مجله مهندسی مکانیک مدرس، فوق‌العاده اسفند 1393، دوره 14، شماره 14، ص‌ص 50-60

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

تأثیر شرایط مختلف روان‌کاری روی زبری‌سطح فولاد آلیاژی 4340 در فرآیند فرزکاری سخت

حامد حسن‌پور[1]، امیر راستی[1]، محمدحسین صادقی[2*]، محمدحسین سعادت‌بخش[3]، احمدرضا امیددودمان[3]

1- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
3- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
* تهران، صندوق پستی 143-14115، sadeghim@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 23 اردیبهشت 1393
پذیرش: 19 مرداد 1393
ارائه در سایت: 19 مهر 1393

کلید واژگان:
فرزکاری
فولاد سخت‌کاری شده 4340
روان‌کاری با حداقل سیال برشی
زبری‌سطح

چکیده

فولاد سخت‌کاری شده 4340 به‌دلیل ویژگی‌های خاص خود، کاربرد زیادی در صنعت دارد. ماشین‌کاری این فولاد پس از انجام عملیات حرارتی سخت‌کاری، می‌تواند باعث افزایش تولیدپذیری، کاهش هزینه تولید و بهبود خواص قطعه‌کار شود. زبری سطح نهایی در فرآیند ماشین‌کاری، نقش مهمی را بر عملکرد قطعه ایفا کرده و مهم‌ترین شاخصه سطح ماشین کاری شده است. یکی از عوامل موثر بر سلامت سطح، استفاده از سیال برشی در ماشین‌کاری است که علاوه بر جنبه‌های مثبت آن، دارای مشکلات زیست‌محیطی بوده و برای سلامت اپراتور خطرناک است. درنتیجه استفاده از روان‌کاری با حداقل سیال برشی به‌عنوان یک روش جایگزین مورد توجه می‌باشد. در این پژوهش، رابطه بین پارامترهای فرزکاری و کیفیت سطح قطعه نهایی در فرزکاری فولاد سخت‌کاری شده 4340 و در حضور سیستم‌های مختلف روان‌کاری شامل حالت خشک، تر و حداقل روانکار بررسی شده است. پارامترهای سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق برش محوری و شعاعی، به‌عنوان پارامترهای اصلی فرآیند فرزکاری درنظرگرفته شده‌اند. روش طراحی آزمایش رویه پاسخ نیز برای بررسی اثر پارامترها روی زبری‌سطح، مورداستفاده قرارگرفت و در مجموع 90 آزمایش انجام شده است. نتایج نشان داد که از بین پارامترهای برشی، به‌ترتیب نرخ پیشروی و سرعت برشی بیشترین تأثیر را روی زبری‌سطح داشته و زبری‌سطح با افزایش سرعت برشی و کاهش پیشروی کمتر شد. همچنین روان‌کاری با حداقل سیال برشی در مقایسه با دیگر روش‌ها بهترین عملکرد را از خود نشان داد و اثر آن در سرعت‌های برشی و عمق برشی بالا مشهودتر است.

Effect of cutting fluid application on surface roughness in hard milling of 4340-alloyed steel

Hamed Hassanpour[1], Amir Rasti[1], Mohammad Hosein Sadeghi[1*], Mohammad Hosein Saadatbakhsh[1], Ahmad Reza Omiddodman[1]

1-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 19 May 2014
Accepted 10 August 2014
Available Online 11 October 2014

Keywords:
Milling, 4340 Hardened Steel
Minimum Quantity Lubricant
Surface Roughness

ABSTRACT

AISI4340 hardened steel has vast functionality in industries. Hard machining of this steel has several benefits such as, higher productivity, lower production cost and improved workpiece properties. In machining operation, ultimate surface roughness is the most important characteristic of machined surface and plays an important role in workpiece life. One of the effective factors on surface integrity is cutting fluid used in machining operation which, in spite of its positive effects has health and environmental problems. As a result, using minimum quantity lubrication is considered as an alternative method. In the present study, relations between milling parameters and final surface quality in milling of AISI4340 hardened steel, in the presence of lubrication systems including; dry, wet and minimum quantity lubrication have been investigated. Cutting speed, feed rate, axial and radial depth of cut have been considered as main parameters of milling operation. Totally, 90 experiments have been done using response surface method to analyze the effects of process parameters on surface roughness. Results revealed that feed rate and cutting speed have the most influence on surface roughness. Also, higher values of cutting speed and lower values of feed rate are necessary to reduce surface roughness. In addition, compared to other lubrication methods, minimum quantity lubrication has the best performance in surface quality, especially in high cutting speed and depth of cut.

1- مقدمه

فولادهای سخت[1] به‌طور گسترده در صنایع مختلف و به‌خصوص مجموعه‌های انتقال قدرت و ساخت قالب مورداستفاده قرار می‌گیرند. یکی از پرکاربردترین این فولادها، فولاد AISI4340 است. عناصر آلیاژی اصلی این فولاد شامل کرم، مولیبدن، نیکل و سیلیسیم می‌باشند. ماشین‌کاری این فولاد معمولاً در

1- Hardened Steels

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
H. Hassanpour, A. Rasti, M. H. Sadeghi, M. H. Saadatbakhsh, A. R. Omiddodman, Effect of cutting fluid application on surface roughness in hard milling of 4340-alloyed steel, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 14, pp. 50-60, 2015 (In Persian)

حالت آنیل یا نرماله انجام می‌شود و بعد از انجام عملیات حرارتی سنگ زده می‌شوند. با استفاده از ماشین‌کاری سخت[1] می‌توان این مراحل اضافی را حذف نمود و بهره‌وری را افزایش داد. همچنین استفاده از ماشین‌کاری سخت موجب کاهش زمان و هزینه فرآیند شده و سطح مطلوبی را به‌دست می‌دهد.

سطح قطعات بیشترین تنش کاری را تحمل می‌کنند و تحت تأثیر عوامل محیطی متعددی قرار دارند. درنتیجه مطالعه تغییرات سطحی قطعات و به‌ویژه آن‌هایی که تحت بار دینامیکی هستند حائز اهمیت است. سلامت سطح به مطالعه این تغییرات ایجادشده در طی فرآیند تولید یک قطعه در قالب مشخصه‌های مختلف می‌پردازد که از مهم‌ترین شاخص‌های آن، می‌توان به زبری‌سطح اشاره کرد[1]. زبری در عمر خستگی و دیگر خواص سطحی قطعه نهایی تأثیرگذار بوده و در بسیاری از مواقع، تنها معیار رد و یا قبول قطعه ماشین‌کاری می‌باشد. محققان بسیاری در زمینه سلامت سطح، بخصوص زبری‌سطح در ماشین‌کاری مواد سخت مطالعاتی را انجام داده‌اند.

داس و همکاران [2] میزان زبری‌سطح را در فرآیند تراشکاری سخت فولاد آلیاژی 4340 سخت‌کاری‌شده، به‌وسیله ابزار اینسرتی پوشش‌دار موردبررسی قراردادند. در آزمایش آن‌ها تأثیر سه پارامتر نرخ پیشروی، سرعت برشی و عمق برش بررسی و مشخص شد که نرخ پیشروی و سرعت برشی به‌ترتیب بیشترین تأثیر را روی زبری‌سطح دارند. لیو و همکاران، [3] به بررسی مشخصه‌های سلامت سطح فولاد یاتاقانی 15GCr با سختی حدود 60 راکول‌سی پرداختند. نتایج نشان داد که تحت برخی شرایط برشی، امکان به‌وجود آمدن تنش پسماند کششی وجود دارد. همچنین مقدار زبری‌سطح در تراشکاری قطعات با سختی بالاتر از 50 راکول‌سی کاهش می‌یابد. رِک و مویسان [4] 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 زبری‌سطح قطعه تأثیر می‌گذارد.

یکی دیگر از مسائل مهم در فرآیند ماشین‌کاری فولادهای سخت، استفاده از سیال برشی است. انتخاب صحیح سیال برشی، علاوه بر دقت و کیفیت سطح، نقش مهمی را نیز در کاهش اصطکاک، خنک‌کاری و جلوگیری از ایجاد گرمای بیش‌ازحد در محیط ماشین‌کاری ایفا می‌کند[5]. تأثیر روان‌کاری در عملیات ماشین‌کاری، به‌شدت وابسته به انتخاب نوع سیال روانکار و سیستم پاشش آن بر ناحیه برش است. مهم‌ترین روش‌های روان‌کاری در ماشین‌کاری شامل سیستم‌های خشک[2]، تر[3] و حداقل سیال برشی (MQL[4]) هستند. بااین‌وجود، استفاده از سیال برشی در عملیات ماشین‌کاری به‌علت مسائل اقتصادی، زیست‌محیطی و سلامت اپراتور دردسرساز است. بهترین راه برای کاهش اثرات منفی سیال برشی، حذف کامل آن است که نهایتاً منجر به ماشین‌کاری در حالت خشک می‌شود. قطعات سخت، قابلیت ماشین‌کاری در حالت عدم استفاده از سیال برشی (ماشین‌کاری خشک) را دارا می‌باشند [6]، اما به‌کارگیری چنین روشی در صنعت با بعضی محدودیت‌ها مواجه است که از آن جمله می‌توان به سایش شدید ابزار برشی، بالارفتن حرارت لبه برشی و کیفیت سطح پایین قطعه تولیدی اشاره کرد[7]. روان‌کاری با استفاده از حداقل سیال برشی به‌عنوان فرآیندی سازگار با محیط‌زیست، 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 ماشین‌کاری خشک را حذف کرده، اصطکاک را به شکل مؤثری کاهش داده و باعث کاهش حرارت در موضع برش می‌شود. تحقیقات زیادی روی روش MQL به‌عنوان جایگزینی پایدار در خنک‌کاری و روان‌کاری در فرآیند ماشین‌کاری صورت گرفته است.

سیلوا و همکاران [8] تأثیر سه محیط خشک، روان‌کاری MQL و سنتی را روی میزان سایش ابزار و زبری‌سطح فولاد آلیاژی AISI 4340 در فرآیند فرزکاری موردبررسی قرار دادند. دار و همکاران [9] به بررسی اثر روان‌کاری با روش MQL روی زبری‌سطح در تراشکاری فولاد 4340 پرداختند و مشخص شد که استفاده از این روش باعث کاهش دمای منطقه برش و درنتیجه کاهش زبری‌سطح می‌شود. آویلا و همکاران [10] تراشکاری فولاد سخت‌شده 4340 را مورد ارزیابی قراردادند و نشان دادند که در میان سیال‌های برشی مختلف، امولسیون بدون روغن، بهترین صافی سطح را نتیجه می‌دهد. بوبکری و همکاران [11] فرآیند سوراخ‌کاری فولاد 1020 را تحت شرایط روان‌کاری MQL و تر، با استفاده از ابزار فولاد تندبر و در پوشش‌ها و هندسه‌های مختلف موردبررسی قراردادند و نتیجه گرفتند که میزان سایش ابزار، زبری‌سطح و اندازه قطر سوراخ تولیدی در حالت MQL نسبت به حالت تر بهتر است. لیو و همکاران [12] عملیات فرزکاری با سرعت کم را روی یک فولاد ضدزنگ با سختی 55 راکول‌سی و در دو محیط روان‌کاری تر و حالت مه افشانی[5]، به‌وسیله دو نوع ابزار تک‌لایه و چندلایه انجام دادند. نالبانت و همکاران [13] تأثیر خنک‌کاری برودتی را در فرآیند فرزکاری AISI304 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. خان و همکاران [14] تأثیر روان‌کاری MQL با روغن پایه گیاهی را در مقابل ماشین‌کاری خشک و تر، در تراشکاری فولاد آلیاژی AISI9310 موردمطالعه قراردادند و به این نتیجه رسیدند که میزان زبری‌سطح قطعه‌کار در حالت MQL نسبت به دو حالت دیگر به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. تاسدلن و همکاران [15] تأثیر شرایط مختلف روان‌کاری MQL را روی میزان سایش ابزار، نیروها، گشتاور و زبری‌سطح در فرآیند سوراخ‌کاری نوعی فولاد چرخدنده مطالعه کردند و نشان دادند که میزان سایش ابزار در حالت MQL و هوای فشرده نسبت به امولسیون، کمتر بوده و بدترین صافی سطح نیز در حالت هوای فشرده به‌دست می‌آید.

هدف از این پژوهش، بررسی و مقایسه زبری‌سطح در فرآیند فرزکاری فولاد سخت‌شده 4340، با استفاده از روش‌های روان‌کاری مختلف شامل تکنیک روان‌کاری MQL، تر و خشک و درنهایت پیشنهاد روش روان‌کاری مناسب برای دستیابی به زبری‌سطح کمینه است. به‌همین منظور با کمک روش طراحی آزمایش رویه پاسخ[6] و تحلیل آماری، تأثیر پارامترهای مختلف فرزکاری در حالت‌های مختلف روان‌کاری، روی زبری‌سطح، بررسی و عملکرد این تکنیک‌ها با یکدیگر مقایسه شده است.

2- مواد و تجهیزات مورداستفاده

جنس ماده قطعه‌کار در این تحقیق، فولاد 4340 سخت‌شده با سختی 45 راکول‌سی بود. آزمایش‌های طرح‌ریزی‌شده روی نمونه‌هایی مکعبی‌شکل به ابعاد 40x40x20 میلی‌متر انجام شد. ترکیب شیمیایی این فولاد که با تحلیل

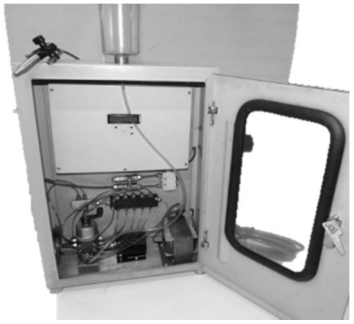
1- Hard Machining
2- Dry
3- Wet
4- Minimum Quantity Lubrication
5- Mist
6- Response Surface Method (RSM)

کوانتومتری به‌دست آمده در جدول 1 ارائه شده‌است. به‌منظور افزایش سختی تا 45 راکول‌سی، نمونه‌ها در کوره با دمای870 درجه سانتی‌گراد آستنیته گشته، سپس به‌مدت 2 ساعت در دمای 425 درجه سانتی‌گراد برگشت داده شدند و در نهایت در حمام روغن به دمای محیط رسیدند. برای انجام آزمایش‌ها، از ماشین فرز CNC چهار محوره کنترل همزمان مایکرون UCP710[1] با کنترلر TNC42 و حداکثر دور اسپیندل 42000 دور بر دقیقه استفاده شد. در تمامی تست‌ها، تیغچه فرز سر تخت تنگستن‌کارباید 4 لبه، با پوشش TiAlN و قطر 12 میلی‌متر، محصول شرکت هم‌تولز[2] آلمان مورد استفاده قرار گرفت. بعد از انجام هر آزمایش، ابزارها بررسی شده و به‌منظور اطمینان از صحت نتایج، پس از هر 5 پاس فرزکاری نیز ابزارها تعویض شدند.

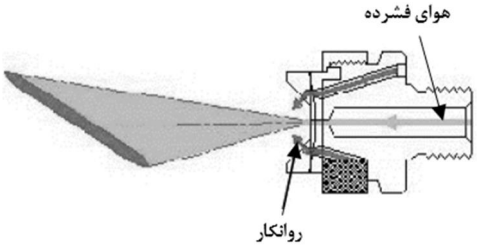
به‌منظور اعمال جریان روانکار MQL، از سیستم نشان داده‌شده در شکل 1 استفاده شد. در این سیستم از یک کمپرسور جهت تولید هوای فشرده استفاده می‌شود که فشار آن توسط رگلاتور دستگاه و دبی سنج گاز قابل تنظیم است. از طرف دیگر روغن موجود در محفظه بالای دستگاه، توسط یک لوله پلاستیکی با قطر کم و به‌کمک یک پمپ به نازل هدایت می‌شود و میزان دبی روغن با تغییر فرکانس پمپ قابل تنظیم می‌باشد. دستگاه دارای نازل اتمیزه کننده‌ای (شکل 2) است که جریان هوا و جریان روغن به‌طور 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 240 میلی‌لیتر بر ساعت و فشار 6 بار انجام شد. به‌منظور عملکرد بهتر سیستم روان‌کاری، مطابق شکل 3 از دو نازل پاشش با زاویه 30 درجه نسبت به ابزار بهره گرفته شد.

جدول 1 ترکیب شیمیایی فولاد AISI4340

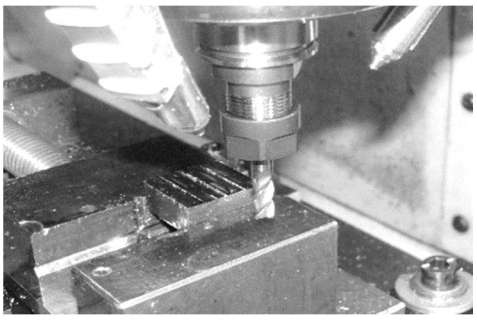
عنصر	درصد وزنی (%)
کربن	0/38
نیکل	1/7
کروم	0/9
منگنز	0/69
مولیبدن	0/3
سیلیسیوم	0/28
آهن	پایه



شکل 1 دستگاه MQL استفاده‌شده جهت انجام آزمایش



شکل 2 نازل اتمیزه‌کننده دستگاه



شکل 3 نحوه قرارگیری نازل‌ها در زمان ماشین‌کاری

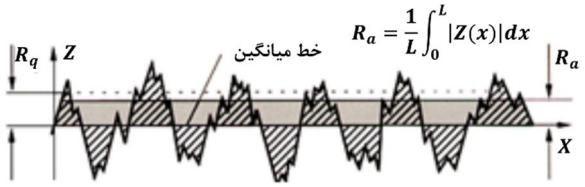
اندازه‌گیری زبری‌سطح با استفاده از دستگاه زبری‌سنج پرتابل مار[3] مدل PS1 انجام گرفت. روش‌های مختلفی برای بیان عدد زبری‌سطح وجود دارد. یکی از آن‌ها زبری متوسط است که معمولاً با *Ra* نشان داده می‌شود. در این تحقیق نیز، زبری بر اساس معیار زبری متوسط گزارش شد. مطابق شکل 4، زبری متوسط برابر با سطح بین پروفیل زبری و خط مرکزی آن و یا انتگرال پروفیل زبری مطلق در طول اندازه‌گیری می‌باشد[16].

3- روش انجام آزمایش

به‌منظور بررسی تأثیر شرایط ماشین‌کاری و حالت‌های روان‌کاری مختلف روی زبری‌سطح در ماشین‌کاری فولاد سخت‌شده 4340، چهار فاکتور سرعت برشی (v_c)، سرعت 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، طرح آزمایش رویه پاسخ برای طرح‌ریزی آزمایش‌ها بکار گرفته شد. در این روش از تعداد آزمایش‌های ثابتی با توجه به سطوح و عوامل، استفاده می‌شود. در حالت فاکتوریل کامل (حالت عمومی)، اگر 4 عامل وجود داشته باشد، که در 3 سطح تغییر کنند، تعداد حالت‌های آزمایش در 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 (با 6 بار تکرار) هیچ آزمایش دیگری تکرار نمی‌شود. این روش یکی از پرکاربردترین روش‌های طرح‌ریزی آزمایش است. با این روش بهتر و واضح‌تر می‌توان تغییرات خروجی را با توجه به پارامترهای ورودی مختلف نشان داد.

پارامترهای فرزکاری، تعداد سطوح و مقادیر آن‌ها در جدول 2 آمده است.



شکل 4 شماتیک زبری‌سطح و نحوه تعیین زبری میانگین[16].

1- Mikron
2- HAMtools
3- Mahr

بر این اساس، در مجموع تعداد 90 آزمایش با 3 بار تکرار انجام گرفت. آزمایش‌ها به‌منظور جلوگیری از بروز خطا، به‌صورت تصادفی انجام شدند. استراتژی ماشین‌کاری، فرزکاری موافق بود که در سه حالت روان‌کاری مختلف شامل روش MQL، تر و خشک صورت پذیرفت. در هر آزمایش، 160 میلی‌متر از طول قطعه ماشین‌کاری شد. برای انجام تحلیل‌های آماری نیز از نرم‌افزار Minitab 17 بهره گرفته شد.

4- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

همان‌طور که اشاره شد، در کل 90 آزمایش انجام گرفت و پس از انجام هر آزمایش، مقادیر زبری‌سطح ناحیه ماشین‌کاری شده اندازه‌گیری شد. برای تعیین مقدار زبری‌سطح در هر نمونه، اندازه‌گیری ها با استفاده از دستگاه زبری‌سنج در 3 ناحیه و هرکدام به طول 5/6 میلی‌متر صورت پذیرفت و میانگین این سه اندازه‌گیری به‌عنوان زبری متوسط سطح ماشین‌کاری‌شده گزارش شد. جدول 3 مقادیر پارامترهای برشی در هر آزمایش را به‌همراه تمامی مقادیر اندازه‌گیری‌شده زبری‌سطح، در سه حالت MQL، تر و خشک نشان می‌دهد.

4-1- زبری‌سطح در حالت ماشین‌کاری خشک

میزان تغییرات پاسخ زبری‌سطح میانگین در ماشین‌کاری خشک و برای هر سطح پارامترهای برشی، در جدول 4 نشان داده‌شده است. ردیف آخر در این جدول، رتبه هر فاکتور را در میزان تأثیرگذاری روی زبری‌سطح نشان می‌دهد. بر این اساس، پیشروی بیشترین و عمق برشی محوری کمترین تأثیر را بر زبری‌سطح دارند. به‌منظور تخمین دقیق‌تر زبری‌سطح در حالت ماشین‌کاری خشک و بررسی معنی‌داربودن پارامترها، از تحلیل واریانس[1] و روش حداقل مربعات، برای تخمین ضرایب رگرسیونی استفاده شد. در ابتدا یک مدل درجه دو، شامل تمامی متغیرهای اصلی، تداخل دوتایی و توان دوم متغیرها بسط داده شد و در ادامه، فاکتورهای دارای اثرات بی‌معنی حذف و به‌عنوان خطا

جدول 2 پارامترهای مورد آزمایش و سطوح آن‌ها

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
سرعت پیشروی (f_z) (mm/tooth)	0/02	0/04	0/06
سرعت اسپیندل (V_c) (m/min)	50	100	150

جدول 3 ماتریس طراحی آزمایش رویه پاسخ به‌همراه نتایج

شماره آزمایش	a_p	a_e	V_c	f_z	Ra(μm)		
					Dry	Wet	MQL
1	1/5	1	50	0/02	1/03	0/93	0/81
2	1	2	100	0/04	1/08	0/98	0/93
3	1	2	100	0/04	1/15	1/04	0/89
4	0/5	3	50	0/02	1/2	0/81	0/83
5	1/5	1	150	0/06	1/29	1/23	0/93
6	0/5	3	150	0/02	0/93	0/77	0/69
7	0/5	1	150	0/02	0/96	0/82	0/55
8	1/5	3	50	0/06	1/95	1/85	1/61
9	1	2	100	0/04	1/13	1/05	0/95
10	0/5	1	50	0/02	0/99	0/73	0/79

ادامه جدول 3 ماتریس طراحی آزمایش رویه پاسخ به‌همراه نتایج

شماره آزمایش	a_p	a_e	V_c	f_z	Ra(μm)		
					Dry	Wet	MQL
11	1/5	3	150	0/06	1/34	1/28	1/21
12	1/5	3	50	0/02	1/11	1/07	1/03
13	1	2	100	0/04	0/96	0/96	0/81
14	0/5	3	150	0/06	1/31	1/19	1/08
15	0/5	1	150	0/06	1/02	0/94	0/89
16	0/5	1	50	0/06	1/29	1/13	1/2
17	0/5	3	50	0/06	1/71	1/62	1/59
18	1/5	1	50	0/06	1/49	1/32	1/19
19	1/5	3	150	0/02	0/89	0/84	0/75
20	1/5	1	150	0/02	0/93	0/81	0/63
21	0/5	2	100	0/04	1/05	0/94	0/79
22	1/5	2	100	0/04	1/19	1/05	0/97
23	1	2	150	0/04	1/05	0/92	0/74
24	1	3	100	0/04	1/32	1/22	1/16
25	1	2	100	0/04	1/29	1/12	0/92
26	1	2	100	0/02	0/93	0/81	0/73
27	1	2	50	0/04	1/29	0/98	1/11
28	1	2	100	0/04	1/17	1/05	0/94
29	1	2	100	0/06	1/33	1/23	1/13
30	1	1	100	0/04	1/02	0/95	0/86

درنظرگرفته شدند.

جدول 5 تحلیل واریانس مدل زبری‌سطح در حالت ماشین‌کاری خشک

عامل	مجموع مربعات	درجه آزادی	مقدار F	مقدار P	سهم تأثیر (%)
a_p	0/032	1	4/87	0/039	2/44
a_e	0/168	1	25/54	< 0/0001	12/8
V_c	0/304	1	46/19	< 0/0001	23/15
f_z	0/465	1	70/66	< 0/0001	35/43
a_p x f_z	0/046	1	7/02	0/015	3/52
a_e x V_c	0/051	1	7/69	0/012	3/85
a_e x f_z	0/063	1	9/49	0/005	4/76
V_c x f_z	0/046	1	7/02	0/015	3/52
باقیمانده	0/138	21			10/53
عدم انطباق	0/079	16	0/42	0/91	
خطا	0/059	5			
کل	1/314	29			100

تحلیل واریانس مدل توسعه داده‌شده نهایی را پس از حذف پارامترهای بی‌معنی نشان می‌دهد. مطابق جدول، مقادیر P با بزرگی کمتر از 0/05 (قابلیت اطمینان بالاتر از 95%) نشان‌دهنده معنی‌داربودن فاکتورها می‌باشند. نتایج حکایت از معنی‌داربودن تأثیر تمامی پارامترهای اصلی، تداخل پیشروی با همه فاکتورها و تداخل عمق برش شعاعی با سرعت برشی دارد.

همچنین مقدار R_{sq} برای مدل توسعه‌داده‌شده نهایی، در حالت ماشین‌کاری خشک، برابر با 91/8% به‌دست آمد، به این معنی که مدل برازش شده تا 91/8% از کل تغییرات زبری‌سطح را در حالت ماشین‌کاری خشک پوشش می‌دهد. از سوی دیگر بر اساس مقدار P برای فاکتور عدم انطباق، معنی‌دارنبودن این فاکتور اثبات شد که تأیید دیگری بر درستی مدل

1- ANOVA

توسعه‌داده‌شده می‌باشد. شکل 5 نشان می‌دهد که مقادیر باقیمانده‌ها نسبت به مقادیر پیش‌بینی شده، دارای پراکندگی نسبتاً مناسبی بوده و شکل 6 نیز نشان می‌دهد که مقادیر این باقیمانده‌ها دارای توزیع نرمالی هستند. بر اساس مدل توسعه‌یافته، فرمول تجربی برای تخمین زبری‌سطح در حالت ماشین‌کاری خشک از معادله (1) به‌دست آمد.

نتایج به‌دست آمده از تحلیل آماری نشان دادند که به‌ترتیب پیشروی با 35/43%، سرعت برشی با 23/15% و عمق برش شعاعی با 12/8% دارای بیشترین تأثیر روی زبری‌سطح می‌باشند. نمودار رویه پاسخ تداخل پیشروی با تمامی پارامترهای اصلی و همچنین تداخل عمق برش شعاعی با سرعت برشی در شکل 7 تا شکل 10 آمده است. نکته قابل‌توجه در این شکل‌ها را می‌توان بی‌تأثیر بودن بقیه پارامترها در سطح پایین پیشروی دانست که نشان‌دهنده تأثیرگذاری بالای سرعت پیشروی روی زبری‌سطح در حالت خشک است. همچنین شیب تغییرات زبری‌سطح در حد بالای عمق برش محوری و حد پایین سرعت برشی بالاتر بوده و میزان تأثیرگذاری در این سطوح نیز بیشتر می‌باشد. شکل 11 تا شکل 14 نیز کانتورهای زبری‌سطح را برای همان رویه‌های پاسخ نشان می‌دهد.

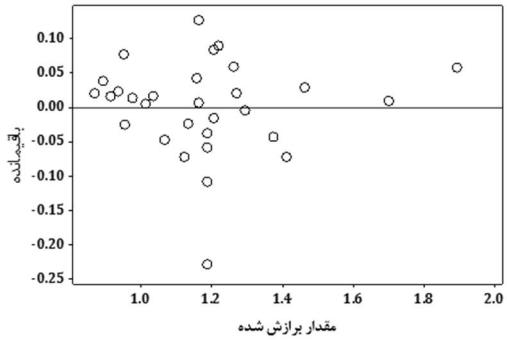
$$Ra = 0.77 - 0.13a_p + 0.084a_e + 0.0018V_c + 4.195f_z + 5.375a_p \times f_z - 0.0011a_e \times V_c + 3.125a_e \times f_z - 0.0537V_c \times f_z \quad (1)$$

جدول 4 مقادیر زبری‌سطح در ماشین‌کاری خشک و در سطوح پارامترهای برشی

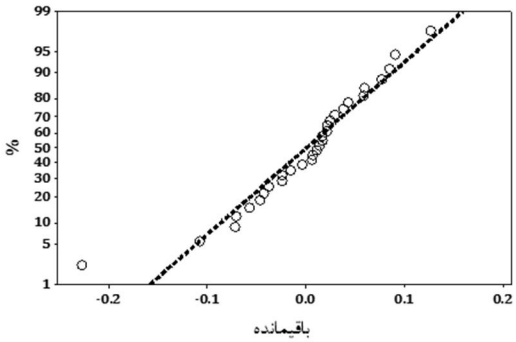
سطح	f_z	V_c	a_e	a_p
سطح 1	1	1/34	1/11	1/16
سطح 2	1/14	1/14	1/14	1/14
سطح 3	1/41	1/08	1/31	1/25
تغییرات	0/41	0/26	0/19	0/1
رتبه	1	2	3	4

جدول 5 تحلیل واریانس مدل زبری‌سطح در حالت ماشین‌کاری خشک

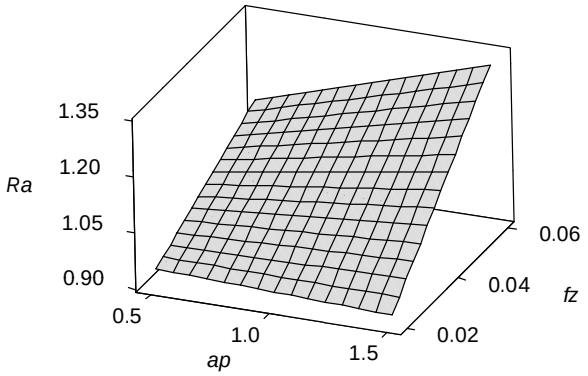
عامل	مجموع مربعات	درجه آزادی	مقدار F	مقدار P	سهم تأثیر (%)
a_p	0/032	1	4/87	0/039	2/44
a_e	0/168	1	25/54	<0/0001	12/8
V_c	0/304	1	46/19	<0/0001	23/15
f_z	0/465	1	70/66	<0/0001	35/43
$a_p \times f_z$	0/046	1	7/02	0/015	3/52
$a_e \times V_c$	0/051	1	7/69	0/012	3/85
$a_e \times f_z$	0/063	1	9/49	0/005	4/76
$V_c \times f_z$	0/046	1	7/02	0/015	3/52
باقیمانده	0/138	21			10/53
عدم انطباق	0/079	16	0/42	0/91	
خطا	0/059	5			
کل	1/314	29			100



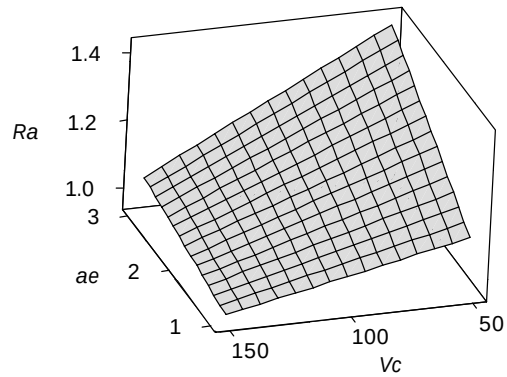
شکل 5 پراکندگی باقیمانده‌ها در مقابل مقادیر برازش شده در مدل توسعه‌یافته زبری‌سطح در حالت ماشین‌کاری خشک



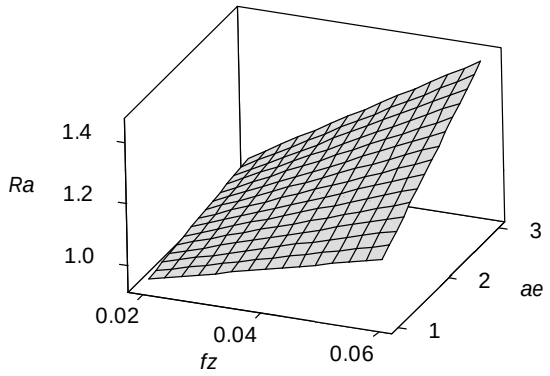
شکل 6 توزیع نرمال باقیمانده‌ها در مدل توسعه‌یافته زبری‌سطح در حالت ماشین‌کاری خشک



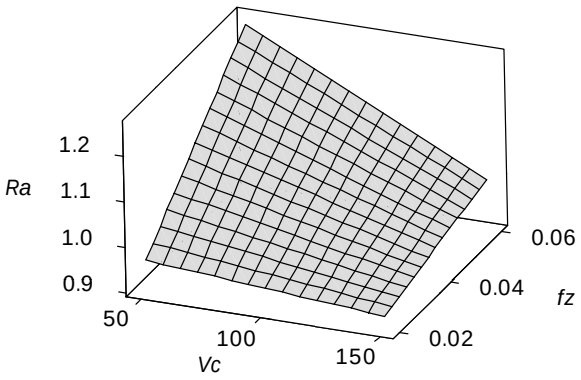
شکل 7 رویه پاسخ تداخل تأثیر عمق برش محوری و نرخ پیشروی روی زبری‌سطح در حالت ماشین‌کاری خشک



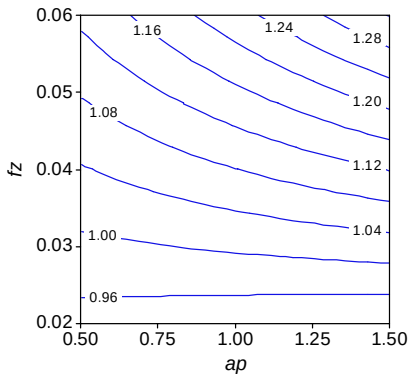
شکل 8 رویه پاسخ تداخل تأثیر عمق برش شعاعی و سرعت برشی روی زبری‌سطح در حالت ماشین‌کاری خشک



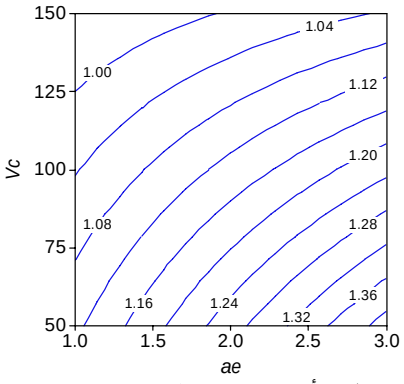
شکل 9 رویه پاسخ تداخل تأثیر عمق برش شعاعی و نرخ پیشروی روی زبری‌سطح در حالت ماشین‌کاری خشک



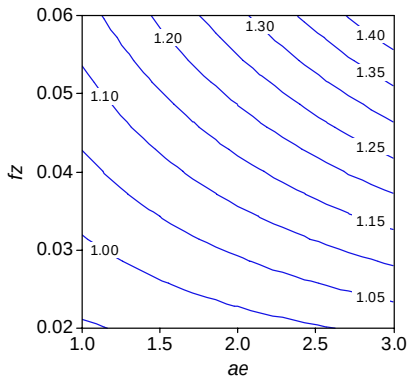
شکل 10 رویه پاسخ تداخل تأثیر سرعت برشی و نرخ پیشروی روی زبری‌سطح در حالت ماشین‌کاری خشک



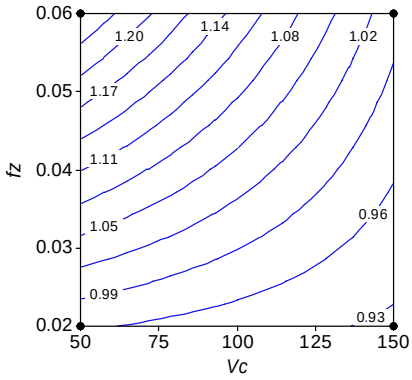
شکل 11 کانتور تداخل تأثیر عمق برش محوری و نرخ پیشروی بر زبری‌سطح در حالت ماشین‌کاری خشک



شکل 12 کانتور تداخل تأثیر عمق برش شعاعی و سرعت برشی روی زبری‌سطح در حالت ماشین‌کاری خشک



شکل 13 کانتور تداخل تأثیر عمق برش شعاعی و نرخ پیشروی روی زبری‌سطح در حالت ماشین‌کاری خشک



شکل 14 کانتور تداخل تأثیر سرعت برشی و نرخ پیشروی روی زبری‌سطح در حالت ماشین‌کاری خشک

4-2- زبری‌سطح در حالت ماشین‌کاری تر

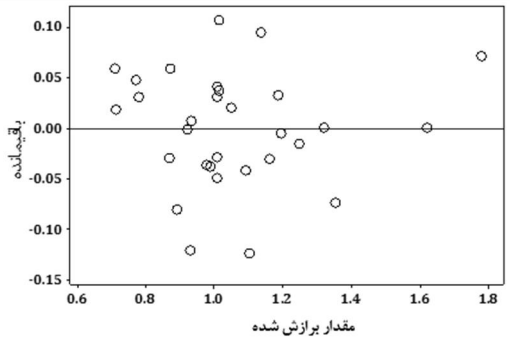
میزان تغییرات پاسخ زبری‌سطح میانگین در حالت روان‌کاری تر برای هر سطح پارامترهای برشی، در جدول 6 نشان داده‌شده است. در این حالت ماشین‌کاری نیز، پیشروی بیشترین و عمق برشی محوری کمترین تأثیر را روی زبری‌سطح داشتند. مشابه قبل، مدلی برای تخمین زبری‌سطح در حالت روان‌کاری تر توسعه داده شد. جدول 7 تحلیل واریانس مدل توسعه داده‌شده نهایی را پس از حذف پارامترهای بی‌معنی نشان می‌دهد. نتایج حکایت از معنی‌دار بودن تأثیر تمامی پارامترهای اصلی، تداخل پیشروی با عمق برشی شعاعی و سرعت برشی و همچنین تداخل عمق برش شعاعی با سرعت برشی را دارد. همچنین مقدار R_{Sq} برای مدل نهایی برابر با 94/65% به‌دست آمد، به این معنی که مدل برازش‌شده تا 94/65% از کل تغییرات زبری‌سطح را پوشش می‌دهد. از سوی دیگر براساس مقدار P برای فاکتور عدم انطباق، معنی‌دار نبودن این فاکتور اثبات شد که تأیید دیگری بر درستی مدل توسعه داده‌شده بود. شکل 15 نشان می‌دهد که مقادیر باقیمانده‌ها نسبت به مقادیر برازش شده دارای پراکندگی نسبتاً مناسبی بوده و شکل 16 نیز نشان می‌دهد که مقادیر این باقیمانده‌ها دارای توزیع نرمال می‌باشند.

جدول 6 مقادیر زبری‌سطح در حالت روان‌کاری تر و در سطوح پارامترهای برشی

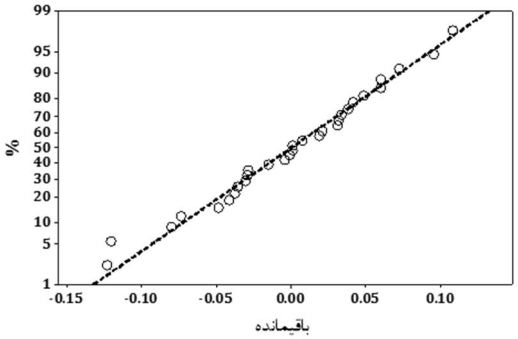
سطح	f_z	V_c	a_e	a_p
سطح 1	0/84	1/16	0/98	0/99
سطح 2	1/02	1/03	1/01	1/03
سطح 3	1/31	0/98	1/18	1/15
تغییرات	0/47	0/18	0/2	0/16
رتبه	1	3	2	4

جدول 7 تحلیل واریانس مدل زبری‌سطح در حالت روان‌کاری تر

عامل	مجموع مربعات	درجه آزادی	مقدار F	مقدار P	سهم تأثیر (%)
a_p	0/114	1	25/47	< 0/0001	6/52
a_e	0/178	1	39/91	< 0/0001	10/18
V_c	0/149	1	33/5	< 0/0001	8/52
f_z	0/98	1	219/73	< 0/0001	56/03
a_e x V_c	0/058	1	12/91	0/0017	3/32
a_e x f_z	0/079	1	17/58	0/0004	4/52
V_c x f_z	0/06	1	13/46	0/0014	3/43
a_e^2	0/038	1	8/62	0/0079	2/17
باقیمانده	0/094	21			5/32
عدم انطباق	0/077	16	1/48	0/3522	
خطا	0/016	5			
کل	1/749	29			100



شکل 15 پراکندگی باقیمانده‌ها در مقابل مقادیر برازش شده در مدل توسعه‌یافته زبری‌سطح در حالت روان‌کاری تر

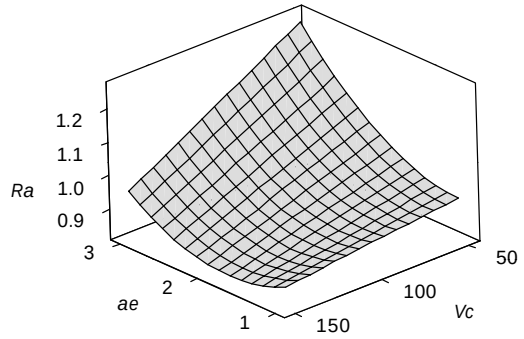


شکل 16 توزیع نرمال باقیمانده‌های مدل توسعه‌یافته برای زبری‌سطح در حالت روان‌کاری تر

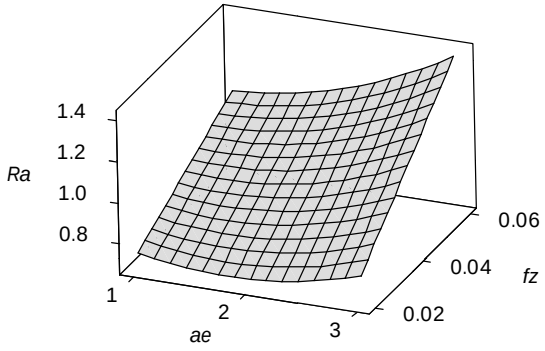
بر اساس مدل توسعه‌یافته، فرمول تجربی برای تخمین زبری‌سطح در حالت روان‌کاری تر به‌صورت معادله (2) به‌دست آمد.

$$Ra = 0.456 + 0.159a_p - 0.212a_e + 0.003V_c + 10.79f_z - 0.0012a_e \times V_c + 3.5a_e \times f_z - 0.0621V_c \times f_z + 0.073a_e^2 \quad (2)$$

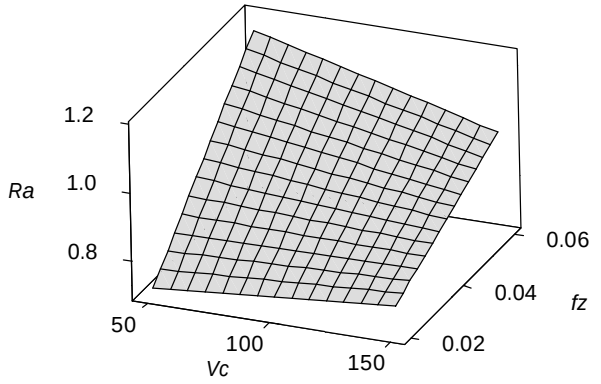
نتایج به‌دست آمده از تحلیل آماری نشان دادند که به‌ترتیب پیشروی با 56/03%، عمق برش شعاعی با 10/2%، سرعت برشی با 8/5% و عمق برش محوری با 6/5% دارای بیشترین تأثیر روی زبری‌سطح می‌باشند. نمودار رویه پاسخ تداخل عمق برش شعاعی با پیشروی و سرعت برشی، و پیشروی با سرعت برشی در شکل 17 تا شکل 19 آمده است. در این شکل‌ها نیز شیب تغییرات زبری‌سطح، در سطوح بالاتر پیشروی و عمق برش شعاعی و نیز سطح پایین سرعت برشی بالاتر بوده و میزان تأثیرگذاری در این سطوح نیز بیشتر می‌باشد. همچنین عمق برشی شعاعی در سطوح بالاتر سرعت برشی دارای تغییرات غیرخطی است. شکل 20 تا شکل 22 نیز کانتورهای زبری‌سطح را برای همان رویه‌های پاسخ نشان می‌دهد.



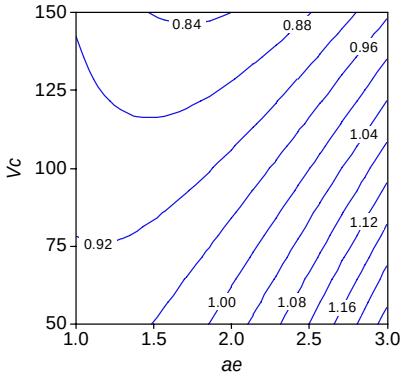
شکل 17 رویه پاسخ تداخل تأثیر سرعت برشی و عمق برشی شعاعی روی زبری‌سطح در حالت روان‌کاری تر



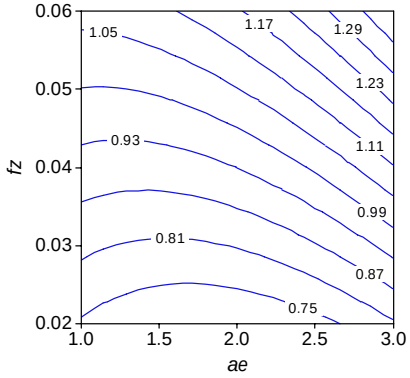
شکل 18 رویه پاسخ تداخل تأثیر نرخ پیشروی و عمق برشی شعاعی روی زبری‌سطح در حالت روان‌کاری تر



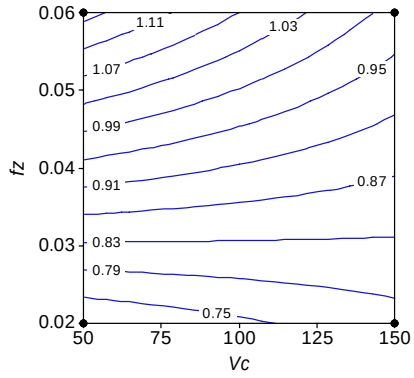
شکل 19 رویه پاسخ تداخل تأثیر نرخ پیشروی و سرعت برشی روی زبری‌سطح در حالت روان‌کاری تر



شکل 20 کانتور تداخل تأثیر سرعت برشی و عمق برشی شعاعی روی زبری‌سطح در حالت روان‌کاری تر



شکل 21 کانتور تأثیر نرخ پیشروی و عمق برشی شعاعی روی زبری‌سطح در حالت روان‌کاری تر



شکل 22 کانتور تداخل تأثیر نرخ پیشروی و سرعت پیشروی روی زبری‌سطح در حالت روان‌کاری تر

4-3-زبری‌سطح در حالت ماشین‌کاری با سیستم MQL

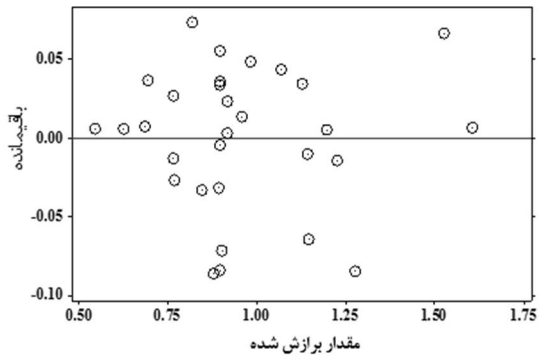
میزان تغییرات پاسخ زبری‌سطح میانگین در حالت روان‌کاری با حداقل سیال برشی برای هر سطح از پارامترها، در جدول 8 نشان داده‌شده است. بر این اساس، پیشروی مشابه حالات قبل دارای بیشترین تأثیر و عمق برشی محوری دارای اثری نسبتاً ناچیز بر زبری‌سطح می‌باشند. جدول 9 تحلیل واریانس مدل توسعه داده‌شده برای تخمین زبری‌سطح در حالت روان‌کاری با حداقل سیال برشی را پس از حذف پارامترهای بی‌معنی نشان می‌دهد. نتایج حکایت از معنی‌دار 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 95/4% به‌دست آمد، به این معنی که مدل برازش شده تا 95/4% از کل تغییرات زبری‌سطح را پوشش می‌دهد. از سوی دیگر بر اساس مقدار P برای فاکتور عدم انطباق، معنی‌دارنبودن این فاکتور اثبات شد. شکل 23 نشان می‌دهد که مقادیر باقیمانده‌های مدل توسعه یافته نسبت به مقادیر پیش‌بینی شده توسط آن، دارای پراکندگی نسبتا مناسبی بوده و شکل 24 نیز نشان می‌دهد که مقادیر این باقیمانده‌ها دارای توزیع نرمالی می‌باشند.

جدول 8 مقادیر زبری در روش MQL و در سطوح پارامترهای برشی

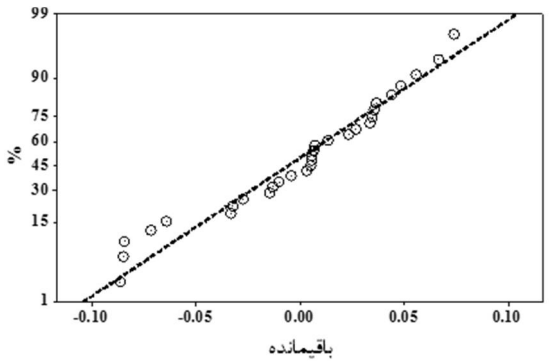
سطح	V_c	f_z	a_e	a_p
سطح 1	1/13	0/76	0/87	0/93
سطح 2	0/92	0/92	0/91	0/93
سطح 3	0/83	1/2	1/11	1/01
تغییرات	0/3	0/45	0/23	0/08
رتبه	2	1	3	4

جدول 9 تحلیل واریانس مدل زبری‌سطح در روش MQL

عامل	مجموع مربعات	درجه آزادی	مقدار F	مقدار P	سهم تأثیر (%)
a_p	0/029	1	10/46	0/0038	1/65
a_e	0/245	1	89	< 0/0001	14/07
V_c	0/402	1	146/03	< 0/0001	23/08
f_z	0/898	1	326/13	< 0/0001	51/55
$a_e x\ f_z$	0/036	1	13/11	0/0015	2/07
$V_c x\ f_z$	0/026	1	9/3	0/0059	1/47
a_e^2	0/046	1	16/62	0/0005	2/63
باقیمانده	0/061	22			3/48
عدم انطباق	0/047	17	1/04	0/53	
خطا	0/013	5			
کل	1/742	29			100



شکل 23 پراکندگی باقیمانده‌ها در مقابل مقادیر برازش شده مدل توسعه‌یافته زبری‌سطح برای روش MQL



شکل 24 توزیع نرمال باقیمانده‌های مدل توسعه‌یافته برای زبری‌سطح در روش MQL

بر اساس مدل توسعه‌یافته، فرمول تجربی برای تخمین زبری‌سطح در حالت روان‌کاری با حداقل سیال برشی به‌صورت معادله (3) به‌دست آمد.

$$Ra = 0.797 + 0.08a_p - 0.297a_e + 0.001V_c + 10.416f_z + 2.375a_e \times f_z + 0.04V_c \times f_z + 0.08a_e{}^2 \quad (3)$$

نتایج به‌دست آمده از تحلیل آماری نشان دادند که به‌ترتیب پیشروی با 51/5%، سرعت برشی با 23% و عمق برش شعاعی با 14% دارای بیشترین تأثیر روی زبری‌سطح می‌باشند. تداخل پیشروی با عمق برش شعاعی و سرعت برشی نیز دارای اثر معنی‌داری بودند که نمودار رویه پاسخ آن‌ها در شکل 25 و شکل 26 آورده شده است. در این حالت روان‌کاری نیز، شیب تغییرات فاکتورهای سرعت برشی و عمق برشی شعاعی در سطوح بالای پیشروی بیشتر بوده و میزان تأثیرگذاری آن‌ها نیز بالاتر است. در شکل 26

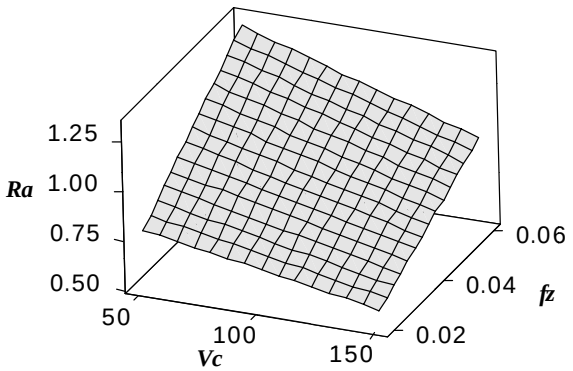
مشاهده می‌شود که در سطح پایین پیشروی، با افزایش عمق برش شعاعی، روند تغییرات زبری‌سطح ابتدا به مقدار جزئی بهبودیافته و سپس افزایش می‌یابد. این بهبود زبری در عمق برشی میانی را می‌توان ناشی از حذف اثر شخم‌زنی دانست. شخم‌زنی در عمق برشی و پیشروی پایین به‌علت ضخامت براده نتراشیده کوچک، ظاهر می‌شود. این پدیده منجر به جریان پلاستیک غیریکنواخت ماده شده و باعث خرابی سطح می‌شود [17].

شکل 27 و شکل 28 نیز کانتورهای زبری‌سطح را به‌ترتیب در صفحه پیشروی-سرعت برشی و پیشروی-عمق برشی شعاعی نشان می‌دهند. در شکل 27 مشاهده می‌شود که کمترین میزان زبری‌سطح در مقادیر پایین پیشروی و مقادیر بالای سرعت برشی حاصل می‌شود. همچنین شکل 28 نشان می‌دهد که در سطوح پایین عمق برشی شعاعی و پیشروی، کانتورهای زبری‌سطح خطی نبوده که بیانگر وجود اثر شخم‌زنی در سطوح پایین این پارامترها می‌باشد و این اثر در مقادیر بالاتر حذف می‌شود.

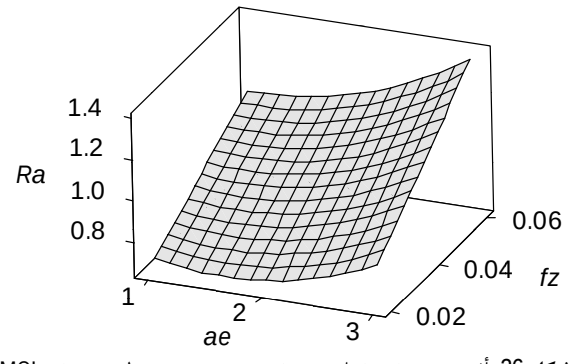
در حالت کلی، شرایط ماشین‌کاری شامل بالاترین سرعت برشی، پایین‌ترین سرعت پیشروی و مقادیر عمق برشی کم تا متوسط، کمترین مقدار زبری‌سطح را برای قطعه ماشین‌کاری ارائه می‌کنند. البته بایستی توجه داشت که در مقادیر پایین پیشروی و عمق برشی، امکان بروز پدیده شخم‌زنی و خرابی سطح می‌باشد و درنتیجه مقدار بهینه‌ای برای این پارامترها وجود دارد.

5- مقایسه نتایج

در شکل 29 تا شکل 32 نمودار تأثیرات اصلی میانگین زبری‌سطح، برای پارامترهای مختلف و در شرایط روان‌کاری مختلف نشان داده شده است. در مقایسه روش‌های روان‌کاری، مشاهده می‌شود که در تمامی سطوح و آزمایش‌ها، زبری‌سطح میانگین به‌دست آمده از روش ماشین‌کاری خشک دارای بیشترین مقدار بوده و روش روان‌کاری با استفاده از حداقل سیال برشی



شکل 25 رویه پاسخ تأثیر سرعت برشی و نرخ پیشروی بر زبری‌سطح در روش MQL



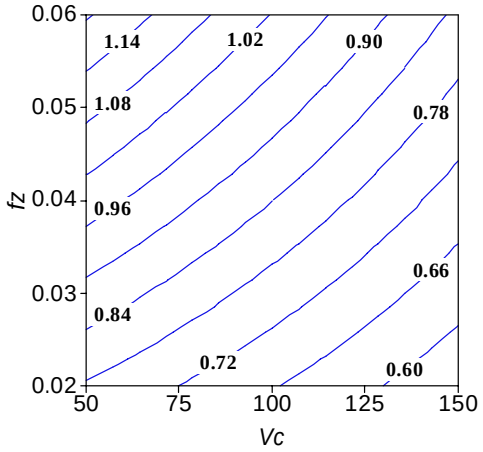
شکل 26 تأثیر عمق برشی شعاعی و نرخ پیشروی بر زبری‌سطح در روش MQL

دارای کمترین میزان زبری می‌باشد.

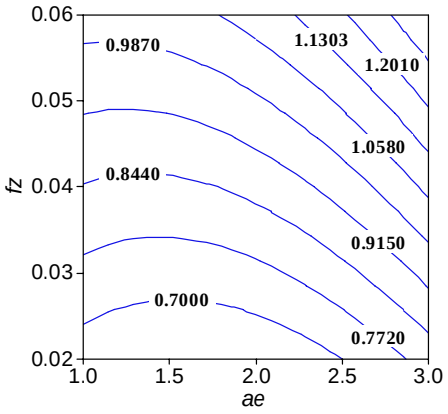
شکل 29 تأثیر تغییرات عمق برشی محوری روی زبری‌سطح را نشان می‌دهد. مطابق شکل، در مقادیر بالاتر عمق برشی، فاصله نمودار در دو حالت روان‌کاری تر و MQL بیشتر شده که بیانگر افزایش برتری روش MQL در عمق‌های بالاتر به‌علت نفوذ بیشتر سیال برشی است. شکل 30 نیز تأثیر تغییرات عمق برشی شعاعی روی زبری‌سطح را نشان می‌دهد که در آن، نمودارها تقریباً دارای روند ثابتی می‌باشند. به‌طورکلی افزایش عمق برشی شعاعی و محوری به‌علت افزایش میزان باربرداری و افزایش ارتعاش باعث افزایش زبری‌سطح می‌شوند. تفاوت جزئی بین تأثیر این دو عامل را می‌توان ناشی از تفاوت در مقادیر و بازه تغییرات این دو فاکتور دانست [18].

همچنین در شکل 31 تأثیر سرعت برشی روی زبری‌سطح نشان داده‌شده است. این نمودار اثر کاهنده سرعت برشی روی زبری‌سطح را نشان می‌دهد. دلیل این پدیده را می‌توان افت تنش سیلان و آسان‌تر شدن تغییر شکل پلاستیک ماده به‌دلیل افزایش درجه حرارت دانست، که باعث کاهش اصطکاک و نیروهای ماشین‌کاری شده و درنتیجه پایداری فرآیند و در پی آن کیفیت سطح افزایش می‌یابد [19].

مشاهده می‌شود که در سرعت برشی پایین، اثر حالت روان‌کاری تر و MQL، مشابه و نزدیک به یکدیگر هستند. در حقیقت، اندازه‌گیری‌ها نشان دادند که در سرعت برشی و عمق برش محوری پایین، مقادیر زبری‌سطح در حالت روان‌کاری تر و MQL بسیار نزدیک به هم بوده و در مواردی حتی حالت روان‌کاری تر دارای زبری‌سطح بهتری نسبت به حالت MQL است. علت این



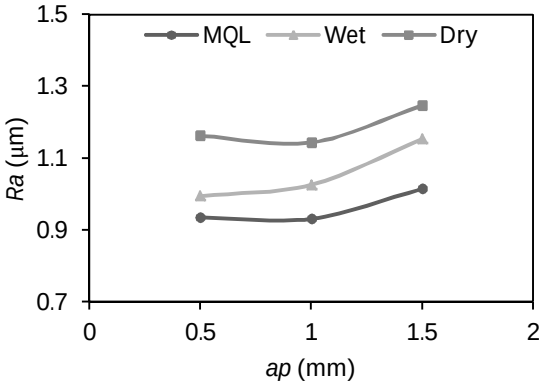
شکل 27 کانتور تأثیر نرخ پیشروی و سرعت پیشروی روی زبری‌سطح در روش MQL



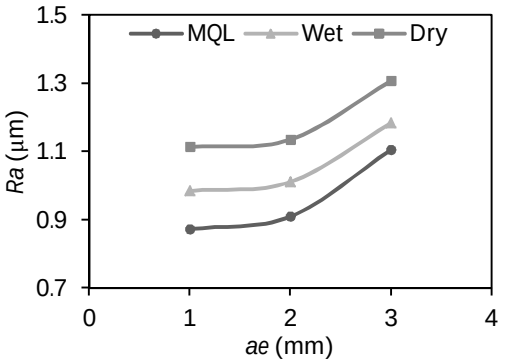
***شکل 28** کانتور تأثیر نرخ پیشروی و عمق برشی شعاعی روی بر در روش MQL*

پدیده را می‌توان نفوذ راحت روانکار به محل برش در این شرایط، در حالت روان‌کاری تر و بدون نیاز به فشار بالای روانکار دانست. مشاهده می‌شود که با افزایش عمق برش محوری و به‌ویژه سرعت برشی، اثر MQL در کاهش زبری‌سطح بارزتر شده است که علت رشد این اثر کاهنده را می‌توان توانایی بالاتر نفوذ سیال به محل ماشین‌کاری در سرعت‌های بیشتر با استفاده از این روش دانست.

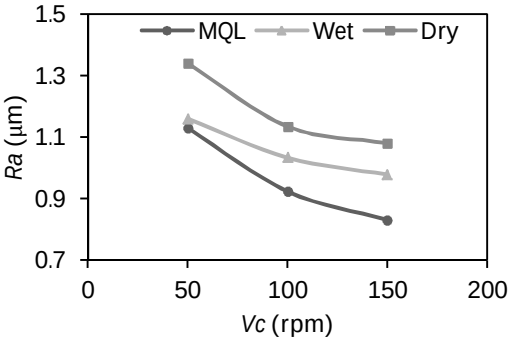
همچنین در شکل 32 تأثیر تغییرات پیشروی روی زبری‌سطح نشان داده‌شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش پیشروی، زبری‌سطح افزایش می‌یابد. در واقع با افزایش این پارامتر، تماس فیزیکی بین ابزار و قطعه‌کار بیشتر شده، اصطکاک و نیروهای ماشین‌کاری افزایش می‌یابد. بالا رفتن نیروها، باعث افزایش ارتعاش و بدتر شدن کیفیت سطح می‌شود[18]. همچنین نمودار تغییرات زبری‌سطح نسبت به تغییرات پیشروی، برای روش‌های مختلف روان‌کاری دارای روند ثابتی می‌باشند.



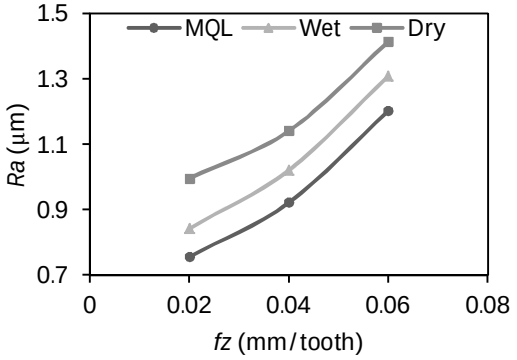
شکل 29 نمودار تأثیر عمق برش محوری بر زبری‌سطح میانگین.



شکل 30 نمودار تأثیر عمق برش شعاعی بر زبری‌سطح میانگین.



شکل 31 نمودار تأثیر سرعت برشی بر زبری‌سطح میانگین



شکل 32 نمودار تأثیر پیشروی بر زبری‌سطح میانگین

6- نتایج

در این پژوهش فرزکاری سخت فولاد 4340 با سختی 45 راکول‌سی در حضور روش‌های روان‌کاری مختلف شامل حالت خشک، تر و MQL مورد بررسی قرار گرفت و با استفاده از روش طراحی آزمایش رویه پاسخ، اثر پارامترهای فرآیند فرزکاری روی زبری‌سطح تعیین و میزان تأثیر آن‌ها در روش‌های مختلف روان‌کاری با یکدیگر مقایسه و بررسی شد. نتایج به‌دست آمده از این پژوهش به‌صورت خلاصه در ادامه آورده شده است:

1- روش طراحی آزمایش رویه پاسخ به خوبی برای مدل‌سازی تأثیر پارامترهای برشی روی خروجی‌های آزمایش مورداستفاده قرار گرفت و رابطه تخمین زده شده برای تمامی حالت‌های روان‌کاری به خوبی توانست نتایج زبری‌سطح را تخمین بزند.

2- در تمامی حالت‌های روان‌کاری، پیشروی با اختلاف زیادی به‌عنوان تأثیرگذارترین پارامتر مشخص شد و بعد از آن، سرعت برشی و عمق برش شعاعی بیشترین سهم تأثیر را به خود اختصاص دادند.

3- به‌طورکلی زبری‌سطح با افزایش پیشروی و عمق برشی افزایش یافت، درحالی‌که افزایش سرعت برشی دارای اثر کاهنده روی زبری‌سطح بود. در سطح پایین پیشروی نیز، کاهش عمق برشی باعث بروز پدیده شخم‌زنی و باعث خرابی سطح شد.

4- نتایج تحلیل نشان داد که زبری‌سطح به‌دست آمده با روش MQL همواره بهتر از شرایط خشک و یا تر بوده و این تأثیر در سرعت‌های برشی و عمق بالا، برجسته‌تر است.

7- مراجع

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

[2] S. R. Das, A. Kumar, D. Dhupal, 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*, Vol. 2, No. 4, pp. 453-445, 2013.

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

[4] J. Rech, A. Moisan, Surface integrity in finish hard turning of case-hardened steels, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 43, No. 5, pp. 550-543, 2003..

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

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

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

[8] 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. 271, No. 9, pp. 2465-2459, 2011.

[9] N. Dhar, M. Kamruzzaman ,M. Ahmed, Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear and surface roughness in turning AISI-4340steel, *Journal of materials processing technology*, Vol. 172, No. 2, pp. 304-299, 2006.

[10] R. Avila, A. Abrao, The effect of cutting fluids on the machining of hardened AISI 4340steel, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 119, No. 1, pp. 26-21, 2001.

[11] N. Boubekri, An Investigation in Drilling 1020Steel Using Minimum Quantity Lubrication, *International Journal of Applied*, Vol ,1 .No. 5, 2011.

[12] W. Y. H. Liew, Low-speed milling of stainless steel with TiAlN single-layer and TiAlN/AlCrN nano-multilayer coated carbide tools under different lubrication conditions, *Wear*, Vol. 269, No. 7, pp. 631-617, 2010.

[13] M. Nalbant, Y .Yildiz, Effect of cryogenic cooling in milling process of AISI 304stainless steel, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 21, No. 1, pp. 79-72, 2011.

[14] M. Khan, M. Mithu, N. Dhar, Effects of minimum quantity lubrication on turning AISI 9310alloy steel using vegetable oil-based cutting fluid, *Journal of materials processing Technology*, Vol. 209, No. 15, pp. -5573 5583, 2009..

[15] B. Tasdelen, T. Wikblom, S. Ekered, Studies on minimum quantity lubrication (MQL) and air cooling at drilling, *Journal of materials processing technology*, Vol. 200, No. 1, pp. 346-339, 2008.

[16] J. L. Yang, J. C. Chen, A systematic approach for identifying optimum surface roughness performance in end-milling operations, *Journal of industrial technology*, Vol. 17, No. 2, pp. 8-1, 2001.

[17] X. Cui, J. Zhao, C. Jia, Y. Zhou, Surface roughness and chip formation in high-speed face milling AISI H 13steel, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 61, No. 4-1, pp. 13-1, 2012.

[18] Q .An, C. Wang, J. Xu, P. Liu, M. Chen, Experimental investigation on hard milling of high strength steel using PVD-AlTiN coated cemented carbide tool, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, Vol. 43, pp. 101-94, 2014.

[19] M. A. Yallese, K. Chaoui, N. Zeghib, L. Boulanouar, J.-F. Rigal, Hard machining of hardened bearing steel using cubic boron nitride tool, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 2, pp. -1092 1104, 2009.