



## مطالعه تجربی و تحلیل حساسیت سوبل در بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر فرآیند تراشکاری خشک آلیاژ آلومینیوم 6061-T6

وحید طهماسبی<sup>2\*</sup>، علی زین العابدین بیگی<sup>1</sup>، حسن مسلمی نائینی<sup>3</sup>

1- استادیار، گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

3- استاد، گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

\* اراک، صندوق پستی 38181-41167، Tahmasbi@arakut.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 22 شهریور 1400

داوری اولیه: 6 مهر 1400

پذیرش: 28 مهر 1400

### کلیدواژگان:

تراشکاری خشک

زبری سطح

تحلیل حساسیت

سطح پاسخ

بهینه‌سازی

یکی از انواع فرآیندهای ماشین‌کاری بر روی مواد صنعتی که از اهمیت اقتصادی بالایی برخوردار است، ماشین‌کاری آلیاژهای آلومینیوم می‌باشد که در اکثر صنایع نظیر صنایع اتومبیل‌سازی، هواپیماسازی، نظامی، هسته‌ای و ... کاربرد بسیار وسیعی دارد. در صورت مطالعه دقیق، روشمند و بهره‌گیری از روش‌های تحلیل و آنالیز پیشرفته می‌توان به تأثیر پارامترهای ورودی بر پارامترهای خروجی به صورت دقیق‌تری پی برد و به قطعه‌ای با پارامترهای مطلوب دست پیدا کرد. در این مطالعه برای نخستین بار اثر پارامترهای مهم ماشین‌کاری یعنی سرعت پیشروی، سرعت دورانی و عمق برش بر روی کیفیت سطح ماشین‌کاری شده با استفاده از روش سطح پاسخ مدل شده است و با بهره‌گیری از یک مدل رگرسیون مرتبه دوم خطی توسعه داده، اثر هر یک از فاکتورهای ورودی بررسی شده است. همچنین با بهره‌گیری از روش تحلیل حساسیت سوبل میزان حساسیت کیفیت سطح ماشین‌کاری شده به تغییرات هر یک از فاکتورهای ورودی مشخص شده و با استفاده از الگوریتم درینگر، بهینه‌سازی پارامترهای ورودی صورت پذیرفته است. پس از بررسی نتایج، بهترین فاکتورهای ورودی شامل سرعت پیشروی 200 میلی‌متر بر دقیقه، سرعت دورانی 1700 دور بر دقیقه و عمق برش 1/8 میلی‌متر می‌باشد. همچنین بیشترین حساسیت کیفیت سطح ماشین‌کاری به تغییرات پارامترهای ورودی مربوط به سرعت پیشروی با 50 درصد تأثیر و پس از آن سرعت دورانی با 42/5 درصد و کمترین آن مربوط به عمق برش با میزان تأثیر 7/5 درصد می‌باشد.

## Experimental study and sobol sensitivity analysis in optimizing the effective parameters of dry turning process of aluminum alloy 6061-T6

Vahid Tahmasbi<sup>1\*</sup>, Ali Zeinolabedin Beygi<sup>2</sup>, Hassan Moslemi Naeini<sup>2</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

\* P.O.B. 38181-41167 Arak, Iran, Tahmasbi@arakut.ac.ir

### Article Information

Original Research Paper

Received: 13 September 2021

First Decision: 28 September 2021

Accepted: 20 October 2021

### Keywords:

Dry turning

Surface roughness

Sensitivity analysis

Response surface method

Optimization

### Abstract

One of the types of machining processes on industrial materials that is of great economic importance is the machining of aluminum alloys, which is widely used in most industries such as automotive, aircraft, military, nuclear, etc. If you study carefully, methodically and use advanced analysis methods, you can understand the effect of input parameters on output parameters more accurately and achieve a piece with the desired parameters. In this study, for the first time, the effect of important machining parameters, ie feed velocity, rotational speed and depth of cut on the quality of the machined surface has been modeled using the response surface method, and using a second-order linear regression model, the effect of each One of the input factors is investigated. Also, by using the Sobel sensitivity analysis method, the quality sensitivity of the machined surface to the changes of each of the input factors has been determined and using the Dringer algorithm, the input parameters have been optimized. After reviewing the results, the best input factors include a feed velocity of 200 mm / min, a rotational speed of 1700 rpm and a depth of cut of 1.8 mm. Also, the highest sensitivity of machining surface quality to changes in input parameters is related to the feed velocity with 50% impact, followed by the rotational speed with 42.5% and the lowest is related to the depth of cut with an impact rate of 7.5%.

### 1- مقدمه

کار رفته بستگی دارد. سه پارامتر سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق برش بر روی نرخ براده‌برداری و کیفیت محصول تولیدی تأثیر زیادی داشته و انتخاب آن‌ها در فرایندهای ماشین‌کاری از

انتخاب پارامترهای ماشین‌کاری به چندین فاکتور شامل جنس قطعه‌ای که ماشین‌کاری می‌شود، ماشین ابزار و ابزار برشی به

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

V. Tahmasbi, A. Zeinolabedin Beygi, H. Moslemi Naeini, Experimental study and sobol sensitivity analysis in optimizing the effective parameters of dry turning process of aluminum alloy 6061-T6, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 8, No. 8, pp. 12-23, 2021 (in Persian)

اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [1]. سطوح خشن معمولاً سریع‌تر ساییده می‌شوند و ضریب اصطکاک بالاتری نسبت به سطوح پرداخت شده دارند. از آنجایی که بی‌نظمی در سطح باعث ایجاد ترک و یا خوردگی می‌شود، زبری سطح اغلب پیش‌بینی خوبی از عملکرد اجزای مکانیکی دارد. زبری سطح معمولاً نامطلوب است، اما کنترل آن در طول فرایند تولید، مشکل و هزینه‌بر است. کاهش زبری سطح معمولاً هزینه تولید را بصورت نمایی افزایش می‌دهد [2]. به منظور بهبود کیفیت و کارایی محصول در ماشین‌کاری، بر روی محاسبه زبری سطح تمرکز شده است. این محاسبات را می‌توان در فرایندهای تراشکاری مخصوصاً در صنایع خودرو و هواپیماسازی برای دستیابی به زبری سطح مناسب، مشاهده کرد. سطح تراشکاری شده با کیفیت خوب می‌تواند باعث بهبود خواص استحکامی مانند استحکام خستگی، مقاومت به خوردگی و مقاومت حرارتی شود. بعلاوه زبری سطح بر روی چندین ویژگی قطعه نظیر اصطکاک، سایش، انعکاس نور، انتقال حرارت، پوشش‌دهی، توانایی توزیع و نگهداری روانکار اثرگذار است [3، 4]. در تحقیقات اخیر توسط علالدین و همکاران [5] نشان داده‌اند که با افزایش سرعت برشی می‌توان بهره‌وری را به حداکثر رساند و کیفیت سطح را بهبود بخشید. هاسه‌گاوا و همکاران [6] بیان می‌کنند که کیفیت سطح نهایی را می‌توان با پارامترهای مختلفی نظیر معیار زبری میانگین (Ra) معیار عمق نرم شدن (Rp)، معیار مربعات میانگین ریشه‌ها (Rq) و معیار ماکزیمم قله تا دره (Rt) مشخص کرد. بارادی [7] نشان داد که با افزایش سرعت برشی می‌توان کیفیت سطح و بهره‌وری را همزمان بهبود بخشید. نسلی و همکاران [8] به مدل‌سازی زبری سطح در فرایند تراشکاری خشک فولاد زنگ‌نزن AISI 304 پرداختند. در این آزمایش اثر پارامترهای برشی بر روی کیفیت سطح به وسیله روش پاسخ مطالعه شد. یان و لی [9] با استفاده از مدل‌سازی چند منظوره پارامترهای فرزکاری در فرزکاری فولاد AISI 1045 با هدف کاهش زبری سطح، به حداقل رساندن انرژی برشی بیش از حد در طول ماشین‌کاری و ماکزیمم شدن نرخ براده‌برداری پرداختند. کامپوسکو و نگرت [10] به بهینه‌سازی پارامترهای برشی اصلی (سرعت برشی، عمق برش و نرخ پیشروی) برای دستیابی به حداقل رساندن زبری سطح و انرژی مصرفی و به حداکثر رساندن نرخ براده‌برداری در طول فرایند تراشکاری آلومینیوم AISI 6061T6 پرداختند و نتایج بدست آمده با استفاده از روش سطح پاسخ مدل‌سازی شد. فرمول‌بندی کردن، یک ویژگی مهم طراحی در بسیاری از موقعیت‌ها می‌باشد مانند قطعات مورد نیاز بارهای

خستگی، قطعات با دقت مناسب و زیبایی ظاهری قطعات؛ علاوه بر این زبری سطح یکی از مهمترین محدودیت‌ها را برای انتخاب ماشین و پارامترهای برشی در برنامه‌ریزی فرایند ایجاد می‌کند. با توجه به مشکلات ماشین‌کاری فوق هدف اصلی این مقاله بررسی تأثیر پارامترهای برشی بر روی سطح نهایی است [11-14]. احمد [15] به بررسی اثر پارامترهای ماشین‌کاری در فرایند پرداخت کاری آلومینیوم پرداخت. وی بیان کرد که پیشروی کمتر سبب کاهش زبری سطح می‌گردد. پالانیپان و همکاران [16] اثر پارامترهای ماشین‌کاری را در فرایند تراشکاری CNC آلومینیوم 6082 مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که شرایط بهینه برای دستیابی به کمترین مقدار زبری سطح در عمق برش 1/5 میلی‌متر، سرعت دورانی 1200 دور بر دقیقه و پیشروی 0/15 میلی‌متر بر دور می‌باشد. جایارامان و کومار [17] نشان دادند که فاکتورهای نرخ پیشروی و عمق برش، از عوامل برجسته‌ای هستند که در تراشکاری آلومینیوم 6063 اثرگذار هستند. کانتغلو و همکاران [18] به انجام مطالعه‌ای سیستماتیک برای تعیین شرایط بهینه برش، تحلیل ارتعاش و زبری سطح تحت سرعت‌های برشی مختلف، نرخ پیشروی و زوایای لبه برش در فرایند تراشکاری فولاد AISI 5140 با استفاده از روش سطح پاسخ پرداختند. نتایج حاکی از آن است که نرخ پیشروی مؤثرترین پارامتر در افزایش زبری سطح است. الاجمی و المسحال [19] روشی را برای پیش‌بینی مقادیر زبری سطح در فرایند تراشکاری خشک و برودتی فولاد ضد زنگ AISI 304 با استفاده از روش ANFIS-QPSO ارائه کردند. نتایج نشان می‌دهد که نرخ پیشروی برجسته‌ترین عاملی است که بر روی افزایش یا کاهش زبری سطح در فرایند تراشکاری خشک اثر می‌گذارد. کبلوتی و همکاران [20] به بررسی اثر پارامترهای برش بر روی زبری سطح، ارتعاش ابزار و نرخ براده‌برداری در فرایند تراشکاری فولاد AISI 4140 با استفاده از ابزار پوشش داده شده و به کارگیری روش سطح پاسخ پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که نرخ پیشروی بر روی زبری سطح اثرگذار است. ازدمیر [21] بررسی اثر سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق برش را بر روی زبری سطح در فرایند تراشکاری فولاد ضد زنگ AISI 409 مورد مطالعه قرار داده است. بر اساس نتایج تحلیل آنالیز واریانس، مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر روی زبری سطح به ترتیب نرخ پیشروی، عمق برش و سرعت برشی می‌باشد. واسانت و همکاران [22] مدل‌های رگرسیونی و یک مدل شبکه عصبی مصنوعی را برای ترکیب نیروی برش، دمای برش، سایش ابزار و جابجایی ارتعاش ابزار برای پیش‌بینی

متغیرهای ورودی مختلف می‌باشد، استفاده از روش‌های آماری آزمایش‌ها کمک قابل توجهی به طراحی، مدل‌سازی، تحلیل و بهینه‌سازی دقیق این فرآیندها می‌کند که روش سطح پاسخ یکی از بهترین روش‌های آماری، در این زمینه می‌باشد [27]. طراحی آزمایش‌ها یکی از مناسب‌ترین روش‌ها برای محققین در اصلاح، بهبود و صرفه‌جویی در وقت و هزینه‌های آزمایش‌ها و تشخیص دقت و رفع عیوب آن‌ها می‌باشد [28]. از مزایای مهم روش سطح پاسخ می‌توان به تبیین دقت آزمایش، مدل ریاضی حاکم بر آزمایش، ارائه نمودارهای برهم‌کنش متغیرهای ورودی، بهینه‌سازی آزمایش و کسب اطمینان از دقت مدل منطبق شده بر آزمایش‌ها اشاره کرد [29]. همچنین این روش این قابلیت را دارد که رابطه بین ورودی‌ها و خروجی‌های یک آزمایش را مدل‌سازی نموده و به صورت یک معادله ریاضی رگرسیون خطی مرتبه دوم ارائه نماید. فرم کلی معادله با توجه به متغیرها و برهم‌کنش‌های مؤثر به صورت رابطه (1) می‌باشد [30].

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_i \sum_j \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (1)$$

در این معادله رگرسیون خطی مرتبه دوم،  $y$  به عنوان پاسخ خروجی بر حسب ورودی‌های آزمایش توصیف می‌گردد که در این معادله ثابت‌های  $\beta$  به عنوان ضرایب معادله رگرسیون،  $x_i$  فاکتور اصلی ورودی آزمایش،  $x_i^2$  توان دوم فاکتورهای ورودی آزمایش و  $x_i x_j$  اثر برهم‌کنش مرتبه دوم فاکتورهای ورودی آزمایش می‌باشد [31]. مدل ارائه شده در صورت دقیق بودن می‌تواند رفتار خروجی را بر حسب پارامترهای ورودی در تمام بازه آزمایش‌ها پیش‌بینی نموده و نقاط بهینه را ارائه نماید [32].

## 2-2- روش‌های تحلیل حساسیت

در مسائل مهندسی، تحلیل حساسیت ابزاری مناسب جهت بررسی سیستم‌ها و تعیین میزان اثر متغیرهای ورودی بر روی پاسخ‌های خروجی سیستم‌ها می‌باشد. بر حسب کاربرد می‌توان تحلیل حساسیت را طبقه بندی کرد.

**روش ریاضیاتی:** در این روش میزان حساسیت از طریق تغییرات فاکتور خروجی بر حسب پارامترهای ورودی بدست می‌آید در حقیقت این روش محاسباتی را در بر می‌گیرد که اثر فاکتور خروجی در مقابل کمی تغییر در فاکتورهای ورودی را مورد بررسی قرار می‌دهد.

**روش ترسیمی:** در روش ترسیمی، میزان حساسیت را به شکل جدول و نمودار یا سطوح نشان می‌دهند. روش گرافیکی عموماً

زبری سطح در فرایند تراشکاری فولاد ضد زنگ 410 توسعه داده اند. نتایج نشان می‌دهد مقادیر عمق برش، نرخ پیشروی و سرعت برشی برای رسیدن به زبری سطح اپتیمم به ترتیب برابر با 0/4 میلی‌متر، 0/08 میلی‌متر بر دور و 120 متر بر دقیقه می‌باشد. کام و همکاران [23] اثر سختی نمونه، سرعت برشی و نرخ پیشروی را بر روی زبری سطح و ارتعاش ابزار در فرایند تراشکاری فولادهای تمپر شده و با استفاده از روش تاگوچی مورد مطالعه قرار داده‌اند. نتایج نشان داد که مهمترین پارامترهای ماشینکار برای ارتعاش ابزار و زبری سطح به ترتیب نرخ پیشروی سختی نمونه و سرعت برشی می‌باشد. تیرومالای و همکاران [24] از روش‌های تاگوچی و سطح پاسخ در بهینه سازی پارامترهای فرایند تراشکاری تیتانیوم استفاده کرده‌اند. در تحلیل زبری سطح مشخص می‌گردد که سرعت برشی 38 درصد، نرخ پیشروی 25 درصد و برهم‌کنش سرعت برشی و عمق برش 17 درصد مشارکت دارند. طاهری و طهماسبی [25] با استفاده از تحلیل حساسیت سوبل نشان دادند که نرخ پیشروی بیشترین تأثیر را بر روی نرخ براده برداری در فرایند سوراخکاری برنج دارد. علاوه بر این قطر ابزار دارای کمترین اثر بر روی نرخ براده برداری می‌باشد. طهماسبی و همکاران [26] به بررسی اثر پارامترهای هندسه ابزار در فرایند تراشکاری استخوان کورتیکال با استفاده از تحلیل حساسیت سوبل پرداختند. نتایج حاکی از آن است که زاویه براده دارای اثر 52 درصدی و پس از آن زاویه تنظیم اصلی با 31 درصد و زاویه تمایل با 17 درصد تأثیر گذار می‌باشند.

در مطالعه حاضر با در نظر داشتن پارامترهای مهم فرایند تراشکاری خشک شامل سرعت دورانی ابزار، سرعت پیشروی و عمق برش یک معادله رگرسیون خطی مرتبه دوم به منظور بررسی دقیق رفتار زبری سطح در تراشکاری خشک آلیاژ آلومینیوم 6061 ارائه شده است. همچنین ضمن بررسی دقیق رفتار هر یک از پارامترهای ورودی، با استفاده از الگوریتم درینگر بهینه سازی لازم به منظور دستیابی به بهترین حالت پرداخت کاری ارائه شده است. همچنین برای نخستین بار با بهره گیری از روش تحلیل حساسیت سوبل میزان تأثیر دقیق تغییرات هر یک از متغیرهای ورودی فرایند بر روی رفتار زبری سطح ارائه گردیده است.

## 2- مواد و روش آزمایش

### 2-1- روش سطح پاسخ

در تحلیل مسائل مهندسی که پاسخ مسئله در آن‌ها متأثر از

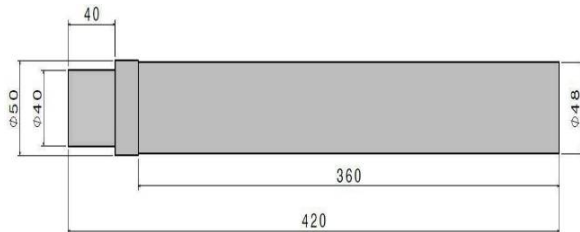


Fig. 1 Geometry and dimension of the workpiece

شکل 1 هندسه و ابعاد قطعه کار

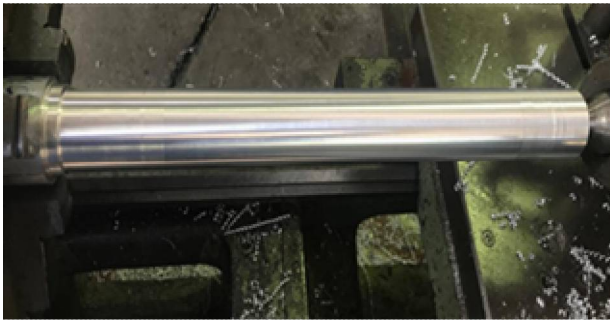


Fig. 2 Experimental setup of turning process of aluminum alloy

شکل 2 ستاپ آزمایشگاهی فرایند تراشکاری آلیاژ آلومینیوم

جدول 1 خواص مکانیکی قطعه کار

Table 1 Mechanical properties of the workpiece

مقدار	خاصیت (واحد)
95	سختی، برینل
120	سختی، نوپ
40	سختی، راکول A
60	سختی، راکول B
107	سختی، ویکرز
310	استحکام کششی نهایی (مگاپاسکال)
276	استحکام تسلیم (مگاپاسکال)
68/9	مدول الاستیسیته (گیگاپاسکال)
2700	چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)

## 2-5- کیفیت سطح

کیفیت سطح یا سطح پایانی طبق استاندارد ANSI متشکل از مواردی چون پروفایل، زبری، موجی، خواب و عیوب است. زبری در واقع بی‌نظمی‌های سطح است که منجر به ایجاد فضاهای ریز شده است. فضاهای بزرگتر از زبری را موجی می‌نامند (شکل 3).

به منظور نمایش تغییرات فاکتورهای خروجی بر اثر فاکتورهای ورودی به کار می‌رود.

## روش آماری: تحلیل حساسیت به صورت توزیع احتمالی به

شبیه‌سازی متغیرهای ورودی سیستم می‌پردازد و تأثیر فاکتورهای ورودی بر پاسخ سیستم مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این روش می‌توان اثر متقابل بین چندین فاکتور مختلف ورودی را بر روی پاسخ سیستم مشخص کرد.

تحلیل حساسیت آماری سوبل یکی از روش‌های آنالیز حساسیت آماری و مستقل از مدل می‌باشد که بر پایه‌ی تجزیه واریانس است. در این بین توابع غیرخطی و غیریکنواخت بیشترین استفاده را با این روش دارند [33].

## 2-3- روش تحلیل حساسیت سوبل

در این روش می‌توان برای مدل، تابعی با ضابطه  $Y=f(X)$  تعریف کرد که در آن  $Y$  خروجی مدل و  $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$  بردار پارامترهای ورودی می‌باشد؛ همچنین واریانس خروجی مدل به صورت مجموع واریانس‌های هر ترم تجزیه شده به صورت رابطه (2) می‌باشد:

$$V(Y) = \sum_{i=1}^n V_i + \sum_{i \leq j \leq n} V_{ij} + \dots + V_{1\dots n} \quad (2)$$

که در آن،  $V_i$  تأثیر مرتبه‌ی اول برای هر فاکتور ورودی و  $V_{ij}$  برهم‌کنش بین  $n$  فاکتور را نشان می‌دهند.

شاخص‌های حساسیت از طریق نسبت واریانس هر مرتبه به واریانس کلی به دست می‌آیند. شاخص حساسیت کلی هر پارامتر نیز به صورت مجموع همه‌ی مرتبه‌های شاخص حساسیت برای آن پارامتر از طریق رابطه (3) تعیین می‌گردد:

$$S_{Ti} = S_i + \sum_{i \neq j} S_{ij} + \dots \quad (3)$$

روابط روش سوبل و معادلات آن در مرجع [34] ارائه گردیده است.

## 2-4- قطعه کار

در این آزمایش از قطعه‌ی آلومینیومی به قطر اولیه 48 میلی‌متر و به طول 360 میلی‌متر استفاده شده است (شکل 1)؛ همچنین نمونه‌ی آلومینیومی بعد از آماده‌سازی اولیه و قبل از انجام آزمایش در شکل 2 نشان داده شده است.

در جدول 1 برخی ویژگی‌های مکانیکی آلومینیوم آورده شده است.

زبری سطح مطلوب، تکنیک‌هایی را به کار برد که نتایج آن قابل اعتماد بوده و سبب صرفه جویی در وقت و هزینه ماشین‌کاری شود. با توجه به سه پارامتر ورودی سرعت دورانی ( $N$ )، سرعت پیشروی ( $V_f$ ) و عمق برش ( $a$ ) تعداد 17 آزمایش به روش سطح پاسخ طراحی شد. ارتباط بین سرعت برشی ( $V$ ) و سرعت دورانی از طریق رابطه (5) بدست می‌آید. در حقیقت سرعت برشی مسافتی است که قطعه‌کار در واحد زمان از جلوی ابزار عبور می‌کند. از نرم افزار مینی تب نسخه 18 برای تحلیل پاسخ و بدست آوردن ضرایب معادله ریاضی حاکم استفاده شده است.

$$v = \frac{\pi DN}{1000} \quad (5)$$

روش سطح پاسخ می‌تواند یک معادله رگرسیون خطی مرتبه دوم برای هر پاسخ خروجی بر حسب متغیرهای ورودی که از داده‌های آزمایش و نزدیک‌ترین نقاط به آن‌ها بدست آمده است، استخراج کند و بهینه‌سازی مؤثر بر روی نتایج را اعمال نماید. نمونه آلومینیومی نشان داده شده در شکل 2 تحت آزمایش قرار گرفت. از ماشین تراش برای تراشکاری آلومینیوم استفاده شده است. زبری نمونه پس از هر بار ماشین‌کاری توسط دستگاه زبری سنج که در شکل 5 نشان داده شده است، اندازه گیری شد. به منظور بررسی اثر پارامترهای فرایند ماشین‌کاری از یک ابزار اینسرتی تک لبه از جنس کارباید تنگستن بهره گرفته شده است (شکل 6).



Fig. 5 Surface roughness measurement

شکل 5 اندازه گیری زبری سطح



Fig. 6 Single-edge tungsten carbide insert tool

شکل 6 ابزار اینسرتی تک لبه از جنس کارباید تنگستن

زبری به دلیل پارامترهای ماشین‌کاری نظیر پیشروی یا سرعت برش و یا به دلیل هندسه ابزار و موجی شدن به دلیل ارتعاشات ماشین و ابزار و صلب نبودن مجموعه دستگاه ایجاد می‌شود [3]. [35، 36]. با توجه به عدم وجود ارتعاشات در ماشین و ابزار، در این مطالعه به اندازه گیری زبری پرداخته می‌شود. هاسه گاوا و همکاران [6] نیز برای بیان کیفیت سطح از زبری میانگین ( $R_a$ ) که کاربرد وسیعی در صنعت دارد، استفاده کردند و بیان داشتند که زبری میانگین متناسب با فاکتورهای نظیر نرخ پیشروی، عمق برش و سرعت دورانی می‌باشد. از میان روش‌های مختلفی که برای بیان زبری وجود دارد از روش زبری متوسط که معمولاً با  $R_a$  نشان داده می‌شود استفاده شد. در این روش میانگین ارتفاعات نسبت به یک خط مرکزی را زبری متوسط می‌گویند. همان‌طور که در شکل 4 مشاهده می‌شود پروفایل  $p$  نشان دهنده برجستگی‌های برشی از قطعه کار است. خط میانگین طوری انتخاب می‌شود که مساحت بالا و پایین در طول مشخص  $l$  با هم برابر باشند.  $y$  نیز مختصات منحنی پروفایل است [37]. رابطه (4) زبری متوسط به سطح را نشان می‌دهد.

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad (4)$$

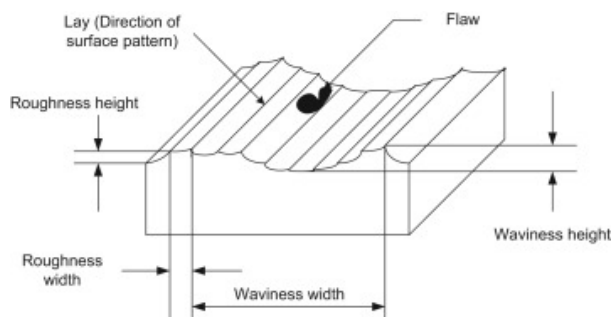


Fig. 3 The illustration of roughness and waviness [38]

شکل 3 نمایش زبری و موجی [38]

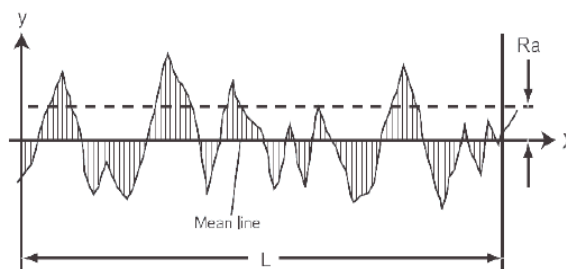


Fig. 4 Surface roughness and how to determine its average

شکل 4 زبری سطح و نحوه تعیین میانگین آن [39]

## 2-6- طراحی آزمایش

این بسیار مهم است که قبل از تراشکاری آلومینیوم برای رسیدن به

از داده‌های آزمایش و یا از نزدیک‌ترین نقاط به آن‌ها در مدل‌سازی صورت‌گرفته عبور کرده، حاصل گشته است و تفسیر نتایج، تحلیل حساست آماری و همچنین بهینه‌سازی مورد نظر بر روی مدل انجام شده است.

با توجه به نتایج بدست آمده از تحلیل کیفیت سطح ماشین‌کاری شده، نتایج حاصل از آنالیز واریانس<sup>1</sup> در جدول 4 آمده است. آنالیز واریانس میزان تأثیر پارامترهای معادله رگرسیون را مشخص می‌نماید و در تحلیل و مدل‌سازی آزمایش‌ها نقش به‌سزایی دارد. جدول آنالیز واریانس در طراحی آزمایش‌ها میزان اثر فاکتورهای ورودی و برهم کنش‌های آن‌ها را بر روی پاسخ خروجی مشخص می‌نماید [28]. با توجه به قابلیت اطمینان 98/39 درصد، مقدار P پایین نشان دهنده دقت بیشتر اثرات جملات است [40].

جدول 5 آنالیز واریانس برای مدل اصلاح شده فوق پس از حذف جملات غیر مؤثر است و رابطه (5)، معادله رگرسیون اصلاح شده مدل را نشان می‌دهد. همچنین مقدار  $Rsq = 96/06\%$  گویای این واقعیت است که مدل‌سازی انجام شده بر روی داده‌های زبری سطح، بسیار دقیق و قابل اطمینان است. البته با بررسی باقیمانده‌ها می‌توان مناسب بودن مدل را احراز کرد.

**Table 4** Analysis of variance of surface roughness in terms of effective terms in aluminum turning

**جدول 4** تحلیل واریانس زبری سطح بر حسب ترم های مؤثر در تراشکاری آلومینیوم

P-Value	F-Value	میانگین مربعات MS	جمع مربعات SS	درجه آزادی DF	ترم‌ها
0,000	40,85	2,48765	22,3888	9	مدل
0,083	4,31	0,26243	0,2624	1	A
0,000	111,72	6,80326	6,8036	1	N
0,003	23,50	1,43145	1,4314	1	V <sub>F</sub>
0,243	1,68	0,10214	0,1021	1	A <sup>2</sup>
0,002	27,82	1,69421	1,6942	1	N <sup>2</sup>
0,374	0,92	0,05605	0,0560	1	V <sub>F</sub> <sup>2</sup>
0,081	4,38	0,26698	0,2670	1	A.N
0,018	10,27	0,62533	0,6253	1	A.V <sub>F</sub>
0,001	32,82	1,99889	1,9989	1	N.V <sub>F</sub>

<sup>1</sup> Anova

در جدول 2 متغیرهای ورودی و بازه تغییرات آن با توجه به سه سطح کد شده آن‌ها نشان داده شده است.

در جدول 3 نیز متغیرهای خروجی برای هر 17 آزمایش آورده شده است؛ همچنین به منظور بالا بردن دقت و صحت نتایج آزمایش، هر آزمایش سه مرتبه تکرار شده است و میانگین آن‌ها به عنوان زبری سطح گزارش شده است. لازم به ذکر است به منظور جلوگیری از ایجاد خطاهای پیش‌بینی نشده، آزمایشات بصورت تصادفی انجام شده است [37].

**Table 2** Coded values for 6061-T6 aluminum turning

جدول 2 مقادیر کد شده برای تراشکاری آلومینیوم 6061-T6			
ورودی‌های آزمایش	-1	0	+1
سرعت پیشروی	40	120	200
عمق برش	0,25	1,025	1,8
سرعت دورانی	125	912,5	1700

**Table 3** Perform experiments to investigate the effect of input parameters on surface roughness

جدول 3 انجام آزمایشات بررسی اثر پارامترهای ورودی بر زبری سطح					
شماره آزمایش	سرعت پیشروی (mm/min)	سرعت دورانی (rpm)	سرعت برشی (m/min)	عمق برش (mm)	زبری سطح (μm)
1	120	710	107/06	1,8	1,66
2	80	500	75/40	1,4	1,63
3	80	1000	150/80	1,4	1,80
4	160	500	75/40	1,4	3,43
5	160	1000	150/80	1,4	1,24
6	120	125	18/85	1	9,42
7	120	710	107/06	1	2,50
8	120	1700	256/35	1	1,27
9	120	710	107/06	1	2,37
10	40	710	107/06	1	0,93
11	120	710	107/06	1	2,41
12	200	710	107/06	1	4,32
13	80	500	75/40	0,6	2,09
14	80	1000	150/80	0,6	1,10
15	160	500	75/40	0,6	5,36
16	160	1000	150/80	0,6	2,03
17	120	710	107/06	0,25	2,51

### 3- نتایج و بحث

با استفاده از روش سطح پاسخ و آنالیز داده‌ها یک معادله رگرسیون خطی مرتبه دوم برای هر پاسخ خروجی بر حسب متغیرهای ورودی و با در نظر گرفتن دقت مدل منطبق شده که

تمامی پارامترها به طور همزمان تغییر می نمایند که برای توضیحات بیشتر می توان به مرجع [41] مراجعه نمود.

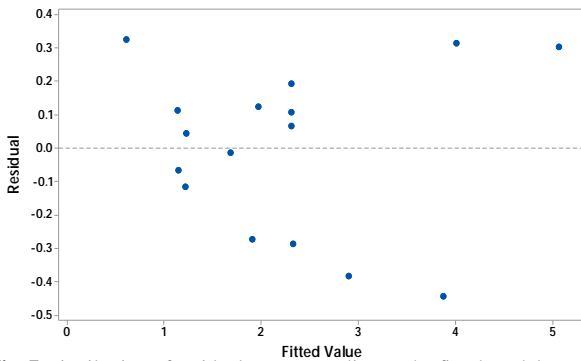


Fig. 7 Distribution of residuals corresponding to the fitted model  
 شکل 7 پراکندگی باقیماندهها نسبت به مدل منطبق شده

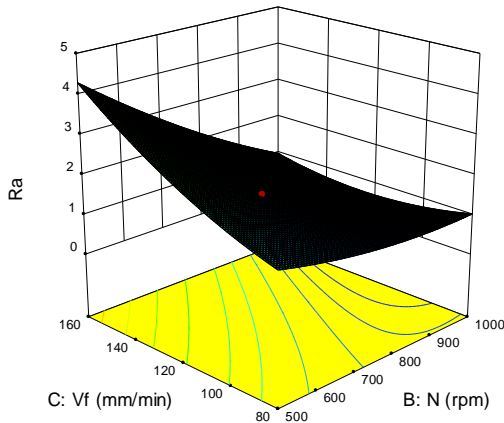


Fig. 8 Surface roughness response procedure diagram based on the simultaneous behavior of rotational speed and feed velocity at a depth of cut 1 mm

شکل 8 نمودار رویه پاسخ زبری سطح بر اساس رفتار همزمان سرعت دورانی و سرعت پیشروی در عمق برش 1 میلی متر

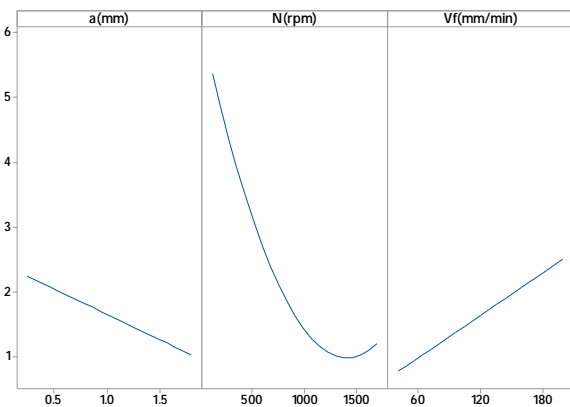


Fig. 9 Effect of main input parameters on surface roughness  
 شکل 9 اثر فاکتورهای اصلی ورودی بر روی رفتار زبری سطح

3-1- اثر سرعت دورانی بر روی زبری سطح

با توجه به شکل 11 که از آنالیز حساسیت استخراج شده است و

Table 5 Modified analysis of variance in aluminum turning

جدول 5 تحلیل واریانس اصلاح شده در تراشکاری آلومینیوم

P-Value	F-Value	میانگین مربعات MS	جمع مربعات SS	درجه آزادی DF	ترمها
0,000	36,61	3,64310	21,8586	6	مدل
0,004	15,37	1,52908	1,5291	1	A
0,000	72,63	7,22820	7,2282	1	N
0,004	14,38	1,43145	1,4314	1	V <sub>F</sub>
0,002	18,40	1,83111	1,8311	1	N <sup>2</sup>
0,033	6,28	0,62533	0,6253	1	A.V <sub>F</sub>
0,002	20,09	1,99889	1,9989	1	N.V <sub>F</sub>

$$Ra(\mu m) = -1.82 + 1.312 a(mm) - 0.00150 N(rpm) + 0.0740 V_f(mm/min) + 0.000003 N(rpm)*N(rpm) - 0.01747 a(mm)*V_f(mm/min) - 0.00005 N(rpm)*V_f(mm/min) \quad (5)$$

در شکل 7 که وضعیت باقیماندهها نشان داده شده است، می توان گفت با توجه به عدم وجود ساختار و الگوی مشخص، مدل ارائه شده صحیح است [40]. در این بخش با توجه به مدل سازی صورت گرفته و انطباق آن بر داده های آزمایش ها و با در نظر گرفتن ترم های مؤثر در مدل، سعی بر آن است تا نقش سرعت پیشروی، سرعت دورانی و عمق برش در رفتار زبری سطح تبیین گردد. بدین منظور ضمن بررسی میزان حساسیت هر یک از پارامترهای ورودی در پاسخ سیستم، به بررسی و تحلیل منحنی های اثر ترم اصلی که از تحلیل روش سطح پاسخ و تحلیل آماری سوبل حاصل شده است و همچنین منحنی های برهم کنش و کانتور پلات های اثر برهم کنش فاکتورهای مؤثر به دقت مورد ارزیابی قرار گرفته است. نمودار رویه سه بعدی سرعت دورانی و سرعت پیشروی در شکل 8 قابل مشاهده است.

نمودارهای شکل 9 رفتار زبری سطح را بر اساس هر یک از متغیرهای ورودی فرآیند طبق مدل سازی صورت گرفته به روش سطح پاسخ ارائه می دهند و نمودار برهم کنش مؤثر فاکتورهای سرعت دورانی و سرعت پیشروی در شکل 10 و نمودار برهم کنش مؤثر فاکتورهای سرعت پیشروی و عمق برش در شکل 13 ارائه شده است. شکل های 11، 12 و 14 پراکندگی نقاط پاسخ های زبری سطح با تغییرات همزمان پارامترهای ورودی را نشان می دهند. نقاط پراکنده موجود در این شکل ها با استفاده از نرم افزار سیملب<sup>1</sup> و به روش سوبل استخراج شده اند. در روش سوبل بر خلاف روش های گرافیکی که در آن ها تمامی ورودی ها به جز یک ورودی ثابت است، با استفاده از الگوریتمی خاص

<sup>1</sup> SimLab

کلی با افزایش سرعت دورانی، زبری سطح کاهش می‌یابد و سطح پرداخت‌تری حاصل می‌شود. با افزایش سرعت دورانی سرعت برشی افزایش یافته و تغییر شکل پلاستیک آسان‌تر شده و اصطکاک بین سطوح آزاد و سطوح ماشین‌کاری شده و اصطکاک بین سطح ابزار و براده کاهش می‌یابد و ارتفاع ناهمواری‌های سطح کمتر می‌گردد [42].

با توجه به رابطه (5) و با توجه به ثابت بودن قطر در حین انجام آزمایش‌ها، افزایش سرعت دورانی باعث افزایش سرعت برشی می‌شود. در یک پیشروی ثابت یعنی ضخامت براده تغییر شکل نیافته ثابت در فرایند رو تراشی، افزایش سرعت برشی به جدا شدن براده کمک می‌کند و تنش‌های مورد نیاز برای براده برداری کمتر شده و تغییر شکل پلاستیک آسان‌تر می‌شود. بطور

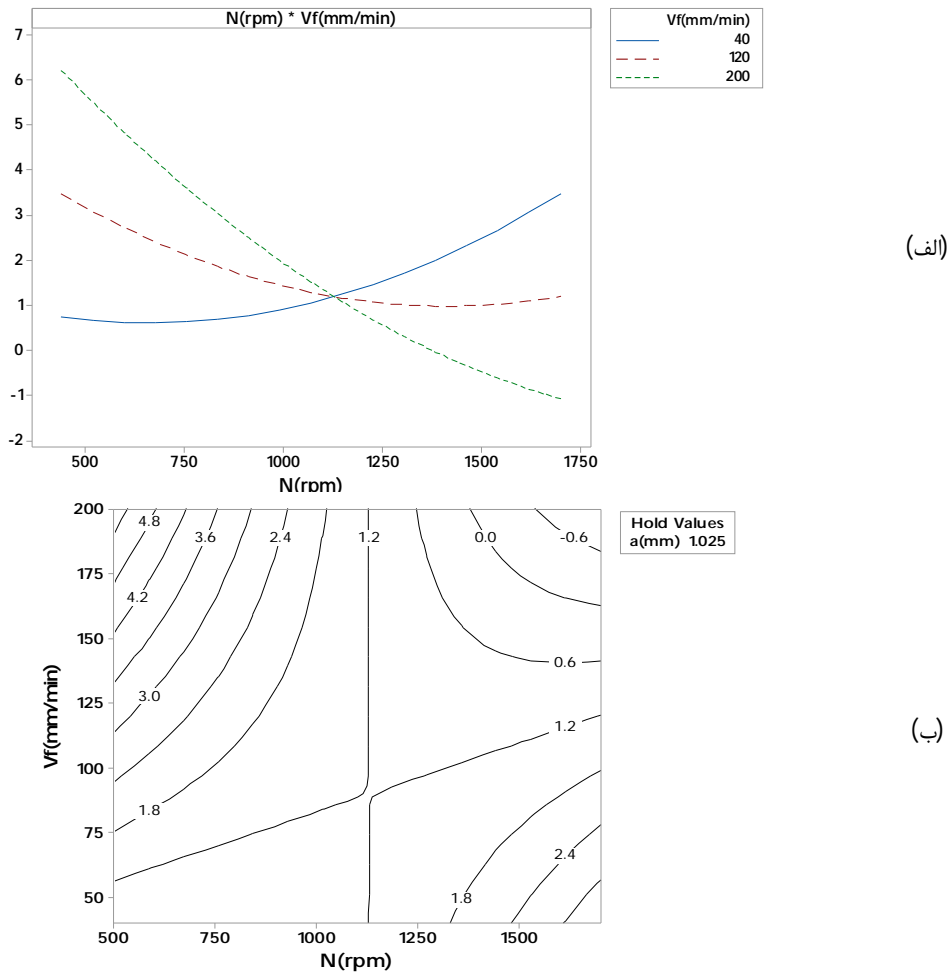


Fig. 10 Interactional effect of feed velocity and rotational speed

شکل 10 نمودارهای برهم کنش سرعت پیشروی و سرعت دورانی

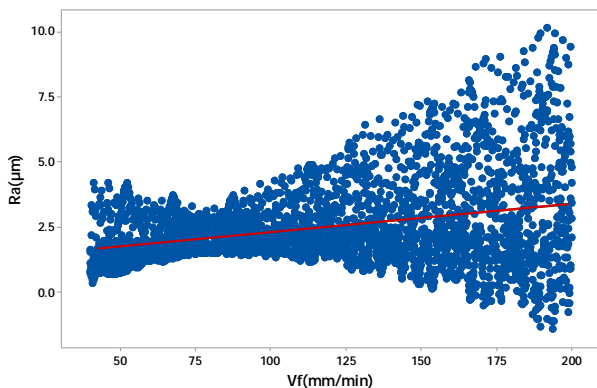


Fig. 12 Effect of feed velocity on surface roughness

شکل 12 نمودار چگونگی رفتار فاکتور سرعت پیشروی بر روی زبری سطح

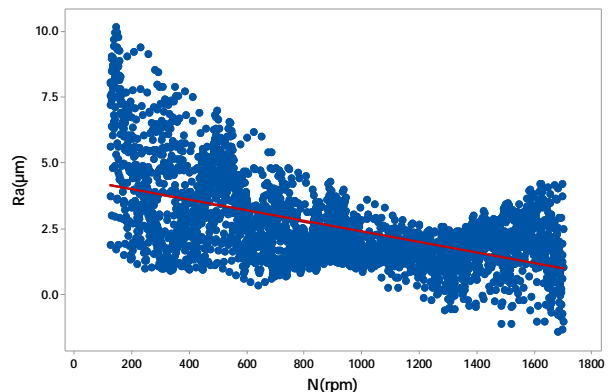


Fig. 11 Effect of rotational speed on surface roughness

شکل 11 نمودار چگونگی رفتار فاکتور سرعت دورانی بر روی زبری سطح



قطعه کار کاهش یافته و حرارت کمتری تولید می شود و در نتیجه چسبیدن ماده به ابزار کمتر شده و زبری سطح کاهش می یابد. شکل 14 به این مطلب اشاره دارد که با افزایش عمق برش، خیز و ناپایداری ابزار کمتر می شود و عاملی برای کاهش زبری سطح است.

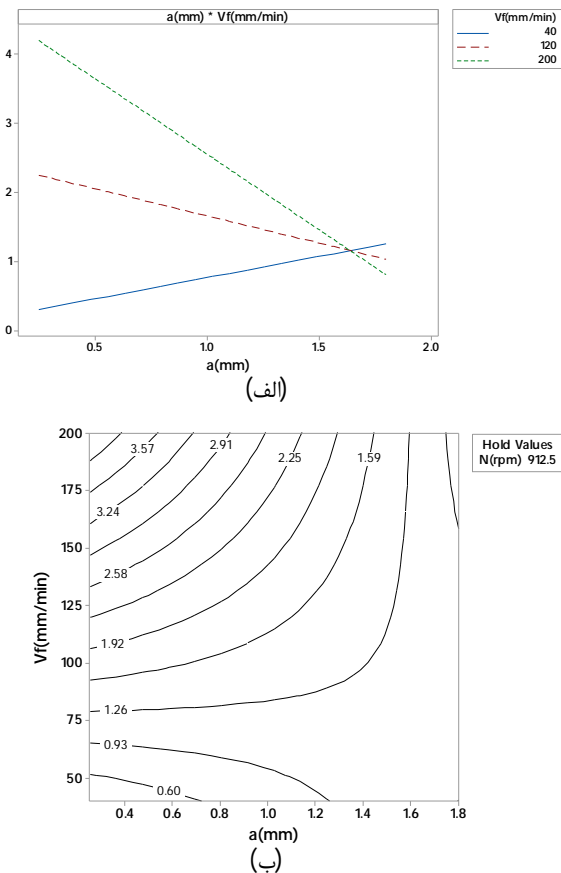


Fig. 13 Interactional effect of feed velocity and depth of cut on surface roughness

شکل 13 نمودارهای برهم کنش سرعت پیشروی و عمق برش

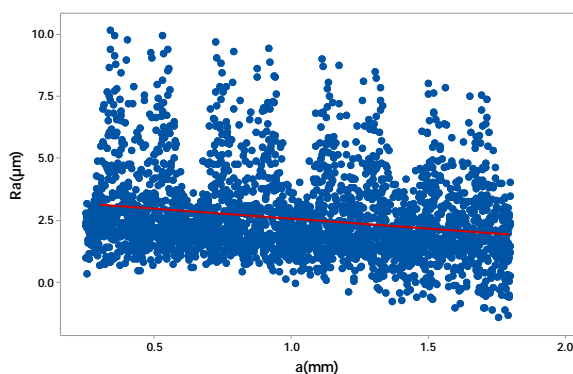


Fig. 14 Effect of depth of cut on surface roughness

شکل 14 نمودار چگونگی رفتار فاکتور عمق برش بر روی زبری سطح

بطور کلی می توان بیان کرد که اثر عمق برش بسیار کم است و می توان آن را نادیده گرفت. لازم به ذکر است تنها محدودیت

در شکل 10 برهم کنش سرعت دورانی و سرعت پیشروی روی زبری سطح ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود، در یک پیشروی ثابت با افزایش سرعت دورانی، زبری سطح کاهش می یابد و بهترین حالت زبری سطح در سرعت دورانی و سرعت پیشروی بالا اتفاق افتاده است.

### 3-2- اثر پیشروی بر روی زبری سطح

همان طور که در شکل 12 مشاهده می شود در پیشروی های پایین، نیروی وارد بر قطعه کار و همچنین اصطکاک بین ابزار و قطعه کار و همچنین ضخامت براده تغییر شکل نیافته کمتر است و جدایش براده به آسانی رخ می دهد که این امر سبب کاهش اصطکاک تماسی و پایین بودن حرارت ایجاد شده در قطعه کار می شود و مقدار زبری سطح کمتری حاصل می گردد. با افزایش سرعت پیشروی ضخامت براده تغییر شکل نیافته بیشتر می شود و در نتیجه نیروی وارد بر قطعه کار به شدت افزایش می یابد که همین عامل سبب افزایش زبری خواهد شد؛ همچنین با افزایش سرعت پیشروی عمر ابزار کاهش یافته و کیفیت سطح ماشین کاری شده پایین می آید [42]. در علم طراحی آزمایش ها در صورت مؤثر بودن اثر برهم کنش فاکتورها و اثر ترم اصلی به منظور تحلیل می بایست بیشتر به اثر برهم کنش بین فاکتورها توجه نمود [28]. در تحقیق های قبلی صورت گرفته صرفاً مشاهدات اثر فاکتور اصلی مورد مطالعه قرار می گرفته است و پیشنهاد کمترین میزان زبری سطح در کمترین مقادیر پیشروی داده می شده است که البته در این پژوهش نیز به وضوح مشاهده می گردد اما با ملاحظه نمودار برهم کنش شکل 10 می توان ملاحظه نمود که دستیابی به زبری سطح مطلوب در صورت استفاده از سرعت های دورانی بالا در پیشروی های بالا نیز برای آلیاژ آلومینیوم امکان پذیر است و این بدین علت است که در صورت استفاده از دستگاه های تراش معمولی با توجه به متاثر بودن سرعت پیشروی از حاصل ضرب نرخ پیشروی بر حسب میلی متر بر دور و سرعت دورانی قطعه کار، در صورت بالا بودن سرعت دورانی سهم نرخ پیشروی کاهش یافته و میزان نرخ پیشروی بر حسب میلی متر بر دور کاهش می یابد و در نتیجه میزان زبری سطح کاهش می یابد. این موضوع به وضوح در این پژوهش قابل مشاهده است.

### 3-3- اثر عمق برش بر روی زبری سطح

بنابر آنالیز واریانس صورت گرفته، عمق برش کمترین تأثیر را بر روی زبری سطح دارد. همان طور که در شکل 13 نشان داده شده است با افزایش سرعت پیشروی، زمان درگیری ابزار و

کرد؛ هر چند که روش سطح پاسخ اثر برهم کنش رفتار پارامترها و تحلیل عمیق رفتارهای فرایند را جزئی تر و دقیق تر ارائه می دهد.

#### 4- بهینه سازی زبری سطح

با در نظر گرفتن اثر پارامترهایی که در حین آزمایش مؤثر هستند می توان مقدار بهینه زبری سطح را مشخص کرد. با بهینه سازی سطح پاسخ و ترکیب اثر پارامترهای ماشین کاری می توان به شرایط بهینه دست یافت. با توجه به جدول 6 شرایط بهینه در سرعت دورانی 1700 دور بر دقیقه، سرعت پیشروی 200 میلی متر بر دقیقه و عمق برش 1/8 میلی متر احراز می شود. به منظور صحت سنجی مدل ارائه شده، آزمایش صحت سنجی انجام و نتایج آن در جدول 6 نشان داده شده است. با در نظر داشتن جدول 6 و خطای مدلسازی 0/02 میکرون ملاحظه می گردد که بهینه سازی صورت گرفته از دقت خوبی برخوردار بوده و قابل اطمینان است. لذا معادله پاسخ بدست آمده برای زبری سطح می تواند بطور مؤثری برای پیش بینی مقادیر زبری سطح در محدوده سرعت پیشروی، عمق برش و سرعت دورانی به کار گرفته شود.

Table 6 Optimization and experimental validation

جدول 6 بهینه سازی و صحت سنجی آزمایش				
زبری	عمق	سرعت پیشروی	سرعت دورانی	بهینه سازی
سطح ( $\mu\text{m}$ )	برش (mm)	(mm/min)	(rpm)	
0/89	1,8	200	1700	مدل سازی
0/91	1,8	200	1700	آزمایش
0,02	-	-	-	خطا (بر حسب میکرون)

#### 5- نتیجه گیری

در این مطالعه ضمن مدل سازی و بهینه سازی به روش سطح پاسخ در فرایند ماشین کاری آلومینیوم 6061، پارامترهای سرعت پیشروی، سرعت دورانی و عمق برش به عنوان متغیرهای ورودی و مقدار زبری سطح ماشین کاری شده به عنوان پاسخ خروجی در نظر گرفته شده و معادله ریاضی رگرسیون خطی مرتبه دوم برای زبری سطح بر حسب متغیرهای ورودی تعیین گردیده و دقت مدل سازی و اهمیت و اثر هر یک از ورودی ها بر روی رفتار آن مورد مطالعه قرار گرفته است.

مدل ریاضی ارائه شده قادر است با دقت بسیار مناسب زبری سطح آلومینیوم 6061 ماشین کاری شده را در بازه آزمایش ها بر

عمق برش وجود پدیده چتر در اثر افزایش عمق برش می باشد [28]. با ملاحظه دقیق نمودارهای برهم کنش فاکتورها می توان تفسیر مطلوبی در خصوص اثر این فاکتور ارائه نمود. در این خصوص در صورت پایین بودن میزان سرعت پیشروی با افزایش عمق برش کیفیت سطح کاهش می یابد و در پیشروی های بالا در ماشین کاری آلومینیوم افزایش عمق برش سبب بهبود کیفیت سطح ماشین کاری شده است که البته در این خصوص می بایست اثر فرسایش ابزار نیز بررسی گردد.

#### 3-4- آنالیز سوبل در بررسی حساسیت پارامترهای مؤثر بر

##### روی زبری سطح

با توجه به شکل های 11، 12 و 14 در تحلیل حساسیت زبری سطح در فرایند تراشکاری آلومینیوم و تحلیل آنالیز واریانس به روش سطح پاسخ، می توان نتیجه گرفت برای پارامترهای ورودی در این مطالعه سرعت پیشروی، سرعت دورانی و عمق برش به ترتیب بیشترین اثر را دارند. این مطلب را می توان از شیب تغییرات نمودارهای گرافیکی در بازه های مورد بررسی دریافت. تمامی پارامترها اثر محسوس دارند اما می توان از اثر عمق برش تا حدودی صرف نظر کرد. شکل 15 نتایج آنالیز حساسیت پارامترها به روش سوبل، تأثیر پارامترها را بر روی زبری سطح به صورت درصد نشان می دهد. در بررسی حساسیت پارامترها بر رفتار زبری سطح، سرعت پیشروی دارای اثر 50 درصدی و بعد از آن سرعت دورانی با 42/5 درصد و عمق برش با 7/5 درصد تأثیرگذار هستند.

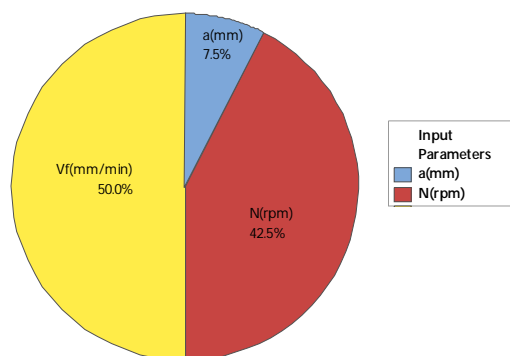


Fig. 14 The percentage diagram of the effect of process parameters on surface roughness

شکل 15 نمودار درصد تأثیر پارامترهای فرایند بر روی زبری سطح

برتری روش آماری آنالیز حساسیت سوبل نسبت به روش سطح پاسخ در این است که می توان تأثیر کیفی و تأثیر کمی و دقیق پارامترهای ورودی بر پاسخ خروجی را بطور همزمان بررسی و ترتیب کمترین و بیشترین اثر پارامترها را مشاهده

- Technology. 1997;71(3):456-65.
- [6] Hasegawa M, Seireg A, Lindberg R. Surface roughness model for turning. *Tribology international*. 1976;9(6):285-9.
- [7] Baradie ME. Surface roughness model for turning grey cast iron (154 BHN). *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 1993;207(1):43-54.
- [8] Asiltürk I, Neşeli S. Multi response optimisation of CNC turning parameters via Taguchi method-based response surface analysis. *Measurement*. 2012;45(4):785-94.
- [9] Yan J, Li L. Multi-objective optimization of milling parameters—the trade-offs between energy, production rate and cutting quality. *Journal of Cleaner Production*. 2013;21:462-71.
- [10] Camposeco-Negrete C. Optimization of cutting parameters using Response Surface Method for minimizing energy consumption and maximizing cutting quality in turning of AISI 6061 T6 aluminum. *Journal of cleaner production*. 2015;91:109-17.
- [11] Aldahdooh M, Bunnori NM, Johari MM. Influence of palm oil fuel ash on ultimate flexural and uniaxial tensile strength of green ultra-high performance fiber reinforced cementitious composites. *Materials & Design (1980-2015)*. 2014;54:694-701.
- [12] Kiaee N, Aghaie-Khafri M. Optimization of gas tungsten arc welding process by response surface methodology. *Materials & Design (1980-2015)*. 2014;54:25-31.
- [13] Xiao G, Zhu Z. Friction materials development by using DOE/RSM and artificial neural network. *Tribology International*. 2010;43(1-2):218-27.
- [14] Meryemoğlu B, Hasanoğlu A, Kaya B, Irmak S, Erbatır O. Hydrogen production from aqueous-phase reforming of sorghum biomass: An application of the response surface methodology. *Renewable energy*. 2014;62:535-41.
- [15] Ahmed SG. Development of a prediction model for surface roughness in finish turning of aluminium. *Sudan Engineering Society Journal*. 2006;52(45):1-5.
- [16] Palaniappan S, Muthukumar K, Sabariraj R, Kumar SD, Sathish T. CNC Turning process parameters optimization on Aluminium 6082 alloy by using Taguchi and ANOVA. *Materials Today: Proceedings*. 2020;21:1013-21.
- [17] Jayaraman P. Multi-response optimization of machining parameters of turning AA6063 T6 aluminium alloy using grey relational analysis in Taguchi method. *Procedia Engineering*. 2014;97:197-204.
- [18] Kuntoğlu M, Aslan A, Pimenov DY, Giasin K, Mikolajczyk T, Sharma S. Modeling of cutting parameters and tool geometry for multi-criteria optimization of surface roughness and vibration via response surface methodology in turning of AISI 5140 steel. *Materials*. 2020;13(19):4242.
- [19] Alajmi MS, Almeshal AM. Prediction and
- حسب پارامترهای ورودی تعیین شده، به دقت پیش بینی نماید. به منظور تحلیل دقیق اثر هر یک از فاکتورها می بایست به نمودارهای اثر ترم اصلی و برهمکش فاکتورها بسته به شرایط ماشین کاری توجه نمود.
- در صورتی که سرعت دورانی 1700 دور بر دقیقه، سرعت پیشروی 200 میلی متر بر دقیقه و عمق برش 1/8 میلی متر در نظر گرفته شود، می توان به کمترین میزان زبری سطح یعنی مقدار 0/9 دست یافت.
- در این تحقیق برای بررسی و تحلیل حساسیت نتایج به دست آمده از روش آماری سوبل استفاده شد که روشی دقیق بوده ولی به زمان بالای اجرا نیاز دارد. در روش سوبل بر خلاف روش های گرافیکی که در آنها تمامی ورودی ها به جز یک ورودی ثابت است، با استفاده از الگوریتمی خاص تمامی پارامترها به طور همزمان تغییر می نمایند و در نتیجه اثرگذاری پارامترهای مؤثر در فرآیند به نحو دقیق تری بدست می آید.
- با در نظر گرفتن تغییرات همزمان همه پارامترها در رفتار زبری سطح به ترتیب سرعت پیشروی، سرعت دورانی و عمق برش بیشترین اثر را دارند زیرا در بازه تغییرات مورد بررسی، شیب کلی تغییرات منحنی گرافیکی در این نمودارها نشان دهنده میزان تأثیر هر یک از پارامترهاست و البته همگی به جز عمق برش دارای اثر محسوس در رفتار فرآیند هستند. به طور کلی در بررسی حساسیت رفتار زبری سطح در فرآیند تراشکاری آلومینیوم سرعت پیشروی دارای اثر 50 درصدی و پس از آن سرعت دورانی با 42/5 درصد و عمق برش با 7/5 درصد تأثیر گذار می باشند.

## 6- مراجع

- [1] Ferraresi D. *Fundamentals of Machining Materials*. Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo. 1977:751.
- [2] Kadrigama K, Noor M, Rahman M. Optimization of surface roughness in end milling on mould aluminium alloys (AA6061-T6) using response surface method and radian basis function network. *Jourdan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*. 2008;2(4).
- [3] Lou MS, Chen JC, Li CM. Surface roughness prediction technique for CNC end-milling. *Journal of industrial technology*. 1998;15(1):1-6.
- [4] Lou S-J, Chen J. In-process surface roughness recognition (ISRR) system in end-milling operations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 1999;15(3):200-9.
- [5] Alauddin M, El Baradie M, Hashmi M. Prediction of tool life in end milling by response surface methodology. *Journal of Materials Processing*

- process temperature during cortical bone drilling. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine. 2018;232(9):871-83.
- [32] Tahmasbi V, Ghoreishi M, Zolfaghari M. Temperature in bone drilling process: Mathematical modeling and Optimization of effective parameters. International Journal of Engineering-Transactions A: Basics. 2016;29(7):946-53.
- [33] Tahmasbi V, Ghoreishi M, Zolfaghari M. Investigation, sensitivity analysis, and multi-objective optimization of effective parameters on temperature and force in robotic drilling cortical bone. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine. 2017;231(11):1012-24.
- [34] Korayem M, Rastegar Z, Taheri M. Sensitivity analysis of nano-contact mechanics models in manipulation of biological cell. Nanoscience and Nanotechnology. 2012;2(3):49-56.
- [35] Davim JP. A note on the determination of optimal cutting conditions for surface finish obtained in turning using design of experiments. Journal of materials processing technology. 2001;116(2-3):305-8.
- [36] Abouelatta O, Madl J. Surface roughness prediction based on cutting parameters and tool vibrations in turning operations. Journal of materials processing technology. 2001;118(1-3):269-77.
- [37] Brezocnik M, Kovacic M, Ficko M. Prediction of surface roughness with genetic programming. Journal of materials processing technology. 2004;157:28-36.
- [38] Tseng T-LB, Konada U, Kwon YJ. A novel approach to predict surface roughness in machining operations using fuzzy set theory. Journal of Computational Design and Engineering. 2016;3(1):1-13.
- [39] Qasemi M, Sheikhi MM, Tahmasbi V, Zolfaghari M. Experimental analysis, mathematical modeling and Sobol sensitivity analysis of surface roughness in orthopedic milling process (polymethylmethacrylate). Journal of Solid and Fluid Mechanics. 2021;11(1):139-52.
- [40] Davidson MJ, Balasubramanian K, Tagore G. Surface roughness prediction of flow-formed AA6061 alloy by design of experiments. Journal of materials processing technology. 2008;202(1-3):41-6.
- [41] Vashishth D, Tanner K, Bonfield W. Contribution, development and morphology of microcracking in cortical bone during crack propagation. Journal of biomechanics. 2000;33(9):1169-74.
- [42] Knight WA, Boothroyd G. Fundamentals of metal machining and machine tools: CRC Press; 2005.
- optimization of surface roughness in a turning process using the ANFIS-QPSO method. Materials. 2020;13(13):2986.
- [20] Keglouti O, Boulanouar L, Azizi MW, Bouziane A. Multi response optimization of surface roughness in hard turning with coated carbide tool based on cutting parameters and tool vibration. Structural Engineering and Mechanics. 2019;70(4):395-405.
- [21] Özdemir M. Optimization with Taguchi method of influences on surface roughness of cutting parameters in CNC turning processing. Mechanics. 2019;25(5):397-405.
- [22] Vasanth XA, Paul PS, Varadarajan A. A neural network model to predict surface roughness during turning of hardened SS410 steel. International Journal of System Assurance Engineering and Management. 2020;11(3):704-15.
- [23] Kam M, Demirtaş M. Analysis of tool vibration and surface roughness during turning process of tempered steel samples using Taguchi method. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering. 2021;09544089211001976.
- [24] Thirumalai R, Techato K, Chandrasekaran M, Venkatapathy K, Seenivasan M. Experimental investigation during turning process of titanium material for surface roughness. Materials Today: Proceedings. 2021;45:1423-6.
- [25] Taheri M, Tahmasbi V. The effect of various parameters on material removal rate in brass drilling operations using statistical sensitivity analysis. 2016.
- [26] Tahmasbi V, Safari M, Joudaki J. Statistical modeling, Sobol sensitivity analysis and optimization of single-tip tool geometrical parameters in the cortical bone machining process. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine. 2020;234(1):28-38.
- [27] Ghoreishi M, Tahmasbi V. Optimization of material removal rate in dry electro-discharge machining process. Modares Mechanical Engineering. 2015;14(12).
- [28] Montgomery DC. Design and Analysis of Experiments: Second Edition. New York: John Wiley & Sons; 2008.
- [29] Hou T-H, Su C-H, Liu W-L. Parameters optimization of a nano-particle wet milling process using the Taguchi method, response surface method and genetic algorithm. Powder technology. 2007;173(3):153-62.
- [30] Nekahi A, Dehghani K. Modeling the thermomechanical effects on baking behavior of low carbon steels using response surface methodology. Materials & Design. 2010;31(8):3845-51.
- [31] Heydari H, Cheraghi Kazerooni N, Zolfaghari M, Ghoreishi M, Tahmasbi V. Analytical and experimental study of effective parameters on