

بهینه‌سازی زبری سطح در ماشین کاری سوپرآلیاژ پایه آهن - نیکل N-155 با استفاده از روش تاگوچی

بهنام داودی*^۱ و بهزاد اسکندری^۲

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه تبریز

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۶/۲۰؛ تاریخ پذیرش: ۹۲/۱۰/۲۲)

چکیده

سوپرآلیاژها به دلیل داشتن خواصی نظیر توانایی حفظ استحکام در دماهای بالا و مقاومت بالا به خوردگی و خستگی، در صنعت هوافضا، صنایع پتروشیمی، صنایع هسته‌ای و همچنین در ساخت توربین‌های گازی و بخار به‌وسعت مورد استفاده قرار می‌گیرند. از طرف دیگر خواصی چون کارسختی سریع در حین ماشین کاری، وجود ذرات ساینده کاربیدی، هدایت حرارتی پایین و تمایل به ایجاد لبه انباشته بر سطح ابزار در ماشین کاری سوپرآلیاژها، باعث شده تا سوپرآلیاژها جزء مواد سخت برای ماشین کاری به شمار آیند. با وجود کاربرد فراوان سوپرآلیاژهای پایه آهن- نیکل در صنایع مختلف، مطالعه چندان بر روی فرآیند ماشین کاری آنها انجام نشده است. در این تحقیق، تأثیر سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق برش بر زبری سطح قطعات ماشین کاری شده، در تراشکاری سوپرآلیاژ پایه آهن- نیکل N-155 به‌طور تجربی بررسی شده است. آزمایش‌ها با استفاده از ابزار کاربیدی پوشش‌دار و بر اساس آرایه‌های متعامد L_9 روش تاگوچی انجام شده‌اند. از تحلیل سیگنال به نویز (S/N) برای تعیین پارامترهای بهینه و از آنالیز واریانس (ANOVA) برای تعیین پارامترهای مؤثر و میزان تأثیر هر کدام از پارامترها کمک گرفته شده است. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهند که نرخ پیشروی و سرعت برشی بیشترین تأثیر را به ترتیب بر روی R_a و R_{max} دارند. همچنین مقادیر بهینه پارامترهای ماشین کاری برای رسیدن به حداقل زبری سطح تعیین و با انجام آزمایش تأیید، صحت سنجی شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: ماشین کاری، سوپرآلیاژ پایه آهن- نیکل، زبری سطح، روش تاگوچی، بهینه‌سازی

Surface Roughness Optimization in Machining of N-155 Iron-Nickel-Base Superalloy Using the Taguchi Method

B. Davoodi and B. Eskandari

Faculty of Mechanical Engineering

University of Tabriz

(Received: 11/September/2013; Accepted: 12/January/2014)

ABSTRACT

Due to the properties such as high strength at elevated temperatures and good corrosion and fatigue resistance, superalloys are widely used in industrial applications where such properties are required. These applications include aerospace, steam turbine power plants and petrochemical and nuclear industries. On the other hand superalloys are classified as difficult-to-machine materials owing to their retention of high strength at elevated temperatures, rapid work hardening during machining, presence of hard particles, low thermal conductivity and tendency to make built-up edge on the cutting tool. There is hardly any published paper on machining of iron-nickel-base superalloys despite their industrial importance. In this work, the effects of cutting speed, feed rate and depth of cut on surface roughness in turning of N-155 iron-nickel-base superalloy, were evaluated. Experiments were conducted according to L_9 Taguchi standard orthogonal array by using coated carbide cutting tools. By the help of signal-to-noise (S/N) quality characteristic and statistical analysis of variance (ANOVA), optimal cutting parameters and statistical significant level of each parameter were determined. Results showed that feed rate and cutting speed were the most effective parameters on R_a and R_{max} , respectively. Additionally, optimum cutting conditions for minimum surface roughness were predicted. Finally, the obtained optimum cutting parameters were verified by a confirmation test.

Keywords: Machining, Iron-Nickel-Base Superalloy, Surface Roughness, Taguchi Method, Optimization

۱- دانشیار (نویسنده پاسخگو): bdavoodi@tabrizu.ac.ir

۲- کارشناس ارشد: beskandari89@ms.tabrizu.ac.ir

۱- مقدمه

همان‌طور که ذکر شد، سوپرآلیاژها دارای انواع مختلف هستند و چگونگی شرایط ماشین‌کاری به نوع این مواد بستگی داشته و نتایج متفاوتی در شرایط یکسان مشاهده می‌شود. برای مثال ماشین‌کاری سوپرآلیاژهای پایه آهن-نیکل که بسیار مشابه فولادهای ضد زنگ هستند، نسبت به سوپرآلیاژهای پایه نیکل و کبالت آسان‌تر انجام می‌شود ولی با این وجود باز هم مشکلات بسیاری در ماشین‌کاری این نوع سوپرآلیاژها وجود دارد. یکی از موضوعاتی که در ماشین‌کاری این مواد حائز اهمیت است و باید مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد کیفیت سطح قطعه ماشین‌کاری شده می‌باشد. کیفیت سطح ماشین‌کاری شده با مقاومت به خستگی قطعه ماشین‌کاری شده ارتباط مستقیم داشته و حائز اهمیت فراوان می‌باشد.

از میان روش‌هایی که برای مشخص کردن کیفیت سطح به کار گرفته می‌شوند، زبری سطح بیشترین کاربرد را دارد [۷] و مطالعات زیادی بر روی زبری سطح در ماشین‌کاری مواد مختلف انجام شده است. دو معیار مهم سنجش زبری سطح عبارتند از R_a و R_{max} . معیار R_{max} نشان دهنده بیشترین مقدار زبری سطح در طول اندازه‌گیری شده و معیار R_a که معروف‌ترین معیار زبری سطح می‌باشد، عبارت است از میانگین ارتفاعات زبری سطح و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |z(x)| dx \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |z_i|$$

در تحقیقاتی که بر روی برخی سوپرآلیاژها انجام شده، تأثیر پارامترهای ماشین‌کاری بر تغییرات زبری سطح بررسی شده است. آروناچالام^۲ و همکاران [۸] زبری سطح و تنش پسماند در ماشین‌کاری سوپرآلیاژ پایه نیکل اینکونل ۷۱۸ را مورد بررسی قرار دادند. آنها با استفاده از ابزارهای CBN^۳ و سرامیکی، تأثیر پارامترهای ماشین‌کاری نظیر سرعت برشی، عمق برش، سیال برش، هندسه و پوشش ابزار را بر روی زبری سطح و تنش پسماند بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که ابزار برشی از جنس CBN در سرعت برشی (۱۵۰ m/min) و عمق برش (۰/۰۵ mm) و در شرایط ماشین‌کاری همراه با سیال برشی، زبری سطح خوب به همراه تنش پسماند حداقل، در قطعه ماشین‌کاری شده به وجود می‌آورد.

در تحقیقی دیگر، پاواد^۴ و همکاران [۹] تأثیر پارامترهای ماشین‌کاری بر مقدار نیروهای برشی و کیفیت سطح از جمله زبری، ریزساختار و آسیب سطحی در تراشکاری سوپرآلیاژ پایه

سوپرآلیاژها موادی هستند که مشخصه بارز آنها توانایی کارکرد در دماهای بالا است و معمولاً دمای عملکرد آنها بیش از ۵۴۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد [۱]. این مواد از نظر ترکیبات شیمیایی و عناصر تشکیل‌دهنده به سه گروه سوپرآلیاژ پایه نیکل، سوپرآلیاژ پایه آهن-نیکل و سوپرآلیاژ پایه کبالت تقسیم‌بندی می‌شوند. تمامی این آلیاژها علاوه بر خاصیت حفظ استحکام در دماهای بالا، برای به‌کارگیری موفقیت‌آمیز در کاربردهای مختلف، باید ترکیبی از خواص، همچون مقاومت به خستگی و خزش، مقاومت به خوردگی و توانایی کارکرد در دماهای بالا برای مدت‌های طولانی (پایداری متالورژیکی) را داشته باشند [۲]. حفظ استحکام در درجه حرارت‌های بالا و مقاومت به فرسایش سطح در سوپرآلیاژها خواصی هستند که قابل مقایسه با دیگر مواد فلزی نیست [۳].

سوپرآلیاژها به وسعت در صنعت هوا فضا، از جمله در موتور اصلی شاتل‌های فضایی، باتری‌های نیکل-هیدروژن در ایستگاه فضایی بین‌المللی [۴] و اجزای توربین‌های جت هواپیما مانند پرها و محفظه احتراق، به کار گرفته شده‌اند و بیش از ۵۰ درصد وزن موتور را تشکیل می‌دهند. سوپرآلیاژها همچنین در کاربردهای دیگری که دمای عملکرد بالا و محیط خوردنده می‌باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرند. از جمله این کاربردها می‌توان به موتور موشک، توربین‌های گازی و بخار، تجهیزات شکل‌دهی فلزات، تجهیزات عملیات حرارتی، کارخانه‌های مواد شیمیایی و پتروشیمی و تجهیزات کنترل آلودگی اشاره کرد [۵].

سوپرآلیاژها جزء مواد سخت برای ماشین‌کاری^۱ به‌شمار می‌آیند. سوپرآلیاژها بعد از آلیاژهای تیتانیوم، سخت‌ترین مواد برای ماشین‌کاری در میان دیگر آلیاژهای فلزی هستند [۶]. البته بسیاری از کسانی که ماشین‌کاری سوپرآلیاژها را انجام داده‌اند بر این عقیده‌اند که سوپرآلیاژها سخت‌ترین مواد برای ماشین‌کاری می‌باشند. همان‌خواصی که باعث شده است تا سوپرآلیاژها مواد مناسبی برای کاربردهای ذکر شده باشند، ماشین‌کاری سوپرآلیاژها را با چالش فراوان همراه کرده است. از جمله این خواص می‌توان به حفظ استحکام در دماهای بالا، کارسختی سریع در حین ماشین‌کاری، وجود ذرات ساینده کاربیدی در ریزساختار، هدایت حرارتی پایین و تمایل براده به ایجاد جوش بر روی لبه ابزار و تشکیل لبه انباشته اشاره کرد [۱].

2- Arunachalam

3- Cubic Boron Nitride

4- Pawade

1- Difficult-to-Machine Materials

زبری سطح در تراشکاری سوپرآلیاژ پایه آهن- نیکل N-155 انجام شده است. هدف از این مطالعه تعیین پارامترهای بهینه ماشین‌کاری برای رسیدن به حداقل زبری سطح می‌باشد. بدین منظور از روش طراحی آزمایش‌ها تاگوچی^۷ و تحلیل سیگنال به نویز^۸ (S/N) استفاده شده است. از تحلیل واریانس^۹ (ANOVA) برای تعیین پارامترهای تأثیرگذار بر زبری سطح و میزان تأثیرگذار بودن هر کدام از آنها کمک گرفته شده است.

۲- تجهیزات آزمایش

برای انجام عملیات تراشکاری از قطعات استوانه‌ای از جنس سوپرآلیاژ پایه آهن- نیکل N-155 استفاده شد. در جدول ۱ عناصر شیمیایی این سوپرآلیاژ ارائه شده است. قبل از اجرای آزمایش‌ها، عملیات آماده‌سازی شامل روتراشی، پیشانی‌تراشی و مته مرغک‌زنی بر روی قطعات انجام شد. قطر نهایی قطعات ۳۴ mm و طول آنها ۲۵۰ mm می‌باشد. در اجرای آزمایش‌ها به این نکته دقت شده است که نسبت طول به قطر قطعه کار بیشتر از ۱۰ نباشد تا از وقوع ارتعاشات و پدیده لرزش^{۱۰} جلوگیری به عمل آید. وقوع لرزش باعث شکست زودهنگام ابزار برشی می‌شود. آزمایش‌ها به صورت ماشین‌کاری خشک و بر روی دستگاه تراش کنترل عددی EMCOTURN 242 TC با مشخصات فنی ارائه شده در جدول ۲ انجام شدند.

از ابزارهای کاربردی پوشش‌دار با روکش TiAlN ساخت شرکت سندویک^{۱۱} برای انجام تمامی آزمایش‌ها استفاده شد. اینسرت‌ها دارای کد استاندارد ایزو CNMG 120404 و گرید GC1105 (مخصوص تراشکاری سوپرآلیاژ) و ابزارگیر استفاده شده دارای استاندارد ایزو PCBNL 2020M12 می‌باشند. زبری سطح با توجه به استاندارد ISO 468 [۱۲] با استفاده از دستگاه زبری‌سنج Perthometer M2 ساخت شرکت Mahr اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری نمونه‌ها در طول ۵/۶ میلی‌متر و در چهار نقطه از قطعه کار انجام و مقادیر زبری ثبت شدند.

نیکل اینکونل ۷۱۸ را با استفاده از ابزار^۱ PCBN بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که نیروهای پیشروی و شعاعی تقریباً با هم برابر بوده و نیروی اصلی ماشین‌کاری دو یا سه برابر نیروهای پیشروی و شعاعی می‌باشد. همچنین بر اساس این تحقیق، قطعه‌کارهایی که ماشین‌کاری آنها با نیروهای برشی بزرگ‌تری همراه بودند، دارای کیفیت سطح پایین‌تر و همچنین آسیب سطحی بیشتری هستند.

پوساوک^۲ و همکاران [۱۰] تأثیر ماشین‌کاری برودتی^۳ را بر کیفیت سطح در ماشین‌کاری اینکونل ۷۱۸ مورد مطالعه قرار دادند و این روش را با سه روش دیگر خنک‌کاری (ماشین‌کاری خشک، MQL^۴، CryoMQL^۵) مقایسه کردند. موارد مورد بررسی، تنش‌های پسماند سطحی و زیرسطحی، سختی و زبری سطح بوده است. نتایج نشان می‌دهد که ماشین‌کاری برودتی می‌تواند باعث بهبود تمامی معیارهای کیفیت سطح شده و در نتیجه کیفیت محصول نهایی ارتقاء یابد.

ژوا^۶ و همکاران [۱۱] در تحقیقی که بر روی اینکونل ۷۱۸ با استفاده از ابزار سرامیکی انجام شده است، تأثیر سایش ابزار و شرایط خنک‌کاری مختلف (خشک و همراه با سیال) را بر روی آسیب سطحی مورد بررسی قرار داده‌اند. مشاهدات از سطح ماشین‌کاری شده نشان داده است که آسیب‌های سطحی شامل عیب هندسی و همچنین تغییرات ریزساختاری زیرسطحی بوده‌اند. همچنین نشان داده شده است که نوع و اندازه آسیب‌های سطحی به پارامترهای ماشین‌کاری، اندازه سایش ابزار و شرایط خنک‌کاری بستگی دارد.

همان‌طور که از مرور برخی از تحقیقات پیشین که بر روی سوپرآلیاژها انجام شده است برمی‌آید، اکثر قریب به اتفاق مقالات به مطالعه بر روی ماشین‌کاری سوپرآلیاژ پایه نیکل و به‌خصوص اینکونل ۷۱۸ تمرکز داشته‌اند و هیچ تحقیق ثبت‌شده‌ای از سوپرآلیاژ پایه آهن-نیکل توسط محققان یافت نشد. از این رو با توجه به اهمیت ماشین‌کاری سوپرآلیاژ پایه آهن-نیکل در صنایع مختلف، در تحقیق حاضر، مطالعه بر روی تأثیر پارامترهای ماشین‌کاری (سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق برش) بر میزان

7- Taguchi

8- Signal to Noise ratio

9- Analysis of Variance

10- Chatter

11- Sandvik

1- Polycrystalline Cubic Boron Nitride

2- Pusavec

3- Cryogenic

4- Minimum Quantity of Lubricant

5- Cryogenic Minimum Quantity of Lubricant

6- Zhou

جدول (۱): عناصر شیمیایی سوپرآلیاژ پایه آهن- نیکل N-155.

Fe balance	Zr 0.02	C 0.15	N 0.15	Mn 1.2	Nb 1.0	W 2.5	Mo 3.00	Co 19.7	Ni 20.3	Cr 21.9	عناصر شیمیایی %wt
------------	---------	--------	--------	--------	--------	-------	---------	---------	---------	---------	----------------------

جدول (۲): مشخصات فنی دستگاه تراش کنترل عددی.

حداکثر قدرت دستگاه	محدوده سرعت محور دستگاه	حداکثر نرخ پیشروی	حداکثر گشتاور محور دستگاه
۳۶kW	۵۰-۴۵۰۰U/min	۴۰۰۰mm/min	۷۵Nm

۳- طراحی آزمایش

برای صرفه جویی در زمان و اتلاف کمتر مواد اولیه و همچنین انجام دقیق تر تحلیل های آماری، از چیدمان طراحی آزمایش برای انجام آزمایش ها استفاده می شود. روش های طراحی آزمایش این امکان را به وجود می آورد که اثرات پارامترهای ماشین کاری در یک فرآیند بررسی شوند و رابطه بین پارامترهای ورودی و خروجی فرآیند که تابع ناشناخته ای از متغیرهای ورودی هستند، مدل سازی گردد [۱۳]. روش های کلاسیک طراحی آزمایش بسیار پیچیده است و استفاده از آنها به آسانی امکان پذیر نیست. به علاوه، وقتی که تعداد پارامترهای ماشین کاری افزایش می یابد، تعداد بیشتری آزمایش تجربی باید انجام شود [۱۴].

یکی از روش های طراحی آزمایش که به وسعت در زمینه بهینه سازی مورد استفاده قرار می گیرد، روش تاگوچی می باشد. این روش طراحی، توسط گنجیچی تاگوچی^۱ ارائه شده و مجموعه ای از روش شناسی هایی است که با استفاده از آنها هرگونه تغییرپذیری در مواد و فرآیندهای تولید در مرحله طراحی، مد نظر قرار می گیرد. این روش پس از دهه ۱۹۸۰ در صنایع آمریکا و اروپا به وسعت مورد استفاده قرار گرفت [۱۵]. در این روش، با تبدیل مقادیر تابع هدف به یک نسبت سیگنال به نویز (S/N)، امکان کنترل تغییرات ایجاد شده توسط پارامترهای غیر قابل کنترل به وجود می آید. این مسئله در روش های معمول طراحی آزمایش در نظر گرفته نشده است [۱۶-۱۵]. نسبت S/N به صورت نسبت سیگنال مطلوب به نویزهای تصادفی نامطلوب تعریف می گردد و به عنوان مشخصه عملکردی^۲ داده های تجربی نشان داده می شود. یکی دیگر از مزیت های مهم این روش نسبت به روش های دیگر، انجام فرآیند بهینه سازی و یافتن پارامترهای مؤثر، در کمترین زمان و با کمترین هزینه است. این ویژگی باعث شده است که از این روش در مواقعی که آزمایش ها پر هزینه

هستند و یا انجام آنها با دشواری همراه می باشند استفاده شود. با توجه به اینکه هزینه مواد سوپرآلیاژها و ابزارهای برشی مخصوص این آلیاژها بالا می باشد، در این تحقیق روش طراحی تاگوچی برای انجام آزمایش ها انتخاب شد تا با انجام کمترین تعداد آزمایش، فرآیند ماشین کاری سوپرآلیاژ پایه آهن- نیکل N-155 مورد بررسی قرار گیرد.

به طور کلی این روش طراحی در سه مرحله انجام می شود که عبارتند از طراحی سیستم، طراحی پارامتر و طراحی تلرانس. در این میان، مرحله طراحی پارامتر مهم ترین مرحله است و هدف آن بهینه کردن پارامترهای فرآیند تولید به منظور بالا بردن کیفیت محصول نهایی می باشد [۱۷]. قدم های اساسی در مرحله طراحی پارامتر، انتخاب یک آرایه متعامد مناسب بر اساس تعداد پارامترهای فرآیند، انجام آزمایش های تجربی بر اساس آرایه ی متعامد، تحلیل داده ها و تعیین پارامترهای بهینه، می باشد [۱۸]. در این مرحله، از تحلیل واریانس برای تشخیص متغیرهای مؤثر و میزان تأثیر هر یک از پارامترها استفاده می شود. همچنین از تحلیل نسبت سیگنال به نویز (S/N) برای به دست آوردن پارامترهای بهینه، به منظور بهبود یک مشخصه عملکرد (که می تواند زبری سطح یا سایش ابزار باشد) کمک گرفته می شود. با توجه به این روش تحلیل، شرایط بهینه شرایطی است که در آن حساسیت عملکرد و یا خروجی نسبت به نویزها، کمترین مقدار باشد [۱۹]. مشخصه سیگنال به نویز به سه دسته زیر تقسیم بندی می شود [۲۰]:

مقدار اسمی بهتر است^۳:

$$\frac{S}{N} = 10 \log \frac{\bar{y}}{S_y^2} \quad (1)$$

مقدار بزرگ تر بهتر است^۴:

$$\frac{S}{N} = -\log \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (2)$$

3- The-Nominal-the-Better

4- The-Larger-the-Better

1- Genichi Taguchi

2- Performance Characteristic

مقدار کوچک‌تر بهتر است^۱:

$$\frac{S}{\bar{N}} = -10 \log \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i^2 \right), \quad (3)$$

که در آنها، y_i مقدار خروجی به‌ازای i امین اجرای آزمایش، \bar{y} میانگین داده‌های خروجی، S_y^2 واریانس y_i و n تعداد تکرار آزمایش است. بسته به نوع خروجی فرآیند، یکی از مشخصه‌های سیگنال به نویز انتخاب می‌شود. برای مثال در صورتی که خروجی فرآیند «عمر ابزار» باشد، از آنجا که هدف نهایی بیشینه کردن آن می‌باشد، مشخصه «مقدار بزرگ‌تر بهتر است» انتخاب می‌شود. از طرف دیگر اگر هدف از بهینه کردن پارامترهای فرآیند، به حداقل رساندن «نیروی برشی» باشد، مشخصه «مقدار کمتر بهتر است» باید انتخاب شود. فارغ از نوع مشخصه، سطح دارای بیشترین مقدار نسبت سیگنال به نویز، سطح بهینه آن پارامتر ماشین کاری را نشان می‌دهد.

در مقاله حاضر، سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق برش هر یک در سه سطح به‌عنوان عوامل^۲ ماشین کاری انتخاب شده‌اند. پارامترهای ماشین کاری و سطوح آنها ارائه شده‌اند. انتخاب پارامترهای ماشین کاری بر اساس اطلاعات در دسترس و انتخاب سطوح پارامترها بر اساس توصیه‌های شرکت سازنده ابزار [۲۱] صورت گرفت. با داشتن سه عامل سه سطحی، آرایه متعامد L_9 انتخاب شد. به این ترتیب برای بررسی تأثیر پارامترهای ماشین کاری بر روی زبری سطح، ۹ آزمایش طراحی انجام شد. اگرچه ممکن است تعداد ۹ آزمایش برای رسیدن به یک نتیجه مطمئن کم به نظر برسد، ولی در تحقیقات مختلف نشان داده شده است که با همین تعداد آزمایش می‌توان به نتایج مورد نظر در فرآیندهای ماشین کاری رسید [۱۵، ۱۸، ۲۲]. هر آزمایش در مدت زمان ۹۰ ثانیه و با استفاده از ابزار نو انجام شده است.

جدول (۳): پارامترهای ماشین کاری و سطوح انتخابی.

نماد	پارامترهای ماشین کاری	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
A	سرعت برشی (m/min)	۸۰	۱۰۰	۱۲۰
B	نرخ پیشروی (mm/rev)	۰/۱	۰/۱۵	۰/۲
C	عمق برش (mm)	۰/۵	۱	۱/۵

تمامی تحلیل‌های آماری توسط نرم‌افزار آماری Minitab[®] 16 که یک نرم‌افزار قوی در حل مسائل آماری می‌باشد، به انجام رسید. از این نرم‌افزار در زمینه‌های مختلف از جمله علوم مهندسی، ریاضیات، آمار، اقتصاد و ورزش به منظور انجام تحلیل‌های آماری و

بهبود کیفیت با موفقیت استفاده شده است [۲۳].

۴- نتایج و بحث

آزمایش‌ها بر اساس آرایه‌های متعامد L_9 اجرا و مقادیر ثبت شدند. از آنجا که هدف یافتن پارامترهای بهینه برای به حداقل رساندن زبری سطح می‌باشد، نسبت S/N برای تمامی زبری‌های سطح حاصل از آزمایش‌ها، از رابطه (۳) به‌دست آمدند. از بین مقادیر S/N به‌دست آمده بیشترین مقدار، حالت بهینه را نشان می‌دهد. مقادیر اندازه‌گیری شده زبری سطح و نسبت‌های S/N مربوط به آنها در جدول ۴ آورده شده است.

شکل‌های ۱ و ۲ رابطه بین پارامترهای ماشین کاری و معیارهای زبری سطح را به ترتیب برای R_a و R_{max} نشان می‌دهند. شکل‌ها نشان می‌دهند که با افزایش نرخ پیشروی در سرعت برشی و عمق بار ثابت، تغییرات مقدار زبری سطح در معیارهای R_a شکل ۱ و R_{max} شکل ۲ روندی افزایشی دارد. دلیل آن افزایش ناهموازی‌های سطح ماشین کاری شده در اثر افزایش نرخ پیشروی می‌باشد. با توجه به شکل ۲ در عمق برش ۱/۵ mm و سرعت برشی ۱۲۰ m/min با افزایش نرخ پیشروی مقدار R_{max} ابتدا کاهش و سپس افزایش شدیدتری پیدا می‌کند. دور بالای محور دستگاه و در نتیجه وقوع لرزش در دستگاه می‌تواند دلیل افزایش در زبری سطح باشد.

روند تغییرات زبری سطح با توجه به تغییرات عمق برش در شکل‌های ۱-الف و ۲-الف نشان داده شده است. در نرخ پیشروی ۰/۱ mm/rev با بیشتر شدن عمق برش از ۰/۵ mm به ۱ mm کاهش در زبری سطح R_a مشاهده می‌شود و دلیل آن افزایش سرعت برشی از ۸۰ m/min به ۱۰۰ m/min بر اساس طراحی آزمایش، می‌باشد. این روند در شکل‌های ۱-ب و ۲-ب نیز قابل مشاهده است که با افزایش سرعت برشی از ۸۰ m/min به ۱۰۰ m/min، زبری سطح کاهش پیدا می‌کند. با افزایش بیشتر عمق برش، به علت عمیق‌تر شدن عمق بار، افزایش بیشتر در زبری سطح دیده می‌شود. در نرخ پیشروی ۰/۱۵ mm/rev تغییرات زبری سطح در هر دو معیار R_a و R_{max} تقریباً ثابت است و با تغییرات پارامترهای ماشین کاری تغییر چندانی در زبری سطح اتفاق نمی‌افتد. در نرخ پیشروی ۰/۲ mm/rev با افزایش عمق برش ابتدا افزایش در زبری سطح و سپس کاهش مشاهده می‌شود (شکل ۱-الف و ۲-الف). دلیل آن، تغییرات در سرعت برشی همراه با تغییر در عمق برش با توجه به طراحی آزمایش است. در

1- The-Smaller-the-Better

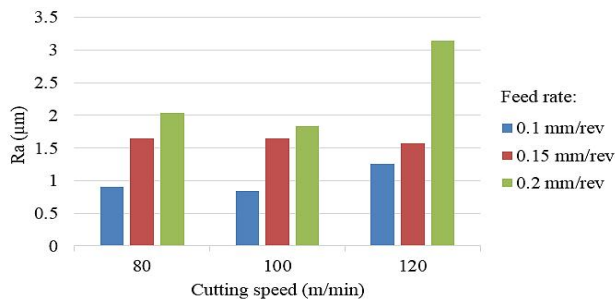
2- Factors

است. با این پارامترها و حذف عوامل تأثیرگذار در سرعت 120 m/min ، زبری سطح کاهش پیدا می‌کند. این روند در شکل ۱-ب و ۲-ب نیز قابل مشاهده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در سرعت برشی 120 m/min و نرخ پیشروی 0.2 mm/rev افزایش قابل توجهی در میزان زبری سطح رخ می‌دهد.

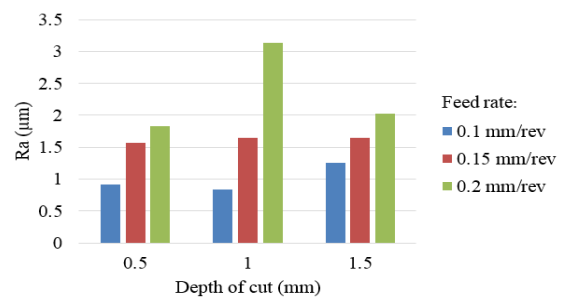
عمق برش 0.5 mm سرعت برشی 100 m/min می‌باشد و با افزایش عمق برش تا 1 mm ، سرعت برشی تا 120 m/min افزایش می‌یابد (جدول ۴). این افزایش سرعت باعث افزایش سایز ابزار و همچنین افزایش لرزش دستگاه تراش می‌شود [۲۴]. در نتیجه زبری سطح در هر دو معیار افزایش می‌یابد. با افزایش بیشتر عمق برش تا 1.5 mm ، سرعت برشی بر اساس طراحی آزمایش 80 m/min

جدول (۴): نتایج آزمایش‌ها و نسبت‌های S/N مربوط به معیارهای زبری سطح.

نسبت S/N (dB) محاسبه شده برای زبری سطح R_{max}	زبری سطح R_{max} (μm)	نسبت S/N (dB) محاسبه شده برای زبری سطح R_a	زبری سطح R_a (μm)	پارامترهای ماشین‌کاری			شماره آزمایش
				عمق برش (mm)	نرخ پیشروی (mm/rev)	سرعت برشی (m/min)	
-۱۸/۰۱	۷/۹۵	۰/۸۲	۰/۹۱	۰/۵	۰/۱	۸۰	۱
-۱۸/۹۱	۸/۸۳	-۴/۳۵	۱/۶۵	۱	۰/۱۵	۸۰	۲
-۲۰/۸۲	۱۰/۹۹	-۶/۱۵	۲/۰۳	۱/۵	۰/۲	۸۰	۳
-۱۶/۳۹	۶/۶۰	۱/۵۱	۰/۸۴	۱	۰/۱	۱۰۰	۴
-۱۹/۱۱	۹/۰۳	-۴/۳۵	۱/۶۵	۱/۵	۰/۱۵	۱۰۰	۵
-۱۹/۸۱	۹/۷۸	-۵/۲۴	۱/۸۳	۰/۵	۰/۲	۱۰۰	۶
-۲۱/۳۴	۱۱/۶۷	-۱/۹۹	۱/۲۶	۱/۵	۰/۱	۱۲۰	۷
-۱۹/۴۷	۹/۴۱	-۳/۹۱	۱/۵۷	۰/۵	۰/۱۵	۱۲۰	۸
-۲۳/۷۰	۱۵/۳۲	-۹/۹۳	۳/۱۴	۱	۰/۲	۱۲۰	۹

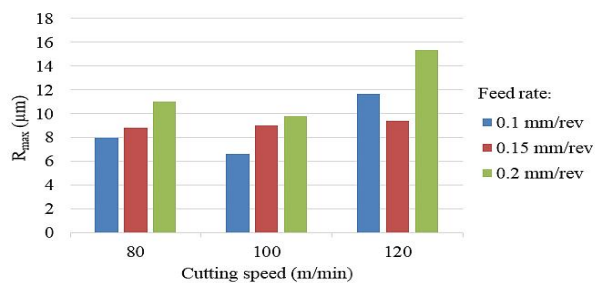


(ب)

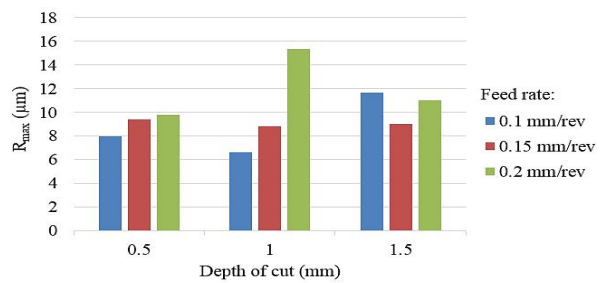


(ف)

شکل (۱): تأثیر پارامترهای ماشین‌کاری بر زبری سطح در معیار R_a .



(ب)



(ف)

شکل (۲): تأثیر پارامترهای ماشین‌کاری بر زبری سطح در معیار R_{max} .

حداقل کردن نرخ پیشروی و حداکثر کردن شعاع نوک ابزار به‌دست آید.

برای به‌دست آوردن پارامترهای بهینه ماشین‌کاری از نسبت S/N حاصل از رابطه (۳) استفاده شده است. مقادیر متوسط نسبت‌های S/N برای هر کدام از سطوح پارامترهای ماشین‌کاری که برای معیارهای R_a و R_{max} محاسبه شده‌اند، در جدول‌های ۶ و ۷ ارائه شده است. شکل‌های ۳ و ۴ نمودار مقادیر متوسط نسبت S/N برای دو معیار زبری سطح را نشان می‌دهند. بر اساس روش تاگوچی، مقادیر حداکثر نسبت S/N برای یک پارامتر ماشین‌کاری، حالت بهینه آن پارامتر را نشان می‌دهد [۲۸]. به این ترتیب، با توجه به جداول و نمودارها، مقادیر بهینه پارامترهای ماشین‌کاری برای هر دو معیار زبری سطح R_a و R_{max} عبارتند از سطح دوم سرعت برشی (۱۰۰ m/min)، سطح اول نرخ پیشروی (۰/۱ mm/rev) و سطح اول عمق برش (۰/۵ mm). هدف از تحلیل ANOVA تعیین میزان تأثیر هر یک از پارامترها بر روی زبری سطح می‌باشد [۲۹]. جدول‌های ۸ و ۹ نتایج مربوط به تحلیل واریانس معیارهای زبری سطح R_a و R_{max} را به ترتیب نشان می‌دهند. با توجه به عدد فیشر F و مقدار درصد تأثیر هر پارامتر بر زبری سطح (ستون آخر)، می‌توان تأثیرگذاری هر یک از پارامترها را بر مشخصه‌ی عملکرد (خروجی) تعیین کرد. معمولاً $F > 4$ در جدول تحلیل واریانس به این معنی است که پارامتر مربوطه تأثیرگذار است [۱۷].

با توجه به جدول ۸ مشاهده می‌شود که پارامترهای سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق برش به ترتیب دارای میزان تأثیرگذاری ۱۰/۷٪، ۸۱/۰۱٪ و ۴/۳۸٪ بر مقدار زبری R_a می‌باشند. به این ترتیب، نرخ پیشروی بیشترین تأثیر را بر زبری سطح R_a دارد. همچنین از این جدول مشخص می‌شود که در محدوده انجام آزمایش‌ها، عمق برش و سرعت برش تأثیر مهمی بر زبری سطح R_a ندارند. تحلیل واریانس زبری سطح R_{max} در جدول ۹ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که سرعت برشی و نرخ پیشروی، پارامترهای تأثیرگذار بر زبری سطح R_{max} هستند و میزان تأثیرگذاری هر یک از پارامترها عبارتند از سرعت برشی ۴۳/۵۲٪، نرخ پیشروی ۳۹/۴۸٪ و عمق برش ۷/۶۵٪. بنابراین سرعت برشی نسبت به نرخ پیشروی تأثیر بیشتری بر روی زبری سطح R_{max} دارد.

با توجه به توضیحات فوق مشخص است که تغییرات زبری سطح بیش از آن که متأثر از تغییرات در عمق برش باشد، از تغییرات نرخ پیشروی و سرعت برشی تأثیر پذیرفته است. این عدم وجود قاعده‌ی مشخص در تغییرات زبری سطح با توجه به تغییرات عمق برش را می‌توان در تحقیقاتی که از طراحی آزمایش استفاده کرده‌اند نیز مشاهده کرد. گونای و یوجل [۲۵] در بررسی تأثیر پارامترهای ماشین‌کاری بر روی زبری سطح با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی، عدم وجود قاعده‌ی مشخص در تغییرات زبری سطح با توجه به تغییرات عمق برش را به نحوه توزیع پیشروی بر اساس طراحی آزمایش مرتبط می‌دانند.

تغییرات زبری سطح با توجه به تغییرات سرعت برشی در شکل‌های ۱-ب و ۲-ب نشان داده شده است. با افزایش سرعت از ۸۰ m/min به ۱۰۰ m/min تغییرات زبری سطح در هر دو معیار R_a و R_{max} با روندی کاهش‌ی مواجه است. این مسئله می‌تواند به علت کاهش اصطکاک بین ابزار و قطعه‌کار و در نتیجه بهبود صافی سطح قطعه ماشین‌کاری شده باشد [۲۶]. با افزایش بیشتر سرعت برشی، به‌علت بالا رفتن دور محور دستگاه و در نتیجه ایجاد لرزش در دستگاه، زبری سطح افزایش می‌یابد. علاوه بر آن در سرعت‌های بالاتر سایش ابزار سریع‌تر اتفاق می‌افتد و این مسئله نیز می‌تواند بر افزایش زبری سطح تأثیرگذار باشد. دیویم^۲ و همکاران [۲۷] نیز به این مسئله اشاره دارند که صلبیت دستگاه، جنس قطعه‌کار، گیره‌بندی ابزار و شرایط کلی ماشین‌کاری بر کیفیت سطح تأثیرگذار هستند. آنها همچنین به رابطه‌ای برای به‌دست آوردن مقدار متوسط زبری سطح R_a اشاره دارند که به صورت زیر می‌باشد:

$$R_a = \frac{0.0321 f^2}{r_e} \text{ [mm]}, \quad (۴)$$

در این رابطه، f نرخ پیشروی و r_e شعاع نوک ابزار می‌باشد. با جایگذاری نرخ پیشروی مختلف و شعاع نوک ابزار در سرعت ۸۰ m/min و عمق برش مختلف، مشاهده می‌شود که نتایج حاصل از این رابطه مطابقت خوبی با نتایج حاصل از آزمایش‌ها دارد (جدول ۵). البته در مورد آخر به‌علت اینکه عمق برش حداکثر است و در این رابطه، عمق برش در نظر گرفته نشده است، تفاوت بیشتر است. این رابطه به خوبی نشان می‌دهد که حداقل ارتفاع ناهمواری‌های سطح ماشین‌کاری شده می‌تواند با

جدول (۵): مقایسه نتایج حاصل از آزمایش و نتایج حاصل از رابطه (۴).

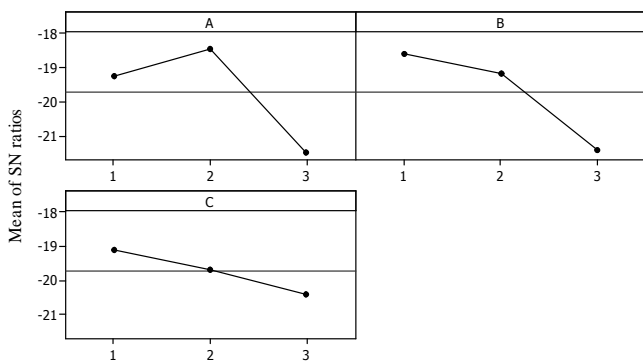
سرعت برشی (m/min)	نرخ پیشروی (mm/rev)	عمق برش (mm)	زبری سطح R_a (μm) حاصل از آزمایش	زبری سطح R_a (μm) حاصل از رابطه (۴)
۸۰	۰/۱	۰/۵	۰/۹۱	۰/۸
۸۰	۰/۱۵	۱	۱/۶۵	۱/۸۱
۸۰	۰/۲	۱/۵	۲/۰۳	۳/۲

جدول (۶): مقادیر متوسط S/N برای معیار زبری سطح R_a .

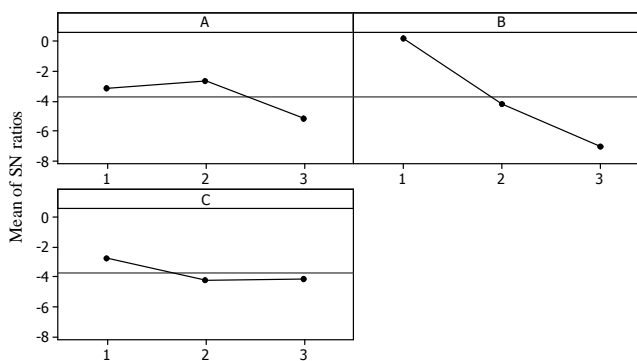
نماد	پارامترهای ماشین کاری	مقدار متوسط نسبت S/N		
		سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
A	سرعت برشی (m/min)	-۳/۱۹۴۸	۰/۱۶۳۸	-۲/۷۵۳۸
B	نرخ پیشروی (mm/rev)	-۲/۶۹۷۹	-۴/۲۰۵۸	-۴/۲۲۰۸
C	عمق برش (mm)	-۵/۲۲۷۸	-۷/۰۷۸۶	-۴/۱۴۵۹

جدول (۷): مقادیر متوسط S/N برای معیار زبری سطح R_{max} .

نماد	پارامترهای ماشین کاری	مقدار متوسط نسبت S/N		
		سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
A	سرعت برشی (m/min)	-۱۹/۲۵	-۱۸/۴۴	-۲۱/۵۱
B	نرخ پیشروی (mm/rev)	-۱۸/۵۹	-۱۹/۱۷	-۲۱/۴۵
C	عمق برش (mm)	-۱۹/۱۰	-۱۹/۶۷	-۲۰/۴۳



Signal-to-noise: Smaller is better



Signal-to-noise: Smaller is better

شکل (۳): نمودار مقادیر متوسط نسبت S/N برای معیار زبری سطح R_a شکل (۴): نمودار مقادیر متوسط نسبت S/N برای معیار زبری سطح R_{max}

جدول (۸): جدول تحلیل واریانس برای نسبت S/N در معیار زبری سطح R_a .

منبع	مجموع مربعات (SS)	درجه آزادی (DF)	میانگین مربعات (MS)	عدد فیشر (F) $\alpha=5\%$	درصد تأثیر (%)
A	۱۰/۵۷۷	۲	۵/۲۸۸	۲/۷۴	۱۰/۷
B	۸۰/۰۱۵	۲	۴۰/۰۰۷	۲۰/۷۶	۸۱/۰۱
C	۴/۳۱۹	۲	۲/۱۶۰	۱/۱۲	۴/۳۸
خطا	۳/۸۵۴	۲	۱/۹۲۷		۳/۹
مجموع	۹۸/۷۶۵	۸			۱۰۰

جدول (۹): جدول تحلیل واریانس برای نسبت S/N در معیار زبری سطح R_{max} .

منبع	مجموع مربعات (SS)	درجه آزادی (DF)	میانگین مربعات (MS)	عدد فیشر (F) $\alpha=5\%$	درصد تأثیر (%)
A	۱۵/۱۳۷	۲	۷/۵۶۹	۴/۶۸	۴۳/۵۲
B	۱۳/۲۲۳	۲	۶/۸۶۲	۴/۲۴	۳۹/۴۸
C	۲/۶۶۲	۲	۱/۳۳۱	۰/۸۲	۷/۶۵
خطا	۳/۲۳۵	۲	۱/۶۱۸		۹/۳۵
مجموع	۳۴/۷۵۸	۸			۱۰۰

۵- تست تأیید

پس از تعیین پارامترهای بهینه ماشین‌کاری، آخرین قدم در روش تاگوچی، انجام تست‌های تأیید با استفاده از پارامترهای بهینه و سپس مقایسه آنها با مقادیر پیش‌بینی شده می‌باشد. به این ترتیب در این تحقیق، یک مرحله ماشین‌کاری با پارامترهای بهینه به انجام رسید و زبری سطح حاصل از آن ثبت و با استفاده رابطه (۵) S/N مربوط به آن اندازه‌گیری شد. همچنین به کمک رابطه‌های (۵) و (۶) [۲۵] به ترتیب مقادیر زبری سطح و نسبت سیگنال به نویز (S/N) مربوط به آن در پارامترهای بهینه تعیین شده توسط روش تاگوچی، محاسبه می‌شوند تا در مرحله بعد نتایج پیش‌بینی شده با مقادیر حاصل از تست تجربی مقایسه شوند.

$$R_{Cal} = 10^{-\eta_{cal}/20}, \quad (5)$$

$$\eta_{cal} = \bar{\eta}_m + (\bar{\eta}_A - \bar{\eta}_m) + (\bar{\eta}_B - \bar{\eta}_m) + (\bar{\eta}_C - \bar{\eta}_m), \quad (6)$$

که در آن، R_{Cal} پارامتر زبری سطح، η_{cal} مقدار S/N محاسبه شده در پارامترهای بهینه ماشین‌کاری، $\bar{\eta}_m$ مقدار متوسط نسبت‌های S/N تمامی آزمایش‌ها، $\bar{\eta}_A$ مقدار متوسط نسبت‌های S/N وقتی که پارامتر A سطح بهینه باشد، $\bar{\eta}_B$ مقدار متوسط نسبت‌های S/N وقتی که پارامتر B سطح بهینه باشد، $\bar{\eta}_C$ مقدار متوسط نسبت‌های S/N وقتی که پارامتر C سطح بهینه باشد، می‌باشند.

اختلاف بین نتایج تجربی و مقادیر پیش‌بینی شده تا جایی قابل قبول می‌باشد که در بازه اطمینان^۱ قرار بگیرد. بازه اطمینان به صورت زیر محاسبه می‌شود [۳۰]:

$$CI = \sqrt{F_{\alpha;1,f_e} \times V_e \times \left[\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{r} \right]}, \quad (7)$$

$$n_{eff} = \frac{N}{1 + v_T}, \quad (8)$$

که در آن، $F_{\alpha;1,f_e}$ ، F-ratio در سطح اطمینان $1-\alpha$ (۰.۹۵) در درجه آزادی ۱ و درجه آزادی خطا f_e ، V_e واریانس خطا، n_{eff} تعداد

آزمایش‌های مؤثر، N تعداد کل آزمایش‌های انجام شده، v_T مجموع درجات آزادی فاکتورهای استفاده شده در فرآیند پیش‌بینی و r تعداد تست‌های تأیید می‌باشند. در این تحقیق یک تست تأیید ($r = 1$) در پارامترهای بهینه به انجام رسید. مقدار بازه اطمینان (CI) برای دو پارامتر زبری سطح R_a و R_{max} با توجه به رابطه‌های (۷) و (۸) به ترتیب $۷/۴۳$ dB و $۶/۸۲$ می‌باشند. در نتیجه مقادیر نسبت S/N حاصل از تست تأیید باید در بازه $۶/۸۲$ - $۸/۶۵$ dB برای R_a و $۱۱/۲۸$ - $۲۴/۹۲$ dB برای R_{max} قرار گیرد.

جدول ۱۰ مقایسه بین مقادیر محاسبه شده پارامترهای زبری سطح و نسبت‌های S/N مربوط به آنها و نتایج حاصل از تست تأیید را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود تطابق خوبی بین مقادیر واقعی زبری سطح و مقادیر پیش‌بینی شده در پارامترهای بهینه ماشین‌کاری وجود دارد. دیده می‌شود که مقادیر نسبت S/N مربوط به تست تأیید برای هر دو پارامتر R_a و R_{max} در بازه اطمینان قرار دارند.

به منظور ارزیابی میزان بهبود زبری سطح به دست آمده در تست تأیید در مقایسه با آزمایش‌های اولیه (۹ آزمایش تاگوچی)، مقایسه‌ای بین نتایج یکی از این آزمایش‌های اولیه (یعنی پارامترهای A1 B2 C2) و تست تأیید انجام شده است (جدول ۱۰). نتایج نشان می‌دهد که هر دو پارامتر زبری سطح به دست آمده در پارامترهای بهینه ماشین‌کاری مقادیر کمتری را نسبت به ماشین‌کاری در پارامتر اولیه دارند. البته زبری سطح پارامتر R_a با بیش از ۵۰٪ کاهش، بهبود بیشتری داشته است.

۶- نتیجه‌گیری

تأثیر پارامترهای ماشین‌کاری (سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق برش) بر زبری سطح در ماشین‌کاری سوپرآلیاژ پایه آهن-نیکل N-155 به‌طور تجربی مورد بررسی قرار گرفت. برای طراحی آزمایش از روش تاگوچی و برای تعیین پارامترهای بهینه و مؤثر از روش تحلیل آماری نسبت سیگنال به نویز و تحلیل واریانس، کمک

- گرفته شد. نتایج به دست آمده را می توان به صورت زیر خلاصه کرد:
- روند تغییرات میزان زبری سطح در هر دو معیار R_a و R_{max} نسبت به افزایش نرخ پیشروی صعودی است.
 - با افزایش سرعت برشی، زبری سطح ابتدا کاهش و سپس به دلیل افزایش ارتعاشات دستگاه با افزایش بیشتر سرعت و همچنین افزایش سایش ابزار، افزایش پیدا می کند.
 - تغییرات زبری سطح با توجه به تغییرات عمق برش به دلیل تغییرات در نرخ پیشروی با توجه به طراحی آزمایش، از روند مشخصی پیروی نمی کند.
 - نرخ پیشروی بیشترین تأثیر ($0.1/0.1$) را بر زبری سطح R_a و سرعت برشی بیشترین تأثیر ($0.43/0.52$) را بر زبری سطح R_{max} دارد.
- سطح دوم سرعت برشی (100 m/min)، سطح اول نرخ پیشروی (0.1 mm/rev) و سطح اول عمق برشی (0.5 mm) مقادیر بهینه پارامترهای ماشینکاری برای حداقل کردن میزان زبری در هر دو معیار R_a و R_{max} می باشند.
- نتایج تست تأیید در پارامترهای بهینه و مقایسه آن با یکی از آزمایش ها در پارامترهای اولیه نشان می دهد که تطابق خوبی بین مقادیر واقعی زبری سطح و مقادیر پیش بینی شده وجود دارد. همچنین بر اساس تست تأیید هر دو پارامتر زبری سطح حاصل از فرآیند ماشین کاری در پارامترهای بهینه، نسبت به آزمایش اولیه بهبود یافته اند.

جدول (۱۰): نتایج تست تأیید.

بهبود خصوصیت عملکردی (%)	آزمایش اولیه A1 B2 C2	پارامترهای بهینه ماشین کاری A2 B1 C1			خصوصیت عملکردی
		اختلاف	تجربی	پیش بینی	
۵۰/۳۰	۱/۶۵	-۰/۰۵	۰/۸۲	۰/۸۷	زبری سطح R_a (μm)
۱۳۹/۶۱	-۴/۳۴۹	۰/۴۹۴	۱/۷۲۳	۱/۲۲۹	نسبت S/N برای R_a (dB)
۸/۰۴	۸/۸۳	۰/۰۹	۸/۱۲	۸/۰۳	زبری سطح R_{max} (μm)
۳/۹۱	-۱۸/۹۱	-۰/۰۷	-۱۸/۱۷	-۱۸/۱۰	نسبت S/N برای R_{max} (dB)

Materials Proc. Tech., Vol. 77, No. 1, pp. 278-284, 1998.

6. Handbook, A.M. "Desk edition", ASM Int., Metals Park, Ohio, USA, 1998.
7. Ulutan, D. and Ozel, T. "Machining Induced Surface Integrity in Titanium and Nickel Alloys: a Review", Int. J. Machine Tools and Manufacture, Vol. 51, No. 3, pp. 250-280, 2011.
8. Arunachalam, R., Mannan, M., and Spowage, A. "Residual Stress and Surface Roughness When Facing Age Hardened Inconel 718 with CBN and Ceramic Cutting Tools", Int. J. Machine Tools and Manufacture, Vol. 44, No. 9, pp. 879-887, 2004.
9. Pawade, R., Joshi, S.S., Brahmanekar, P. and Rahman, M. "An Investigation of Cutting Forces and Surface Damage In High-Speed Turning of Inconel 718", J. Materials Proc. Tech., Vol. 192, pp. 139-146, 2007.
10. Pusavec, F., Hamdi, H., Kopac, J. and Jawahir, I. "Surface integrity in Cryogenic Machining of Nickel based alloy—Inconel 718", J. Materials Proc. Tech., Vol. 211, No. 4, pp. 773-783, 2011.

۷- تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله وظیفه خود می دانند از مهندس عرب عامری مدیرعامل محترم شرکت تجربه نور و مهندس زمانی مدیرعامل محترم شرکت ریخته گری دقیق پارس برای در اختیار قرار دادن مواد اولیه سپاسگزاری نمایند.

۸- مراجع

1. Donachie, M.J. "Superalloys: a Technical Guide", ASM Int., 2002.
2. Davis, J.R. "Alloying: Understanding the Basics", ASM Int., 2001.
3. Campbell, F.C. "Manufacturing Tech. for Aerospace Structural Materials", Elsevier Amsterdam, the Netherlands, 2006.
4. Krain, H., Sharman, A., and Ridgway, K. "Optimisation of Tool Life and Productivity When end Milling Inconel 718TM", J. Materials Proc. Tech., Vol. 189, No. 1, pp. 153-161, 2007.
5. Choudhury, I. and El-Baradie, M. "Machinability of Nickel-Base Super Alloys: a General Review", J.

20. Asiltürk, İ. and Akkuş, H. "Determining the Effect of Cutting Parameters on Surface Roughness in Hard Turning Using the Taguchi method", *Measurement*, Vol. 44, No. 9, PP.1697-1704, 2011.
21. Coromant, S. "Turning tools", Sweden, 2012.
22. Cetin, M.H., Ozcelik, B., Kuram, E. and Demirbas, E. "Evaluation of Vegetable Based Cutting Fluids With Extreme Pressure And Cutting Parameters in Turning of AISI 304L by Taguchi Method", *J. Cleaner Production*, Vol. 19, No.17, PP. 2049-2056, 2011.
23. Moghanizadeh, A., Honarvar, F., Ghoreishi, M. and Ghajar, R. "An Investigation of the Parameters Affecting The Quality of Resistance Spot Welds In Low Carbon Steel Sheets", *Aerospace Mechanics Journal*, Vol. 7, No.2, pp.1-10, 2011. (In Persian)
24. Che-Haron, C. "Tool Life and Surface Integrity in Turning Titanium Alloy", *J. Materials Proc. Tech.*, Vol. 118, No. 1, pp. 231-237, 2001.
25. Günay, M. and Yücel, E. "Application of Taguchi Method for Determining Optimum Surface Roughness in Turning of high-alloy White Cast Iron", *Measurement*, 2012.
26. Razfar, M. "principles of Machining", Amirkabir University of Tech., 2006. (in persian)
27. Davim, J.P. "Surface Integrity in Machining", Springer, 2009.
28. Taguchi, G. and Jugulum, R. "The Mahalanobis-Taguchi Strategy: A Pattern Tech. System", Wiley, 2002.
29. Nategh, M., Amini, S., Soleimanimehr, H., Abdullah, A., and Sadeghi, M. "A Machining Force Model Developed for Ultrasonic Vibration-Assisted Turning, Through Statistical Analysis of Influential Parameters", *Aerospace Mechanics Journal.*, Vol. 4, No.4, pp.83-91, 2009. (In Persian)
30. Belavendram, N. "Quality by Design", Prentice Hall New York, 1995.
11. Zhou, J., Bushlya, V., and Stahl, J. "An investigation of Surface Damage in the High Speed Turning of Inconel 718 with use of Whisker Reinforced Ceramic tools", *J. Materials Proc Tech.*, Vol. 212, No.2, pp. 372-384, 2012.
12. ISO468 "Surface Roughness Parameters, Their Values and General Rules for Specifying Requirements", 1998.
13. Mirzalou, V. and Ghoreyshi, M. "Quality Improvement of Surfaces Machined by Wire Electrical Discharge Process Through Sand Blasting", *Aerospace Mechanics Journal*, Vol. 4, No.3, pp.1-15, 2008. (in persian)
14. Lin, T-R. "Optimisation Technique For Face Milling Stainless Steel With Multiple Performance Characteristics", *The Int. J. Advanced Manufacturing Tech.*, Vol. 19, No. 5, pp.330-335, 2002.
15. Zhang, J.Z., Chen, J.C. and Kirby, E.D. "Surface Roughness Optimization in an end-milling operation Using the Taguchi Design Method", *J. Materials Proc. Tech.*, Vol. 184, No. 1, pp.233-239, 2007.
16. Gologlu, C. and Sakarya, N. "The Effects of Cutter Path Strategies on Surface Roughness of Pocket Milling of 1.2738 Steel Based on Taguchi Method", *J. Materials Proc Tech.*, Vol. 206, No. 1, pp.7-15, 2008.
17. Yang, W. and Tarng, Y. "Design Optimization of Cutting Parameters for Turning Operations Based on the Taguchi Method", *J. Materials Proc. Tech.*, Vol. 84, No. 1, pp.122-129, 1998.
18. Kolahan, F. and Bakhtyari, M. " Investigation of Machining of Inconel 718 Superalloy Using Taguchi Method", the Third Manufacturing Eng. Con, 2011. (In Persian)
19. Nalbant, M., Gökkaya, H. and Sur, G. "Application of Taguchi Method in the Optimization of Cutting Parameters for Surface Roughness in Turning", *Materials & design*, Vol. 28, No. 4, pp. 1379-1385, 2007.