

بررسی تجربی و آماری تاثیر پارامترهای ماشینکاری و نوع اینسرت بر سایش ابزار و کیفیت سطح در تراشکاری اینکونل ۷۱۸

محمد براهنی^{۱*}، وحید طهماسبی^۲، محمد توکلی پور^۳، محمد مسعود غازی اصفهانی^۳

۱- استادیار، دانشکده مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه صنعتی اراک، اراک ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه صنعتی اراک، اراک ایران

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه صنعتی اراک، اراک ایران

mbaraheni@arakut.ac.ir *

چکیده

آلیاژ اینکونل ۷۱۸ از آلیاژهای پایه نیکل است که به دلیل مقاومت بالا در برابر حرارت، فشار و خوردگی، کاربرد گسترده‌ای در صنایع پیشرفته مانند هوافضا و انرژی دارد. ماشینکاری این آلیاژ به دلیل سختی بالا و تمایل به سایش ابزار، یکی از چالش‌برانگیزترین فرآیندها در تولید قطعات دقیق محسوب می‌شود. در این پژوهش، اثر پارامترهای ماشینکاری بر سایش ابزار و زبری سطح در فرآیند تراشکاری اینکونل ۷۱۸ بررسی شده است. با استفاده از طرح آزمایش تاگوچی و روش بهینه‌سازی مطلوبیت، تأثیر نرخ پیشروی، عمق برش، سرعت دورانی و نوع اینسرت بر سایش ابزار و زبری سطح ارزیابی شد. نتایج نشان داد که نرخ پیشروی بیشترین تأثیر را دارد و عمق برش نیز نقش مهمی در سایش ابزار ایفا می‌کند. همچنین اینسرت DNMG سایش کمتری نسبت به TNMG ایجاد کرد. شرایط بهینه ماشینکاری برای کاهش سایش ابزار و زبری سطح شناسایی شد. این نتایج می‌تواند به بهبود فرآیند ماشینکاری آلیاژهای مقاوم به حرارت کمک کرده و موجب افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌های تولید شود.

کلیدواژگان

اینکونل ۷۱۸، تراشکاری، سایش ابزار، کیفیت سطح، بهینه‌سازی

Experimental and statistical examination the effects of machining parameters and insert type on tool wear and surface quality in turning of Inconel 718

Mohammad Baraheni^{1*}, Vahid Tahmasbi², Mohammad Tavakkolipour³, Mohammad Masoud Ghazi Esfahani³

1- Assistant professor, Manufacturing engineering department, Arak university of technology, Arak, Iran

2- Associate professor, Manufacturing engineering department, Arak university of technology, Arak, Iran

3- Master student, Manufacturing engineering department, Arak university of technology, Arak, Iran

* mbaraheni@arakut.ac.ir

Abstract

Inconel 718 is a nickel-based superalloy widely used in advanced industries such as aerospace and energy due to its excellent resistance to heat, pressure, and corrosion. However, machining this alloy is highly challenging due to its hardness and tendency to cause rapid tool wear, making it a demanding process for producing precision components. This study examines the effects of machining parameters on tool wear and surface roughness during the turning of Inconel 718. Using the Taguchi design of experiments and desirability optimization method, the influence of feed rate, depth of cut, spindle speed, and insert type on tool wear and surface roughness was evaluated. The results revealed that feed rate had the most significant impact, while depth of cut also played a critical role in tool wear. Additionally, DNMG inserts exhibited lower wear compared to TNMG inserts. Optimal machining conditions were identified to minimize tool wear and surface roughness. These findings can enhance machining processes for heat-resistant alloys, improve efficiency, and reduce production costs.

Keywords

Inconel 718, Turning, Tool wear, Surface quality, Optimization

آلیاژهای اینکونل گروهی از سوپرآلیاژهای مبتنی بر نیکل هستند که مقاومت لازم را در طیف وسیعی از دماها دارند. به طوری که در دمای بالا یک لایه اکسید قوی و پایدار بر روی سطح این آلیاژ تشکیل شده و از خوردگی بیشتر جلوگیری می کند [۱]. اینکونل ۷۱۸ عمدتاً از نیکل (%۵۵-۵۰)، کروم (%۲۱-۱۷) و آهن (%۲۱-۱۷) تشکیل شده است. همچنین حاوی مقادیر کمتری از عناصر دیگر مانند نیوبیوم (%۵.۵-۴.۷۵)، مولیبدن (%۳.۳-۲.۸)، تیتانیوم (%۱.۵-۰.۶۵)، آلومینیوم (%۰.۸-۰.۲) و کربن (%۰.۰۸ حداکثر) است [۲]. این ترکیب منحصر به فرد آلیاژ موجب استحکام، مقاومت خوردگی و پایداری در دمای بالا کمک می کند. اینکونل ۷۱۸ خواص مکانیکی استثنایی از خود نشان می دهد و برای کاربردهای سخت مناسب است. اینکونل ۷۱۸ می تواند دماهای بسیار بالا تا حدود ۷۰۰ درجه سانتی گراد را تحمل کند و این ویژگی ها آن را برای کاربردهای حساس و پیشرفته مانند هوافضا، صنایع نفت و گاز، و صنایع شیمیایی مناسب می سازد. اینکونل ۷۱۸ همچنین دارای مقاومت عالی در برابر خوردگی و اکسیداسیون می باشد. در ماشینکاری اینکونل ۷۱۸، لبه برش تحت بارهای حرارتی مکانیکی شدید قرار می گیرد [۳] که این امر منجر به نرم شدن حرارتی لبه ابزار و کاهش سختی و استحکام لبه می شود [۴]. کاربرد های اینکونل عبارت است از: کاربردهای اینکونل ۷۱۸ صنایع هوافضا: برای ساخت قطعات موتورهای جت و توربین های گازی استفاده می شود - صنایع نفت و گاز: در تجهیزات حفاری و استخراج نفت و گاز کاربرد دارد - صنایع شیمیایی: در تولید تجهیزات مقاوم به خوردگی مانند مخازن و پمپ ها استفاده می شود.

در فرآیند تراشکاری، ابزار برشی با استفاده از حرکت خطی یا دورانی بر روی سطح قطعه کار، مواد زائد را از روی آن حذف می کند. در این فرآیند، تنظیم دقیق پارامترهای ماشینکاری بسیار اهمیت دارد تا بتوان به کیفیت سطح بالا و سایش کمتر ابزار دست یافت. دمای بالا در حین فرآیند تراشکاری می تواند تأثیرات منفی بر روی ابزار برشی و کیفیت سطح قطعه کار داشته باشد. استفاده از روانکارها و خنک کننده های مناسب می تواند به کاهش دمای تولیدی و افزایش عمر ابزار کمک کند. تراشکاری اینکونل ۷۱۸ به دلیل سختی بالا و تمایل به چسبیدن به ابزار برشی، با چالش های زیادی همراه است. برای مقابله با این چالش ها، استفاده از ابزارهای با پوشش های مقاوم به سایش، روانکارهای مناسب و تکنیک های خنک کننده پیشرفته ضروری است. همچنین، استفاده از روش های بهینه سازی پارامترهای ماشینکاری می تواند به کاهش هزینه های تولید و افزایش بهره وری کمک کند.

هنگام ماشینکاری این آلیاژ، دستیابی به دقت ابعادی و تکمیل سطح لازم، ممکن است دشوار باشد [۵]. هندسه لبه برش، سرعت پیشروی، سرعت برش، و عمق برش همگی تأثیر قابل توجهی بر معیارهای عملکردی مانند زبری سطح، نیروی برش، سایش ابزار و تنش پسماند روی سطوح ماشینکاری شده آلیاژ اینکونل ۷۱۸ دارند. لیانگ و همکاران [۶] تأثیر سایش ابزار را بر یکپارچگی سطح اینکونل ۷۱۸ بررسی کردند. ویژگی های یکپارچگی سطح از جمله توپوگرافی سطح (نقایص سطح و زبری سطح)، تغییرات ریزساختاری (تغییر شکل پلاستیک، اندازه دانه ها و لایه سفید)، و خواص مکانیکی (ریزشختی و تنش پسماند) بررسی شدند. جیانپندارجان و همکاران [۷] تأثیر شرایط و پارامترهای برش بر انتخاب جنس قطعه کار و ابزار در تراشکاری اینکونل ۷۱۸ را بررسی کردند. فاطومه ژوجانی و همکاران [۸] از طراحی آزمایش L9 (۳۴) مبتنی بر تاگوچی برای یافتن بهترین مقادیر برای پارامترهای فرآیند مانند سرعت برش، سرعت تغذیه، عمق برش و شعاع دماغه ابزار استفاده کردند. در این مطالعه، روش رابطه خاکستری چند هدفه مبتنی بر تاگوچی (GRA) برای رسیدگی به مشکل تراشکاری آلیاژ اینکونل ۷۱۸ به منظور افزایش بهره وری، یعنی با به حداقل رساندن همزمان زبری سطح، سایش ابزار و زمان ماشینکاری استفاده شد. پاواده و همکارانش [۹] به بررسی تأثیر پارامترهای فرآیندی و هندسه ابزار بر نیروهای برشی، زبری سطح و آسیب سطح در ماشین کاری سرعت بالای اینکونل ۷۱۸ با ابزارهای PCBN پرداختند. نتایج نشان می دهند که نیروی برش اصلی ۲ تا ۳ برابر بیشتر از نیروهای پیشروی و شعاعی است و ابزار با پخ به طور قابل توجهی نیروهای برشی را کاهش داده است. همچنین، نمونه هایی با نیروهای برشی بیشتر، کیفیت سطح ضعیف تری و آسیب های سطحی بیشتری داشته اند. خان و همکارانش [۱۰] نتایج ماشین کاری اینکونل ۷۱۸ با اینسرت های PCBN غلظت پایین را بررسی کردند. آزمایش ها با استفاده از طرح L36 Taguchi برای ارزیابی تأثیر عوامل مختلفی مانند هندسه ابزار، آماده سازی لبه، فشار سیال، پوشش ابزار، سرعت برش و نرخ پیشروی انجام شد. نتایج نشان داد که در سرعت برش ۱۵۰ متر در دقیقه، عمر ابزار گرد ۵ برابر بیشتر از ابزار نوع C بود. با افزایش سرعت به ۳۰۰ متر در دقیقه، عملکرد هر دو ابزار مشابه شد، اما در ۴۵۰ متر در دقیقه شکست ابزار رخ داد و عمر آن به ۳.۵ دقیقه کاهش یافت. سایش ناشی از چسبندگی اصلی ترین عوامل تخریب ابزار بودند. فریفتا و همکارانش [۱۱] با هدف بهینه سازی پارامترهای تراشکاری اینکونل ۷۱۸ با استفاده از ابزار برش کاربرد برای دستیابی به حداقل زبری سطح، نیروی برش، توان، انرژی ویژه

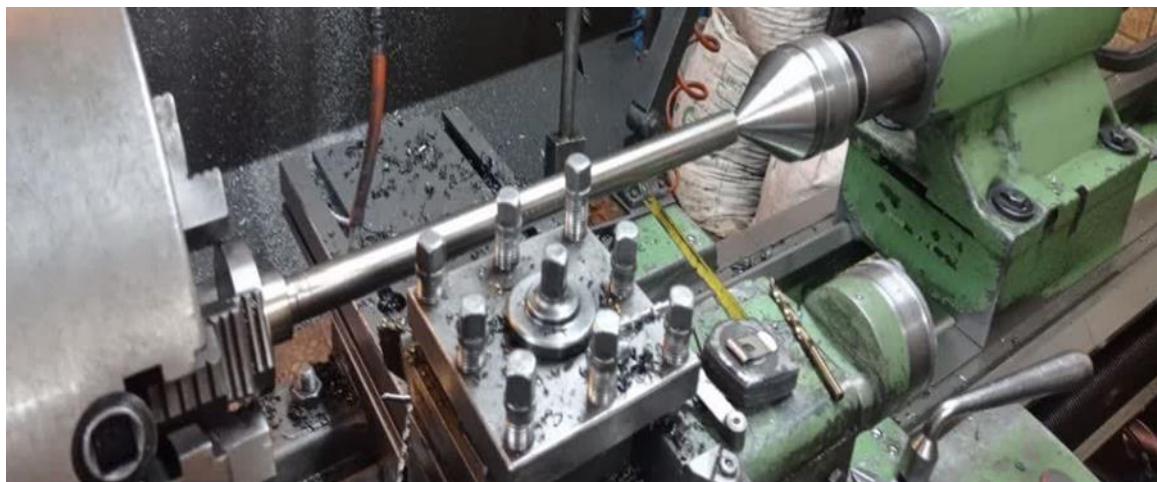
و حداکثر بهره‌وری، پژوهشی انجام دادند. از روش‌های تحلیل واریانس (ANOVA) و پاسخ سطحی (RSM) همراه با تابع مطلوبیت برای شناسایی پارامترهای مؤثر بر پاسخ‌ها و توسعه مدل پیش‌بینی استفاده شده است. نتایج نشان داد که شعاع نوک ابزار، نرخ پیشروی، عمق برش و سرعت برش تأثیر قابل توجهی بر زبری سطح و نیروهای برش دارند. پینه‌پرو و همکارانش [۱۲] پژوهشی با هدف بررسی تأثیر پارامترهای ماشینکاری بر کیفیت سطح قطعه کار در فرآیند تراشکاری آلیاژ اینکونل ۷۱۸ انجام دادند. از طرح آزمایش تاگوچی برای ارزیابی تأثیر پارامترهایی مانند سرعت برش، نرخ پیشروی، نوع ابزار و روانکاری بر کیفیت سطح استفاده شده است. نتایج نشان داد که سرعت برش و نرخ پیشروی تأثیر قابل توجهی بر کیفیت سطح دارند. سرعت برش بهینه ۷۰ متر بر دقیقه و نرخ پیشروی بهینه ۰,۱ میلی‌متر بر دور تعیین شده است. افزایش نرخ پیشروی منجر به افزایش مصرف توان، ارتعاش و سایش ابزار می‌شود. مصرف توان به عنوان یک شاخص حساس نسبت به پارامترهای ماشینکاری می‌تواند در مطالعات پیش‌بینی سایش ابزار برای ماشینکاری اینکونل ۷۱۸ استفاده شود. ژوجانی و همکارانش [۱۳] از طراحی آزمایش‌های مبتنی بر تاگوچی و رویکرد رابطه خاکستری چندهدفه (GRA) برای کاهش زبری سطح، سایش ابزار و زمان ماشین‌کاری استفاده کردند. نتایج نشان داد که شرایط بهینه شامل سرعت برش ۱۰۰ متر در دقیقه، نرخ تغذیه ۰,۰۵۱ میلی‌متر بر دور، عمق برش ۰,۴ میلی‌متر و شعاع نوک ابزار ۰,۴ میلی‌متر است. تان و همکارانش [۱۴] با هدف بررسی تأثیر پارامترهای ماشینکاری بر کیفیت سطح قطعه کار در فرآیند تراشکاری آلیاژ اینکونل ۷۱۸ با استفاده از دو نوع اینسرت سرامیکی و کاربیدی، پژوهشی انجام دادند. نتایج نشان داد که نوع اینسرت، سرعت برش، عمق برش و نرخ پیشروی بر کیفیت سطح تأثیرگذار هستند. اینسرت سرامیکی نسبت به اینسرت کاربیدی، سطح صاف‌تر و یکنواخت‌تری تولید می‌کند. توزیع تنش‌های باقیمانده و میکروسختی در هر دو نوع اینسرت مشابه است. هیچ تغییر شکل پلاستیکی شدید با اینسرت کاربیدی یا سرامیکی مشاهده نشده است.

در این پژوهش، مطالعه‌ای جامع با هدف بررسی اثرات متقابل پارامترهای مختلف ماشینکاری بر کیفیت سطح و سایش ابزار در فرآیند تراشکاری آلیاژ مقاوم به حرارت اینکونل ۷۱۸ انجام شده است. اینکونل ۷۱۸ به دلیل ویژگی‌های مکانیکی برتر و مقاومت عالی در برابر حرارت، یکی از آلیاژهای پرکاربرد در صنایع هوافضا، نفت و گاز و نیروگاهی است. با این حال، ماشینکاری این آلیاژ به دلیل سختی بالا، تمایل به سایش ابزار و تولید گرمای زیاد در حین فرآیند، چالش‌های فراوانی را به همراه دارد. در این مقاله، تأثیر پارامترهای کلیدی مانند سرعت برش، نرخ پیشروی و عمق برش بر کیفیت سطح نهایی و نرخ سایش ابزار بررسی شده است. برای این منظور، دو نوع اینسرت رایج TNMG و DNMG انتخاب و رفتار آن‌ها در شرایط ماشینکاری مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. تحلیل نتایج به منظور یافتن بهینه‌ترین شرایط ماشینکاری برای دستیابی به سطحی با کیفیت بالا و افزایش عمر ابزار، بخش کلیدی این مطالعه محسوب می‌شود. علیرغم اهمیت صنعتی اینکونل ۷۱۸ و چالش‌های موجود در ماشینکاری آن، پژوهش‌های گذشته عمدتاً بر تأثیر یک‌جانبه برخی پارامترها متمرکز بوده و بررسی‌های محدودی به مطالعه جامع تأثیر متقابل انواع اینسرت‌ها و پارامترهای ماشینکاری بر کیفیت سطح و عمر ابزار پرداخته‌اند. در این تحقیق، با اتخاذ رویکردی سیستماتیک و جامع، تلاش شده است تا شکاف موجود در پژوهش‌های پیشین پوشش داده شود و داده‌های ارزشمندی برای بهبود فرآیند ماشینکاری این آلیاژ استراتژیک ارائه شود. نتایج این تحقیق می‌تواند به عنوان راهنمایی عملی برای بهینه‌سازی فرآیند ماشینکاری اینکونل ۷۱۸ در صنایع مختلف مورد استفاده قرار گیرد.

۲- مواد و آزمایش‌ها

در این پژوهش، عملیات تراشکاری بر روی شفت اینکونل با طول ۴۰۰ میلی‌متر و قطر ۲۴ میلی‌متر، مطابق شکل ۱ انجام شد. آزمایش‌ها با استفاده از دستگاه تراش TN50BR ساخت تبریز انجام گرفت. چهار پارامتر ورودی در این آزمایش‌ها در نظر گرفته شد: نوع اینسرت، سرعت اسپیندل، نرخ پیشروی و عمق برش. در روش‌های سنتی، انجام آزمایش‌ها به دلیل پیچیدگی و تعداد زیاد جایگشت‌های مختلف دشوار و زمان‌بر است. این مسئله زمانی بیشتر مشهود می‌شود که تعداد متغیرهای مسئله افزایش یابد، چرا که در این حالت تعداد آزمایش‌های مورد نیاز به‌طور تصاعدی افزایش می‌یابد. برای کاهش منابع مصرفی و زمان مورد نیاز، می‌توان از روش‌های نوین طراحی آزمایش استفاده کرد. یکی از این روش‌ها، روش تاگوچی است. این روش با بهره‌گیری از ترکیب فاکتوریل جزئی و آرایه‌های متعامد، به طراحی آزمایشی بهینه و کم‌هزینه منجر می‌شود که همچنان نتایج کافی و معتبری ارائه می‌دهد [۱۵]. در این مطالعه نیز طراحی آزمایش‌ها با استفاده از روش تاگوچی صورت گرفت و مجموعاً ۱۸ آزمایش، مطابق جدول ۱ انجام شد. طول هر

ناحیه ماشین کاری در این آزمایش ها ۲۰ میلی متر بود. از دو نوع اینسرت TNMG و DNMG با شعاع نوک ۰,۸ میلی متر استفاده شد. در این فرآیند تراشکاری، از هیچ سیال برشی استفاده نگردید.



شکل ۱: شفت اینکونل حین تست ماشینکاری

جدول ۱. طراحی آزمایش تاگوچی (L18)

شماره آزمون	عمق برش	نرخ پیشروی	سرعت اسپیندل	نوع اینسرت
1	0.3	0.2	180	TNMG
2	0.6	0.4	180	TNMG
3	0.9	0.6	180	TNMG
4	0.3	0.2	255	TNMG
5	0.6	0.4	255	TNMG
6	0.9	0.6	255	TNMG
7	0.3	0.2	350	TNMG
8	0.6	0.4	350	TNMG
9	0.9	0.6	350	TNMG
10	0.3	0.2	180	DNMG
11	0.6	0.4	180	DNMG
12	0.9	0.6	180	DNMG
13	0.3	0.2	255	DNMG
14	0.6	0.4	255	DNMG
15	0.9	0.6	255	DNMG
16	0.3	0.2	350	DNMG
17	0.6	0.4	350	DNMG
18	0.9	0.6	350	DNMG

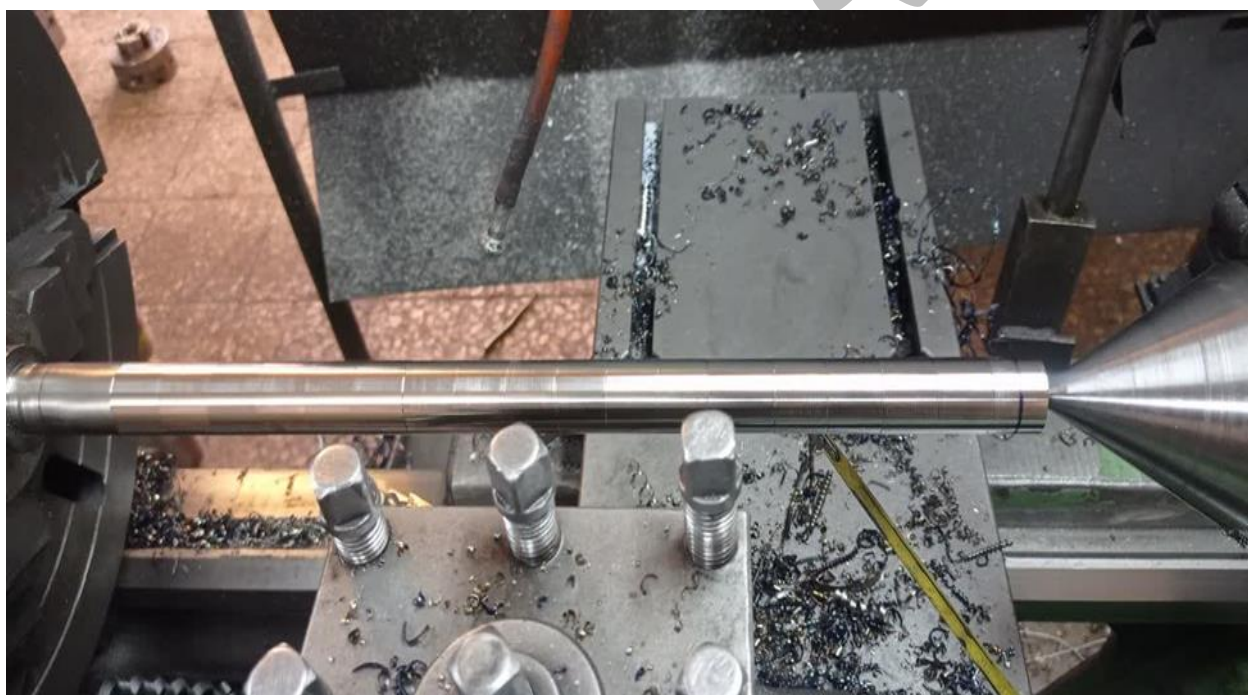
اینسرت های TNMG بیشتر در فرآیندهای روتراشی و داخل تراشی به کار می روند و دارای ۶ لبه برشی هستند. این نوع اینسرت ها برای ماشین کاری فولاد، چدن، آلیاژهای با دمای بالا و مواد غیر آهنی مناسب هستند و در مقایسه با ابزارهای فولادی با سرعت بالا، مقاومت حرارتی بیشتری دارند. اینسرت های DNMG معمولاً با زاویه ۵۵ درجه به کار می روند. اینسرت های DNMG در مقایسه با اینسرت هایی با زوایای بیشتر، نیروی برشی کمتری تولید می کنند. ساختار خاص این اینسرت ها به کاهش ترک خوردگی در حین کار کمک می کند و برای ماشین کاری فولادهای کربنی، فولادهای ضد زنگ و آلیاژهای دما بالا مناسب هستند.

زبری سطح با استفاده از دستگاه زبری سنج 3100 TIME که در شکل ۲ نشان داده شده، اندازه گیری شد. زبری سنج مدل TIME 3100 ساخت کمپانی TIME از کشور چین است. دستگاه زبری سنج سطوح تایم ۳۱۰۰ با طراحی کاربردی و خاص مناسب زبری

سنجی انواع سطوح ماشین کاری شده می باشد. تستر زبری سطوح مدل TIME3100 ابزاری با قیمت اقتصادی در اندازه جیبی است که برای اندازه گیری بافت سطوح مطابق با استانداردها کاربرد دارد. همچنین شفت مورد آزمایش به ۱۸ قسمت تقسیم شد که در شکل ۳ قابل مشاهده است. در این پژوهش، سایش ابزار و زبری سطح به عنوان دو پارامتر خروجی مهم در نظر گرفته شدند.



شکل ۲. زبری سنج TIME 3100



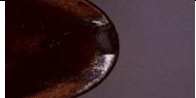
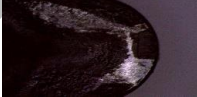
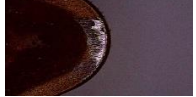
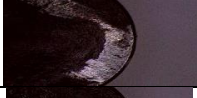
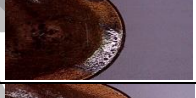
شکل ۳. تقسیم کردن شافت به ۱۸ قسمت مساوی

۳- نتایج و بحث

با بهینه سازی پارامترهای ماشینکاری و استفاده از تکنیک ها و مواد نوین، می توان بهبود قابل توجهی در فرآیند تراشکاری این آلیاژ ایجاد کرد. انتخاب صحیح پارامترهای ماشینکاری، استفاده از ابزارهای مناسب و استفاده از تکنیک های خنک کننده پیشرفته، می توانند به کاهش سایش ابزار و بهبود کیفیت سطح کمک کنند و بهره وری فرآیند را افزایش دهند. این بهبودها می توانند هزینه های تولید را کاهش داده و عمر مفید قطعات تولیدی را افزایش دهند. به عنوان مثال، در فرآیند ماشینکاری اینکونل ۷۱۸، بهینه سازی نرخ پیشروی

و عمق برش می‌تواند تأثیر زیادی بر سایش ابزار و کیفیت سطح داشته باشد. همچنین استفاده از اینسرت‌های مناسب با پوشش‌های نوین و بهینه‌سازی شرایط خنک‌کننده می‌تواند عمر ابزار را افزایش دهد و کیفیت سطح را بهبود بخشد. با انجام آزمون‌های سایش بر روی هر یک از اینسرت‌ها، میزان سایش ابزار به دقت اندازه‌گیری و در جدول ۲ ارائه شده است. علاوه بر سایش ابزار، زبری سطح قطعه کار نیز در هر آزمون به عنوان یک پارامتر کلیدی ارزیابی شده است. با اندازه‌گیری طول و عرض ناحیه ساییده شده و محاسبه مساحت آن، میزان سایش کمی‌سازی شده است. همچنین، از پارامتر زبری سطح R_a برای ارزیابی صافی سطح قطعه کار استفاده شده است.

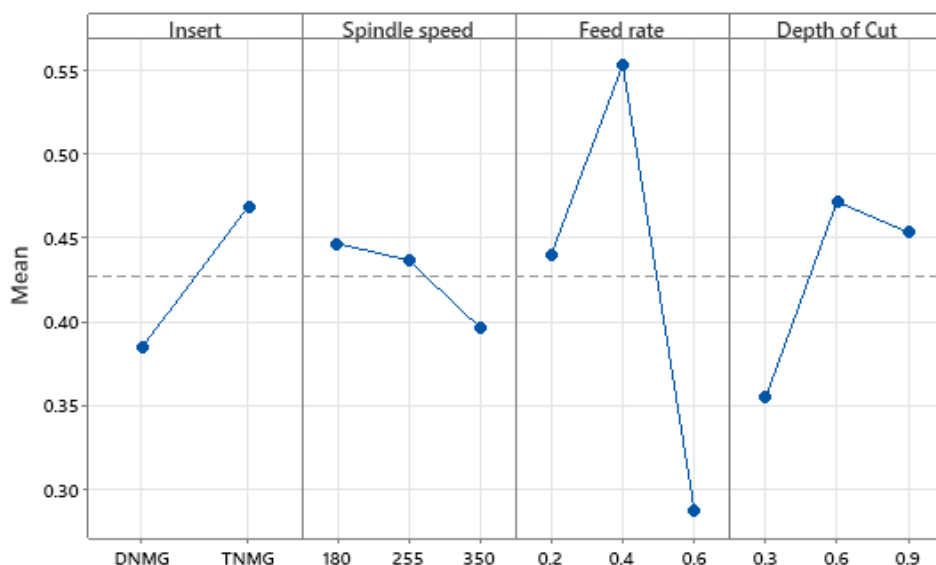
جدول ۲. سایش ابزار و مقادیر سطح سایش هر تست

شماره آزمون	تصویر سایش ابزار	میزان مساحت ساییده شده (mm^2)	زبری سطح (μm)	شماره آزمون	تصویر سایش ابزار	میزان مساحت ساییده شده (mm^2)	زبری سطح (μm)
1		0.42	1.41	10		0.44	0.9
2		0.77	3.37	11		0.42	4.03
3		0.33	0.42	12		0.3	0.58
4		0.43	1.34	13		0.41	1.47
5		0.6	3.46	14		0.61	3.44
6		0.35	0.43	15		0.22	0.6
7		0.5	1.43	16		0.44	1.33
8		0.55	3.36	17		0.37	3.46
9		0.27	0.54	18		0.25	0.6

نمودار اثر اصلی در طرح آزمایش تاگوچی، ابزاری قدرتمند برای بررسی جداگانه تأثیر هر یک از پارامترهای آزمایش بر روی پاسخ مورد نظر است. روش تاگوچی و طرح‌های آزمایش استوار، الگویی است که به واسطه آن امکان ایجاد طرح آزمایش‌ها به شکلی صورت می‌گیرد که نسبت به انتخاب نمونه یا فرآیند استوار بوده و تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد. روش تاگوچی نسبت به روش‌های متداول و رایج مهندسی کیفیت کاملاً متفاوت است. متدولوژی روش تاگوچی بر طراحی کیفیت در هنگام طراحی محصولات و فرآیندها تأکید دارد. درحالی که روش‌های متداول بر مبنای بازرسی و کنترل کیفیت در حین فرآیند تولید و یا بعد از تولید محصول تأکید دارند. در واقع تاگوچی بر این باور بود که بهترین راه بهبود کیفیت، طراحی و ایجاد آن در خود محصول است.

روش تاگوچی مزیت هایی نظیر کاهش تعداد آزمایش ها و هزینه ها، امکان بررسی فاکتورهای گسسته (نوع ماده، رنگ قطعه و ...)، تعیین سهم فاکتورها، امکان تخمین نتایج در شرایط بهینه، امکان تخمین نتایج در سطوح دلخواه، تعیین سهم اثرات متقابل در نظر گرفته شده، امکان بدست آوردن همزمان شرایط بهینه برای چندین پاسخ، امکان بررسی فاکتورهایی با سطوح مختلف و بررسی تعداد فاکتورهای نامحدود را دارد.

در این نمودار، میانگین پاسخ برای هر سطح از هر پارامتر نشان داده شده و با مقایسه ارتفاع نقاط در هر نمودار، می توان به راحتی تأثیر هر سطح از هر پارامتر بر روی سایش ابزار را تشخیص داد.



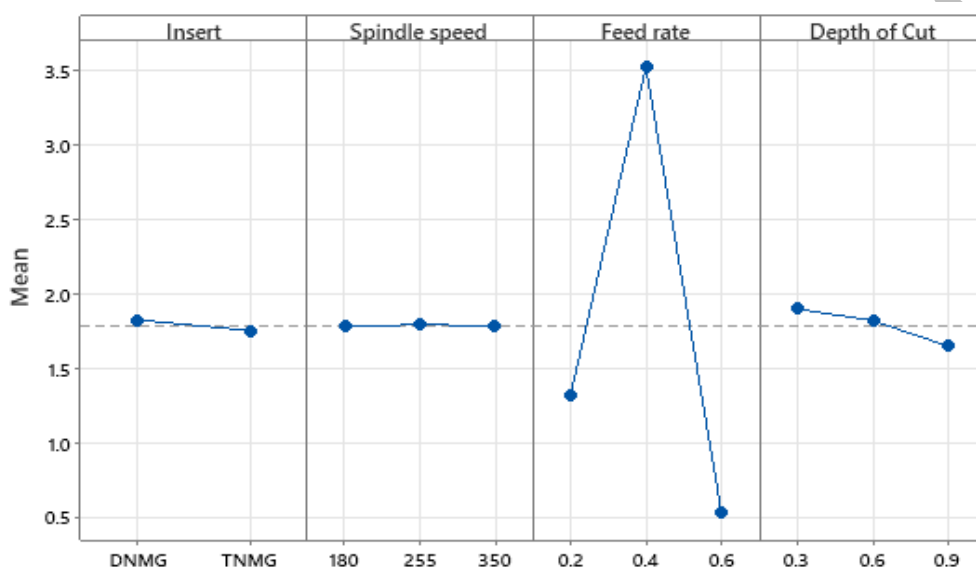
شکل ۴. تأثیر پارامترهای ورودی بر میزان سایش ابزار

با توجه به شکل ۴ (الف)، افزایش عمق برش بطور کلی منجر به افزایش سایش ابزار می شود. زیرا با افزایش عمق برش، سطح تماس ابزار با قطعه کار بیشتر شده و نیروی برشی وارد بر ابزار نیز افزایش می یابد. این افزایش نیرو موجب تولید حرارت بیشتری در ناحیه برش می شود که می تواند منجر به نرم شدن لبه های برشی و تسریع سایش آن ها گردد. همچنین، فشار مکانیکی بیشتر در ناحیه برش باعث تشدید پدیده های مانند سایش چسبنده و سایش ساینده می شود [۱۶]. در نتیجه، افزایش عمق برش موجب افزایش بار مکانیکی و حرارتی بر ابزار و در نهایت افزایش سایش آن می شود.

شکل ۴ (ب) رابطه بین نرخ پیشروی و میزان سایش ابزار را نمایش می دهد. با بررسی دقیق این نمودار، می توان مشاهده کرد که بین این دو متغیر، رابطه ای غیرخطی وجود دارد. افزایش سرعت پیشروی از ۰.۲ میلی متر بر دور به ۰.۴ میلی متر بر دور منجر به افزایش سایش ابزار می شود. زیرا با افزایش پیشروی، حجم براده برداری و نیروی برشی وارد بر لبه های ابزار بیشتر می شود. این افزایش نیرو و تولید حرارت می تواند موجب افزایش سایش ابزار گردد. اما افزایش سرعت پیشروی از ۰.۴ به ۰.۶ میلی متر بر دور می تواند به کاهش سایش ابزار منجر شود، چرا که در سرعت های بالاتر، براده ها سریع تر از ناحیه برش خارج می شوند و زمان تماس ابزار با قطعه کار در هر دور کاهش می یابد. این موضوع می تواند از تجمع حرارت و براده در ناحیه برش جلوگیری کند. همچنین، افزایش سرعت پیشروی می تواند از بروز چسبندگی براده به لبه های ابزار جلوگیری کند که به کاهش سایش ابزار کمک می کند [۱۷].

شکل ۴ (ج) نشان می دهد که افزایش سرعت دورانی از ۱۸۰ دور بر دقیقه به ۳۵۰ دور بر دقیقه می تواند منجر به کاهش سایش ابزار شود که به دلیل تغییر در دینامیک برش می باشد. در سرعت های بالاتر، زمان تماس ابزار با قطعه کار در هر چرخش کاهش می یابد، که باعث کاهش تجمع حرارت موضعی در لبه های برشی می شود. این بهبود در توزیع حرارت می تواند از افزایش شدید دما که منجر به سایش ابزار می شود، جلوگیری کند. همچنین، در سرعت های بالاتر، امکان دفع بهتر براده ها فراهم می شود که از انباشته شدن مواد در لبه های ابزار و ایجاد سایش جلوگیری می کند. در نتیجه، این عوامل باعث کاهش سایش ابزار در سرعت های دورانی بالاتر می شوند [۱۸].

شکل ۴ (د) نشان می دهد که ابزار TNMG موجب سایدگی بیشتر قرار گرفته است. علت اصلی سایش بیشتر اینسرت TNMG نسبت به DNMG در فرآیند تراشکاری می تواند به ویژگی های هندسی و عملکردی این دو نوع اینسرت برگردد. اینسرت TNMG با زاویه براده و طراحی خاص خود معمولاً برای فرایندهای روتراشی و ماشین کاری قطعات با سطوح بزرگتر استفاده می شود. در این شرایط، سطح تماس اینسرت با قطعه کار بیشتر است و این موضوع باعث تولید حرارت و نیروی برشی بالاتر می شود. در نتیجه، افزایش دما و تنش های مکانیکی در حین فرآیند باعث تسریع در سایش ابزار TNMG می شود. در مقابل، اینسرت DNMG با زاویه ۵۵ درجه و طراحی بهینه برای کاهش نیروی برشی، معمولاً نیروی کمتری را در حین تراشکاری به وجود می آورد. این کاهش نیرو باعث کاهش تولید حرارت و فشار بر لبه های برشی می شود که به طولانی تر شدن عمر ابزار و کاهش سایش آن کمک می کند. در ادامه به بررسی تاثیر پارامترهای تراشکاری بر زبری سطح پرداخته می شود.



شکل ۵. تاثیر پارامترهای ورودی بر صافی سطح

طبق شکل ۵ (الف)، افزایش عمق برش می تواند موجب کاهش زبری سطح در تراشکاری شود که به دلیل تأثیر آن بر پایداری فرآیند برش و نحوه براده برداری. با افزایش عمق برش، نیروی برشی افزایش می یابد و این موضوع باعث می شود که ابزار به طور مؤثرتر و یکنواخت تر با قطعه کار درگیر شود. در این شرایط، ابزار تمایل کمتری به ارتعاش یا لرزش دارد که یکی از عوامل مهم در ایجاد زبری سطح است.

با توجه به شکل ۵ (ب)، افزایش سرعت پیشروی از ۰٫۲ میلی متر بر دور به ۰٫۴ میلی متر بر دور منجر به افزایش زبری سطح قطعه کار می شود، زیرا با افزایش سرعت پیشروی، نرخ براده برداری بیشتر می شود و ابزار باید حجم بیشتری از ماده را در هر دور از قطعه جدا کند. این افزایش بار برشی می تواند منجر به کاهش کیفیت سطح و ایجاد ردهای عمیق تر بر روی قطعه شود، که به افزایش زبری سطح منجر می گردد. اما با افزایش سرعت پیشروی از ۰٫۴ به ۰٫۶ میلی متر بر دور، زبری سطح کاهش می یابد. دلیل این کاهش می تواند به بهبود در نحوه تشکیل و جدا شدن براده ها و همچنین کاهش زمان تماس ابزار با قطعه کار در هر دور مربوط باشد. در سرعت های بالاتر، براده ها سریع تر و یکنواخت تر از سطح قطعه جدا می شوند و از تجمع براده در ناحیه برش و ایجاد اصطکاک اضافه جلوگیری می شود [۱۷، ۱۹]. این عوامل به کاهش زبری سطح کمک کرده و کیفیت سطح بهبود می یابد.

شکل ۵ (ج) نشان می دهد که سرعت دورانی تأثیر خاصی بر مقدار زبری سطح ندارد. سرعت دورانی تنها نرخ چرخش قطعه کار را کنترل می کند، اما تأثیر آن بر زبری سطح در مقایسه با سایر عوامل کمتر است. اگرچه سرعت های دورانی بسیار پایین یا بسیار بالا می توانند بر دمای برش یا پایداری فرآیند تأثیر بگذارند، در بازه های معمول ماشین کاری، تأثیر سرعت دورانی بر زبری سطح به اندازه تأثیر سرعت پیشروی یا عمق برش قابل توجه نیست. در واقع، سرعت پیشروی تعیین می کند که هر دندانه ابزار چه مقدار ماده را

برمی‌دارد و عمق برش نیز میزان تماس ابزار با قطعه را تعیین می‌کند، که این دو عامل به طور مستقیم بر زبری سطح اثر می‌گذارند [۲۰].

طبق شکل ۵ (د) ابزار TNMG باعث زبری سطح کمتری نسبت به DNMG شده است، اما تفاوت زیادی بین آنها مشاهده نشده است. این تفاوت اندک به دلیل ویژگی‌های هندسی هر دو اینسرت است. TNMG با طراحی متقارن و چندین لبه برشی، پایداری بیشتری در فرآیند تراشکاری دارد و این امر به بهبود کیفیت سطح و کاهش زبری کمک می‌کند. از سوی دیگر، DNMG با زاویه ۵۵ درجه نیز طراحی مناسبی برای کاهش نیروی برشی و بهبود کیفیت سطح دارد. هرچند TNMG ممکن است به دلیل پایداری بیشتر در سرعت‌های بالاتر و شرایط سخت‌تر کمی کیفیت سطح بهتری ایجاد کند، اما DNMG نیز عملکرد مطلوبی ارائه می‌دهد. به همین دلیل، اختلاف زبری سطح بین این دو ابزار کم است و تفاوت محسوسی ندارد.

تحلیل واریانس (ANOVA) یک روش آماری است که برای مقایسه تأثیر چندین متغیر مستقل بر یک یا چند متغیر وابسته به کار می‌رود [۲۱]. این روش به محققان اجازه می‌دهد تا بفهمند آیا تفاوت‌های مشاهده‌شده در نتایج به دلیل تغییر در عوامل ورودی است یا اینکه به‌طور تصادفی رخ داده‌اند. ANOVA با استفاده از شاخص‌هایی مانند F-value و P-value کار می‌کند. F-value نسبت تغییرات بین گروه‌ها به تغییرات درون گروه‌ها را نشان می‌دهد، و P-value معناداری آماری این تغییرات را تعیین می‌کند (به‌طور معمول، اگر P-value کمتر از ۰,۰۵ باشد، اثر معنادار در نظر گرفته می‌شود) [۲۲، ۲۳].

در این مطالعه، ANOVA برای بررسی تأثیر پارامترهای مختلف ماشین‌کاری (سرعت اسپیندل، نرخ پیشروی، عمق برش، و نوع اینسرت) بر دو پارامتر خروجی، یعنی سایش ابزار و زبری سطح، استفاده شده است. این تحلیل کمک می‌کند تا مشخص شود کدام پارامترها تأثیر معناداری بر نتایج خروجی دارند و چگونه می‌توان تنظیمات فرآیند را بهینه‌سازی کرد تا عملکرد ابزار بهبود یابد و کیفیت سطح نهایی ارتقا پیدا کند.

در جدول ۴ مربوط به سایش ابزار، مشخص می‌شود که نرخ پیشروی بیشترین تأثیر را دارد و ۲۱٪ از تغییرات سایش ابزار را توضیح می‌دهد (با F-value برابر ۲۳ و P-value کمتر از ۰,۰۵ که نشان‌دهنده معنی‌دار بودن این تأثیر است). (پس از آن، نوع اینسرت و عمق برش به ترتیب با ۹,۵۶٪ و ۸,۶۴٪ تأثیر مهمی بر سایش ابزار دارند، که مقادیر F-value به ترتیب ۱۰,۱۷ و ۶,۴۱، و مقادیر P-value آنها نیز معنی‌داری تأثیر را تأیید می‌کنند (P-value کمتر از ۰,۰۵). سرعت اسپیندل تأثیر ناچیزی دارد (۲,۳۳٪) و مقدار F-value برابر با ۰,۱۷، و P-value آن نشان‌دهنده عدم معناداری آماری است.

همچنین، روابط مربعی بین پارامترها مانند نرخ پیشروی و عمق برش نیز در این جدول بررسی شده‌اند که تأثیر نرخ پیشروی مربعی با ۴۳٪ سهم و F-value برابر با ۳۷,۰۲ به‌طور معناداری بر سایش ابزار اثر می‌گذارد.

به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که نرخ پیشروی مهم‌ترین پارامتر در تأثیرگذاری بر سایش ابزار است و تنظیم صحیح آن نقش کلیدی در کاهش سایش ابزار دارد. نوع اینسرت و عمق برش نیز در این امر تأثیرگذار هستند، در حالی که سرعت اسپیندل تأثیر کمتری دارد و معنی‌دار نیست.

جدول ۴. تجزیه و تحلیل واریانس برای سایش ابزار

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	10	0.309541	92.18%	0.309541	0.030954	8.25	0.005
Spindle speed	1	0.007821	2.33%	0.000651	0.000651	0.17	0.689
Feed rate	1	0.070533	21.00%	0.086292	0.086292	23.00	0.002
Depth of Cut	1	0.029008	8.64%	0.024033	0.024033	6.41	0.039
Insert	1	0.032089	9.56%	0.038164	0.038164	10.17	0.015
Spindle speed*Spindle speed	1	0.000579	0.17%	0.001589	0.001589	0.42	0.536
Feed rate*Feed rate	1	0.144400	43.00%	0.138866	0.138866	37.02	0.000
Depth of Cut*Depth of Cut	1	0.018225	5.43%	0.017560	0.017560	4.68	0.067
Spindle speed*Feed rate	1	0.000049	0.01%	0.000011	0.000011	0.00	0.957
Spindle speed*Depth of Cut	1	0.000002	0.00%	0.000136	0.000136	0.04	0.854
Feed rate*Depth of Cut	1	0.006836	2.04%	0.006836	0.006836	1.82	0.219
Error	7	0.026259	7.82%	0.026259	0.003751		
Total	17	0.335800	100.00%				

جدول ۵ مربوط به تحلیل واریانس (ANOVA) برای زبری سطح است که تأثیر پارامترهای مختلف ماشین کاری مانند سرعت اسپیندل، نرخ پیشروی، عمق برش و نوع اینسرت را بررسی می‌کند. نتایج این جدول نشان می‌دهد که نرخ پیشروی با ۶,۲۸٪ بیشترین تأثیر را بر زبری سطح دارد. مقدار F-value برای این پارامتر ۵۱۷,۵۹ است و P-value کمتر از ۰,۰۵ به وضوح نشان می‌دهد که این تأثیر به طور آماری معنادار است. این نشان می‌دهد که افزایش یا کاهش نرخ پیشروی به شکل چشمگیری زبری سطح را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

عمق برش و نوع اینسرت به ترتیب با سهم‌های بسیار کمتر ۰,۶۴٪ و ۰,۰۸٪ تأثیر کمی بر زبری سطح دارند. مقادیر F-value برای این دو پارامتر نیز پایین است (۲,۷۹ برای عمق برش و ۳,۴۰ برای نوع اینسرت)، و مقادیر P-value بالاتر از ۰,۰۵ نشان می‌دهند که تأثیر آن‌ها بر زبری سطح از لحاظ آماری معنادار نیست. سرعت اسپیندل هیچ تأثیر قابل توجهی بر زبری سطح ندارد (۰,۰۰٪)، و مقدار F-value آن ۰,۴۹ و P-value برابر با ۵۲۲ است که نشان می‌دهد این پارامتر از نظر آماری تأثیر معنی‌داری بر زبری سطح ندارد. همچنین، تأثیر روابط مربعی مانند نرخ پیشروی مربعی با ۹۱,۷۷٪ سهم و F-value برابر با ۱۰۲۷,۲۵ بسیار معنادار است و بر زبری سطح اثر زیادی می‌گذارد. در مجموع، این نتایج نشان می‌دهد که نرخ پیشروی مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بر زبری سطح است. سایر پارامترها، از جمله سرعت اسپیندل، عمق برش، و نوع اینسرت، تأثیر قابل توجهی بر زبری سطح ندارند یا تأثیر آن‌ها از لحاظ آماری معنادار نیست.

جدول ۵. تجزیه و تحلیل واریانس برای زبری سطح

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	13	29.3603	99.71%	29.3603	2.2585	104.25	0.000
Spindle speed	1	0.0000	0.00%	0.0106	0.0106	0.49	0.522
Feed rate	1	1.8487	6.28%	11.2125	11.2125	517.59	0.000
Depth of Cut	1	0.1875	0.64%	0.0604	0.0604	2.79	0.170
Insert	1	0.0235	0.08%	0.0737	0.0737	3.40	0.139
Spindle speed*Spindle speed	1	0.0001	0.00%	0.0023	0.0023	0.11	0.760
Feed rate*Feed rate	1	27.0227	91.77%	22.2535	22.2535	1027.25	0.000
Depth of Cut*Depth of Cut	1	0.0087	0.03%	0.0230	0.0230	1.06	0.361
Spindle speed*Feed rate	1	0.0571	0.19%	0.0283	0.0283	1.30	0.317
Spindle speed*Depth of Cut	1	0.1178	0.40%	0.1503	0.1503	6.94	0.058
Feed rate*Depth of Cut	1	0.0151	0.05%	0.0556	0.0556	2.57	0.184
Spindle speed*Insert	1	0.0186	0.06%	0.0297	0.0297	1.37	0.307
Feed rate*Insert	1	0.0579	0.20%	0.0605	0.0605	2.79	0.170
Depth of Cut*Insert	1	0.0026	0.01%	0.0026	0.0026	0.12	0.747
Error	4	0.0867	0.29%	0.0867	0.0217		
Total	17	29.4470	100.00%				

بهینه‌سازی به روش مطلوبیت سطح یکی از تکنیک‌های پیشرفته و کارآمد در بهینه‌سازی چند متغیره است که به‌ویژه در فرآیندهای مهندسی و شیمیایی کاربرد گسترده‌ای دارد. این روش به دلیل سادگی در پیاده‌سازی و توانایی ارزیابی چندین پارامتر به‌طور هم‌زمان، از محبوبیت زیادی برخوردار است. اساس این روش بر تعریف توابع مطلوبیت برای پاسخ‌های مختلف و سپس ترکیب این توابع برای دستیابی به یک جواب بهینه استوار است.

در گام اول، برای هر یک از پاسخ‌های مورد نظر (که ممکن است شامل متغیرهایی مانند زمان، هزینه، کیفیت و غیره باشد)، یک تابع مطلوبیت تعریف می‌شود. این تابع معمولاً مقادیری بین صفر و یک دارد، به‌طوری‌که مقدار ۱ نشان‌دهنده مطلوب‌ترین حالت (یعنی بهترین مقدار ممکن برای آن پاسخ) و مقدار ۰ نشان‌دهنده وضعیت کاملاً نامطلوب یا عدم دستیابی به پاسخ مطلوب است. مقدار تابع مطلوبیت برای هر پاسخ، به‌طور خاص با توجه به نوع مسئله و هدف کلی آن تعیین می‌شود. بسته به اینکه هدف فرایند، حداقل‌سازی یک متغیر (مثلاً هزینه یا زمان)، حداکثرسازی آن (مثلاً بهره‌وری یا کیفیت) یا دستیابی به یک مقدار خاص باشد، تابع مطلوبیت می‌تواند شکل‌های مختلفی داشته باشد.

در مرحله بعد، برای ترکیب پاسخ‌های مختلف و دستیابی به یک ارزیابی کلی، از یک تابع ترکیبی استفاده می‌شود. این تابع معمولاً به صورت میانگین هندسی تعریف می‌شود که از ترکیب توابع مطلوبیت تمام پاسخ‌ها به دست می‌آید. استفاده از میانگین هندسی به این دلیل است که این روش قادر است تأثیر هر یک از پاسخ‌ها را به طور یکسان در نظر بگیرد، در حالی که در برخی دیگر از توابع ترکیبی مانند میانگین حسابی، وزن‌دهی بیشتری به پاسخ‌های با مقدار بالاتر داده می‌شود. به این ترتیب، با استفاده از تابع ترکیبی، می‌توان شرایطی را شبیه‌سازی کرد که در آن تمامی پاسخ‌ها به طور بهینه و هماهنگ به مقادیر مطلوب نزدیک شوند.

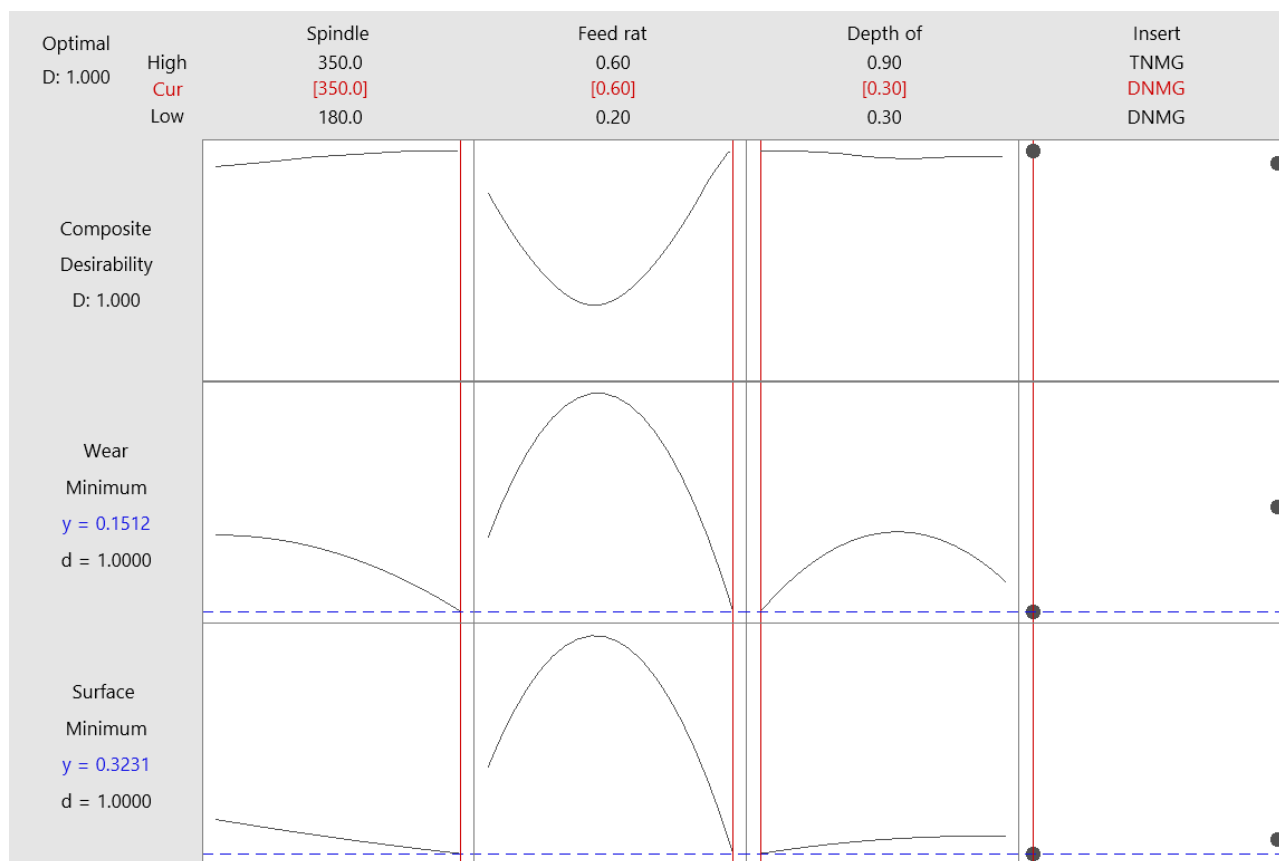
هدف اصلی در روش مطلوبیت سطح این است که شرایطی از متغیرهای ورودی پیدا شود که در آن مطلوبیت کلی به بیشترین مقدار خود برسد. این هدف در واقع، به دست آوردن بهترین ترکیب از متغیرهای ورودی است که باعث بهبود تمامی پاسخ‌ها به صورت همزمان می‌شود. به عبارت دیگر، در این روش نه تنها به دنبال بهینه‌سازی یک متغیر خاص هستیم، بلکه تمامی پاسخ‌های مرتبط با مسئله به طور همزمان بهینه می‌شوند.

یکی از مزیت‌های اصلی این روش، انعطاف‌پذیری بالای آن است. به این معنی که برای هر پاسخ می‌توان یک تابع مطلوبیت خاص و مناسب با آن مسئله تعریف کرد. علاوه بر این، در روش مطلوبیت سطح امکان وزن‌دهی به پاسخ‌های مختلف براساس اهمیت آن‌ها وجود دارد. این ویژگی باعث می‌شود که در صورت وجود پاسخ‌های متعدد با اولویت‌های مختلف، بتوان تأثیرگذاری و اهمیت هر یک را در بهینه‌سازی نهایی لحاظ کرد.

در مجموع، بهینه‌سازی به روش مطلوبیت سطح به عنوان یک ابزار قدرتمند در تحلیل و بهینه‌سازی فرآیندهای پیچیده چند متغیره، به مهندسان و پژوهشگران این امکان را می‌دهد که به طور کارآمد و علمی به دنبال شرایط بهینه برای سیستم‌های مختلف باشند و از این طریق، عملکرد کلی سیستم را به نحو چشمگیری بهبود بخشند [۲۴].

در شکل ۶، فرآیند بهینه‌سازی با روش مطلوبیت سطح برای دو پاسخ اصلی یعنی سایش ابزار و زبری سطح انجام شده است. این تحلیل بر اساس چهار متغیر ورودی شامل سرعت اسپیندل، نرخ پیشروی، عمق برش و نوع اینسرت صورت گرفته است. برای هر کدام از این متغیرها، مقادیر بهینه به دست آمده‌اند. سرعت اسپیندل ۳۵۰ دور بر دقیقه، نرخ پیشروی ۰٫۶ میلی‌متر بر دور و عمق برش ۰٫۳ میلی‌متر به عنوان مقادیر بهینه انتخاب شده‌اند، همچنین اینسرت DNMG نیز بهترین انتخاب بوده است.

برای سایش ابزار، مقدار بهینه ۰٫۱۵۱۲ و برای زبری سطح، مقدار بهینه ۰٫۳۲۳۱ به دست آمده که در هر دو حالت، مقدار مطلوبیت (desirability) برابر با یک است؛ به این معنی که به حداکثر مطلوبیت ممکن رسیده‌ایم. علاوه بر این، مطلوبیت کلی نیز برابر با یک بوده که نشان‌دهنده دستیابی به بهینه‌ترین شرایط ممکن برای هر دو پاسخ است. منحنی‌های ارائه‌شده در شکل نشان می‌دهند که تأثیر پارامترهای ورودی بر نتایج به صورت غیرخطی است و مقدار بهینه آن‌ها در نقاط خاصی از بازه‌های تعریف‌شده قرار دارند، به ویژه در مورد نرخ پیشروی و عمق برش که مقادیر میانی بهینه‌تر هستند.



شکل ۶. نمودار بهینه‌سازی به روش مطلوبیت سطح

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی تاثیر پارمترهای ماشینکاری و نوع اینسرت بر کیفیت سطح و عمر ابزار در تراشکاری آلیاژ سخت اینکونل ۷۱۸ پرداخته شده است. از روش تاگوچی برای انجام آزمایش استفاده شده است. نتایج بدست آمده به شرح زیر می باشد:

- با افزایش عمق برش، سایش ابزار به دلیل افزایش سطح تماس و نیروی برشی بیشتر می‌شود، اما زبری سطح کاهش می‌یابد، زیرا براده‌برداری یکنواخت‌تر انجام می‌شود و لرزش ابزار کاهش می‌یابد. تاثیر آن بر سایش ابزار ۸,۶۴٪ و بر زبری سطح ۰,۶۴٪ است. F-value برای سایش ابزار ۶,۴۱ و برای زبری سطح ۲,۷۹ بوده، و P-value سایش ابزار کمتر از ۰,۰۵ و زبری سطح بیشتر از ۰,۰۵ است، بنابراین تاثیر آن بر سایش معنادار است اما بر زبری سطح نیست.
- افزایش نرخ پیشروی از ۰,۲ به ۰,۴ میلی‌متر بر دور، هم سایش ابزار و هم زبری سطح را افزایش می‌دهد. اما با افزایش بیشتر به ۰,۶ میلی‌متر بر دور، هر دو کاهش می‌یابند، زیرا زمان تماس کمتر و دفع سریع‌تر براده‌ها باعث کاهش سایش و بهبود کیفیت سطح می‌شود. بیشترین تاثیر را هم بر سایش ابزار (۲۱٪) و هم بر زبری سطح (۶,۲۸٪) دارد. F-value برای سایش ابزار ۲۳ و برای زبری سطح ۵۱۷,۵۹ بوده و هر دو P-value کمتر از ۰,۰۵ دارند، که نشان‌دهنده معناداری آماری است.
- افزایش سرعت دورانی از ۱۸۰ به ۳۵۰ دور بر دقیقه، باعث کاهش سایش ابزار به دلیل دفع بهتر براده‌ها و کاهش تجمع حرارت می‌شود. تاثیر سرعت دورانی بر زبری سطح کم است و تغییرات معناداری ایجاد نمی‌کند. تاثیر ناچیزی بر سایش ابزار (۲,۳۳٪) و زبری سطح (۰,۰۰٪) دارد. F-value و P-value هر دو نشان‌دهنده عدم معناداری آماری است.
- اینسرت TNMG نسبت به DNMG سایش بیشتری دارد، اما زبری سطح کمتری ایجاد می‌کند. هرچند تفاوت زبری سطح میان این دو ابزار ناچیز است. ۹,۵۶٪ از تغییرات سایش ابزار و ۰,۰۸٪ از تغییرات زبری سطح را توضیح می‌دهد. F-value برای سایش ابزار ۱۰,۱۷ و برای زبری سطح ۳,۴۰ بوده و P-value سایش ابزار کمتر از ۰,۰۵ و زبری سطح بیشتر از ۰,۰۵ است، که نشان می‌دهد تاثیر آن بر سایش معنادار است اما بر زبری سطح نیست.

- در فرآیند بهینه‌سازی سایش ابزار و زبری سطح با استفاده از روش مطلوبیت سطح، سرعت اسپیندل ۳۵۰ دور بر دقیقه، نرخ پیشروی ۰٫۶ میلی‌متر بر دور، عمق برش ۰٫۳ میلی‌متر و اینسرت DNMG به عنوان مقادیر بهینه انتخاب شدند. مقدار بهینه سایش ابزار ۰٫۱۵۱۲ و زبری سطح ۰٫۳۲۳۱ به دست آمد که در هر دو حالت، مطلوبیت برابر با ۱ بوده و نشان‌دهنده دستیابی به حداکثر مطلوبیت است. همچنین، تأثیر پارامترهای ورودی بر نتایج غیرخطی بوده و مقادیر بهینه در نقاط میانی بازه‌ها قرار دارند.

با پیشرفت فناوری و توسعه مواد جدید، ماشینکاری اینکونل ۷۱۸ نیز بهبودهای زیادی خواهد داشت. استفاده از ابزارهای نوین، تکنیک‌های خنک‌کننده پیشرفته و روش‌های بهینه‌سازی پیشرفته می‌تواند به کاهش هزینه‌های تولید و افزایش بهره‌وری کمک کند. همچنین، تحقیقات بیشتر در زمینه روانکارها و پوشش‌های نوین ابزار می‌تواند به بهبود فرآیند ماشینکاری اینکونل ۷۱۸ کمک کند.

۵- تشکر و قدردانی

از شرکت بهسازکار نور اصفهان که با تأمین مواد اولیه و همکاری در انجام آزمایشات، نقشی مؤثر در پیشبرد این پژوهش داشتند، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌کنیم.

۶- واژه نامه انگلیسی به فارسی

واژه انگلیسی	واژه فارسی
Inconel	اینکونل
Insert	اینسرت
Chromium	کروم
iron	آهن
molybdenum	مولیبدن
niobium	نیوبیوم
Titanium	تیتانیوم
Aluminum	آلومینیوم
Carbon	کربن
Analysis of Variance	آنالیز واریانس
Optimization	بهینه سازی
P-Value	مقدار P
F-Value	مقدار F
DNMG	نوعی از اینسرت تراشکاری
TNMG	نوعی از اینسرت تراشکاری
Feed rate	نرخ پیشروی
Spindle speed	سرعت دورانی
Depth of cut	عمق برش

رگرسیون	Regression
مشارکت	Contribution
مجموع مربعات	Sum of Squares (SS)
میانگین مربعات	Mean of Squares (MS)
خطا	Error
درجه آزادی	DF (Degree of Freedom)
تنظیم شده	Adj
تابع مطلوبیت	Desirability function
منبع (پارامتر مدنظر)	Source

۷- مراجع

- [۱] Zhu D, Zhang X, Ding H. Tool wear characteristics in machining of nickel-based superalloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2013;64:60-77.
- [۲] Pollock TM, Tin S. Nickel-based superalloys for advanced turbine engines: chemistry, microstructure and properties. *Journal of propulsion and power*. 2006;22(2):361-74.
- [۳] Donachie MJ, Donachie SJ. *Superalloys: a technical guide*: ASM international; 2002.
- [۴] Khochtali H, Ayed Y, Zemzemi F, Bensalem W. Tool wear characteristics in rough turning of Inconel 718 with coated carbide tool under conventional and high-pressure coolant supplies. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021;114:2371-86.
- [۵] Jafarian F, Umbrello D, Golpayegani S, Darake Z. Experimental investigation to optimize tool life and surface roughness in Inconel 718 machining. *Materials and Manufacturing Processes*. 2016;31(13):1683-91.
- [۶] Liang X, Liu Z, Wang B. State-of-the-art of surface integrity induced by tool wear effects in machining process of titanium and nickel alloys: A review. *Measurement*. 2019;132:150-81.
- [۷] Jeyapandiarajan P, Xavier A. Influence of cutting condition on machinability aspects of Inconel 718. *Journal of Engineering Research*. 2019;7.(۲)
- [۸] Zhujani F, Abdullahu F, Todorov G, Kamberov K. Optimization of Multiple Performance Characteristics for CNC Turning of Inconel 718 Using Taguchi–Grey Relational Approach and Analysis of Variance. *Metals*. 2024;14(2):186.
- [۹] Pawade R, Joshi SS, Brahmanekar P, Rahman MJJoMPT. An investigation of cutting forces and surface damage in high-speed turning of Inconel 718. 2007;192:139-46.
- [۱۰] Khan S, Soo S, Aspinwall D, Sage C, Harden P, Fleming M, et al. Tool wear/life evaluation when finish turning Inconel 718 using PCBN tooling. ۲۰۱۲;۲۸۳:۱-۸.
- [۱۱] Frifita W, Salem SB, Haddad A, Yallese MAJM, Industry. Optimization of machining parameters in turning of Inconel 718 Nickel-base super alloy. 2020;21(2):203.
- [۱۲] Pinheiro C, Kondo MY, Amaral SS, Callisaya ES, De Souza JVC, De Sampaio Alves MC, et al. Effect of machining parameters on turning process of Inconel 718. 2021;36(12):1421-37.
- [۱۳] Zhujani F, Abdullahu F, Todorov G, Kamberov KJM. Optimization of Multiple Performance Characteristics for CNC Turning of Inconel 718 Using Taguchi–Grey Relational Approach and Analysis of Variance. 2024;14(2):186.
- [۱۴] Tan L, Yao C, Li X, Fan Y, Cui MJJoME, Performance. Effects of machining parameters on surface integrity when turning Inconel 718. 2022;31(5):4176-86.

- [۱۵] M. Ghalami-Chooabar GL, M. Sadighi, H. Ahmadi. Optimization of manufacture process of Glass/Polycarbonate thermoplastic laminates using Taguchi method. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2019 5(4):37-43 (In Persian).
- [۱۶] Sadílek M, Dubský J, Sadílková Z, Poruba ZJPiS. Cutting forces during turning with variable depth of cut. 2016;7:357-63.
- [۱۷] Kuntoğlu M, Sağlam HJM. Investigation of progressive tool wear for determining of optimized machining parameters in turning. 2019;140:427-36.
- [۱۸] Hu L, Cai W, Shu L, Xu K, Zheng H, Jia SJIJoPE, et al. Energy optimisation for end face turning with variable material removal rate considering the spindle speed changes. 2021;8:625-38.
- [۱۹] Mohammad Hasanifard RA, Mohammad Hosein Alaei, Moslem Najafi Experimental investigation of the effect of machining parameters on the surface quality in turning aluminum base composite reinforced with Mg2Si particles. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2024:(In Persian).
- [۲۰] Albertelli P, Mussi V, Ravasio C, Monno MJPC. An experimental investigation of the effects of spindle speed variation on tool wear in turning. 2012;4:29-34.
- [۲۱] Baraheni M, Shabgard MR, Amini S, Gholipour FJJoTCM. Experimental evaluation and optimization of parameters affecting delamination, geometrical tolerance and surface roughness in ultrasonic drilling of 3D-Printed PLA thermoplastic. 2024:08927057241264803.
- [۲۲] Amini S, Baraheni M, Mardiha AJPotIoME, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering. Parametric investigation of rotary ultrasonic drilling of carbon fiber reinforced plastics. 2018;232(5):540-54.
- [۲۳] Baraheni M, Amini SJAJfS, Engineering. Influence of Machining Condition and Nano-Graphene Incorporation on Drilling Load and Hole Quality in Both Conventional Drilling and Ultrasonic-Assisted Drilling of CFRP. 2024:1-14.
- [۲۴] Tabatabaeian A, Baraheni M, Amini S, Ghasemi ARJJoCM. Environmental, mechanical and materialistic effects on delamination damage of glass fiber composites: analysis and optimization. 2019;53(26-27):3671-80.