



# Investigating the Effect of Machining Parameters on Surface Roughness and Machining Force using Artificial Neural Network



## ARTICLE INFO

### Authors

Jafarian F.<sup>1</sup>

Fallah M.<sup>2</sup>

Dehghani S.<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Engineering, Mahallat Institute of Higher Education, Mahallat, Iran.

<sup>2</sup> Faculty of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran.

<sup>3</sup> Faculty of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran.

### \* Correspondence

Address: Faculty of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran.

Sajadmst94@gmail.com

### How to cite this article

Jafarian F, Fallah M, Dehghani S. Investigating the effect of machining parameters on surface roughness and machining force using artificial neural network. Proceedings of 3rd Iranian National Conference on Advanced Machining and Machine Tools (CAMMT). 2023;23(10):95-100

## ABSTRACT

When working with hardened materials, it's important to control and optimize the surface roughness and machining force. To achieve this, we can use intelligent methods that are based on prediction and optimization models. In this study, an artificial neural network was used to evaluate the surface roughness and machining force of hardened steel 4140 by analyzing cutting speed, feed rate, and machining time. A full factorial method was used to carry out 27 experiments, and an uncoated cemented carbide tool TCMW 16T304 H13A was used to measure surface roughness and machining force during turning. An artificial neural network model with two hidden layers was selected as the optimal architecture for separately predicting surface roughness and machining force. The predicted values were then compared with the experimental results, and the average error percentage for validation data was calculated as 4.25% for surface roughness and 5.11% for machining force. Finally, the optimal cutting parameters were selected to minimize surface roughness and machining force.

**Keywords** Artificial Neural Network, Surface Roughness, Machining Force, AISI 4140, Optimization

ماهانامه علمی مهندسی مکانیک مدرس، ویژه نامه مجموعه مقالات سومین کنفرانس ملی ماشین‌کاری و ماشین‌های ابزار پیشرفته  
مهر ۱۴۰۲، دوره ۲۳، شماره ۱۰، صفحه ۹۵-۱۰۰



# بررسی تاثیر پارامترهای ماشین‌کاری بر روی زبری سطح و نیروی ماشین‌کاری با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی



## چکیده

کنترل و بهینه‌سازی زبری سطح و نیروی ماشین‌کاری برای مواد سخت‌کاری شده بسیار ضروری است. برای این منظور می‌توان از روش‌های هوشمند مبتنی بر مدل‌های پیش‌بینی و بهینه‌سازی استفاده کرد. در این پژوهش پارامترهای ماشین‌کاری شامل سرعت برش، نرخ پیشروی و زمان ماشین‌کاری توسط شبکه عصبی مصنوعی برای ارزیابی زبری سطح و نیروی ماشین‌کاری، در تراشکاری فولاد سخت‌کاری شده ۴۱۴۰ مورد استفاده قرار گرفت. طراحی آزمایش‌ها به روش فاکتوریل کامل در قالب ۲۷ آزمایش صورت گرفت و از ابزار کاربید سماتنه بدون پوشش TCMW 16T304 H13A در تراشکاری استفاده شد و زبری سطح و نیروی ماشین‌کاری اندازه‌گیری شد. معماری بهینه با دولایه پنهان برای مدل شبکه عصبی مصنوعی انتخاب شد و برای پیش‌بینی جداگانه زبری سطح و نیروی ماشین‌کاری استفاده شد. مقادیر پیش‌بینی مدل شبکه عصبی مصنوعی با نتایج تجربی مقایسه شد و میانگین درصد خطای داده‌های اعتبارسنجی برای زبری سطح و نیروی ماشین‌کاری به ترتیب برابر با ۴/۲۵ و ۵/۱۱ درصد محاسبه شد و در انتها پارامترهای بهینه برش به‌طوری‌که زبری سطح و نیروی ماشین‌کاری در پایین‌ترین سطح باشند، انتخاب شد.

## مشخصات مقاله

### نویسندگان

فرشید جعفریان<sup>۱</sup>

محمد مقداد فلاح<sup>۲</sup>

سجاد دهقانی<sup>۳\*</sup>

<sup>۱</sup> مرکز آموزش عالی محلات، محلات

<sup>۲</sup> دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

<sup>۳</sup> دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

### \* نویسنده مسئول

آدرس:

دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

Sajadmst94@gmail.com

کلیدواژه‌ها شبکه عصبی مصنوعی، زبری سطح، نیروی ماشین‌کاری، فولاد ۴۱۴۰، بهینه‌سازی

## ۱- مقدمه

زبری سطح به عنوان یکی از مؤثرترین عوامل پرداخت سطح، نقش مهمی در عمر قطعات و کیفیت خدمات دارد. نیروهای ماشین-کاری نیز یکی از پارامترهای خروجی مهم در حوزه ماشین-کاری است و کنترل و بهینه سازی این پارامتر یکی از اهداف مطلوب ماشین-کاری محسوب می شود؛ چرا که نیروهای ماشین-کاری بر روی سایش ابزار تأثیر می گذارند و سایش ابزار نیز بر زبری سطح اثرگذار است و کنترل این پارامترها گام بسیار مهمی برای رسیدن به کاهش هزینه ها و ارتقای کیفیت قطعه تولیدی که هدف نهایی است، برمی دارد. شبکه عصبی مصنوعی روشی است که با استفاده از آن می توان زبری سطح، نیروی ماشین-کاری و تأثیر پارامترهای ورودی بر روی آن ها را بررسی کرد. در سال های اخیر، مطالعات علمی متعددی بر اساس شبکه عصبی مصنوعی به دلیل ظرفیت پیش بینی خوب آن انجام شده است.

زرتی و همکاران<sup>[1]</sup>، به بررسی تأثیر پارامترهای ورودی شامل سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق برش در سطوح مختلف بر روی زبری سطح و نیروی مماسی در طول تراش فولاد ضدزنگ مارتنزیتی ۴۲۰ پرداختند و از شبکه عصبی مصنوعی برای مدل سازی خروجی استفاده شد و معماری های مختلفی را برای مدل پیشنهادی آزمایش کردند تا بتواند بهترین حالت برای پیش بینی زبری سطح و نیروی مماسی به طور هم زمان و جداگانه را ارائه دهد که حداقل میانگین مربع خطا را داشته باشد، تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد که مدل شبکه عصبی مصنوعی برای پیش بینی جداگانه زبری سطح و نیروی مماسی از مدل شبکه عصبی مصنوعی که برای پیش بینی هم زمان هر دو پارامتر به کار گرفته شد، عملکرد بهتری دارد که به ما امکان می دهد مدل های دقیق تری را داشته باشیم. واسانت و همکاران<sup>[2]</sup>، در مطالعه تجربی که داشتند از مدل های رگرسیون و شبکه عصبی مصنوعی برای پیش بینی زبری سطح در حین تراشکاری سخت فولاد SS۴۱۰ با ابزار فلزی سخت چندلایه SNMG۱۲۰۴۰۸ MT TT۵۱۰۰ استفاده کردند. سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق برش در سه سطح مختلف به عنوان پارامترهای برش انتخاب شدند و مقادیر نیروی برش، ارتعاش ابزار، و سایش ابزار در یک طرح آزمایشی تاگوچی با آرایه متعامد L۲۷ اندازه گیری شد. مدل شبکه عصبی مصنوعی برای پیش بینی زبری سطح با معماری ۱-۳-۴-۶ که سه گره در لایه پنهانی دارد با ضریب تعیین ۰/۹۹۴ و میانگین مربع خطای ۰/۰۰۳ توسعه داده شد. در نهایت از تجزیه و تحلیل مدل های مختلف پیش بینی زبری سطح مشاهده شد که مدل شبکه عصبی مصنوعی می تواند زبری سطح را بهتر از مدل های رگرسیونی پیش بینی کند و افزایش تعداد گره های ورودی شبکه عصبی مصنوعی، دقت پاسخ پیش بینی را افزایش می دهد. جعفریان و همکاران<sup>[3]</sup>، به بررسی تأثیر پارامترهای ماشین-کاری شامل سرعت برشی، نرخ

پیشروی، عمق برش و زمان ماشین-کاری در چهار سطح مختلف بر روی زبری سطح با استفاده از روش هوشمند مبتنی بر مدل شبکه عصبی مصنوعی با توپولوژی ۲-۴-۵-۴ پرداختند و با استفاده از میانگین خطای داده ها دقت مدل شبکه عصبی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان می دهد که کیفیت سطح بهتر با افزایش سرعت برش و کاهش عمق برش و نرخ پیشروی به دست می آید. همچنین نتایج تجربی نشان می دهد که برای هر پارامتر برش، افزایش زمان ماشین-کاری منجر به یک مقدار زبری سطح بیشتر می شود. همچنین جعفریان و همکاران<sup>[4]</sup> در مطالعه دیگری، تکنیک های هوشمند برای دسترسی به پارامترهای ماشین-کاری بهینه برای بهبود یکپارچگی سطح در تراشکاری نهایی آلیاژ اینکونل ۷۱۸ با ابزار کاربید سمانته اجرا کردند. برای انجام این کار، تنش پسماند و زبری سطح در شرایط مختلف ماشین-کاری با پارامترهای سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق برش در چهار سطح مختلف اندازه گیری شد، پس از آن فرایند توسط شبکه های عصبی مصنوعی مدل سازی شد. سپس از تکنیک بهینه سازی ژنتیکی شبکه عصبی برای یافتن پارامترهای ماشین-کاری بهینه برای به حداقل رساندن تنش پسماند کششی و درعین حال حفظ مقدار زبری سطح در محدوده های مورد نظر استفاده شد. دو شبکه عصبی مجزا برای مدل های پیش بینی زبری سطح و تنش پسماند استفاده شد. خطاهای اعتبارسنجی در این مطالعه برای هر دو شبکه بین ۲/۵ تا ۸/۱ درصد یافت شد.

هدف از این پژوهش کنترل و بهینه سازی زبری سطح و نیروی ماشین-کاری با روش پیش بینی این پارامترها در طول تراشکاری با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و انتخاب شرایط بهینه برش برای فولاد سخت کاری شده ۴۱۴۰ است.

## ۲- مواد و روش ها

## ۲-۱- آزمایش های تجربی

ابتدا فولاد ۴۱۴۰ با عملیات حرارتی سخت کاری شد و سختی آن تا ۴۵ راکول C افزایش یافت. برای براده برداری از ابزار اینسرتی کاربید سمانته بدون پوشش TCMW 16T304 H13A از برند سندویک استفاده شد.

سرعت برشی، نرخ پیشروی و زمان ماشین-کاری به عنوان متغیرهای ورودی و عمق برش در همه آزمایش ها ثابت و برابر با ۰/۸ میلی متر در نظر گرفته شد. جدول ۱ سطوح مختلف متغیرهای ورودی را نشان می دهد. طراحی آزمایش ها به روش فاکتوریل کامل و در قالب ۲۷ آزمایش صورت گرفت. مطابق شکل ۱ فرایند ماشین-کاری با دستگاه تراش مدل HLV-H از برند فلتهم انجام شد. همچنین دستگاه دینامومتر مدل 9257B از برند کیسلر بر روی دستگاه تراش متصل بود و هم زمان با انجام فرایند ماشین-کاری، نیروهای ماشین-کاری نیز اندازه گیری شد. میزان زبری نمونه ها با قرارگیری آن ها در زیر دستگاه زبری سنج مدل PFM-3320 از برند شریف سولار سنجیده شد که در طی این عملیات، فقط ۱۵ ثانیه

## ۲-۲- مدل سازی شبکه عصبی مصنوعی

پس از تلاش فراوان و امتحان کردن معماری های مختلف برای مدل شبکه عصبی مصنوعی، در انتها معماری بهینه با ۳ نورون در لایه ورودی شامل پارامترهای ورودی ماشین کاری تجربی (سرعت برشی، نرخ پیشروی و زمان ماشین کاری)، دولایه پنهان با ۱۲ و ۳۶ نورون به ترتیب در لایه اول و دوم پنهان و ۱ نورون در لایه خروجی به دست آمد. تعداد ۲۱ داده (۸۰٪) برای آموزش شبکه عصبی مصنوعی و ۶ داده (۲۰٪) برای آزمون و اعتبارسنجی مدل مورد استفاده قرار گرفت که انتخاب داده ها به صورت تصادفی انجام می شد. شبکه در تکرارهای مختلف آموزش داده شد تا مناسب ترین نسل برای آموزش شبکه عصبی مصنوعی شناسایی شود. در این مطالعه تعداد تکرار ۱۰۰۰ برای آموزش انتخاب شد که بعد از هر ۱۰ داده پس انتشار خطا انجام می شود تا خطای مطلق بین مقدار پیش بینی و آزمایش تجربی به کمترین مقدار برسد. برای اعتبارسنجی پیش بینی ها از مقدار میانگین خطای مطلق و میانگین مربع خطا استفاده شد. برای محاسبه میانگین خطای مطلق و میانگین مربع خطا به ترتیب از معادلات (۱) و (۲) استفاده شد. همچنین برای محاسبه میانگین درصد خطای داده های آموزش و اعتبارسنجی از معامله (۳) استفاده شد.

$$MAE = \frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N (Y_i - Y_d) \quad (1)$$

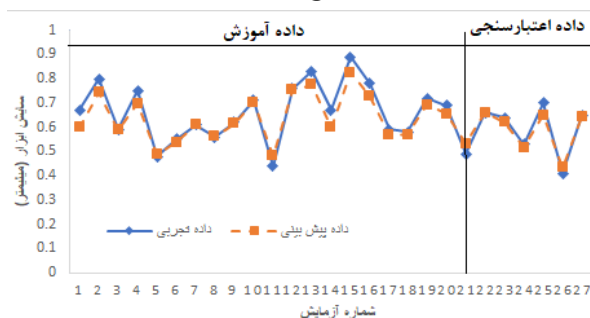
$$MSE = \frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N (Y_i - Y_d)^2 \quad (2)$$

$$\Delta = \frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N \frac{|Y_i - Y_d|}{Y_i} \times 100 \quad (3)$$

که  $Y_i$  مقدار تجربی،  $Y_d$  مقدار پیش بینی و  $N$  تعداد مجموعه داده ها را نشان می دهد.

## ۲-۲-۱- پیش بینی زبری سطح

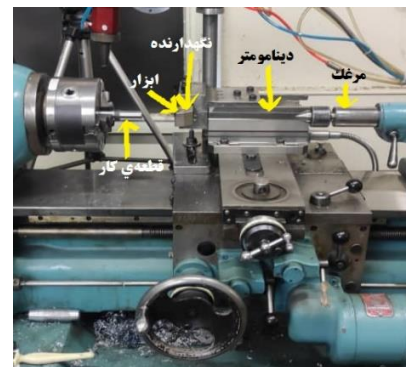
مقایسه بین مقادیر پیش بینی مدل شبکه عصبی مصنوعی و اندازه گیری شده برای زبری سطح در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲) مقایسه بین مقادیر پیش بینی مدل شبکه عصبی مصنوعی و اندازه گیری شده برای زبری سطح

جدول ۳ مقدار میانگین مربع خطا، میانگین خطای مطلق و میانگین درصد خطا برای داده های آموزش و اعتبارسنجی را نشان می دهد. مدل شبکه عصبی مصنوعی درست مشابه با نتایج ماشین کاری تجربی حداکثر زبری سطح را برای پارامترهای ورودی ماشین کاری سرعت برشی ۷۲ متر در دقیقه، نرخ پیشروی ۴۲

آخر ماشین کاری شده از هر قطعه و سه نقطه مختلف از سطح هر قطعه کار مورد زبری سنجی قرار گرفت. نتایج در جدول ۲ ذکر شده است.



شکل ۱) مجموعه دستگاه تراش و اجزای آن

جدول ۱) سطوح مختلف پارامترهای ماشین کاری

| سطح ۳ | سطح ۲ | سطح ۱ | واحد             | پارامتر ورودی   |
|-------|-------|-------|------------------|-----------------|
| ۷۲    | ۴۸    | ۲۴    | متر در دقیقه     | سرعت برشی       |
| ۴۲    | ۲۸    | ۱۴    | میلیمتر در دقیقه | نرخ پیشروی      |
| ۱۲۰   | ۶۰    | ۱۵    | ثانیه            | زمان ماشین کاری |

جدول ۲) داده های اندازه گیری شده برای زبری سطح و نیروی ماشین کاری

| نیروی ماشین کاری (نیوتن) | زبری سطح (میکرومتر) | عمق برش (میلیمتر) | زمان ماشین کاری (ثانیه) | نرخ پیشروی (میلیمتر در دقیقه) | سرعت برشی (متر در دقیقه) | ردیف |
|--------------------------|---------------------|-------------------|-------------------------|-------------------------------|--------------------------|------|
| ۶۴/۹۰۵                   | ۰/۴۲۲               | ۰/۸               | ۱۵                      | ۱۴                            | ۲۴                       | ۱    |
| ۸۴/۱۷۰                   | ۰/۴۹۰               | ۰/۸               | ۶۰                      | ۱۴                            | ۲۴                       | ۲    |
| ۱۳۳/۶۰۵                  | ۰/۶۱۲               | ۰/۸               | ۱۲۰                     | ۱۴                            | ۲۴                       | ۳    |
| ۱۰۵/۱۹۵                  | ۰/۶۳۱               | ۰/۸               | ۱۵                      | ۲۸                            | ۲۴                       | ۴    |
| ۱۱۲/۶۲۵                  | ۰/۶۸۳               | ۰/۸               | ۶۰                      | ۲۸                            | ۲۴                       | ۵    |
| ۱۵۲/۸۴۵                  | ۰/۷۳۹               | ۰/۸               | ۱۲۰                     | ۲۸                            | ۲۴                       | ۶    |
| ۱۱۱/۶۳۵                  | ۰/۸۵۴               | ۰/۸               | ۱۵                      | ۴۲                            | ۲۴                       | ۷    |
| ۱۵۱/۵۹۰                  | ۰/۹۳۷               | ۰/۸               | ۶۰                      | ۴۲                            | ۲۴                       | ۸    |
| ۱۶۴/۶۴۵                  | ۱/۰۲۱               | ۰/۸               | ۱۲۰                     | ۴۲                            | ۲۴                       | ۹    |
| ۵۳/۲۷۰                   | ۰/۳۹۶               | ۰/۸               | ۱۵                      | ۱۴                            | ۴۸                       | ۱۰   |
| ۶۹/۷۳۰                   | ۰/۴۴۳               | ۰/۸               | ۶۰                      | ۱۴                            | ۴۸                       | ۱۱   |
| ۱۱۵/۴۱۵                  | ۰/۵۶۰               | ۰/۸               | ۱۲۰                     | ۱۴                            | ۴۸                       | ۱۲   |
| ۷۵/۵۰۰                   | ۰/۵۸۲               | ۰/۸               | ۱۵                      | ۲۸                            | ۴۸                       | ۱۳   |
| ۹۹/۹۱۵                   | ۰/۶۵۲               | ۰/۸               | ۶۰                      | ۲۸                            | ۴۸                       | ۱۴   |
| ۱۲۵/۶۴۰                  | ۰/۶۸۱               | ۰/۸               | ۱۲۰                     | ۲۸                            | ۴۸                       | ۱۵   |
| ۸۹/۱۶۵                   | ۰/۸۰۶               | ۰/۸               | ۱۵                      | ۴۲                            | ۴۸                       | ۱۶   |
| ۱۳۰/۵۹۵                  | ۰/۸۶۳               | ۰/۸               | ۶۰                      | ۴۲                            | ۴۸                       | ۱۷   |
| ۱۴۲/۳۷۰                  | ۰/۹۳۴               | ۰/۸               | ۱۲۰                     | ۴۲                            | ۴۸                       | ۱۸   |
| ۵۰/۰۵۵                   | ۰/۳۷۲               | ۰/۸               | ۱۵                      | ۱۴                            | ۷۲                       | ۱۹   |
| ۵۷/۷۸۰                   | ۰/۴۶۰               | ۰/۸               | ۶۰                      | ۱۴                            | ۷۲                       | ۲۰   |
| ۶۹/۲۳۵                   | ۰/۵۷۹               | ۰/۸               | ۱۲۰                     | ۱۴                            | ۷۲                       | ۲۱   |
| ۷۱/۴۴۵                   | ۰/۵۷۵               | ۰/۸               | ۱۵                      | ۲۸                            | ۷۲                       | ۲۲   |
| ۸۶/۲۰۵                   | ۰/۵۹۳               | ۰/۸               | ۶۰                      | ۲۸                            | ۷۲                       | ۲۳   |
| ۱۰۹/۹۳۵                  | ۰/۷۸۴               | ۰/۸               | ۱۲۰                     | ۲۸                            | ۷۲                       | ۲۴   |
| ۸۱/۸۱۵                   | ۰/۸۱۷               | ۰/۸               | ۱۵                      | ۴۲                            | ۷۲                       | ۲۵   |
| ۱۱۳/۶۹۰                  | ۰/۹۵۰               | ۰/۸               | ۶۰                      | ۴۲                            | ۷۲                       | ۲۶   |
| ۱۲۳/۴۱۰                  | ۱/۱۵۴               | ۰/۸               | ۱۲۰                     | ۴۲                            | ۷۲                       | ۲۷   |

**جدول ۴)** میانگین مربع خطا، میانگین خطای مطلق و میانگین درصد خطا برای داده‌های آموزش و اعتبارسنجی

| اعتبارسنجی | آموزش   |
|------------|---------|
| ۵/۱۶۹۱     | ۷/۵۷۳۳  |
| ۳۵/۸۱۱۴    | ۹۵/۵۵۴۲ |
| ۵/۱۱       | ۷/۳۳    |

### ۳- نتایج و بحث

نمودارهای سه‌بعدی تأثیر سرعت برشی و نرخ پیشروی بر روی زبری سطح در زمان‌های ماشین‌کاری متفاوت، در شکل ۴ و شکل ۵ نشان داده شده است. این نمودارها در سه زمان ماشین‌کاری ۱۵، ۶۰ و ۱۲۰ ثانیه رسم شدند و پارامتر سرعت برشی در بازه ۲۴ الی ۷۲ متر در دقیقه و پارامتر نرخ پیشروی در بازه ۱۴ الی ۴۲ میلی‌متر در دقیقه تغییر یافت و میزان افزایش یا کاهش زبری سطح در اثر این تغییرات به وسیله مدل طراحی شده، پیش‌بینی و رسم شد.

#### ۳-۱- تحلیل اثرگذاری متغیرها بر روی زبری سطح

با افزایش نرخ پیشروی تا ۴۲ میلی‌متر بر دقیقه، ناحیه برش افزایش می‌یابد و باعث می‌شود که سایش ابزار افزایش یابد در نتیجه زبری سطح افزایش می‌یابد. همچنین افزایش زمان ماشین‌کاری باعث افزایش اصطکاک شده و سایش ابزار بیشتر را به دنبال دارد که باعث افزایش زبری سطح می‌شود؛ بنابراین زمان ماشین‌کاری و نرخ پیشروی رابطه مستقیم با زبری سطح دارند. هر چه زبری سطح افزایش یابد کیفیت سطح نامطلوبی به دست خواهد آمد. اما تأثیر پارامتر سرعت برش بر روی زبری سطح درست مانند نتایج تجربی به دست آمده به یک صورت نبود و در مواردی افزایش سرعت برشی باعث افزایش زبری سطح و در مواردی باعث کاهش آن شده بود. اما به طور کلی می‌توان گفت که افزایش سرعت برشی، دمای برش را افزایش می‌دهد و باعث نرم شدن مواد می‌شود و تنش‌های مؤثر کم شده و زبری سطح کاهش می‌یابد و در مواردی که با افزایش سرعت برشی، زبری سطح بدتر شده است دلیل آن را می‌توان به تشکیل لبه انباشته ربط داد.

اگر پارامترهای سرعت برشی و زمان ماشین‌کاری را ثابت نگه داریم و نرخ پیشروی را از ۱۴ تا ۴۲ میلی‌متر بر دقیقه افزایش دهیم، مقدار تغییرات زبری سطح حداکثر برابر با ۰/۳۸۵ میکرومتر به دست می‌آید. اگر همین کار را برای زمان ماشین‌کاری تکرار کنیم و پارامترهای سرعت برشی و نرخ پیشروی را ثابت نگه داریم و زمان ماشین‌کاری را از ۱۵ تا ۱۲۰ ثانیه افزایش دهیم مقدار تغییرات زبری سطح حداکثر برابر با ۰/۱۷۵ میکرومتر می‌شود و برای سرعت برشی با ثابت نگه داشتن زمان ماشین‌کاری و نرخ پیشروی و افزایش سرعت برشی تا ۷۲ متر در دقیقه میزان تغییرات زبری سطح برابر با ۰/۰۲ میکرومتر می‌شود که نشانگر تأثیر ناچیز سرعت برشی بر زبری سطح است؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که از نظر تأثیرگذاری بر روی زبری سطح، نرخ پیشروی

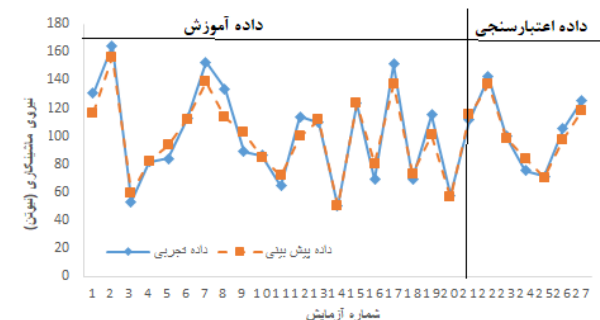
میلی‌متر در دقیقه و زمان ماشین‌کاری ۱۲۰ ثانیه برابر با ۰/۹۴ میکرومتر پیش‌بینی کرد و حداقل زبری سطح را با اختلاف ۰/۰۲۸ میکرومتر از نتیجه اندازه‌گیری تجربی برابر با ۰/۴ میکرومتر برآورد کرد که نشانگر دقت بالای مدل طراحی شده است. میانگین درصد خطای داده‌های آموزش شبکه و اعتبارسنجی به ترتیب ۶/۵۵ و ۴/۲۵ درصد به دست آمد. میانگین خطای مطلق ۰/۰۲۹۵۶۴ و میانگین مربع خطای ۰/۰۰۱۹۶ برای داده‌های اعتبارسنجی عملکرد خوب شبکه عصبی مصنوعی طراحی شده برای پیش‌بینی زبری سطح را نشان می‌دهد.

**جدول ۳)** میانگین مربع خطا، میانگین خطای مطلق و میانگین درصد خطا برای داده‌های آموزش و اعتبارسنجی

| اعتبارسنجی | آموزش    |
|------------|----------|
| ۰/۰۲۹۵۶۴   | ۰/۰۴۹۱۲  |
| ۰/۰۰۱۹۶    | ۰/۰۰۴۶۶۲ |
| ۴/۲۵       | ۶/۵۵     |

#### ۲-۲-۲- پیش‌بینی نیروی ماشین‌کاری

مقایسه بین مقادیر پیش‌بینی مدل شبکه عصبی مصنوعی و اندازه‌گیری شده برای نیروی ماشین‌کاری در شکل ۳ نشان داده شده است.

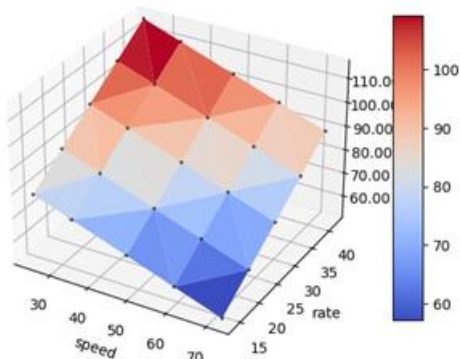


**شکل ۳)** مقایسه بین مقادیر پیش‌بینی مدل شبکه عصبی مصنوعی و اندازه‌گیری شده برای نیروی ماشین‌کاری

جدول ۴ مقدار میانگین مربع خطا، میانگین خطای مطلق و میانگین درصد خطا برای داده‌های آموزش و اعتبارسنجی را نشان می‌دهد. برای حداقل نیروی ماشین‌کاری که با پارامترهای ماشین‌کاری سرعت برشی ۷۲ متر در دقیقه، نرخ پیشروی ۱۴ میلی‌متر در دقیقه و زمان ماشین‌کاری ۱۵ ثانیه به صورت تجربی برابر با ۵۰/۰۵۵ نیوتن اندازه‌گیری شده بود مدل شبکه عصبی مصنوعی مقدار سایش ابزار را با ۰/۲۸ درصد خطا، برابر با ۵۰/۲ نیوتن پیش‌بینی کرد. در نهایت میانگین درصد خطای داده‌های آموزش و اعتبارسنجی به ترتیب ۷/۳۳ و ۵/۱۱ درصد به دست آمد. میانگین خطای مطلق ۵/۱۶۹۱ و میانگین مربع خطای ۳۵/۸۱۱۴۱ برای داده‌های اعتبارسنجی نشان می‌دهد که مدل توسعه یافته دقت خوبی در پیش‌بینی نیروی ماشین‌کاری دارد.

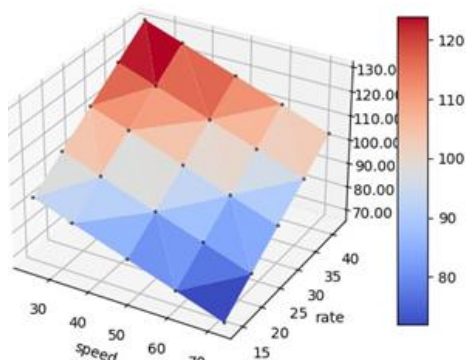
نیروی ماشین‌کاری افزایش پیدا می‌کند؛ بنابراین نرخ پیشروی و زمان ماشین‌کاری رابطه مستقیم و سرعت برشی رابطه عکس با نیروی ماشین‌کاری دارد.

Avg Force Surface 3d Chart Time(15)



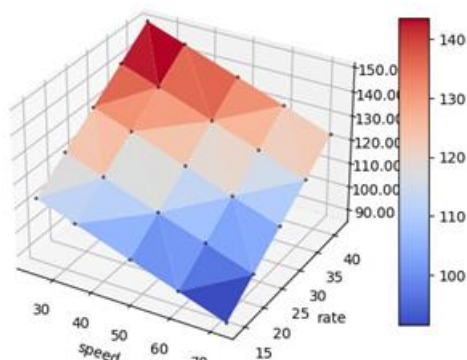
(الف)

Avg Force Surface 3d Chart Time(60)



(ب)

Avg Force Surface 3d Chart Time(120)



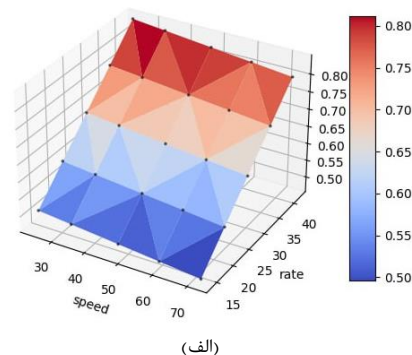
(ج)

**شکل ۵)** نمودارهای سه‌بعدی اثر گذاری متغیرها بر روی نیروی ماشین‌کاری در زمان‌های مختلف (الف) ۱۵ ثانیه (ب) ۶۰ ثانیه (ج) ۱۲۰ ثانیه

اگر پارامترهای سرعت برشی و زمان ماشین‌کاری را ثابت نگه داریم و نرخ پیشروی را از ۱۴ تا ۴۲ میلی‌متر در دقیقه افزایش دهیم، مقدار تغییرات نیروی ماشین‌کاری حداکثر برابر با ۴۳/۲۷ نیوتن به دست می‌آید. اگر همین کار را برای زمان ماشین‌کاری تکرار کنیم و پارامترهای سرعت برشی و نرخ پیشروی را ثابت نگه داریم و

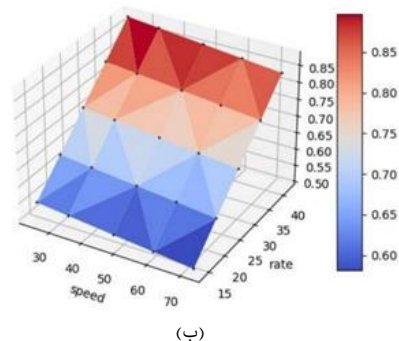
بیشترین تأثیر را دارد و زبری سطح از سرعت برشی تأثیرپذیری ناچیزی دارد.

Surface Roughness Surface 3d Chart Time(15)



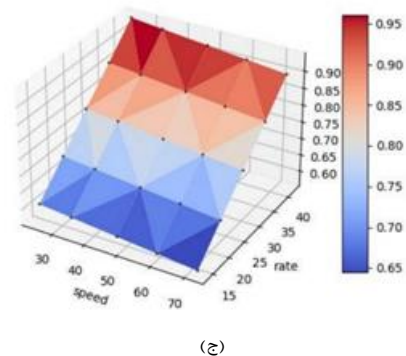
(الف)

Surface Roughness Surface 3d Chart Time(60)



(ب)

Surface Roughness Surface 3d Chart Time(120)



(ج)

**شکل ۴)** نمودارهای سه‌بعدی اثر گذاری متغیرها بر روی زبری سطح در زمان‌های مختلف (الف) ۱۵ ثانیه (ب) ۶۰ ثانیه (ج) ۱۲۰ ثانیه

### ۳-۲- تحلیل اثرگذاری متغیرها بر روی نیروی ماشین‌کاری

باتوجه به نتایج پیش‌بینی، با افزایش سرعت برشی نیروی ماشین‌کاری کاهش می‌یابد. این اتفاق به دلیل نرم‌شدن حرارتی مواد ماشین‌کاری شده در اثر افزایش دمای برش رخ می‌دهد که تنش مؤثر بر ابزار را کاهش می‌دهد و باعث کاهش نیروی ماشین‌کاری می‌شود. افزایش زمان ماشین‌کاری با بیشتر شدن اصطکاک و افزایش سایش ابزار همراه است که هندسه ابزار را به هم می‌ریزد و افزایش نیروی ماشین‌کاری را به دنبال دارد. همچنین با بالاتر رفتن نرخ پیشروی، به علت افزایش ناحیه برش

در این تحقیق سرعت برشی بر روی زبری سطح تاثیر معناداری نداشت ولی به طور کلی با افزایش سرعت برشی، زبری سطح کاهش می‌یابد. بیشترین تاثیر روی زبری سطح نیز مربوط به نرخ پیشروی است.

- نیروی ماشین‌کاری با افزایش نرخ پیشروی و زمان ماشین‌کاری، افزایش یافته و با افزایش سرعت برشی نیروی ماشین‌کاری کاهش می‌یابد. بیشترین تاثیر روی نیروی ماشین‌کاری نیز مربوط به نرخ پیشروی است.

**تأییدیه اخلاقی:** نویسندگان این تحقیق اقرار می‌نمایند که تمامی نتایج مندرج در این مقاله حاصل تحقیق صورت‌گرفته توسط ایشان و نتایج به‌دست‌آمده از آن است.

**تعارض منافع:** نویسندگان متعهد می‌شوند که در این مقاله تضاد منافع وجود ندارد و این مقاله پیش‌از این در جای دیگری ثبت نشده است و نخواهد شد.

**منابع مالی:** کلیه هزینه‌های صورت‌گرفته جهت انجام این تحقیق از منابع شخصی صورت‌گرفته است.

#### مراجع

- 1- Zerti, A., Yallese, M. A., Zerti, O., Nouioua, M., & Khettabi, R. (2019). Prediction of machining performance using RSM and ANN models in hard turning of martensitic stainless steel AISI 420. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 233(13), 4439-4462.
- 2- Vasanth, X. A., Paul, P. S., & Varadarajan, A. S. (2020). A neural network model to predict surface roughness during turning of hardened SS410 steel. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 11, 704-715.
- 3- Jafarian, F., Umbrello, D., Golpayegani, S., & Darake, Z. (2016). Experimental investigation to optimize tool life and surface roughness in Inconel 718 machining. *Materials and Manufacturing Processes*, 31(13), 1683-1691.
- 4- Jafarian, F., Amirabadi, H., & Fattahi, M. (2014). Improving surface integrity in finish machining of Inconel 718 alloy using intelligent systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 71, 817-827.

زمان ماشین‌کاری را از ۱۵ تا ۱۲۰ ثانیه افزایش دهیم مقدار تغییرات نیروی ماشین‌کاری حداکثر برابر با ۴۱/۳۴ نیوتن می‌شود و برای سرعت برشی با ثابت نگه‌داشتن زمان ماشین‌کاری و نرخ پیشروی و افزایش سرعت برشی تا ۷۲ متر بر دقیقه میزان تغییرات نیروی ماشین‌کاری حداکثر برابر با ۳۷/۱۳ نیوتن می‌شود؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که از نظر تأثیرگذاری بر روی نیروی ماشین‌کاری، نرخ پیشروی بیشترین تأثیر، سپس زمان ماشین‌کاری و کمترین تأثیر را سرعت برشی دارد.

باتوجه به نتایج پیش‌بینی مدل شبکه عصبی مصنوعی، حداقل نیروی ماشین‌کاری و بهترین کیفیت سطح با پارامترهای ورودی سرعت برشی ۷۲ متر در دقیقه، نرخ پیشروی ۱۴ میلی‌متر در دقیقه و زمان ماشین‌کاری ۱۵ ثانیه حاصل شد؛ بنابراین این پارامترها به‌عنوان شرایط بهینه برش برای فولاد سخت‌کاری شده ۴۱۴۰ انتخاب می‌شود.

#### ۴- نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش کنترل و بهینه‌سازی زبری سطح و نیروی ماشین‌کاری با روش پیش‌بینی این پارامترها در طول تراشکاری با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و انتخاب شرایط بهینه برش برای فولاد سخت‌کاری شده ۴۱۴۰ است. عملکرد مدل شبکه عصبی مصنوعی با مقایسه بین داده‌های پیش‌بینی و داده‌های اندازه‌گیری دستی بررسی شد و نتایج ذیل حاصل گردید:

- برای زبری سطح میانگین درصد خطای داده‌های آموزش شبکه و اعتبارسنجی به ترتیب ۶/۵۵ و ۴/۲۵ درصد محاسبه شد. میانگین خطای مطلق ۰/۲۹۵۶۴ و میانگین مربع خطای ۰/۰۰۱۹۶ برای داده‌های اعتبارسنجی عملکرد خوب شبکه عصبی مصنوعی طراحی شده برای پیش‌بینی زبری سطح را نشان می‌دهد.
- برای نیروی ماشین‌کاری میانگین درصد خطای داده‌های آموزش و اعتبارسنجی به ترتیب ۷/۳۳ و ۵/۱۱ درصد به دست آمد. میانگین خطای مطلق ۵/۱۶۹۱ و میانگین مربع خطای ۳۵/۸۱۱۴۱ برای داده‌های اعتبارسنجی دقت خوب شبکه عصبی مصنوعی طراحی شده برای پیش‌بینی نیروی ماشین‌کاری را نشان می‌دهد.
- حداقل نیروی ماشین‌کاری و بهترین کیفیت سطح با پارامترهای ورودی سرعت برشی ۷۲ متر در دقیقه، نرخ پیشروی ۱۴ میلی‌متر در دقیقه و زمان ماشین‌کاری ۱۵ ثانیه به ترتیب برابر با ۵۰/۲ نیوتن و ۰/۴ میکرومتر حاصل شد؛ بنابراین این پارامترها به‌عنوان شرایط بهینه برش انتخاب شدند.
- زبری سطح با افزایش نرخ پیشروی و زمان ماشین‌کاری، افزایش یافته و کیفیت سطح نامطلوب می‌شود.