



بررسی و مطالعه اثرات پارامترهای فرآیند تراش کاری بر قابلیت ماشین کاری آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ رسوب سخت شده

پیمان قاسمی تمامی^۱، مصطفی حبیب نیا^{۲*}، محمد امینی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه آزاد اسلامی، ساری

۲- مربی، مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه آزاد اسلامی، جویبار

۳- کارشناس ارشد، مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه آزاد اسلامی، ساری

*ساری، صندوق پستی ۴۸۱۳۹۶۵۹۹۸، M.habibnia@stu.nit.ac.ir

چکیده

در فرآیند تراش کاری پارامترهای فرآیند اثرات متفاوتی را بر قابلیت های ماشین کاری می گذارند. از این رو یکی از مشکلاتی که با این فرآیند آمیخته است انتخاب بهینه پارامترها جهت رسیدن به مطلوب ترین قابلیت ماشین کاری می باشد. در این پژوهش یک مطالعه آزمایشگاهی برای بررسی و مطالعه اثرات پارامترهای فرآیند تراش کاری مانند سرعت چرخش اسپیندل، سرعت پیشروی و عمق بار بر قابلیت ماشین کاری مانند نیرو، زبری سطح و سایش ابزار آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ رسوب سخت شده انجام می شود. بدین منظور تعداد ۱۵ آزمایش با استفاده از روش طرح مرکب مرکزی طراحی شد تا مدل های تجربی از خروجی ها استخراج گردد و اثرات پارامترها مورد بررسی قرار گیرد. در پایان جهت بهینه سازی همزمان نیرو، زبری سطح و سایش ابزار از روش تابع مطلوب استفاده شد. نتایج نشان داد که انتخاب سرعت چرخش اسپیندل در سطح دوم، سرعت پیشروی در سطح اول و عمق برش در سطح سوم سبب رسیدن به کمترین مقدار نیرو، زبری سطح و سایش ابزار می شود.

کلید واژگان: تراش کاری، آلومینیوم ۲۰۲۴ رسوب سخت شده، زبری سطح، سایش ابزار، بهینه سازی

Investigation of the effects of turning process parameters on the machinability of the age hardened Aluminum alloy 2024

Peyman Ghasemi Tamami¹, Mostafa Habibnia^{2*}, Mohammad Amini¹

1-Mechanics, Islamic Azad University, Sari, Iran

2-Mechanics, Islamic Azad University, Jouybar, Iran

*P.O.B. 4813965998, Sari, Iran, M.habibnia@stu.nit.ac.ir

ABSTRACT

In turning process, the predominant parameters have different influences on machinability. Thus, a main problem associated with this process is to select optimal solution in which the process reaches to desirable performance. In the present work, an experimental study has been attempted to investigate the effect of turning parameters such as spindle speed, feed rate and depth of cut on machinability properties such as axial force, surface roughness and tool wear while turning of age hardened 2024 aluminum alloy. Hence, fifteen experiments is designed and conducted based on central composite design to obtain the empirical model from outputs and study effects of parameters. Finally, the desirability approach function has been used to optimize force, surface roughness and tool wear, simultaneously. Results indicated that selection of spindle speed at the second level, feed rate at the first level and the depth of cut at the third level guarantees the minimum surface roughness and tool wear.

Keywords: Hardened 2024 Aluminum Alloy, Optimization, Surface Roughness, Tool Wear, Turning.

می گیرد [۱]. قبل از بحث در مورد عملیات تراش کاری بهتر است به خصوصیات چند از قلم های تک لبه ای که در تراش کاری به کار می رود توجه شود. قلم های تک لبه دارای یک قسمت برنده و یک دنباله می باشند [۲]. شکل ۱ مهمترین قسمت های این قلم، لبه برنده و سطوح مشرف به آن می باشد.

در این پژوهش آزمایش ها در دستگاه ماشین تراش انیورسال ۴۳۰۱ شرکت ایندکس^۲ آلمان انجام شده است. این دستگاه از یک موتور با توان اسمی ۱/۷ کیلووات با سرعت دورانی ۳۰۰۰ دور بر دقیقه بهره می برد که توسط یک گیربکس می تواند بی نهایت سرعت دورانی بین ۱۰ تا ۲۰۰۰ دور بر دقیقه را تامین کند. ماشین تراش شامل یک ابزار گیر می باشد که قابلیت

۱- مقدمه

در این بخش ابتدا بررسی کوتاهی در مورد مکانیزم تراش کاری و اثر عوامل مختلف بر قابلیت های ماشین کاری انجام می گردد. سپس متدولوژی طراحی آزمایش و بهینه سازی با استفاده از روش های آماری مورد بحث و بررسی قرار می گیرد.

۱-۱- تراش کاری^۱

معمول ترین عملیات ماشین کاری که توسط دستگاه تراش انجام می گیرد عمل رو تراشی، مخروط تراشی، داخل تراشی، پیشانی تراشی و پیچ تراشی است که در اثر گردش قطعه کار (حرکت اصلی) و حرکت ابزار (حرکت تغذیه) انجام

خاص تعیین می کند).

۲-۱- سایش ابزار

بطور کلی سایش در ابزار به صورت زیر طبقه بندی می شود:

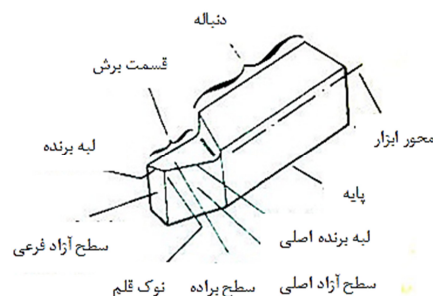
- تغییر شکل پلاستیک لبه برنده در اثر تنش های فشاری
- سایش ابزار در اثر چسبندگی
- سایش ابزار در اثر ساییدگی
- سایش ابزار در اثر نفوذ
- سایش ابزار در اثر خستگی

در این پژوهش برای اندازه گیری سایش ابزار از یک دستگاه میکروسکوپ میتوتویو^۴ استفاده گردید. این میکروسکوپ به دوربین کنون^۵ برای عکس برداری از تصاویر دیده شده و یک مانیتور ۱۶ اینچ برای نمایش تصاویر مجهز شده است. بدین ترتیب براحتی می توان سایش ابزار را بوسیله مانیتور تشخیص داد سپس از سایش مورد نظر بوسیله دوربین عکس گرفت. شکل ۲ میکروسکوپ استفاده شده را به همراه دوربین عکس برداری نشان می دهد.

۲- طراحی آزمایشات

در تمام زمینه های علمی و پژوهشی، به منظور شناسایی یک فرآیند یا سیستم معین و استخراج مطالب جدید معمولاً بایستی آزمایش انجام شود. برای این منظور به پایگاه داده تجربی از فرآیند نیاز می باشد [۴]. تست های عملی به دو صورت قابل انجام می باشند. یکی انجام آن ها بدون الگو و طراحی مشخص و دیگری استفاده از رویکرد طراحی آزمایشات می باشد که در این حالت برحسب تعداد پارامترهای مورد مطالعه، دقت مورد انتظار، منابع موجود و ... از یک الگوی استاندارد به نام ماتریس طرح آزمایشات استفاده می شود [۵]. تفاوت این دو نحوه اجرا در این است که در روش اول به دلیل انتخاب دلخواه تعداد آزمایشات و سطوح تغییر پارامترها، تمامی ترکیبات متغیرها یا بهترین آن ها، مورد آزمایش قرار نگرفته و حتی با انجام تعداد زیادی آزمایش و صرف منابع زیاد (افزایش زمان و هزینه) بعضی از پارامترهای ورودی کمتر ارزیابی می شوند. لذا در تحلیل نتایج حاصل از آزمایشات دقت های لازم قابل وصول نیست. اما در روش دوم با انجام حداقل آزمایش منطقی، از بهترین سطوح متغیرهای مورد مطالعه، ارزیابی یکسانی از پارامترها صورت می گیرد. معمولاً برای کاهش تعداد آزمایشات، فضای جواب ها گسسته شده تا فقط چند سطح مورد بررسی قرار گیرند [۶]. به طور کلی برای یک آزمایش با K متغیر و n سطح برای هر متغیر، تعداد کل آزمایشات برابر با nk خواهد شد. بنابراین با افزایش تعداد متغیرها، تعداد آزمایشات به صورت نمایی افزایش می یابد که انجام این تعداد آزمایش منطقی نیست. بنابراین هدف اصلی از طراحی آزمایشات، گسسته سازی مناسب فضای جواب ها و انتخاب مهم ترین حالات آزمایشی است تا بتوان با استفاده از آن، فرآیند را به بهترین وجه بررسی کرد. کلیه فرآیندها دارای ورودی، خروجی و تعدادی عوامل قابل کنترل یا غیرقابل کنترل می باشند. بنابراین اگر میزان و شیوه اثرگذاری هر عامل در جریان تبدیل ورودی به خروجی مشخص باشد، می توان فرآیند را کنترل کرد [۷].

شکل ۳ عملکرد طراحی آزمایشات به صورت شماتیک همراه با ورودی و خروجی و روابط بین آن ها را نشان داده است.



شکل ۱ ابزار تک لبه

تجهیز شدن در این پژوهش آزمایش ها در دستگاه ماشین تراش انیورسال ۴۳۰۱ شرکت ایندکس^۱ آلمان انجام شده است. این دستگاه از یک موتور با توان اسمی ۱/۷ کیلووات با سرعت دورانی ۳۰۰۰ دور بر دقیقه^۲ بهره می برد که توسط یک گیربکس می تواند بی نهایت سرعت دورانی بین ۱۰ تا ۲۰۰۰ دور بر دقیقه را تامین کند. ماشین تراش شامل یک ابزارگیر می باشد که قابلیت تجهیز شدن به چندین ابزار را دارد. این ماشین دارای سیستم پایش شرایط ابزار بوده و به محض این که احتمال سایش زیاد و شکست در ابزار به وجود آید پروسه متوقف شده و ابزار جایگزین می شود. سرعت پیشروی ابزار توسط یک سیستم محرک جداگانه تامین می شود که قابلیت تولید نرخ های پیشروی متغیری را دارا می باشد.

به منظور انجام آزمایش های فرآیند تراش کاری، قطعه هایی از جنس آلومینیوم ۲۰۲۴ با قطر ۲۰ میلی متر تهیه شد و آزمایشات بر روی این قطعه انجام گردید. این قطعه کار یک آلیاژ رسوب سخت شده می باشد که طی عملیات حرارتی رسوب سختی شامل حرارت دادن، سرد کردن و پیرسازی، سختی و استحکام آن افزایش یافته است. این آلیاژ شامل مس، کروم، آهن، منیزیم، منگنز، سیسیسم، تیتانیوم، قلع و آهن می باشد. جهت ماشین کاری ماده مذکور در این پژوهش از یک ابزار با جنس فولاد تندبر استفاده شده است. این ابزار با مشخصه TNMG 1604 در بازار موجود بوده و ساخت کشور آلمان می باشد. جهت اندازه گیری نیروهای ماشین کاری از دینامومتر ساخت شرکت کیستلر^۳ سوییس استفاده شده است.

۲-۱- قابلیت ماشین کاری

مهندسی ساخت و تولید می گوید که هم حداقل هزینه تولید و هم حداکثر نرخ تولید را داشته باشد. این دو امر مهم با انتخاب پارامترهای ماشین کاری نظیر سرعت، پیشروی و عمق برش در ارتباط هستند. بهینه کردن این شرایط براساس قابلیت ماشین کاری مواد بوده و با آن ارتباط تنگاتنگی دارد. اینک ضرورت روزافزونی برای برقراری ارتباط بین مواد خام موجود در مهندسی و تولیدات نیمه تمام، با قابلیت ماشین کاری مخصوص مشاهده می شود. دانستن خصوصیات قابلیت ماشین کاری یک ماده که باید بر روی آن فرآیندی انجام گیرد برای صنایع بسیار سودمند می باشد و علت این امر این است که ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی به تنهایی برای تأمین خواص ماشین کاری مواد کافی نیستند [۳].

در زمینه مربوط به ساخت و تولید و تحقیقات می توان عبارت قابلیت ماشین کاری را چنین تعریف کرد:

(خاصیتی از مواد است که سهولت و سختی ماشین کاری را تحت یک شرایط

1. INDEX
2. Revolution per minute
3. KISTLER

4. Mitutoyo
5. Canon

جهت بررسی صحت این مدل‌ها آنالیز واریانس مربوط به نیروی محوری، زبری سطح و سایش ابزار محاسبه شده است که جدول ۲ به عنوان نمونه آنالیز واریانس مربوط به زبری سطح را نشان می‌دهد و مورد بررسی قرار گرفته است و از نمایش سایر جدول‌های واریانس و شکل‌های مربوط به اثرات متقابل به علت حجم بالا صرف نظر شده است.

در جدول ۲ دیده می‌شود که مقدار $Prob>F$ برای این مدل حدود از ۰/۰۰۰۱ می‌باشد. این مقدار بدین معنی است که مدل مربوطه اهمیت قابل ملاحظه‌ای در پیش بینی زبری سطح دارد. عدم تناسب^۲ ۰/۰۴۸ نشان دهنده‌ی این می‌باشد که احتمال این‌که این داده‌ها به صورت اتفاقی جمع آوری شده باشند کم می‌باشد. بنابراین مدل مربوطه هم صحت و هم دقت کافی را در پیش بینی زبری سطح خواهد داشت. بنابراین می‌توان از این مدل تجربی جهت تحلیل اثرات پارامترهای فرآیند بر زبری سطح



شکل ۲ میکروسکوپ نوری به همراه دوربین جهت عکس برداری از سطح جانبی ابزار



شکل ۳ عملکرد طراحی آزمایش بصورت شماتیک

۳- بررسی اثرات پارامترها

به منظور بررسی اثرات پارامترهای فرآیند بر نیروی محوری، زبری سطح و سایش ابزار تعداد ۱۵ آزمایش با استفاده از روش طراحی مرکب مرکزی انجام شد. جدول ۱ مقادیر به دست آمده از نیروی ماشین کاری، زبری سطح و سایش ابزار را نشان می‌دهد. جهت بررسی اثرات پارامترها این مقادیر به نرم افزار دیزاین اکسپرت^۱ داده شده و نمودار اثرات پارامترها بر پاسخها مشخص می‌گردد. سپس این اثرات با توجه به فیزیک فرآیند تراش کاری مورد توجه قرار می‌گیرد.

۴- بررسی نیروی محوری، زبری سطح و سایش ابزار

جهت بررسی تجربی نیروی محوری، زبری سطح و سایش ابزار و بررسی اثرات پارامترها بر آن داده‌های موجود در جدول ۱ را به نرم افزار دیزاین اکسپرت داده و معادله تجربی به دست آمده، دقت و صحت آن و همچنین اثرات متغیرها بر آن را مرحله به مرحله مورد بررسی قرار می‌دهیم.

معادله‌ی (۱) چندجمله‌ای به دست آمده از یک مدل تجربی جهت ارایه رابطه بین متغیرهای فرآیند و نیروی محوری می‌باشد که از تحلیل در نرم افزار دیزاین اکسپرت به دست آمده است. همین مراحل برای زبری سطح و سایش ابزار صورت گرفته است که معادلات (۲) و (۳) بیانگر آن می‌باشند.

$$F_z = 647.23 - 0.373N - 280.15f + 238.87doc + 1.12 \times 10^{-4}N^2 - 1030.3f^2 - 47.27doc^2 - 0.05N.f - 0.065N.doc + 66116f.doc \quad (1)$$

F_z نیروی محوری (نیوتن)

N سرعت دورانی اسپیندل (دور بر دقیقه)

f نرخ پیشروی (میلی متر بر ثانیه)

Doc عمق برش (میلی متر)

$$V_B = 0.7189 - 8.15 \times 10^{-4}N + 0.2389f + 0.1273doc + 1.33 \times 10^{-4}N.f - 3 \times 10^{-5}N.doc + 0.33f.doc + 3.18 \times 10^7N^2 + 0.202f^2 - 0.031doc^2 \quad (2)$$

V_B سایش ابزار (میلی متر)

$$Ra = 3.38 - 6.7 \times 10^{-4}N + 3.2f - 0.45doc \quad (3)$$

Ra زبری سطح (میکرومتر)

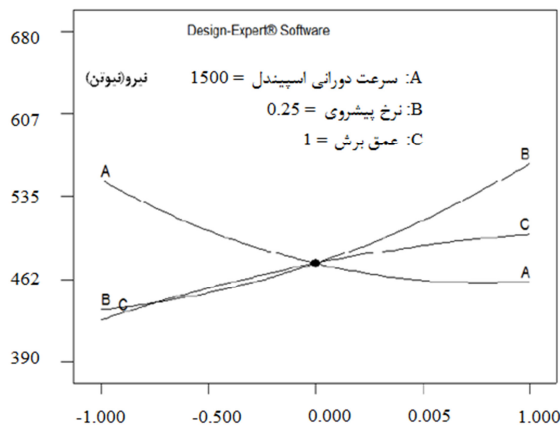
جدول ۱ داده‌های مربوط به بررسی نیروی برشی و اثرات پارامترها

شماره	سرعت دورانی	نرخ پیشروی	عمق برش	نیرو	زبری سطح ^۴	سایش
اسپیندل	(میلی متر بر (میلی متر (نیوتن (میکرومتر) جانبی ^۳	(دور بر دقیقه)	(ثانیه)	(میلی متر)	(میلی متر)	(میلی متر)
۱	۱۰۰۰	۰/۱	۰/۵	۴۵۰	۳/۵	۰/۲۷۵
۲	۲۰۰۰	۰/۱	۰/۵	۳۹۰	۲	۰/۴
۳	۱۰۰۰	۰/۴	۰/۵	۵۵۰	۳/۷۵	۰/۳۶
۴	۲۰۰۰	۰/۴	۰/۵	۵۱۰	۳/۱۵	۰/۴۱
۵	۱۰۰۰	۰/۱	۱/۵	۵۴۰	۲/۲۵	۰/۳۲
۶	۲۰۰۰	۰/۱	۱/۵	۴۲۰	۱/۸	۰/۳۸
۷	۱۰۰۰	۰/۴	۱/۵	۶۸۰	۳/۴	۰/۳۸
۸	۲۰۰۰	۰/۴	۱/۵	۵۷۰	۲/۸	۰/۴۳۵
۹	۱۰۰۰	۰/۲۵	۱	۵۷۰	۳	۰/۳۲۵
۱۰	۲۰۰۰	۰/۲۵	۱	۴۶۰	۲/۵۵	۰/۴۱۵
۱۱	۱۵۰۰	۰/۱	۱	۴۴۵	۲/۳	۰/۲۷
۱۲	۱۵۰۰	۰/۴	۱	۵۷۵	۳/۳	۰/۳۲
۱۳	۱۵۰۰	۰/۲۵	۰/۵	۴۴۰	۳	۰/۲۵
۱۴	۱۵۰۰	۰/۲۵	۱/۵	۵۱۰	۲/۶۵	۰/۳۱۵
۱۵	۱۵۰۰	۰/۲۵	۱	۴۷۰	۲/۵۵	۰/۲۹۵

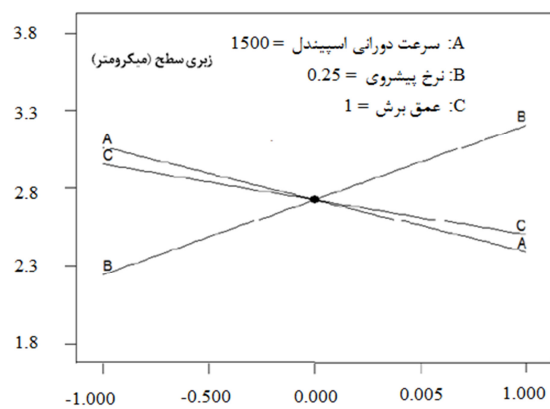
جدول ۲ آنالیز واریانس مربوط به مدل سازی تجربی زبری سطح

منبع	مجموع مربعات ^۱	درجه	میانگین	مقدار نیروی	$Prob>F$
آزادی ^۷	مربعات ^۶	برشی ^۵			
مدل	۳/۹۳	۳	۱/۳۱	۳۹/۹۵	۰/۰۰۰۱
سرعت دورانی اسپیندل	۱/۱۲	۱	۱/۱۲	۳۴/۲	۰/۰۰۰۱
نرخ پیشروی	۲/۳	۱	۲/۳	۷۰/۲۲	۰/۰۰۰۱
عمق باردهی	۰/۵۱	۱	۰/۵۱	۱۵/۴۳	۰/۰۰۱۲
باقیمانده ^۹	۰/۵۳	۱۶	۰/۰۳۳	-	-
عدم تناسب	۰/۵۳	۱۱	۰/۰۴۸	-	-
خطای خالص ^{۱۰}	۰/۰۰	۵	۰/۰۰۰	-	-

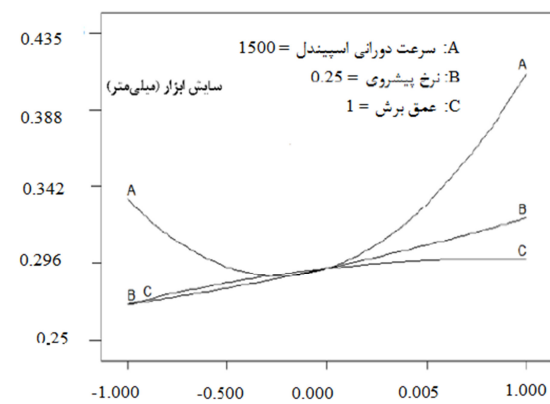
2. Lack of fit
3. Flank wear
4. Surface roughness
5. F-Value
6. Mean squares (MS)
7. Degree of freedom (DF)
8. Sum of squares (SS)
9. Residual
10. Pure error



شکل ۴ نمودار اثر پارامترهای فرآیند بر نیروی محوری ماشین کاری



شکل ۵ نمودار اثر پارامترهای فرآیند بر زبری سطح قطعه کار



شکل ۶ نمودار اثر پارامترهای فرآیند بر سایش ابزار

۵-۱- بهینه سازی با روش تابع مطلوب

امروزه در بین روش های آماری روش تئوری تابع مطلوب به دلیل اجرای آسان، در دسترس بودن نرم افزاری آن و قابلیت انعطاف پذیری آن برای حل مسائل بهینه سازی چندهدفه و تک هدفه با وزن های مختلف مورد توجه محققین قرار گرفته است. با استفاده از این روش یک مسئله بهینه سازی چندهدفه را می توان به داخل یک کمیت بی بعد به نام تابع مطلوب کلی نگاشت [۸]. تئوری تابع مطلوب شامل نگاشتن هریک از خروجی ها به داخل یک بازه بین صفر و یک می باشد. در این بازه هرچه مقدار di به یک نزدیک تر باشد گفته می شود که

ماشین کاری استفاده نمود. نمودار تأثیرات پارامترهای فرآیند بر قابلیت ماشین کاری در شکل های ۹-۴ آمده است. این اشکال با استفاده از مدل تجربی بدست آمده از نرم افزار دیزاین اکسپرت بدست آمده است و خروجی نرم افزار می باشند. شکل های ۹-۷ به بررسی اثر متقابل برخی پارامترها پرداخته است. با بررسی شکل ۴ این نتیجه به دست می آید که نیروی ماشین کاری با نرخ پیشروی و عمق برش رابطه مستقیم و با سرعت دورانی اسپیندل رابطه عکس دارد. با افزایش سرعت دورانی اسپیندل سرعت برشی افزایش می یابد و افزایش سرعت برشی باعث افزایش حرارت و کاهش اصطکاک بین ابزار و قطعه کار می شود و نیروی ماشین کاری را کاهش می دهد. با افزایش سرعت پیشروی ابزار مدت کمتری با قطعه کار درگیر می باشد و توسعه حرارت کم بوده و نرم شدن صورت نمی گیرد و نیروی محوری افزایش می یابد. با افزایش عمق بار میزان سطح مقطع براده تغییر شکل نیافته افزایش پیدا کرده و سبب افزایش سطح تماس بین ابزار و قطعه کار می گردد و نیروی محوری را افزایش می دهد. با بررسی شکل ۵ این نتیجه به دست می آید که زبری سطح با سرعت دورانی اسپیندل و عمق برش رابطه عکس و با نرخ پیشروی رابطه مستقیم دارد. دو دلیل که افزایش سرعت دورانی اسپیندل باعث افزایش کیفیت سطح می شود این است که افزایش سرعت دورانی اسپیندل باعث افزایش حرارت و کاهش ضریب اصطکاک بین ابزار و قطعه کار و رسیدن به کیفیت سطح مطلوب می شود و دلیل دوم عدم تشکیل براده پیوسته با لبه انباشته^۱ در سرعت های بالا می باشد. در مورد نرخ پیشروی افزایش این پارامتر سبب افزایش ضخامت براده تغییر شکل نیافته و نیروی ماشین کاری می شود. این افزایش در نیروی ماشین کاری سبب اعمال نیروی زیادی بر ابزار شده و تیزی نوک ابزار را از بین می برد و باعث افزایش زبری سطحی می شود. در مورد اثر عمق بار افزایش این پارامتر سبب افزایش سطح مقطع براده تغییر شکل نیافته شده و سبب انجام کار مکانیکی بیشتر خواهد شد. در اثر این افزایش در کار مکانیکی لایه های برداشته شده دچار بروز پدیده کارسختی شده و سختی سطحی بالاتر می رود [۱۰]. در اثر این افزایش سختی تغییر شکل پلاستیک و به وجود آمدن ناهمواری های ناشی از آن در سطح قطعه کار به سختی انجام شده و سبب بهبود کیفیت سطح ماشین کاری خواهد شد. با بررسی شکل ۶ هم مشخص می شود که افزایش سرعت چرخش اسپیندل در ابتدا تا حدی سبب کاهش سایش ابزار شده که علت آن نرم شدن قطعه کار در اثر حرارت ایجاد شده و افزایش حد حلالیت و کاهش اصطکاک می باشد و سپس با افزایش بیشتر حرارت نرم شدن تاثیر چندانی بر کاهش اصطکاک نداشته و باعث ایجاد شوک های حرارتی می شود و سایش ابزار با همه پارامترها رابطه مستقیم پیدا می کند و با افزایش هریک از پارامترهای نرخ پیشروی، سرعت دورانی اسپیندل و عمق برش میزان سایش ابزار افزایش می یابد. افزایش عمق برش و نرخ پیشروی باعث ایجاد شوک ها و تنش های حرارتی و مکانیکی در ابزار می شود و سایش آن را بیشتر می کند.

۵- بهینه سازی

در این پژوهش جهت مینیمم کردن نیروی برشی، زبری سطح و سایش ابزار بطور همزمان از تئوری تابع مطلوب استفاده شده است. در بهینه سازی توسط این تئوری نیاز است که به تمامی پارامترها محدوده مجاز بهینه سازی به همراه نوع مطلوبیت آن از لحاظ ماکزیمم و مینیمم شدن اختصاص داده شود. این اطلاعات باید به تمامی پارامترها و پاسخ ها داده شود. جدول ۳ اطلاعات اختصاص داده شده برای بهینه سازی را نشان می دهد.

1. Continues chip with built-up-edge

$$d_i = \begin{cases} 0 & y_i < low_i \\ \left(\frac{y_i - low_i}{high_i - low_i} \right)^w & low_i < y_i < high_i \\ 1 & y_i > high_i \end{cases} \quad (4)$$

برای یک خروجی که نقش مینیمم شونده داشته باشد (مانند زبری سطح) رابطه‌ی (۵) برای محاسبه تابع مطلوب آن به کار می رود.

$$d_i = \begin{cases} 1 & y_i < low_i \\ \left(\frac{y_i - low_i}{high_i - low_i} \right)^w & low_i < y_i < high_i \\ 0 & y_i > high_i \end{cases} \quad (5)$$

همچنین تابع هدف اصلی که در برگزیده توابع فوق با توجه به اهمیت آن‌ها می باشد از رابطه‌ی (۶) محاسبه می گردد. در روابط متغیر (۷) نشان دهنده اهمیت یک پارامتر بوده که بین ۱ تا ۵ قابل تغییر می باشد. مقدار اهمیت هر پارامتر با توجه به نظر مهندس طراح تعیین می گردد.

$$D = \left(\prod_{i=1}^n d_i^{r_i} \right)^{1/\sum r_i} \quad (6)$$

پس از وارد کردن اطلاعات مربوط به هر پارامتر و پاسخ آن از لحاظ وزن و مطلوبیت در نرم افزار دیزاین اکسپرت تمامی حالت‌ها (ترکیب های بهینه مختلفی از پارامترهای فرآیند) مورد بررسی قرار گرفته و آن رشته جواب هایی که مطلوبیت بالاتری دارند به عنوان رشته جواب بهینه شناخته می شوند. جدول ۴ جواب بهینه را به همراه درصد مطلوبیت آن‌ها به مقادیر نیرو، زبری سطح و سایش ابزار نشان می دهد.

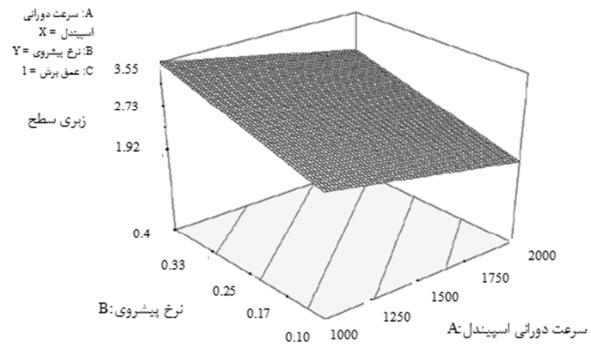
جدول ۳ محدوده و وزن‌های اختصاص داده شده به پارامترها و پاسخ‌های فرآیند جهت انجام بهینه سازی

پارامترها/پاسخ‌ها	هدف	حد پایین	حد بالا	اهمیت
سرعت دورانی	در محدوده	۱۰۰۰	۱۵۰۰	-
اسپیندل				
نرخ پیشروی	در محدوده	۰/۱	۰/۴	-
عمق برش	در محدوده	۰/۵	۱/۵	-
نیرو	حداقل	۳۹۰	۶۸۰	۵
زبری سطحی	حداقل	۱/۸	۳/۷۵	۵
سایش جانبی	حداقل	۰/۲۵	۰/۴۳۵	۵

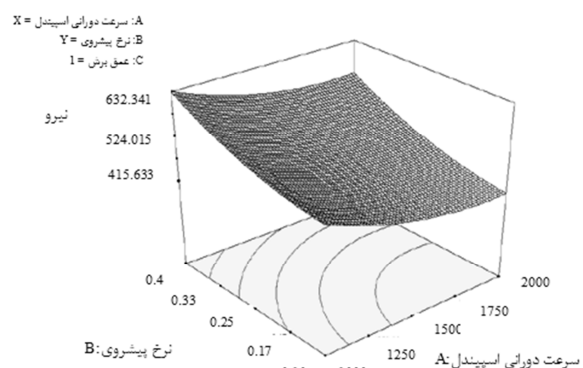
جهت تأیید این جواب‌ها نیاز است که آزمایشات مجددی با این پارامترها انجام پذیرد. جدول ۵ این آزمایشات انجام شده جهت تأثیر جواب بهینه را نشان می دهد. با توجه به این جدول در می یابیم که مقادیر به دست آمده از نیرو، زبری سطح و سایش ابزار از آزمایش با مقادیری که از نرم افزار به دست آمد بسیار نزدیک می باشد. همچنین جدول ۵ مقدار درصد خطای بهینه سازی را نشان می دهد که می توان مشاهده نمود مقدار خطای بدست آمده بسیار کم می باشد. بنابراین می توان نتیجه گرفت که روش ارائه شده روش بسیار مؤثری در بهینه سازی فرآیند می باشد.

جدول ۴ جواب بهینه به همراه درصد مطلوبیت آن‌ها به مقادیر نیرو، زبری سطح و سایش ابزار

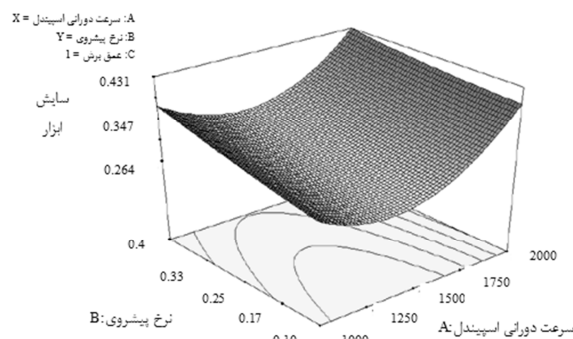
سرعت دورانی اسپیندل (دور بر دقیقه)	نرخ پیشروی (میلی متر بر ثانیه)	عمق برشی (میلی متر)	نیروی محوری (نیوتن)	زبری سطح (میکرومتر)	سایش ابزار (میلی متر)	درصد مطلوبیت
۱۵۷۴	۰/۱	۱/۵	۴۴۴/۴۱۱	۱/۹۷۹	۰/۲۸۲۵	۸۴/۷



شکل ۷ اثر متقابل سرعت چرخش اسپیندل و نرخ پیشروی بر زبری سطح



شکل ۸ اثر متقابل سرعت چرخش اسپیندل و نرخ پیشروی بر نیروی محوری



شکل ۹ اثر متقابل سرعت چرخش اسپیندل و نرخ پیشروی بر سایش ابزار

خروجی مربوطه مطلوب تر است و اگر d_i به صفر نزدیک باشد گفته می شود خروجی به صفر غیر مطلوب تر است. در این پژوهش مقدار تابع مطلوب با توجه به اهمیت آن از روابط (۴-۶) به دست می آید [۹].

- [8] Hsiao YF, Tarn YS, Huang WJ. Optimization of plasma arc welding parameters by using the Taguchi method with the grey relational analysis, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 23, No. 1, pp. 51–58, 2008.
- [9] M. Seeman & G. Ganesan & R. Karthikeyan & A. Velayudham. Study on tool wear and surface roughness in machining of particulate aluminum metal matrix composite-response surface methodology approach, *Int J Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 48, No. 5, pp. 613–624, 2010.
- [10] Ezilarasan C, Senthil Kumar VS, Velayudham. An experimental analysis and measurement of process performances in machining of nimonic C-263 super alloy. *Measurement*, Vol. 46, No. 1, pp. 185-199, 2013.

جدول ۵ نتایج بدست آمده از آزمایش تاییدی			
پاسخ ^۴	روش آزمایش تاییدی ^۳	تجربی ^۲	درصد خطا ^۱
نیرو	۴۴۴/۴۱۱	۴۱۰	۸/۲۹
زبری سطح	۱/۹۷۹	۲/۱	۵/۷۶
سایش ابزار	۰/۲۸۲۵	۰/۲۵	۷/۱۸

۶- نتیجه گیری

در این پژوهش یک مطالعه سیستماتیک آزمایشگاهی برای بررسی اثرات پارامترهای فرآیند تراش کاری مانند سرعت چرخش اسپیندل، سرعت پیشروی و عمق بار بر معیارهای قابلیت ماشین کاری مانند نیروی ماشین کاری، زبری سطح و سایش ابزار انجام شده است. در این جا تعداد ۱۵ آزمایش با استفاده از طراحی مرکب مرکزی در نرم افزار دیزاین اکسپرت طراحی و انجام شد تا اثر هر پارامتر در سه سطح مورد بررسی قرار گیرد و یک مدل تجربی از هر خروجی ارایه گردد. در ادامه جهت رسیدن به کمترین مقدار نیرو، زبری سطح و کمترین سایش ابزار از روش بهینه سازی تابع مطلوب استفاده شد. با توجه به کار انجام شده خلاصه ای از نتایج بدست آمده به شرح ذیل می باشد.

- در مدل سازی خروجی ها با استفاده از روش پاسخ سطح نتایج بدست آمده نشان داد که برای نیرو و سایش ابزار مدل های درجه دو و برای زبری سطح مدل خطی درجه یک بهترین برازش را انجام می دهد.
- نتایج نشان داد که سرعت چرخش اسپیندل زیاد، پیشروی کم و عمق بار کم سبب رسیدن به کمترین نیروی ماشین کاری می شود.
- نتایج نشان داد که سرعت چرخش اسپیندل زیاد، پیشروی کم و عمق بار کم سبب رسیدن به کمترین زبری سطح می شود.
- نتایج نشان داد که سرعت برشی متوسط، پیشروی کم و عمق بار متوسط سبب رسیدن به کمترین سایش می شود.
- در بهینه سازی فرآیند توسط تئوری تابع مطلوب این نتیجه بدست آمد که انتخاب سرعت چرخش اسپیندل ۱۵۰۰ دور بر دقیقه، پیشروی ۰/۱ میلی متر بر ثانیه و عمق بار ۱/۵ میلی متر سبب رسیدن به کمترین نیرو، سایش و زبری سطح به طور همزمان می شود.

۷- مراجع

- [1] M.R. Razfar, *Principals of Machining Science and Technology*, Amirkabir University of Technology Press Center, 2010. (in Persian)
- [2] HK Toenshoff, B Denkena, *Basic of cutting and abrasive processes*, Springer series, 2013.
- [3] M.H. Sadeghi, *Principals of Metals Machining*, Mehreganeghalem Publication, 2009. (in Persian)
- [4] C. Douglas. Montgomery, Translated by GH. Shahkar, *Design and Analysis of experiments*, Institute University Publication, 2001. (in Persian)
- [5] Rao SS, *Engineering Optimization Theory and Practice*, New Jersey: John Wiley & Sons, 2009.
- [6] Hsiao YF, Tarn YS, Huang WJ. Optimization of plasma arc welding parameters by using the Taguchi method with the grey relational analysis, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 23, No. 1, pp. 51–58, 2007.
- [7] Fung CP, *Manufacturing process optimization for wear property of fiber-reinforced polybutylene terephthalate composites with grey relational analysis*, *Wear*, Vol. 254, No. 3, pp. 298–306, 2003.

1. Percentage of Error
2. Experiment
3. Response surface methodology (RSM-DA)
4. Response