



Experimental Investigation of The Effect of Changes in the Machining Parameters of the Turn-Milling Process



ARTICLE INFO

Authors

Amini S^{1*},
saebi rad R²

¹ Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Kashan, kashan, Isfahan, Iran

² PHD Student, Faculty of Mechanical Engineering, University of Kashan, kashan, Isfahan, Iran

* Correspondence

Address: Faculty of Mechanical Engineering, University of Kashan, kashan, Isfahan, Iran
amini.s@kashanu.ac.ir

How to cite this article

Amini S, saebi rad R. Experimental Investigation of The Effect of Changes in the Machining Parameters of the Turn-Milling Process. Proceedings of 3rd Iranian National Conference on Advanced Machining and Machine Tools (CAMMT). 2023;23(10):43-49

ABSTRACT

Turn-milling is a new process that uses, turning and milling operations together, so that the tool and the work piece rotate simultaneously, for this reason, it has a wide ability in machining curved and complex surfaces. The Main subject of this research is Conducting research on the effect of changes in machining parameters, including work piece rotational speed, tool rotational speed and feed rate, on cutting parameters such as cutting force, cutting pressure, and surface finish parameters. The order and the number of experiments is designed based on the full factorial method. Experiments for each of the mentioned parameters were performed at three levels, which includes 27 tests in total. The results were analyzed with the help of Minitab software. The mentioned process was performed with a $\phi 6$ diameter end mill on a steel work piece 1.7225. As a result, increasing feed rate by three times increases the machining force by about two times and reduces the cutting pressure by about 27%, Also, the surface finish quality parameters R_a and R_z increased by 74% and 61%, respectively. The upward or downward trend of cutting forces, cutting pressure and the surface finish quality did not occur with the increase in the rotational speed of the work piece and the rotational speed of the tool, in fact, an extremum range was achieved in the increasing trend of the mentioned speeds. So that the minimum resultant force and also the cutting pressure were observed in the range of rotational speed of 950rpm of the tool and 300rpm of the work piece.

Keywords Turn-Milling, Cutting Pressure, Surface Finish, Cutting Force

ماهنامه علمی مهندسی مکانیک مدرس، ویژه نامه مجموعه مقالات سومین کنفرانس ملی ماشین‌کاری و ماشین‌های ابزار پیشرفته
مهر ۱۴۰۲، دوره ۲۳، شماره ۱۰، صفحه ۴۳-۴۹



بررسی تجربی اثر تغییرات پارامترهای ماشین‌کاری فرآیند فرز تراش



چکیده

فرز-تراش فرآیند جدیدی است که از دو عملیات تراش کاری و فرزکاری بهره می‌برد بدینگونه که بطور همزمان ابزار و قطعه کار دوران می‌کنند و به همین دلیل توانایی گسترده‌ای در ماشین‌کاری سطوح منحنی و پیچیده را دارا می‌باشد. بررسی اثر تغییرات پارامترهای مستقل ماشین‌کاری شامل سرعت دورانی قطعه کار، سرعت دورانی ابزار و نرخ پیشروی ابزار، بر پارامترهای وابسته برش همچون نیرو، فشار برش و زبری سطح ماشین‌کاری شده موضوع اصلی پژوهش حاضر است. ترتیب انجام و همچنین تعداد آزمایش‌ها، بر اساس روش فاکتوریل کامل طراحی شده است. آزمایش‌ها برای هرکدام از پارامترهای ذکر شده در سه سطح انجام شده که مجموعاً شامل ۲۷ آزمایش است. نتایج حاصله به کمک نرم افزار مینی‌تیب مورد بررسی قرار گرفت. فرآیند فرز-تراش با ابزار فرز انگشتی قطر $\phi 6$ بر روی قطعه فولادی 1/7225 انجام شد. نتیجه آنکه، افزایش سه برابری نرخ پیشروی ابزار، نیروی برآیند ماشین‌کاری را تا حدود دو برابر افزایش داده و فشار برش را تا حدود ۲۷ درصد کاهش می‌دهد، همچنین پارامترهای کیفیت سطح R_a و R_z به ترتیب برابر ۷۴ و ۶۱ درصد افزایش یافت. روند کاملاً صعودی یا نزولی نیروهای برشی، فشار برش و همچنین کیفیت سطح ماشین‌کاری شده با افزایش سرعت دورانی قطعه کار و سرعت دورانی ابزار رخ نداده و یک محدوده اکسترمم در روند افزایشی سرعت‌های مذکور محقق شده است. بطوریکه حداقل نیروی برآیند برش و همچنین فشار برش در محدوده سرعت دورانی 950rpm ابزار و 300rpm قطعه کار مشاهده شد.

مشخصات مقاله

نویسنده

سعید امینی^{۱*}
رضا صائبی راد^۲

^۱ استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، اصفهان، ایران
^۲ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، اصفهان، ایران

* نویسنده مسئول

آدرس: استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، اصفهان، ایران
amini.s@kashanu.ac.ir

کلیدواژه‌ها فرز-تراش، فشار برش، کیفیت سطح، نیروهای ماشین‌کاری

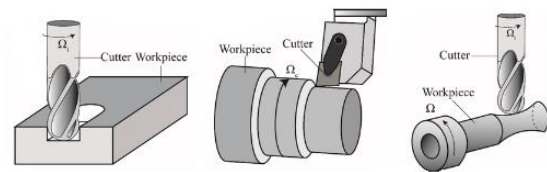
۱- مقدمه

فرآیند فرز-تراش شامل عملیات فرزکاری همراه با دوران قطعه-کار (استوانه‌ای) می‌باشد. شکل ۱ انواع حالت‌های فرآیند فرز-تراش را در مقایسه با فرآیندهای تراش کاری و فرزکاری سنتی نشان می‌دهد.



(ب)

(الف)



(ه)

(د)

(ج)

شکل ۱) نمایش فرآیند (الف) فرز-تراش مماسی (ب) فرز-تراش هم-محور (ج) فرز-تراش متعامد (د) تراش کاری (ه) فرزکاری [1,7]

مطابق شکل ۱ (الف) حالت مماسی فرآیند فرز-تراش نمایش داده شده است. در این حالت سطح پیرامون ابزار مماس بر سطح قطعه‌کار بوده و بطور همزمان محور ابزار نیز عمود بر محور قطعه‌کار می‌باشد، در این طرح، باردهی ابزار در امتداد شعاع ابزار انجام می‌شود. حالت فرز-تراش هم‌محور نیز در شکل ۱ (ب) مشاهده می‌گردد. در این حالت محور ابزار با محور قطعه‌کار موازی می‌باشد، این حالت برای انجام فرآیند داخل تراشی توصیه شده است. شکل ۱ (ج) حالت عمودی فرآیند فرز-تراش را نشان می‌دهد که در این حالت محور ابزار عمود بر محور قطعه-کار بوده و باردهی ابزار در امتداد محور ابزار صورت می‌پذیرد. صرفنظر از اینکه فرآیند ماشین‌کاری مماسی یا متعامد یا هم-محور باشد، برای حالتی که ماشین پایه، فرز بوده باشد، به آن فرز-تراش اطلاق می‌گردد [1]. در این فرآیند قطعه‌کار و ابزار بطور همزمان در حال دوران می‌باشند بررسی و نتایج گذشته نشان داده است که کیفیت قطعات به روش فرز-تراش مماسی بهتر از قطعات ماشین‌کاری شده نسبت به دو روش دیگر می‌باشد [2].

در سال ۱۹۹۴ شالز و همکاران، اثر فرآیند فرز-تراش هم‌محور بر روی قطعه‌کار متقارن فولادی ۱/۷۱۳۱ را بررسی کردند. در این تحقیق از ابزار CBN استفاده گردید و نتایج حاکی از آن بود که این فرآیند برای ماشین‌کاری قطعات سخت کاری شده متقارن مناسب می‌باشد و می‌توان به کیفیت سطح کمتر از ۲ میکرون نیز دست یافت. از دیگر مزایای آن می‌توان به استرس حرارتی

کم برای لبه برنده ابزار، دفع بهتر براده‌ها و در نتیجه افزایش عمر ابزار نسبت به تراش کاری معمولی نام برد [3].

در سال ۱۹۹۷ کوپک^۱ و همکاران به تحقیق در مورد مقایسه صافی سطح فرآیند فرز-تراش متعامد در دو حالتی که محور ابزار واقع در محور قطعه‌کار و خارج از محور مرکز قطعه‌کار بود پرداختند. نتایج نشان داد زمانی که محور مرکزی ابزار خارج از محور مرکز قطعه‌کار بود، کیفیت از حالتی که محور مرکزی ابزار عمود بر محور مرکزی قطعه‌کار بود، بیشتر است و نیز هرچه سرعت دورانی ابزار برشی بیشتر از قطعه‌کار باشد کیفیت سطح افزایش پیدا کرده و به همین دلیل خنک کاری ابزار بهتر انجام شده که کاهش نیروی ماشین‌کاری و افزایش عمر ابزار را در پی دارد. ابزار استفاده شده در این پژوهش به دلیل ارتعاشات بالایی که بر اثر برخورد ابزار و قطعه‌کار رخ می‌دهد، از مقاومت استاتیکی بالایی برخوردار باشد که در این تحقیق از ابزار کف‌تراش اینسرت‌خور با زاویه برش ۱۵ درجه استفاده شده است [4].

در سال ۲۰۰۷ ساواس^۲ و اووزه^۳ به ارزیابی عملکرد فرز-تراش مماسی بر روی فولاد ۱۰۵۰ پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که عملکرد فرز-تراش مماسی در حالتی که ابزار و قطعه‌کار عمود بر هم باشند مناسب‌ترین حالت فرز-تراش بوده و از نظر اقتصادی نیز مقرون به صرفه می‌باشد به این دلیل که کیفیت سطح بسیار بهتر از تراش کاری سنتی و فرز-تراش هم‌محور است، به خصوص اینکه می‌توان با محاسبه سرعت برشی مناسب، کیفیت سطح را به حدی ارتقا داد که به کیفیت سطح به دست‌آمده در سنگ‌زنی رسید و می‌توان عملیات سنگ‌زنی و پرداخت نهایی سطح را حذف کرد. همچنین براده‌های به دست آمده از ماشین‌کاری مماسی بسیار کوچک‌تر از تراش کاری سنتی و فرز-تراش هم‌محور می‌باشد [5].

در سال ۲۰۲۰ ژنگ^۴ و همکاران به تحقیق بر روی پدیده چتر پرداختند. یافته‌های پژوهش ایشان نشان داد که پدیده چتر در ماشین‌کاری به روش فرز-تراش به نسبت روش‌های سنتی تراش کاری و فرزکاری به نسبت قابل توجهی هم در ابزار و هم در قطعه‌کار کاهش یافته است که این فرآیند را قادر به ماشین‌کاری موادی با سختی بالا می‌کند و همچنین باعث افزایش طول عمر ابزار می‌گردد [6].

به عنوان یک جمع بندی اجمالی، فرآیند فرز-تراش و بهبود پارامترهای ماشین‌کاری برای جنس قطعه کارهای مختلف هنوز مورد توجه محققین قرار دارد، لذا در این تحقیق به بررسی تاثیر پارامترهای ماشین‌کاری فرآیند فرز-تراش، بر نیرو، فشار برش و کیفیت سطح قطعه‌کار فولادی ۱/۷۲۲۵ پرداخته می‌شود. بدلیل طیف گسترده استفاده از فولاد آلیاژی ۱/۷۲۲۵ در صنعت، این ماده‌کار بعنوان جنس مورد بررسی در فرآیند فرز-تراش انتخاب شده است.

Kopac¹
savas²
ozay³
zheng⁴

۲- آماده سازی فرآیند ۲-۱- جنس ماده کار مورد آزمایش

فولاد کم آلیاژ ۱/۷۲۲۵ با نام تجاری Mo40 که در استاندارد AISI به فولاد ۴۱۴۰ معروف است، از آلیاژ کروم نیکل می باشد. این فولاد به دلیل وجود کروم، ترد و شکننده بوده که برای پیشگیری از این خاصیت به آن عنصر نیکل اضافه شده است. عناصر آلیاژی این فولاد در جدول ۱ ارائه شده است [7].

جدول (۱) جدول ترکیبات شیمیایی فولاد آلیاژی ۱/۷۲۲۵ [7]

%Mn	%Si	%C
0.6-0.9	0.4	0.45-0.38
%Mo	%Cr	%S
0.15-0.3	0.9-1.2	0.035

مطابق با جدول ۱ فولاد آلیاژی مذکور علاوه بر کربن ۰.۹-۱.۲ درصد عنصر کروم دارد که موجب افزایش مقاومت در برابر برش و سایش می گردد. فولاد آلیاژی ۱/۷۲۲۵ دارای خواص و کاربردهای فراوان در صنعت می باشد که منجمه می توان به ساخت غلطک- های صنایع فولاد، شاتون ها، انواع چرخنده ها، محورهای خودرو، دنده فرمان، پیچ های مقاوم و انواع متنوع مخازن تحت فشار اشاره کرد. مشخصات فیزیکی و مکانیکی نمونه های رایج فولاد آلیاژی ۱/۷۲۲۵ در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول (۲) مشخصات فیزیکی و مکانیکی فولاد آلیاژی ۱/۷۲۲۵ [7]

تنش تسلیم	دمای آئیل	استحکام کششی
650-950 MPa	800-850 °C	900-1300 MPa
افزایش طول	انرژی ضربه	سختی
10-12 %	J30-35	197HB

نمونه های فولادی ۱/۷۲۲۵ مورد آزمایش با قطر ماده خام $\phi 20$ تهیه شده است. در جدول ۳ نتیجه کشش و سختی سنجی ارائه شده است.

جدول (۳) گزارش آزمایشگاه مقاومت مصالح برای سختی سنجی و کشش نمونه فولاد ۱/۷۲۲۵ [8]

Test duration [sec]	Yield stress [Kgf/cm ²]	Elongation [%]	Hardness [HRC]
24	7400	6	30.2
Cross section [mm ²]	Maximum force [N]	Maximum stress [Kgf/cm ²]	
314.16	33197	10566.9	

آزمون سختی سنجی بر اساس معیار راکول سی با مشخصه مخروط 120 درجه و تحت اعمال بار 150Kg اجرا شده و مقادیر سختی به ترتیب 30.6HRC , 29.7HRC , 30.3HRC برای مرکز، وسط و پیرامون قطعه نمونه حاصل شده است. [8].

۲-۲- ابزار ماشین کاری و تعیین حدود پارامترهای برشی

یکی از مهمترین پارامترها در انجام پژوهش های ماشین کاری، ابزار برشی است. پارامترهایی همچون نوع ابزار، جنس ابزار، نوع پوشش ابزار، تعداد لبه های برشی و همچنین هندسه لبه های برش ابزار تاثیر قابل ملاحظه ای در حدود نیروهای ماشین کاری و

کیفیت سطح برش دارد. در شکل ۲ ابزار فرز کارباید قطر $\phi 6\text{mm}$ با پوشش WC-TiAlN و کد فنی YU954-D6L75 ساخت شرکت YU تایوان، که برای انجام مجموعه آزمایش ها به کار گرفته شده، نمایش داده شده است. ابزار مذکور چهار پر بوده و دارای زاویه ماریچ 35 درجه و طرح پیشانی تخت می باشد. مطابق کاتالوگ شرکت YU این ابزار گزینه مناسب برای ماشین کاری فولادهای آلیاژی تا سختی 45HRC می باشد [9].



شکل (۲) فرز کارباید قطر $\phi 6\text{mm}$ با پوشش WC-TiAlN و کد فنی YU954-D6L75 ساخت شرکت YU تایوان [9]

حدود پارامترهای ماشین کاری فرآیند فرز-تراش در جدول ۴ ارائه شده است. نظر به محدودیت تجهیزات موجود در کارگاه و ناشناخته بودن فرآیند فرز-تراش و همچنین پیرو تست های اولیه ماشین کاری انجام شده، حدود پارامترهای ماشین کاری شامل سرعت دورانی قطعه کار، سرعت دورانی ابزار و همچنین نرخ پیشروی ابزار در سه سطح انتخاب شده است.

جدول (۴) پارامترهای ماشین کاری در فرآیند فرز-تراش. قطر قطعه کار $\phi 19$ و قطر ابزار $\phi 6$

حدود پارامترهای مورد استفاده در فرآیند فرز-تراش		
نرخ پیشروی ابزار a_f	سرعت دورانی ابزار n_r	سرعت دورانی قطعه کار n_w
[mm/min]	[rpm]	[rpm]
22,36,63	565,950,1500	100,300,600

۲-۳- تجهیزات آزمون

دستگاه فرز انیورسال مورد استفاده از نشان تجاری لوان مدل ZXZ 6350 ZA ساخت کشور چین است. حداکثر سرعت دورانی قابل حصول با این ماشین 1500 rpm می باشد. این فرز مجهز به خط کش دیجیتال و نمایشگر حرکت محورها بوده است. با داشتن قابلیت نمایش حرکت محورها، دقت حرکتی محورها در سه راستای X,Y,Z تضمین شده و بدین ترتیب آزمایش ها با دقت قابل قبولی اجرا می گردد. حداقل سرعت پیشروی میز فرز 22 mm/min بوده و این محدودیت در انتخاب حد پایین نرخ پیشروی ابزار اعمال گردیده است.

در این پژوهش دستگاه پایه، فرز انیورسال بوده و برای دوران قطعه- کار، یک مکانیزم مستقل و دقیق طراحی و ساخته شده است. موتور صنعتی سه فاز بکار رفته در مکانیزم تراش دارای توان 1.5 کیلووات بوده و برای کنترل تعداد دوران از اینورتر استفاده شده است. این موتور توانائی ارائه سرعت دورانی حداکثر 1500 دور در دقیقه در جریان 50 هرتز را دارا می باشد. برای ایجاد سرعت دورانی دلخواه با استفاده از اینورتر، جریان ورودی موتور تغییر داده می شود. این مکانیزم که شامل یک الکتروموتور و سه نظام می باشد از طریق تجهیزات دینامومتری به میز فرز نصب شده است. بدین ترتیب سرعت پیشروی میز دستگاه فرز از دوران ابزار مستقل بوده و با

تغییر سرعت دوران قطعه کار، سرعت پیشروی ابزار تاثیر نمی پذیرد (شکل ۳).



شکل ۳) نحوه اتصال مکانیزم تراش ساخته شده بر روی میز فرز

شده است. مقدار عددی نرخ برداشت براده Z_w با واحد میلیمتر مکعب بر دقیقه برای حصول مقدار عددی فشار برش لازم بوده و در یک ستون مستقل ارائه شده است. موارد مذکور در محیط نرم افزار اکسل و مطابق فرمول های زیر محاسبه شده است [11]:

$$\begin{aligned} V_w &= (\pi \cdot D_w \cdot n_w) / 1000 & (1) & \text{سرعت خطی قطعه کار} \\ V_t &= (\pi \cdot D_t \cdot n_t) / 1000 & (2) & \text{سرعت خطی ابزار} \\ V_r &= \sqrt{V_t^2 + V_w^2} & (3) & \text{سرعت برآیند برش} \\ \alpha &= \tan^{-1} \left(\frac{V_w}{V_t} \right) \times \frac{180}{\pi} & (4) & \text{زاویه بردار سرعت برآیند با امتداد محور قطعه کار} \\ f &= a_f / (n_w + n_t) & (5) & \text{پیشروی به ازای هر دور ابزار} \\ f_t &= f / 4 & (6) & \text{پیشروی به ازای هر لیه برشی ابزار} \\ Z_w &= (V_r \times a_f \times a_p) \times 1000 & (7) & \text{نرخ برداشت براده} \end{aligned}$$

در روابط فوق D_w قطر قطعه کار، D_t قطر ابزار است، که به ترتیب ۱۹ و ۶ میلیمتر انتخاب شده است.

جدول ۵) مقدار و ترتیب تنظیم پارامترهای ماشین کاری طبق روش فاکتوریل کامل با ترتیب انجام رندوم مطابق با نرم افزار مینی تب

RunOrder	StdOrder	n_w [rpm]	n_t [rpm]	a_f [mm/min]	a_p [mm]	V_t [m/min]
1	T11	300	565	36	0.25	10.64
2	T27	600	1500	63	0.25	28.26
3	T12	300	565	63	0.25	10.64

Continued

Run order	[m/min] V_w	[m/min] V_r	α [°]	f [mm/rev]	[mm/t] f_t	Z_w [mm ³ /min]
1	17.898	20.824	59.289	0.042	0.010	216.668
2	35.796	45.607	51.736	0.030	0.008	342.051
3	17.898	20.824	59.289	0.073	0.018	379.168

Continued

۳- نتایج و بحث

مطابق با جدول ۵ و بر اساس رویه پیشنهادی نرم افزار مینی تب، تنظیم پارامترهای ماشین کاری انجام شده و فرآیند فرز-تراش اجرا شده است. در جدول ۶ مقادیر نیروهای ماشین کاری F_x , F_y , F_z ، قرائت شده از دینامومتر ارائه شده است. مقدار نیروی برآیند F_r و فشاربرش P_s برای هر ردیف آزمایش مطابق فرمول های زیر محاسبه شده است [12]:

$$\begin{aligned} F_r &= \sqrt{(F_x^2 + F_y^2 + F_z^2)} & (8) & \text{نیروی برآیند برش} \\ P_s &= \frac{P}{Z_w} = \frac{F_x(V_r \cdot \cos \alpha + a_f \times 1000/n) + F_z(V_r \cdot \sin \alpha)}{Z_w} & (9) & \text{فشار برش} \end{aligned}$$

در روابط فوق P توان برش، Z_w نرخ برداشت براده و P_s معرف فشار برش است.

همچنین زبری سطوح ماشین کاری شده قطعات که با پارامترهای R_a , R_z ارزیابی می شوند، در دو ستون مستقل از جدول ۶ ارائه شده است.

۴-۲ طراحی آزمایش

در این پژوهش اثر تغییرات سه پارامتر سرعت دورانی قطعه کار n_w ، سرعت دورانی ابزار n_t و نرخ پیشروی ابزار a_f ، هر کدام در سه سطح مختلف بر نیروهای برشی F_x , F_y , F_z ، فشار برش P_s و کیفیت سطح R_a , R_z بررسی شده است. روش مورد آزمون برای طراحی تعداد آزمایش ها و همچنین ترتیب انجام آزمایش ها روش فاکتوریل کامل بوده است. بر اساس این روش تعداد $3^3 = 27$ آزمایش و به ترتیب مندرج در جدول ۶ اجرا گردیده است. مطابق دستورالعمل روش فاکتوریل کامل ترتیب انجام آزمایش های مذکور بصورت رندوم بوده و در نرم افزار مینی تب اجرا شده است. پارامتر عمق برش a_p ثابت بوده و برابر 0.25 میلیمتر در نظر گرفته شده است. مقدار سرعت خطی ابزار V_t و سرعت خطی قطعه کار V_w و همچنین سرعت برآیند برش V_r و زاویه این بردار α نسبت به امتداد محور قطعه کار محاسبه شده است. همچنین پیشروی به ازای هر دور ابزار f و پیشروی به ازای هر لیه برشی ابزار f_t در سایر ستون های جدول ۵ محاسبه

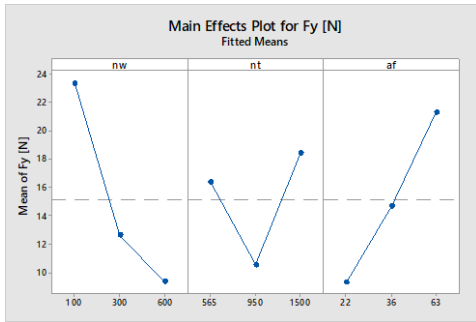
⁵ kistler Dynamo B9257

⁶ Mahr

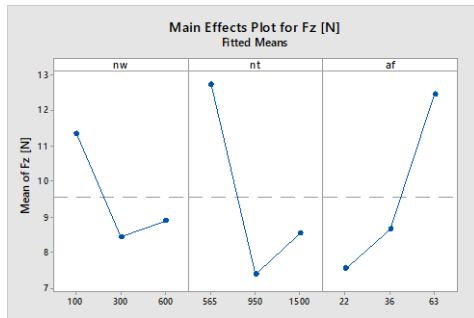
جدول ۶ مقادیر نیروهای ماشین کاری F_x, F_y, F_z ، نیروی برآیند برش F_r ، فشار برش P_s و پارامترهای زبری سطوح R_a, R_z بدست آمده از فرآیند فرز تراش با ابزار فرز انگشتی قطر ۶ و قطعه کار فولادی ۱/۷۲۲۵ و قطر ۱۹.

	$[N]F_x$	$[N]F_y$	$[N]F_z$	$[N]F_r$	$[N/mm^2]P_s$	R_a	R_z
T1	7.196	14.24	14.434	21.515	1615.787	1.509	7.998
T2	8.21	28.562	19.912	35.773	1252.558	2.305	10.808
T3	9.842	35	20.912	41.943	799.039	3.56	16.177

continued



شکل ۵ تاثیر تغییرات پارامترهای مستقل بر روی نیروی برشی F_y



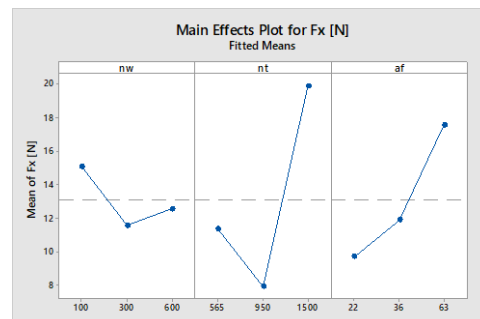
شکل ۶ تاثیر تغییرات پارامترهای مستقل بر روی نیروی برشی F_z

در اشکال ۴ الی ۶ پارامترهای n_w ، n_t [rpm]، a_f [mm/min] در محور x به ترتیب معرف نرخ پیشروی ابزار، سرعت دورانی ابزار و سرعت دورانی قطعه کار می‌باشد. متوسط حدود نیروهای برشی F_x [N]، F_y [N]، F_z [N] نیز در محور y ارائه شده است.

در اشکال ۷ الی ۸ نمودار تاثیر تغییرات پارامترهای مستقل ماشین کاری بر روی نیروی برآیند برش F_r و فشار برش P_s نمایش داده شده است. مطابق شکل ۷ افزایش نرخ پیشروی ابزار موجب افزایش نیروی برآیند برش شده است. همانگونه که انتظار می‌رفت، کاهش فشار برش با افزایش نرخ پیشروی ابزار شکل ۸ مشهود است. اگر چنانچه محدودیت کیفیت سطح وجود نداشته باشد، بدلیل اینکه افزایش نرخ پیشروی موجب افزایش راندمان برش (به واسطه کاهش فشار برش) می‌گردد، پیشنهاد می‌گردد که در مباحث تولیدی از حداکثر نرخ پیشروی ابزار استفاده شود. مثال آشکار این پیشنهاد برای اجرای مرحله خشن‌تراشی^۷ و نیمه پرداخت^۸ می‌باشد. مطابق داده‌های آزمون، وجود اکسترمم برای حدود پارامتر فشار برش، با تغییرات سرعت دورانی ابزار و سرعت دورانی قطعه کار، ثابت شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد در سرعت دورانی 565-950 rpm ابزار و حدود سرعت دورانی 300 rpm قطعه کار، مینیمم فشار برش محقق شده است.

در اشکال ۴ الی ۶ نمودار تاثیر تغییرات پارامترهای مستقل ماشین کاری n_w, a_f, n_t ، بر روی نیروهای برشی F_x, F_y, F_z نمایش داده شده است. افزایش نرخ پیشروی ابزار موجب افزایش قابل ملاحظه نیروهای برشی شده است. با ملاحظه نسبت تاثیر افزایش نرخ پیشروی ابزار بر روی نیروهای برشی، انتظار کاهشی شدن فشار برش (که بهبود راندمان برش را بدنبال خواهد داشت) دور از انتظار نیست. اثر نرخ پیشروی ابزار همانند اثر ضخامت براده نتراشیده است که با افزایش نرخ پیشروی ابزار، فشار برش (یا انرژی مخصوص تراش) کاهش می‌یابد. مطابق جدول ۷ و ردیف آزمایش‌های T10, T12 با افزایش حدود سه برابری نرخ پیشروی ابزار از 22mm/min به 63mm/min مقادیر نیروهای برشی F_x, F_y, F_z به ترتیب ۸۸- ۲۳۷/۵- ۱۰۰ درصد افزایش را نشان می‌دهد. بروز این پدیده دلیلی بر افزایش راندمان برش و کاهش فشار برش می‌باشد. همچنین مطابق داده‌های جدول ۷ و ردیف آزمایش‌های T10, T12 با افزایش حدود سه برابری نرخ پیشروی ابزار، افزایش ۲/۳ برابری پارامتر نیروی برآیند F_r حاصل شده است.

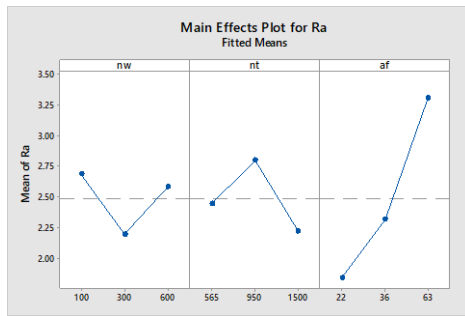
مطابق داده‌های بدست آمده، افزایش سرعت دورانی ابزار و سرعت دورانی قطعه کار موجب افزایش پیوسته نیروهای برشی F_x, F_y, F_z نمی‌گردد همانطور که مشاهده می‌شود در سرعت دورانی 950 rpm ابزار و سرعت دورانی قطعه کار 300 rpm مینیمم نیروهای برشی محقق شده است. احتمالاً تاثیر متقابل دو پدیده: یک- تشکیل لبه انباشته در حدود دورهای دورانی یاد شده و دو- بروز و تشدید پدیده ارتعاشات بر اثر اجرای فرآیند فرز- تراش موجب پدید آمدن نقطه مینیمم در این نمودارها شده است.



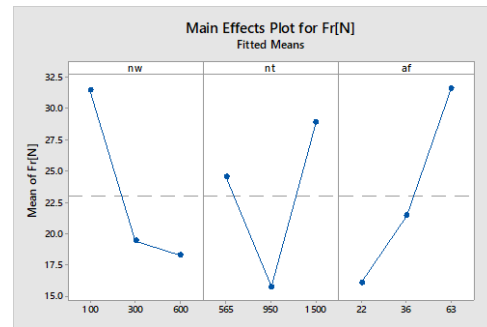
شکل ۱۴ تاثیر تغییرات پارامترهای مستقل بر روی نیروی برشی F_x

⁷ Rough machining

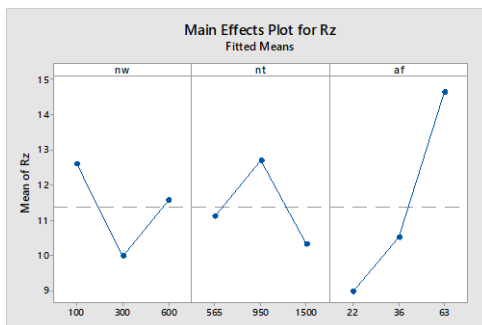
⁸ Semi finishing



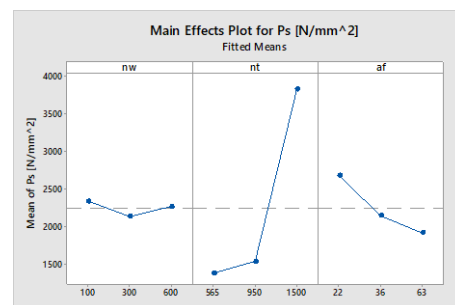
شکل ۹: تاثیر تغییرات پارامترهای مستقل برش بر روی مولفه کیفیت R_a سطح



شکل ۷: تاثیر تغییرات پارامترهای مستقل ماشین کاری بر روی نیروی برآیند برش F_r



شکل ۱۰: تاثیر تغییرات پارامترهای مستقل برش بر روی مولفه کیفیت R_z سطح



شکل ۸: تاثیر تغییرات پارامترهای مستقل ماشین کاری بر روی فشار برش P_s

مطابق با اشکال ۹ و ۱۰ اثر تغییرات سرعت دورانی قطعه کار نیز بر روی مولفه های کیفیت سطح ماشین کاری شده R_a, R_z نیز با تشکیل اکسترهم حادث شده است. بطوریکه در محدوده سرعت دورانی 300rpm قطعه کار بهترین کیفیت سطح با حداقل پارامتر R_a, R_z حاصل شده است.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش فرآیند فرز-تراش بر روی فولاد کم آلیاژ ۱۷۲۲۵ و با فرز انگشتی ۴ پر از جنس تنگستن کارباید و با طرح سرتخت و تحت پارامترهای مستقل ماشین کاری مختلف شامل سرعت دورانی قطعه کار، سرعت دورانی ابزار و نرخ پیشروی ابزار بررسی شد. با هدف کاهش تعداد آزمایش ها مقدار عمق برش در این تحقیق ثابت در نظر گرفته شده و بررسی دقیق تر پارامتر مذکور به پژوهشی دیگر موکول شده است.

مولفه های نیروی برش F_x, F_y, F_z در جریان انجام فرآیند ماشین کاری از دینامومتر قرائت شد. نیروی برآیند برش و همچنین فشار برش بوسیله فرمول محاسبه شده است. پارامترهای زبری سطوح R_a, R_z توسط زبری سنج ماهر اندازه گیری شده و بافت سطح ماشین کاری شده با دستگاه اندازه گیری تصویری دو بعدی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

از نتایج حاصل از پژوهش حاضر می توان به موارد زیر اشاره کرد:

در اشکال ۹ الی ۱۰ نمودار تاثیر تغییرات پارامترهای مستقل ماشین کاری بر روی مولفه های کیفیت سطح ماشین کاری شده R_a, R_z نمایش داده شده است. افزایش نرخ پیشروی ابزار موجب کاهش کیفیت سطح و بالتبع افزایش مولفه های کیفیت سطح R_a, R_z شده است. نکته مهم این که، با افزایش نرخ پیشروی ابزار مولفه های نیروی افزایش یافته و در مقابل کیفیت سطح و فشار برش کاهش می یابد، بنابراین ضرورت دارد با توجه به سه سری متغیر وابسته مذکور (یعنی نیروهای ماشین کاری، فشار برش و کیفیت سطح) مقدار بهینه نرخ پیشروی ابزار محاسبه گردد.

مطابق داده های آزمایش، رفتار تغییرات سرعت دورانی ابزار و سرعت دورانی قطعه کار بر روی مولفه های کیفیت سطح متفاوت است. با افزایش سرعت دورانی ابزار، کیفیت سطح ماشین کاری شده، کاهش یافته و در پیرامون سرعت دورانی 950rpm به مقدار اکسترهم می رسد. بروز پدیده تشکیل لبه انباشته به همراه بروز پدیده ارتعاشات ناشی از ماشین کاری دلایل احتمالی کاهش کیفیت سطح در محدوده ماشین کاری مذکور است.

۸- با افزایش سرعت دورانی قطعه کار مقدار پارامترهای زیری سطوح R_a , R_z کاهش یافته و در محدوده 300rpm به مقدار بهینه نزدیک می‌شود.

۵- فهرست علائم

سرعت برشی ابزار [m/min]	v	نیروهای برشی [N]	F_y, F_z, F_x
نرخ پیشروی ابزار [mm/rev]	a_f	فشار برش [N/mm ²]	P_s
استحکام کششی [N/mm ²]	R_m	کیفیت سطح	R_z, R_a
سرعت دورانی قطعه کار [rpm]	n_w	قطر قطعه کار	D_w
سرعت دورانی ابزار [rpm]	n_t	قطر ابزار	D_t
سرعت برآیند برش [m/min]	V_r		

۶- مراجع

- 1- Choudhury, S. and J. Bajpai, Investigation in orthogonal turn-milling towards better surface finish. Journal of Materials Processing Technology, 2005. 170(3): p. 487-493.
- 2- Azadi, M., Using Gray Relational Analysis and Taguchi Technique in Solving Multi-objective Problems for Turning Operation of Austenitic Stainless Steel. Journal of Mechanical Research and Application, 2013.
- 3- Schulz, H. and T. Kneisel, Turn-milling of hardened steel-an alternative to turning. CIRP annals, 1994. 43(1): p. 93-96.
- 4- Kopač, J. and M. Pogačnik, Theory and practice of achieving quality surface in turn milling. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1997. 37(5): p. 709-715.
- 5- Savas, V. and C. Ozay, Analysis of the surface roughness of tangential turn-milling for machining with end milling cutter. Journal of Materials Processing Technology, 2007. 186(1-3): p. 27-38.
- 6- Zheng, Z., et al., Prediction of chatter stability for enhanced productivity in parallel orthogonal turn-milling. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020. 110(9): p. 2377-2388.
- 7- Ulrich fisher, M. Heinzler, R.Kilgus, 20th edition, Tarah publication, 1401, in persian.
- 8- Amirkabir University of Technology, Mechanical Engineering Department, Strength of Materials Laboratory.
- 9- <http://www.cctc-cnccutter.com/2022>.
- 10- <https://www.kistler.com/de/produkt/type-9257b./2018>.
- 11- MILTON C. SHAW, "METAL CUTTING PRINCIPLES", 1991.
- 12- GEOFFERY BOOTHROYD, "FUNDAMENTAL OF METAL MACHINING AND MACHIN TOOLS", 1985.

۱- در آزمون‌های فرز-تراش پژوهش حاضر و به ازای تمامی مقادیر سرعت‌های دورانی ابزار، قطعه کار و همچنین مقادیر مختلف نرخ پیشروی ابزار، براده‌ها به شکل کاملاً شکسته و منفصل تولید شده است. در این فرآیند کنترل براده‌ها به سهولت انجام شده و مشکلات مرتبط با جمع‌آوری و کنترل براده‌های پیوسته وجود ندارد.

۲- افزایش نرخ پیشروی ابزار موجب افزایش نیروهای برش F_x, F_y, F_z و نیروی برآیند برش F_r می‌گردد.

۳- افزایش نیروهای ماشین‌کاری به نسبت افزایش نرخ پیشروی ابزار کمتر بوده و به همین دلیل فشار برش در این فرآیند با افزایش نرخ پیشروی ابزار کاهش یافته و بالتبع راندمان برش افزایش پیدا می‌کند. بطوریکه افزایش سه برابری نرخ پیشروی ابزار، نیروی برآیند ماشین‌کاری را تا حدود دو برابر افزایش داده و فشار برش را تا حدود ۲۷ درصد کاهش می‌دهد. در صورتیکه محدودیت کیفیت سطح وجود نداشته باشد افزایش نرخ پیشروی ابزار با هدف حصول حداکثر نرخ برداشت براده، جهت بهبود راندمان ماشین‌کاری توصیه می‌گردد.

۴- با افزایش نرخ پیشروی ابزار و به دلیل افزایش ناهمواری‌های سطوح ماشین‌کاری شده، کیفیت سطح کاهش یافته و مقادیر عددی پارامترهای زیری سطوح R_a, R_z افزایش می‌یابد. بطوریکه افزایش سه برابری نرخ پیشروی ابزار، موجب افزایش حدود پارامترهای کیفیت سطح R_a و R_z به ترتیب برابر ۷۴ و ۶۱ درصد می‌گردد. در صورتیکه کیفیت سطح خوب، مدنظر بوده باشد ضرورت دارد که از حداقل نرخ پیشروی ابزار استفاده شده و در مقابل زمانی که عملیات خشن‌تراشی و نیمه پرداخت مدنظر بوده باشد از نرخ‌های پیشروی بالا استفاده گردد.

۵- با افزایش سرعت دورانی ابزار مولفه نیروهای برش F_x, F_y, F_z ابتدا کاهش یافته و از یک محدوده‌ای به بعد تمایل به افزایش پیدا می‌کنند. در آزمایش‌های این پژوهش نقطه عطف تغییر روند نمودار حدود سرعت دورانی 950rpm ابزار بوده است. در این محدوده فشار برش کمترین مقدار را به خود اختصاص داده است. به نظر می‌رسد که تأثیر تغییر هندسه قلم به واسطه تشکیل لبه انباشته و بروز پدیده ارتعاشات در کاهش نیروهای برشی و انرژی مخصوص تراش موثر بوده است. البته تعیین عدد دقیق مذکور مستلزم بهینه‌سازی دقیق پارامترهای ماشین‌کاری فرآیند فرز-تراش است که نیازمند تحقیق مستقل در این زمینه می‌باشد.

۶- با افزایش سرعت دورانی ابزار پارامترهای زیری سطوح R_a, R_z افزایش یافته و در محدوده حدود 950rpm به اکسترمم رسیده و مجدد کاهش پیدا می‌کنند. احتمالاً تأثیر همزمان پدیده ارتعاشات و تشکیل لبه انباشته در شکل‌گیری روند مذکور تأثیر-گذار بوده است.

۷- با افزایش سرعت دورانی قطعه کار مولفه نیروهای برش F_x, F_y, F_z و همچنین فشار برش P_s کاهش یافته بطوریکه شیب کاهش نیروها (و البته فشار برش) در محدوده 300-600rpm کمتر از محدوده 100-300rpm می‌باشد. مطابق تحقیق حاضر نقطه بهینه سرعت دورانی قطعه کار برای داشتن حداقل نیرو و فشار برش حدود 300rpm است.