



## بررسی تجربی تأثیر پارامترهای ماشین کاری و نحوه روان کاری بر توان مصرفی و زبری سطح به دست آمده در فرز کاری فولاد CK45

احد قلی پور<sup>1\*</sup>، وحید زاکری مهرآباد<sup>2</sup>، عطا حجاوری<sup>3</sup>

1- مربی گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تبریز

2- مربی گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تبریز

3- دانشجوی کارشناسی مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تبریز

\* تبریز، صندوق پستی 47148-71167 - ah.gholipoor@iaut.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 30 اردیبهشت 1393  
پذیرش: 28 خرداد 1393  
ارائه در سایت: 02 مهر 1393

کلید واژگان:

فرز کاری

روان کاری نیمه خشک

روش تاگوچی

توان مصرفی

زبری سطح

### چکیده

در این مقاله، برای اجتناب از مشکلات استفاده از مایعات روان کاری مانند هزینه بالا، آلودگی محیط زیست و به خطر انداختن سلامتی ماشین کار در فرایند فرز کاری و همچنین استفاده از مزایای آن‌ها از قبیل افزایش عمر ابزار و کیفیت سطح ماشین کاری شده، روش ماشین کاری با حداقل استفاده از روان کار (MQL) یا روان کاری نیمه خشک معرفی شده و تأثیر آن بر توان مصرفی و زبری سطح ماشین کاری شده با روش‌های دیگر روان کاری مانند روان کاری با مایع و روان کاری خشک مقایسه شده است. همچنین از روش طراحی آزمایش تاگوچی برای اجرای یکسری آزمایش‌ها برای بررسی تأثیر پارامترهای مختلف فرایند مانند سرعت دورانی ابزار، سرعت پیشروی، فشار گاز ورودی و نرخ جریان مایع بر توان مصرفی و زبری سطح ماشین کاری شده استفاده شده است و در ادامه با استفاده از آنالیز واریانس مهم‌ترین فاکتورهای مؤثر بر توان مصرفی و زبری سطح ماشین کاری شده به دست آمدند. نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها نشان می‌دهند که استفاده از روش روان کاری نیمه خشک به توان مصرفی کمتر و زبری سطح قابل مقایسه با سایر روش‌های روان کاری منجر می‌شود. آنالیز واریانس انجام شده نیز نشان می‌دهد که در بین پارامترهای بررسی شده در این پژوهش، سرعت پیشروی مهم‌ترین پارامتر مؤثر بر توان مصرفی و نرخ جریان مایع مهم‌ترین پارامتر مؤثر بر زبری سطح ماشین کاری شده است.

## Experimental investigation of the effects of machining parameters and lubrication on consumed power and surface roughness in CK45 steel milling

Ahad Gholipoor<sup>1\*</sup>, Vahid Zakeri Mehrabad<sup>2</sup>, Ata Hejavari<sup>3</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad Univ. Tabriz Branch, Tabriz, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad Univ. Tabriz Branch, Tabriz, Iran

3- Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad Univ. Tabriz Branch, Tabriz, Iran

\* P.O.B. 47148-71167 Tabriz, Iran, ah.gholipoor@stu.unit.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 20 May 2014  
Accepted 18 June 2014  
Available Online 24 September 2014

### Keywords:

Milling  
minimum quantity lubrication (MQL)  
Taguchi method  
electrical power  
Surface Roughness

### ABSTRACT

In this paper, in order to avoid the problems induced by cutting liquids like higher cost, environmental pollution and dangerous for operator health in milling process and also using the benefits of them such as increasing tool life and machined surface quality, machining by minimum quantity of lubrication (MQL) or near dry lubrication was introduced and that's effects on main outputs (consumed power and surface roughness) was compared with other lubrication methods such as lubrication by cutting fluids and by air. In order to perform a series of experiments and investigate the effects of different process parameters such as tools rotational speed, feed rate, gas pressure and liquid flow rate on main outputs, the Taguchi method of design of experiments was employed and then the analysis of variance (ANOVA) was used to find the most important factors effecting main outputs. The results obtained by experiments showed that employing near dry lubrication leads to lower electrical power and comparable surface roughness as compared with other lubrication methods. The analysis of variance showed that feed rate is the most important factor affecting consumed power and liquid flow rate is the most important factor influencing surface roughness.

### 1- مقدمه

بالاست و موجب آسیب به محیط زیست و ایجاد خطر برای سلامتی ماشین کار می‌شوند. برای رفع این مشکلات، ماشین کاری در حالت خشک<sup>1</sup> و

روان کارها و خنک‌کننده‌های مایع هنوز هم در عملیات ماشین کاری مورد استفاده گسترده‌ای قرار می‌گیرند، در حالی که هزینه مصرف و دفع آن‌ها

1- Dry Machining

Please cite this article using:

A. Gholipoor, V. Zakeri Mehrabad, A. Hejavari, Experimental investigation of the effects of machining parameters and lubrication on consumed power and surface roughness in CK45 steel milling, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 10, pp. 80-84, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

مهم مؤثر بر خروجی‌های فرآیند به‌کار گرفته شده است.

## 2- شرایط تجربی آزمایش

### 2-1- تجهیزات مورد نیاز برای انجام آزمایش

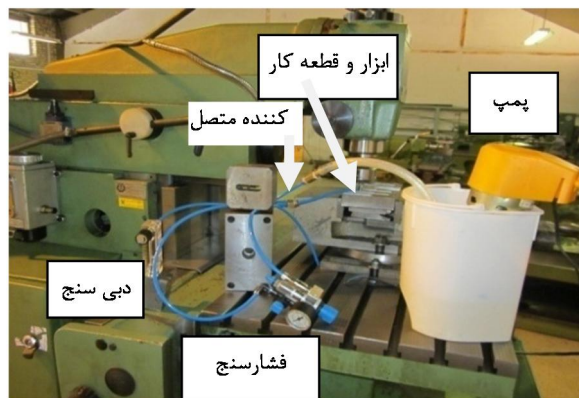
برای انجام آزمایش‌ها از ماشین فرز مدل FP4M ساخت شرکت ماشین‌سازی تبریز استفاده شده است که به همراه تجهیزات مورد استفاده برای روان کاری در شکل 1، مشاهده می‌شود.

برای تهیه روان کار استفاده شده در تست‌ها، از مجموعه آزمایشگاهی که در شکل 1 آورده شده و شماتیک آن نیز در شکل 2 مشاهده می‌شود، استفاده شده است. سیال تهیه‌شده که در حالت روان کاری با مایع فقط مایع، در حالت روان کاری خشک فقط گاز و در حالت روان کاری نیمه‌خشک مخلوطی از مایع و گاز است، توسط شیلنگ دو محوره به سطح ماشین کاری هدایت می‌شود. دبی سنج و فشارسنج تعبیه شده در این مجموعه برای کنترل پارامترهای مختلف پروسه مانند نرخ جریان مایع و فشار گاز است. کمپرسور، مخزن مایع، پمپ و کلاهک انتهایی شیلنگ از اجزای دیگر این مجموعه است. گاز و مایع مورد استفاده در حالت‌های مختلف روان کاری در جدول 1، آورده شده است.

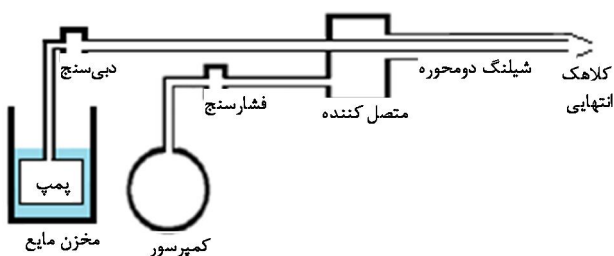
### 2-2- اجرای آزمایش

در بخش اول این مطالعه، تأثیر حالت‌های مختلف روان کاری بر توان مصرفی ماشین در دو شرایط ماشین کاری مختلف مطابق جدول 2، بررسی می‌شود.

حالت روان کاری	مایع	گاز
با مایع روان کار	آب دی‌یونیزه	-
با مایع روان کار خشک	مایع پایه روغن معدنی	هوا
نیمه‌خشک 1	آب دی‌یونیزه	هوا
نیمه‌خشک 2	مایع پایه روغن معدنی	هوا



شکل 1 ماشین فرز و تجهیزات روانکاری مورد استفاده



شکل 2 شماتیک مکانیزم استفاده شده برای تهیه سیال روان کار

نیمه‌خشک<sup>1</sup> یا استفاده از حداقل میزان روان کار<sup>2</sup> توجه محققان را در دهه اخیر به خود اختصاص داده است [1,2]. در ماشین کاری در حالت خشک، از جریان گازی فشرده برای خنک کاری استفاده می‌شود و در حالت نیمه‌خشک از مقدار کمی روان کار که توسط جریان گازی فشرده به سطح مشترک ابزار و قطعه کار و ابزار پاشیده می‌شود، استفاده می‌شود [3].

بیرمن و همکاران توزیع حرارت و تعادل حرارتی در قطعه کار را در فرآیند سوراخ کاری عمیق با استفاده از روان کاری نیمه‌خشک مطالعه کردند. ایشان از یک برنامه اجزای محدود و با تهیه یک مدل دوبعدی از قطعه کار، به آنالیز توزیع دمای قطعه کار در طول فرآیند سوراخ کاری عمیق پرداختند [4]. تسدلن و همکاران فرآیند سوراخ کاری را با حالت‌های روان کاری مایع، خشک و نیمه‌خشک انجام داده و سایش ابزار، نحوه تشکیل براده، نیرو، گشتاور و زبری سطح به‌دست‌آمده در این حالت‌ها را مطالعه کردند. براساس نتایج این محققان، روان کاری در حالت خشک و نیمه‌خشک به سایش ابزار کمتری منجر می‌شود، در حالی که زبری سطح به‌دست‌آمده با حالت روان کاری خشک، بیشتر از سایر حالت‌هاست [5]. دار و همکاران با انجام یک سری آزمایش‌ها به بررسی تأثیر روان کاری نیمه‌خشک بر سایش ابزار و زبری سطح ماشین کاری شده در عملیات تراش کاری پرداختند. براساس نتایج آن‌ها، با استفاده از این نوع روان کاری، زبری سطح ماشین کاری شده و سایش ابزار با توجه به کاهش دمای ناحیه ماشین کاری، کاهش می‌یابد [6]. سانچز و همکاران با استفاده از روان کاری نیمه‌خشک به کمک گاز دی‌اکسید کربن با دمای پایین در فرآیند سنگ‌زنی، به این نتیجه رسیدند که با این روش روان کاری، عمر ابزار (چرخ سنگ‌زنی) افزایش یافته و زبری سطح ماشین کاری شده کاهش می‌یابد [7]. پارک و همکاران با استفاده از تکنیک پردازش تصویر به بررسی اندازه قطرات سیال و توزیع آن‌ها در عملیات فرزکاری با استفاده از روان کاری نیمه‌خشک پرداختند [8]. توکلی و همکاران در مطالعه خود در مورد عملیات سنگ‌زنی، تأثیر پارامترهای مختلف روان کاری نیمه‌خشک مانند نرخ جریان روغن، فشار هوا و موقعیت قرارگیری نازل را بر پارامترهای خروجی مانند نیروی سنگ‌زنی و زبری سطح به‌دست‌آمده مطالعه کردند [9]. ابیکوا و همکاران، عملکرد روان کاری نیمه‌خشک را در عملیات شیارزنی مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که با این روش روان کاری می‌توان سایش پهلوی و گوشه را کاهش داد [10]. دار و همکاران به بررسی تأثیر روان کاری نیمه‌خشک بر دمای ماشین کاری، تشکیل براده و کیفیت سطح ماشین کاری شده در عملیات تراش کاری پرداختند و نتایج به‌دست‌آمده را با نتایج مربوط به روان کاری با مایع و روان کاری خشک مقایسه کردند [11]. یازید و همکاران تأثیر پارامترهای ماشین کاری را بر سلامتی سطوح تراش کاری شده در شرایط روان کاری خشک و نیمه‌خشک بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که با استفاده از روان کاری نیمه‌خشک، سلامتی سطوح ماشین کاری شده بهبود می‌یابد [12].

در این مطالعه، تأثیر روش‌های مختلف روان کاری از جمله روان کاری با مایع، روان کاری خشک و نیمه‌خشک بر توان مصرفی و زبری سطح به‌دست‌آمده در فرآیند فرزکاری بررسی شده است. همچنین از روش طراحی آزمایش تاگوجی برای انجام آزمایش‌هایی برای بررسی تأثیر پارامترهای مختلف ماشین کاری و روان کاری از جمله سرعت دورانی ابزار، سرعت پیشروی، نرخ جریان مایع و فشار گاز ورودی بر توان مصرفی و زبری سطح ماشین کاری شده استفاده شده است. آنالیز واریانس نیز برای به‌دست آوردن پارامترهای

1- Near Dry Machining

2- Minimum Quantity of Lubrication (MQL)

ابزار مورد استفاده در این مطالعه. انگشتی چهار پر سر تخت به قطر 10 میلی متر است. ترکیب شیمیایی قطعه کار در جدول 4، آمده است.

### 3- نتایج و بحث

#### 3-1- بررسی توان مصرفی ماشین

در این بخش، تأثیر حالت های مختلف روان کاری و همچنین پارامترهای مختلف فرایند مانند سرعت دورانی ابزار، سرعت پیشروی، نرخ جریان مایع و فشار گاز، بر توان مصرفی ماشین در حالت استفاده از روان کاری نیمه خشک بررسی می شود.

#### 3-1-1- تأثیر حالت های مختلف روان کاری بر توان مصرفی ماشین

شکل 3، توان مصرفی ماشین در حالت های مختلف روان کاری را نشان می دهد. مطابق این شکل، در همه حالت های مورد بررسی در این مطالعه، ماشین کاری با روان کاری نیمه خشک با استفاده از مخلوط مایع پایه روغن معدنی و هوا به کمترین توان مصرفی ماشین منجر می شود. چون در ماشین کاری با استفاده از روان کاری نیمه خشک، نفوذ سیال به سطح مشترک ابزار و قطعه کار بهتر صورت می گیرد و اثرات روان کاری بهبود می یابد که سبب کاهش اصطکاک بین ابزار و قطعه کار شده و در نتیجه مطابق رابطه 2، نیروی ماشین کاری و توان مصرفی ماشین کمتر می شود.

همچنین مطابق این شکل، با افزایش عمق بار و سرعت پیشروی ابزار در شرایط ماشین کاری دوم نسبت به شرایط ماشین کاری اول مندرج در جدول 2، توان مصرفی بیشتری در شرایط آزمایش دوم به دست می آید.

$$F_m = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_t^2} \quad (2)$$

در رابطه بالا  $F_m$  نیروی ماشین کاری،  $F_c$  نیروی برشی<sup>5</sup>،  $F_f$  نیروی اصطکاک<sup>6</sup> و  $F_t$  نیروی شخم<sup>7</sup> است.

#### 3-1-2- تأثیر پارامترهای مختلف فرایند بر توان مصرفی در حالت روان کاری نیمه خشک

شکل 4 الف، تأثیر سرعت دورانی ابزار را بر توان مصرفی ماشین نشان می دهد. مطابق این شکل، با افزایش سرعت دورانی ابزار، توان مصرفی ماشین کاهش می یابد. مطابق رابطه 3، با افزایش سرعت دورانی ابزار، سرعت برشی افزایش یافته و احتمال تشکیل لبه انباشته کاهش می یابد و در نتیجه با توجه به کاهش زاویه براده<sup>8</sup> ضریب انقباض براده کاهش یافته و تغییر شکل براده کمتر می شود، بنابراین توان مصرفی ماشین کاهش می یابد [13]. از سوی با افزایش سرعت برشی، زاویه صفحه برش افزایش یافته و ضخامت براده کمتر می شود [14]. با کاهش ضخامت براده، مساحت صفحه برش و حجم ناحیه تغییر شکل اولیه کاهش یافته و انرژی لازم برای براده برداری و نیروی برشی کمتر می شود و مطابق رابطه 2، نیروی ماشین کاری و توان مصرفی کاهش می یابد [15].

$$V = \frac{\pi dn}{1000} \quad (3)$$

در رابطه بالا  $V$  سرعت برشی برحسب متر بر دقیقه،  $d$  قطر ابزار برحسب میلی متر و  $n$  سرعت دورانی ابزار برحسب دور بر دقیقه است.

بر اساس شکل 4 ب، که تأثیر سرعت پیشروی را بر توان مصرفی ماشین نشان می دهد، با افزایش سرعت پیشروی نیروی مماسی ماشین کاری افزایش یافته و در نتیجه توان مصرفی ماشین بیشتر می شود. همچنین با افزایش سرعت پیشروی، ضریب اصطکاک بین ابزار و قطعه کار نیز افزایش یافته و منجر به افزایش توان مصرفی ماشین می شود [16].

در ادامه با بهره گیری از روش طراحی آزمایش تاگوچی و به دست آوردن نمودارهای اثر اصلی<sup>1</sup>، به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف پروسه از قبیل سرعت دورانی ابزار، سرعت پیشروی، نرخ جریان مایع ورودی و فشار گاز ورودی بر توان مصرفی ماشین در حالت استفاده از روان کاری نیمه خشک پرداخته می شود، در حالی که عمق ماشین کاری در این مرحله 1 میلی متر و مخلوط مایع پایه روغن معدنی و هوا به عنوان سیال روان کار در نظر گرفته شده است. همین روند در قسمت دوم این مطالعه، برای بررسی زبری سطح ماشین کاری شده نیز به کار گرفته شده است. از آنالیز واریانس نیز برای به دست آوردن پارامترهای مهم مؤثر بر توان مصرفی ماشین و زبری سطح ماشین کاری شده استفاده می شود. ماتریس طراحی آزمایش تاگوچی نیز در جدول 3، آورده شده است. سطوح انتخابی پارامترهای ورودی، با توجه به جداول استاندارد ماشین کاری برای قطعه کار مورد بررسی بوده است.

توان مصرفی ماشین از راه اندازه گیری شدت جریان توسط دستگاه آمپرسنج مدل کیوریتسو<sup>2</sup> و با استفاده از رابطه 1، به دست می آید. زبری سطح (SR) قطعه کار ماشین کاری شده نیز با زبری سنج مدل TR200 (تایم کو<sup>3</sup>) اندازه گیری شده است. زبری سطح ماشین کاری شده از سه مسیر مختلف اندازه گیری شده و با میانگین گیری از این اعداد، زبری سطح ماشین کاری شده به دست آمده است.

$$\cos \theta \times P = V \times I \quad (1)$$

در رابطه بالا  $P$  توان مصرفی،  $V$  ولتاژ دستگاه،  $I$  شدت جریان عبوری و  $\theta$  ضریب کیفیت است که در این پژوهش  $\cos \theta = 0.97$  است.

#### 3-2- مواد مورد استفاده در آزمایش ها

قطعه کار مورد استفاده در این مطالعه، از جنس فولاد CK45 با سختی 185 واحد برینل<sup>4</sup> است که در صنعت قالب سازی به طور وسیعی مورد استفاده قرار می گیرد.

جدول 2 شرایط انجام مرحله اول آزمایش ها

عمق برش (mm)	سرعت دورانی (rpm)	سرعت پیشروی (mm/min)	نرخ جریان مایع فشار گاز (ml/min)	فشار گاز (bar)	شرایط
0/5	630	50	30	2	1
1	800	100	40	3	2

جدول 3 ماتریس طراحی آزمایش تاگوچی

شماره آزمایش	سرعت دورانی ابزار (rpm)	سرعت پیشروی (mm/min)	نرخ جریان مایع (ml/min)	فشار گاز (bar)
1	630	50	30	2
2	630	100	40	3
3	630	168	50	4
4	800	50	40	4
5	800	100	50	2
6	800	168	30	3
7	1000	50	50	3
8	1000	100	30	4
9	1000	168	40	2

جدول 4 ترکیب شیمیایی قطعه کار

عنصر	کربن	سیلیسیم	منگنز	کروم	مولیبدن	نیکل
درصد وزنی %	0/46	>0/4	0/65	>0/4	>0/1	>0/4

1- Main effect plots  
2- Kyoritsu  
3- TIME CO  
4- Brinell hardness

5- Cutting force  
6- Friction force  
7- Thrust force  
8- Rake angle

ماشین کاهش می‌یابد.

مطابق شکل 4د، که تأثیر فشار گاز را بر توان مصرفی ماشین نشان می‌دهد، با افزایش فشار گاز تا 3 بار، توان مصرفی ماشین افزایش و سپس کاهش می‌یابد و نشان می‌دهد که با افزایش فشار گاز از 3 بار، با توجه به افزایش اثر خنک‌کنندگی سیال و نیز بهبود نفوذ سیال به سطح ماشین کاری، توان مصرفی ماشین کاهش می‌یابد.

### 3-2- بررسی زبری سطح ماشین کاری شده

در این قسمت، تأثیر حالت‌های مختلف روان کاری و همچنین پارامترهای مختلف فرایند بر زبری سطح ماشین کاری شده در حالت استفاده از روان کاری نیمه‌خشک بررسی می‌شود.

3-2-1- تأثیر حالت‌های مختلف روان کاری بر زبری سطح ماشین کاری شده شکل 5، زبری سطح ماشین کاری شده با روان کاری در حالت‌های مختلف را نشان می‌دهد. مطابق شکل، در شرایط ماشین کاری 1، با توجه به پایین بودن سرعت برشی و زیاد بودن اصطکاک بین ابزار و قطعه کار، سیالی که موجب کاهش زیاد اصطکاک می‌شود، کمترین زبری سطح را ایجاد می‌کند که این مقدار مربوط به استفاده از سیال مایع پایه روغن معدنی است. با توجه به کاهش قدرت نفوذ سیال به ناحیه تماس ابزار و قطعه کار با افزایش سرعت برشی و ضخامت براده تغییر شکل‌نیافته در شرایط 2 و افزایش ناکارآمدی روان کاری معمولی، روان کاری نیمه‌خشک که قدرت نفوذ بالایی دارد، کمترین زبری سطح ماشین کاری شده را تولید می‌کند.

### 3-2-2- تأثیر پارامترهای مختلف فرایند بر زبری سطح ماشین کاری شده در

#### حالت استفاده از روانکاری نیمه‌خشک

شکل 6 الف، تأثیر سرعت دورانی ابزار را بر زبری سطح ماشینکاری شده نشان می‌دهد. مطابق این شکل، با افزایش سرعت دورانی ابزار، سرعت برشی افزایش یافته و تغییر شکل پلاستیک آسانتر شده و اصطکاک بین سطوح آزاد و سطوح ماشینکاری شده و اصطکاک بین سطح ابزار و براده کاهش می‌یابد و سطوح صافتری به‌دست می‌آید، اما در ادامه و با افزایش سرعت دورانی بیشتر از 800 دور بر دقیقه، به دلیل تشکیل لبه انباشته و ناکارآمدی سیال روانکار، ناهمواری سطح بیشتر شده و زبری سطح افزایش می‌یابد.

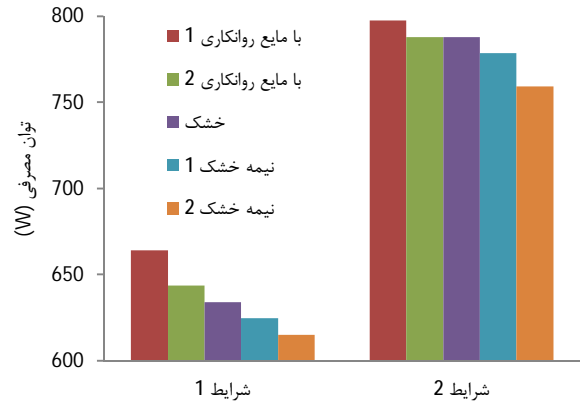
مطابق شکل 6 ب، که تأثیر سرعت پیشروی را بر زبری سطح ماشینکاری شده نشان می‌دهد، با افزایش سرعت پیشروی زبری سطح ماشینکاری شده مطابق رابطه 4 افزایش می‌یابد.

$$H = \frac{a_f \sin x \sin \bar{x}}{\sin(x+\bar{x})} \quad (4)$$

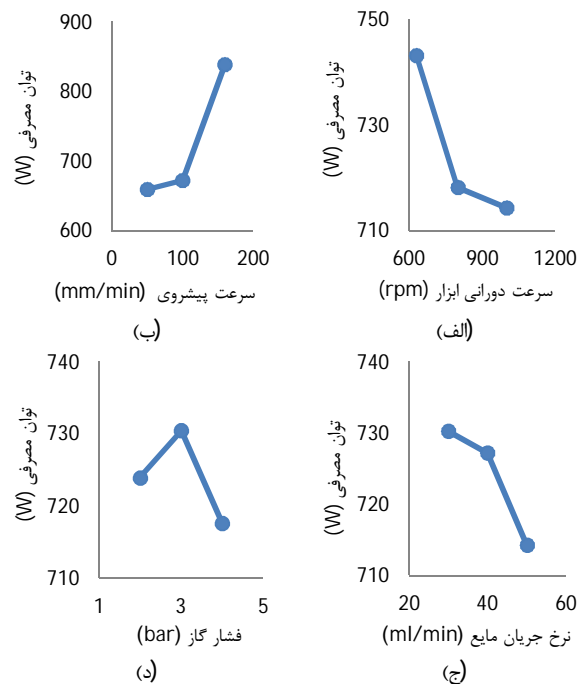
در رابطه بالا  $H$  مقدار ناهمواری سطح،  $a_f$  سرعت پیشروی،  $x$  زاویه تنظیم اصلی و  $\bar{x}$  زاویه تنظیم فرعی است.

شکل 6 ج، تأثیر نرخ جریان مایع را بر زبری سطح ماشینکاری شده نشان می‌دهد. مطابق شکل، با افزایش نرخ جریان مایع، زبری سطح ماشینکاری شده کاهش می‌یابد، چون با بیشتر شدن نرخ جریان مایع، خاصیت روانکاری سیال بهبود می‌یابد و کاهش بیشتری در اصطکاک بین ابزار و قطعه کار به وجود می‌آید.

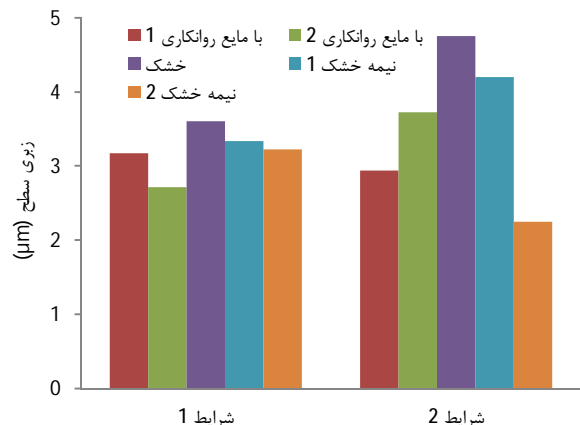
مطابق شکل 6 د، که تأثیر فشار گاز را بر زبری سطح ماشین کاری شده نشان می‌دهد، با افزایش فشار گاز، زبری سطح ماشین کاری شده کاهش می‌یابد، چون با بیشتر شدن فشار گاز، عمق نفوذ سیال بیشتر می‌شود و عمل روان کاری و خنک‌کنندگی سیال بهتر انجام می‌شود.



شکل 3 مقایسه توان مصرفی ماشین در حالت‌های مختلف روان کاری



شکل 4 نمودارهای اثر اصلی مربوط به توان مصرفی ماشین



شکل 5 مقایسه زبری سطح ماشین کاری شده در حالت‌های مختلف روان کاری

شکل 4 ج، تأثیر نرخ جریان مایع را بر توان مصرفی ماشین نشان می‌دهد. براساس شکل، با افزایش نرخ جریان مایع، به دلیل بهبود خاصیت روان کاری و خنک‌کنندگی سیال و با کاهش اصطکاک بین ابزار و قطعه کار، توان مصرفی

ابزار، سرعت پیشروی و نرخ جریان مایع، توان مصرفی کاهش می یابد، در حالی که با افزایش فشار گاز تا 4 بار، توان مصرفی افزایش یافته و پس از آن کاهش می یابد. در فرزکاری با روان کاری نیمه خشک، با افزایش سرعت دورانی ابزار تا 800 دور بر دقیقه، زبری سطح به دست آمده کاهش یافته و پس از آن افزایش می یابد. همچنین با افزایش سرعت پیشروی، زبری سطح ماشین کاری شده افزایش یافته و با افزایش نرخ جریان مایع و فشار گاز، زبری سطح ماشین کاری شده کاهش می یابد.

- آنالیز واریانس انجام شده نشان می دهد که سرعت پیشروی مهم ترین پارامتر مؤثر بر توان مصرفی ماشین در فرزکاری با روان کاری نیمه خشک بوده و نرخ جریان مایع مهم ترین پارامتر مؤثر بر زبری سطح ماشین کاری شده است.

### 5- مراجع

[1] T. Tawakoli, M. J. Hadad, M. H. Sadeghi, Investigation on minimum quantity lubricant-MQL grinding of 100Cr6 hardened steel using different abrasive and coolant-lubricant types, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 50, pp. 698-708, 2010.

[2] L. R. D. Silva, E. C. Bianchi, R. Y. Fosse, R. E. Catai, T. V. Franca, P. R. Aguiar, Analysis of surface integrity for minimum quantity lubricant-MQL in grinding, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 47, pp. 412-418, 2007.

[3] E. A. Rahim, H. Sasahara, A study of the effect of palm oil as MQL lubricant on high speed drilling of titanium alloys, *Tribology International*, Vol. 44, pp. 309-317, 2011.

[4] D. Biermann, I. Iovkov, H. Blum, A. Rademacher, K. Taebi, F. T. Suttmeier, N. Klein, Thermal Aspects in Deep Hole Drilling of Aluminium Cast Alloy Using Twist Drills and MQL, *Procedia CIRP*, Vol. 3, pp. 245 - 250, 2011.

[5] B. Tasdelen, T. Wikblom, S. Ekered, Studies on minimum quantity lubrication (MQL) and air cooling at drilling, *Journal of materials processing technology*, Vol. 200, pp. 339-346, 2008.

[6] N. R. 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, pp. 299-304, 2006.

[7] A. Sanchez, I. Pombo, R. Alberdi, B. Izquierdo, N. Ortega, S. Plaza, J. M. Toledano, Machining evaluation of a hybrid MQL-CO2 grinding technology, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 18, pp. 1840-1849, 2010.

[8] K. H. Park, J. O. Yume, M. C. Yoon, P. Kwon, A study on droplets and their distribution for minimum quantity lubrication (MQL), *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 50, pp. 824-833, 2010.

[9] T. Tawakoli, M. J. Hadad, M. H. Sadeghi, Influence of oil mist parameters on minimum quantity lubrication-MQL grinding process, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 50, pp. 521-531, 2010.

[10] T. Obikawa, Y. Kamata, J. Shinozuka, High-speed grooving with applying MQL, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 46, pp. 1854-1861, 2006.

[11] N. R. Dhar, M. W. Islam, S. Islam, M. A. H. Mithu, The influence of minimum quantity of lubrication (MQL) on cutting temperature, chip and dimensional accuracy in turning AISI-1040 steel, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 171, pp. 93-99, 2006.

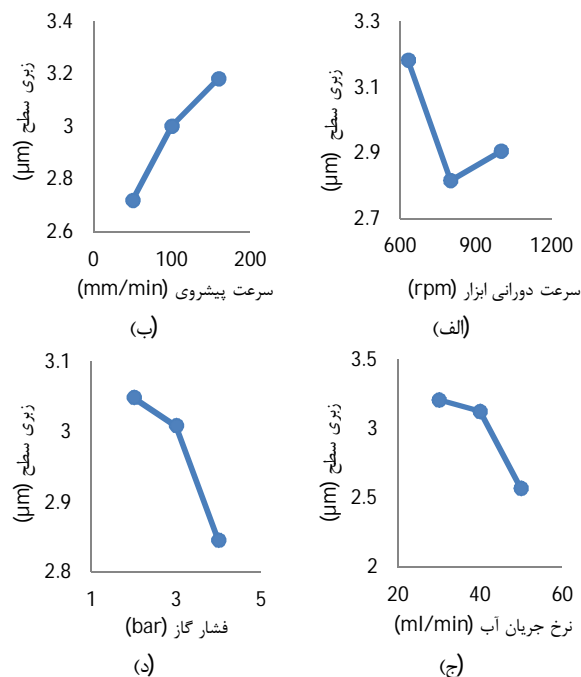
[12] M. Z. A. Yazid, C. H. CheHaron, J. A. Ghani, G. A. Ibrahim, A. Y. M. Said, Surface integrity of Inconel 718 when finish turning with PVD coated carbide tool under MQL, *Procedia Engineering*, Vol. 19, pp. 396-401, 2011.

[13] V. P. Astakhov, M. O. M. Osman, Correlations amongst process parameters in metal cutting and their use for stablishing the optimum cutting speed, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 62, pp. 175-179, 1996.

[14] R. Suresh, S. Basavarajappa, V. N. Gaitonde, G. L. Samuel, Machinability investigations on hardened AISI 4340 steel using coated carbide insert, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, Vol. 33, pp. 75-86, 2012.

[15] E.G. Ng, D. Aspinwall, D. Brazil, J. Monaghan, Modelling of temperature and forces when orthogonally machining hardened steel, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 39, No. 6, pp. 885-903, 1999.

[16] M. R. Shabgard, M. J. Zenjanab, R. Azarafza, Experimental study on the influence of CuO nanofluid on surface roughness and machining force in turning of AISI 4340 steel, *Moades Mechanical Engineering*, Vol. 99, No. 9, pp. 1-7, (In Persian).



شکل 6 نمودارهای اثر اصلی مربوط به زبری سطح ماشین کاری شده

جدول 5 آنالیز واریانس برای توان مصرفی ماشین

فاکتور	درجه آزادی	درجه مجموع	نسبت واریانس	نسبت واریانس	مجموع مربعات	درصد مشارکت
سرعت دورانی ابزار	2	0/044	0/022	6/75	0/038	8/267
سرعت پیشروی	2	1/626	0/813	244/064	1/62	81/858
نرخ جریان مایع	2	0/011	0/005	1/75	0/005	5/296
فشار گاز	2	0/006				
خطا	2	0/006	0/003			4/579

جدول 6 آنالیز واریانس برای زبری سطح ماشین کاری شده

فاکتور	درجه آزادی	درجه مجموع	نسبت واریانس	نسبت واریانس	مجموع مربعات	درصد مشارکت
سرعت دورانی ابزار	2	0/219	0/109	3/146	0/149	11/137
سرعت پیشروی	2	0/327	0/163	4/701	0/257	19/205
نرخ جریان مایع	2	0/726	0/363	10/433	0/656	48/941
فشار گاز	2	0/069				
خطا	2	0/069	0/034			20/717

### 3-3 آنالیز واریانس

آنالیز واریانس مربوط به توان مصرفی ماشین و زبری سطح ماشین کاری شده در جداول 5 و 6 آورده شده است و نشان می دهد که سرعت پیشروی مهم ترین عامل مؤثر بر توان مصرفی ماشین بوده و نرخ جریان مایع مهم ترین عامل مؤثر بر زبری سطح ماشین کاری شده است. همچنین فشار گاز کم اهمیت ترین فاکتور مؤثر بر توان مصرفی ماشین و زبری سطح ماشین کاری شده است و در آنالیز واریانس کنار گذاشته می شود.

### 4- نتیجه گیری

نتایج حاصل از این پژوهش را می توان به صورت دسته بندی زیر بیان کرد:

- فرزکاری با روان کاری نیمه خشک، توان مصرفی کمتر و زبری سطح ماشین کاری شده قابل مقایسه با حالت روان کاری مایع و روان کاری خشک تولید می کند.
- در فرزکاری با استفاده از روان کاری نیمه خشک، با افزایش سرعت دورانی