



# Experimental Studies to Investigate the Cutting Forces, Surface Roughness and Tool Wear in the Machining Process of Hardened AISI 4140



## ARTICLE INFO

### Authors

Fallah M.<sup>1</sup>  
Jafarian F.<sup>2</sup>  
Dehghani S.<sup>3\*</sup>  
Alizade H.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran.

<sup>2</sup> Faculty of Engineering, Mahallat Institute of Higher Education, Mahallat, Iran.

<sup>3</sup> Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran.

<sup>4</sup> Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran.

### \* Correspondence

Address: Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran.  
Sajadmst94@gmail.com

### How to cite this article

Fallah M, Jafarian F, Dehghani S, Alizade H, Experimental studies to investigate the cutting forces, surface roughness and tool wear in the machining process of hardened AISI 4140. Proceedings of 3rd Iranian National Conference on Advanced Machining and Machine Tools (CAMMT). 2023;23(10):81-88.

## ABSTRACT

In this research, the effect of parameters of cutting speed, feed rate and machining time at constant cutting depth on tool wear and its effect on the surface roughness of hardened steel 4140 and machining forces were investigated. First, 4140 steel was prepared and its hardness was increased to 45 HRC under heat treatment, and then the TCMW 16T304 H13A tool was prepared from uncoated cemented carbide for machining. The design of the experiments was carried out in a full factorial manner. The analysis of the results was done from the analysis of variance test and the graphs related to the experimental results, based on these results, the advance rate had the greatest effect on the surface roughness and machining shear force, and the machining time had the greatest effect on the machining advance force and Cutting speed also had the greatest effect on tool wear. The highest amount of tool wear was equal to 0.89 mm and the lowest amount of tool wear was equal to 0.41 mm. The best surface quality was measured as 0.372  $\mu\text{m}$  and the highest surface roughness was measured as 1.154  $\mu\text{m}$ . The maximum shear force was 172.7 N and the minimum shear force was 54.2 N. The maximum forward force was equal to 156.59 N and the minimum forward force was equal to 45.86 N.

**Keywords** Cutting Speed, Hardened Steel 4140, Surface Roughness, Tool Wear, Machining Forces

ماهانامه علمی مهندسی مکانیک مدرس، ویژه نامه مجموعه مقالات سومین کنفرانس ملی ماشین‌کاری و ماشین‌های ابزار پیشرفته  
مهر ۱۴۰۲، دوره ۲۳، شماره ۱۰، صفحه ۸۱-۸۸



# مطالعات تجربی جهت بررسی نیروهای برش، زبری سطح و سایش ابزار در فرایند ماشین‌کاری فولاد سخت کاری شده AISI ۴۱۴۰



## چکیده

در این پژوهش تأثیر پارامترهای سرعت برشی، نرخ پیشروی و زمان ماشین‌کاری در عمق برش ثابت بر روی سایش ابزار و تأثیر آن بر روی زبری سطح فولاد سخت کاری شده ۴۱۴۰ و نیروهای ماشین‌کاری مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا فولاد ۴۱۴۰ تهیه و تحت عملیات حرارتی سختی آن به ۴۵ راکول C رسانده شد و سپس ابزار TCMW 16T304 H13A از جنس کاربید سماتنه بدون پوشش برای ماشین‌کاری تهیه شد. طراحی آزمایش‌ها به صورت عاملی کامل صورت گرفت. تحلیل نتایج از آزمون تحلیل واریانس و نمودارهای مربوط به نتایج تجربی صورت پذیرفت که بر اساس این نتایج، نرخ پیشروی بیشترین تأثیر را روی زبری سطح و نیروی برشی ماشین‌کاری داشت و زمان ماشین‌کاری بیشترین تأثیر بر روی نیروی پیشروی ماشین‌کاری و سرعت برشی نیز بیشترین تأثیر را روی سایش ابزار داشت. بیشترین میزان سایش ابزار برابر با ۰/۸۹ میلی‌متر و کمترین میزان سایش ابزار برابر ۰/۴۱ میلی‌متر بود. بهترین کیفیت سطح برابر با ۰/۳۷۲ میکرومتر و بیشترین زبری سطح برابر با ۱/۱۵۴ میکرومتر اندازه‌گیری شد. حداکثر نیروی برشی برابر با ۱۷۲/۷ نیوتن و حداقل نیروی برشی برابر با ۵۴/۲ نیوتن بود. حداکثر نیروی پیشروی برابر با ۱۵۶/۵۹ نیوتن و حداقل نیروی پیشروی برابر با ۴۵/۸۱ نیوتن بود.

## مشخصات مقاله

### نویسنده‌ها

- محمد مقداد فلاح<sup>۱</sup>
- فرشید جعفریان<sup>۲</sup>
- سجاد دهقانی<sup>۳\*</sup>
- حسین علیزاده<sup>۴</sup>
- <sup>۱</sup> دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران
- <sup>۲</sup> مرکز آموزش عالی محلات، محلات
- <sup>۳</sup> دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران
- <sup>۴</sup> دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

### \* نویسنده مسئول

آدرس: دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

**کلیدواژه‌ها** سرعت برشی، فولاد سخت کاری شده ۴۱۴۰، زبری سطح، سایش ابزار، نیروهای ماشین‌کاری

Sajadmst94@gmail.com

## ۱- مقدمه

فولادهای سخت کاری شده که به طور معمول از ۴۰ راکول C سخت تر هستند، به دلیل ترکیبات و خواص مکانیکی و فیزیکی، ماشین کاری آنها دشوار تلقی می شود. خواصی که به نوبه خود شرایط خاصی از ماشین کاری را می طلبد. انتخاب ابزار مناسب یک کار بسیار مهم برای انجام فرایند ماشین کاری فولادهای سخت کاری شده به حساب می آید. به گونه ای که اگر سختی ابزار انتخاب شده کم باشد، سایش ابزار زیاد در زمان بسیار کم اتفاق می افتد. ماشین کاری با ابزارهای فرسوده منجر به افزایش نیروهای ماشین کاری، دمای بالاتر، کیفیت سطح ضعیف تر، دقت ابعادی کمتر و برش پر سروصدا می شود. 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 همان طور که گفته شد، سایش ابزار نیز بر زبری سطح اثرگذار است.

کنترل سایش ابزار برای تولید قطعه کار با کیفیت سطح بالاتر و افزایش راندمان تولید بسیار ضروری است؛ زیرا اقتصاد فرایند ماشین کاری به طور قابل توجهی تحت تأثیر سایش ابزار برش است. انتخاب شرایط برش مناسب مانند سرعت برش، عمق برش، نرخ پیشروی و زمان ماشین کاری یک معیار مؤثر برای بهبود فناوری برش در کاربردهای ماشین کاری است. تلاش زیادی توسط پژوهشگران در یافتن شرایط ماشین کاری بهینه برای خروجی مورد نظر انجام شده است.

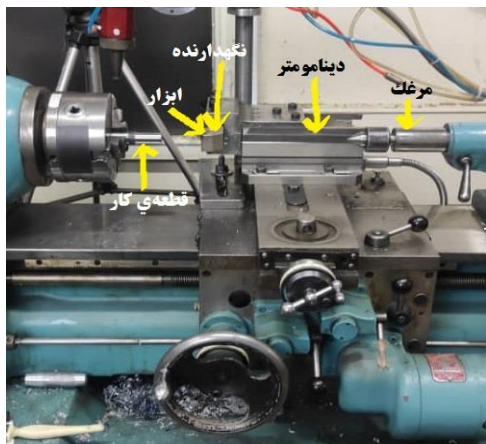
رانجوداس و همکاران<sup>[1]</sup> روی فولاد ۴۳۴۰ سخت کاری شده که دارای پوشش کاربیدی بوده، عملیات تراشکاری را انجام دادند. در طی این آزمایش، اثر پارامترهای ماشین کاری شامل نرخ پیشروی، سرعت برشی و عمق برشی بر روی زبری سطح با طراحی آزمایش به روش عاملی کامل مورد بررسی قرار گرفت. از تحلیل واریانس مشاهده شده است که میزان پیشروی (۶۰/۸۵٪) مهم ترین پارامتر و پس از آن سرعت برشی (۲۴/۶٪) بر روی زبری سطح تأثیر داشته است. آزمایش نشان می دهد که عمق برش بر روی زبری سطح در محدوده مورد مطالعه تأثیر نمی گذارد. با افزایش سرعت برش، میزان زبری سطح کاهش و با افزایش نرخ پیشروی، زبری سطح افزایش یافت. میا و همکاران<sup>[2]</sup> تأثیر پارامترهای ورودی شامل سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق برشی را بر روی زبری سطح فولاد سخت کاری شده ۱۰۶۰ و سایش ابزار کاربید سمانته پوشش داده شده بررسی کردند؛ با توجه به تحلیل واریانس و نسبت سیگنال به نویز طرح آزمایش تاگوچی، در این پژوهش سرعت برشی بیشترین تأثیر را بر زبری سطح داشت و عمق برشی و سرعت برشی به ترتیب بیشترین تأثیر را بر روی سایش پهلوی ابزار داشتند. کونت اوغلو و همکاران<sup>[3]</sup> به بررسی تأثیر پارامترهای ورودی شامل

سرعت برشی، نرخ پیشروی و نوک ابزار بر روی سایش پهلوی ابزار و نیروی برشی ماشین کاری پرداختند. قطعه کار مورد استفاده در این پژوهش فولاد ۱۰۵۰ و ابزار استفاده شده 16T304 TCMT بود. با توجه به نتایج تحلیل واریانس، سرعت برشی مؤثرترین عامل در سایش پهلوی ابزار است و نرخ پیشروی بیشترین تأثیر را بر روی نیروی برشی دارد. آقای کونت اوغلو و همکاران<sup>[4]</sup> در مطالعه ای دیگر، به بررسی تأثیر پارامترهای ورودی اعم از سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق برش بر روی نیروی برشی ماشین کاری و زبری سطح فولاد ۵۱۴۰ و سایش پهلوی ابزار WCMT06T308 پرداختند. طراحی آزمایش ها به روش سطح پاسخ انجام گرفت و تحلیل نتایج آزمایش با استفاده از تحلیل واریانس صورت پذیرفت که سرعت برشی بیشترین تأثیر را بر روی سایش پهلوی ابزار و نرخ پیشروی بیشترین اثر را بر روی نیروی برشی ماشین کاری و زبری سطح داشت. آقای کومار و همکاران<sup>[5]</sup> به بررسی تأثیر پارامترهای سختی قطعه کار، شعاع نوک ابزار، نرخ پیشروی و سرعت برشی بر روی زبری سطح فولاد ۴۳۴۰ با استفاده از ابزار SNGA 431S0425MT پرداختند. طراحی آزمایش های به روش سطح پاسخ و تجزیه و تحلیل داده ها نیز با روش تحلیل واریانس صورت گرفت. طبق تحلیل، در کمترین میزان شعاع نوک ابزار و سختی قطعه کار، بیشترین زبری سطح مشاهده شد. به گونه ای که با افزایش مقدار این دو پارامتر تا نقطه بحرانی، زبری سطح کاهش می یابد و پس از نقطه بحرانی با افزایش شعاع نوک ابزار و میزان سختی قطعه کار، زبری سطح افزایش پیدا می کند. همچنین با افزایش سرعت برشی، زبری سطح کاهش یافته و با افزایش نرخ پیشروی، زبری سطح نیز افزایش می یابد. در پژوهش حاضر به بررسی تأثیر پارامترهای زمان ماشین کاری، سرعت برشی و نرخ پیشروی بر روی سایش ابزار و تأثیر آن بر زبری سطح فولاد سخت کاری شده ۴۱۴۰ و نیروهای ماشین کاری پرداخته خواهد شد. طراحی آزمایش ها به صورت عاملی کامل و تجزیه و تحلیل نتایج با استفاده از تحلیل واریانس صورت خواهد گرفت.

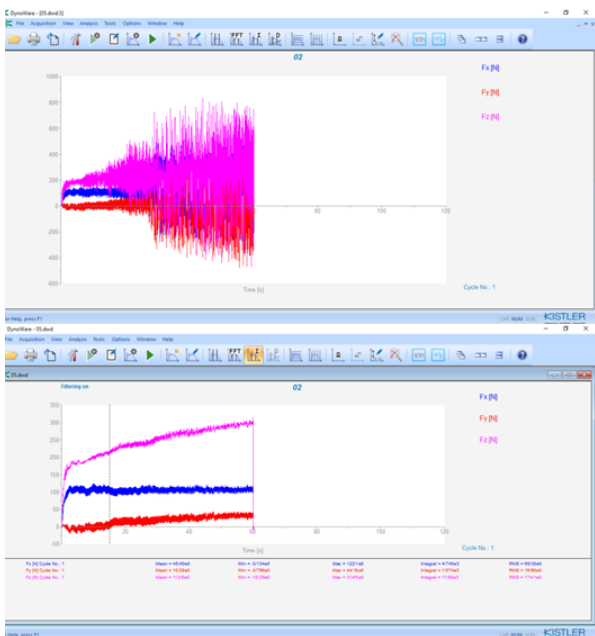
## ۲- مواد و روش ها

ماده قطعه کار مورد استفاده برای آزمایش فولاد ۴۱۴۰ بود که سختی آن تحت عملیات حرارتی از ۱۵ به ۴۵ راکول C رسانده شد. برای آزمایش ها از میله به قطر ۱۹ میلی متر و طول ۱۵۰ میلی متر استفاده شد. جدول ۱ به ترکیب شیمیایی فولاد ۴۱۴۰ اشاره دارد.

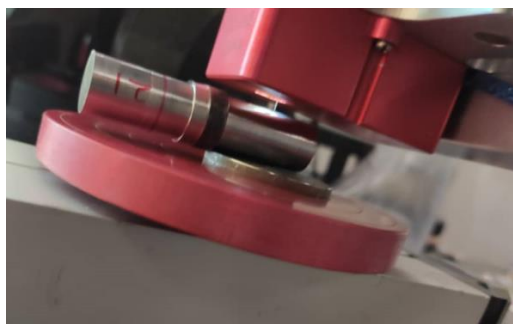
پس از اتمام فرایند ماشین کاری، ابزار زیر میکروسکوپ نوری مدل M3 از برند وایلد قرار گرفت که در شکل ۴ مشاهده می شود و سپس تصاویر به دست آمده با بزرگنمایی ۵۰ برابر از سایش پهلوی ابزار با خطکش های مدرج مربوطه میکروسکوپ نوری اندازه گیری شد. نتایج اندازه گیری شده برای نیروهای ماشین کاری، زبری سطح و سایش ابزار در جدول ۳ آورده شده است.



شکل (۱) مجموعه ی دستگاه تراش و اجزای آن



شکل (۲) نمونه ای از تحلیل نیروها در نرم افزار Dynaware



(الف)

ابزار اینسرتی TCMW 16T304 H13A از جنس کاربید سمانته بدون پوشش از برند سندویک در این پژوهش مورداستفاده قرار گرفت. 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 ۲ سطوح مختلف متغیرهای ورودی را نشان می دهد. برای اینکه تمامی حالات مورد بررسی قرار گیرد و نتایج کاملاً دقیق باشد، از طراحی آزمایش به روش عاملی کامل استفاده شد که براین اساس ۲۷ آزمایش طراحی و انجام گردید.

جدول (۱) ترکیب شیمیایی فولاد آلیاژی ۴۱۴۰ [۶]

درصد وزنی	ترکیبات
۰/۱۷۰	مولیبدن
۱/۱۰۰	کروم
۰/۰۲۹	گوگرد
۰/۴۱۰	کربن
۹۷/۳۰۰	آهن
۰/۲۶۰	سیلیسیم
۰/۷۴۰	منگنز
۰/۰۱۲	فسفر

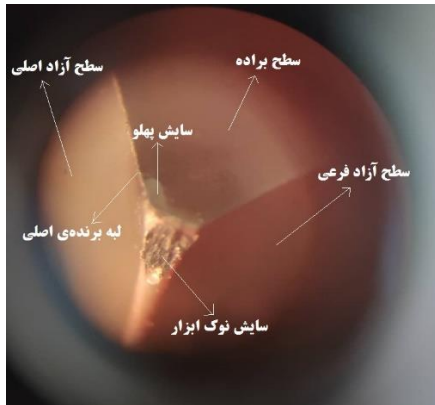
جدول (۲) سطوح مختلف پارامترهای ماشین کاری

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

فاصله بین زمان های ماشین کاری ثابت در نظر گرفته شد و زمان ماشین کاری ۱۵ ثانیه برای حالت شروع اولیه ماشین کاری انتخاب شد.

پس از انجام تمامی مراحل فوق، نوبت به مرحله ماشین کاری رسید. دستگاه تراش مدل HLV-H از برند فلتهم که در فرایند ماشین کاری از آن استفاده شد، دستگاهی بود که سرعت پیشروی و سرعت برشی آن از یکدیگر مستقل بود. به دلیل این ویژگی، تأثیر پارامترهای سرعت برشی و نرخ پیشروی به صورت مستقل از هم مورد بررسی قرار گرفت. همچنین دستگاه دینامومتر مدل 9257B از برند کیسلر بر روی دستگاه تراش متصل بود که در شکل ۱ نشان داده شده است و هم زمان با انجام فرایند ماشین کاری، نیروهای ماشین کاری نیز اندازه گیری شد. مطابق شکل ۲ داده های نیروهای ماشین کاری در نرم افزار داینور مورد تحلیل قرار گرفت و حذف نویز توسط آن انجام شد.

میزان زبری نمونه ها با قرارگیری آن ها در نگهدارنده V-BLOCK و زیر دستگاه زبری سنج مدل PFM-3320 از برند شریف سولار مطابق شکل ۳ سنجیده شد که در طی این عملیات، فقط ۱۵ ثانیه آخر ماشین کاری شده از هر قطعه و سه نقطه مختلف از سطح هر قطعه کار مورد زبری سنجی قرار گرفت.



شکل ۴) سایش ابزار برای قطعه ماشین‌کاری شده



(ب)

شکل ۳) زبری‌سنجی قطعات ماشین‌کاری شده، الف) نحوه قرارگیری قطعه در دستگاه ب) مجموعه دستگاه زبری‌سنج

جدول ۳) داده‌های اندازه‌گیری شده برای سایش ابزار، زبری سطح و نیروهای ماشین‌کاری در ۲۷ حالت مختلف

شماره آزمایش	سرعت برشی (متر در دقیقه)	نرخ پیشروی (میلیمتر در دقیقه)	زمان ماشین‌کاری (ثانیه)	عمق برش (میلیمتر)	سایش ابزار (میلیمتر)	زبری سطح (میکرومتر)	نیروی برشی (نیوتن)	نیروی پیشروی (نیوتن)
۱	۲۴	۱۴	۱۵	۰/۸	۰/۴۱	۰/۴۲۲	۷۱/۵۸	۵۸/۲۳
۲	۲۴	۱۴	۶۰	۰/۸	۰/۴۸	۰/۴۹۰	۹۳/۵۰	۷۴/۸۴
۳	۲۴	۱۴	۱۲۰	۰/۸	۰/۵۶	۰/۶۱۲	۱۴۰/۰۰	۱۲۷/۲۱
۴	۲۴	۲۸	۱۵	۰/۸	۰/۴۴	۰/۶۳۱	۱۱۳/۵۰	۹۶/۸۹
۵	۲۴	۲۸	۶۰	۰/۸	۰/۵۵	۰/۶۸۳	۱۲۲/۰۰	۱۰۳/۲۵
۶	۲۴	۲۸	۱۲۰	۰/۸	۰/۶۱	۰/۷۳۹	۱۶۰/۰۰	۱۴۵/۶۹
۷	۲۴	۴۲	۱۵	۰/۸	۰/۴۹	۰/۸۵۴	۱۱۹/۰۰	۱۰۴/۲۷
۸	۲۴	۴۲	۶۰	۰/۸	۰/۵۹	۰/۹۳۷	۱۶۵/۹۰	۱۳۷/۲۸
۹	۲۴	۴۲	۱۲۰	۰/۸	۰/۶۶	۱/۰۲۱	۱۷۲/۷۰	۱۵۶/۵۹
۱۰	۴۸	۱۴	۱۵	۰/۸	۰/۵۳	۰/۳۹۶	۵۷/۴۳	۴۹/۱۱
۱۱	۴۸	۱۴	۶۰	۰/۸	۰/۵۸	۰/۴۴۳	۷۸/۰۰	۶۱/۴۶
۱۲	۴۸	۱۴	۱۲۰	۰/۸	۰/۶۵	۰/۵۶۰	۱۲۱/۰۰	۱۰۹/۸۳
۱۳	۴۸	۲۸	۱۵	۰/۸	۰/۵۹	۰/۵۸۲	۸۵/۵۰	۶۵/۵۰
۱۴	۴۸	۲۸	۶۰	۰/۸	۰/۶۴	۰/۶۵۲	۱۰۸/۰۰	۹۱/۸۳
۱۵	۴۸	۲۸	۱۲۰	۰/۸	۰/۷۲	۰/۶۸۱	۱۳۲/۰۰	۱۱۹/۲۲
۱۶	۴۸	۴۲	۱۵	۰/۸	۰/۶۲	۰/۸۰۶	۹۴/۰۰	۸۴/۳۳
۱۷	۴۸	۴۲	۶۰	۰/۸	۰/۶۷	۰/۸۶۳	۱۴۳/۰۰	۱۱۸/۱۹
۱۸	۴۸	۴۲	۱۲۰	۰/۸	۰/۸۰	۰/۹۳۴	۱۵۰/۰۰	۱۳۴/۷۴
۱۹	۷۲	۱۴	۱۵	۰/۸	۰/۶۷	۰/۳۷۲	۵۴/۲۵	۴۵/۸۶
۲۰	۷۲	۱۴	۶۰	۰/۸	۰/۶۹	۰/۴۶۰	۶۲/۱۹	۵۳/۲۷
۲۱	۷۲	۱۴	۱۲۰	۰/۸	۰/۷۸	۰/۵۷۹	۶۶/۰۰	۷۲/۴۷
۲۲	۷۲	۲۸	۱۵	۰/۸	۰/۷۰	۰/۵۷۵	۸۰/۵۵	۶۲/۳۴
۲۳	۷۲	۲۸	۶۰	۰/۸	۰/۷۱	۰/۵۹۳	۹۲/۵۰	۷۹/۹۱
۲۴	۷۲	۲۸	۱۲۰	۰/۸	۰/۸۳	۰/۷۸۴	۱۰۸/۰۰	۱۱۱/۸۷
۲۵	۷۲	۴۲	۱۵	۰/۸	۰/۷۵	۰/۸۱۷	۸۵/۰۰	۷۸/۶۳
۲۶	۷۲	۴۲	۶۰	۰/۸	۰/۷۶	۰/۹۵۰	۱۲۰/۰۰	۱۰۷/۳۸
۲۷	۷۲	۴۲	۱۲۰	۰/۸	۰/۸۹	۱/۱۵۴	۱۲۸/۰۰	۱۱۸/۸۲

### ۳- نتایج و بحث

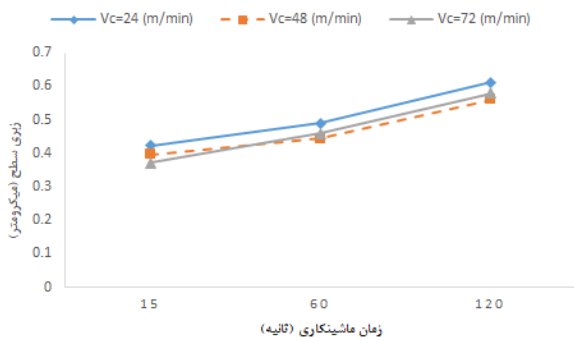
#### ۳-۱- تحلیل سایش ابزار

باتوجه به نمودارهای شکل ۵ و شکل ۶، با افزایش سرعت برشی دمای ناحیه برش افزایش یافته و سایش ابزار افزایش می‌یابد. با افزایش نرخ پیشروی، ناحیه برش افزایش می‌یابد و سایش ابزار نیز بیشتر می‌شود. با افزایش زمان ماشین‌کاری به دلیل اینکه

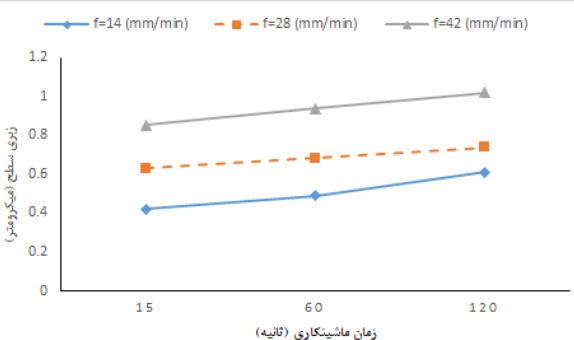
اصطکاک افزایش می‌یابد و هندسه ابزار به هم می‌ریزد، سایش ابزار افزایش می‌یابد و هر سه پارامتر ورودی رابطه مستقیم با سایش ابزار دارند. بیشترین میزان سایش ابزار برابر با ۰/۸۹ میلیمتر در بالاترین سرعت برشی ۷۲ متر در دقیقه و بیشترین نرخ پیشروی ۴۲ میلیمتر در دقیقه و طولانی‌ترین زمان ماشین‌کاری ۱۲۰ ثانیه اتفاق افتاد. کمترین میزان سایش ابزار برابر ۰/۴۱ میلیمتر در

افزایش زمان ماشین کاری اصطکاک افزایش یافته و سایش بیشتر شده و در نتیجه زبری سطح نیز افزایش پیدا می‌کند؛ بنابراین زمان ماشین کاری و نرخ پیشروی رابطه مستقیم با زبری سطح دارند. هر چه زبری سطح افزایش پیدا کند، کیفیت سطح نامطلوبی به دست خواهد آمد. اما در مورد تأثیر پارامتر سرعت برشی می‌توان چنین گفت که به‌طور کلی با افزایش سرعت برشی، دمای برش افزایش پیدا می‌کند و باعث نرم شدن مواد برش شده و تنش‌های مؤثر کم شده و زبری سطح کاهش می‌یابد. اما در مورد مواردی که با افزایش سرعت برشی، زبری سطح افزایش پیدا کرده است می‌توان گفت به دلیل تشکیل لبه انباشته و ارتعاشات دستگاه این اتفاق رخ داده است.

کمترین زبری سطح یعنی بهترین کیفیت سطح برابر با  $0.372$  میکرومتر در کمترین زمان ماشین کاری  $15$  ثانیه و پایین‌ترین نرخ پیشروی  $14$  ثانیه و بالاترین سرعت برشی یعنی  $72$  متر بر دقیقه به وقوع پیوسته است. بیشترین زبری سطح یعنی بدترین کیفیت سطح برابر با  $1.154$  میکرومتر است که در بیشترین زمان  $120$  ثانیه و بالاترین نرخ پیشروی  $42$  میلی‌متر بر دقیقه و نیز بالاترین سرعت برشی یعنی  $72$  متر بر دقیقه اتفاق افتاده است.



شکل ۵) نمودار سایش ابزار بر حسب زمان در نرخ پیشروی  $14$  میلی‌متر در دقیقه

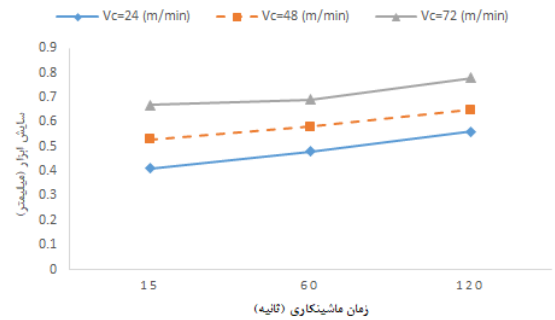


شکل ۶) نمودار سایش ابزار بر حسب زمان در سرعت برشی  $24$  متر بر دقیقه

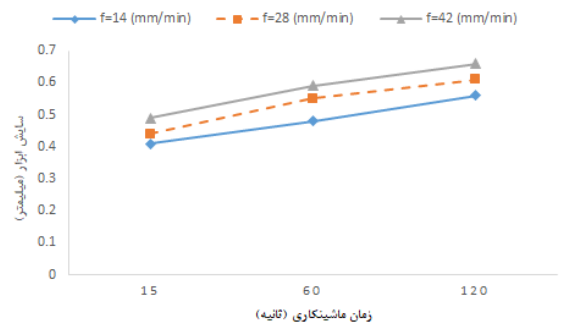
### ۳-۲-۱- تحلیل واریانس زبری سطح

باتوجه به اعداد جدول ۵، مقدار  $P$  برای دو متغیر نرخ پیشروی و زمان ماشین کاری کمتر از  $0.05$  (سطح اطمینان قابل قبول) است و بدین معناست که هر دو روی زبری سطح تأثیر معناداری دارند.

کمترین سرعت برشی یعنی  $24$  متر در دقیقه و کمترین نرخ پیشروی  $14$  میلی‌متر در دقیقه و کمترین زمان ماشین کاری  $15$  ثانیه است به دست آمد.



شکل ۵) نمودار سایش ابزار بر حسب زمان در نرخ پیشروی  $14$  میلی‌متر در دقیقه



شکل ۶) نمودار سایش ابزار بر حسب زمان در سرعت برشی  $24$  متر در دقیقه

### ۳-۱-۱- تحلیل واریانس سایش ابزار

به کمک تحلیل واریانس، به بررسی تأثیرگذاری هر یک از پارامترهای ورودی بر روی سایش ابزار مطابق جدول ۴ پرداخته می‌شود. این جدول شامل درجات آزادی، مجموع مربعات تنظیم شده، میانگین مربعات تنظیم شده، مقدار  $F$  و مقدار  $P$  است. چون مقدار  $P$  هر سه پارامتر کمتر از  $0.05$  (سطح اطمینان قابل قبول) است، بدین معناست که هر سه پارامتر روی سایش ابزار تأثیر معناداری دارند. باتوجه به مقایسه مقادیر  $P$  در سه متغیر، بیشترین اثر مربوط به سرعت برشی و سپس زمان ماشین کاری و کمترین اثر مربوط به نرخ پیشروی به است.

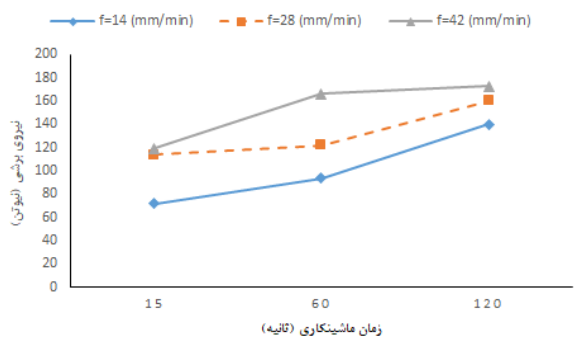
جدول ۴) اثرگذاری هر متغیر بر روی سایش ابزار بر اساس تحلیل واریانس

منبع	درجات آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار P
سرعت برشی	۱	۰/۲۲۰۰	۰/۲۲۰۰	۵۹۹/۴۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰
نرخ پیشروی	۱	۰/۰۴۳۰	۰/۰۴۳۰	۱۱۷/۲۱	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰
زمان ماشین کاری	۱	۰/۰۹۵۷	۰/۰۹۵۷	۲۶۰/۸۱	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰

### ۳-۲- تحلیل زبری سطح

باتوجه به نمودارهای شکل ۷ و شکل ۸، با افزایش نرخ پیشروی، به دلیل افزایش ناحیه برش، زبری سطح افزایش می‌یابد. با





شکل ۱۰ نمودار نیروی برشی برحسب زمان در سرعت برشی ۲۴ متر در دقیقه

### ۳-۳-۱- تحلیل واریانس نیروی برشی

باتوجه به جدول ۶، با مقایسه مقادیر P در سه پارامتر ورودی، بیشترین اثر مربوط به نرخ پیشروی و سپس زمان ماشین کاری و کمترین اثر مربوط به سرعت برشی است.

جدول ۶ اثرگذاری هر متغیر بر روی نیروی برش بر اساس تحلیل واریانس

منبع	درجات آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F مقدار	P مقدار
سرعت برشی	۱	۷۲۶۸	۷۲۶۸/۸	۶۳/۷۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۴۴۶۶
نرخ پیشروی	۱	۱۰۴۴۷	۱۰۴۴۷/۴	۹۱/۵۷	۰/۰۰۰۰۰۰۰۱۷۴۴
زمان ماشین کاری	۱	۹۵۲۱	۹۵۲۱/۹	۸۳/۴۵	۰/۰۰۰۰۰۰۰۴۰۹۶

### ۳-۴- تحلیل نیروی پیشروی

باتوجه به نمودارهای شکل ۱۱ و شکل ۱۲، سرعت برشی بالا باعث افزایش دمای برش می شود که مواد برش را نرم می کند و تنش های مؤثر بر ابزار را کاهش داده و باعث کاهش نیروهای پیشروی می شود؛ بنابراین سرعت برشی با نیروی پیشروی ماشین کاری رابطه عکس دارد. با افزایش زمان ماشین کاری به دلیل اینکه سایش زیاد شده و اصطکاک افزایش می یابد و هندسه ابزار به هم می ریزد، نیروی پیشروی ماشین کاری افزایش می یابد. با بالا رفتن نرخ پیشروی، به علت افزایش ناحیه برش، نیروی پیشروی ماشین کاری افزایش پیدا می کند که نشان می دهد نرخ پیشروی با نیروی پیشروی ماشین کاری رابطه مستقیم دارد؛ بنابراین مطابق تحلیل فوق بیشترین نیروی ماشین کاری باید در بالاترین نرخ پیشروی، بیشترین زمان ماشین کاری و کمترین میزان سرعت برشی رخ دهد که مطابق داده ها و جداول حداکثر نیروی پیشروی برابر با ۱۵۶/۵۹ نیوتن در زمان ماشین کاری ۱۲۰ ثانیه و نرخ پیشروی ۴۲ میلی متر در دقیقه و سرعت برشی ۲۴ متر در دقیقه و حداقل نیروی پیشروی برابر با ۴۵/۸۶ نیوتن در زمان ماشین کاری ۱۵ ثانیه و نرخ پیشروی ۱۴ میلی متر در دقیقه و سرعت برشی ۷۲ متر در دقیقه است.

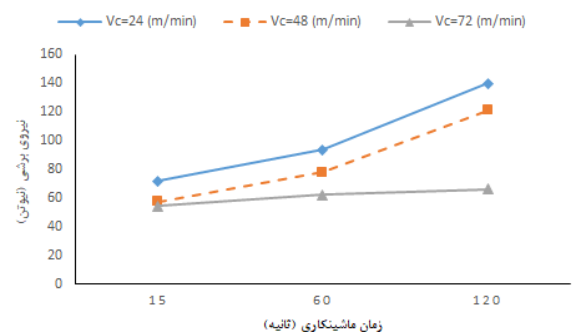
مقدار P برای پارامتر سرعت برشی برابر با ۰/۶۳۸۳ است که نشان می دهد تأثیر معناداری روی زبری سطح ندارد. باتوجه به مقایسه مقادیر P در دو متغیر گفته شده، بیشترین اثر مربوط به نرخ پیشروی و کمترین اثر مربوط به زمان ماشین کاری است.

جدول ۵ اثرگذاری هر متغیر بر روی زبری سطح بر اساس تحلیل واریانس

منبع	درجات آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F مقدار	P مقدار
سرعت برشی	۱	۰/۰۰۰۶۱	۰/۰۰۰۶۱۳	۰/۲۳	۰/۶۳۸۳
نرخ پیشروی	۱	۰/۸۸۹۷۸	۰/۸۸۹۷۷۸	۳۲۹/۶۰	۰
زمان ماشین کاری	۱	۰/۱۴۶۰۶	۰/۱۴۶۰۶۱	۵۴/۱۱	۰/۰۰۰۰۰۰۱۷۵۶

### ۳-۳- تحلیل نیروی برش

باتوجه به نمودارهای شکل ۹ و شکل ۱۰، سرعت برشی بالا باعث افزایش دمای برش می شود که مواد برش را نرم می کند و تنش مؤثر بر ابزار را کاهش داده و باعث کاهش نیروهای برشی می شود؛ بنابراین سرعت برشی با نیروی برشی ماشین کاری رابطه عکس دارد. با افزایش زمان ماشین کاری به دلیل اینکه سایش زیاد شده و اصطکاک افزایش می یابد و هندسه ابزار به هم می ریزد، نیروی برشی ماشین کاری افزایش می یابد. با بالا رفتن نرخ پیشروی، به علت افزایش ناحیه برش، نیروی برشی ماشین کاری افزایش پیدا می کند که نشان می دهد نرخ پیشروی با نیروی برشی ماشین کاری رابطه مستقیم دارد؛ بنابراین مطابق تحلیل فوق بیشترین نیروی ماشین کاری باید در بالاترین نرخ پیشروی، بیشترین زمان ماشین کاری و کمترین میزان سرعت برشی رخ دهد که مطابق داده های جدول ۳ حداکثر نیروی برشی برابر با ۱۷۲/۷ نیوتن در زمان ماشین کاری ۱۲۰ ثانیه و نرخ پیشروی ۴۲ میلی متر بر دقیقه و سرعت برشی ۲۴ متر بر دقیقه و حداقل نیروی برشی برابر با ۵۴/۲ نیوتن در زمان ماشین کاری ۱۵ ثانیه و نرخ پیشروی ۱۴ میلی متر بر دقیقه و سرعت برشی ۷۲ متر بر دقیقه است.



شکل ۹ نمودار نیروی برشی بر حسب زمان در نرخ پیشروی ۱۴ میلی متر در دقیقه

• نرخ پیشروی بیشترین تأثیر را روی زبری سطح و نیروی برشی ماشین‌کاری داشت و زمان ماشین‌کاری و بیشترین تأثیر بر روی نیروی پیشروی ماشین‌کاری و سرعت برشی نیز بیشترین تأثیر را روی سایش ابزار داشت.

• بیشترین میزان سایش ابزار برابر با  $0.89$  میلی‌متر در بالاترین سرعت برشی  $72$  متر در دقیقه و بیشترین نرخ پیشروی  $42$  میلی‌متر در دقیقه و طولانی‌ترین زمان ماشین‌کاری  $120$  ثانیه ایجاد شد. کمترین میزان سایش ابزار برابر  $0.41$  میلی‌متر در کمترین سرعت برشی یعنی  $24$  متر در دقیقه و کمترین نرخ پیشروی  $14$  میلی‌متر در دقیقه و کمترین زمان ماشین‌کاری  $15$  ثانیه اتفاق افتاد.

• بهترین کیفیت سطح برابر با  $0.372$  میکرومتر در کمترین زمان ماشین‌کاری  $15$  ثانیه و پایین‌ترین نرخ پیشروی  $14$  میلی‌متر در دقیقه و بالاترین سرعت برشی یعنی  $72$  متر در دقیقه به وقوع پیوست. بیشترین میزان زبری سطح برابر با  $1.154$  میکرومتر است که در بیشترین زمان ماشین‌کاری یعنی  $120$  ثانیه و بالاترین نرخ پیشروی  $42$  میلی‌متر در دقیقه و نیز بالاترین سرعت برشی یعنی  $72$  متر در دقیقه اتفاق افتاد.

• حداکثر نیروی برشی برابر با  $172/7$  نیوتن در زمان ماشین‌کاری  $120$  ثانیه و نرخ پیشروی  $42$  میلی‌متر در دقیقه و سرعت برشی  $24$  متر در دقیقه و حداقل نیروی برشی برابر با  $54/2$  نیوتن در زمان ماشین‌کاری  $15$  ثانیه و نرخ پیشروی  $14$  میلی‌متر در دقیقه و سرعت برشی  $72$  متر در دقیقه است.

• حداکثر نیروی پیشروی برابر با  $156/59$  نیوتن در زمان ماشین‌کاری  $120$  ثانیه و نرخ پیشروی  $42$  میلی‌متر در دقیقه و سرعت برشی  $24$  متر در دقیقه و حداقل نیروی پیشروی برابر با  $45/86$  نیوتن در زمان ماشین‌کاری  $15$  ثانیه و نرخ پیشروی  $14$  میلی‌متر در دقیقه و سرعت برشی  $72$  متر در دقیقه است.

### فهرست علائم

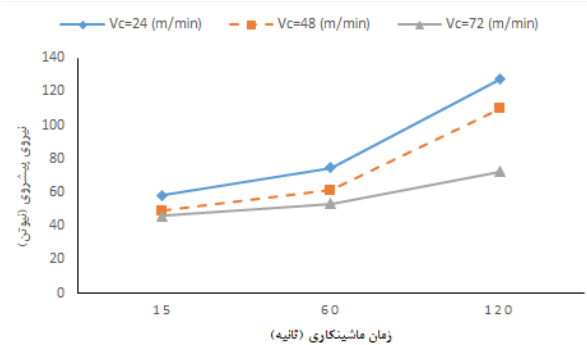
$V_c$	سرعت برشی (m/min)
$f$	نرخ پیشروی (mm/min)
$T$	زمان ماشین‌کاری (S)

### زیرنویس‌ها

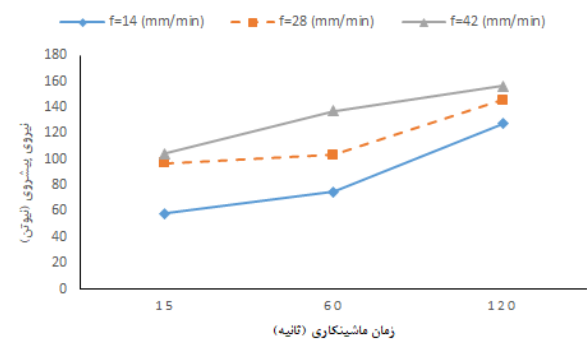
Flankwear سایش پهلوئی ابزار

**تائیدیه اخلاقی:** نویسندگان این تحقیق اقرار می‌نمایند که تمامی نتایج مندرج در این مقاله حاصل تحقیق صورت گرفته توسط ایشان و نتایج به دست آمده از آن می‌باشد.

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



شکل ۱۱) نمودار نیروی پیشروی بر حسب زمان در نرخ پیشروی  $14$  میلی‌متر در دقیقه



شکل ۱۲) نمودار نیروی پیشروی بر حسب زمان در سرعت برشی  $24$  متر در دقیقه

### ۳-۴-۱- تحلیل واریانس نیروی پیشروی

هر سه پارامتر روی نیروی پیشروی تأثیر معناداری دارند. باتوجه به مقایسه مقادیر  $P$  در سه پارامتر ورودی، بیشترین اثر مربوط به زمان ماشین‌کاری و سپس نرخ پیشروی و کمترین اثر مربوط به سرعت برشی است.

جدول ۷) اثرگذاری هر متغیر بر روی نیروی پیشروی بر اساس تحلیل واریانس

منبع	درجات آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار P
سرعت برشی	۱	۴۱۵۹	۴۱۵۸/۷	۶۳/۱۳	۰/۰۰۰۰۰۰۴۸۲۲۳
نرخ پیشروی	۱	۸۳۵۷	۸۳۵۷/۱	۱۲۶/۸۶	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۷۷
زمان ماشین‌کاری	۱	۱۱۴۴۴	۱۱۴۴۳/۹	۱۷۳/۷۲	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰۳

### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک مطالعه تجربی به منظور بررسی تأثیر پارامترهای سرعت برشی، نرخ پیشروی و زمان ماشین‌کاری در عمق برش ثابت بر روی سایش ابزار و تأثیر آن بر روی زبری سطح فولاد سخت‌کاری شده  $4140$  و نیروهای ماشین‌کاری مورد بررسی قرار گرفت. برای تحلیل نتایج از تحلیل واریانس و نمودارهای مربوط به نتایج تجربی استفاده شد و نتایج ذیل به دست آمد:

منابع مالی: کلیه هزینه‌های صورت گرفته جهت انجام این تحقیق از منابع شخصی صورت گرفته است.

### مراجع

- 1- Das, S. R., Kumar, A., & Dhupal, D. (2013). Effect of machining parameters on surface roughness in machining of hardened AISI 4340 steel using coated carbide inserts. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 2(4), 445-453.
- 2- Mia, M., Dey, P. R., Hossain, M. S., Arafat, M. T., Asaduzzaman, M., Ullah, M. S., & Zobaer, S. T. (2018). Taguchi S/N based optimization of machining parameters for surface roughness, tool wear and material removal rate in hard turning under MQL cutting condition. *Measurement*, 122, 380-391.
- 3- Kuntoğlu, M., & Sağlam, H. (2019). Investigation of progressive tool wear for determining of optimized machining parameters in turning. *Measurement*, 140, 427-436.
- 4- Kuntoğlu, M., Aslan, A., Pimenov, D. Y., Giasin, K., Mikolajczyk, T., & Sharma, S. (2020). 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*, 13(19), 4242.
- 5- Kumar, S., Singh, D., & Kalsi, N. S. (2017). Analysis of surface roughness during machining of hardened AISI 4340 steel using minimum quantity lubrication. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 3627-3635.
- 6- Nikam, B., Khadtare, A., & Pawade, R. (2021). MACHINABILITY ASSESSMENT OF AISI 4140 HARDENED STEEL USING CBN INSERTS IN HARD TURNING. *International Journal of Modern Manufacturing Technologies (IJMMT)*, 13(1).