪ افزایش در نیروهای ماشین‌کاری 25 افزایش در نرخ براده‌برداری خواهیم داشت لذا به منظور انجام عملیات خشن‌کاری، اگر مقاومت ابزار کافی باشد، این بازه‌ی نرخ پیشروی مناسب است چون در مدت زمان کمتر انجام می‌شود.

#### 4-3-1-3- اثر عمق برش

همان‌طور که در شکل 10 مشاهده می‌گردد عمق برش در محدوده‌ی عمل، روی نیروی ماشین‌کاری اثری ندارد و با توجه به نمودار، عمق برش دو برابر شده و در نتیجه سطح مقطع براده تغییر شکل نیافته دو برابر می‌شود و نیروی مصرفی نیز دو برابر می‌شود.

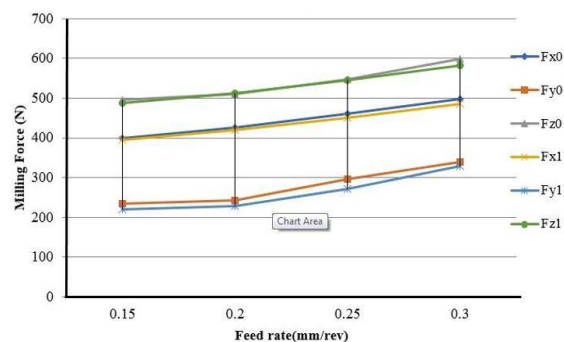


Fig. 9 Effect of changes Feed rate on cutting force

شکل 9 تأثیر تغییرات نرخ پیشروی بر روی نیروی فرزکاری

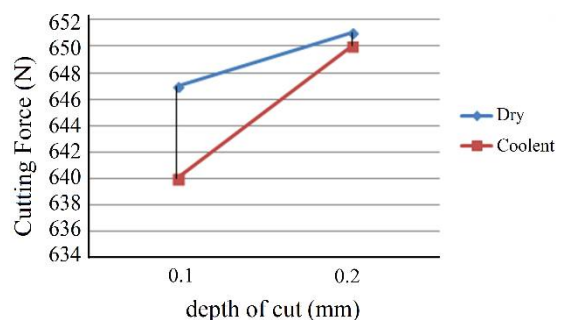


Fig. 10 Effect of changes depth of cut on cutting force

شکل 10 تأثیر تغییرات عمق برش بر روی نیروی فرزکاری

### 2-4-3- عمق برش

نتایج ارایه شده در شکل 15 نشان می‌دهد تأثیر عمق برش بر روی کیفیت سطح ماشین‌کاری شده کم می‌باشد. تنها محدودیت عمق برش وجود پدیده ارتعاش در اثر افزایش عمق برش می‌باشد (شکل 15).

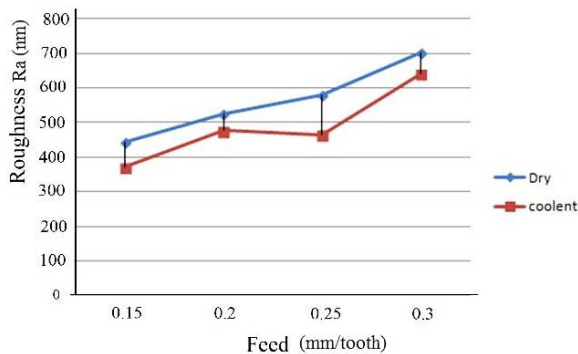


Fig. 14 Effects of Feed on surface roughness

شکل 14 اثر سرعت پیشروی بر زبری سطح

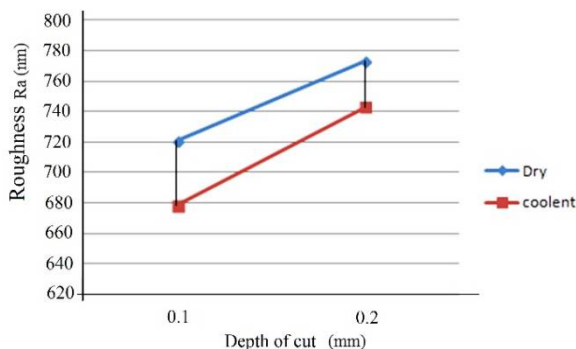


Fig. 15 Effects of depth of cut on surface roughness

شکل 15 اثر عمق برش بر زبری سطح

### 4-2-4- اثر سیال خنک کننده بر زبری سطح

روان کار باعث کاهش در ایجاد لبه انباشته می‌شود. وجود لبه انباشته عامل مهمی در ازدیاد ناهمواری سطح ماشین‌کاری شده است. بنابراین کیفیت سطح ماشین‌کاری شده با کاربرد روان کار بالا می‌رود. در مجموع می‌توان از نمودارهای 13، 14 و 15 دریافت که سرعت پیشروی در سرعت‌های پایین برش، اثر بیشتری بر زبری می‌گذارد. این امر ناشی از تشکیل براده با لبه انباشته در سرعت‌های پایین است. در سرعت‌های بالا با حل شدن این مشکل، اثر پیشروی کمی کاهش می‌یابد.

کاهش زبری سطح با افزایش سرعت برشی را می‌توان به دلیل آسانتر شدن تغییر شکل پلاستیک و کم شدن اصطکاک به دلیل افزایش درجه حرارت دانست از سوی دیگر افزایش سرعت برشی سبب کاهش تشکیل لبه انباشته می‌گردد لذا با افزایش سرعت برشی، تشکیل براده‌ی لبه انباشته متوقف شده و

در برخی از آزمایش‌ها ممکن است اختلاف مشاهده شده بین پاسخ‌های حاصل از سطوح یک عامل، به ازای تمام سطوح عامل دیگر یکسان نباشد. در چنین مواقعی گفته می‌شود بین عوامل اثر متقابل وجود دارد. و به‌طور کلی زمانی که اثر متقابل بزرگ باشد، اثرات اصلی متناظر، اهمیت کمتری خواهند داشت. با توجه به شکل 12 می‌توان فهمید که اثرات متقابل وجود ندارد پس می‌توان نمودار اثرات اصلی را با اطمینان مورد بررسی قرار داد.

### 4-2-1- اثر سرعت برشی

همان‌طور که در شکل 13 مشاهده می‌شود با افزایش سرعت برشی ارتفاع ناهمواری سطوح کمتر شده و پرداخت سطوح بهتر می‌شود. با توجه به شکل نمودار، در اثر ازدیاد سرعت برشی زبری سطح کاهش می‌یابد. دلیل کاهش ناهمواری‌های سطح در اثر ازدیاد سرعت برشی را می‌توان چنین توجیه کرد که با افزایش سرعت برشی تغییر شکل پلاستیک آسانتر اتفاق می‌افتد و اصطکاک بین سطوح آزاد و سطوح ماشین‌کاری شده و همچنین اصطکاک بین سطح قلم و براده در اثر افزایش درجه حرارت کاهش می‌یابد و از طرفی در سرعت‌های زیاد، افزایش سرعت برشی تأثیر چندانی در ارتفاع ناهمواری سطوح ندارد. با افزایش سرعت برشی کیفیت سطح تولید شده نیز بهتر می‌شود (شکل 13).

### 2-4-2- اثر سرعت پیشروی

با توجه به رابطه بین ارتفاع ناهمواری سطح و نرخ پیشروی و نیز با توجه به شکل 14، با افزایش نرخ پیشروی ناهمواری‌های سطح ماشین‌کاری شده بیشتر می‌کند. با افزایش نرخ پیشروی بار براده تغییر شکل نیافته افزایش و کیفیت سطح ماشین‌کاری شده پایین می‌آید.

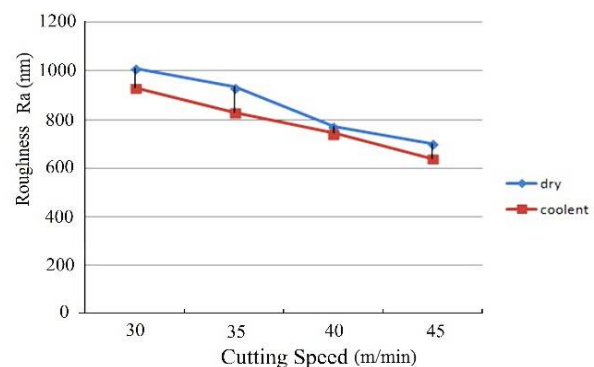


Fig. 13 Effects of cutting speed on surface roughness

شکل 13 اثر سرعت برشی بر زبری سطح



شبکه به کمترین مقدار ممکن خود در حالت آموزش و آزمون (تست) میل کند. به منظور یافتن شبکه بهینه، شبکه‌های مختلف با تعداد لایه‌ها و نورون‌های متفاوت آزمایش شد. در این شبکه، نیروی کل ماشین‌کاری که از رابطه (5) به دست می‌آید به عنوان خروجی در نظر گرفته شد.

$$F_{total} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (5)$$

پس از آزمایش شبکه‌های مختلف برای نیروی ماشین‌کاری، در نهایت شبکه‌ای با دو لایه‌ی پنهان با 4 نورون به عنوان شبکه بهینه به دست آمد. 44 داده برای آموزش 8 داده برای معتبرسازی و 8 داده برای تست‌ها در نظر گرفته شد. که تعداد نورون‌های بهینه 4 عدد در هر لایه بر اساس نمودار شکل 16 بدست آمد. متغیرهای وزنی در شبکه بصورت تصادفی گوسی<sup>4</sup> و هوشمندانه از مقادیر اولیه داده شده است. رابطه (6) بیانگر ایجاد مقادیر وزن‌های جدید از وزن‌های قبلی می‌باشد این مقادیر تا وقتی تکرار می‌گردند که مقدار خطای مینیمم<sup>5</sup> بین مقادیر پیش‌بینی شبکه و مقادیر ورودی حاصل گردد.

$$w_{ij}^{new} = w_{ij}^{old} + \Delta w_{ij}$$

$$\Delta w_{ij} = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{ij}} out_j \quad (6)$$

در رابطه (6) مقدار  $\eta$  نرخ یادگیری و  $w_{ij}$  مقادیر وزنی شبکه می‌باشد که پایداری و نرخ انحراف شبکه را کنترل می‌نماید. در شکل‌های 17 تا 19 نمودارهای مربوط مدل شبکه عصبی، شبکه ساخته شده جهت مدل‌سازی فرایند ارائه شده است. در نهایت شبکه عصبی با وزن‌های بهینه شده به وسیله داده‌های آزمون مورد آزمون قرار گرفت. رگرسیون داده‌های آزمون 0/99905 دست آمد. داده‌های پیش‌بینی نیروی ماشین‌کاری توسط شبکه توسعه داده شده و میزان خطای آن با مقادیر تجربی در جدول 4 قابل مشاهده است.

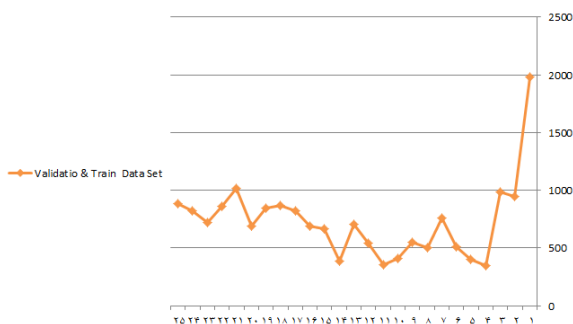


Fig. 16 The Optimum graph of norons

شکل 16 نمودار بهینه‌سازی نورون‌ها

صافی سطح بهبود خواهد یافت. با افزایش پیشروی به دلیل زیاد شدن ضخامت براده تغییر شکل نیافته، ارتفاع ناهمواری‌ها افزایش یافته و زبری سطح نیز بالا می‌رود. مقادیر عمق برش محوری تأثیر چندانی بر کیفیت سطح ندارد و با حضور سیال خنک کننده نیز زبری سطح کاهش می‌یابد. با افزایش درجه حرارت ناشی از افزایش سرعت برشی در عدم حضور خنک کننده کیفیت سطح ماشین‌کاری بهبود می‌یابد. زیرا عموماً کمیت‌هایی مانند حد تسلیم، استحکام کششی و برشی با افزایش درجه حرارت کاهش می‌یابد، حال آن که تغییر طول نسبی (کرنش) افزایش می‌یابد، لذا با توجه به این مسئله می‌توان سهولت در تغییر شکل پلاستیک، در نتیجه تشکیل براده و هم چنین تبدیل براده منقطع به ممتد در سرعت‌های برشی بالا را توجیه نمود.

### 3-4- نتایج حاصل از شبکه عصبی

همانطوری که گفته شد، شبکه عصبی روشی قدرتمند برای مدل‌سازی نیروی ماشین‌کاری و زبری سطح می‌باشد. جهت ساخت مدل در ابتدا بایستی پارامترهای ورودی و خروجی شبکه مشخص شوند. پارامترهای ورودی شامل عمق برش محوری، سرعت برش، پیشروی و خنک کننده می‌باشند و پارامتر خروجی نیز در یک مدل نیروی ماشین‌کاری و در مدلی دیگر زبری سطح می‌باشد. ارائه نتایج توسط شبکه عصبی به سرعت انجام می‌گیرد، همچنین استفاده و روش کار با شبکه نیز بسیار راحت‌تر از حل معادلات پیچیده خواهد بود.

### 4-3-1- مدل‌سازی نیرو

به منظور مشاهده تأثیر پارامترهای ورودی بر نیروی ماشین‌کاری با استفاده از داده‌های تجربی و ساخت مدل پیش‌بینی از شبکه عصبی استفاده شد. پارامترهای ورودی شامل عمق‌های برش محوری، سرعت برشی و پیشروی می‌باشند. پارامتر خروجی نیروی برآیند ماشین‌کاری می‌باشد. داده‌ها به سه دسته داده‌های آموزشی<sup>1</sup> و تست<sup>2</sup> و معتبرسازی<sup>3</sup> تقسیم می‌شوند. هدف از آموزش شبکه عصبی، تعیین پارامترهای بهینه شبکه از قبیل تعداد لایه‌های مخفی، نورون‌های لایه‌های مخفی، تابع انتقال لایه‌ها و مقادیر وزن‌ها برای دستیابی به بهترین شبکه جهت مدل‌سازی تابع هدف است. جهت دستیابی به شبکه بهینه لازم است پارامترهای تعریف شده برای شبکه را به گونه‌ای تغییر داد که مقدار خطای

<sup>4</sup> Quasi-Random

<sup>5</sup> Minimize the mean square error (MSE)

<sup>1</sup> Training

<sup>2</sup> Testing

<sup>3</sup> Validation

### 4-3-2- مدل‌سازی زبری سطح

در مرحله بعد داده‌ها به سه دسته داده‌های آموزشی<sup>1</sup> و تست<sup>2</sup> و معتبرسازی<sup>3</sup> تقسیم می‌شوند. تعداد 48 دسته از این داده‌ها به صورت تصادفی برای آموزش انتخاب و 8 دسته از این داده‌ها برای آزمایش استفاده شد و 8 دسته از این داده‌ها نیز جهت ارزیابی شبکه برای پیش‌بینی نتایج حاصل از زبری سطح به کار گرفته شد. هدف از آموزش شبکه عصبی، تعیین پارامترهای بهینه شبکه از قبیل تعداد لایه‌های مخفی، نورون‌های لایه‌های مخفی، تابع انتقال لایه‌ها و مقادیر وزن‌ها برای دستیابی به بهترین شبکه جهت مدل‌سازی تابع هدف است. شبکه‌های مختلف با تعداد لایه‌ها و نورون‌های متفاوت آزمایش شد. در نهایت شبکه‌ای با ساختار یک لایه ورودی، دو لایه پنهان و یک لایه خروجی به عنوان شبکه بهینه به دست آمد. ساختار این شبکه در شکل 20 نشان داده شده است. تعداد نورون‌های بهینه بر اساس شکل 22، 5 نورون در هر لایه میانی می‌باشد. محور قائم، کارایی<sup>4</sup> بر حسب MSE و محور افقی تعداد نورون لایه میانی می‌باشد. ساختار شبکه در لایه 1-5-4-5 بوده و الگوریتم آموزشی مورد استفاده در هر 3 لایه از نوع ترینسینگ<sup>5</sup> ترینسینگ<sup>5</sup> و توابع انتقال مورد استفاده خطی پیورلین<sup>6</sup> و غیرخطی تانسینگ<sup>7</sup> می‌باشد که در شکل 21 نحوه اثرگذاری این توابع بر پاسخ در لایه‌ها قابل مشاهده است.

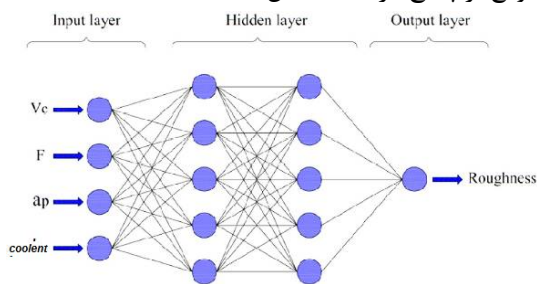


Fig. 20 Optimum Structure Model of Neural network

شکل 20 ساختار مدل بهینه شبکه عصبی



Fig.21 Functions that used in Modeling

شکل 21 توابع استفاده شده در مدل‌سازی

<sup>1</sup> Training  
<sup>2</sup> Testing  
<sup>3</sup> Validation  
<sup>4</sup> Performance  
<sup>5</sup> TRAINSCG  
<sup>6</sup> PURELIN  
<sup>7</sup> TANSIG

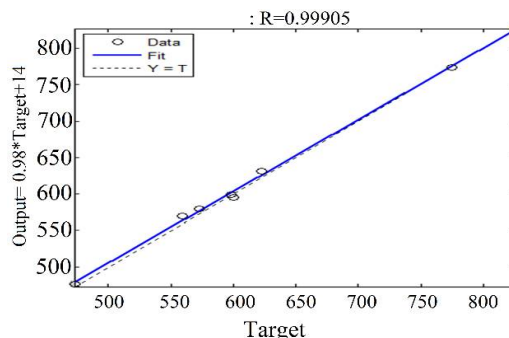


Fig. 17 Regression graph of output data

شکل 17 نمودار رگرسیون خروجی داده‌ها

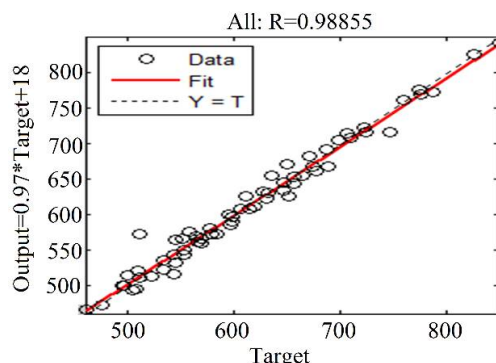


Fig. 18 Regression graph in training

شکل 18 نمودار رگرسیون داده‌ها هنگام آموزش

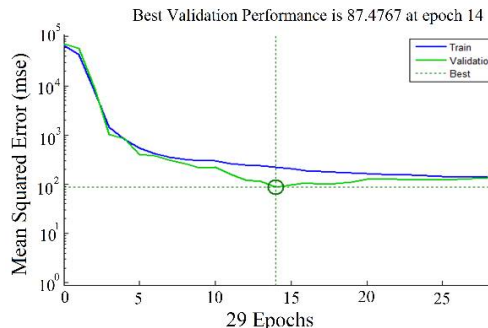


Fig. 19 Performance Graph

شکل 19 نمودار کارایی

جدول 4 مقادیر واقعی و مقادیر تخمینی و میزان خطا در نیروی ماشین‌کاری

Table 4 real and expected value and its error of cutting force

مقدار واقعی	مقدار تخمینی با شبکه عصبی	خطا
595	600/030	5/030
570	559/240	-10/759
599	597/836	-1/163
580	572/7093	-7/290
476	472/820	-3/179
631	622/2279	-8/772
826	825/422	-0/577
774	775/071	1/071

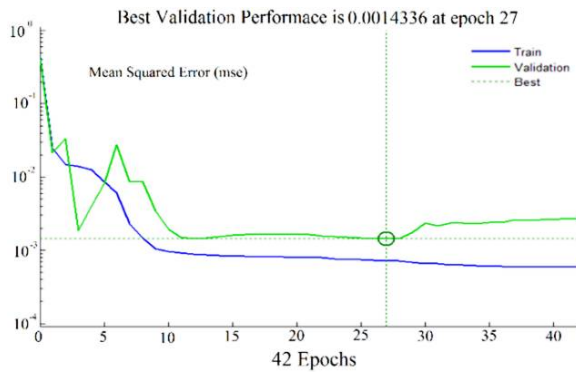


Fig. 25 Performance Graph of Network

شکل 25 نمودار کارایی شبکه

#### 4-4- بهینه‌سازی هم‌زمان نیروی ماشین‌کاری و زبری سطح

دو مشکل عمده در مهندسی ساخت وجود دارد. اولین مشکل انتخاب مقادیر و پارامترهای ورودی فرایند برای رسیدن به یک کیفیت سطح مطلوب و دومین بحث حداکثر کردن نرخ تولید می‌باشد. کارایی و راندمان پروسه‌ی ماشین‌کاری، به وسیله‌ی نرخ براده برداری، زمان ماشین‌کاری، نیروهای ماشین‌کاری، توان مورد نیاز برش، سایش و عمر ابزار سنجیده می‌شود. بهینه‌سازی از این توابع هدف ذکر شده، بدون از دست رفتن کیفیت قطعه اهمیت کلیدی دارد، چون یک سطح نامطلوب نیاز به ماشین‌کاری اضافی دارد که این خود باعث کاهش قابلیت تولید می‌شود. توابع هدف این مقاله فقط نیروهای فرزکاری و زبری می‌باشد. عواملی که بر خروجی‌های فرایند تأثیر می‌گذارند همان پارامترهای ماشین‌کاری (سرعت برشی، سرعت پیشروی، سیال خنک کننده، عمق برش محوری) هستند. برای انجام بهینه‌سازی روش‌های مختلفی وجود دارد. در این مقاله از بهینه‌سازی چند هدفه توبلاکس برنامه متلب استفاده گردیده است. پارامترهای ورودی شامل عمق‌های برش محوری، سرعت برشی و پیشروی سیال خنک کننده می‌باشند و خروجی مورد بررسی بهینه‌سازی زبری سطح و نیروی ماشین‌کاری بصورت هم‌زمان می‌باشد، به گونه‌ای که زبری سطح حداقل و نیروی ماشین‌کاری نیز حداقل باشد. ارائه نتایج الگوریتم ژنتیک به سرعت انجام می‌گیرد و نیز استفاده از الگوریتم ژنتیک بسیار راحت‌تر از حل روابط پیچیده خواهد بود. در ابتدا معادلات رگرسیون درجه دو نیروی ماشین‌کاری و زبری سطح به عنوان بهترین توابع هدف نسبت به داده‌های تجربی ایجاد گردید. بهینه‌سازی نیرو و زبری سطح بصورت هم‌زمان نیز یک بهینه‌سازی چند متغیره می‌باشد. این مسأله بدون قید طراحی گردید و نتایج آن در جدول 5 مشاهده می‌شود.

در شکل 22 اثر تعداد نورون هرلایه بر خطای محاسباتی براساس داده‌های آموزش و معتبرسازی مشاهده می‌شود و همانطور که مشخص است انتخاب بین 4 و 5 نورون در لایه پنهان کمترین خطا را به همراه دارد. شکل 23 نمودار رگرسیون خروجی داده‌های شبکه عصبی می‌باشد که ضریب همبستگی 97 درصد قابلیت بالای آن را نشان می‌دهد. شکل 24 نیز نمودار رگرسیون داده‌ها هنگام آموزش و معتبرسازی و شکل 25 نیز نمودار کارایی شبکه عصبی است که تایید کاملی بر صحت و اعتبار نتایج خروجی شبکه عصبی خواهد بود. به علاوه مشخص است که با 27 دوره<sup>1</sup> داده‌های معتبرسازی نزدیک ترین حالت به داده‌های آموزش می‌باشد و پس از آن خطا افزایش می‌یابد.

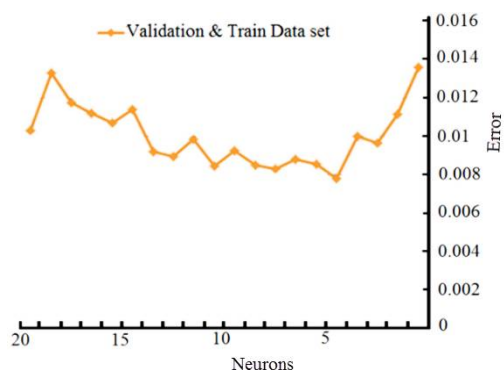


Fig. 22 The Optimum graph of neurons

شکل 22 نمودار بهینه‌سازی نورون‌ها

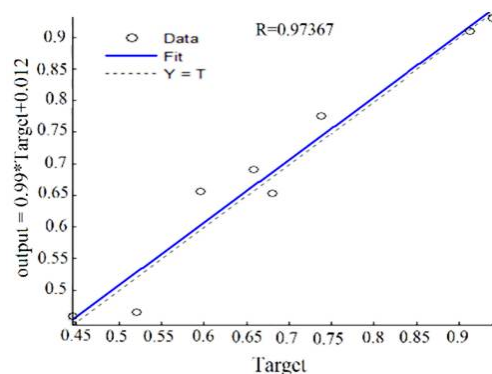


Fig. 23 Regression graph of output data

شکل 23 نمودار رگرسیون داده‌های خروجی

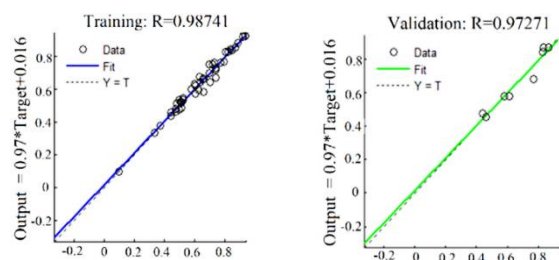


Fig. 24 Regression graph in training and validation

شکل 24 نمودارهای رگرسیون داده‌ها هنگام آموزش و معتبرسازی

<sup>1</sup> Epochs

نیکل، اینکونل 738 مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. نهایتاً با توجه به نتایج حاصل از نیروی ماشین‌کاری و زبری‌سنجی تأثیر پارامترهای مختلف ماشین‌کاری مشخص گردید. با توجه به نتایج حاصل از نیروسنجی به کمک دینامومتر در سه جهت X, Y, Z تأثیر پارامترهای مختلف بر نیروی ماشین‌کاری در این جهات مشخص گردید. با افزایش سرعت برشی، نیروهای ماشین‌کاری کم می‌شود. این امر به بدین دلیل است که با افزایش سرعت برشی مساحت صفحه برش یا حجم ناحیه تغییر شکل اولیه کاهش می‌یابد ( $\phi$ ) یا همان زاویه صفحه برش افزایش پیدا می‌کند، افزایش درجه حرارت باعث می‌شود، اصطکاک سطح قلم کاهش پیدا کند و سیلان ماده راحت‌تر شود. از طرف دیگر بعلافت مقاومت به برش ماده در منطقه‌ی HAZ و تغییر رفتار پلاستیکی ماده در سرعت‌های برشی بالا، نیروی ماشین‌کاری کم شده است. مشاهده می‌گردد که افزایش سرعت برشی تأثیر کمی بر کاهش دامنه نیروهای معمولی تأثیر سرعت برشی کمتر از پارامترهای دیگر است، در صورتی که در بحث ماشین‌کاری سرعت بالا و سرعت‌های برشی پایین، سرعت برشی تأثیر به‌سزایی در تغییر نیروهای ماشین‌کاری دارد و کاهش نیرو با افزایش سرعت برشی بسیار مشهودتر است. در صورتی که با افزایش سرعت برشی از یک میزان مشخص به بعد تغییرات نیروی ماشین‌کاری بسیار کم می‌باشد. با زیاد شدن عمق‌های برشی و پیشروی ضخامت براده تغییر شکل نیافته زیاد می‌شود و این موضوع باعث بالا رفتن بار براده و زیاد شدن نیروی ماشین‌کاری می‌گردد. نهایتاً با توجه به اهمیت نیروی ماشین‌کاری در این تحقیق با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و روش رگرسیون یک مدل بهینه برای پیش‌بینی نیروی کل ماشین‌کاری ایجاد گردید. برای یافتن بهترین مدل، انواع مختلف شبکه عصبی (از نظر تعداد لایه‌ی پنهان، تعداد نورون‌ها، توابع انتقال و ...) ساخته و مورد ارزیابی قرار گرفت، مشخص شد شبکه‌ای با دو لایه پنهان که هریک دارای 4 نورون است، ساختار بهینه مدل مورد نظر می‌باشد. همچنین برای نیروی ماشین‌کاری مشخص شد در بازه‌ی طراحی آزمایش صورت گرفته، سرعت برشی و پیشروی بالاترین تأثیر را داشت.

همچنین برای مدل‌سازی زبری سطح از شبکه‌ای با دو لایه پنهان و هریک دارای 5 نورون استفاده شد. سرعت برشی، پیشروی، مایع خنک‌کننده و عمق برش محوری به ترتیب بیشترین تأثیر را بر زبری سطح اینکونل مورد مطالعه داشتند.

جدول 5 نتیجه حاصل از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی نیروی ماشین‌کاری و زبری سطح

Table 5 The optimized machining force and surface roughness obtained from genetic algorithm(GA)

خنک کننده	عمق برش (mm)	سرعت پیشروی (mm/tooth)	سرعت برشی (m/min)	نیروی ماشین‌کاری (N)	زبری سطح (nm)
1	1/0	15/0	45	435/61	324/45

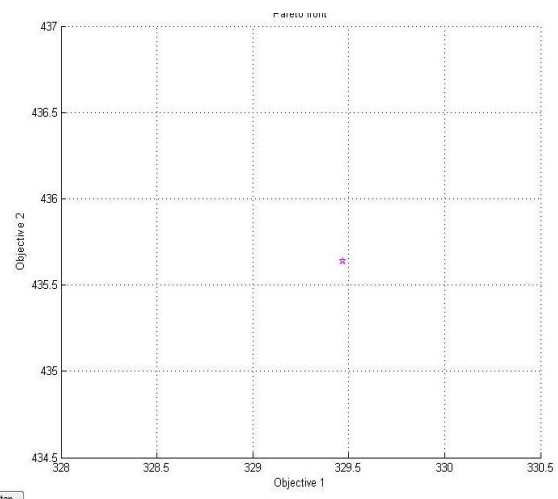


Fig. 26 Optimum relation between surface roughness & cutting force

شکل 26 ارتباط بهینه بین زبری سطح و نیروی ماشین‌کاری

همچنان که از جدول 5 و جدول پیوست دیده می‌شود مقدار بهینه معرفی شده از طرف الگوریتم ژنتیک و آزمون‌های عملی با هم کمی اختلاف دارند. این مقادیر بهینه به صورت همزمان برای زبری و نیرو در شکل 26 مشاهده می‌گردد. مقادیر بهینه حاصل از الگوریتم ژنتیک برای بدست آمدن مقدار 435/61 نیوتن برای نیرو و مقدار 324/45 نانومتر برای زبری برابر با جدول 5 است. شرایط آزمایش مذکور اجرا و نتیجه آن گزارش گردید که در جدول پیوست نیز قابل مشاهده است. عدد نیروی تجربی 461 و عدد زبری تجربی بدست آمده برابر 335 نانومتر می‌باشد. یکی از عوامل عدم تطابق نتایج حاصل از الگوریتم ژنتیک با آزمون‌های عملی، ناپایداری در اثر ارتعاشات ناشی از ماشین‌کاری فلز سخت در سرعت‌های برشی بالاتر بوده است.

### 5- نتیجه‌گیری

در عملیات فرزکاری بهینه‌سازی و پیش‌بینی نیروی ماشین‌کاری و زبری سطح حاصل دارای اهمیت فراوان می‌باشد. به علت ماشین‌کاری سخت سوپر آلیاژها، این اهمیت بیش از پیش احساس می‌گردد. در این پژوهش فرزکاری سوپرآلیاژ پایه

- of CBN Tool, 43rd Proceedings of the North American Manufacturing Research Institution of SME, Vol. 1, pp. 675–682. 2015.
- [8] S. Amini, M. J. Nategh, One directional and elliptical ultrasonic vibration assisted cutting of IN738, mechanics.journals.modares, Vol. 12, No. 6, pp. 117-123, 1391(In Persian).
- [9] Mostafa pour asl, M.R. Razfar, Use of motor spindle for predict tool wear in face milling by neural network, Mechanical and aerospace magazine, No 1, 1384(In Persian).
- [10] P.V.S. Suresh, P.V. Rao, S.G. Deshmukh, A genetic algorithmic approach for optimization of surface roughness prediction model, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol 42, pp.675–680, 2002.
- [11] H. Oktem An integrated study of surface roughness for modelling and optimization of cutting parameters during end milling operation, Int J. Adv. Manuf. Technol, Vol.43, pp.852–861, 2009.
- [12] H. Oktem, T. Erzurumlu, F. Erzincanli, Prediction of minimum surface roughness in end milling mold parts using neural network and genetic algorithm, International Journal of Material & Design, 2006.
- [13] Handbook from Sandvik Coromant, Metalcutting Technical guide, pp. A12, 2009
- [14] W.T. Chien, C.Y. Chou, The predictive model for machinability of 304 stainless steel, journal of material processing technology, Vol. 118, pp. 442-447, 2001.
- [15] H. Demuth, M. Beale, Neural Network toolbox user's guide, The Mathworks, Inc2000.
- [16] A.R Mahdi, Introduction of genetic algorithm and its application, Naghous Andishe Publication, 1386. (In Persian)
- نتایج نشان داد که بعلت تأثیر بسیار پایین عمق برش محوری، می‌توان عمق برشی را در بالاترین حد ممکن در سطوح انتخابی این مقاله را انتخاب نمود و تنها محدود کننده آن اثر افزایش ارتعاش دستگاه در ماشین‌کاری سخت است که نیاز به ماشین آلات مخصوصی دارد. هوش مصنوعی روشی قدرتمند در مدلسازی و بهینه‌سازی می‌باشد. مدل شبکه عصبی ساخته شده با دولا به پنهان توانست با دقت حداقل 97 درصد خروجی مد نظر را پیش‌بینی نماید که این عدد نشان دهنده دقت خیلی بالایی مدل ساخته شده است. از میان مدل حتی می‌توان برای پیش‌بینی آزمایش‌هایی که انجام نیافته نیز استفاده نمود. با توجه به نتایج مشخص گردید که استفاده از الگوریتم ژنتیک با 90 دوره مسئله مذکور را بهینه می‌نماید که نشان از انتخاب درست و صحیح پارامترهای تنظیمی نرم‌افزار بوده است. الگوریتم ژنتیک توانست نتایج نیرو و زبری سطح را به میزان قابل قبولی بهبود بدهد. این مقدار کمترین مقدار ممکن بوده و توسط آزمون عملی با خطای کمتر از 5 درصد بر نتیجه آن صحت‌گذاری شد.

## 6- مراجع

- [1] L.N. Lopez, J. Perez, J.I. Llorente, J.A. Sanchez, Advanced Cutting Conditions for the Milling of Aeronautical Alloys, J. Materials processing tech., vol. 100, No 1-3, pp. 1-11, 2000.
- [2] A.Farhadi, A.F.Tehrani, M.J.Haddad, A.A.Mohammadi, Effects of Machining Parameters on Cutting Force and Surface Roughness of the Superalloy Inconel 738, Tehran International Congress on Manufacturing Engineering (TICME2007) December 10-13, Tehran. 2007.
- [3] B. Davoodi and A. Hosseini Tazehkandi, Cutting forces and surface roughness in wet machining of Inconel alloy 738 with coated carbide tool, Proc IMechE Part B: J Engineering Manufacture, pp. 1–12, 2014.
- [4] Devillez, G. Le Coz, S. Dominiak, Dry machining of Inconel 718, workpiece surface integrity. J Mater Process Tech, Vol. 211, pp. 1590–1598, 2011.
- [5] J. Kyncla, L. Beránka, K. Kolařík, Z.Pala, The Research of the Surface Profile after Profiling of Inconel 738LC, Procedia Engineering, Vol.69, pp. 974 – 979, 2014.
- [6] A.K. Parida, K. Maity, Effect of nose radius on forces, and process parameters in hot machining of Inconel 718 using finite element analysis, Engineering Science and Technology, an International Journal, 2016.
- [7] T. Sugihara, T. Enomoto, High Speed Machining of Inconel 718 Focusing on Tool Surface Topography

پیوست الف نتایج حاصل از تست‌های تجربی

Attach A. Result of experimental tests

RUN	Cutting Speed	Feed	Axial Deep	Coolant	Ft (N)	Ra (nm)
1	45	0/3	0/2	0	648	702
2	35	0/2	0/2	1	615	743
3	35	0/15	0/1	1	544	508
4	40	0/25	0/1	1	567	658
5	40	0/2	0/2	1	554	527
6	40	0/25	0/2	1	597	633
7	40	0/15	0/2	1	510	512
8	40	0/2	0/1	1	523	499
9	30	0/2	0/2	0	707	871
10	30	0/2	0/2	1	698	798
11	35	0/25	0/1	0	619	847
12	40	0/25	0/1	0	584	658
13	35	0/15	0/2	1	565	527

40	45	0/2	0/1	1	446	446	14	40	0/15	0/1	0	509	498
41	35	0/25	0/2	1	635	697	15	35	0/3	0/2	0	723	934
42	45	0/25	0/1	1	495	479	16	30	0/15	0/1	0	651	700
43	35	0/3	0/1	1	671	839	17	45	0/25	0/2	0	552	581
44	45	0/15	0/1	1	461	335	18	45	0/25	0/1	0	512	484
45	40	0/15	0/1	1	505	463	19	30	0/25	0/1	1	689	825
46	45	0/2	0/1	0	512	439	20	40	0/3	0/2	0	476	773
47	30	0/2	0/1	1	689	769	21	35	0/3	0/1	0	615	918
48	35	0/3	0/2	1	505	829	22	45	0/2	0/2	1	535	477
49	40	0/15	0/2	0	535	580	23	45	0/3	0/1	1	671	512
50	35	0/15	0/1	0	553	612	24	40	0/3	0/2	1	465	743
51	30	0/25	0/2	1	759	833	25	35	0/25	0/2	0	650	807
52	30	0/2	0/1	0	689	867	26	40	0/2	0/2	0	569	608
53	45	0/3	0/1	0	595	695	27	40	0/2	0/1	0	544	511
54	45	0/25	0/2	1	552	465	28	30	0/15	0/2	1	665	602
55	40	0/25	0/2	0	599	643	29	45	0/15	0/2	1	498	372
56	35	0/2	0/1	1	580	656	30	40	0/3		0	647	721
57	45	0/15	0/1	0	476	459	31	45	0/3	0/2	1	632	641
58	35	0/2	0/2	0	631	780	32	45	0/2	0/2	0	546	608
59	30	0/3	0/2	1	595	930	33	35	0/2	0/1	0	512	739
60	30	0/25	0/2	0	774	910	34	30	0/15	0/1	1	651	630
61	40	0/3	0/1	1	627	678	35	30	0/3	0/1	1	671	885
62	30	0/25	0/1	0	746	971	36	30	0/15	0/2	0	678	729
63	35	0/15	0/2	0	577	580	37	45	0/15	0/2	0	501	445
64	30	0/3	0/1	0	787	972	38	30	0/3	0/2	0	598	101
							39	35	0/25	0/1	1	565	656