



## مطالعه میکروسختی و لایه سفید در فرزکاری فولاد سخت با استفاده از روش طراحی آزمایش رویه پاسخ

حامد حسنپور<sup>1</sup>، محمدحسین صادقی<sup>2\*</sup>، امیر راستی<sup>1</sup>

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

\* تهران، صندوق پستی 143-14115، sadeghim@modares.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 11 مهر 1394

پذیرش: 09 آبان 1394

ارائه در سایت: 30 آبان 1394

کلید واژگان:

فولاد سخت

میکروسختی

لایه سفید

سطوح پاسخ

### چکیده

فولادهای سخت با دارا بودن استحکام و مقاومت سایشی بالا، کاربرد گسترده‌ای در صنعت خودروسازی، قالب‌سازی و ساخت سرمت‌های حفاری دارند. ماشین‌کاری این مواد در حالت سخت‌کاری شده با هدف دستیابی به دقت ابعادی و هندسی بالا، افزایش تولیدپذیری و بهبود خواص قطعه‌کار رو به گسترش است. در این پژوهش، رابطه بین پارامترهای برش و کیفیت سطح نهایی در فرزکاری سخت قطعه‌کاری از جنس فولاد 4340 و در حضور روان‌کاری با حداقل سیال برشی بررسی گردیده است. پارامترهای سرعت برشی، نرخ پیشروی، عمق برش محوری و شعاعی، به‌عنوان پارامترهای اصلی فرآیند فرزکاری سخت در سه سطح در نظر گرفته شدند و با استفاده از روش طراحی آزمایش رویه پاسخ، اثر این پارامترها روی میکروسختی سطح و ضخامت لایه سفید بررسی گردید. تحلیل واریانس نشان داد که مدل درجه 2 برای تخمین میکروسختی سطح به‌خوبی می‌تواند نتایج تجربی را تخمین بزند درحالی‌که مدل خطی تغییرات ضخامت لایه سفید را بهتر برآورد می‌کند. تحلیل آماری نیز مشخص نمود که تمامی پارامترهای برش اثر افزایش‌دهی روی اندازه میکروسختی و ضخامت لایه سفید داشتند. نرخ پیشروی با 73.1% سرعت برشی با 14.4% سهم تأثیر بالاتری را روی میکروسختی به خود اختصاص دادند. ضخامت لایه سفید نیز با تغییر شرایط برش بین 7.6 تا 16.1 میکرومتر تغییر می‌کرد و سرعت برشی با سهم 81.3% و نرخ پیشروی با سهم 9.4%، مؤثرترین پارامترهای روی ضخامت آن لایه بودند.

## Investigation of Microhardness and White Layer in Milling of Hardened Steel Using Response Surface Methodology

Hamed Hassanpour, Mohammad Hossein Sadeghi\*, Amir Rasti

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

\*P.O. B. 14115-143, Tehran, Iran, sadeghim@modares.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 03 October 2015  
Accepted 31 October 2015  
Available Online 21 November 2015

Keywords:  
Hard Steel  
Microhardness  
White Layer  
Response Surface

### ABSTRACT

Hard steels are widely used in automotive industry, molding and production of well drilling bits because of their high wear resistance and strength. Tendency toward hard machine of these steels is growing with the purpose being to achieve high dimensional and geometrical accuracy, increased productivity and improved workpiece properties. In this research, relation between cutting parameters and final surface integrity in hard milling process of a workpiece made out of 4340 steel while using minimum quantity lubrication system is studied. Different parameters were considered in three levels as main milling parameters including: cutting speed, feed rate, axial and radial depth of cut, consequently the effect of these parameters on surface microhardness and white layer thickness were studied using Response Surface Methodology (RSM). The analysis of variance (ANOVA) showed that a model of quadratic polynomial function would work perfectly to estimate microhardness and it can also estimate experimental results while a linear model can evaluate white layer thickness changes, better. Also, Statistical analysis revealed that all cutting parameters increase microhardness and white layer thickness. Feed rate with 73.1% and cutting speed with 14.4% had more effect on microhardness comparatively. White layer thickness also varied between 7.6  $\mu\text{m}$  and 16.1  $\mu\text{m}$  while different cutting conditions were applied and cutting speed with 81.3% and feed rate with 9.4% had the most effects on white layer thickness.

### 1- مقدمه

سنتی این آلیاژها، ابتدا بایستی قطعه‌کار آنبیل یا نرماله شود. در مرحله بعدی فرایند خشن‌کاری روی قطعه صورت می‌گیرد. پس از آن که شکل کلی قطعه ایجاد شد، برای رساندن سختی قطعه به مقدار موردنظر، عملیات حرارتی

فولادهای سخت به‌طور گسترده در صنایع سنگین، قالب‌سازی و همچنین مجموعه‌های انتقال قدرت مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای ماشین‌کاری

Please cite this article using:

H. Hassanpour, M. H. Sadeghi, A. Rasti, Investigation of Microhardness and White Layer in Milling of Hardened Steel Using Response Surface Methodology, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 12, pp. 175-182, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

H. Hassanpour, M. H. Sadeghi, A. Rasti, Investigation of Microhardness and White Layer in Milling of Hardened Steel Using Response Surface Methodology, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 12, pp. 175-182, 2015 (In Persian)

یکی دیگر از مسائل مهم در فرآیند ماشین کاری فولادهای سخت، حرارت بالای تولیدشده در ناحیه برش است. این حرارت موضعی بالا باعث انحراف ابعادی و خرابی پیش از موعد ابزار شده و به علت بروز تنش‌های پسماند کششی، میکروتکرک‌های سطحی و زیرسطحی، اکسید شدن سریع، سلامت سطح قطعه را تحت‌الشعاع خود قرار می‌دهد [9]. در نتیجه، انتخاب صحیح سیال برشی علاوه بر افزایش دقت و کیفیت سطح، نقش مهمی را نیز در کاهش اصطکاک، خنک‌کاری و جلوگیری از ایجاد گرمای بیش از حد در محیط ماشین کاری ایفا می‌کند [10]. تأثیر روان‌کاری در عملیات ماشین کاری به شدت وابسته به انتخاب نوع سیال روان کار و سیستم پاشش آن بر ناحیه برش است. با این وجود، استفاده از سیال برشی در عملیات ماشین کاری به علت مسائل اقتصادی و زیست‌محیطی دردسرساز است. بهترین راه برای کاهش اثرات منفی سیال برشی، حذف کامل آن است که در نهایت، منجر به ماشین کاری خشک<sup>5</sup> می‌شود. قطعات سخت، قابلیت ماشین کاری در حالت خشک را دارا می‌باشند [11]، اما به کارگیری چنین روشی در صنعت با بعضی محدودیت‌ها مواجه است که از آن جمله می‌توان به سایش شدید ابزار برشی و کیفیت سطح پایین قطعه تولیدی اشاره کرد [12]. روان کاری با استفاده از حداقل سیال برشی (MQL<sup>6</sup>) به عنوان فرآیندی سازگار با محیط زیست، روشی است که در آن مقدار کمی از سیال در داخل جت هوایی، اتمیزه شده و به محل برش پاشیده می‌شود. استفاده از این روش علاوه بر کاهش مصرف سیال برشی، محدودیت‌های روش ماشین کاری خشک (حرارت موضعی بالا و اصطکاک زیاد) را حذف می‌کند. در ادامه برخی از مطالعات انجام شده در زمینه سلامت سطح در ماشین کاری فولاد سخت آورده شده است.

سواج و گو [13] سلامت سطح را در تراش کاری فولاد AISI 52100 با سختی 60 راکول سی بررسی و مشاهده کردند که استفاده از ابزار نو و نرخ پیشروی پایین می‌تواند ضخامت لایه سفید تشکیل شده را کاهش دهد. علاوه بر این، سختی لایه سفید حدود 30% بالاتر از سختی ماده قطعه کار بود.

چن و همکاران [14] فرایند سنگ‌زنی و فرزکاری سخت را روی فولاد قالب SKD11 مقایسه نموده و مشاهده کردند که در فرایند فرزکاری سخت، به واسطه دمای پایین‌تر، تغییرات سختی و متالورژیکی کمتری روی سطح به وجود می‌آید. همچنین تنش‌های پسماند فشاری در سطح قطعه به وجود آمد و ضخامت لایه تحت تأثیر حرارت بسیار کمتر از فرایند سنگ‌زنی بود.

لیو و همکاران، [15] به بررسی مشخصه‌های سلامت سطح فولاد یاتاقانی 15GCR با سختی حدود 60 راکول سی پرداختند. نتایج نشان داد که عمق لایه سخت‌شده سطحی ایجادشده در اثر ماشین کاری، با افزایش سختی قطعه کار افزایش یافته و مقدار زبری سطح نیز در سختی بحرانی 50 راکول سی دارای بیشترین مقدار خواهد بود.

بارباکی و همکاران [16] حداکثر ضخامت لایه سفید و سیاه را در فرزکاری فولاد سخت براساس تابعی از سرعت برشی، عمق برش و سایش ابزار تقریب زدند. بررسی سختی در راستای ضخامت قطعه نشان داد که لایه سفید به طور متوسط 100 ویکرز سخت‌تر از ماده پایه بود. همچنین نشان داده شد که در تراش کاری سخت، خنک کاری در ضخامت لایه سفید تأثیری نداشته اما باعث باریک شدن لایه سیاه<sup>7</sup> می‌گردد.

هاردنینگ روی آن انجام می‌گیرد و در پایان برای پرداخت نهایی از روش سنگ‌زنی استفاده می‌شود [1].

حال باید به این نکته دقت کرد که اگر بتوان با استفاده از فرایندی، بدون نیاز مبرم به روان کار و باز و بستن قطعه کار از ماشینی به ماشین دیگر، فولادهای سخت را یکپارچه (با یک ابزار و روی یک ماشین) ماشین کاری کرد، چه مزایایی حاصل خواهد شد. معرفی این فرایند کارا، در اواسط دهه 1980 با ایده تراش کاری سخت آغاز و امروزه بسیاری از فرایندهای ماشین کاری، خصوصاً فرزکاری سخت را نیز شامل می‌شود [2]. گرایش صنعت خودروسازی به منظور بهبود فرایند تولید قطعات انتقال قدرت، استفاده از ماشین کاری سخت است. یاتاقان‌های چرخ‌دنده از دیگر موارد کاربرد این روش ماشین کاری به جای سنگ‌زنی می‌باشد. علت اصلی ظهور و گسترش چنین فرایندهایی، پیشرفت‌های صورت گرفته در صنعت ساخت ماشین ابزارهای صلب، ابزارهای با سختی و چقرمگی بسیار بالا و ابزارگیرهای خاص است [3].

به منظور جایگزینی ماشین کاری سخت با فرایند سنگ‌زنی، نیاز است تا پارامترهای اصلی فرایند برش به صورت صحیح انتخاب شوند. پارامترهای فرایند در ماشین کاری سخت دارای رنج قابل قبول محدودی نسبت به ماشین کاری سنتی می‌باشند و انتخاب نادرست این پارامترها منجر به کاهش عمر ابزار و افت کیفیت سطح قطعه می‌گردد. بنابراین با توجه به این که سطح قطعات بیشترین تنش را در حین کارکرد قطعه تحمل نموده و تحت تأثیر عوامل محیطی متعددی قرار دارد، مطالعه تأثیر پارامترهای برشی بر کیفیت سطح قطعات تولید شده به روش ماشین کاری سخت بسیار حائز اهمیت است. سلامت سطح<sup>1</sup> به مطالعه خصوصیات و ماهیت لایه سطح ماشین کاری شده و تأثیر آن بر خواص مکانیکی و عملکردی قطعه کار می‌پردازد [4]. از مهم‌ترین شاخصه‌های سلامت سطح، می‌توان به میکروسختی سطح و ضخامت لایه سفید اشاره کرد [5].

زمانی که درجه حرارت قطعه در طول عملیات ماشین کاری سخت از دمای آستنیت فراتر رود (به علت اصطکاک، لبه انباشته<sup>2</sup> و کرنش پلاستیک)، فاز آستنیت تغییر کرده و ضمن کوئنچ شدن، لایه تغییر یافته شکننده‌ای بانام لایه سفید روی سطح به وجود می‌آید. در واقع، حجم بالای آستنیت موجود در این ناحیه، پس از ماشین کاری، ساختاری با مارتنزیت تمپر نشده تولید کرده و سختی سطح بالایی را در طول عملیات ماشین کاری به وجود می‌آورد [6]. لایه سفید با ضخامتی بین 2 تا 20 میکرومتر روی سطح قطعه ماشین کاری شده تشکیل می‌شود. مشاهدات و بررسی‌های انجام شده روی میکروساختار لایه سفید نشان می‌دهد که این لایه، ساختار نانوکریستالی با اندازه دانه‌ای بین 30 تا 500 نانومتر دارد. ظاهر بدون شکل و سفیدرنگ این لایه بعد از اچ کردن<sup>3</sup>، نتیجه مقاومت در برابر محلول اچ نیست و در اثر بازتاب مناسب نور برخوردی به سطح توسط ساختار ریزدانه آن به وجود می‌آید [7]. لایه سفید دارای تنش پسماند و تردی بالا بوده و در نتیجه می‌تواند اثر مخربی بر عملکرد قطعه داشته و روی خواص تریبولوژیکی<sup>4</sup>، مقاومت به خوردگی و عمر خستگی قطعه اثر منفی بگذارد [8]. لذا سختی و ضخامت لایه سفید جزو اصلی‌ترین معیارهای بررسی سلامت سطح قطعه کار محسوب می‌شوند.

1- Surface integrity  
2- Built-up edge  
3- Etching  
4- Tribological

5- Dry machining  
6- Minimum Quantity Lubrication  
7- Dark layer

شد. در هر آزمایش، مقدار میانگین سختی اندازه‌گیری شده در 3 ناحیه مختلف از سطح به‌عنوان معیار میکروسختی مدنظر قرار گرفت. اندازه‌گیری تحت نیروی 0.5 کیلوگرمی و در مدت زمان 4 ثانیه انجام گردید.

برای اندازه‌گیری ضخامت لایه سفید نیز، ابتدا نمونه‌ها با استفاده از فرایند وایرکات برش خورده و مقطع عرضی آن‌ها پس از پولیش‌زنی، در محلول اسید نایتال<sup>5</sup> 2% (ترکیب 2% اسید نیتریک با اتانول) به مدت 10 ثانیه اچ گردید. سپس با استفاده از میکروسکوپ نوری الیمپوس<sup>6</sup> مدل DP25 با حداکثر بزرگ‌نمایی 1000 برابر و نرم‌افزار تحلیل تصویر، ضخامت لایه سفید بدست آمد.

### 3- روش انجام آزمایش

به‌منظور بررسی تأثیر شرایط فرزکاری سخت فولاد 4340 روی مشخصه‌های میکروسختی سطح و ضخامت لایه سفید، چهار پارامتر سرعت برشی ( $V_c$ )، نرخ پیشروی ( $f_z$ )، عمق برش محوری ( $a_p$ ) و عمق برش شعاعی ( $a_e$ ) به‌عنوان اصلی‌ترین پارامترهای فرزکاری، در 3 سطح تغییر داده شدند. در این تحقیق، روش رویه پاسخ برای طرح‌ریزی آزمایش‌ها به‌کار گرفته شد. در این روش با توجه به تعداد عوامل و سطوح، از تعداد آزمایش‌های ثابتی استفاده می‌شود. در حالت فاکتوریل کامل (حالت عمومی)، باوجود 4 عامل که در 3 سطح تغییر می‌کنند، تعداد حالت‌های آزمایش کل برابر با  $3^4=81$  خواهند بود. با استفاده از روش سطوح پاسخ، تنها 30 حالت از 81 حالت ممکن در نظر گرفته می‌شود. در این 30 آزمایش، به‌غیر از آزمایش مربوط به نقطه مرکزی

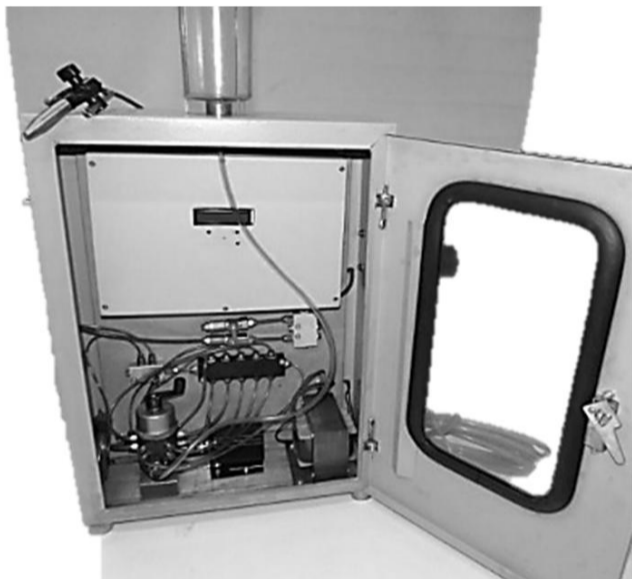


Fig. 1 MQL system used for performing experiments

شکل 1 دستگاه MQL استفاده شده جهت انجام آزمایش‌ها

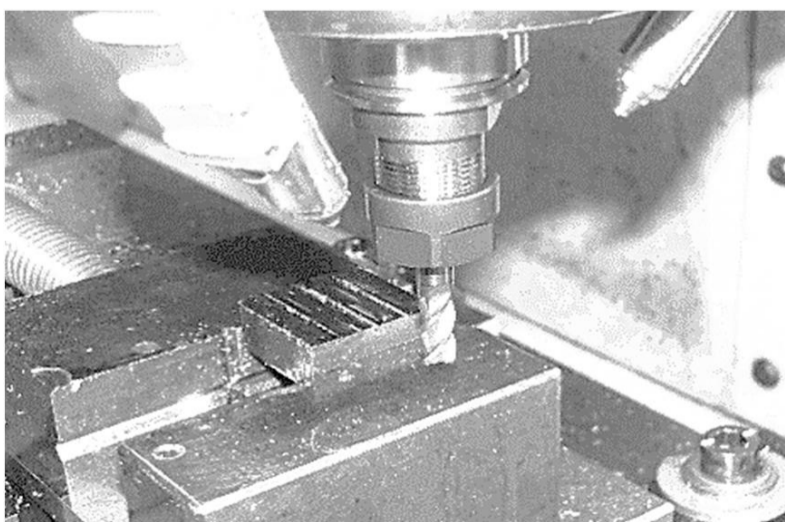


Fig. 2 Experiments setup and nozzles position in milling

شکل 2 چیدمان انجام آزمایش و نحوه قرارگیری نازل‌ها در فرزکاری

مارکز و همکاران [17] تحلیل فازی و توزیع میکروسختی سطح فولاد AISI H13 را پس از فرزکاری بررسی کرده و هیچ‌گونه تغییر فازی در سطح نمونه‌ها مشاهده نکردند. تنها یک لایه تغییرشکل‌یافته نازک روی سطح فرزکاری شده شکل گرفت.

بررسی پژوهش‌های صورت گرفته، نشان می‌دهد که تحقیقات بسیار کمی در زمینه مطالعه اثر پارامترهای برش روی مشخصه‌های اصلی سلامت سطح شامل میکروسختی سطح و ضخامت لایه سفید در فرزکاری سخت فولاد 4340 با استفاده از روش MQL صورت گرفته است. لذا در این پژوهش، سلامت سطح در فرآیند فرزکاری سخت این فولاد با کمک روش طراحی آزمایش رویه پاسخ<sup>1</sup> و تحلیل آماری بررسی شد و تأثیر پارامترهای مختلف فرزکاری روی میکروسختی و ضخامت لایه سفید مطالعه گردید. لازم به ذکر است که برخلاف اغلب کارهای انجام شده در زمینه به‌کارگیری روش MQL، که از یک نازل پاشش بهره برده بودند [18]، در این پژوهش از دو نازل پاشش استفاده شد.

### 2- مواد و تجهیزات مورد استفاده

جنس ماده قطعه‌کار در این تحقیق، فولاد 4340 با سختی  $450 \pm 5$  ویکرز بود. به‌منظور افزایش سختی، نمونه‌ها در کوره با دمای 870 درجه سانتی‌گراد آستنیته گشته، سپس به مدت 2 ساعت در دمای 425 درجه سانتی‌گراد برگشت داده شدند و در نهایت در حمام روغن به دمای محیط رسیدند. آزمایش‌های طرح‌ریزی شده روی نمونه‌هایی مکعبی شکل به ابعاد  $20 \times 40 \times 40$  میلی‌متر انجام شد. برای انجام آزمایش‌ها، از ماشین فرز کنترل عددی چهار محوره کنترل همزمان مایکرون<sup>2</sup> مدل HSM700 با حداکثر نرخ پیشروی میز 20000 میلی‌متر بر دقیقه و دوران اسپیندل 42000 دور بر دقیقه استفاده گردید. همچنین از تیغچه فرز سرتخت تنگستن‌کارباید 4 لبه، با پوشش TiAlN و قطر 12 میلی‌متر، محصول شرکت هم‌تولز<sup>2</sup> بهره گرفته شد. به‌منظور اطمینان از صحت نتایج و حذف اثر ساییدگی احتمالی ابزار، به‌طور میانگین بعد از هر 4 آزمایش، ابزارها تعویض می‌شدند.

به‌منظور اعمال جریان روان‌کار MQL، از سیستم نشان داده شده در شکل 1 استفاده گردید. در این سیستم از یک کمپرسور جهت تولید هوای فشرده استفاده می‌شود که فشار آن توسط رگلاتور دستگاه و دی‌سنج گاز قابل تنظیم است. از طرف دیگر روغن موجود در محفظه بالای دستگاه، توسط یک لوله پلاستیکی با قطر کم و به کمک یک پمپ به نازل هدایت می‌شود و میزان دی‌سنج روغن با تغییر فرکانس پمپ قابل تنظیم می‌باشد.

دستگاه دارای نازل اتمیزه‌کننده‌ای است که جریان هوا و روغن به‌طور جداگانه وارد آن می‌شود. سرعت جریان گاز نسبت به جریان روغن بسیار بیشتر بوده که همین پدیده باعث شکستن روغن و تبدیل آن به قطرات ریز در خروجی نازل می‌گردد. قطرات روغن در جریان گاز حامل، تشکیل اسپری روغن - هوا داده که از آن برای روان‌کاری ناحیه ماشین‌کاری استفاده می‌شود. در آزمایش‌ها روش MQL با استفاده از روغن معدنی، دی 240 میلی‌لیتر بر ساعت و فشار 6 بار انجام شد. به‌منظور عملکرد بهتر سیستم روان‌کاری، مطابق شکل 2 از دو نازل پاشش با زاویه  $30^\circ$  نسبت به ابزار بهره گرفته شد. در این تحقیق اندازه‌گیری میکروسختی سطح با استفاده از دستگاه سختی‌سنج ساخت شرکت باریس<sup>3</sup> مدل وی-تست<sup>4</sup> با دقت 1 ویکرز انجام

1- Response Surface Methodology (RSM)

2- Mikron

3- Bareiss

4- V-test

5- Nital  
6- Olympus

به منظور تحلیل دقیق تر نتایج و بررسی معنی داری پارامترها، از تحلیل واریانس و مدل سازی رگرسیونی خطی چندگانه درجه 2 استفاده گردید. مدل های ارائه شده، برازشی از داده های آزمایش ها بوده و نحوه اثر متغیرهای ورودی بر روی متغیرهای پاسخ را توصیف می کنند. در حالت کلی مدل درجه دوم را می توان به صورت معادله (1) در نظر گرفت:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 A + \beta_2 B + \beta_3 AB + \beta_4 A^2 + \beta_5 B^2 \quad (1)$$

که در آن  $Y$  متغیر پاسخ (میکروسختی و ضخامت لایه سفید) و ثوابت  $\beta_0$ ، ضرایب جزئی رگرسیون یا به اختصار ضرایب رگرسیون هستند.  $\beta_1$  و  $\beta_2$  نشان دهنده اثرات خطی  $A$  و  $B$ ،  $\beta_3$  نشان دهنده اثر خطی متقابل  $A$  و  $B$  و  $\beta_4$  و  $\beta_5$  نشان دهنده اثرات درجه دوم  $A$  و  $B$  بر روی متغیر پاسخ می باشد. این ضرایب بر اساس روش حداقل مربعات محاسبه شدند.

در این تحقیق ابتدا یک مدل درجه دو، شامل تمامی متغیرهای اصلی، تداخل دوتایی و توان دوم متغیرها بسط داده شد و سپس، فاکتورهای دارای اثر بی معنی حذف و به عنوان خطا فرض شدند. برای انجام تحلیل های آماری از نرم افزار مینی تب<sup>1</sup> بهره گرفته شد. در ادامه، هر کدام از خروجی ها به صورت جداگانه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته اند.

#### 4-1- میکروسختی سطح

بررسی مقادیر میکروسختی سطح به دست آمده نشان می دهد که فارغ از شرایط برشی، در تمامی آزمایش ها سختی سطح فرزندکاری شده بالاتر از سختی اولیه ماده است. همچنین مقادیر میکروسختی با تغییر شرایط برش بین 470 تا 607 ویکرز تغییر می کند که نشان از معنی دار بودن تأثیر شرایط برش بر میکروسختی سطح دارد.

جدول 3 تحلیل واریانس مدل توسعه یافته برای تخمین میکروسختی را نشان می دهد. مقدار  $R_{adj}$  برای این مدل 94.5% به دست آمد. نتایج حاکی از معنی داری تأثیر پارامترهای اصلی به جز عمق برشی شعاعی، تداخل نرخ پیشروی و سرعت برشی و توان دوم فاکتورهای عمق برشی محوری و نرخ پیشروی بود. مقدار  $P$  برای فاکتور عدم انطباق نیز، معنی دار نبودن این فاکتور را اثبات کرد. بر اساس تحلیل آماری، نرخ پیشروی با 73.1%، سرعت برشی با 14.4% و عمق برش محوری تنها با 5.1% دارای بیشترین تأثیر روی میکروسختی بودند. در شکل 3 نمودار تأثیر پارامترهای برش بر میکروسختی سطح نشان داده شده است. مشاهده می شود که تمامی پارامترهای برشی مورد بررسی اثر افزایشی روی اندازه میکروسختی دارند.

جدول 3 تحلیل واریانس مدل میکروسختی سطح فرزندکاری شده

Table 3 Analysis of variance for milled surface microhardness model

عامل	مجموع مربعات	درجه آزادی	مقدار $F$	مقدار $P$	سهم تأثیر (%)
$a_p$	2233.4	1	14.73	0.0001	5.14
$v_c$	6272	1	74.92	0	14.44
$f_z$	31768	1	391.42	0	73.13
$a_p^2$	872/8	1	9.89	0.04	1.91
$a_p \times f_z$	333.1	1	3.98	0.058	0.77
باقیمانده	2009.2	24			4.62
عدم انطباق	1866.3	19	3.44	0.088	
خطا	142.8	5			
کل	43443.4	29			100

(با 6 بار تکرار) هیچ آزمایش دیگری تکرار نمی شود. روش سطوح پاسخ یکی از پرکاربردترین روش های طرح ریزی آزمایش است که با استفاده از آن، بهتر و واضح تر می توان تغییرات خروجی را بر حسب ورودی های فرایند نشان داد [20,19]. پارامترهای فرزندکاری، تعداد سطوح و مقادیر آن ها در جدول 1 آمده است. بر این اساس، تعداد 30 آزمایش انجام گرفت. آزمایش ها به منظور جلوگیری از بروز خطا، به صورت تصادفی انجام شدند. استراتژی ماشین کاری، فرزندکاری موافق بود و در هر آزمایش، 120 میلی متر از طول قطعه ماشین کاری گردید.

#### 4- نتایج و بحث

همان طور که اشاره شد، در مجموع 30 آزمایش انجام گرفت و پس از انجام هر آزمایش، مقادیر میکروسختی سطح ( $H$ ) و ضخامت لایه سفید ( $WLT$ ) ناحیه ماشین کاری شده اندازه گیری شدند. جدول 2 مقادیر پارامترهای برشی در هر آزمایش به همراه تمامی مقادیر اندازه گیری شده پارامترهای خروجی، در حضور روان کاری با روش MQL را نشان می دهد.

جدول 1 پارامترهای اصلی آزمایش های فرزندکاری به همراه سطوح تغییرات

Table 1 Milling experiments and their variation levels

فاکتورها	سطوح		
	سطح 1	سطح 2	سطح 3
عمق برش محوری ( $a_p$ ) (mm)	0.5	1	1.5
عمق برش شعاعی ( $a_e$ ) (mm)	1	2	3
نرخ پیشروی ( $f_z$ ) (mm/tooth)	0.02	0.04	0.06
سرعت برشی ( $v_c$ ) (m/min)	50	100	150

جدول 2 آرایه طراحی آزمایش رویه پاسخ به همراه نتایج

Table 2 Response surface design array and results

شماره آزمایش	$a_p$	$a_e$	$v_c$	$f_z$	$H$ (Hv)	$WLT$ ( $\mu\text{m}$ )
1	1.5	1	50	0.02	479	9.4
2	1	2	100	0.04	519	13
3	1	3	100	0.04	522	13.5
4	0.5	3	50	0.02	472	7.6
5	1.5	1	150	0.06	602	1.55
6	0.5	3	150	0.02	498	14.4
7	0.5	1	150	0.02	510	12.7
8	1.5	3	50	0.06	574	1.50
9	1	2	100	0.04	531	12.9
10	0.5	1	50	0.02	470	8.7
11	1.5	3	150	0.06	607	15.6
12	1.5	3	50	0.02	478	8.1
13	1	2	100	0.04	524	11.9
14	0.5	3	150	0.06	596	16.1
15	0.5	1	150	0.06	589	1.55
16	0.5	1	50	0.06	534	8.8
17	0.5	3	50	0.06	541	9.6
18	1.5	1	50	0.06	568	1.50
19	1.5	3	150	0.02	509	13.3
20	1.5	1	150	0.02	502	13.1
21	0.5	2	100	0.04	513	11.8
22	1.5	2	100	0.04	553	1.52
23	1	2	150	0.04	537	1.54
24	1	3	100	0.04	522	13.1
25	1	2	100	0.04	533	11.6
26	1	2	100	0.02	492	11.1
27	1	2	50	0.04	498	8.2
28	1	2	100	0.04	526	12.2
29	1	2	100	0.06	567	13.1
30	1	1	100	0.04	497	10.8

محیطی مانند واکنش نیتريده شدن و يا اکسيد شدن سطح ماشين کاری شده را شامل می شود [21]. در مجموع، میزان اثرگذاري این مکانیزمها و برهم کنش آنها بر یکدیگر، سختی سطح نهایی را تعیین می کنند.

مطابق شکل 3 (الف) و (ب)، عمق برش محوری و شعاعی کمتر از دو پارامتر دیگر باعث افزایش سختی سطح می شوند. این افزایش ناچیز به علت بیشتر شدن سطح تماس بین ابزار و قطعه کار بوده که به دنبال آن، کارسختی ناشی از تغییر شکل پلاستیک افزایش یافته و سختی بیشتر می شود. افزایش سرعت برشی نیز، سطح ماشين کاری شده را سخت تر می کند (شکل 3 ج). این پدیده ناشی از بیشتر شدن درجه حرارت در موضع برش بوده که باعث تغییر فاز ماده شده و به دنبال آن، با سریع سرد شدن سطح، سختی افزایش می یابد [22]. همچنین با افزایش نرخ پیشروی، سختی سطح بیشترین افزایش را دارد و با تغییر نرخ پیشروی از 0.02 میلی متر بر دندانه تا 0.06 میلی متر بر دندانه، سختی سطح ماشين کاری از 490 ویکرز تا 575 ویکرز (21%) بالا می رود (شکل 3 د). در واقع، ماده نرخ کرنش بالاتری را در نرخ پیشروی های بالا تجربه می کند و در اثر افزایش نیروهای ماشين کاری و کارسختی ناشی از آن، سختی سطح بالاتر می رود [23].

تداخل نرخ پیشروی با عمق برش محوری هم دارای اثر معناداری بود که رویه پاسخ آن با فرض ثابت بودن سرعت برشی و عمق برش شعاعی در سطوح میانی خود (100 متر بر دقیقه و 2 میلی متر) در شکل 4 آورده شده است. این رویه نشان می دهد که در سطح پایین نرخ پیشروی، با افزایش عمق برش محوری، روند تغییرات میکروسختی سطح ابتدا یک افت ناچیز داشته و سپس روند صعودی را در پیش می گیرد. این کاهش سختی را می توان ناشی از حذف اثر شخم زنی دانست. شخم زنی جریان پلاستیک غیریکنواختی در ماده به وجود آورده و سختی سطح را بالا می برد که اثر آن با افزایش عمق برش محوری حذف می گردد.

براساس این مدل توسعه یافته، یک فرمول تجربی برای تخمین میکروسختی سطح براساس معادله (2) بدست آمد. شکل 5 مقایسه نتایج پیش بینی شده توسط مدل گسترش یافته و مقادیر واقعی میکروسختی سطح را در هر آزمایش نشان می دهد.

این نمودار تخمین بسیار خوب مقادیر واقعی میکروسختی توسط مدل توسعه یافته را بیان می کند. در مجموع خطای میانگین این تخمین 1.18% و بیشینه خطای مدل 5% به دست آمد.

$$H = 444.25 - 87.47222a_p + 0.37333v_c + 1677.08333f_z + 456.25a_p \times f_z + 42.88889a_p^2 \quad (2)$$

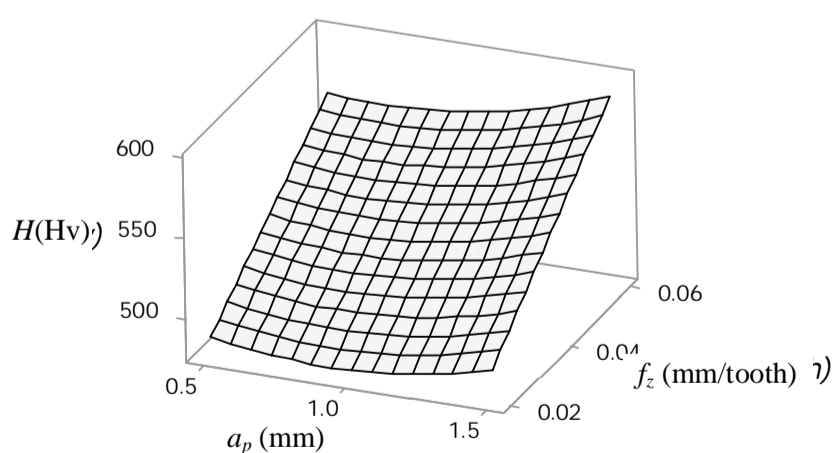


Fig. 4 Response surface for significant interaction of axial depth of cut and feed rate on the surface microhardness

شکل 4 رویه پاسخ تداخل معنی دار عمق برش محوری و نرخ پیشروی روی میکروسختی سطح

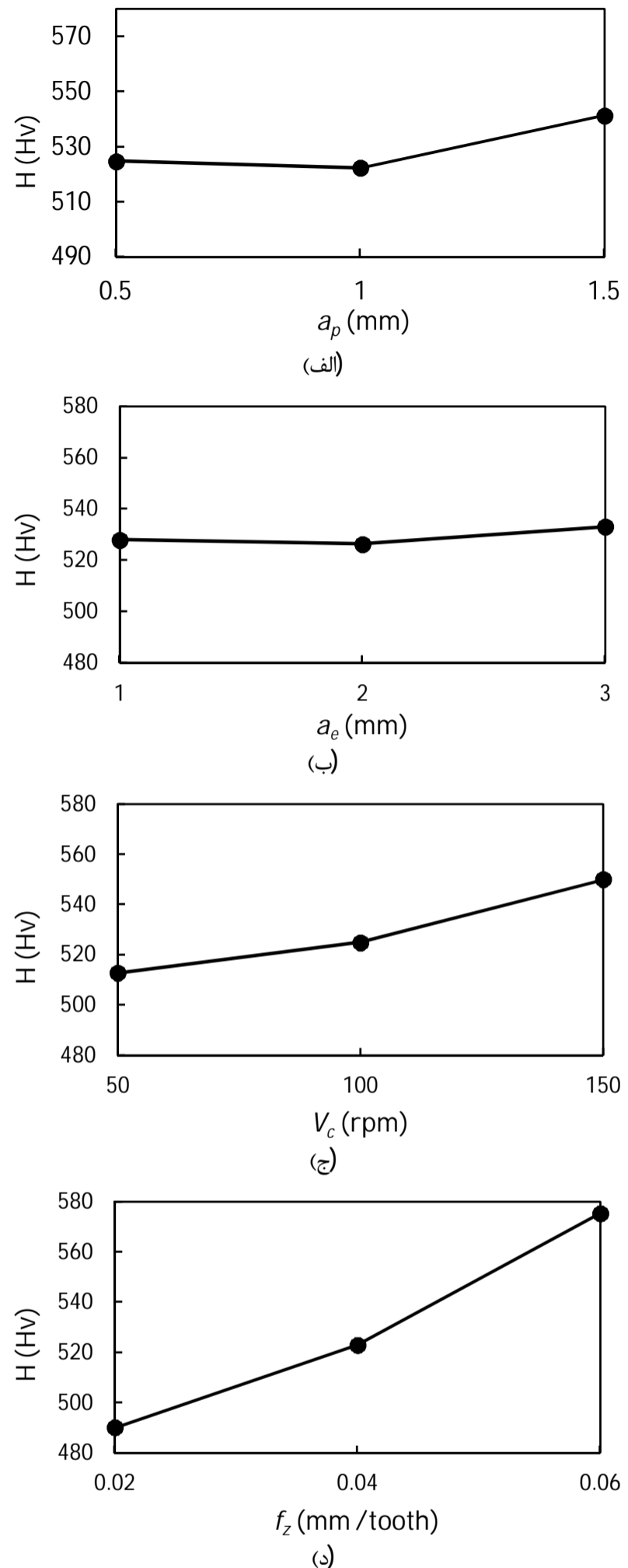


Fig. 3 Milled surface microhardness variations versus cutting parameters a) axial depth of cut b) radial depth of cut c) cutting speed d) feed rate

شکل 3 تغییرات میکروسختی سطح فرزکاری شده با پارامترهای برش (الف) عمق برش محوری (ب) عمق برش شعاعی (ج) سرعت برشی (د) نرخ پیشروی

تغییرات سختی سطح قطعه فرزکاری شده، توسط سه مکانیزم اصلی قابل توجیه است. در مکانیزم اول گرادیان دمایی شدید ناحیه برش، باعث تغییر فاز ماده شده و با سرد شدن سریع سطح، افزایش سختی را نتیجه می دهد. مکانیزم دوم، تغییر شکل و اندازه دانه به علت تغییر شکل پلاستیک شدید در اثر کار مکانیکی و بروز پدیده کارسختی است. مکانیزم سوم نیز، اثرات

جدول 4 تحلیل واریانس مدل ضخامت لایه سفید

Table 4 Analysis of variance for white layer thickness model

عامل	مجموع مربعات	درجه آزادی	مقدار F	مقدار P	سهم تأثیر (%)
$v_c$	135.027	1	237.55	0.0001	81.31
$f_z$	15.68	1	27.59	0.0001	9.44
باقیمانده	15.347	27			9.24
عدم انطباق	12.679	22	1.08	0.517	
خطا	0.534	5			
کل	166.054	29			100

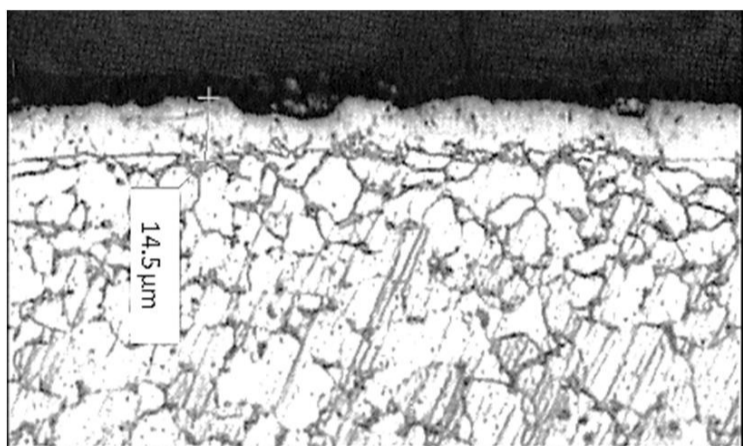


Fig. 6 Image of formed white layer and measuring method in experiment No. 23

شکل 6 تصویر لایه سفید تشکیل شده و نحوه اندازه گیری در آزمایش شماره 23

براساس مدل توسعه یافته، فرمول تجربی برای تخمین ضخامت لایه سفید به صورت معادله (3) بدست آمد. شکل 8 مقایسه نتایج پیش بینی شده توسط مدل گسترش یافته و مقادیر واقعی ضخامت لایه سفید را در هر آزمایش نشان می دهد. این نمودار حکایت از تخمین بسیار خوب مقادیر واقعی ضخامت لایه سفید توسط مدل توسعه یافته دارد. مجموع خطای میانگین این تخمین 5.2% و بیشینه خطای آن نیز 15.69% بدست آمد.

$$WLT = 4.64222 + 0.054778v_c + 46.66667f_z \quad (3)$$

### 5- نتیجه گیری و جمع بندی

در این پژوهش فرزندکاری سخت فولاد 4340 در حضور روش MQL مورد بررسی قرار گرفت و با استفاده از تکنیک طراحی آزمایش رویه پاسخ، اثر پارامترهای فرآیند روی میکروسختی و ضخامت لایه سفید تعیین گردید. نتایج به دست آمده از این پژوهش به صورت خلاصه در ادامه آمده است:

1. با استفاده از روش طراحی آزمایش رویه پاسخ و تحلیل رگرسیون، مدلی درجه 2 برای تخمین میکروسختی سطح و مدلی خطی برای تخمین ضخامت لایه سفید توسعه داده شدند.
2. تمامی پارامترهای فرزندکاری اثر افزایش یافته روی اندازه میکروسختی داشتند. همچنین نرخ پیشروی با 73.1%، سرعت برشی با 14.4% و عمق برش محوری تنها با 5.1% روی میکروسختی مؤثر بودند.
3. ضخامت لایه سفید تشکیل شده در فرزندکاری با تغییر شرایط برش بین 7.6 تا 16.1 میکرومتر تغییر می کرد. سرعت برشی با 81.3% و نرخ پیشروی با 9.4% تنها پارامترهای مؤثر روی ضخامت لایه سفید بودند.
4. در بین پارامترهای برشی مورد بررسی، عمق برشی شعاعی کمترین اثر را روی سختی سطحی و ضخامت لایه سفید داشت.

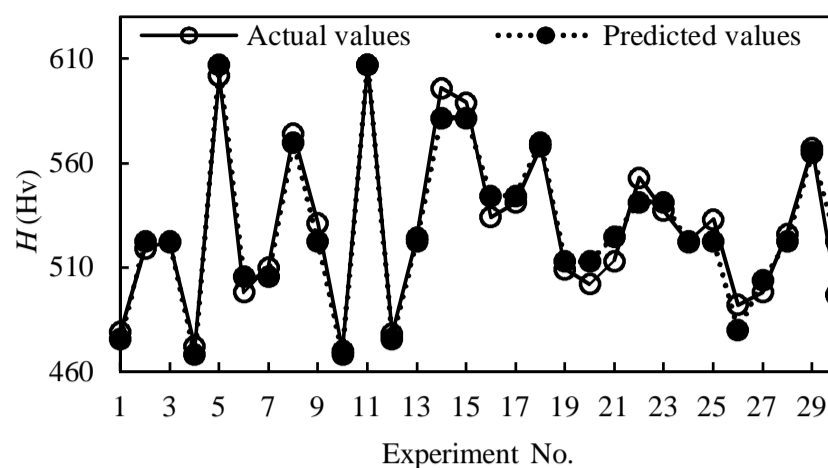


Fig. 5 Comparison of predicted and empirical results for microhardness in each experiments

شکل 5 مقایسه مقادیر تجربی و پیش بینی شده میکروسختی سطح در هر آزمایش

### 4-2- ضخامت لایه سفید

نتایج بدست آمده بیانگر شکل گیری لایه سفید فارغ از شرایط برشی، در تمامی آزمایش های فرزندکاری است. همچنین ضخامت این لایه با تغییر شرایط برش بین 7.6 تا 16.1 میکرومتر تغییر می کند. جدول 4 تحلیل واریانس مدل توسعه یافته برای تخمین ضخامت لایه سفید را نشان می دهد. نتایج حکایت از معنی دار بودن تأثیر تنها دو پارامتر سرعت برشی و نرخ پیشروی دارد. مقدار  $R_{adj}$  به بزرگی 90.5% برای مدل نهایی بدست آمد. همچنین مقدار P برای فاکتور عدم انطباق، معنی دار نبودن این فاکتور را اثبات کرد. تحلیل آماری نشان داد که سرعت برشی با 81.3% و نرخ پیشروی با 9.4% به ترتیب بیشترین تأثیر را روی ضخامت لایه سفید دارا هستند.

دلیل شکل گیری لایه سفید ترکیبی از دو مکانیزم اصلی است؛ اولی تغییر شکل پلاستیکی سریع که موجب ریزدانه شدن ساختار شده و دومی تغییر فازهای متالورژیکی به خاطر گرادیان دمایی شدید قطعه کار [25,24]. فرایند برشی که دمای بالا و فشار زیادی هنگام برش روی سطح ایجاد کند، می تواند موجب بروز هر دو مکانیزم گردیده و لایه سفید ضخیمی را به وجود آورد. شکل 6 نمونه ای از لایه سفید تشکیل شده و نحوه اندازه گیری ضخامت آن را برای آزمایش شماره 23 نشان می دهد. مطابق شکل، ضخامت لایه سفید با استفاده از نرم افزار تحلیل تصویر در پنج نقطه اندازه گیری شد و میانگین اعداد به دست آمده، به عنوان ضخامت این لایه گزارش گردید.

نمودار تأثیر پارامترهای برش بر ضخامت لایه سفید در شکل 7 آمده است. مشاهده می شود که عمق برش محوری و شعاعی تأثیر چندانی بر ضخامت لایه سفید ندارند (شکل 7 الف) و (ب)). این در حالی است که با افزایش سرعت برشی و نرخ پیشروی، ضخامت این لایه به شدت افزایش می یابد (شکل 7 ج) و (د)). در واقع لایه سفید، لایه ای از ماده است که از دمای آستنیت شده فراتر رفته و سپس در هوا کوئنچ می گردد [13]. زمانی که از سرعت های برش و نرخ پیشروی بالاتر استفاده می گردد، دمای ضخامت بیشتری از قطعه از دمای آستنیت شده بالاتر می رود و در نتیجه لایه سفید ضخیم تری تشکیل خواهد شد [26]. افزایش سرعت برشی از 50 متر بر دقیقه تا 150 متر بر دقیقه، ضخامت لایه سفید را تا 5.5 میکرومتر (60%) افزایش می دهد.

علاوه بر این با افزایش نرخ کرنش در پیشروی های بالا، ضخامت بیشتری از ماده تحت تأثیر تغییر شکل و کارسختی ناشی از فرزندکاری قرار می گیرد که خود عاملی کمکی در جهت افزایش ضخامت لایه سفید خواهد شد. همچنین تغییرات نرخ پیشروی از 0.02 میلی متر بر دندانه تا 0.06 میلی متر بر دندانه این لایه را تا 1.9 میکرومتر (17%) ضخیم تر می کند.

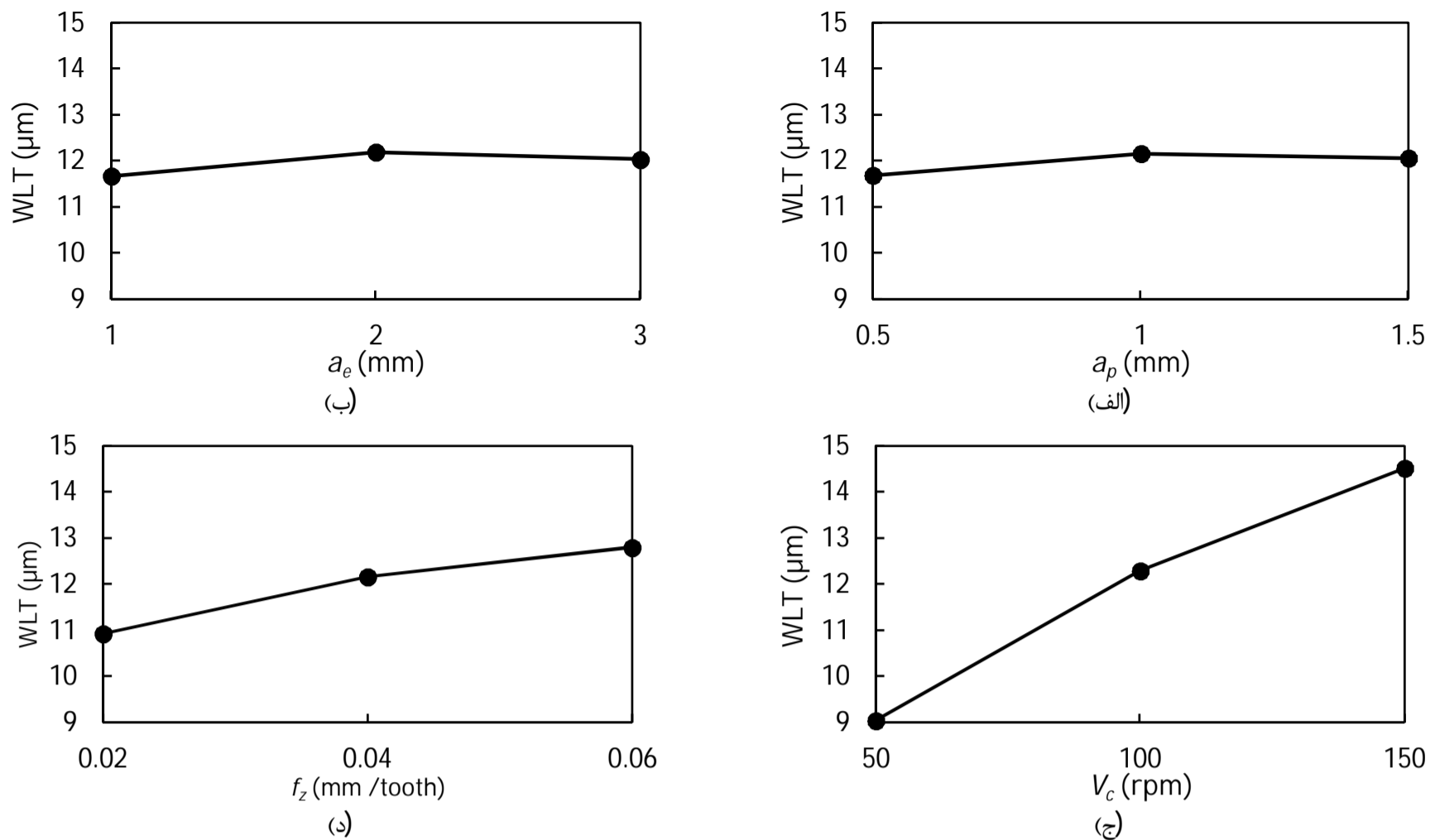


Fig. 7 white layer thickness variations versus cutting parameters a) axial depth of cut b) radial depth of cut c) cutting speed d) feed rate

شکل 7 تغییرات ضخامت لایه سفید با پارامترهای برش (الف) عمق برش محوری (ب) عمق برش شعاعی (ج) سرعت برشی (د) نرخ پیشروی

[9] H. Tonshoff, E. Brinkomeier, Determination of the mechanical and thermal influences on machined surfaces by microhardness and residual stress analysis, *Annals of the CIRP*, Vol. 29, No. 2, pp. 519-530, 1980.

[10] E. Oberg, C. J. McCauley, *Machinery's Handbook & Guide to Machinery's Handbook*: Industrial Press, 2004.

[11] T. G. Dawson, *Machining hardened steel with polycrystalline cubic boron nitride cutting tools*, Thesis, Georgia Institute of Technology, Georgia, 2002.

[12] Y. K. Chou, C. J. Evans, M. M. Barash, Experimental investigation on CBN turning of hardened AISI 52100 steel, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 124, No. 3, pp. 274-283, 2002.

[13] D. W. Schwach, Y. Guo, Feasibility of producing optimal surface integrity by process design in hard turning, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 395, No. 1, pp. 116-123, 2005.

[14] M. Chen, L.-l. Jing, X.-k. Li, The surface integrity in machining hardened steel SKD11 for die and mold, *Machining science and technology*, Vol. 11, No. 1, pp. 99-116, 2007.

[15] X. Liu, D. Wen, Z. J. Li, L. Xiao, F. Yan, Experimental study on hard turning hardened GCr15 steel with PCBN tool, *Journal of Materials processing technology*, Vol. 129, No. 1, pp. 217-221, 2002.

[16] A. Barbacki, M. Kawalec, A. Hamrol, Turning and grinding as a source of microstructural changes in the surface layer of hardened steel, *Journal of materials processing technology*, Vol. 133, No. 1, pp. 21-25, 2003.

[17] M. J. Marques, J. Outeiro, A. M. Dias, R. M'Saoubi, H. Chandrasekaran, Surface integrity of H13 ESR mould steel milled by carbide and CBN tools, In *Proceeding of Materials Science Forum*, Vol. 514, pp. 564-568, 2006.

[18] X. J. Cai, Z. Q. Liu, M. Chen, Q. L. An, An experimental investigation on effects of minimum quantity lubrication oil supply rate in high-speed end milling of Ti-6Al-4V, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 226, No. 11, pp. 1784-1792, 2012.

[19] K. Palanikumar, Application of Taguchi and response surface methodologies for surface roughness in machining glass fiber reinforced plastics by PCD tooling, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 36, No. 1-2, pp. 19-27, 2008.

[20] U. Çaydaş, A. Haşçalık, Modeling and analysis of electrode wear and white layer thickness in die-sinking EDM process through response surface methodology, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 38, No. 11-12, pp. 1148-1156, 2008.

[21] C. Duan, W. Kong, Q. Hao, F. Zhou, Modeling of white layer thickness in high speed machining of hardened steel based on phase transformation mechanism, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 69, No. 1-4, pp. 59-70, 2013.

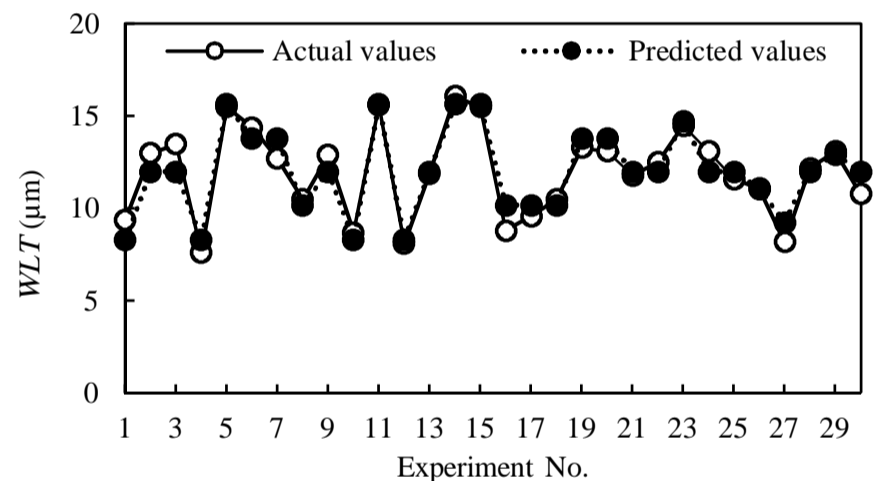


Fig. 8 comparison of predicted and empirical results for white layer thickness at each experiment

شکل 8 مقایسه مقادیر تجربی و پیش‌بینی شده ضخامت لایه سفید در هر آزمایش

## 6- مراجع

[1] M. Dogra, V. S. Sharma, A. Sachdeva, N. M. Suri, J. S. Dureja, Tool wear, chip formation and workpiece surface issues in CBN hard turning: A review, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 11, No. 2, pp. 341-358, 2010.

[2] V. P. Astakhov, *Machining of hard materials—definitions and industrial applications*, in: *Machining of Hard Materials*, (Eds.), pp. 1-32, London: Springer, 2011.

[3] W. Grzesik, *Advanced machining processes of metallic materials: theory, modelling and applications*: Elsevier, 2008.

[4] J. P. Davim, *Surface integrity in machining*, London: Springer, 2010.

[5] A. M. Abrão, J. L. S. Ribeiro, J. P. Davim, *Surface integrity*, in: *Machining of Hard Materials*, (Eds.), pp. 115-141, London: Springer, 2011.

[6] S. Zhang, T. Ding, J. Li, Microstructural alteration and microhardness at near-surface of AISI H13 steel by hard milling, *Machining Science and Technology*, Vol. 16, No. 3, pp. 473-486, 2012.

[7] I. S. Harrison, T. R. Kurfess, E. J. Oles, P. M. Singh, Inspection of white layer in hard turned components using electrochemical methods, *Journal of manufacturing science and engineering*, Vol. 129, No. 2, pp. 447-452, 2007.

[8] S. Akcan, W. S. Shah, S. Moylan, S. Chandrasekar, P. Chhabra, H. Yang, Formation of white layers in steels by machining and their characteristics, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 33, No. 4, pp. 1245-1254, 2002.

- Technology*, Vol. 36, No. 7-8, pp. 650-657, 2008.
- [25] D. Umbrello, Analysis of the white layers formed during machining of hardened AISI 52100 steel under dry and cryogenic cooling conditions, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 64, No. 5-8, pp. 633-642, 2013.
- [26] D. Umbrello, Influence of material microstructure changes on surface integrity in hard machining of AISI 52100 steel, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 54, No. 9-12, pp. 887-898, 2011.
- [22] Y. K. Chou, C. J. Evans, White layers and thermal modeling of hard turned surfaces, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 39, No. 12, pp. 1863-1881, 1999.
- [23] C. Ezilarasan, A. Velayudham, Effect of Machining Parameters on Surface Integrity in Machining Nimonic C-263 Super Alloy Using Whisker-Reinforced Ceramic Insert, *Journal of materials engineering and performance*, Vol. 22, No. 6, pp. 1619-1628, 2013.
- [24] A. Aramcharoen, P. Mativenga, White layer formation and hardening effects in hard turning of H13 tool steel with CrTiAlN and CrTiAlN/MoST-coated carbide tools, *The International Journal of Advanced Manufacturing*