



## بهینه‌سازی هم‌زمان زبری سطح و نرخ برداشت ماده در تراش‌کاری خشک سوپرآلیاژ اینکونل 600

بهبود حیدری<sup>1</sup>، محمد مهدی ابوترابی<sup>2\*</sup>، حمیدرضا کریمی زارچی<sup>3</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد

3- استادیار، مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، یزد

\* یزد، صندوق پستی 89195-741، abootorabi@yazd.ac.ir

### چکیده

آلیاژهای پایه نیکل کاربرد زیادی در صنایع هوافضا، نیروگاهی و پتروشیمی دارند. ماشین‌کاری این آلیاژها معمولاً با نیرو و دمای برش زیاد و کیفیت سطح پایین همراه است. برای مقابله با این محدودیت‌ها، در ماشین‌کاری آلیاژهای پایه نیکل از مقادیر نسبتاً کوچک پارامترهای برشی استفاده می‌شود که نرخ تولید را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد. در این مقاله، تأثیر سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق برش بر زبری سطح در تراش‌کاری خشک سوپر آلیاژ پایه نیکل اینکونل 600 با استفاده از ابزار کاربیدی در محدوده عملیات پرداخت‌کاری بصورت تجربی بررسی شده است. طراحی آزمایش‌ها بصورت کامل بوده و در مجموع، 48 آزمایش انجام شده است. آنالیز واریانس انجام شده نشان داد که نرخ پیشروی 69%، عمق برش 6% و سرعت برشی 2% بر زبری سطح اینکونل 600 اثرگذار هستند. علاوه بر اندازه‌گیری زبری سطح، میزان نرخ برداشت براده در هر آزمایش محاسبه شده و سپس، مقادیر بهینه پارامترهای ماشین‌کاری برای رسیدن هم‌زمان به حداقل زبری سطح و حداکثر نرخ برداشت براده با استفاده از شبکه عصبی و الگوریتم بهینه‌سازی رقابت استعماری بدست آمده است. به کمک این الگوریتم، چندین سطح از پارامترهای برشی بهینه تعیین شده است که با توجه به زبری سطح و نرخ برداشت ماده مورد نیاز، یک طراح فرایند می‌تواند مقادیر پارامترهای برشی مذکور را مورد استفاده قرار دهد.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 26 اسفند 1396

پذیرش: 28 خرداد 1397

ارائه در سایت: آذر 1397

### کلیدواژگان:

بهینه‌سازی چند هدفه

زبری سطح

اینکونل 600

شبکه عصبی

الگوریتم رقابت استعماری

## Simultaneous optimization of surface roughness and material removal rate in dry turning of super alloy Inconel 600

Behbood Heydari<sup>1</sup>, Mohammad Mahdi Abootorabi<sup>1\*</sup>, Hamid Reza Karimi Zarchi<sup>2</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

2- Department of Mining and Metallurgical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

\* P.O.B. 89195-741 Yazd, abootorabi@yazd.ac.ir

### Article Information

Original Research Paper  
Received 17 March 2018  
Accepted 18 June 2018  
Available Online December 2018

### Keywords:

Multi objective optimization  
Surface roughness  
Inconel600  
Neural network  
Imperialist Competitive Algorithm

### Abstract

Nickel-based alloys are largely used in aerospace, power generation and petrochemical industries. Machining of these alloys is usually accompanied with high cutting force and temperature and low surface quality. In order to avoid these limitations, small values of cutting parameters are used in machining of nickel-based alloys that significantly decrease the productivity. In this paper, the effects of cutting speed, feed rate and depth of cut on the surface roughness in dry turning of nickel-based super alloy Inconel600 by using carbide tool in finishing range have been experimentally investigated. Full factorial design of experiments was used and totally 48 tests were done. Results of the analysis of variance showed that feed rate 69%, depth of cut 6% and cutting speed 2% affects on surface roughness of Inconel 600. In addition to measuring the surface roughness, chip removal rate was calculated for each test and then, for achieving to minimum surface roughness and maximum chip removal rate at the same time, the optimal machining parameters have been achieved by using neural network and imperialist competitive optimization algorithm. By using this algorithm, several levels of optimum cutting parameters are set and a process planner according to the required surface roughness and material removal rate can use these cutting parameters.

1- مقدمه

حفظ استحکام در دمای بالا را نام برد [1]. این ویژگی‌ها باعث می‌شود ماشین‌کاری این آلیاژها حتی نسبت به فولادهای زنگ نزن سخت‌تر شود. خواصی مانند هدایت حرارتی پایین، کار سختی سریع هنگام ماشین‌کاری، تمایل به ایجاد لبه انباشته و وجود ذرات ساینده کاربیدی در آلیاژهای پایه نیکل،

آلیاژهای پایه نیکل استفاده گسترده‌ای در صنایع هوافضا، نیروگاهی، پتروشیمی، دریایی و شیمیایی دارند. از ویژگی‌های آلیاژهای پایه نیکل می‌توان دمای ذوب بالا، مقاومت به سایش بالا، مقاومت به خوردگی خوب، عمر خستگی زیاد و قابلیت

Please cite this article using:

B. Heydari, M. M. Abootorabi, H. R. Karimi Zarchi, Simultaneous optimization of surface roughness and material removal rate in dry turning of super alloy Inconel 600, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 5, No. 3, pp. 1-11, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

پارامترهای ماشین‌کاری در عملیات تراش کاری اینکونل 625 را به کمک روش تاگوچی بهینه کردند. هدف آنها در این تحقیق، ماکزیمم کردن نرخ برداشت براده بود. آنها نشان دادند که عمق برشی تا یک محدوده خاص بر زبری سطح اثر گذار است و پارامترهای سرعت برشی و نرخ پیشروی بیشترین تأثیر را بر نرخ برداشت براده دارند.

با توجه به اهمیت ماشین‌کاری سوپر آلیاژهای پایه نیکل در صنایع مختلف، در این تحقیق تأثیر پارامترهای سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق برش بر میزان زبری سطح در تراش کاری سوپر آلیاژ پایه نیکل اینکونل 600 در محدوده عملیات پرداخت کاری مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از این مطالعه، بهینه‌سازی پارامترهای ماشین‌کاری برای رسیدن به حداقل زبری سطح و حداکثر نرخ برداشت براده به صورت هم‌زمان با استفاده از شبکه عصبی و الگوریتم رقابت استعماری است. بهینه‌سازی چند هدفه پارامترهای برشی برای داشتن زبری سطح کم و نرخ برداشت براده بالا در تراش کاری اینکونل 600 در تحقیقات منتشر شده [9-15] انجام نشده است. نتایج به دست آمده نشان دهنده کارایی الگوریتم رقابت استعماری برای بهینه‌سازی چند هدفه خروجی‌های فرایند ماشین‌کاری است.

## 2- تجهیزات و روش انجام آزمایش‌ها

آزمایش‌های تراش کاری روی قطعات استوانه‌ای از جنس سوپر آلیاژ پایه نیکل اینکونل 600 که سختی آن حدود 190 ویکرز (یا 90 راکول بی) بود انجام شده است. ترکیب شیمیایی قطعه کار با روش کوانتومتری به دست آمده و در جدول 1 ذکر شده است.

جدول 1 ترکیب شیمیایی اینکونل 600

Table 1 Chemical composition of Inconel 600

عنصر	درصد وزنی (%)
نیکل	73/57
کرم	16/4
آهن	8/4
منگنز	0/46
الومنیوم	0/39
سیلیسیم	0/34
تیتانیوم	0/3
کربن	0/04
هافنیوم	0/04
مس	0/02
کبالت	0/02

ماشین‌کاری آنها را سخت کرده و باعث کاهش کیفیت سطح و عمر ابزار و افزایش نیروهای برشی می‌شود [2]. در ماشین‌کاری سوپر آلیاژها، استفاده از مایعات خنک کننده بسیار مهم است اما هزینه‌های تولید را افزایش می‌دهد و اثرات مخربی بر محیط زیست و سلامت انسان می‌گذارد. به این دلایل، تمایل به استفاده از ماشین‌کاری خشک برای سوپر آلیاژها افزایش یافته است [3]. انتخاب جنس، هندسه و پوشش ابزار برشی نقش مهمی در افزایش قابلیت ماشین‌کاری و بهبود کیفیت سطح ایفا می‌کند. از ابزار کاربیدی به‌طور گسترده‌ای در ماشین‌کاری آلیاژهای پایه نیکل استفاده شده است. با افزایش پارامترهای برشی نرخ تولید افزایش می‌یابد ولی باعث کاهش عمر ابزار و افزایش زبری سطح می‌شود. از این رو، بهینه‌سازی چند هدفه پارامترهای ماشین‌کاری برای دستیابی به کیفیت سطح مناسب و نرخ براده برداری حداکثر از اهمیت زیادی برخوردار است. برای بهینه‌سازی چند هدفه، در تحقیقات مختلف از ترکیب شبکه عصبی و الگوریتم‌های بهینه‌سازی متفاوت استفاده شده است [4]. اروناچالام و همکاران [5] تأثیر پارامترهای سرعت برشی، عمق برش، سیال برشی، هندسه و پوشش ابزار را بر زبری سطح و تنش‌های پسماند در تراش کاری سوپر آلیاژ پایه نیکل اینکونل 718 با ابزارهای CBN و سرامیکی مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که مقدار زبری سطح با افزایش سرعت برشی کاهش می‌یابد و کاهش شعاع نوک ابزار و استفاده از ابزار با زاویه براده منفی باعث افزایش تنش‌های پسماند فشاری می‌شود. داوودی و اسکندری [6] برای بررسی تجربی ماشین‌کاری سوپر آلیاژ پایه نیکل N-125 از روش طراحی آزمایش تاگوچی استفاده کردند و برای تعیین پارامترهای برشی بهینه، روش تحلیل آماری نسبت سیگنال به نویز و آنالیز واریانس را بکار بردند. حداقل مقدار زبری سطح در سرعت برشی 100 m/min، نرخ پیشروی 0/05 mm/rev و عمق برش 0/5 mm به دست آمد. مایار و همکاران [7] با استفاده از روش تاگوچی و تحلیل رابطه خاکستری، پارامترهای نرخ برداشت براده و زبری سطح را در فرزکاری تر سوپر آلیاژ اینکونل 718 با استفاده از ابزار تنگستن کارباید بدون پوشش بهینه کردند. پارامترهای ورودی در این مطالعه، نرخ پیشروی، سرعت برشی و عمق برش در نظر گرفته شد. مارکو و همکاران [8] با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات، پارامترهای نرخ پیشروی، سرعت برشی و عمق برش را بهینه کردند. پارامترهای خروجی در این تحقیق، نیروی برش، زبری سطح و عمر ابزار در نظر گرفته شد. جاین و همکاران [1]

پارامترهای ورودی در این تحقیق شامل سرعت برشی و نرخ پیشروی در چهار سطح و عمق برش در سه سطح بود. پارامترهای خروجی، زبری سطح و نرخ برداشت براده در نظر گرفته شده‌است. مقادیر پارامترهای ورودی در جدول 2 ارائه شده‌است. انتخاب مقادیر پارامترهای برشی بر اساس داده‌های سایر مقالات برای سوپر آلیاژهای پایه نیکل، آزمایش‌های تجربی مقدماتی و همچنین پیشنهادی شرکت سازنده ابزار برشی انجام شده است. طراحی آزمایش‌ها به صورت کامل بوده و در مجموع 48 آزمایش با ترتیب تصادفی انجام شده‌است. در هر آزمایش، نرخ برداشت براده از رابطه (1) بدست آمده است [16]:

$$MRR = V_c \cdot f \cdot a_p \quad (1)$$

که  $V_c$  سرعت برشی برحسب متر بر دقیقه،  $f$  نرخ پیشروی برحسب میلی‌متر بر دور و  $a_p$  عمق برش برحسب میلی‌متر است و نرخ برداشت براده  $MRR$  برحسب سانتی‌متر مکعب بر دقیقه به دست می‌آید. جدول 3 نحوه طراحی آزمایش‌ها و مقادیر زبری سطح و نرخ برداشت براده در هر آزمایش را نشان می‌دهد.

جدول 2 سطوح و مقادیر پارامترهای ورودی

Table 2 Levels and values of input cutting parameters

سطح	سرعت برشی $V_c$ (m/min)	نرخ پیشروی $f$ (mm/rev)	عمق برش $a_p$ (mm)
1	38	0/05	0/2
2	53	0/09	0/4
3	75	0/14	0/6
4	105	0/18	-

قبل از اجرای آزمایش‌ها، عملیات آماده‌سازی شامل مته مرغک‌زنی، شیارتراشی، روتراشی و پیشانی‌تراشی بر روی قطعات انجام شد. نقشه قطعه‌کار استفاده شده در آزمایش‌های تجربی در شکل 1 نشان داده شده‌است. هر آزمایش روی یکی از قسمت‌های 13 میلی‌متری قطعه‌کار به صورت ماشین‌کاری خشک (بدون روان‌کار) انجام گرفته است. دستگاه تراش مورد استفاده برای انجام آزمایش‌ها از نوع TCN-10 ساخت شرکت ماشین‌سازی تبریز با سیستم کنترل ساخت شرکت زمینس بوده است. در همه آزمایش‌ها از ابزارگیر مدل DDANR 2525 M16 و ابزار کاربایدی DNMA 15 06 04 گرید K15 ساخت شرکت سندویک استفاده شده‌است. هر سه آزمایش با یک اینسرت جدید انجام شد و ترتیب انجام آزمایش‌ها تصادفی بود. برای اندازه‌گیری زبری سطح از دستگاه زبری‌سنج پرتابل مدل TR100 ساخت شرکت تایم استفاده شد. نحوه اندازه‌گیری زبری سطح به این صورت بود که بعد از انجام براده برداری، زبری سطح هر نمونه چهار بار اندازه‌گیری شد و میانگین آنها به عنوان زبری سطح آن نمونه ثبت گردید. شکل 2 نحوه انجام آزمایش‌های تجربی، قطعه‌کار و چگونگی زبری‌سنجی نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

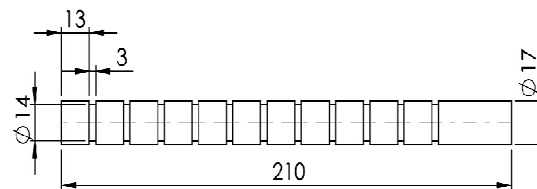


Fig. 1 The used workpiece for turning tests

شکل 1 قطعه‌کار استفاده شده برای آزمایش‌های تراش کاری

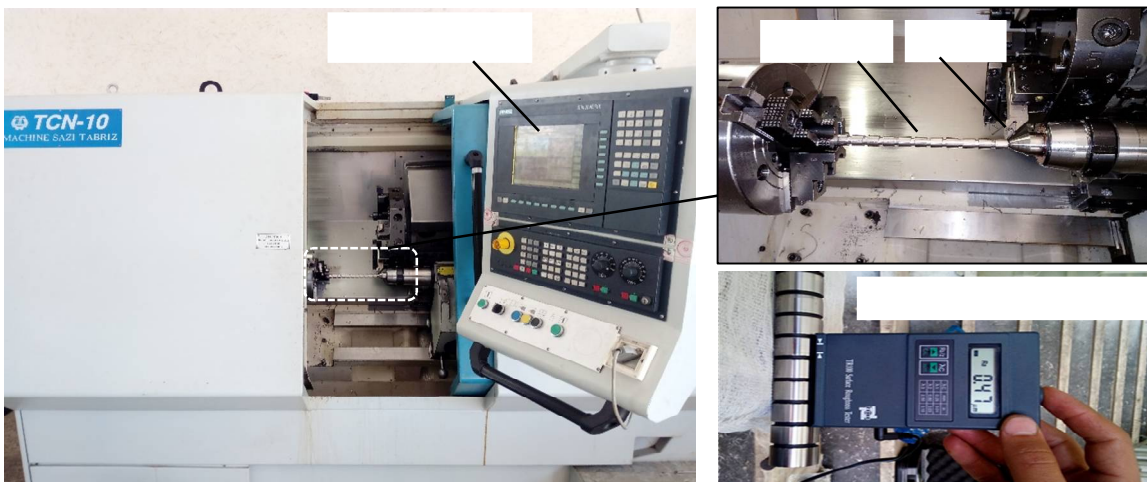


Fig 2 Experimental setup and surface roughness measuring machine

شکل 2 چیدمان تجربی و دستگاه اندازه‌گیری زبری سنج

جدول 3 طراحی آزمایش‌ها همراه با مقادیر زبری سطح و نرخ برداشت براده

Table 3 Design of experiments with values of surface roughness and material remove rate

MRR (cm <sup>3</sup> /min)	R <sub>a</sub> (μm)	a <sub>p</sub>	f	V <sub>c</sub>	شماره آزمایش	MRR (cm <sup>3</sup> /min)	R <sub>a</sub> (μm)	a <sub>p</sub>	f	V <sub>c</sub>	شماره آزمایش
0/750	0/73	1	1	3	25	0/380	0/86	1	1	1	1
1/500	1/65	2	1	3	26	0/760	1/40	2	1	1	2
2/250	1/74	3	1	3	27	1/140	1/25	3	1	1	3
1/350	2/09	1	2	3	28	0/684	0/80	1	2	1	4
2/700	1/16	2	2	3	29	1/368	0/85	2	2	1	5
4/050	1/46	3	2	3	30	1/052	1/57	3	2	1	6
2/100	1/25	1	3	3	31	1/064	1/45	1	3	1	7
4/200	1/73	2	3	3	32	2/128	1/66	2	3	1	8
6/300	2/52	3	3	3	33	3/192	2/09	3	3	1	9
2/700	3/42	1	4	3	34	1/368	2/60	1	4	1	10
5/400	3/46	2	4	3	35	2/736	2/56	2	4	1	11
8/100	2/60	3	4	3	36	4/104	2/48	3	4	1	12
1/050	1/17	1	1	4	37	0/530	0/74	1	1	2	13
2/100	1/47	2	1	4	38	1/060	0/51	2	1	2	14
3/150	1/05	3	1	4	39	1/590	0/76	3	1	2	15
1/890	0/68	1	2	4	40	0/954	1/40	1	2	2	16
3/780	1/52	2	2	4	41	1/908	1/48	2	2	2	17
5/670	1/85	3	2	4	42	2/862	1/46	3	2	2	18
2/940	1/30	1	3	4	43	1/484	1/07	1	3	2	19
5/880	1/98	2	3	4	44	2/968	2/10	2	3	2	20
8/820	2/45	3	3	4	45	4/452	1/69	3	3	2	21
3/780	2/85	1	4	4	46	1/908	2/11	1	4	2	22
7/560	3/43	2	4	4	47	3/516	4/48	2	4	2	23
11/340	2/7	3	4	4	48	4/724	2/31	3	4	2	24

### 3- نتایج و بحث

در این پژوهش از معیار سنجش زبری سطح متوسط R<sub>a</sub> جهت تعیین زبری سطح استفاده شده است. زبری سطح متوسط یکی از مهمترین پارامترهای خروجی در یک فرایند ماشین کاری است که تحت تأثیر پارامترهای برشی و هندسه ابزار قرار دارد [12]. سرعت برشی روی زبری سطح، نیروی برش، توان مصرفی، عمر ابزار و زمان ماشین کاری تأثیر دارد [17].

نحوه تأثیر سرعت برشی بر زبری سطح کاملاً مشخص نشده است و به جنس ابزار، قطعه کار و شرایط ماشین کاری بستگی دارد. در برخی موارد با افزایش سرعت برشی، زبری سطح افزایش [18] و در موارد دیگر، زبری سطح کاهش یافته است [19]. در شکل 3 تأثیر سرعت برشی بر میانگین زبری سطح نشان داده شده است. در ماشین کاری خشک سوپر آلیاژ اینکونل 600 ابتدا با افزایش سرعت برشی تا یک محدوده مشخص، زبری سطح

افزایش و سپس با افزایش بیشتر سرعت برشی، زبری سطح کاهش یافته است. افزایش زبری سطح در محدوده سرعت 38 تا 75 m/min به دلیل تشکیل لبه انباشته [20] و ایجاد اصطکاک بین سطح ابزار و براده است. افزایش اصطکاک در فصل مشترک ابزار و براده باعث دشواری جریان براده و افزایش ارتعاش قطعه کار و ابزار شده و در نتیجه زبری سطح را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، با افزایش سرعت برشی، سایش ابزار افزایش می‌یابد و این سایش، کیفیت سطح را کاهش می‌دهد. با افزایش سرعت برشی از 75 تا 105 m/min، به دلیل بالا رفتن درجه حرارت و از بین رفتن لبه انباشته [21]، تغییر شکل پلاستیکی آسانتر شده و اصطکاک بین سطح آزاد و سطح تازه ماشین کاری شده قطعه کار و همچنین اصطکاک سطح قلم با براده کاهش می‌یابد و در نتیجه زبری سطح کاهش پیدا می‌کند. همان‌طور که در شکل 3 دیده می‌شود، کمترین میانگین زبری سطح در سرعت برشی

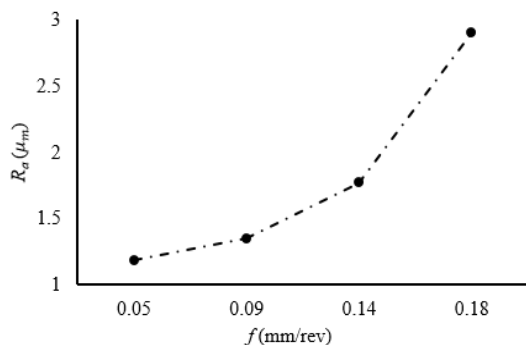


Fig 4 The effect of feed rate on average surface roughness

شکل 4 تأثیر نرخ پیشروی بر میانگین زبری سطح

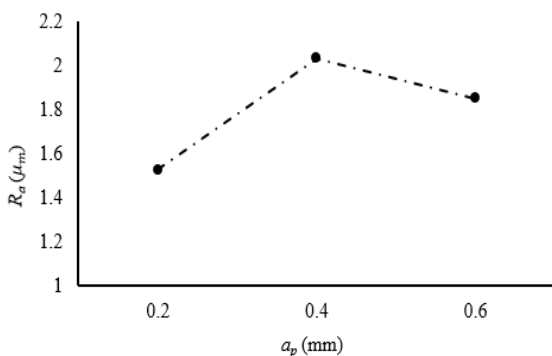


Fig 5 The effect of depth of cut on average surface roughness

شکل 5 تأثیر عمق برش بر میانگین زبری سطح

نتایج حاصل از آنالیز واریانس برای زبری سطح در جدول 4 ذکر شده‌است که DF تعداد درجه آزادی، Seq SS تغییرپذیری کل مدل، Contribution درصد تأثیر هر پارامتر بر مدل، Adj MS مجموع مربعات تغییرات، Adj MS مجموع مربعات مینیمم تغییرات و F برابر با Adj MS تقسیم بر مقدار خطای Adj MS است و P توسط نرم‌افزار و با توجه به مقدار F تعیین می‌گردد. اگر مقدار P از مقدار  $\alpha$  (عدم قطعیت) که در این تحقیق 0/05 در نظر گرفته شده‌است، کمتر باشد، پارامتر مورد نظر بر رفتار سیستم مؤثر و در غیر این‌صورت، غیر مؤثر است. طبق نتایج حاصل از آنالیز واریانس، در بین پارامترهای برشی، بیشترین تأثیر بر زبری سطح را نرخ پیشروی با 69% و سپس عمق برش با 6% دارد. سرعت برشی با 2% تأثیر عملاً اثری بر زبری سطح ندارد. در جدول 4 اثرات متقابل دوتایی پارامترهای برشی نیز بررسی شده‌است. اثر متقابل عمق برش و نرخ پیشروی با 8% تأثیر بر زبری سطح، نسبت به سایر اثرات متقابل پارامترها اهمیت بیشتری دارد. میزان خطای آنالیز واریانس 9% است که قابلیت اعتماد آنالیز واریانس انجام شده را نشان می‌دهد.

بدست آمده است. 38 m/min

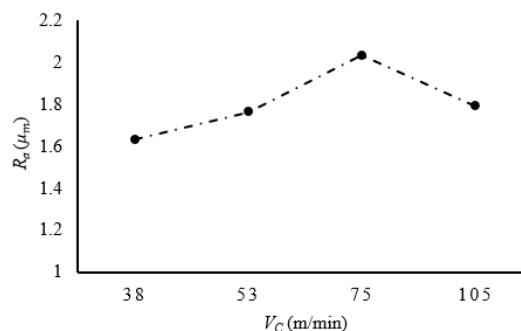


Fig 3 The effect of cutting speed on average surface roughness

شکل 3 تأثیر سرعت برشی بر میانگین زبری سطح

در بین پارامترهای برشی، نرخ پیشروی بیشترین تأثیر را بر زبری سطح دارد. بر اساس نتایج ارائه شده توسط نالبنات و همکاران، نرخ پیشروی و شعاع نوک ابزار بیشترین تأثیر را بر زبری سطح دارند [22]. در شکل 4 تأثیر نرخ پیشروی بر میانگین زبری سطح نشان داده شده‌است. همان‌گونه که در شکل 4 دیده می‌شود، با افزایش نرخ پیشروی، زبری سطح افزایش یافته است. علت افزایش زبری سطح با افزایش نرخ پیشروی، افزایش نیروهای برشی، سایش ابزار و گام برآمدگی-های ناشی از تماس ابزار با سطح قطعه کار است [20]. کمترین زبری سطح در نرخ پیشروی 0/05 mm/rev مشاهده شده‌است. شکل 5 تأثیر عمق برش روی میانگین زبری سطح را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل 5 دیده می‌شود، زبری سطح با افزایش عمق برش تا محدوده 0/4 mm افزایش و با افزایش بیشتر عمق برش تا 0/6 mm کاهش یافته است اما مقادیر تغییرات زبری سطح در عمق‌های برش مختلف، اندک است. مرور تحقیقات مختلف [24، 23] نشان می‌دهد که تغییر عمق برش تأثیر زیادی بر زبری سطح ندارد. شکل 5 نیز به طور کلی این نتیجه را تأیید می‌کند.

به نظر می‌رسد با تغییر مقادیر عددی عمق برش در شکل 5، روند متفاوتی مشاهده خواهد شد. کمترین زبری سطح در عمق برش 0/2 mm بدست آمد.

### 3-1- آنالیز واریانس

در این تحقیق، برای تعیین میزان تأثیر پارامترهای سرعت برشی، نرخ پیشروی، عمق برش و اثرات متقابل دوتایی آنها بر زبری سطح در فرایند تراش کاری خشک اینکونل 600، از نرم‌افزار مینی‌تب جهت آنالیز واریانس و تحلیل نتایج استفاده شده است.

جدول 4 آنالیز واریانس برای زبری سطح

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F	P
$a_p$	2	1/9736	%5/90	1/9736	0/98681	5/91	0/011
$f$	3	22/9284	%68/55	22/9284	7/64272	45/76	0/000
$V_c$	3	0/5658	%1/69	0/5658	0/1886	1/13	0/364
$a_p \times f$	6	2/6088	%7/80	2/6088	0/43481	2/6	0/054
$V_c \times a_p$	6	1/6495	%4/93	1/6495	0/27491	1/65	0/192
$V_c \times f$	9	0/7135	%2/13	0/7135	0/07927	0/47	0/873
Error	18	3/0066	%8/99	3/0066	16/70		
Total	47	33/4462	%100				

نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها برای آموزش شبکه عصبی، 15% برای اعتبار سنجی و 15% برای تست نهایی مدل ارائه شده استفاده شده است. شبکه عصبی مورد استفاده، یک شبکه عصبی دو لایه با یک لایه مخفی و تعداد هفت نرون در لایه مخفی و تابع تبدیل تانژانت سیگموئید در لایه اول و خطی ساده در لایه دوم است که ساختار آن در شکل 6 آمده است.

پس از آموزش شبکه عصبی مصنوعی توسط نتایج تجربی و بررسی دقت و اعتبار شبکه ایجاد شده، از آن به عنوان تابع هزینه در الگوریتم رقابت استعماری استفاده می‌شود. شکل 7 تحلیل رگرسیون خطی بین داده‌های تجربی و پیش‌بینی شبکه عصبی برای زبری سطح را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که خطاها بسیار کوچک است و شبکه عصبی به خوبی آموزش دیده است.

### 3-3- بهینه‌سازی

برای بهینه‌سازی مسائل غیرخطی و پیچیده، استفاده از روش‌های تصادفی که الگوریتم جستجوی آنها بر مبنای احتمال است، نسبت به روش‌های کلاسیک که بر اساس گرادینان توابع عمل می‌کنند کارایی بیشتری دارد.

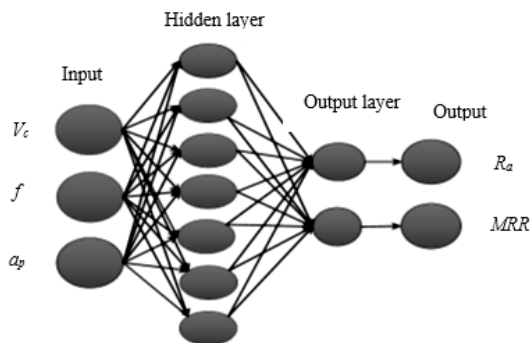


Fig. 6 Neural network structure proposed for the prediction of surface roughness

شکل 6 ساختار شبکه عصبی پیشنهاد شده برای پیش‌بینی زبری سطح

پس از اطمینان از تأثیر معنا دار نرخ پیشروی و عمق برش بر زبری سطح، برای تعیین اینکه کدام جامعه یا سطوح از این دو پارامتر با هم تفاوت معنا دار دارند، از آزمون تعقیبی Tukey استفاده گردید. نتایج این آزمون نشان می‌دهد که سطح معنا دار بودن برای عمق برش بین دو سطح 0/2 تا 0/4 mm و برای نرخ پیشروی، تمام نواحی مورد آزمایش بجز بین دو سطح 0/05 تا 0/09 mm/rev است.

### 3-2- شبکه عصبی

شبکه عصبی مصنوعی یکی از مهم‌ترین و مشهورترین مدل‌های پیش‌بینی است که قادر است تخمین خوبی برای خروجی‌ها در فرایند ماشین‌کاری به دست آورد [25]. شبکه عصبی مصنوعی به‌طور گسترده در تحقیقات و حل مسائل مختلف در جایی که یک تابع تقریبی برای نگاشت غیرخطی بین پارامترهای ورودی و خروجی نیاز است، استفاده می‌شود [26]. در این پژوهش، به دلیل غیرخطی بودن رابطه زبری سطح با پارامترهای ورودی و عدم وجود رابطه ریاضی مشخص بین ورودی‌ها و خروجی، از شبکه عصبی برای مدل‌سازی زبری سطح استفاده شده است. به‌منظور تعیین مدل پیش‌بینی فرایند با دقت قابل قبول، شبکه عصبی باید آموزش داده شود. در اکثر پژوهش‌های مهندسی، برای آموزش شبکه عصبی از الگوریتم پیش‌خور<sup>1</sup> پس انتشار خطا<sup>2</sup> با الگوریتم آموزشی لونیبرگ-مارکواریت استفاده شده است. الگوریتم لونیبرگ-مارکواریت سریع‌ترین نرخ همگرایی را نسبت به الگوریتم‌های دیگر دارد [19]. در مطالعه حاضر، از جعبه ابزار شبکه عصبی نرم‌افزار متلب و از الگوریتم‌های مختلف برای آموزش شبکه عصبی استفاده شد و در نهایت، الگوریتم لونیبرگ-مارکواریت که کمترین خطا را داشت، انتخاب گردید 70% از

<sup>1</sup> Feed Forward

<sup>2</sup> Back Propagation Algorithm

$$Country = [p_1, p_2, p_3, \dots, p_{N_{var}}] \quad (2)$$

هزینه یک کشور با ارزیابی تابع  $f$  در متغیرهای طراحی و طبق رابطه (3) بدست می‌آید:

$$Cost_i = f(country_i) = f(p_{i1}, p_{i2}, p_{i3}, \dots, p_{iN_{var}}) \quad (3)$$

این الگوریتم مانند دیگر الگوریتم‌های بهینه‌سازی، با تعدادی  $N_{coun}$  جمعیت اولیه که به‌صورت تصادفی شکل گرفته، یک کشور را تشکیل می‌دهند. کشورها به دو دسته مستعمره و امپریالیست تقسیم می‌شوند. در الگوریتم رقابت استعماری، برخی از بهترین عناصر جمعیت  $N_{imp}$  به‌عنوان امپریالیست و باقیمانده جمعیت  $N_{col}$  به‌عنوان مستعمره شناخته می‌شوند. با شکل‌گیری امپراطوری‌های اولیه، رقابت امپریالیستی میان آن‌ها شروع می‌شود. هر امپراطوری که نتواند در رقابت استعماری بر قدرت خود بیفزاید، به‌صورت تدریجی از صحنه رقابت استعماری حذف خواهد شد و امپراطوری‌های قوی‌تر جای او را می‌گیرد [29]. کشور امپریالیست جدید با سیاست همگون‌سازی و تغییر در فرهنگ و رسوم آنها شروع به جذب کشورهای مستعمره می‌کند. رابطه (4) حرکت کشورهای مستعمره به سمت کشورهای امپریالیست را نشان می‌دهد:

$$\begin{aligned} x &\sim U(0, \beta, d), \beta > 1 \\ \theta &\sim U(-\gamma, \gamma) \end{aligned} \quad (4)$$

که،  $x$  و  $\theta$  اعدادی تصادفی،  $U$  تابع جابجایی و  $d$  فاصله بین مستعمره و امپریالیست است. همچنین  $\beta$  و  $\gamma$  اعدادی اختیاری در محدوده جستجوی کشورهای مستعمره است. در طول این حرکت اگر کشورهای مستعمره موقعیت بهتری نسبت به امپریالیست داشته باشند، جای خود را با امپریالیست عوض می‌کنند. شکل 8 حرکت کشورهای مستعمره به سمت کشورهای امپریالیست و شکل 9 مراحل انجام الگوریتم رقابت استعماری را نشان می‌دهد. کشورهای امپریالیست با توجه به قدرشان، این مستعمرات را با رابطه (5) به سمت خود می‌کشند:

$$T.C_n = Cost(imp) + \xi \text{mean}\{Cost(col)\} \quad (5)$$

که  $T.C_n$  قدرت کلی امپراتوری  $n$ ام و  $\xi$  عددی مثبت بین صفر و یک در نظر گرفته می‌شود.

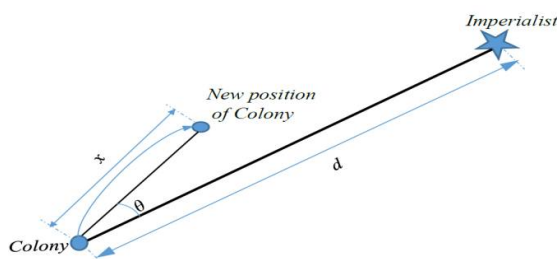


Fig. 8 moving colonies toward their relevant imperialist [30]

شکل 8 حرکت کشورهای مستعمره به سمت کشور امپریالیست [30]

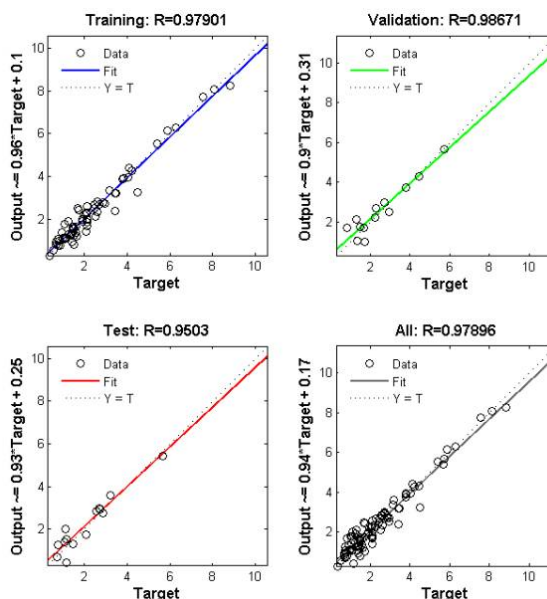


Fig.7 Linear regression analysis between the experimental data and the predictive neural network for surface roughness

شکل 7 تحلیل رگرسیون خطی بین داده‌های تجربی و پیش‌بینی شبکه عصبی برای زبری سطح

روش‌های کلاسیک بهینه‌سازی برای توابع پیوسته و منظم استفاده می‌شوند و امکان محبوس شدن در نقاط مینیمم محلی برای آنها وجود دارد. در این مقاله، از الگوریتم تصادفی رقابت استعماری برای بهینه‌سازی هم‌زمان زبری سطح و نرخ برداشت براده استفاده شده است. دلیل استفاده از این الگوریتم آن است که با وجود توانایی بهینه‌سازی هم‌زمان چند تابع هدف، توانایی مناسب یافتن نقطه بهینه سراسری و گیر نیفتادن در نقاط بهینه محلی و سرعت همگرایی بالا، الگوریتم رقابت استعماری کمتر در زمینه بهینه‌سازی فرایندهای ماشین‌کاری مورد استفاده قرار گرفته است. یکی از اهداف این تحقیق، بررسی کارایی این الگوریتم در بهینه‌سازی فرایندهای برشی است. الگوریتم رقابت استعماری در زمینه محاسبات تکاملی، در سال 2007 توسط آتش‌پز و لوکاس ارائه شده که نه از یک پدیده طبیعی، بلکه از یک پدیده اجتماعی - سیاسی الهام گرفته است [27]. الگوریتم رقابت استعماری در کنار روش‌های دیگر بهینه‌سازی، به‌عنوان ابزار نوینی برای محاسبات تکاملی و حل مسائل بهینه‌سازی مطرح شده و با موفقیت به بسیاری از مسائل در این حوزه عمل شده است. این الگوریتم بر اساس مدل‌سازی فرایند پدیده استعمار ساخته شده و در نوع خود قابل رقابت با دیگر الگوریتم‌های تکاملی است [28] در یک مسئله بهینه‌سازی  $N_{var}$  بعدی، یک کشور، یک آرایه‌ی  $1 \times N_{var}$  است. این آرایه به صورت رابطه (2) تعریف می‌شود:



محبوس نشدن در نقاط مینیمم محلی برای بهینه سازی فرایندهای برشی اهمیت زیادی دارد. در این پژوهش، به‌منظور مدل‌سازی و بهینه‌سازی چند هدفه، از ترکیب شبکه عصبی و الگوریتم رقابت استعماری استفاده شده است. سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق برش به‌عنوان ورودی و نرخ برداشت براده و زبری سطح به‌عنوان خروجی در نظر گرفته شده‌است. در فرایند بهینه‌سازی فرض شده است که پارامترهای ورودی به صورت پیوسته تغییر کنند. محدوده تغییرات پارامترهای ورودی به شبکه عصبی عبارتند از: سرعت برشی از 38 تا 105 m/min، نرخ پیشروی از 0/05 تا 0/18 mm/rev و عمق برش از 0/2 تا 0/6 mm مدل ایجاد شده برای زبری سطح و نرخ برداشت براده در شبکه عصبی پس از اعتبارسنجی، به عنوان تابع هزینه ورودی الگوریتم رقابت استعماری مورد استفاده قرار گرفته است. در الگوریتم‌های بهینه‌سازی چند هدفه به جای یک نقطه بهینه، مجموعه‌ای از نقاط غالب پارتو<sup>1</sup> معرفی می‌شوند. نقاط غالب پارتو نقاط بهینه هستند که هیچ نقطه دیگری بر آن‌ها غالب نیست. جدول 5 چندین سطح از پارامترهای برشی بهینه را نشان می‌دهد که با توجه به زبری سطح و نرخ برداشت ماده مورد نیاز، طراح فرایند می‌تواند هر یک از سطوح پارامترهای برشی مذکور را مورد استفاده قرار دهد.

### 3-4- تست تأیید

پس از تعیین پارامترهای برشی بهینه، باید مقادیر سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق برش بهینه بدست آمده توسط الگوریتم رقابت استعماری، بصورت تجربی نیز تست و زبری سطح اندازه‌گیری شود. بدین منظور بعد از بدست آمدن این پارامترهای بهینه، یک مرحله ماشین‌کاری با پارامترهای بهینه انجام و زبری سطح و نرخ برداشت براده بدست آمده از آزمایش‌ها با مقادیر محاسبه شده از شبکه عصبی مقایسه شد (جدول 5). شکل 10 مقادیر بدست آمده از شبکه عصبی در پارامترهای بهینه پیشنهاد شده توسط الگوریتم رقابت استعماری و نتایج حاصل از تست تأیید را در کنار هم نشان می‌دهد. پارامترهای برشی مربوط به هر یک از نقاط شکل 10 در جدول 5 آمده است. میانگین اختلاف بین مقادیر زبری سطح و نرخ برداشت ماده تخمین زده شده توسط شبکه عصبی در حالت‌های بهینه به‌دست آمده توسط الگوریتم رقابت استعماری و مقادیر زبری سطح و نرخ برداشت ماده حاصل از آزمایش‌های تجربی که با حالت‌های بهینه انجام شده است، به ترتیب برابر 12 و 6 درصد است.



Fig. 9 Stages of the Imperialist Competitive Algorithm [30]

شکل 9 مراحل انجام الگوریتم رقابت استعماری [30]

همچنین هزینه امپراطوری  $n$ ام و میانگین مجموع هزینه‌های مستعمره‌های هر امپراطوری است. پس از محاسبه قدرت هر امپریالیست، امپریالیست ضعیف‌تر مستعمره‌های خود را از دست داده و به تدریج از بین می‌رود و امپریالیست‌های دیگر این مستعمرات را تصاحب می‌کنند. زمانی که به نقطه بهینه رسیده شود و تنها یک امپراطوری باقی بماند، الگوریتم متوقف می‌شود.

احتمال تصاحب مستعمره توسط هر امپراطوری از رابطه (6)

محاسبه می‌شود:

$$p_{pn} = \frac{N.T.C.n}{\sum_{i=1}^{N_{imp}} N.T.C.i} \quad (6)$$

که  $N.T.C.n$  هزینه کل نرمال شده آن امپراطوری است [23].

یکی از مزیت‌های مهم الگوریتم رقابت استعماری، فرار از نقاط مینیمم محلی و نیز عدم وابستگی به ساختار معین شبکه است. به دلیل یکنواخت نبودن تغییرات زبری سطح با تغییرات همه پارامترهای برشی در فرایندهای مختلف ماشین‌کاری،

<sup>1</sup> Pareto



جدول 5 مقادیر بهینه پارامترهای برشی بدست آمده از الگوریتم رقابت استعماری و مقایسه نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی با مدل شبکه عصبی

Table 5 Optimal values of cutting parameters obtained from ICA and comparison between the results of experimental data and neural network model

حالت‌های بهینه	سرعت برشی (m/min)	نرخ پیشروی (mm/rev)	عمق برشی (mm)	زبری سطح ( $\mu\text{m}$ )			نرخ برداشت ماده ( $\text{cm}^3/\text{min}$ )		
				پیش‌بینی	آزمایش	درصد خطا	پیش‌بینی	آزمایش	درصد خطا
1	104	0/078	0/2	0/55	0/51	8%	1/72	1/62	6%
2	105	0/088	0/23	0/88	0/69	28%	2/28	2/12	8%
3	102	0/088	0/23	0/96	0/56	48%	2/48	2/06	20%
4	102	0/1	0/3	1/38	1/55	-11%	3/54	3/06	16%
5	104	0/074	0/6	1/6	1/73	-8%	4/5	4/61	-6%
6	105	0/09	0/57	1/74	1/8	-3%	5/25	5/3	-1%
7	100	0/11	0/55	1/85	1/94	-5%	5/85	6	-3%
8	105	0/11	0/6	2/03	1/97	-3%	6/8	6/9	-1%
9	105	0/13	0/6	2/26	2/38	-5%	8/08	8/19	-1%
10	103	0/15	0/6	2/46	2/49	1%	9/12	9/2	-1%

از شبکه عصبی مصنوعی برای مدل‌سازی و از الگوریتم رقابت استعماری به‌منظور بهینه‌سازی چند هدفه پارامترهای برشی برای کمینه کردن زبری سطح هم‌زمان با بیشینه کردن نرخ برداشت براده استفاده شد. چندین سطح از پارامترهای برشی بهینه توسط الگوریتم رقابت استعماری پیشنهاد شده است. نتایج نشان می‌دهد که با استفاده از پارامترهای برشی بکار رفته در این تحقیق، حداقل زبری سطح قابل دست‌یابی در فرایند ماشین‌کاری آلیاژ اینکونل 600 در حدود 0/5 میکرومتر و حداکثر نرخ برداشت ماده در حدود 10 سانتی‌متر مکعب بر دقیقه است. با افزایش نرخ برداشت ماده، زبری سطح نیز افزایش می‌یابد. با توجه به حجم براده‌برداری و زبری سطح مورد نیاز، یک طراح فرایند می‌تواند هر یک از سطوح پارامترهای برشی بهینه پیشنهاد شده توسط الگوریتم رقابت استعماری را مورد استفاده قرار دهد.

انجام تست تأیید نشان دهنده مدل‌سازی مطلوب در شبکه عصبی است و کارایی الگوریتم رقابت استعماری برای بهینه‌سازی خروجی‌های فرایندهای ماشین‌کاری را نشان می‌دهد. پیشنهاد می‌شود که از الگوریتم رقابت استعماری در تحقیقات آینده برای بهینه‌سازی دیگر فرایندهای ماشین‌کاری نیز استفاده شود.

#### 5- مراجع

- [1] H. Jain, J. Tripathi, R. Bharilya, S. Jain, and A. Kumar, Optimisation and evaluation of machining parameters for turning operation of Inconel-625, *Mater. Today Proc.*, Vol. 2, No. 4–5, pp. 2306–2313, 2015.
- [2] A. Del Prete, T. Primo, R. Franchi, Super-nickel orthogonal turning operations optimization,

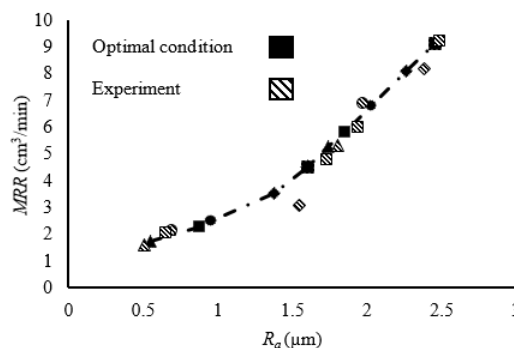


Fig. 10 Comparison of optimal solution set and experimental tests

شکل 10 مقایسه مجموعه جواب‌های بهینه و تست‌های تجربی

همان‌طور که مشاهده می‌شود، تطابق خوبی بین مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی وجود دارد.

#### 4- نتیجه‌گیری

در این مقاله، تأثیر پارامترهای سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق برش بر زبری سطح در تراش کاری خشک سوپر آلیاژ پایه نیکل اینکونل 600 در محدوده عملیات پرداخت کاری به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. طراحی آزمایش‌ها به صورت کامل بود و در مجموع 48 آزمایش انجام شد. نتایج زیر از این مقاله استخراج گردیدند:

از آنالیز واریانس برای تجزیه و تحلیل تأثیر پارامترهای برشی بر زبری سطح استفاده شد. نرخ پیشروی 69%، عمق برش 6% و سرعت برشی 2% بر زبری سطح تأثیرگذار بود. نتایج به‌دست آمده در مورد تأثیر بیشتر نرخ پیشروی بر زبری سطح در مقایسه با سایر پارامترهای برشی، در تطابق با یافته‌های سایر محققان است.

- Persian)
- [15] I. Asiltürk, S. Neşeli, M. A. Ince, Optimisation of parameters affecting surface roughness of Co28Cr6Mo medical material during CNC lathe machining by using the Taguchi and RSM methods, *Measurement*, Vol. 78, pp. 120–128, 2016.
- [16] D. M. D'Addona R. Teti, Genetic algorithm-based optimization of cutting parameters in turning processes, *Procedia CIRP*, Vol. 7, pp. 323–328, 2013.
- [17] E. O. Ezugwu, D. A. Fadare, J. Bonney, R. B. Da Silva, W. F. Sales, Modelling the correlation between cutting and process parameters in high-speed machining of Inconel 718 alloy using an artificial neural network, Vol. 45, pp. 1375–1385, 2005.
- [18] M. V. Kini A. M. Chincholkar, Effect of machining parameters on surface roughness and material removal rate in finish turning of  $\pm 30^\circ$  glass fibre reinforced polymer pipes, *Mater. Des.*, Vol. 31, No. 7, pp. 3590–3598, 2010.
- [19] I. Asiltürk M. Çunkaş, Modeling and prediction of surface roughness in turning operations using artificial neural network and multiple regression method, *Expert Syst. Appl.*, Vol. 38, No. 5, pp. 5826–5832, 2011.
- [20] J. P. Davim, V. N. Gaitonde, S. R. Karnik, Investigations into the effect of cutting conditions on surface roughness in turning of free machining steel by ANN models, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 205, No. 1–3, pp. 16–23, 2008.
- [21] A. Thakur and S. Gangopadhyay, “State-of-the-art in surface integrity in machining of nickel-based super alloys,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 100, pp. 25–54, 2016.
- [22] M. Nalbant, H. Gökkaya, G. Sur, Application of Taguchi method in the optimization of cutting parameters for surface roughness in turning, *Mater. Des.*, Vol. 28, No. 4, pp. 1379–1385, 2007.
- [23] H. Aouici, M. A. Yaltese, B. Fnides, K. Chaoui, T. Mabrouki, Modeling and optimization of hard turning of X38CrMoV5-1 steel with CBN tool: Machining parameters effects on flank wear and surface roughness, *J. Mech. Sci. Technol.*, Vol. 25, No. 11, pp. 2843–2851, 2011.
- [24] A. Khellaf, H. Aouici, S. Smaiah, S. Boutabba, M. A. Yaltese, M. Elbah, Comparative assessment of two ceramic cutting tools on surface roughness in hard turning of AISI H11 steel: including 2D and 3D surface topography, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, pp. 1–22, 2016.
- [25] M. Mahdi Abootorabi, Optimization of cutting parameters to minimize surface roughness by integrating Artificial Neural Network and Imperialist
- Procedia CIRP*, Vol. 8, pp. 164–169, 2013.
- [3] A. Devillez, F. Schneider, S. Dominiak, D. Dudzinski, D. Larrouquere, Cutting forces and wear in dry machining of Inconel 718 with coated carbide tools, *Wear*, Vol. 262, No. 7–8, pp. 931–942, 2007.
- [4] A. Bhatt, H. Attia, R. Vargas, V. Thomson, Wear mechanisms of WC coated and uncoated tools in finish turning of Inconel 718, *Tribol. Int.*, Vol. 43, No. 5–6, pp. 1113–1121, 2010.
- [5] R. M. Arunachalam, M. A. Mannan, A. C. Spowage, Surface integrity when machining age hardened Inconel 718 with coated carbide cutting tools, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Vol. 44, No. 14, pp. 1481–1491, 2004.
- [6] B. Davoodi and B. Eskandari, “Surface Roughness Optimization in Machining of N-155 Iron-Nickel-Base Superalloy Using the Taguchi Method B.,” *Aerosp. Mech. J.*, Vol. 11, No. 2, pp. 43–53, 2013.
- [7] L. M. Maiyar, R. Ramanujam, K. Venkatesan, J. Jerald, Optimization of machining parameters for end milling of Inconel 718 super alloy using Taguchi based grey relational analysis, *Procedia Eng.*, Vol. 64, pp. 1276–1282, 2013.
- [8] H. Marko, K. Simon, I. Tomaz, P. Matej, B. Joze, B. Miran, Turning parameters optimization using particle swarm optimization, *Procedia Eng.*, Vol. 69, pp. 670–677, 2014.
- [9] A. Kumar, M. M. Mahapatra, P. K. Jha, Effect of machining parameters on cutting force and surface roughness of in situ Al – 4 . 5 % Cu / TiC metal matrix composites, *Measurement*, Vol. 48, pp. 325–332, 2014.
- [10] S. Khalilpourazary, P. M. Kashtiban and N. Payam, “Optimization of Turning Operation of St37 Steel Using Grey Relational Analysis”, *J. Comput. Appl. Res. Mech. Eng.*, Vol. 3, pp. 135–144, (2014).
- [11] S. J. Raykar, D. M. D'Addona, a. M. Mane, Multi-objective Optimization of High Speed Turning of Al 7075 Using Grey Relational Analysis, *Procedia CIRP*, Vol. 33, pp. 293–298, 2015.
- [12] N. Qehaja, K. Jakupi, A. Bunjaku, M. Bruçi, H. Osmani, Effect of machining parameters and machining time on surface roughness in dry turning process, *Energy Procedia*, Vol. 100, No. C, pp. 135–140, 2015.
- [13] K. S. Sangwan, S. Saxena, G. Kant, Optimization of machining parameters to minimize surface roughness using integrated ANN-GA approach, *Procedia CIRP*, Vol. 29, pp. 305–310, 2015.
- [14] H. Amirabadi, A. Foorginejad, M. Ahmadi Mojaveri, “Cutting of Ti-6Al-4V titanium alloy using abrasive water jet and multiobjective optimization of geometry features”, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 16, pp. 67-75, 2015 (In

- simultaneously estimation of mechanical properties using Imperialist competitive Algorithm and Simplex method Mohammad, *Modares Mech. Eng.*, Vol. 14, No. 10, pp. 71–79, 2014. (in Persian فارسی)
- [29] M. Sheikhi A. Ghoddosian, Optimal design of structural support positions using ica and mfem, *Modares Mech. Eng.*, Vol. 12, No. 3, pp. 50–59, 2012. (in Persian فارسی)
- [30] M. Bayareh M. Mohammadi, Multi-objective optimization of a triple shaft gas compressor station using Imperialist Competitive Algorithm, *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 109, pp. 384–400, 2016.
- Competitive Algorithm, *Modares Mech. Eng.*, Vol. 15, No. 13, pp. 73–77, 2015. (in Persian فارسی)
- [26] M. Nasrollahzade, J. S. Karami, H. M. Naeini, S. J. Hashemi, Multiobjective optimization of hot metal gas forming process to production of square parts, *Modares Mech. Eng.*, Vol. 99, No. 9, pp. 1–12, 2015. (in Persian فارسی)
- [27] E. Atashpaz-Gargari C. Lucas, Imperialist competitive algorithm: An algorithm for optimization inspired by imperialistic competition, in *2007 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, pp. 4661–4667. 2007.
- [28] M. H. mozaffari, M. Khodada, Identifying two regular interfacial boundary configurations and