



## مدل‌سازی و بهینه‌سازی تاثیر پارامترهای ماشین‌کاری بر سایش ابزار و زبری سطح قطعه با روش رویه پاسخ و تابع مطلوبیت

ولی علی‌میرزالو<sup>\*</sup>، وحید مدانلو<sup>۱</sup>، منصور کریمی تکانلو<sup>۲</sup>

۱- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه

۲- دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه

\*v.alimirzaloo@urmia.ac.ir #۵۷۸۵۳-۱۶۵

\*\*رومیه، متندوق پستی v.alimirzaloo@urmia.ac.ir

### چکیده

سایش ابزار و زبری سطح قطعه دو پارامتر مهم در ارزیابی فرآیندهای ماشین‌کاری هستند. در این تحقیق با استفاده از روش‌های رویه پاسخ و تابع مطلوبیت، تاثیر پارامترهای ماشین‌کاری بر سایش سطح براده ابزار و زبری سطح قطعه کار از جنس فولاد ۴۱۴۰ مدل سازی و بهینه‌سازی شده است. ابتدا با انتخاب سطوح برای هر یک از پارامترهای ورودی (سرعت پیشروی، عمق برش، مدت زمان و سرعت برش)، آزمایش‌های لازم طراحی شده است. پس از انجام عملی آزمایش‌ها و سیله ماشین تراش کنترل عددی، میزان سایش سطح براده ابزار و زبری سطح نمونه‌ها به عنوان توابع هدف استخراج شده است. در مرحله بعد تأثیرات اصلی و مقابله پارامترها بررسی شده و مدل رویه پاسخ توابع هدف بدست آمده است. در نهایت با استفاده از روش بهینه‌سازی چند هدفه تابع مطلوبیت، مقادیر بهینه برای پارامترهای ورودی بدست آمده است. نتایج نشان می‌دهد که فرآیند با روش رویه پاسخ با دقت خوبی مدل سازی شده است و با بهینه‌سازی مقادیر پارامترهای ورودی، مقدار سایش و زبری سطح کمینه حاصل شد. همچنین بررسی اثر پارامترها نشان می‌دهد که با افزایش پیشروی، زبری سطح قطعه و سایش ابزار افزایش یافته و با افزایش سرعت برشی، سایش افزایش یافته و زبری سطح کاهش می‌یابد.

کلیدوازگان: ماشین‌کاری، سایش ابزار، زبری سطح، رویه پاسخ، تابع مطلوبیت

## Modeling and optimization of the machining parameters effects on the tool wear and surface roughness by the response surface and desirability function method

Vali Alimirzaloo\*, Vahid Modanloo, Mansour Karimi Takanlou

Department of Mechanical Engineering, Urmia University, Urmia, Iran  
\*P.O.B. 57153-165 Urmia, Iran, v.alimirzaloo@urmia.ac.ir

### ABSTRACT

Tool wear and surface roughness of the workpiece are the important parameters in evaluation of the machining processes. In this research, effect of the machining parameters on the tool wear and surface roughness of the 4140 steel workpiece have been modeled and optimized using the response surface and desirability function approaches. First, required experiments have been designed by specifying the level of the input parameters (feed rate, cutting depth, operation time and cutting speed). Then, the experiments have been performed using a CNC lathe and tool wear and workpiece surface roughness have been measured as objective functions. In the next stage, main and interaction effects of the parameters investigated and response surface model of the objective functions obtained. At last, optimized value of the input parameters have been gained using the desirability function method as a multi objective optimization approach. Results showed that the process has been modeled precisely and minimized value of the surface roughness and tool wear obtained by optimizing the input parameters. Investigation of the parameters effects showed that the surface roughness and tool wear increase as the feed rate increases and tool wear increases and surface roughness decreases as the cutting speed increases.

**Keywords:** Desirability Function, Machining, Response Surface, Surface Roughness, Tool Wear.

این عوامل، تحلیل دقیق فرآیندهای ماشین‌کاری را مشکل می‌سازد. سایش ابزار و صافی سطح از مهم‌ترین پارامترها در فرآیند ماشین‌کاری می‌باشند. از یک سو، کاهش سایش ابزار نقش مهمی را در هزینه عملیات ماشین‌کاری ایفا می‌کند و از سوی دیگر، صافی سطح قطعات مهم‌ترین نقش را در کیفیت قطعات دارد. سایش ابزار شکست تدریجی ابزار برشی است که وقوع آن غیر قابل اجتناب است. زمانی که فرآیند ماشین‌کاری با فرسودگی ابزار ادامه پیدا می‌کند، هزینه و زمان تولید افزایش می‌یابد. سایش ابزار در طی فرآیند

ماشین‌کاری یکی از مهم‌ترین فرآیندهای تولید قطعات فلزی بوده که کاربرد گسترده‌ای در صنایع مختلف دارد. به منظور رقابتی نمودن محصولات تولید شده با این فرآیند، بایستی هزینه‌ها کاهش و کیفیت تولید افزایش داده شود. سایش ابزار و زبری سطح ناشی از فرآیند، دو عامل مؤثر در هزینه‌ها و کیفیت قطعات تولیدی می‌باشد که از عوامل مختلفی مانند پارامترهای دستگاه، جنس قطعه کار و روان کار در ماشین‌کاری متأثر می‌شود. ارتباط متقابل بین

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

V. Alimirzaloo, V. Modanloo, M. Karimi Takanlou, Modeling and optimization of the machining parameters effect on the tool wear and surface roughness by the response surface and desirability function method, *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 192-197, 2015 (in Persian) (فارسی)

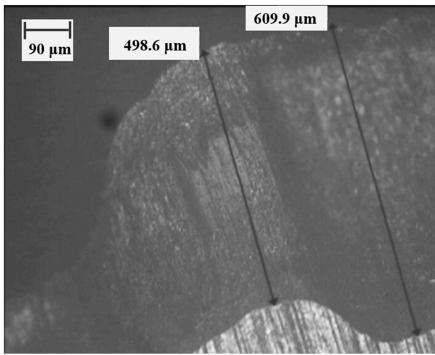
میکروسکوپ نوری مطابق شکل ۲ اندازه گیری شد. همچنین به منظور اندازه گیری زبری سطح نمونه ها از دستگاه زبری سنج میتوتو ۷ استفاده شد. قسمتی از جدول طرح آزمایشات و مقادیر خروجی برای هر آزمایش در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۱ محدوده و سطوح عوامل ورودی

مقادیر سطوح					پارامتر
۷	۵	۳	۱	(min)	زمان عملیات
۱۲۰۰	۹۰۰	۶۰۰	۳۰۰	(rpm)	ساعت دورانی
۰/۷	۰/۵	۰/۳	۰/۱	(mm/min)	سرعت پیشروی
۱	۰/۷۵	۰/۵	۰/۲۵	(mm)	عمق برش



شکل ۱ نمونه های تراش کاری شده



شکل ۲ اندازه گیری سایش سطح براده ابزار با میکروسکوپ نوری

جدول ۲ طرح آزمایش ها و نتایج

سطح	صافی	سایش ابزار (μm)	عمق برش (μm)	سرعت پیشروی (mm/min)	سرعت دورانی (rpm)	زمان عملیات (min)	شماره آزمایش
۱۷	۷۸	۱	۰/۷	۱۲۰۰	۷	۱	
۲۲	۳۰	۱	۰/۷	۳۰۰	۱	۲	
۱/۲۷	۵۰	۱	۰/۱	۱۲۰۰	۳	۳	
۲۰	۶۹	۰/۲۵	۰/۷	۱۲۰۰	۵	۴	
۳/۰۵	۲۵	۰/۲۵	۰/۱	۳۰۰	۷	۵	
.	.	.	.	.	.	.	
.	.	.	.	.	.	.	
.	.	.	.	.	.	.	
۷/۲	۲۲	۰/۵	۰/۳	۳۰۰	۱	۲۹	
۱۹/۲	۵۳	۰/۲۵	۰/۷	۹۰۰	۱	۳۰	

7. Mitutoyo

ماشین کاری سبب می شود نیروی برشی افزایش یابد [۱]. تخمین سایش و شناسایی شکست در ابزار یکی از مهم ترین مشکلات در ماشین های CNC مدرن می باشد. اجرای سیستم نظارت بر شرایط صحیح ابزار، اطلاعاتی را از سایش ابزار به واحد کنترل دستگاه CNC برای عملکرد مناسب می فرستد [۲]. سیله [۳] با روش طراحی آزمایش ها تاثیر سختی قطعه کار و هندسه لبه ابزار بر زبری سطح قطعه را بررسی کرد و نتیجه گرفت که که هندسه لبه ابزار و سرعت پیشروی بر کیفیت سطح قطعه موثر است. پالانیسامی [۴] یک مدل رگرسیون و مدل شبکه عصبی مصنوعی برای پیش بینی سایش ابزار در مقابل پارامترهای مختلف تراش کاری از جمله سرعت برشی، سرعت پیشروی و عمق برش ارائه کرده و مدل ریاضی را با آزمایش های تجربی ارزیابی کرده است. پریکت و جائز [۵] یک رویکرد اجمالی برای تکنیک های هشدار دهنده اتمام ابزارهای فرز کاری به منظور شناسایی سایش ابزارهای برشی و شکست طی فرآیند فرز کاری را ارائه دادند. کوآن و فیشر [۶] راهنمای سایش ابزار و مدلی برای اندازه گیری عمر ابزار برای تحلیل سطح ناحیه سایش و ضایعات ابزار برای استفاده میکروپاپتیک ۷ و الگوریتم تحلیل و فرآیند سازی ارائه کردند. آن ها استراتژی کنترل بهینه را پیشنهاد کردند که نشان می داد که چگونه هزینه های تولید را با سازگاری پارامترهای ماشین کاری و استفاده از ابزارها با محدودیت های شرایط ماشین کاری می توان به حداقل رساند. اورابی و هایپرورست [۷] مدلی را برای شناسایی عمر و سایش ابزار با استفاده از تکنیک های تحلیل رگرسیون غیرخطی پیشنهاد دادند. دهار و همکاراش [۸] تاثیر خنک کاری سرمایابی ۳ را در ماشین کاری فولاد ۴۱۴۰ بررسی کردند. فولاد ۴۱۴۰ در ساخت ماشین آلات مانند غلتک های نورد استفاده می شود. تاکنون در عملیات ماشین کاری فولاد ها، تاثیرات اصلی و مقابل پارامترهای موثر فرآیند شامل پیشروی، عمق برش، زمان و سرعت پیشروی هم زمان در سایش سطح براده ابزار و زبری سطح قطعه به ویژه در ماشین کاری فولاد ۴۱۴۰ مطالعه نشده است. همچنین، رابطه جامعی که سایش سطح براده ابزار و صافی سطح قطعه کار را بر اساس هر چهار پارامتر مذکور تعريف کند، ارائه نشده است. در این تحقیق تاثیر پارامترهای فرآیند بر سایش ابزار و زبری سطح قطعه با استفاده از روش رویه پاسخ مدل سازی و بررسی شده است و توسط روش بهینه سازی چند هدفه تابع مطلوبیت بهینه سازی شده است.

## ۲- طراحی و اجرای آزمایش ها

براساس مطالعات قبلی، پارامترهای سرعت دورانی، سرعت پیشروی، عمق برش و مدت زمان عملیات از مهم ترین پارامترهای تاثیر گذار بر میزان سایش ابزار در سطح براده ابزار می باشند. در این مقاله با در نظر گرفتن مطالعات قبلی و محدودیت های دستگاه، سطوح پارامترهای ورودی به صورت جدول ۱ در نظر گرفته شد. طراحی آزمایش ها به روش طراحی بهینه طرح عاملی و با استفاده از نرم افزار مینی تب ۸ انجام شده است [۹]. با توجه به سطوح پارامترها، تعداد ۳۰ آزمایش طراحی شد. برای انجام عملیات ماشین کاری نمونه ها، دستگاه تراش CNC مدل میانوفانوک ۸ به کار گرفته شد و از تیغچه الماسه سندویک ۹ به عنوان ابزار برشی استفاده شد. عملیات ماشین کاری به صورت خشک و بدون روان کار بر روی نمونه ها مطابق شکل ۱ انجام شد.

با انجام آزمایش ها، مقدار سایش سطح براده ابزار با استفاده از یک

1. Artificial neural network mathematical model

2. Micro Optics

3. Cryogenic Cooling

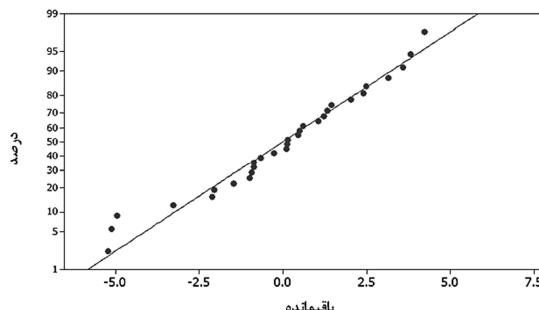
4. Minitab

5. Miyano-fanuk/JNC35

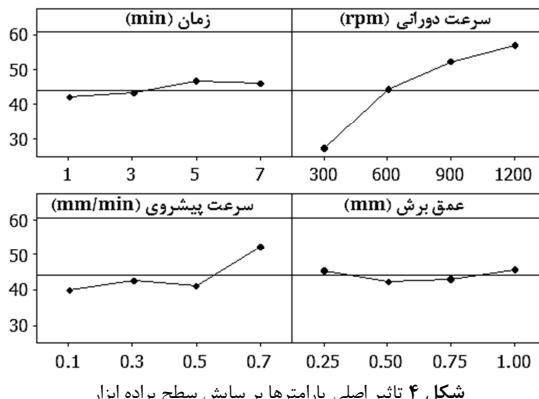
6. Sandvik

کمی افزایش یافته و با افزایش عمق برش ( $dc$ ), مقدار کمی کاهش و سپس افزایش می‌باشد.

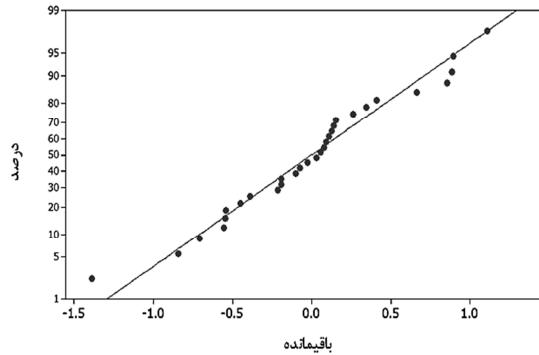
شکل ۵ نمودار احتمال نرمال برای زبری سطح می‌باشد که بیانگر نرمال بودن توزیع داده‌های است. در شکل ۶ تاثیر اصلی پارامترها بر زبری سطح قطعه-کار قطعه نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت پیشروی زبری سطح قطعه کار افزایش یافته و با افزایش سرعت برش کمی کاهش می‌باشد و تاثیر عمق برش و مدت زمان بر زبری سطح محسوس نیست. تاثیر متقابل دو پارامتر بر یک تابع پاسخ به معنای تاثیر یکی از پارامترها بر تابع پاسخ در سطوح مختلف پارامتر دیگر است. در شکل ۷ تاثیر متقابل پارامترها بر سایش سطح براده ابزار نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در تاثیر بر سایش سطح براده ابزار، سرعت برشی با سرعت پیشروی تاثیر متقابل ندارند ولی در بقیه حالتاً تاثیر متقابل مشاهده می‌شود.



شکل ۳ نمودار احتمال نرمال برای سایش سطح براده ابزار



شکل ۴ تاثیر اصلی پارامترها بر سایش سطح براده ابزار



شکل ۵ نمودار احتمال نرمال برای زبری سطح قطعه کار

### ۳- روش مدل‌سازی و بهینه‌سازی

برای مدل‌سازی و استخراج رابطه بین پارامترهای ورودی و خروجی فرایند از روش رویه پاسخ [۱۰] استفاده شد. در این روش برای برآش بین متغیرهای مستقل و تابع پاسخ، معمولاً از مدل مرتبه دوم استفاده می‌شود. مدل مرتبه دوم یک مدل کاملاً مفید و با اغلب طرح‌های تجربی سازگار است. فرم کلی این مدل به صورت رابطه (۱) می‌باشد.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k (\beta_i x_i) + \sum_{i=1}^k (\beta_{ii} x_i^2) + \sum_i \sum_j (\beta_{ij} x_i x_j) + \varepsilon \quad (1)$$

در این رابطه  $y$  تابع پاسخ،  $x_i$  و  $x_j$  متغیرهای مستقل،  $k$  تعداد متغیرهای مستقل،  $\beta_0$ ،  $\beta_i$  و  $\beta_{ii}$  ضرایب ثابت مجھول هستند که از تحلیل بدست می-آیند و  $\varepsilon$  خطای آماری است. میزان انطباق مدل با داده‌های تجربی با ضریب  $R^2$  بیان می‌شود که طبق رابطه (۲) محاسبه می‌گردد.

$$R^2 = \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (2)$$

$y_i$  مقدار حاصل از آزمایش،  $\hat{y}_i$  مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل و  $\bar{y}$  مقدار میانگین می‌باشد. بعد از مدل‌سازی رابطه برای بهینه‌سازی مقادیر پارامترهای ورودی برای زبری سطح و سایش ابزار کمینه از روش بهینه‌سازی چند هدفه تابع مطلوبیت استفاده شد. برای بهینه‌سازی با این روش، ابتدا باید درجه مطلوبیت انفرادی<sup>۱</sup> برای هر پاسخ محاسبه شود. اگر هدف کمینه نمودن یک پاسخ باشد، درجه مطلوبیت از رابطه (۳) حاصل خواهد شد.

$$\begin{aligned} d_i &= 0, & y_i > U_i \\ d_i &= \left[ \frac{(U_i - y_i)}{(U_i - T_i)} \right]^{r_i}, & T_i \leq y_i \leq U_i \\ d_i &= 1, & y_i < T_i \end{aligned} \quad (3)$$

در رابطه (۳)  $d_i$  درجه مطلوبیت انفرادی،  $y_i$  مقدار پیش‌بینی شده،  $T_i$  مقدار مطلوب،  $U_i$  بیشترین مقدار قابل قبول و  $r_i$  وزن تابع مطلوبیت برای پاسخ  $i$  می‌باشد. بعد از محاسبه درجه مطلوبیت انفرادی برای هر پاسخ، به منظور استفاده از آن‌ها برای ترکیب همه پاسخ‌ها و پیدا کردن شرایط مطلوب کلی، درجه مطلوبیت ترکیبی<sup>۲</sup> با استفاده از رابطه (۴) بدست می‌آید.

$$D = \left( \prod_i (d_i w_i)^{\frac{1}{W}} \right)^{\frac{1}{W}} \quad (4)$$

در رابطه (۴)،  $D$  درجه مطلوبیت ترکیبی،  $w_i$  اهمیت پاسخ  $i$  و  $W$  مجموع وزن‌ها می‌باشد. اساس استفاده از روش تابع مطلوبیت بدین صورت است که باید محدوده‌ای را برای بدست آوردن نقطه بهینه مشخص نمود. برای سایش ابزار و صافی سطح قطعه، ابتدا باید درجه اهمیت، بیشترین مقدار و سپس مقدار قابل قبول را تعیین نمود. برای این موضوع هدف موردنظر، رسیدن دو تابع به حداقل مقدار ممکن می‌باشد.

### ۴- نتایج و بحث

با تحلیل آزمایش‌ها به روش رویه پاسخ، تاثیر اصلی و متقابل پارامترها و همچنین مدل رگرسیون توابع پاسخ استخراج شد. در شکل ۳ نمودار احتمال نرمال برای سایش سطح براده ابزار آمده است. برآش نقاط حاصل از آزمایشات بر خط مورب نشان نرمال بودن توزیع داده‌ها می‌باشد. شکل ۴ تاثیر اصلی پارامترها را بر روی سایش سطح براده ابزار نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت برشی (rpm) و سرعت پیشروی (fr) در محدوده تعیین شده، سایش سطح براده ابزار افزایش می‌باشد. همچنین با افزایش مدت زمان عملیات ماشین‌کاری ( $T_i$ ) سایش سطح براده ابزار مقدار

1. Individual Desirability  
2. Composite Desirability

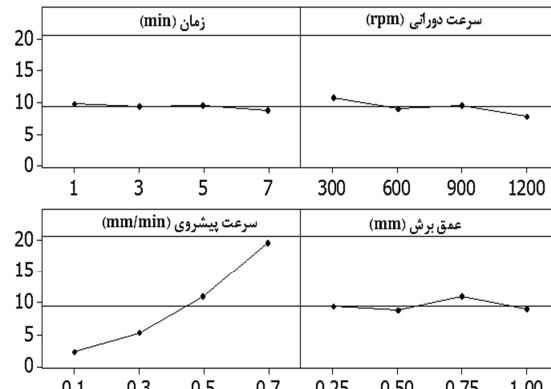
با برآریز مدل رویه پاسخ مرتبه دوم بر هر دوتابع پاسخ، مدل رگرسیون سایش سطح براده ابزار و زبری سطح قطعه کار به ترتیب به صورت روابط زیر بدست آمد:

$$\begin{aligned} \text{Wear} = & 10.4165 - 0.901247t_i + 0.0578542\text{rpm} - \\ & 5.79775fr + 1.70119dc + 10.8188fr\cdot fr + 1.98711dc\cdot dc + \\ & 0.00306384t_i\cdot rpm + 0.408448t_i\cdot fr - \\ & 0.781633t_i\cdot dc + 0.0268258\text{rpm}\cdot fr + 0.00667038\text{rpm}\cdot \\ & dc - 8.7295fr\cdot dc \end{aligned} \quad (2)$$

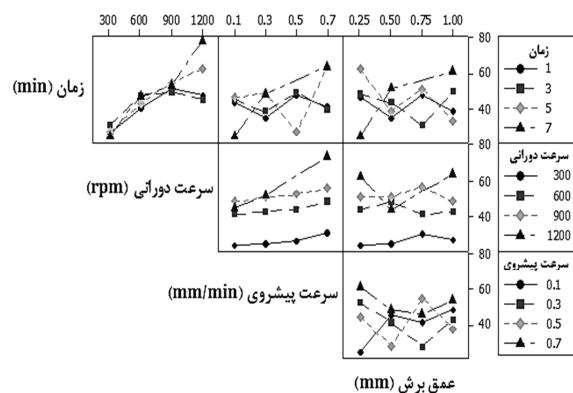
$$\begin{aligned} \text{Roughness} = & -1.46022 + 0.354127t_i - \\ & 0.00624224\text{rpm} + 5.70689fr + 16.5441dc + 0.006354 \\ & 55t_i\cdot ti + 30.6707fr\cdot fr - \\ & 8.11872dc\cdot dc + 0.000573972t_i\cdot rpm - 0.828372t_i\cdot fr - \\ & 0.887998t_i\cdot dc + 0.00461646\text{rpm}\cdot fr - \\ & 0.00218961\text{rpm}\cdot dc - 2.53507fr\cdot dc \end{aligned} \quad (3)$$

در مرحله بعدی تحلیل واریانس بر روی مدل‌ها انجام شد و موثر بودن مدل و ضرایب آن بررسی گردید و میزان انطباق مدل با داده‌ها از لحاظ آماری بدست آمد. در تحلیل‌های واریانس مقدار  $\alpha$  در آزمون F برابر  $F_{0.05} = 4.05$  در نظر گرفته شده که بیانگر این است که در صورتیکه مقدار احتمال  $P$  در تحلیل واریانس کمتر از  $0.05$  باشد، پارامتر مربوطه با احتمال بالای  $95\%$  موثر می‌باشد. مطابق نتایج تحلیل واریانس برای تابع سایش سطح براده ابزار طبق جدول ۳، مشاهده گردید که مقدار احتمال  $P$  برای هر سه نوع جمله خطی، درجه دو، متقابل و کل مدل رگرسیون در تابع پاسخ کمتر از  $0.05$  است. بنابراین مدل رگرسیون برای تابع سایش سطح براده ابزار قابل قبول است.

نتایج تحلیل واریانس برای تابع زبری سطح قطعه کار در جدول ۴ آمده است. مشاهده می‌شود که مقدار احتمال  $P$  برای هر سه نوع جمله خطی، درجه دو و متقابل و همچنین کل مدل رگرسیون تابع پاسخ کمتر از  $0.05$  است. بنابراین مدل رگرسیون برای تابع زبری سطح قطعه کار قابل قبول است. مقدار  $R^2$  برای تابع پاسخ سایش سطح براده ابزار  $0.96/46$  و برای زبری سطح قطعه کار  $0.99/38$  بدست آمد که نشان دهنده کفايت بالای مدل توابع پاسخ می‌باشد. بنابراین از این مدل‌ها می‌توان جهت بررسی پارامترها و نیز بهینه‌سازی فرآيند استفاده کرد. در شکل ۹ نمودار رویه پاسخ تاثیر پارامترهای سرعت پیشروی و برشی بر سایش سطح براده ابزار در مدت زمان ۴ دقیقه و عمق برش  $0.625$  نشان داده شده است. مطابق با شکل مشاهده

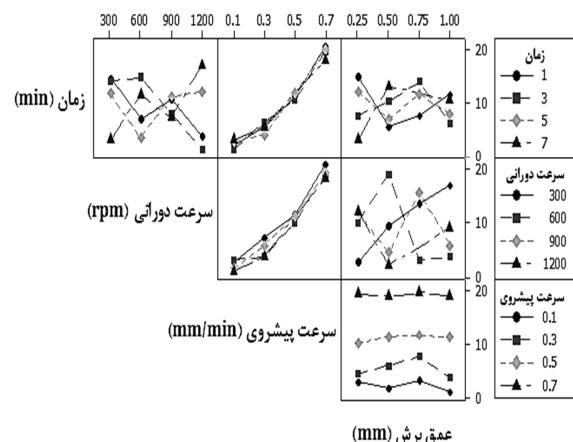


شکل ۶ تاثیر اصلی پارامترها بر زبری سطح قطعه کار



شکل ۷ تاثیر متقابل پارامترها بر سایش سطح براده ابزار

تاثیر متقابل پارامترها بر زبری سطح قطعه کار در شکل ۸ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در تاثیر بر زبری سطح قطعه کار، مدت زمان با سرعت برشی و عمق برش با سرعت برشی و عمق برش با مدت زمان تاثیر متقابل دارند. به طور مثال در مدت زمان‌های مختلف، تاثیر سرعت برشی بر زبری سطح قطعه کار متفاوت بوده اما پارامترهای زمان و سرعت پیشروی تاثیر متقابل ندارند، زیرا با افزایش سرعت پیشروی در مدت زمان‌های مختلف زبری سطح قطعه کار افزایش می‌یابد.



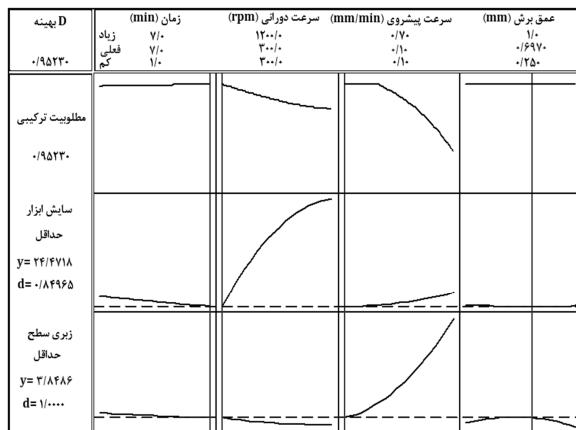
شکل ۸ تاثیر متقابل پارامترها بر زبری سطح قطعه کار

جدول ۳ تحلیل واریانس برای تابع سایش سطح براده ابزار		
P	درجه آزادی	عبارت
•/•••	۱۴	رگرسیون
•/•••	۴	خطی
•/۰۱۲	۴	درجه دو
•/۰۳۳	۶	اثر متقابل

جدول ۴ تحلیل واریانس برای تابع زبری سطح قطعه کار		
P	درجه آزادی	عبارت
•/•••	۱۴	رگرسیون
•/•••	۴	خطی
•/•••	۴	درجه دو
•/۰۱۲	۶	اثر متقابل

جدول ۵ مقادیر بهینه پارامترهای ورودی و خروجی

مقدار بهینه	پارامتر
۷	زمان عملیات (min)
۳۰۰	سرعت دورانی (rpm)
۰/۱۰	سرعت پیشروی (mm/min)
۰/۶۹۷۰	عمق برش (mm)
۲۴/۴۷۱۸	سایش ابزار (μm)
۳/۸۴۸۶	زبری سطح (μm)



شکل ۱۱ نتایج بهینه‌سازی به روش تابع مطلوبیت

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله تاثیر پارامترهای سرعت پیشروی، عمق برش، مدت زمان و سرعت برشی بر سایش سطح براده ابزار و زبری سطح قطعه کار در فرآیند ماشین کاری فولاد ۴۱۴۰ با روش های رویه پاسخ و تابع مطلوبیت، مدل سازی و بهینه‌سازی شد. نتایج حاصل را می‌توان بصورت زیر جمع بندی کرد :

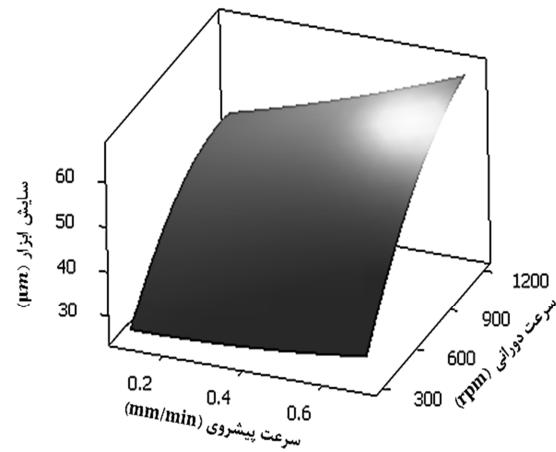
- ۱- در مدل سازی فرآیند، مقادیر احتمال  $P$  و ضریب  $R^2$  بیانگر انطباق خوب مدل‌ها با داده‌ها و کفايت بالاي مدل‌ها است.
- ۲- با بهینه‌سازی مقادیر پارامترهای ورودی، مقدار سایش کمینه ۲۴/۴ میکرون و زبری سطح کمینه ۳/۸ میکرون حاصل شد.
- ۳- بررسی اثر پارامترها نشان می‌دهد که با افزایش سرعت برشی و پیشروی، سایش سطح براده ابزار افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش زمان عملیات سایش به مقدار کمی افزایش یافته و با افزایش عمق برش، مقدار کمی کاهش و سپس افزایش می‌یابد.
- ۴- از لحاظ تاثیر متقابل پارامترها در تاثیر بر زبری سطح قطعه کار، مدت زمان با سرعت برشی و عمق برش با سرعت برشی و عمق برش با مدت زمان تاثیر متقابل دارند.
- ۵- با افزایش سرعت پیشروی زبری سطح قطعه کار افزایش می‌یابد و با افزایش سرعت برشی، کمی کاهش می‌یابد و تاثیر عمق برش و مدت زمان محسوس نیست.
- ۶- در تاثیر بر سایش سطح براده ابزار، سرعت برشی با سرعت پیشروی تاثیر متقابل ندارند ولی در بقیه حالت‌ها تاثیر متقابل مشاهده می‌شود.

## ۶- مراجع

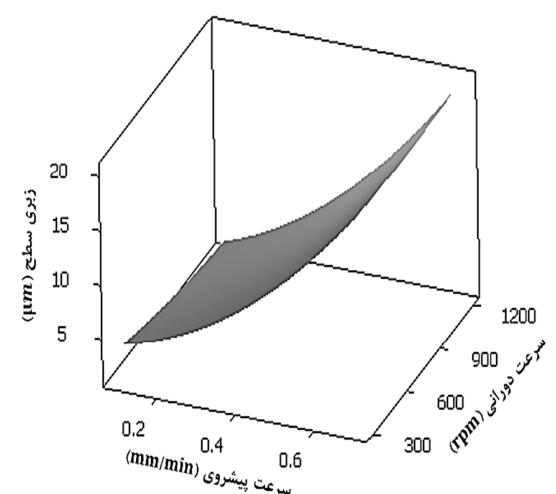
- [1] D.E. Dimla, P.M. Lister, On-line metal cutting tool condition monitoring. I: force and vibration analyses, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 40, pp. 739-768, 2000.

می‌شود که با افزایش سرعت پیشروی و برشی، سایش سطح براده ابزار افزایش می‌یابد و تاثیر سرعت برشی بر سایش شدیدتر است. در شکل ۱۰ رویه پاسخ زبری سطح قطعه کار برای دو پارامتر سرعت پیشروی و برشی نشان داده است. مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت پیشروی زبری سطح قطعه کار افزایش می‌یابد.

با مدل سازی قابل قبول توابع پاسخ بر حسب پارامترهای ماشین کاری، مقادیر این پارامترها برای کمینه‌سازی سایش ابزار و زبری سطح قطعه با روش تابع مطلوبیت بهینه‌سازی شد. در بهینه‌سازی چند هدفه با توجه به اهمیت هر یک از توابع هدف نقاط بهینه متعددی وجود دارد. برای درجه اهمیت ۳۰٪ و ۷۰٪ به ترتیب برای سایش ابزار و زبری سطح، نتایج حاصل از بهینه‌سازی، در شکل ۱۱ نشان داده است. تغییرات توابع پاسخ و تابع مطلوبیت کل بر حسب پارامترها در شکل ۱۱ نشان داده شده است. مطابق با شکل مشخص است که درجه مطلوبیت نقطه بدست آمده ۰/۹۵ می‌باشد. بنابراین می‌توان نقطه بهینه را به عنوان نقطه مورد قبول انتخاب کرد. در جدول ۵ مقادیر بهینه بدست آمده برای پارامترهای ورودی و خروجی نشان داده شده است.



شکل ۹ رویه پاسخ تاثیر سرعت پیشروی و دورانی بر سایش سطح براده ابزار



شکل ۱۰ رویه پاسخ زبری سطح قطعه کار برای دو پارامتر سرعت پیشروی و دورانی

- life measurements for optimal tool management, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 43, pp. 359-368, 2003.
- [7] S.E. Oraby, D.R. Hayhurst, Tool life determination based on the measurement of wear and tool force ratio variation, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 44, pp. 1261-1269, 2004.
- [8] N.R. Dhar, S. Paul, A.B. Chattopadhyay, Machining of AISI 4140 steel under cryogenic cooling-tool wear, surface roughness and dimensional deviation, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 123, No. 3, pp. 483-489, 2002.
- [9] Minitab software, V16, user's guide, technical manual, 2013.
- [10] B. Davoodi, B. Eskandari, Investigation of tool life and wear mechanisms in turning of N-155 iron-nickel-base superalloy using response surface methodology, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No.15, pp. 51-58, 2015. (In Persian)
- [2] R. Teti, K. Jemielniak, G. O'Donnell, D. Dornfeld, Advanced monitoring of machining operations, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 59, No. 2, pp. 717-739, 2010.
- [3] J.D. Thiele, S.N. Melkote, R.A. Peascoe, T.R. Watkins, Effect of cutting-edge geometry and workpiece hardness on surface residual stresses in finishhard turning of AISI 52100 steel, *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 122, pp. 642-649, 2000.
- [4] P. Palanisamy, I. Rajendran, S. Shanmugasundaram, Prediction of tool wear using regression and ANN models in end milling operation, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 37, pp. 29-41, 2007.
- [5] P.W. Prickett, C. Johns, An overview of approaches to end milling tool monitoring, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 39, No. 1, pp. 105-122, 1994.
- [6] Y. Kwon, G.W. Fischer, A novel approach to quantifying tool wear and tool