



## مطالعه زبری سطح فولاد آلیاژی ۱.۷۷۶۵ سخت شده در فرایند فرزکاری سرعت بالا

حامد حسن پور<sup>۱</sup>، فرهاد محمدی پیراسته<sup>۲</sup>، رحمان مهدیانی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>. تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی مکانیک (دانشجوی دکتری)

<sup>۲</sup>. تهران، دانشگاه آزاد واحد پرند (دانشجوی کارشناسی ارشد)

<sup>۳</sup>. تهران، دانشگاه آزاد واحد علوم تحقیقات تهران (استاد)

### چکیده

ماشینکاری سرعت بالا دارای مزایای متعددی از قبیل افزایش تولیدپذیری، کاهش هزینه تولید و بهبود خواص قطعه کار نهایی است. از سوی دیگر، زبری سطح نهایی از مهم ترین شاخصه های کیفیت قطعه ماشینکاری شده می باشد. در این پژوهش، رابطه بین پارامترهای فرزکاری سرعت بالا و کیفیت سطح قطعه فولاد آلیاژی ۱.۷۷۶۵ با سختی ۵۰ را کولسی در حضور سیستم روانکاری با حداقل سیال برشی (MQL) بررسی گردید. پارامترهای سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق برش محوری و شعاعی، به عنوان پارامترهای اصلی فرآیند فرزکاری در نظر گرفته شدند. روش طراحی آزمایش رویه پاسخ برای بررسی اثر پارامترها بر روی زبری سطح، مورد استفاده قرار گرفته و در مجموع ۳۰ آزمایش انجام شد. نتایج نشان داد که از بین پارامترهای برشی، به ترتیب نرخ پیشروی و سرعت برشی بیشترین تأثیر را بر روی زبری سطح داشته و زبری سطح با افزایش سرعت برشی کاهش یافت. همچنین استفاده از سیستم روانکاری با حداقل سیال برشی دارای عملکرد مناسبی در سرعت های برشی و عمق برشی بالا مشهودتر است.

**واژه های کلیدی:** فرزکاری سرعت بالا؛ روش رویه پاسخ؛ زبری سطح.

## مقدمه

سطح قطعات بیشترین تنش کاری را تحمل می‌کنند و تحت تأثیر عوامل محیطی متعددی قرار دارند. در نتیجه مطالعه تغییرات سطحی قطعات و به‌ویژه آن‌هایی که تحت بار دینامیکی هستند حائز اهمیت است. سلامت سطح به مطالعه این تغییرات ایجاد شده در طی فرآیند تولید یک قطعه در قالب مشخصه‌های مختلف می‌پردازد که از مهم‌ترین شاخص‌های آن، می‌توان به زبری سطح اشاره کرد [۱]. زبری در عمر خستگی و دیگر خواص سطحی قطعه نهایی تأثیر گذار بوده و در بسیاری از مواقع، تنها معیار رد و یا قبول قطعه ماشینکاری می‌باشد.

در صنعت ماشینکاری، بالاخص مواد سخت ماشینکاری شونده، باید به دنبال آنالیز شرایط ماشینکاری بود تا از این طریق بتوان بهینه‌سازی را روی پارامترهای مؤثر بر ماشینکاری این آلیاژها انجام داد. هزینه‌بر بودن پروسه‌ی ماشینکاری این مواد، باعث افزایش رقابت صنعتی بین تولیدکنندگان و افزایش کارایی ماشینکاری مواد سخت شده است. فرزکاری سرعت بالا به دلیل راندمان بالای تولید و کاهش زمان و هزینه، فرایندی است که اخیراً برای دستیابی به این قابلیت مطرح شده است. همانگونه از نام آن پیداست، در این فرآیند، ماشین کاری با سرعت دورانی بالای اسپیندل انجام می‌شود [۲]. در این فرآیند کیفیت سطح پس از ماشین کاری، به علت حداقل بودن حرارت ورودی به قطعه کار افزایش پیدا می‌کند.

رک و مویسان [۳] مطالعاتی را درباره اثرات نرخ پیشروی، سرعت برشی و سایش ابزار بر روی سلامت سطح در تراشکاری سخت روی چرخ‌دنده‌های سخت‌شده موضعی از جنس فولاد  $Mn5Cr27$  انجام دادند. نتایج حاکی از آن بود که نرخ پیشروی اصلی‌ترین پارامتری است که بر روی زبری سطح قطعه تأثیر می‌گذارد.

سیلوا و همکاران [۴] تأثیر سه محیط خشک، روانکاری MQL و سنتی را بر روی میزان سایش ابزار و زبری سطح فولاد آلیاژی AISI ۴۳۴۰ در فرآیند فرزکاری مورد بررسی قرار دادند

لیو و همکاران [۵] عملیات فرزکاری با سرعت کم را بر روی یک فولاد ضدزنگ با سختی HRC ۵۵ و در دو محیط روانکاری تر و حالت مه افشانی<sup>۱</sup>، به‌وسیله دو نوع ابزار تک‌لایه و چندلایه انجام دادند.

اوبرگ و همکاران [۶] تأثیر خنک‌کاری برودتی را در فرآیند فرزکاری AISI ۳۰۴ و در مقایسه با دو محیط MQL و خشک مطالعه کردند و پی بردند که میزان نیروهای ماشینکاری و گشتاور اعمالی، در حالت برودتی بیشتر از حالت MQL و خشک است.

داس و همکاران [۷] میزان زبری سطح را در فرآیند تراشکاری سخت فولاد آلیاژی ۴۳۴۰ سخت کاری شده، به‌وسیله ابزار اینسرتی پوشش‌دار مورد بررسی قرار دادند. در آزمایش آن‌ها تأثیر سه پارامتر نرخ پیشروی، سرعت برشی و عمق برش مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که نرخ پیشروی و سرعت برشی به ترتیب بیشترین تأثیر را روی زبری سطح دارند.

دویلز و همکاران [۸] ماشینکاری خشک را بر روی اینکونل ۷۱۸ انجام دادند که در شرایط برش خاصی، حالت خشک سلامت سطح بهتری داشت.

<sup>۱</sup> Mist

لیو و همکاران، [۹] به بررسی مشخصه‌های سلامت سطح فولاد یاتاقانی ۱۵GCr با سختی حدود HRC ۶۴-۶۰ پرداختند. نتایج نشان داد که تحت برخی شرایط برشی، امکان به وجود آمدن تنش پسماند کششی وجود دارد. همچنین مقدار زبری سطح در تراشکاری قطعات با سختی بالاتر از HRC ۵۰ کاهش می‌یابد. هدف از این پژوهش، بررسی زبری سطح در فرآیند فرزکاری سرعت بالای فولاد سخت‌شده با استفاده از تکنیک روانکاری با حداقل سیال برشی (MQL) و در نهایت ارائه پیشنهادی به منظور فرزکاری بهینه این فولاد با معیار زبری حداقل است. به این منظور با کمک روش طراحی آزمایش رویه پاسخ<sup>۱</sup> و تحلیل آماری، تأثیر پارامترهای مختلف فرزکاری بر روی زبری سطح بررسی شد.

### مواد و روش تحقیق

جنس ماده قطعه کار در این تحقیق، فولاد ۱.۷۷۶۵ سخت‌شده با سختی ۵۰ راکولسی بود. آزمایش‌های طرح ریزی شده روی نمونه‌هایی مکعبی شکل به ابعاد ۱۵×۳۰×۳۰mm انجام شد. برای انجام آزمایش‌ها، از ماشین فرز CNC چهار محوره‌ی کنترل همزمان Mikron UCP ۷۱۰ استفاده گردید. در تمامی تست‌ها، تیغچه فرز سر تخت تنگستن کاربرد ۴ لبه، با پوشش TiAlN و قطر ۸ mm محصول شرکت Korloy مورد استفاده قرار گرفت. چیدمان آزمایش، نحوه بستن قطعه کار و موقعیت نازل‌های پاشش روانکار در شکل ۱ آمده است. روش روانکاری بکاررفته، روانکاری با حداقل سیال برشی بود. به منظور اعمال جریان روانکار MQL، از سیستم نشان داده شده در **Error! Reference source not found.** استفاده گردید. دستگاه دارای نازل اتمیزه کننده‌ای است که جریان هوا و جریان روغن به طور جداگانه وارد آن می‌شوند. سرعت جریان گاز نسبت به جریان روغن بسیار بیشتر است و در دهانه خروجی نازل، سرعت جریان گاز باعث شکستن روغن و تبدیل آن به قطرات ریز شده که توسط گاز حامل شتاب می‌گیرند. قطرات روغن در جریان گاز حامل، تشکیل اسپری روغن-هوا داده که از آن برای روانکاری ناحیه ماشینکاری استفاده می‌شود. روانکاری MQL در آزمایش‌ها با استفاده از روغن معدنی، با دبی ۲۴۰ میلی‌لیتر بر ساعت و فشار ۶ بار انجام شد.

اندازه‌گیری زبری سطح با استفاده از دستگاه زبری‌سنج پورتابل Mahr مدل ۱ MarSurf PS انجام گرفت. روشهای مختلفی برای بیان عددزبری سطح وجود دارد. یکی از آنها زبری متوسط است که معمولاً با Ra نشان داده می‌شود. در این تحقیق نیز، زبری بر اساس معیار زبری متوسط گزارش شد. مطابق شکل ۳، زبری متوسط برابر با سطح بین پروفیل زبری و خط مرکزی آن و یا انتگرال پروفیل زبری مطلق در طول اندازه‌گیری می‌باشد [۱۰].

به منظور بررسی تأثیر شرایط ماشینکاری چهار فاکتور سرعت برشی ( $V_c$ )، سرعت پیشروی ( $f_z$ )، عمق برش

محوری ( $a_p$ ) و عمق برش شعاعی ( $a_e$ ) به عنوان اصلی‌ترین پارامترهای فرزکاری سرعت بالا، در ۳ سطح تغییر

داده شدند. در این تحقیق، طرح آزمایش RSM برای طرح ریزی آزمایش‌ها بکار گرفته شد. در روش سطوح

<sup>۱</sup> Response Surface Method

پاسخ، از تعداد آزمایش‌های ثابتی، با توجه به سطوح و عوامل، استفاده می‌شود. پارامترهای فرزکاری، تعداد

### سطوح و مقادیر آن‌ها در

A. M. Abrão, J. L. S. Ribeiro, J. P. Davim, Surface integrity, in: *Machining of Hard Materials*, Eds., pp. ۱۱۵-۱۴۱: Springer, ۲۰۱۱

۱. J. Rech, A. Moisan, Surface integrity in finish hard turning of case-hardened steels, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. ۴۳, No. ۵, pp. ۵۴۳-۵۵۰, ۲۰۰۳.
۲. R. Da Silva, J. Vieira, R. Cardoso, H. Carvalho, E. Costa, A. Machado, R. De Ávila, Tool wear analysis in milling of medium carbon steel with coated cemented carbide inserts using different machining lubrication/cooling systems, *Wear*, Vol. ۲۷۱, No. ۹, pp. ۲۴۵۹-۲۴۶۵, ۲۰۱۱.
۳. X. Liu, D. Wen, Z. J. Li, L. Xiao, F. Yan, Experimental study on hard turning hardened GCr۱۵ steel with PCBN tool, *Journal of Materials processing technology*, Vol. ۱۲۹, No. ۱, pp. ۲۱۷-۲۲۱, ۲۰۰۲.
۴. E. Oberg, C. J. McCauley, *Machinery's Handbook & Guide to Machinery's Handbook*, Industrial Press, ۲۰۰۴.
۵. S. R. Das, A. Kumar, D. Dhupal, Effect of Machining Parameters on Surface Roughness in Machining of Hardened AISI ۴۳۴۰ Steel Using Coated Carbide Inserts, *International Journal of Innovation and Applied Studies*, Vol. ۲, No. ۴, pp. ۴۴۵-۴۵۳, ۲۰۱۳.
۶. A. Devillez, F. Schneider, S. Dominiak, D. Dudzinski, D. Larrouquere, Cutting forces and wear in dry machining of Inconel ۷۱۸ with coated carbide tools, *Wear*, Vol. ۲۶۲, No. ۷, pp. ۹۳۱-۹۴۲, ۲۰۰۷.
۷. Grzesik W, *Advanced Machining Processes Of Metallic Materials*, (۲۰۰۸) Elsevier.
۸. Davim J.P., *Surface Integrity In Machinig*, (۲۰۰۹) Springer.
۹. T. G. Dawson, *Machining hardened steel with polycrystalline cubic boron nitride cutting tools*, Thesis, Georgia Institute of Technology, ۲۰۰۲.
۱۰. Y. K. Chou, C. J. Evans, M. M. Barash, Experimental investigation on CBN turning of hardened AISI ۵۲۱۰۰ steel, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. ۱۲۴, No. ۳, pp. ۲۷۴-۲۸۳, ۲۰۰۲.

جدول آمده است.

بر این اساس، در مجموع تعداد ۳۰ آزمایش با ۳ بار تکرار انجام گرفت. آزمایش‌ها به منظور جلوگیری از بروز خطا، به صورت تصادفی انجام شدند. استراتژی ماشینکاری، فرزکاری موافق بود. در هر آزمایش، ۱۲۰ میلی‌متر از طول قطعه ماشینکاری گردید. برای انجام تحلیل‌های آماری نیز از نرم‌افزار ۱۷ Minitab بهره گرفته شد.

### نتایج و بحث

همان‌طور که اشاره شد، در کل ۳۰ آزمایش انجام گرفت و پس از انجام هر آزمایش، مقادیر زبری سطح ناحیه ماشینکاری شده اندازه‌گیری شد. برای تعیین مقدار زبری سطح در هر نمونه، اندازه‌گیری‌ها با استفاده از دستگاه زبری‌سنج در ۳ ناحیه و هر کدام به طول ۵.۶ میلی‌متر (در مجموع ۱۶.۸ میلی‌متر) صورت پذیرفت و میانگین این سه اندازه‌گیری به عنوان زبری متوسط سطح ماشینکاری شده (Ra) گزارش گردید.

جدول مقادیر پارامترهای برشی در هر آزمایش را به همراه تمامی مقادیر اندازه‌گیری شده زبری سطح نشان می‌دهد.

جدول آنالیز واریانس مدل توسعه داده شده برای تخمین زبری سطح را پس از حذف پارامترهای بی معنی نشان می دهد. نتایج حکایت از معنی دار بودن تأثیر تمامی پارامترهای اصلی، تداخل پیشروی با عمق برش شعاعی و سرعت برش و نیز توان دوم عمق برش شعاعی دارد. همچنین مقدار  $R-Sq$  برای مدل نهایی برابر با ۹۴٪ بدست آمد، به این معنی که مدل برازش شده تا ۹۴٪ از کل تغییرات زبری سطح را پوشش می دهد. از سوی دیگر بر اساس مقدار  $P$  برای فاکتور عدم انطباق، معنی دار نبودن این فاکتور اثبات گردید. شکل نشان می دهد که مقادیر باقیمانده های مدل توسعه یافته نسبت به مقادیر پیش بینی شده توسط آن، دارای پراکنندگی نسبتاً مناسبی بوده و نیز نشان می دهد که مقادیر این باقیمانده ها دارای توزیع نرمالی می باشند.

نتایج بدست آمده از تحلیل آماری نشان دادند که به ترتیب پیشروی با ۵۱٪، سرعت برشی با ۲۴٪ و عمق برش شعاعی با ۱۳٪ دارای بیشترین تأثیر بر روی زبری سطح می باشند. تداخل پیشروی با عمق برش شعاعی و سرعت برشی نیز دارای اثر معنی داری بودند که نمودار رویه پاسخ آن ها در شکل و شکل آورده شده است. شیب تغییرات فاکتورهای سرعت برشی و عمق برشی شعاعی در سطوح بالای پیشروی بیشتر بوده و میزان تأثیرگذاری آن ها نیز بالاتر است. مشاهده می گردد که در سطح پایین پیشروی، با افزایش عمق برش شعاعی، روند تغییرات زبری سطح ابتدا به مقدار جزئی بهبود یافته و سپس افزایش می یابد. این بهبود زبری در عمق برشی میانی را می توان ناشی از حذف اثر شخم زنی دانست [۱۱]. شخم زنی در عمق برشی و پیشروی پایین بعلت

ضخامت براده نتراشیده کوچک، ظاهر می‌شود. این پدیده منجر به جریان پلاستیک غیریکنواخت ماده شده و باعث خرابی سطح می‌شود.

در حالت کلی، شرایط ماشینکاری شامل بالاترین سرعت برشی، پایین‌ترین سرعت پیشروی و مقادیر عمق برشی کم تا متوسط، کمترین مقدار زبری سطح را برای قطعه ماشینکاری ارائه می‌کنند. البته بایستی توجه داشت که در مقادیر پایین پیشروی و عمق برشی، امکان بروز پدیده شخم‌زنی و خرابی سطح می‌باشد و در نتیجه مقدار بهینه‌ای برای این پارامترها وجود دارد. با توجه به شکل، با افزایش سرعت برشی، زبری سطح کاهش می‌یابد. دلیل این پدیده را می‌توان افت تنش سیلان و آسان‌تر شدن تغییر شکل پلاستیک ماده به دلیل افزایش درجه حرارت دانست، که باعث کاهش اصطکاک و نیروهای ماشینکاری شده و در نتیجه پایداری فرآیند و در پی آن کیفیت سطح افزایش می‌یابد [۱۲].

همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش پیشروی، زبری سطح افزایش می‌یابد. در واقع با افزایش این پارامتر، تماس فیزیکی بین ابزار و قطعه کار بیشتر شده، اصطکاک و نیروهای ماشینکاری افزایش می‌یابد. بالا رفتن نیروها، باعث افزایش ارتعاش و بدتر شدن کیفیت سطح می‌شود

### نتیجه‌گیری

- ۱- روش طراحی آزمایش RSM به خوبی برای مدل‌سازی تأثیر پارامترهای برشی بر روی خروجی‌های آزمایش مورد استفاده قرار گرفت.
- ۲- پیشروی با اختلاف زیادی به عنوان تأثیرگذارترین پارامتر مشخص گردید و بعد از آن، سرعت برشی و عمق برش شعاعی بیشترین سهم تأثیر را به خود اختصاص دادند.
- ۳- به طور کلی زبری سطح با افزایش پیشروی و عمق برشی افزایش یافت، درحالی‌که افزایش سرعت برشی دارای اثر کاهنده بر روی زبری سطح بود. در سطح پایین پیشروی نیز، کاهش عمق برشی باعث بروز پدیده شخم‌زنی و باعث خرابی سطح گردید.

### مراجع

۱۱. Davim, J.P., Machining Of Hard Materials. ۲۰۱۱: Springer.
۱۲. A. M. Abrão, J. L. S. Ribeiro, J. P. Davim, Surface integrity, in: Machining of Hard Materials, Eds., pp. ۱۱۵-۱۴۱: Springer, ۲۰۱۱.
۱۳. J. Rech, A. Moisan, Surface integrity in finish hard turning of case-hardened steels, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. ۴۳, No. ۵, pp. ۵۴۳-۵۵۰, ۲۰۰۳.
۱۴. R. Da Silva, J. Vieira, R. Cardoso, H. Carvalho, E. Costa, A. Machado, R. De Ávila, Tool wear analysis in milling of medium carbon steel with coated cemented carbide inserts using different machining lubrication/cooling systems, Wear, Vol. ۲۷۱, No. ۹, pp. ۲۴۵۹-۲۴۶۵, ۲۰۱۱.
۱۵. X. Liu, D. Wen, Z. J. Li, L. Xiao, F. Yan, Experimental study on hard turning hardened GCr<sub>15</sub> steel with PCBN tool, Journal of Materials processing technology, Vol. ۱۲۹, No. ۱, pp. ۲۱۷-۲۲۱, ۲۰۰۲.
۱۶. E. Oberg, C. J. McCauley, Machinery's Handbook & Guide to Machinery's Handbook, Industrial Press, ۲۰۰۴.

۱۷. S. R. Das, A. Kumar, D. Dhupal, Effect of Machining Parameters on Surface Roughness in Machining of Hardened AISI ۴۳۴۰ Steel Using Coated Carbide Inserts, International Journal of Innovation and Applied Studies, Vol. ۲, No. ۴, pp. ۴۴۵-۴۵۳, ۲۰۱۳.
۱۸. A. Devillez, F. Schneider, S. Dominiak, D. Dudzinski, D. Larrouquere, Cutting forces and wear in dry machining of Inconel ۷۱۸ with coated carbide tools, Wear, Vol. ۲۶۲, No. ۷, pp. ۹۳۱-۹۴۲, ۲۰۰۷.
۱۹. Grzesik W, Advanced Machining Processes Of Metallic Materials, (۲۰۰۸) Elsevier.
۲۰. Davim J.P., Surface Integrity In Machinig, (۲۰۰۹) Springer.
۲۱. T. G. Dawson, Machining hardened steel with polycrystalline cubic boron nitride cutting tools, Thesis, Georgia Institute of Technology, ۲۰۰۲.
۲۲. Y. K. Chou, C. J. Evans, M. M. Barash, Experimental investigation on CBN turning of hardened AISI ۵۲۱۰۰ steel, Journal of Materials Processing Technology, Vol. ۱۲۴, No. ۳, pp. ۲۷۴-۲۸۳, ۲۰۰۲.

جدول ۱: پارامترهای مورد آزمایش و سطوح آنها

سطوح			فاکتورها
سطح ۳	سطح ۲	سطح ۱	
۱,۵	۱	۰,۵	عمق برش محوری $a_p$ (mm)
۳	۲	۱	عمق برش شعاعی $a_e$ (mm)
۰,۰۶	۰,۰۴	۰,۰۲	سرعت پیشروی $f_z$ (mm/tooth)
۴۵۰	۳۰۰	۱۵۰	سرعت اسپیندل $V_c$ (m/min)

جدول ۲ ماتریس طراحی آزمایش RSM به همراه نتایج

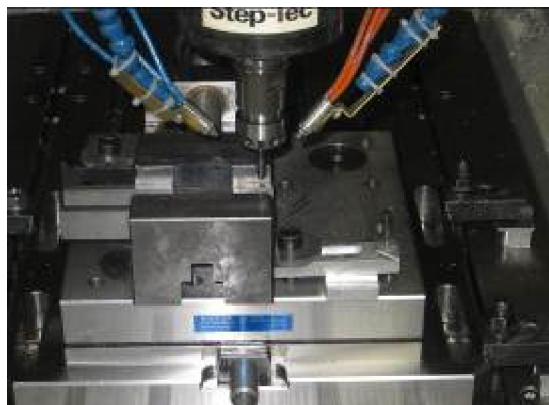
شماره آزمایش	$a_p$	$a_e$	$V_c$	$f_z$	زبری سطح ( $\mu m$ )
۱	۱,۵	۱	۱۵۰	۰,۰۲	۰,۸۶
۲	۱	۲	۳۰۰	۰,۰۴	۰,۹۹
۳	۱	۲	۳۰۰	۰,۰۴	۰,۹۴
۴	۰,۵	۳	۱۵۰	۰,۰۲	۰,۸۸
۵	۱,۵	۱	۴۵۰	۰,۰۶	۰,۹۸
۶	۰,۵	۳	۴۵۰	۰,۰۲	۰,۷۴
۷	۰,۵	۱	۴۵۰	۰,۰۲	۰,۶۰
۸	۱,۵	۳	۱۵۰	۰,۰۶	۱,۶۶
۹	۱	۲	۳۰۰	۰,۰۴	۰,۹۳
۱۰	۰,۵	۱	۱۵۰	۰,۰۲	۰,۸۴
۱۱	۱,۵	۳	۴۵۰	۰,۰۶	۱,۲۴
۱۲	۱,۵	۳	۱۵۰	۰,۰۲	۱,۰۸
۱۳	۱	۲	۳۰۰	۰,۰۴	۰,۸۶
۱۴	۰,۵	۳	۴۵۰	۰,۰۶	۱,۰۹
۱۵	۰,۵	۱	۴۵۰	۰,۰۶	۰,۹۲
۱۶	۰,۵	۱	۱۵۰	۰,۰۶	۱,۲۷
۱۷	۰,۵	۳	۱۵۰	۰,۰۶	۱,۶۴
۱۸	۱,۵	۱	۱۵۰	۰,۰۶	۱,۲۷
۱۹	۱,۵	۳	۴۵۰	۰,۰۲	۰,۷۷
۲۰	۱,۵	۱	۴۵۰	۰,۰۲	۰,۶۷
۲۱	۰,۵	۲	۳۰۰	۰,۰۴	۰,۸۱
۲۲	۱,۵	۲	۳۰۰	۰,۰۴	۱,۰۲
۲۳	۱	۲	۴۵۰	۰,۰۴	۰,۷۸

۱,۱۸	۰,۰۴	۳۰۰	۳	۱	۲۴
۰,۹۵	۰,۰۴	۳۰۰	۲	۱	۲۵
۰,۷۶	۰,۰۲	۳۰۰	۲	۱	۲۶
۱,۱۷	۰,۰۴	۱۵۰	۲	۱	۲۷
۰,۹۸	۰,۰۴	۳۰۰	۲	۱	۲۸
۱,۲۱	۰,۰۶	۳۰۰	۲	۱	۲۹
۰,۹۳	۰,۰۴	۳۰۰	۱	۱	۳۰

جدول ۳ آنالیز واریانس مدل زبری سطح

عامل	مقدار P	سهم تأثیر (%)
$a_p$	۰,۰۰۳۸	۱,۷۵
$a_e$	<۰,۰۰۰۱	۱۳,۰۷
$V_c$	<۰,۰۰۰۱	۲۳,۸۸
$F_z$	<۰,۰۰۰۱	۵۱,۰۴
$a_e \times f_z$	۰,۰۰۱۴	۳,۰۷
$V_c \times f_z$	۰,۰۰۶۴	۱,۰۷
$a_e^2$	۰,۰۰۵۴	۲,۲۳
باقیمانده		۳,۳۸
عدم انطباق	۰,۷۱	
کل		۱۰۰

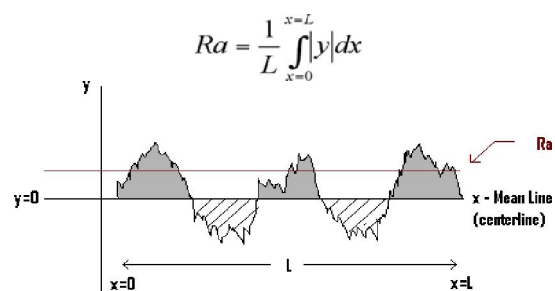




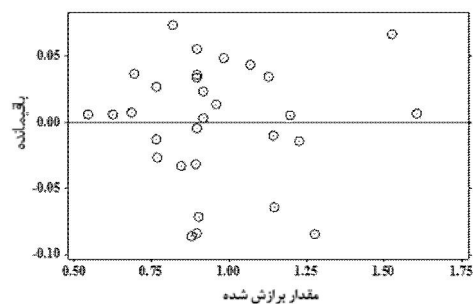
شکل ۱: نحوه قرارگیری قطعه و ابزار در فرزکاری سرعت بالا



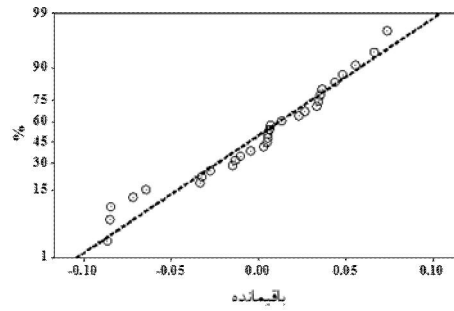
شکل ۲: دستگاه MQL استفاده شده جهت انجام آزمایش‌ها



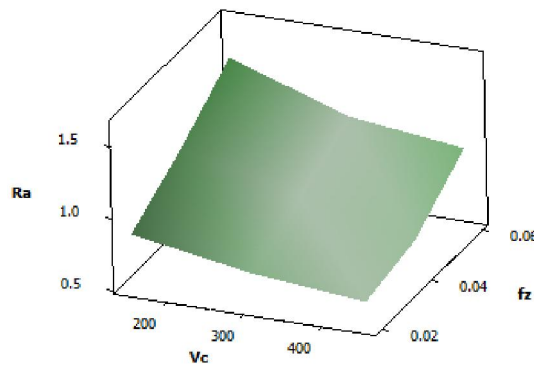
شکل ۳: شماتیک زبری سطح و نحوه تعیین زبری میانگین [۱۰]



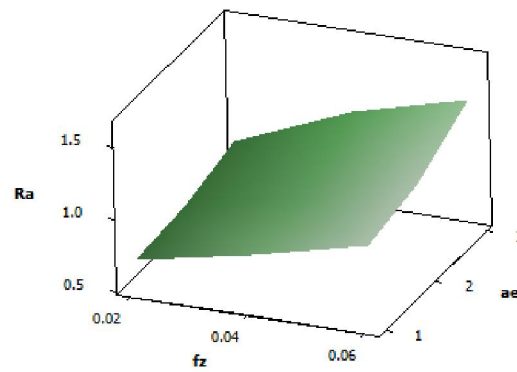
شکل ۴: پراکندگی باقیمانده‌ها در مقابل مقادیر برآزش شده در مدل توسعه یافته زبری سطح



شکل ۵: توزیع نرمال باقیمانده‌های مدل توسعه یافته برای زبری سطح



شکل ۶: رویه پاسخ تداخل تأثیر سرعت برشی و نرخ پیشروی بر زبری سطح



شکل ۷: تأثیر عمق برشی شعاعی و نرخ پیشروی بر زبری سطح