



تأثیر شرایط مختلف روان کاری روی زبری سطح فولاد آلیاژی 4340 در فرآیند فرزکاری سخت

حامد حسن پور¹، امیر راستی¹، محمدحسین صادقی^{2*}، محمدحسین سعادتبخش³، احمدرضا امیددودمان³

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

چکیده

اطلاعات مقاله

فولاد سخت کاری شده 4340 به دلیل ویژگی‌های خاص خود، کاربرد زیادی در صنعت دارد. ماشین کاری این فولاد پس از انجام عملیات حرارتی سخت کاری، می‌تواند باعث افزایش تولیدپذیری، کاهش هزینه تولید و بهبود خواص قطعه کار شود. زبری سطح نهایی در فرآیند ماشین کاری، 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 ماشین کاری است که علاوه بر جنبه‌های مثبت آن، دارای مشکلات زیست‌محیطی بوده و برای سلامت اپراتور خطرناک است. در نتیجه استفاده از روان کاری با حداقل سیال برشی به عنوان یک روش جایگزین مورد توجه می‌باشد. در این پژوهش، رابطه بین پارامترهای فرزکاری و کیفیت سطح قطعه نهایی در فرزکاری فولاد سخت کاری شده 4340 و در حضور سیستم‌های مختلف روان کاری شامل حالت خشک، تر و حداقل روانکار بررسی شده است. پارامترهای سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق برش محوری و شعاعی، به عنوان پارامترهای اصلی فرآیند فرزکاری در نظر گرفته شده‌اند. روش طراحی آزمایش رویه پاسخ نیز برای بررسی اثر پارامترها روی زبری سطح، مورداستفاده قرار گرفت و در مجموع 90 آزمایش انجام شده است. نتایج نشان داد که از بین پارامترهای برشی، به ترتیب نرخ پیشروی و سرعت برشی بیشترین تأثیر را روی زبری سطح داشته و زبری سطح با افزایش سرعت برشی و کاهش پیشروی کمتر شد. همچنین روان کاری 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.

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 23 اردیبهشت 1393
پذیرش: 19 مرداد 1393
ارائه در سایت: 19 مهر 1393
کلید واژگان:
فرزکاری
فولاد سخت کاری شده 4340
روان کاری با حداقل سیال برشی
زبری سطح

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

Hamed Hassanpour¹, Amir Rasti¹, Mohammad Hosein Sadeghi^{1*}, Mohammad Hosein Saadatbakhsh¹, Ahmad Reza Omiddodman¹

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

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. ماشین کاری این فولاد معمولاً در

فولادهای سخت¹ به‌طور گسترده در صنایع مختلف و به‌خصوص مجموعه‌های

1- Hardened Steels

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)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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 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 خنک کاری و روان کاری در فرآیند ماشین کاری صورت گرفته است.

سیلوا و همکاران [8] تأثیر سه محیط خشک، روان کاری MQL و سنتی را روی میزان سایش ابزار و زبری سطح فولاد آلیاژی AISI 4340 در فرآیند فرزکاری مورد بررسی قرار دادند. دار و همکاران [9] به بررسی اثر روان کاری با روش MQL روی زبری سطح در تراشکاری فولاد 4340 پرداختند و مشخص شد که استفاده از این روش باعث کاهش دمای منطقه برش و در نتیجه کاهش زبری سطح می‌شود. آویلا و همکاران [10] تراشکاری فولاد سخت شده 4340 را مورد ارزیابی قرار دادند و نشان دادند که در میان سیال‌های برشی مختلف، امولسیون بدون روغن، بهترین صافی سطح را نتیجه می‌دهد. بوبکری و همکاران [11] فرآیند سوراخ کاری فولاد 1020 را تحت شرایط روان کاری MQL و تر، با استفاده از ابزار فولاد تندر و در پوشش‌ها و هندسه‌های مختلف مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که میزان سایش ابزار، زبری سطح 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 روان کاری تر و حالت مه افشانی⁵، به‌وسیله دو نوع ابزار تک‌لایه و چندلایه انجام دادند. نالبانت و همکاران [13] تأثیر خنک کاری برودتی را در فرآیند فرزکاری AISI 304 و در مقایسه با دو محیط MQL و خشک مطالعه کردند و پی بردند که میزان نیروهای ماشین کاری و گشتاور اعمالی، در حالت برودتی بیشتر از حالت MQL و خشک است. خان و همکاران [14] تأثیر روان کاری MQL با روغن پایه گیاهی را در مقابل ماشین کاری خشک و تر، در تراشکاری فولاد آلیاژی AISI 9310 مورد مطالعه قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که میزان زبری سطح قطعه کار در حالت MQL نسبت به دو حالت دیگر به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. تاسلدن و همکاران [15] تأثیر شرایط مختلف روان کاری MQL را روی میزان سایش ابزار، نیروها، گشتاور و زبری سطح در فرآیند سوراخ کاری نوعی فولاد چرخنده 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 زبری سطح در فرآیند فرزکاری فولاد سخت شده 4340، با استفاده از روش‌های روان کاری مختلف شامل تکنیک روان کاری MQL، تر و خشک و در نهایت پیشنهاد روش روان کاری مناسب برای دستیابی به زبری سطح کمینه است. به‌همین منظور با کمک روش طراحی آزمایش رویه پاسخ⁶ و تحلیل آماری، تأثیر پارامترهای مختلف فرزکاری در حالت‌های مختلف روان کاری، روی زبری سطح، بررسی و عملکرد این تکنیک‌ها با یکدیگر مقایسه شده است.

2- مواد و تجهیزات مورد استفاده

جنس ماده قطعه کار در این تحقیق، فولاد 4340 سخت شده با سختی 45 راکولسی بود. آزمایش‌های طرح‌ریزی شده روی نمونه‌هایی مکعبی شکل به ابعاد 20x40x40 میلی‌متر انجام شد. ترکیب شیمیایی این فولاد که با تحلیل

حالت آنیل یا نرماله انجام می‌شود و بعد از انجام عملیات حرارتی سنگ زده می‌شوند. با استفاده از ماشین کاری سخت¹ می‌توان این مراحل اضافی را حذف نمود و بهره‌وری را افزایش داد. همچنین استفاده از ماشین کاری 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. 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 [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 ماشین کاری می‌باشد. محققان بسیاری در زمینه سلامت سطح، بخصوص زبری سطح در ماشین کاری مواد سخت مطالعاتی را انجام داده‌اند.

داس و همکاران [2] میزان زبری سطح را در فرآیند تراشکاری سخت فولاد آلیاژی 4340 سخت کاری شده، به‌وسیله ابزار اینستریتی پوشش‌دار مورد بررسی قرار دادند. 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 زبری سطح 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 زبری سطح در تراشکاری قطعات با سختی بالاتر از 50 راکولسی کاهش می‌یابد. رک و مویسان [4] مطالعاتی را درباره اثرات نرخ پیشروی، سرعت برشی و سایش ابزار بر روی سلامت سطح در تراشکاری سخت روی چرخ‌دنده‌های سخت شده 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.

یکی دیگر از مسائل مهم در فرآیند ماشین کاری فولادهای سخت، استفاده از سیال برشی است. انتخاب صحیح سیال برشی، علاوه بر دقت و کیفیت سطح، نقش مهمی را نیز در کاهش اصطکاک، خنک کاری و جلوگیری از ایجاد گرمای بیش‌ازحد در محیط ماشین کاری ایفا می‌کند [5]. تأثیر روان کاری در عملیات ماشین کاری، به‌شدت وابسته به انتخاب نوع سیال روانکار و سیستم پاشش آن بر ناحیه برش است. مهم‌ترین روش‌های روان کاری در ماشین کاری شامل سیستم‌های خشک²، تر³ و حداقل سیال برشی (MQL⁴) هستند. با این وجود، استفاده از سیال برشی در عملیات ماشین کاری به‌علت مسائل اقتصادی، زیست‌محیطی و سلامت اپراتور در دسرساز است. بهترین راه برای کاهش اثرات منفی سیال برشی، حذف کامل آن است که نهایتاً منجر به ماشین کاری در حالت خشک می‌شود. قطعات سخت، قابلیت ماشین کاری در حالت عدم استفاده از سیال برشی (ماشین کاری 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، بالا رفتن حرارت لبه برشی و کیفیت سطح پایین قطعه تولیدی اشاره کرد [7]. روان کاری با استفاده از حداقل سیال برشی به‌عنوان فرآیندی سازگار با محیط‌زیست، روشی است که در آن مقدار کمی از سیال

1- Hard Machining

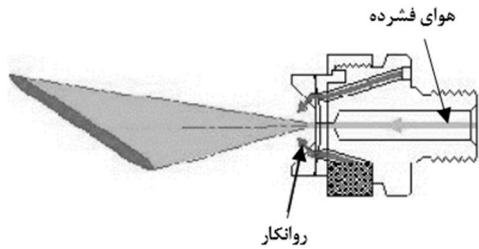
2- Dry

3- Wet

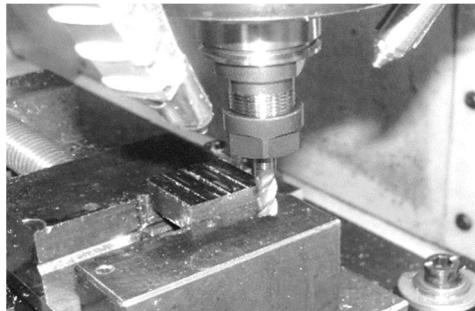
4- Minimum Quantity Lubrication

5- Mist

6- Response Surface Method (RSM)



شکل 2 نازل اتمیزه کننده دستگاه



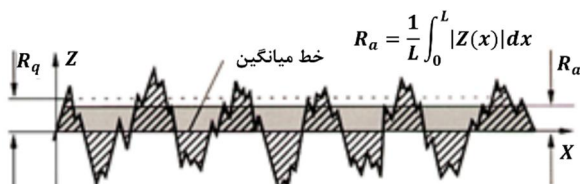
شکل 3 نحوه قرارگیری نازل ها در زمان ماشین کاری

اندازه گیری زبری سطح با استفاده از دستگاه زبری سنج پرتابل مار 3 مدل PS1 انجام گرفت. روش های مختلفی برای بیان عدد زبری سطح وجود دارد. یکی از آن ها زبری متوسط است که معمولاً با Ra نشان داده می شود. 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 اندازه گیری می باشد [16].

3- روش انجام آزمایش

به منظور بررسی تأثیر شرایط ماشین کاری و حالت های روان کاری مختلف روی زبری سطح در ماشین کاری فولاد سخت شده 4340، چهار فاکتور سرعت برشی (V_c)، سرعت پیشروی (f_r)، عمق برش محوری (a_p) و عمق برش شعاعی (a_e) به عنوان اصلی ترین پارامترهای فرزکاری، در 3 سطح تغییر داده شدند. در این تحقیق، طرح آزمایش رویه پاسخ برای طرح ریزی آزمایش ها بکار گرفته شد. در این روش از تعداد آزمایش های ثابتی با توجه به سطوح و عوامل، استفاده می شود. در حالت فاکتوریل کامل (حالت عمومی)، اگر 4 عامل وجود داشته باشد، که در 3 سطح تغییر کنند، تعداد حالت های 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 می شود.

در این 30 آزمایش، به غیر از آزمایش مربوط به نقطه مرکزی (با 6 بار تکرار) هیچ آزمایش دیگری تکرار نمی شود. این روش یکی از پرکاربردترین روش های طرح ریزی آزمایش است. با این روش بهتر و واضح تر می توان تغییرات خروجی را با توجه به پارامترهای ورودی مختلف نشان داد. پارامترهای فرزکاری، تعداد سطوح و مقادیر آن ها در جدول 2 آمده است.



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

کوانتومتری به دست آمده در جدول 1 ارائه شده است. به منظور افزایش سختی تا 45 راکول سی، نمونه ها در کوره با دمای 870 درجه سانتی گراد آستنیت شده، سپس به مدت 2 ساعت در دمای 425 درجه سانتی گراد برگشت داده شدند و در نهایت در حمام روغن به دمای محیط رسیدند. برای انجام آزمایش ها، از ماشین فرز CNC چهار محوره کنترل همزمان میکرون¹ UCP710 با کنترلر TNC42 و حداکثر دور اسپیندل 42000 دور بر دقیقه استفاده شد. در تمامی تست ها، تیغه فرز سر تخت تنگستن کارباید 4 لبه، با پوشش TiAlN و قطر 12 میلی متر، محصول شرکت هم تولز² آلمان مورد استفاده قرار گرفت. بعد از انجام هر آزمایش، ابزارها بررسی شده و به منظور اطمینان از صحت نتایج، پس از هر 5 پاس فرزکاری نیز ابزارها تعویض شدند.

به منظور اعمال جریان روانکار MQL، از سیستم نشان داده شده در شکل 1 استفاده شد. در این سیستم از یک کمپرسور جهت تولید هوای فشرده استفاده می شود 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 به کمک یک پمپ به نازل هدایت می شود و میزان دبی روغن با تغییر فرکانس پمپ قابل تنظیم می باشد. دستگاه دارای نازل اتمیزه کننده ای (شکل 2) است که جریان هوا و جریان روغن به طور جداگانه وارد آن می شوند. 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 می گیرند. قطرات روغن در جریان گاز حامل، تشکیل اسپری روغن-هوا داده که از آن برای روان کاری ناحیه ماشین کاری استفاده می شود. روان کاری MQL در آزمایش ها با استفاده از روغن معدنی، با دبی 240 میلی لیتر بر ساعت و فشار 6 بار انجام شد. به منظور عملکرد بهتر سیستم روان کاری، 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 استفاده شده جهت انجام آزمایش

ادامه جدول 3 ماتریس طراحی آزمایش رویه پاسخ به همراه نتایج

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

در نظر گرفته شدند.

جدول 5 تحلیل واریانس مدل زبری سطح در حالت ماشین کاری 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

تحلیل واریانس مدل توسعه داده شده نهایی را پس از حذف پارامترهای بی معنی نشان می دهد. مطابق جدول، مقادیر P با بزرگی کمتر از 0/05 (قابلیت اطمینان بالاتر از 95%) نشان دهنده معنی دار بودن فاکتورها می باشند. نتایج حکایت از معنی دار بودن تأثیر تمامی پارامترهای اصلی، تداخل پیشروی با همه فاکتورها و تداخل عمق برش شعاعی با سرعت برشی دارد. همچنین مقدار R_{sq} برای مدل توسعه داده شده نهایی، در حالت ماشین کاری خشک، برابر با 91/8% به دست آمد، به این معنی که مدل برازش شده تا 91/8% از کل تغییرات زبری سطح را در حالت ماشین کاری خشک پوشش می دهد. از سوی دیگر بر اساس مقدار P برای فاکتور عدم انطباق، معنی دار نبودن این فاکتور اثبات شد که تأیید دیگری بر درستی مدل

بر این اساس، در مجموع تعداد 90 آزمایش با 3 بار تکرار انجام گرفت. آزمایش ها به منظور جلوگیری از بروز خطا، به صورت تصادفی انجام شدند. استراتژی ماشین کاری، فرزکاری موافق بود که در سه حالت روان کاری مختلف شامل روش MQL، تر و خشک صورت پذیرفت. در هر آزمایش، 160 میلی متر از طول قطعه ماشین کاری شد. برای انجام تحلیل های آماری نیز از نرم افزار Minitab 17 بهره گرفته شد.

4- نتیجه گیری و جمع بندی

همان طور که اشاره شد، در کل 90 آزمایش انجام گرفت و پس از انجام هر آزمایش، مقادیر زبری سطح ناحیه ماشین کاری شده اندازه گیری شد. برای تعیین مقدار زبری سطح در هر نمونه، اندازه گیری ها با استفاده از دستگاه زبری سنج در 3 ناحیه و هر کدام به طول 5/6 میلی متر صورت پذیرفت و میانگین این سه اندازه گیری به عنوان زبری متوسط سطح ماشین کاری شده گزارش شد. جدول 3 مقادیر پارامترهای برشی در هر آزمایش را به همراه تمامی مقادیر اندازه گیری شده زبری سطح، در سه حالت MQL، تر و خشک نشان می دهد.

4-1- زبری سطح در حالت ماشین کاری خشک

میزان تغییرات پاسخ زبری سطح میانگین در ماشین کاری خشک و برای هر سطح پارامترهای برشی، در جدول 4 نشان داده شده است. ردیف آخر در این جدول، رتبه هر فاکتور را در میزان تأثیرگذاری روی زبری سطح نشان می دهد. بر این اساس، پیشروی بیشترین و عمق برشی محوری کمترین تأثیر را بر زبری سطح دارند. به منظور تخمین دقیق تر زبری سطح در حالت ماشین کاری خشک و بررسی معنی دار بودن پارامترها، از تحلیل واریانس¹ 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 بی معنی حذف و به عنوان خطا

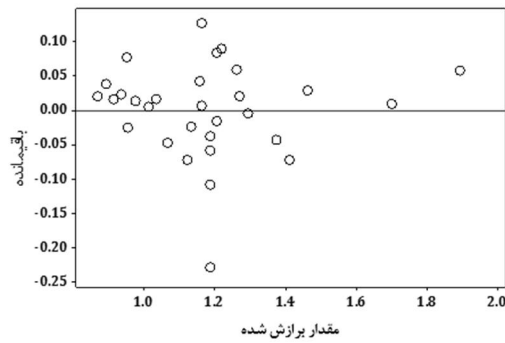
جدول 2 پارامترهای مورد آزمایش و سطوح آنها

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

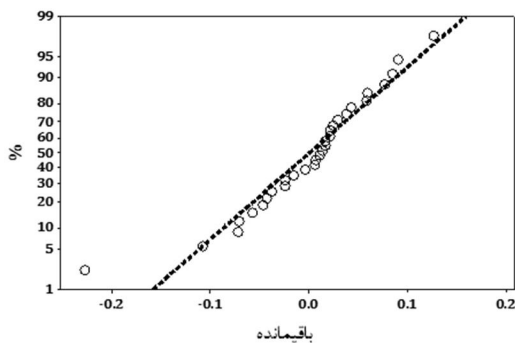
جدول 3 ماتریس طراحی آزمایش رویه پاسخ به همراه نتایج

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

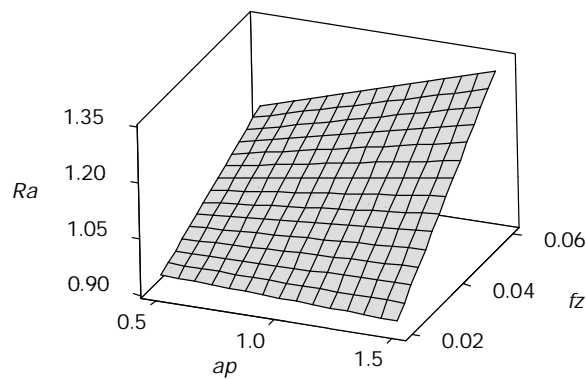
1- ANOVA



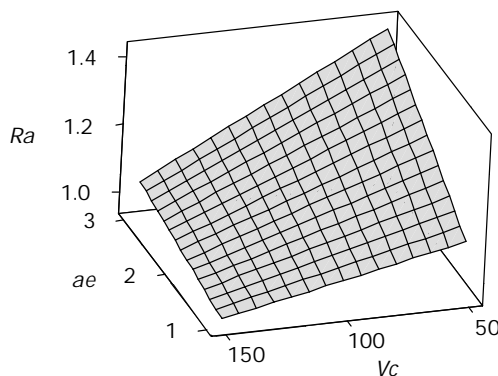
شکل 5 پراکندگی باقیمانده‌ها در مقابل مقادیر برآزش شده در مدل توسعه یافته زبری سطح در حالت ماشین کاری خشک



شکل 6 توزیع نرمال باقیمانده‌ها در مدل توسعه یافته زبری سطح در حالت ماشین کاری خشک



شکل 7 رویه پاسخ تداخل تأثیر عمق برش محوری و نرخ پیشروی روی زبری سطح در حالت ماشین کاری خشک



شکل 8 رویه پاسخ تداخل تأثیر عمق برش شعاعی و سرعت برشی روی زبری سطح در حالت ماشین کاری خشک

توسعه داده شده 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 توسعه یافته، فرمول تجربی برای تخمین زبری سطح در حالت ماشین کاری خشک از معادله (1) به دست آمد.

نتایج به دست آمده از تحلیل آماری نشان دادند که به ترتیب پیشروی با 35/43%، سرعت برشی با 23/15% و عمق برش شعاعی با 12/8% دارای بیشترین تأثیر روی زبری سطح 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 قابل توجه در این شکل‌ها را می‌توان بی‌تأثیر بودن بقیه پارامترها در سطح پایین پیشروی دانست که نشان‌دهنده تأثیرگذاری بالای سرعت پیشروی روی زبری سطح در حالت خشک است. همچنین شیب تغییرات زبری سطح 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 زبری سطح را برای همان رویه‌های پاسخ نشان می‌دهد.

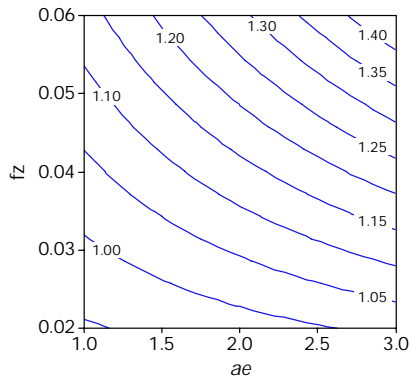
$$Ra = 0.77 - 0.13a_p + 0.084a_e + 0.0018V_c + 4.195f_z + 5.375a_p \times f_z - 0.0011a_e \times V_c + 3.125a_e \times f_z - 0.0537V_c \times f_z \quad (1)$$

جدول 4 مقادیر زبری سطح در ماشین کاری خشک و در سطوح پارامترهای برشی

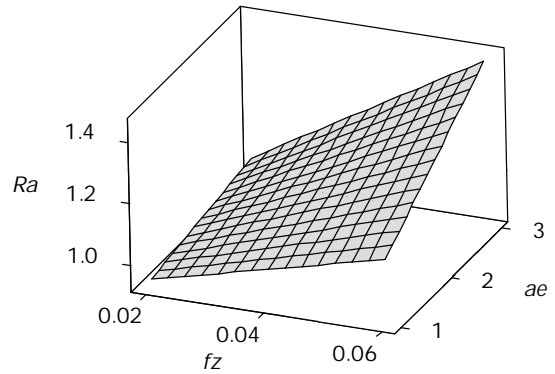
سطح	a_p	a_e	V_c	f_z
سطح 1	1/16	1/11	1/34	1
سطح 2	1/14	1/14	1/14	1/14
سطح 3	1/25	1/31	1/08	1/41
تغییرات	0/1	0/19	0/26	0/41
رتبه	4	3	2	1

جدول 5 تحلیل واریانس مدل زبری سطح در حالت ماشین کاری خشک

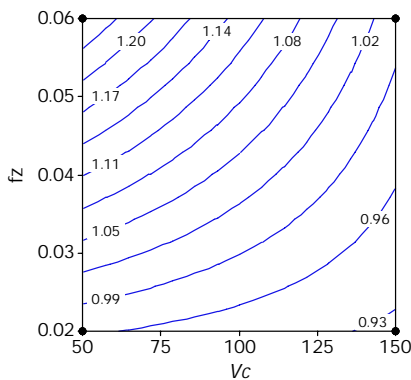
عامل	مجموع مربعات	درجه آزادی	مقدار F	مقدار P	سهم تأثیر (%)
a_p	0/032	1	4/87	0/039	2/44
a_e	0/168	1	25/54	< 0/0001	12/8
V_c	0/304	1	46/19	< 0/0001	23/15
f_z	0/465	1	70/66	< 0/0001	35/43
$a_p \times f_z$	0/046	1	7/02	0/015	3/52
$a_e \times V_c$	0/051	1	7/69	0/012	3/85
$a_e \times f_z$	0/063	1	9/49	0/005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



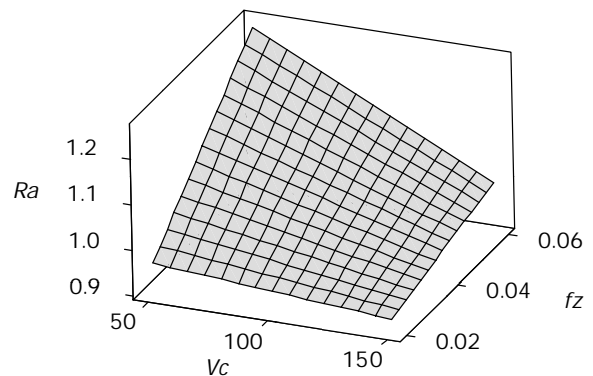
شکل 13 کانتور تداخل تأثیر عمق برش شعاعی و نرخ پیشروی روی زبری سطح در حالت ماشین کاری خشک



شکل 9 رویه پاسخ تداخل تأثیر عمق برش شعاعی و نرخ پیشروی روی زبری سطح در حالت ماشین کاری خشک



شکل 14 کانتور تداخل تأثیر سرعت برشی و نرخ پیشروی روی زبری سطح در حالت ماشین کاری خشک



شکل 10 رویه پاسخ تداخل تأثیر سرعت برشی و نرخ پیشروی روی زبری سطح در حالت ماشین کاری خشک

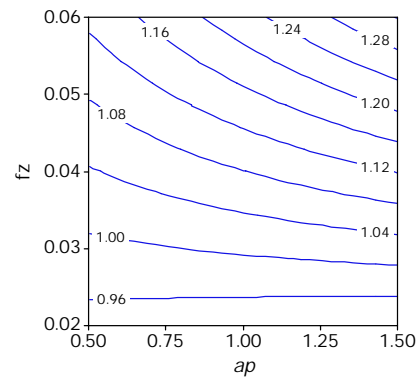
4-2- زبری سطح در حالت ماشین کاری تر

میزان تغییرات پاسخ زبری سطح میانگین در حالت روان کاری تر برای هر سطح پارامترهای برشی، در جدول 6 نشان داده شده است. در این حالت ماشین کاری نیز، پیشروی بیشترین و عمق برشی کمترین تأثیر را روی زبری سطح داشتند. مشابه قبل، مدلی برای تخمین زبری سطح در حالت روان کاری تر توسعه داده شد. جدول 7 تحلیل واریانس مدل توسعه داده شده نهایی را پس از حذف پارامترهای بی معنی نشان می دهد. نتایج حکایت از معنی دار 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% به دست آمد، به این معنی که مدل برازش شده تا 94/65% از کل تغییرات زبری سطح را پوشش می دهد. از سوی دیگر براساس مقدار P برای فاکتور عدم انطباق، معنی دار نبودن این فاکتور اثبات شد که تأیید دیگری بر درستی مدل توسعه داده شده بود. شکل 15 نشان می دهد که مقادیر باقیمانده ها نسبت به مقادیر برازش شده دارای پراکندگی نسبتاً مناسبی بوده و شکل 16 نیز نشان می دهد که مقادیر این باقیمانده ها دارای توزیع نرمال می باشند.

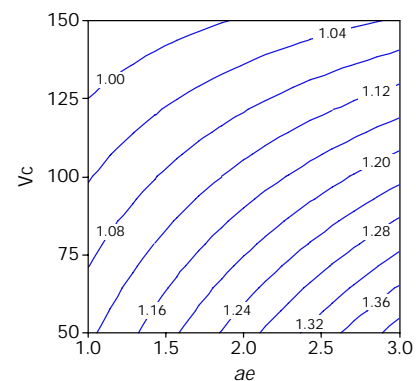
جدول 6 مقادیر زبری سطح در حالت روان کاری تر و در سطوح پارامترهای برشی

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 زبری سطح در حالت روان کاری تر

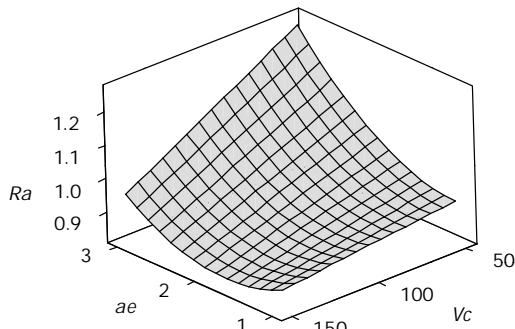


شکل 11 کانتور تداخل تأثیر عمق برش محوری و نرخ پیشروی بر زبری سطح در حالت ماشین کاری خشک

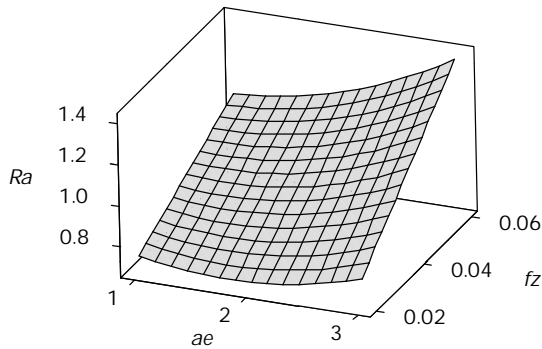


شکل 12 کانتور تداخل تأثیر عمق برش شعاعی و سرعت برشی روی زبری سطح در حالت ماشین کاری خشک

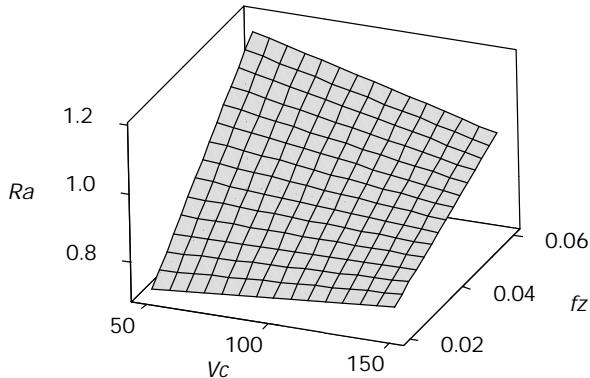
دارای تغییرات غیرخطی است. شکل 20 تا شکل 22 نیز کانتورهای زبری سطح را برای همان رویه‌های پاسخ نشان می‌دهد.



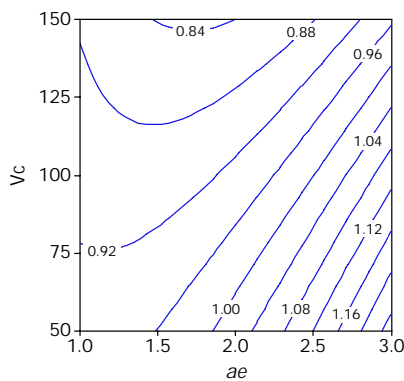
شکل 17 رویه پاسخ تداخل تأثیر سرعت برشی و عمق برشی شعاعی روی زبری سطح در حالت روان کاری تر



شکل 18 رویه پاسخ تداخل تأثیر نرخ پیشروی و عمق برشی شعاعی روی زبری سطح در حالت روان کاری تر

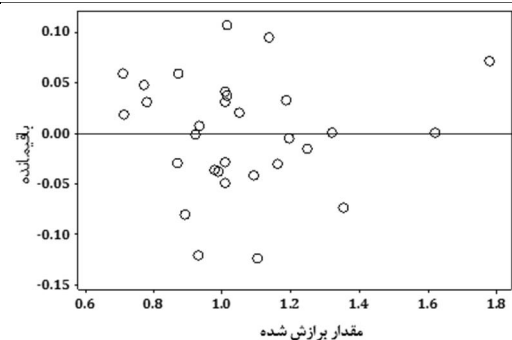


شکل 19 رویه پاسخ تداخل تأثیر نرخ پیشروی و سرعت برشی روی زبری سطح در حالت روان کاری تر

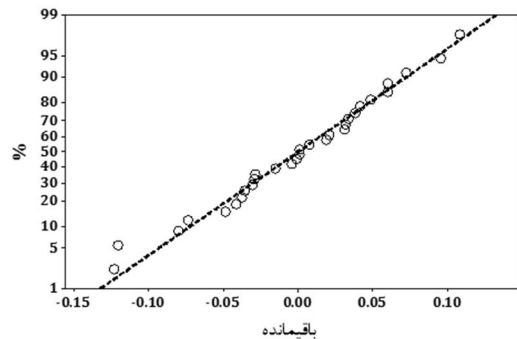


شکل 20 کانتور تداخل تأثیر سرعت برشی و عمق برشی شعاعی روی زبری سطح در حالت روان کاری تر

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
$a_e \times V_c$	0/058	1	12/91	0/0017	3/32
$a_e \times f_z$	0/079	1	17/58	0/0004	4/52
$V_c \times f_z$	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 توسعه یافته زبری سطح در حالت روان کاری تر



شکل 16 توزیع نرمال باقیمانده‌های مدل توسعه یافته برای زبری سطح در حالت روان کاری تر

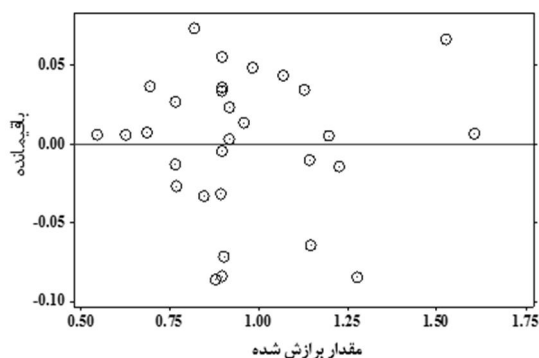
بر اساس مدل توسعه یافته، فرمول تجربی برای تخمین زبری سطح در حالت روان کاری تر به صورت معادله (2) به دست آمد.

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

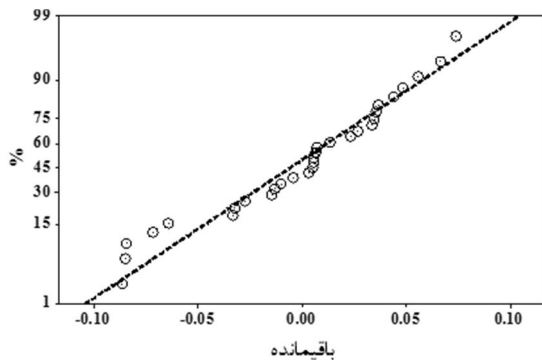
نتایج به دست آمده از تحلیل آماری نشان دادند که به ترتیب پیشروی با 56/03% عمق برش شعاعی با 10/2%، سرعت برشی با 8/5% و عمق برش محوری با 6/5% دارای بیشترین تأثیر روی زبری سطح می‌باشند. نمودار رویه پاسخ تداخل عمق برش شعاعی با پیشروی و سرعت برشی، و پیشروی با سرعت برشی در شکل 17 تا شکل 19 آمده است. در این شکل‌ها نیز شیب تغییرات زبری سطح، 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

جدول 9 تحلیل واریانس مدل زبری سطح 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
$a_e \times f_z$	0/036	1	13/11	0/0015	2/07
$V_c \times f_z$	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



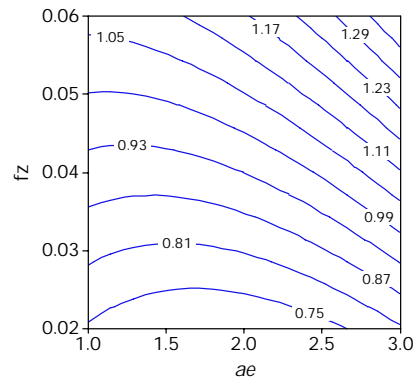
شکل 23 پراکندگی باقیمانده‌ها در مقابل مقادیر برازش شده مدل توسعه یافته زبری سطح برای روش MQL



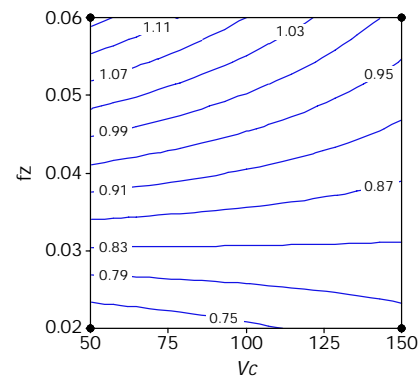
شکل 24 توزیع نرمال باقیمانده‌های مدل توسعه یافته برای زبری سطح در روش MQL بر اساس مدل توسعه یافته، فرمول تجربی برای تخمین زبری سطح در حالت روان کاری با حداقل سیال برشی به صورت معادله (3) به دست آمد.

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

نتایج به دست آمده از تحلیل آماری نشان دادند که به ترتیب پیشروی با 51/5%، سرعت برشی با 23% و عمق برش شعاعی با 14% دارای بیشترین تأثیر روی زبری سطح می‌باشند. تداخل پیشروی با عمق برش شعاعی و سرعت برشی نیز دارای اثر معنی داری بودند که نمودار رویه پاسخ آن‌ها در شکل 25 و شکل 26 آورده شده است. در این حالت روان کاری 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



شکل 21 کانتور تأثیر نرخ پیشروی و عمق برشی شعاعی روی زبری سطح در حالت روان کاری تر



شکل 22 کانتور تداخل تأثیر نرخ پیشروی و سرعت پیشروی روی زبری سطح در حالت روان کاری تر

3-4- زبری سطح در حالت ماشین کاری با سیستم MQL

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

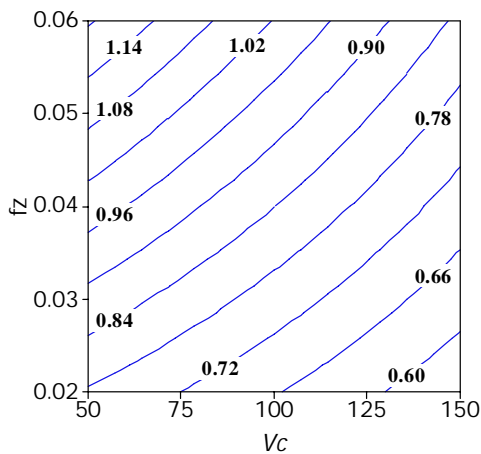
جدول 8 مقادیر زبری در روش MQL و در سطوح پارامترهای برشی

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

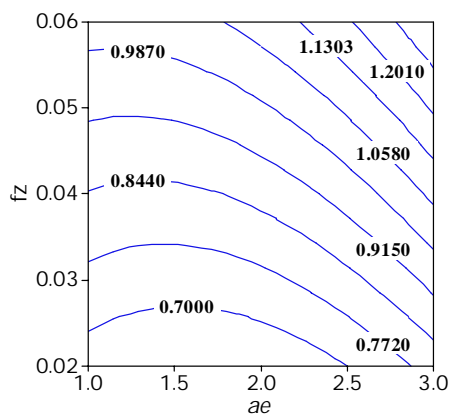
دارای کمترین میزان زبری می‌باشد. شکل 29 تأثیر تغییرات عمق برشی محوری روی زبری سطح را نشان می‌دهد. مطابق شکل، در مقادیر بالاتر عمق برشی، فاصله نمودار در دو حالت روان کاری تر و MQL بیشتر شده که بیانگر افزایش برتری روش MQL در عمق‌های بالاتر به علت نفوذ بیشتر سیال برشی است. شکل 30 نیز تأثیر تغییرات عمق برشی شعاعی روی زبری سطح را نشان می‌دهد که در آن، نمودارها تقریباً دارای روند ثابتی می‌باشند. به‌طور کلی افزایش عمق برشی شعاعی و محوری به علت افزایش میزان باربرداری و افزایش ارتعاش باعث افزایش زبری سطح 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 زبری سطح نشان داده شده است. این نمودار اثر کاهنده سرعت برشی روی زبری سطح را نشان می‌دهد. 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 [19].

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



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



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

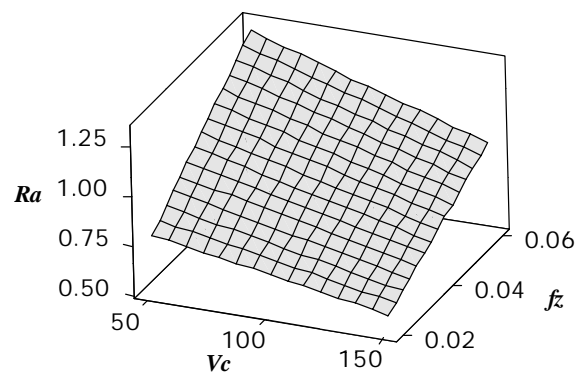
مشاهده می‌شود که در سطح پایین پیشروی، با افزایش عمق برش شعاعی، روند تغییرات زبری سطح ابتدا به مقدار جزئی بهبود یافته و سپس افزایش می‌یابد. این بهبود زبری در عمق برشی میانی را می‌توان ناشی از حذف اثر شخم‌زنی دانست. شخم‌زنی در عمق برشی و پیشروی پایین به علت ضخامت براده نتراشیده کوچک، ظاهر می‌شود. این پدیده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

شکل 27 و شکل 28 نیز کانتورهای زبری سطح را به ترتیب در صفحه پیشروی-سرعت برشی و پیشروی-عمق برشی شعاعی نشان می‌دهند. در شکل 27 مشاهده می‌شود که کمترین میزان زبری سطح 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 زبری سطح خطی نبوده که بیانگر وجود اثر شخم‌زنی در سطوح پایین این پارامترها می‌باشد و این اثر در مقادیر بالاتر حذف می‌شود.

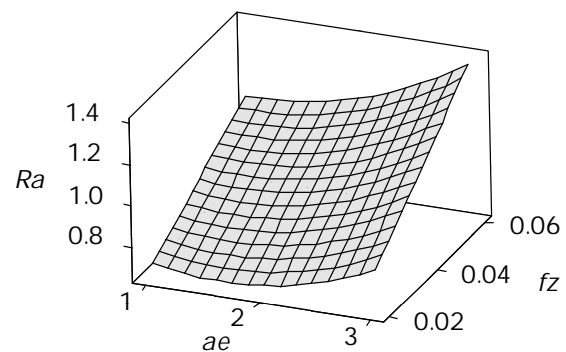
در حالت کلی، شرایط ماشین‌کاری شامل بالاترین سرعت برشی، پایین‌ترین سرعت پیشروی و مقادیر عمق برشی کم تا متوسط، کمترین مقدار زبری سطح را برای قطعه ماشین‌کاری ارائه می‌کنند. البته بایستی توجه داشت که در مقادیر پایین پیشروی و عمق برشی، امکان بروز پدیده شخم‌زنی و خرابی سطح می‌باشد و در نتیجه مقدار بهینه‌ای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

5- مقایسه نتایج

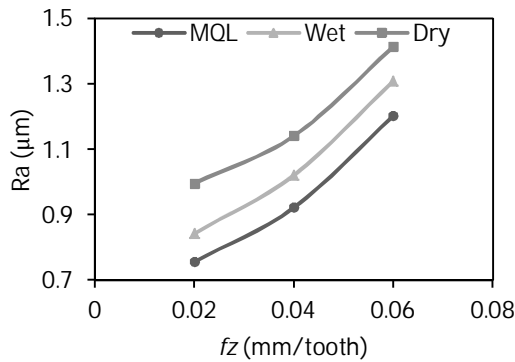
در شکل 29 تا شکل 32 نمودار تأثیرات اصلی میانگین زبری سطح، برای پارامترهای مختلف و در شرایط روان کاری مختلف نشان داده شده است. در مقایسه روش‌های روان کاری، مشاهده می‌شود که در تمامی سطوح و آزمایش‌ها، زبری سطح میانگین به دست آمده از روش ماشین‌کاری خشک دارای بیشترین مقدار بوده و روش روان کاری با استفاده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



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



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



شکل 32 نمودار تأثیر پیشروی بر زبری سطح میانگین

6- نتایج

در این پژوهش فرزکاری سخت فولاد 4340 با سختی 45 راکولسی در حضور روش‌های روان کاری 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 زبری سطح تعیین و میزان تأثیر آن‌ها در روش‌های مختلف روان کاری با یکدیگر مقایسه و بررسی شد. نتایج به دست آمده از این پژوهش به صورت خلاصه در ادامه آورده شده است:

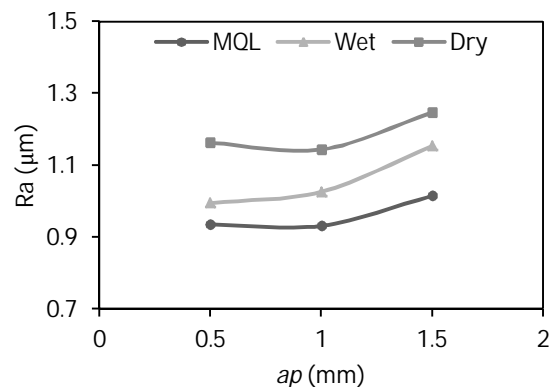
- 1- روش طراحی آزمایش رویه پاسخ به خوبی برای مدل‌سازی تأثیر پارامترهای برشی روی خروجی‌های آزمایش مورد استفاده قرار گرفت و رابطه تخمین زده شده برای تمامی حالت‌های روان کاری به خوبی توانست نتایج زبری سطح را تخمین بزند.
- 2- در تمامی حالت‌های روان کاری، پیشروی با اختلاف زیادی به‌عنوان تأثیرگذارترین پارامتر مشخص شد و بعد از آن، سرعت برشی و عمق برش شعاعی بیشترین سهم تأثیر را به خود اختصاص دادند.
- 3- به‌طور کلی زبری سطح با افزایش پیشروی و عمق برشی افزایش یافت، درحالی‌که افزایش سرعت برشی دارای اثر کاهنده روی زبری سطح بود. در سطح پایین پیشروی نیز، کاهش عمق برشی باعث بروز پدیده شخم‌زنی و باعث خرابی سطح شد.
- 4- نتایج تحلیل نشان داد که زبری سطح 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

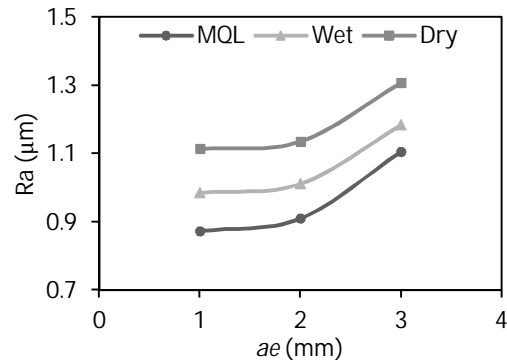
- [1] A. M. Abrão, J. L. S. Ribeiro, J. P. Davim, *Surface integrity*, in: *Machining of Hard Materials*, Eds., pp. 141-115, Springer, 2011.
- [2] S. R. Das, A. Kumar, D. Dhupal, Effect of Machining Parameters on Surface Roughness in Machining of Hardened AISI 4340 Steel Using Coated Carbide Inserts, *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.

پدیده را می‌توان نفوذ راحت روانکار به محل برش در این شرایط، در حالت روان کاری 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 زبری سطح بارزتر شده است که علت رشد این اثر کاهنده را می‌توانی بالاتر نفوذ سیال به محل ماشین کاری در سرعت‌های بیشتر با استفاده از این روش دانست.

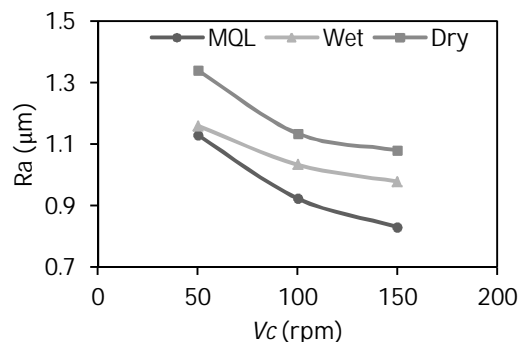
همچنین در شکل 32 تأثیر تغییرات پیشروی روی زبری سطح نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش پیشروی، زبری سطح افزایش می‌یابد. در واقع با افزایش این پارامتر، تماس فیزیکی بین ابزار و قطعه کار بیشتر شده، اصطکاک و نیروهای ماشین کاری افزایش می‌یابد. بالا رفتن نیروها، باعث افزایش ارتعاش و بدتر شدن کیفیت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



شکل 29 نمودار تأثیر عمق برش محوری بر زبری سطح میانگین.



شکل 30 نمودار تأثیر عمق برش شعاعی بر زبری سطح میانگین.



شکل 31 نمودار تأثیر سرعت برشی بر زبری سطح میانگین

- [14] M. Khan, M. Mithu, N. Dhar, Effects of minimum quantity lubrication on turning AISI 9310 alloy 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 13 steel, *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.
- [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-4340 steel, *Journal of materials processing technology*, Vol. 172, No. 2, pp. 304-299, 2006.
- [10] R. Ávila, A. Abrao, The effect of cutting fluids on the machining of hardened AISI 4340 steel, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 119, No. 1, pp. 26-21, 2001.
- [11] N. Boubekri, An Investigation in Drilling 1020 Steel 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 304 stainless steel, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 21, No. 1, pp. 79-72, 2011.