



بررسی تجربی و عددی فرایند فرز-تراش بر روی فولاد ۱.۷۲۲۵

رضا صائبی راد^۱، سعید امینی^{۱*}، رضا مهدی پور^۲

۱- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، اصفهان، ایران

۲- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: amini.s@kashanu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۶ مرداد ۱۴۰۴

پذیرش: ۹ اردیبهشت ۱۴۰۵

کلیدواژگان:

فرز-تراش

انرژی مخصوص تراش

نیروهای ماشین کاری

نرم افزار آباکوس

فرز-تراش یک فرایند ماشین کاری ترکیبی است که به طور همزمان از دو عملیات تراشکاری و فرزکاری بهره می برد، به گونه ای که ابزار و قطعه کار همزمان دوران می کنند. این ویژگی امکان ماشین کاری قطعات حجیم و دارای سطوح منحنی و پیچیده را فراهم می سازد. هدف مطالعه حاضر، بررسی تجربی و عددی اثر تغییر پارامترهای مستقل ماشین کاری شامل سرعت دورانی قطعه کار، سرعت دورانی ابزار و نرخ پیشروی ابزار بر پارامترهای وابسته همچون نیروهای برشی و انرژی مخصوص تراش است. شبیه سازی عددی فرایند در محیط نرم افزار آباکوس انجام شد و نتایج آن با داده های تجربی برای صحت سنجی مورد مقایسه قرار گرفت. یافته ها نشان می دهد که افزایش نرخ پیشروی ابزار باعث افزایش مؤلفه های نیروی برشی و کاهش انرژی مخصوص تراش می شود. بر اساس آزمون های تجربی، افزایش سه برابری نرخ پیشروی ابزار موجب افزایش حدود ۲/۳ برابری نیروی فرایند ماشین کاری و کاهش حدود ۲۷ درصدی انرژی مخصوص تراش می شود. نتایج شبیه سازی عددی نیز افزایش ۲/۷ برابری نیروی فرایند و کاهش ۴ درصدی انرژی مخصوص تراش را در پی افزایش مشابه نرخ پیشروی ابزار نشان می دهد.

Experimental and numerical investigation of the turn-milling process on 1.7225 steel

Reza Saebi Rad¹, Saeed Amini^{1*}, Reza Mahdipour²

1- Faculty of Mechanical Engineering, University of Kashan, Isfahan, Iran

2- Faculty of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

* Corresponding Author's Email: amini.s@kashanu.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 28 July 2025

Accepted: 29 April 2026

Keywords:

Turn-Milling

Specific Cutting Energy

Cutting Force

ABAQUS Software

Abstract

Turn-milling is a hybrid machining process that combines turning and milling operations, in which both the tool and the workpiece rotate simultaneously. This configuration provides high flexibility for machining curved and complex surfaces. The present study investigates, through both experimental tests and numerical simulations, the influence of key independent machining parameters—namely, workpiece rotational speed, tool rotational speed, and tool feed rate—on cutting responses such as cutting forces and specific cutting energy. The results indicate that increasing the tool feed rate leads to higher cutting force components and lower specific cutting energy. Experimental findings show that tripling the tool feed rate increases the machining force by approximately 2.3 times and reduces specific cutting energy by about 27%. Numerical simulations performed in ABAQUS predict a 2.7-fold increase in machining force and a 4% reduction in specific cutting energy for a similar threefold increase in the tool feed rate.

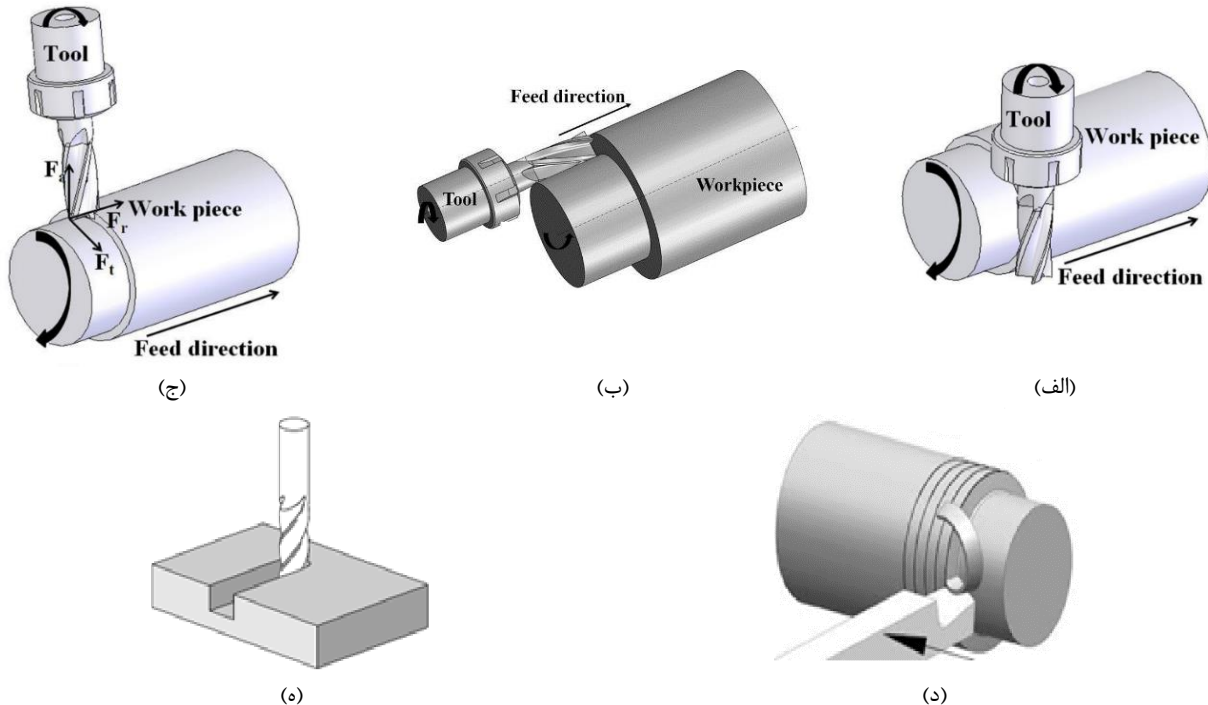
Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Saebi Rad R, Amini S, Mahdipour R. Experimental and numerical investigation of the turn-milling process on 1.7225 steel. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2025 Nov 22;12(9):52-66. doi: 10.22034/ijme.2026.537602.2114 [In Persian]

۱- مقدمه

فرایند فرز-تراش ترکیبی از عملیات فرزکاری و دوران قطعه کار است که با چرخش هم‌زمان ابزار و قطعه کار، و اعمال پیشروی به ابزار، فرایند براده‌برداری انجام می‌شود. شکل ۱ انواع مختلف این فرایند را در مقایسه با فرایندهای سنتی تراشکاری و فرزکاری نشان می‌دهد.



شکل ۱ نمایش فرایند (الف) فرز-تراش مماسی، (ب) فرز-تراش هم‌محور، (ج) فرز-تراش متعامد، (د) تراشکاری، (ه) فرزکاری [۱، ۲]

مطالعات اولیه در زمینه فرایند فرز-تراش به دهه ۱۹۹۰ میلادی بازمی‌گردد؛ زمانی که شالز [۳] پژوهش‌هایی را بر روی تأثیر این فرایند بر قطعه‌کار فولادی از جنس ۱.۳۵۰۵ آغاز کرد. تمرکز اصلی این تحقیقات، بررسی هندسه ابزار و نوع عملیات ماشین‌کاری در فرایند فرز-تراش بود. در ادامه، حوزه‌های تحقیقاتی گسترش‌یافته و پارامترهایی نظیر طول عمر ابزار، کیفیت سطح ماشین‌کاری‌شده، نیروهای ماشین‌کاری و دمای فرایند مورد بررسی قرار گرفتند. از جمله مزایای گزارش‌شده برای این فرایند می‌توان به افزایش عمر ابزار (به دلیل تماس متناوب لبه‌های برنده با قطعه کار)، کاهش حرارت تولیدی و بهبود تهویه حرارتی ابزار، کاهش نیروهای برشی، ارتقای کیفیت سطح نهایی، دقت ابعادی قطعه کار و کنترل مؤثرتر بر جریان براده اشاره نمود. پاکانیک و همکاران [۴] به بررسی پایداری دینامیکی در فرایند فرز-تراش پرداختند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که برای حفظ پایداری دینامیکی سیستم ماشین‌کاری، لازم است نسبت عرض درگیری ابزار با قطعه کار در بازه ۰/۴ تا ۰/۵ میلی‌متر تنظیم شود. در صورتی که این مقدار از ۰/۴ میلی‌متر کمتر باشد، فرایند دچار بی‌ثباتی دینامیکی شده و در پی آن، سایش شدید ابزار و کاهش کیفیت سطح قطعه کار مشاهده می‌شود. همچنین یافته‌های این پژوهش بیانگر آن بود که فرایند فرز-تراش، در مقایسه با فرزکاری سنتی، قادر به ایجاد صافی سطح بهتری است. لی و همکاران [۵] مطالعه‌ای را در زمینه تراشکاری با سرعت بالا بر روی آلیاژ تیتانیوم انجام دادند. در این پژوهش، عملکرد ابزار چرخان با ابزار ثابت در شرایط یکسان مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که به‌کارگیری ابزار چرخان موجب کاهش قابل‌توجه نیروهای ماشین‌کاری شده و در نتیجه، عمر ابزار نسبت به ابزار ثابت تا شش برابر افزایش یافته است. چادوری و همکاران [۱] تأثیر پارامترهای قطر ابزار، عمق برش و سرعت دورانی قطعه کار را بر زبری سطح در فرایند فرز-تراش مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که افزایش قطر ابزار و کاهش عمق برش منجر به بهبود کیفیت سطح ماشین‌کاری می‌شود. همچنین، یکی دیگر از عوامل مؤثر بر زبری سطح، ترکیب سرعت دورانی ابزار و قطعه کار است؛ به‌گونه‌ای که بیشترین میزان زبری سطح در زمانی مشاهده شد که سرعت دورانی قطعه کار صفر بود. با افزایش سرعت دورانی قطعه کار تا ۱۰ دور بر دقیقه، کیفیت سطح بهبود یافت، اما افزایش بیشتر سرعت دورانی قطعه کار در حالی که سرعت ابزار ثابت مانده بود، موجب افزایش مجدد زبری سطح شد.

ساواس و اووزه [۶] عملکرد فرایند فرز-تراش مماسی را بر روی فولاد ۱۰۵۰ مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که مناسب‌ترین حالت برای انجام عملیات فرز-تراش مماسی، حالتی است که ابزار و قطعه‌کار به‌صورت عمود بر یکدیگر قرار می‌گیرند. این پیکربندی نه‌تنها از نظر عملکرد فرایند، بلکه از منظر اقتصادی نیز مقرون‌به‌صرفه‌تر از روش‌های تراش کاری سنتی و فرز-تراش هم‌محور است. در این پژوهش بیان شد که در صورت انتخاب سرعت برشی بهینه، کیفیت سطح به‌دست‌آمده می‌تواند به سطح کیفی مشابه با سنگ‌زنی نزدیک شود، به‌طوری که در برخی شرایط، عملیات سنگ‌زنی و پرداخت نهایی سطح قابل حذف خواهد بود. کاراگوزل و همکاران [۷] به بررسی تحلیل هندسی و مدل‌سازی فرایند فرز-تراش با استفاده از ابزار فرز انگشتی پرداختند و نتایج مدل‌سازی را با داده‌های تجربی مقایسه کردند. هدف اصلی این پژوهش، شناسایی شرایط بهینه برای کاهش نیروهای ماشین‌کاری و بهبود کیفیت سطح در عملیات فرز-تراش بود. برای نخستین بار در این مطالعه، فرایند فرز-تراش و ابزار برشی به‌صورت جامع مدل‌سازی شده و براده‌برداری در حالت‌های فرز-تراش عمودی، مماسی و هم‌محور در نرم‌افزار شبیه‌سازی گردید. نتایج تجربی و تئوری نشان داد که فرایند فرز-تراش، به‌دلیل وجود برش‌های منقطع و تبادل حرارتی مؤثرتر، نسبت به تراش کاری و فرز‌کاری سنتی توانایی بیشتری در ماشین‌کاری فلزات سخت دارد. همچنین، این فرایند منجر به کاهش زبری سطح و افزایش دقت در ایجاد سطح مقطع گرد می‌شود. در بین حالت‌های مختلف فرز-تراش، فرز-تراش مماسی به‌عنوان بهینه‌ترین حالت شناخته شده است که نیروی ماشین‌کاری را کاهش داده و کیفیت سطح را بهبود می‌بخشد. کاراگوزل [۸] در مطالعه‌ای دیگر به تحلیل هندسی و مقایسه نتایج مدل با آزمایش‌های تجربی در فرایند فرز-تراش با ابزار اینسرت‌خور پرداخت. یافته‌ها نشان داد که در فرز-تراش عمودی، علاوه بر لبه ابزار، حاشیه ابزار نیز با قطعه‌کار درگیر است و با افزایش فاصله بین محور قطعه‌کار و ابزار برشی، نیروی ماشین‌کاری کاهش می‌یابد. امینی و همکاران [۹] پژوهشی را در زمینه تراش-فرز با ارتعاش روی آلومینیوم ۷۰۷۵ انجام دادند. نتایج نشان داد که این روش موجب بهبود کیفیت سطح تا ۳۵ درصد و کاهش نیروی ماشین‌کاری تا ۷۵ درصد می‌شود. ارتعاشات التراسونیک باعث تسهیل جدایش براده‌ها و کاهش چسبندگی آلومینیوم به لبه برش ابزار شده که منجر به افزایش کارایی و طول عمر ابزار گردید. همچنین، افزایش سرعت دورانی ابزار باعث کاهش نیروی ماشین‌کاری و زبری سطح شد، در حالی که افزایش پیشروی ابزار تأثیر منفی بر کیفیت سطح و نیروی ماشین‌کاری داشت. امینی و صائبی‌راد [۱۰] به بررسی فرایند فرز-تراش بر روی قطعه‌کار فولادی با ۱.۷۲۲۵ پرداختند. در این مطالعه از ابزار فرز انگشتی کاربرد تنگستن استفاده شد. نتایج نشان داد که افزایش سه‌برابری نرخ پیشروی ابزار منجر به افزایش حدود دو برابری نیروهای ماشین‌کاری گردید، که به دنبال آن انرژی مخصوص تراش تا ۲۷ درصد کاهش یافته و راندمان فرایند ماشین‌کاری بهبود یافت. همچنین، روند نیروهای ماشین‌کاری با افزایش سرعت دورانی ابزار و قطعه‌کار کاملاً نزولی نبوده و در محدوده آزمایش‌ها، وجود یک نقطه اکسترمم مشاهده شد. سون و همکاران [۱۱] به بررسی شبیه‌سازی و آزمایش فرز‌کاری با ارتعاش التراسونیک روی آلیاژ دما بالای GH4169 پرداختند. مدل ارتعاشی به‌کار رفته نشان داد افزایش دامنه ارتعاش باعث کاهش تنش ماشین‌کاری، بهبود شکستن براده و کاهش نیروی فرز‌کاری می‌شود. ژو فنگ و همکاران [۱۲] به شبیه‌سازی اجزاء محدود و آزمایش مقایسه‌ای میکرو فرز‌کاری با ارتعاشات التراسونیک محوری (UVAM) و فرز‌کاری معمولی (CM) روی فولاد ضدزنگ ۳۱۶ پرداختند. مطالعه نشان داد که UVAM با افزایش شکست‌پذیری براده، نیروی ماشین‌کاری را کاهش داده و کیفیت سطح بهتری نسبت به CM ایجاد می‌کند. مو هوانگ و همکاران [۱۳] به بررسی نیروهای برش در فرز‌کاری با سرعت بالا روی آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V پرداختند. با استفاده از آزمایش‌های چندعاملی و تحلیل آماری، تأثیر پارامترهای ماشین‌کاری بر نیروهای برش بررسی و بهترین شرایط برای فرز‌کاری با عمق برش کم و سرعت بالا شناسایی شد. نیروهای برشی به مؤلفه‌های عمودی، افقی و محوری تجزیه شدند و مدل سه‌بعدی نیرو با روش حداقل مربعات و رگرسیون ایجاد شد. اعتبار مدل با تحلیل پارامترها و باقی‌مانده‌ها تأیید شد. این مدل قابل‌اعتماد است و به بهینه‌سازی پارامترهای فرز‌کاری تیتانیوم کمک می‌کند. لیو و همکاران [۱۴] به بررسی و مدل‌سازی نیروهای ماشین‌کاری در فرز‌کاری با کمک ارتعاش التراسونیک روی کامپوزیت فلزی Ti B₂ / Al پرداختند. در این مطالعه مکانیسم‌های اساسی نیروی برشی تولید شده در طول برش به کمک ارتعاشات اولتراسونیک بررسی شده است. از تحلیل سینماتیکی برای بررسی برهمکنش‌های اصطکاکی بین براده و سطح براده استفاده شد. نتایج نشان داد که بین مقادیر پیش‌بینی‌شده نظری و خروجی مدل شبیه‌سازی، درجه خاصی از خطا وجود دارد و این خطا کمتر از ۲۰ درصد بود. با این وجود، روند مشاهده‌شده در تغییرات نیروی برش، سازگاری قوی بین دو روش را نشان داد.

هدف اصلی این پژوهش، بررسی تجربی فرایند فرز-تراش است. نوآوری تحقیق حاضر در مطالعه عددی این فرایند نهفته است؛ به‌گونه‌ای که شبیه‌سازی فرایند فرز-تراش در محیط آباکوس انجام شده و در بخش تجربی نیز نیروهای ماشین‌کاری به‌وسیله دینامومتر

استخراج شده‌اند. همچنین، نیروی برآیند برش، توان مصرفی و انرژی ویژه ماشین‌کاری در هر دو حالت تجربی و شبیه‌سازی عددی محاسبه و نتایج حاصل با یکدیگر مقایسه و ارزیابی شده‌اند.

۲- مواد، تجهیزات و روش‌ها

۲-۱- جنس ماده مورد آزمون

فولاد کم‌آلیاژ ۱.۷۲۲۵ با نام تجاری Mo40 که در استاندارد AISI به فولاد ۴۱۴۰ معروف است، از آلیاژ کروم-نیکل است. عناصر آلیاژی این فولاد در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱ جدول ترکیبات شیمیایی فولاد آلیاژی ۱.۷۲۲۵

عناصر آلیاژی	P	Mn	Si	C	Mo	Cr	S
درصد	0.035	0.6-0.9	0.4	0.45-0.38	0.15-0.3	0.9-1.2	0.035

مشخصات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های رایج فولاد آلیاژی ۱.۷۲۲۵ در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲ مشخصات فیزیکی و مکانیکی فولاد آلیاژی ۱.۷۲۲۵ [۱۵]

تنش تسلیم	دمای آنیل	استحکام کششی	افزایش طول	انرژی ضربه	سختی
650-950 MPa	800-850 °C	900-1300 MPa	10-12 %	30-35 J	197HB

نمونه‌های 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

سختی	ازدیاد طول نسبی	تنش تسلیم	مدت زمان تست	حداکثر تنش	حداکثر نیرو	سطح مقطع
30.2 HRC	6 %	7400 Kg/cm ²	24 sec	10566.9 Kg/cm ²	33197 N	314.16 mm ²

۲-۲- ابزار ماشین‌کاری و تعیین حدود پارامترهای برشی

یکی از مهم‌ترین پارامترها در انجام پژوهش‌های ماشین‌کاری، ابزار برشی است. پارامترهایی همچون نوع ابزار، جنس ابزار، نوع پوشش ابزار، تعداد لبه‌های برشی و همچنین هندسه لبه‌های برش ابزار تأثیر زیادی در حدود نیروهای ماشین‌کاری دارد. در شکل ۲ ابزار فرز کارباید قطر $\phi 6$ mm با پوشش WC - TiAlN و کد فنی YU ۹۵۴YU - D ۷۵L۶- ساخت شرکت YU تایوان، برای انجام مجموعه آزمایش‌ها به کار گرفته شده است. ابزار مذکور چهارپر بوده و دارای زاویه مارپیچ ۳۵ درجه و طرح پیشانی تخت است. مطابق کاتالوگ شرکت YU این ابزار گزینه مناسب برای ماشین‌کاری فولادهای آلیاژی تا سختی 45 HRC است.



شکل ۲ فرز کارباید قطر $\phi 6$ mm با پوشش WC - TiAlN و کد فنی YU954 - D6L75 ساخت شرکت YU تایوان

مقادیر مرجع حدود پارامترهای برشی برای فرایند فرزکاری و تراشکاری با جنس ابزار کاربید تنگستن در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴ مقادیر مرجع حدود پارامترهای برشی برای فرایند فرزکاری و تراشکاری با جنس ابزار کاربید تنگستن [۱۵]

گروه جنس قطعه‌کار	فرایند تراشکاری			فرایند فرزکاری		
	استحکام کششی R_m [N/mm ²]	سرعت برشی v [m/min]	نرخ پیشروی a_f [mm/rev]	استحکام کششی R_m [N/mm ²]	سرعت برشی V [m/min]	نرخ پیشروی a_f [mm/rev]
فولاد استحکام پایین	$\leq 800R_m$	200 - 350	0.1 - 0.5	200 - 400	$\leq 800R_m$	فرز $\phi 6$ / فرز $\phi 12$
فولاد استحکام بالا	$\geq 800R_m$	100 - 200	0.1 - 0.5	150 - 300	$\geq 800R_m$	≥ 0.08 / ≥ 0.06

مطابق با جدول ۴ حدود سرعت برشی و نرخ پیشروی ابزار در هر دو فرایند فرزکاری و تراشکاری بر اساس استحکام کششی قطعه‌کار پیشنهاد شده است. با توجه به جدول ۳ و ملاحظه عدد 10566.9 [kgf/cm²] (که معادل 1056.7 [N/mm²] است) برای پارامتر استحکام کششی، جنس فولاد مورد آزمون در ردیف فولادهای استحکام بالا قرار می‌گیرد.

حدود پارامترهای ماشین‌کاری فرایند فرز-تراش در جدول ۵ ارائه شده است. نظر به محدودیت تجهیزات موجود در کارگاه و ناشناخته بودن فرایند فرز-تراش و همچنین پیرو آزمون‌های اولیه ماشین‌کاری انجام شده، حدود پارامترهای ماشین‌کاری شامل سرعت دورانی قطعه‌کار، سرعت دورانی ابزار و همچنین نرخ پیشروی ابزار در سه سطح انتخاب شده است.

جدول ۵ پارامترهای ماشین‌کاری برای آزمون‌های تجربی در فرایند فرز-تراش. قطر قطعه‌کار $\phi 19$ و قطر ابزار $\phi 6$

نرخ پیشروی ابزار a_f [mm/min]	سرعت دورانی ابزار n_t [rpm]	سرعت دورانی قطعه‌کار n_w [rpm]
22, 36, 63	565, 950, 1500	100, 300, 600

برای انجام آزمون‌ها باهدف مقایسه در محیط نرم‌افزار المان محدود آباکوس حدود پارامترهای مطابق جدول ۶ در نظر گرفته شده است.

جدول ۶ پارامترهای ماشین‌کاری برای تحلیل عددی آباکوس در فرایند فرز-تراش. قطر قطعه‌کار $\phi 19$ و قطر ابزار $\phi 6$

نرخ پیشروی ابزار a_f [mm/min]	سرعت دورانی ابزار n_t [rpm]	سرعت دورانی قطعه‌کار n_w [rpm]
22, 36, 63	1500	600

۲-۳- تجهیزات آزمون

دستگاه فرز یونیورسال مورد استفاده از نشان تجاری لوان مدل ZXX 6350 ZA ساخت کشور چین است. حداکثر سرعت دورانی قابل حصول با این ماشین ۱۵۰۰ دور در دقیقه است. این دستگاه مجهز به خط کش دیجیتال و نمایشگر حرکت محورها بوده است. داشتن قابلیت نمایش حرکت محورها، دقت حرکتی محورها در سه راستای X, Y, Z تضمین شده و بدین ترتیب آزمایش‌ها با دقت قابل قبولی اجرا می‌گردد. حداقل سرعت پیشروی میز فرز ۲۲ میلی‌متر بر دقیقه بوده و این محدودیت در انتخاب حد پایین نرخ پیشروی ابزار اعمال گردیده است. در این پژوهش دستگاه پایه، فرز یونیورسال بوده و برای دوران قطعه‌کار، یک مکانیسم مستقل و دقیق طراحی و ساخته شده است. موتور صنعتی سه‌فاز بکار رفته در مکانیسم تراش دارای توان یک کیلووات بوده و برای کنترل تعداد دوران قطعه‌کار از اینورتر استفاده شده است. این موتور توانایی ارائه سرعت دورانی حداکثر ۱۵۰۰ دور در دقیقه در جریان ۵۰ هرتز را دارا است. برای ایجاد سرعت دورانی دلخواه با استفاده از اینورتر، جریان ورودی موتور تغییر داده می‌شود. این مکانیسم که شامل یک الکتروموتور و سه‌نظام است 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 قطعه‌کار، سرعت پیشروی ابزار تأثیر نمی‌پذیرد (شکل ۳).

مطابق شکل ۳ و برای کاهش ارتعاشات، مجموعه مکانیسم تراش، شامل الکتروموتور، سه‌نظام، قطعه‌کار و مرغک دوار، از طریق یک صفحه مقاوم صلب بر روی دینامومتر نصب شده است. امکان استفاده از قطعه‌کار با طول مناسب و با ریسک ارتعاشی کمتر میسر می‌گردد. محور قطعه‌کار به موازات محور X ماشین فرز تنظیم شده است. ابزار نیز در حالت فرز-تراش مماسی و عمود بر محور قطعه‌کار تنظیم شده

است، به طوری که برای باردهی، در راستای محور Y ماشین فرز انجام می‌پذیرد. دستگاه دینامومتر مورد استفاده ساخت شرکت کیستلر و مدل B9257^۱ بوده است این تجهیزات توانایی اندازه‌گیری حداقل ۰/۵ نیوتن و حداکثر ۱۰/۰ کیلونیوتن را دارا است.



شکل ۳ نحوه اتصال مکانیسم تراش ساخته‌شده بر روی میز فرز

۲-۴- انرژی مخصوص تراش

توان مصرفی در فرایند ماشین‌کاری طبق رابطه ۱، از حاصل ضرب نیروی برش F_c در سرعت برش V به دست می‌آید:

$$P = F_c \times V \quad (1)$$

برای محاسبه انرژی مخصوص تراش P_s که شاخصی از راندمان فرایند ماشین‌کاری محسوب می‌شود، توان مصرفی بر واحد حجم ماده‌ی ماشین‌کاری شده سنجیده می‌شود. این مفهوم در رابطه ۲ بیان شده است:

$$P_s = \frac{P}{Z_w} = \frac{F_c \cdot V}{A_c \cdot V} \sim \frac{F_c}{A_c} \quad (2)$$

در این رابطه، Z_w نرخ برداشت براده در واحد زمان و A_c سطح مقطع براده تغییر شکل‌نیافته است. پارامتر P_s تحت تأثیر ویژگی‌های ماده، شرایط ماشین‌کاری و هندسه ابزار تغییر می‌کند. عواملی مانند سرعت برش، نرخ پیشروی ابزار و زاویه براده ابزار از عوامل مؤثر بر مقدار انرژی مخصوص تراش هستند. در صورت ثابت بودن هندسه ابزار، مقدار این پارامتر در سرعت‌ها و پیشروی‌های بالا به مقدار ثابتی میل می‌کند.

۲-۵- روش‌های موجود برای شبیه‌سازی المان محدود فرآیند برش فلزات

برای شبیه‌سازی دقیق و قابل قبول یک فرایند، شناخت ابزارهای موجود و آشنایی با ویژگی‌ها و محدودیت‌های آن‌ها ضروری است. در حالت کلی چهار فرمولاسیون اصلی لاگرانژ^۲، اویلر^۳، لاگرانژ اویلر قراردادی^۴ و هیدرودینامیک ذرات هموارشده^۵، در شبیه‌سازی المان محدود برش فلزات مورد استفاده قرار می‌گیرد.

¹ Kistler Dynamo B9257

² Lagrangian

³ Eulerian

⁴ Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE)

⁵ Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)

۲-۵-۱- فرمولاسیون لاگرانژ

این روش نخستین بار در سال ۱۹۷۳ و توسط کلامکی [۱۶] ارائه شده و امروزه در اغلب شبیه‌سازی‌های المان محدود از این متد یا مدل به‌روزآوری شده آن استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که در فرمولاسیون به‌روزآوری شده از فن مش بندی تطبیقی بهره گرفته می‌شود. فرمولاسیون لاگرانژ به‌طور عمده در مسائل مکانیک جامدات استفاده می‌شود. مفهوم اساسی لاگرانژ آن است که مش مواد را دنبال کرده و کل منطقه تحت آنالیز را پوشش می‌دهد. تغییر شکل می‌تواند با افزایش در زمان رخ دهد. پس از هر افزایش زمان منطقه موردنظر بر اساس مختصات مواد به‌روزرسانی می‌شود. به‌این ترتیب تاریخچه مواد به‌راحتی در نظر گرفته می‌شود. این وضعیت بروز شده به‌عنوان شرط اولیه برای مراحل بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این حال روش لاگرانژ بروز شده، به دلیل اعوجاج مش در طول تغییر شکل‌های بزرگ، محاسبات پرهزینه‌ای به همراه دارد.

فرمولاسیون لاگرانژ زمانی ترجیح داده می‌شود که جریان نامحدودی از مواد درگیر باشد. این فرمولاسیون با توجه به توانائی تعیین هندسه براده از مرحله اولیه به حالت ثابت، در فرایند شبیه‌سازی برش فلزات و همچنین دیگر فرایندهای تغییر شکل پلاستیک به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این فن لازم نیست مرزها و شکل براده از قبل تعیین شوند و معیارهای جدایش براده را می‌توان به شبیه‌سازی براده‌های ناپیوسته و یا شکست مواد در مدل‌های برش فلزات که بر اساس مدل لاگرانژ هستند، تعریف نمود. اگرچه مزایای زیادی برای فرمولاسیون لاگرانژ وجود دارد؛ اما استفاده از آن با محدودیت‌های جدی همراه است، در برش فلزات، قطعه‌ی در حال برش در معرض تغییر شکل پلاستیک شدیدی قرار داشته و این امر باعث اعوجاج المان‌ها می‌شود؛ بنابراین بازسازی المان‌ها مورد نیاز بوده و لازم است که معیار جدایش براده هم تعیین شود. لازم به توضیح است که محدودیت مذکور در صورت استفاده از فرمول بندی لاگرانژ به‌روز شده با مش تطبیقی مرتفع می‌شود [۱۷].

۲-۵-۲- مدل‌های رفتاری ماده

یکی از مهم‌ترین موضوعات در شبیه‌سازی المان محدود برش فلزات، مدل‌سازی صحیح تنش جریان ماده کار است. این موضوع به‌شدت بر نتایج مدل تأثیرگذار خواهد بود. تنش جریان، تنش تسلیم آنی ماده است که به‌عنوان تابعی از کرنش، نرخ کرنش و دما بیان می‌شود. انواع متفاوتی از مدل‌های ریاضی برای توصیف رفتار ماده در شرایط بارگذاری مختلف ارائه شده است. در ادامه مطلب، مدل اکسلی و جانسون کوک به‌عنوان نمونه‌های رایج مورد استفاده در فرایندهای شبیه‌سازی المان محدود، مطرح می‌شود که در آن σ و ε به ترتیب معرف تنش جریان و کرنش بوده و σ_1 تنش جریان در کرنش واحد است. در این رابطه n توان کرنش سختی است. تنش جریان در کرنش واحد و توان کرنش سختی به درجه حرارت و همچنین نرخ کرنش بستگی دارد.

۲-۵-۳- مدل جانسون کوک

یکی از معروف‌ترین و پرکاربردترین روابط برای ارائه رفتار ماده، معادله جانسون-کوک است. حین فرایند براده‌برداری دمای ناحیه برش در مدت‌زمان اندک به‌شدت افزایش می‌یابد و تغییر شکل‌های پلاستیک شدید و سریعی در حین به‌وجود آمدن براده رخ می‌دهد. از آنجاکه مدل جانسون-کوک تغییر شکل‌های پلاستیک ماده را تحت شرایط کرنشی مختلف به‌خوبی بیان می‌کند، لذا به‌طور گسترده جهت شبیه‌سازی فرایند براده‌برداری مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۸]. این معادله از سه بخش پیرامتری مجزا تشکیل شده است که به ترتیب از چپ به راست تأثیرات سخت‌شدگی کرنشی، سخت‌شدگی نرخ کرنشی، نرم‌شدگی دمایی، را لحاظ می‌کند. در رابطه ۳ معادله جانسون-کوک نمایش داده شده است.

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \left(1 - \left(\frac{T - T_W}{T_m - T_W}\right)^m\right) \quad (3)$$

در این رابطه σ مقدار تنش سیلان قطعه کار است، ε نرخ کرنش مؤثر، $\dot{\varepsilon}_0$ نرخ کرنش مرجع و ε معرف کرنش قطعه کار است. همچنین T معرف دمای فعلی قطعه کار و T_W دمای محیط است. پارامتر T_m نیز معرف دمای ذوب قطعه کار است. علاوه بر این پارامترهای A, B, C, m, n ثوابت معادله جانسون-کوک هستند که عموماً از آزمایش‌های تجربی به دست می‌آیند [۱۹]. مقدار این ثوابت نقش مهمی در رفتار ماده ایفا می‌کنند و تعیین دقیق آن‌ها به‌گونه‌ای که در محدوده دمایی و کرنشی متناسب با فرایند موردنظر باشند، بسیار حائز اهمیت است. از جمله آزمایش‌های انجام‌شده در این راستا می‌توان به آزمون فشار هاپکینسون اشاره نمود که رفتار ماده را در دما و کرنش‌های بالا بررسی می‌کند [۲۰].

۲-۵-۴- مدل آسیب جانسون-کوک

جانسون و کوک [۲۱] در سال ۱۹۸۵ یک مدل آسیب برای مواد نرم ارائه دادند که تا امروز نیز یکی از مدل‌های آسیب معتبر به شمار می‌آید. در مدل آسیب جانسون-کوک (رابطه ۴) مدل کرنش شکست ماده به‌عنوان تابعی از تنش سه محوره، نرخ کرنش و دما در نظر گرفته می‌شود:

$$\epsilon_f = [D_1 + D_2(\exp D_3 \eta)] [1 + D_4 \ln \epsilon^*] [1 + D_5 T^*] \quad (4)$$

در این رابطه D_1, D_2, D_3, D_4, D_5 ثابت‌های ماده و η نسبت تنش سه محوره وارد بر ماده است.

۲-۶- انتخاب مدل رفتاری مناسب برای ماشین کاری فولاد ۱.۷۲۲۵

فولاد آلیاژی ۱.۷۲۲۵ که به‌عنوان ماده کار در این پژوهش انتخاب شده است، دارای خواص و کاربردهای فراوان در صنعت بوده و استحکام این آلیاژ به دما وابسته بوده، فلذا مدل رفتاری انتخاب شده در رابطه با آلیاژ مذکور لزوماً بایستی تأثیر حرارت تولید شده در حین برش فلز را در مقدار تنش جریان اعمال کند. به‌عنوان یک جمع‌بندی اجمالی، فرایند فرز-تراش و بهبود پارامترهای ماشین کاری برای جنس قطعه کارهای مختلف هنوز مورد توجه محققین قرار دارد.

۲-۷- 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 و انرژی مخصوص تراش P_s بررسی شده است. روش مورد آزمون برای طراحی تعداد آزمایش‌ها و همچنین ترتیب انجام آزمایش‌ها روش فاکتوریل کامل بوده است (جدول ۷).

جدول ۷ مقدار و ترتیب تنظیم پارامترهای ماشین کاری طبق روش فاکتوریل کامل با ترتیب انجام تصادفی مطابق با نرم‌افزار مینی‌تب

RunOrder	StdOrder	n_w [rpm]	n_t [rpm]	a_f [mm/min]	a_p [mm]	V_t [m/min]	V_w [m/min]	V_r [m/min]	α [°]	f [mm/rev]	f_t [mm/t]	Z_w [mm ³ /min]
1	T11	300	565	36	0.25	10.64	17.898	20.824	59.289	0.042	0.010	216.668
2	T27	600	1500	63	0.25	28.26	35.796	45.607	51.736	0.030	0.008	342.051
3	T12	300	565	63	0.25	10.64	17.898	20.824	59.289	0.073	0.018	379.168

۳- نتایج و بحث

مطابق با جدول ۷ و بر اساس رویه پیشنهادی نرم‌افزار مینی‌تب، تنظیم پارامترهای ماشین کاری انجام شده و فرایند فرز-تراش اجرا شده است. در جدول ۸ مقادیر نیروهای ماشین کاری F_x, F_y, F_z ، قرائت شده از دینامومتر ارائه شده است. مقدار نیروی برآیند F_r و فشار برش P_s برای هر ردیف آزمایش مطابق روابط ۵ و ۶ محاسبه شده است:

$$F_r = \sqrt{(F_x^2 + F_y^2 + F_z^2)} \quad (5)$$

$$P_s = \frac{P}{Z_w} = \frac{F_x (V_r \cdot \cos \alpha + a_f \times 1000/n) + F_z (V_r \cdot \sin \alpha)}{Z_w} \quad (6)$$

در این روابط F_r و P_s به ترتیب معرف نیروی برآیند برش و انرژی مخصوص تراش می‌باشند.

جدول ۸ مقادیر نیروهای ماشین کاری F_x, F_y, F_z ، نیروی برآیند برش F_r ، انرژی مخصوص تراش P_s به‌دست آمده از فرایند فرز تراش با ابزار فرز انگشتی قطر ۶ و قطعه کار فولادی ۱.۷۲۲۵ و قطر ۱۹ میلی‌متر

	n_w	n_t	a_f	F_x	F_y	F_z	F_r	P_s
T1	100	565	22	7.196	14.24	14.43	21.515	1615.78
T2	100	565	36	8.21	28.56	19.91	35.773	1252.55
T3	100	565	63	9.842	35	20.91	41.943	799.03

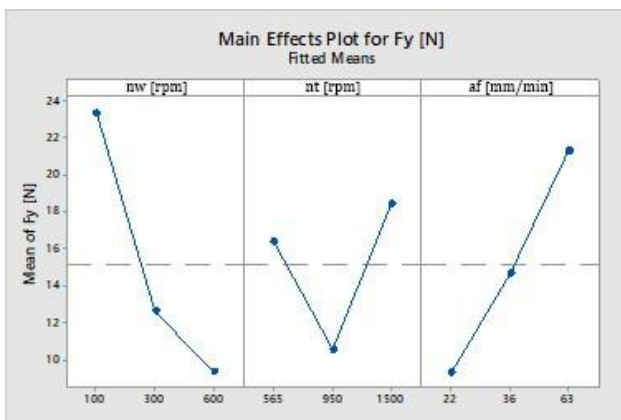
مقادیر استخراج شده از آباکوس و برای تعدادی محدود از آزمون‌ها در جدول ۹ ارائه شده است.

جدول ۹ مقادیر نیروهای ماشین کاری rf1 - F_x, rf2 - F_z, rf3 - F_y حاصل از محاسبات عددی در محیط آباکوس

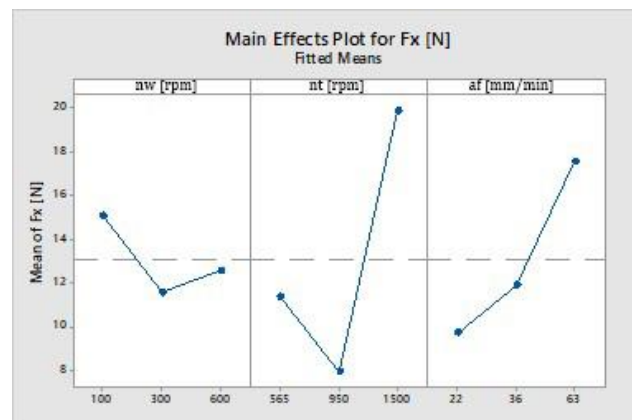
	ABQ-F _x -rf1-novib	ABQ-F _z -rf2-novib	ABQ-F _y -rf3-novib	ABQ-F _r -novib	P [N.mm/min]	P _s [N/mm ²]
T25	0.43	3.26	2.71	4.26	108982.13	912.39
T26	0.75	5.20	4.50	6.91	182104.14	931.68
T27	1.20	8.79	7.61	11.69	306195.33	895.17

در شکل ۴ نمودار تأثیر تغییرات پارامترهای مستقل بر روی نیروهای برشی F_x, F_y, F_z نمایش داده شده است. افزایش نرخ پیشروی ابزار موجب افزایش نیروهای برشی شده است. با ملاحظه نسبت تأثیر افزایشی نرخ پیشروی ابزار بر روی نیروهای برشی، انتظار کاهشی شدن انرژی مخصوص تراش (که بهبود راندمان برش را به دنبال خواهد داشت) دور از انتظار نیست. اثر نرخ پیشروی ابزار همانند اثر ضخامت براده نتراشیده است که با افزایش نرخ پیشروی ابزار، انرژی مخصوص تراش را کاهش می‌دهد. مطابق جدول ۸ و ردیف آزمایش‌های T10, T12 با افزایش حدود سه برابری نرخ پیشروی ابزار از ۲۲ میلی‌متر بر دقیقه به ۶۳ میلی‌متر بر دقیقه مقادیر نیروهای برشی F_x, F_y, F_z به ترتیب ۸۸، ۲۳۷ و ۱۰۰ درصد افزایش را نشان می‌دهد. بروز این پدیده دلیلی بر افزایش راندمان برش و کاهش انرژی مخصوص تراش است. همچنین مطابق داده‌های جدول ۸ و ردیف آزمایش‌های T10, T12 با افزایش حدود سه برابری نرخ پیشروی ابزار، افزایش ۲.۳ برابری پارامتر نیروی براینده F_r حاصل شده است.

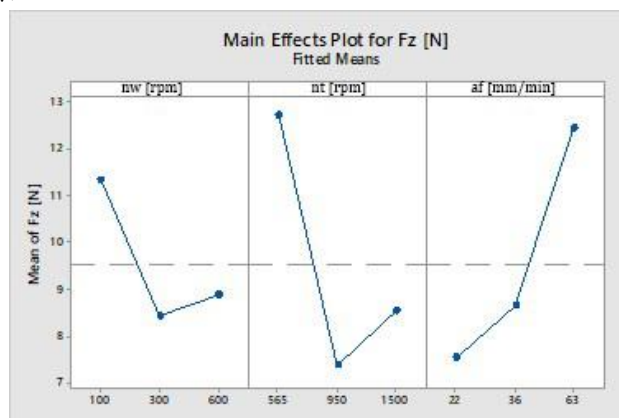
مطابق داده‌های به‌دست آمده، افزایش سرعت دورانی ابزار و سرعت دورانی قطعه‌کار موجب افزایش پیوسته نیروهای برشی F_x, F_y, F_z نمی‌گردد، همان‌طور که مشاهده می‌شود در سرعت دورانی ۹۵۰ دور بر دقیقه ابزار و سرعت دورانی قطعه‌کار ۳۰۰ دور بر دقیقه مینیمم نیروهای برشی محقق شده است. احتمالاً تأثیر متقابل دو پدیده تشکیل لبه انباشته در حدود دورهای دورانی یادشده و بروز و تشدید پدیده ارتعاشات بر اثر اجرای فرایند فرز-تراش است که موجب پدید آمدن نقطه مینیمم در این نمودارها شده است. پارامترهای a_f, n_w, n_t در امتداد محور x به ترتیب معرف نرخ پیشروی ابزار، سرعت دورانی قطعه‌کار و سرعت دورانی ابزار است. متوسط حدود نیروهای برشی F_x, F_y, F_z نیز در محور y ارائه شده است.



(ب)



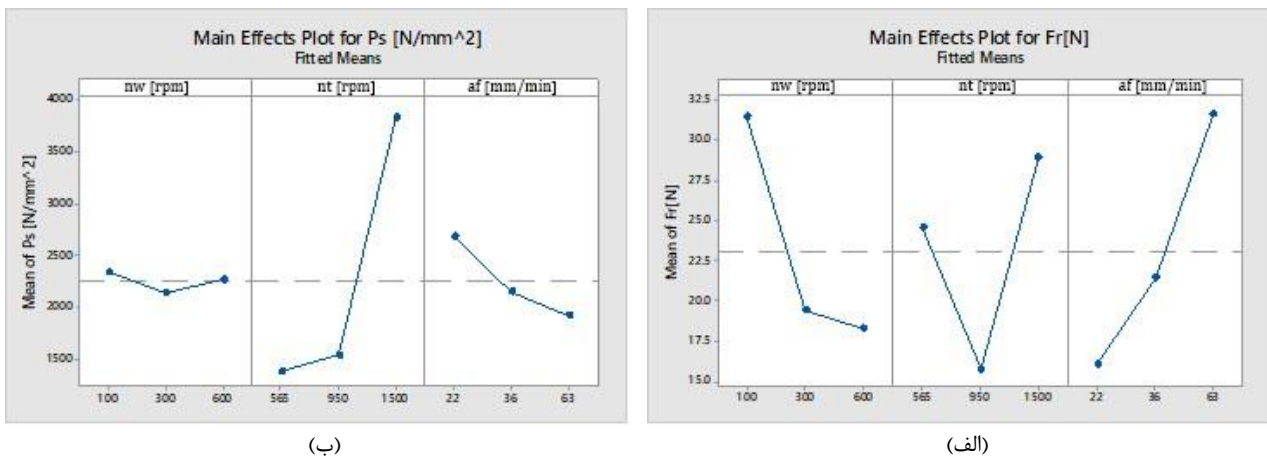
(الف)



(ج)

شکل ۴ تأثیر تغییرات پارامترهای مستقل برش بر روی نیروی برشی (الف) F_x، (ب) F_y، (ج) F_z

در شکل ۵ نمودار تأثیر تغییرات پارامترهای مستقل ماشین کاری بر روی نیروی برابند برش F_T و انرژی مخصوص تراش P_s نمایش داده شده است. مطابق شکل ۵-الف افزایش نرخ پیشروی ابزار موجب افزایش نیروی برابند برش شده است. همان گونه که انتظار می‌رفت، کاهش انرژی مخصوص تراش با افزایش نرخ پیشروی ابزار در شکل ۵-ب مشهود است. اگر چنانچه محدودیت کیفیت سطح وجود نداشته باشد، به دلیل اینکه افزایش نرخ پیشروی ابزار موجب افزایش راندمان برش می‌گردد، پیشنهاد می‌گردد که در مباحث تولیدی از حداکثر نرخ پیشروی ابزار استفاده شود. مثال آشکار این پیشنهاد برای اجرای مرحله خشن‌تراشی^۱ و نیمه پرداخت^۲ است. مطابق داده‌های آزمون، وجود اکسترمم برای حدود پارامتر انرژی مخصوص تراش، با تغییرات سرعت دورانی ابزار و سرعت دورانی قطعه‌کار، ثابت شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد در سرعت دورانی ۵۶۵-۹۵۰ دور بر دقیقه ابزار و حدود سرعت دورانی ۳۰۰ دور بر دقیقه قطعه‌کار، مینیمم انرژی مخصوص تراش محقق شده است.



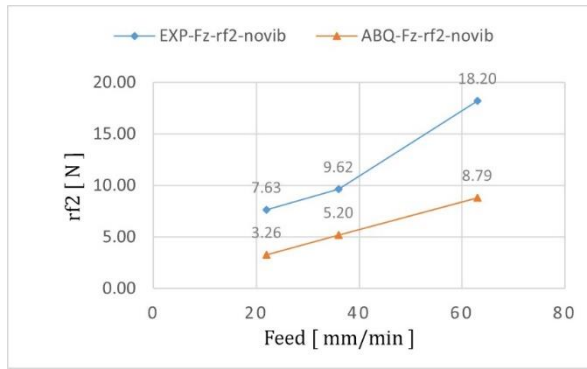
شکل ۵ تأثیر تغییرات پارامترهای مستقل ماشین کاری بر روی (الف) نیروی برابند برش F_T ، (ب) انرژی مخصوص تراش P_s

در شکل ۶ مقادیر مؤلفه نیروهای خروجی آباکوس با مقادیر تجربی مقایسه شده است. در این شکل هر کدام از مؤلفه‌های نیرویی F_x ، F_y ، F_z در آزمون‌های تجربی، با معادل پارامتر نیروئی حاصل از آباکوس (شامل rf1, rf2, rf3) مقایسه شده است. شیب مثبت تأثیر افزایش نرخ پیشروی ابزار بر روی مؤلفه‌های نیرویی حاصل از آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی آباکوس مشهود است. در شکل ۷ تأثیر مثبت افزایش مؤلفه نرخ پیشروی ابزار بر روی مؤلفه برابند برش، توان مصرفی و انرژی مخصوص تراش نمایش داده شده است.

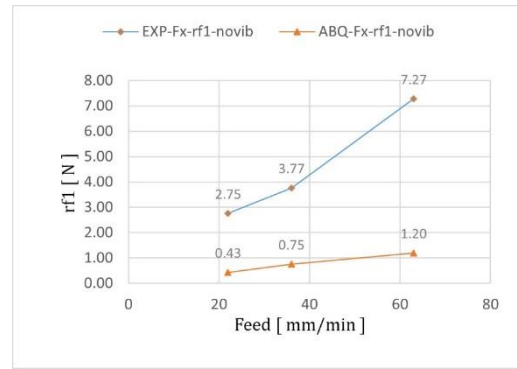
در شکل ۸ طرح مدل‌سازی شده و نمایش مش در فرایند فرز-تراش در محیط نرم‌افزار آباکوس نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که یکی دلیل مهم استفاده از نرم افزار آباکوس، قابلیت اعمال چرخش هم‌زمان به ابزار و قطعه کار می‌باشد. موضوع بسیار مهمی که در نرم‌افزار تجاری مشابه دفرم، اگر غیر ممکن نباشد، بسیار زمان‌بر و مشکل خواهد بود.

در شکل ۹ خروجی نرم‌افزار آباکوس برای مؤلفه‌های نیرویی rf1, rf2, rf3 و همچنین نیروی برابند نمایش داده شده است. مطابق شکل ۹ بخش کوتاه از زمان درگیری ابزار و قطعه کار (۰/۳-۰/۲۲ ثانیه) که کمی بیشتر از یک دور کامل درگیری ابزار است، نمایش داده شده است. همان‌گونه که از این شکل‌ها معین است، لبه‌های برش ابزار به تدریج درگیر کار شده و پس از طی کسری از ثانیه از کار خارج می‌شوند. روند شروع اعمال نیروهای ماشین کاری از صفر تا مقدار حداکثر و همچنین کاهش مجدد تا مقدار مینیمم، مؤید این مطلب مهم است. لازم به ذکر است که در بررسی و تحلیل مقادیر نیرویی مذکور، از نمایش مرحله ورود ابزار به کار^۳ و همچنین مرحله پیش ماشین کاری^۴ اجتناب شده است.

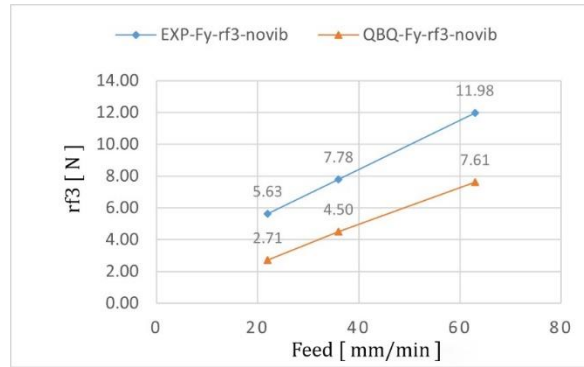
1 Rough Machining
2 Semi Finishing
3 Penetration Step
4 Pre-machining Step



(ب)

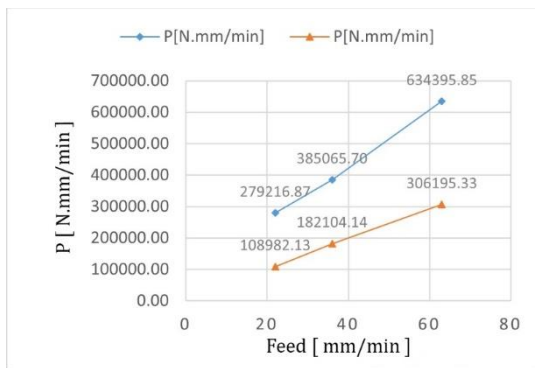


(الف)

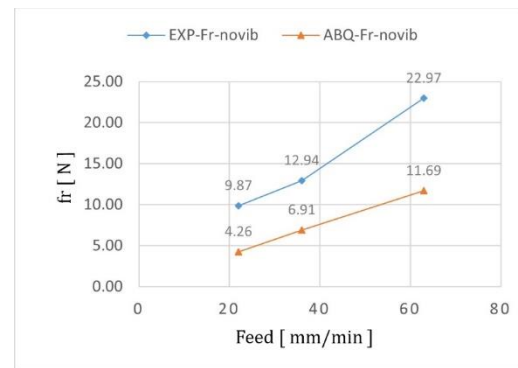


(ج)

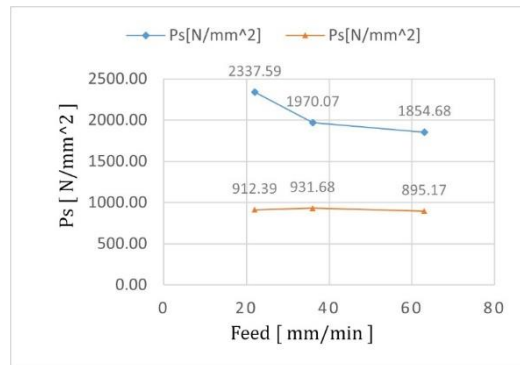
شکل ۶ نمایش تأثیر افزایش نرخ پیشروی ابزار بر روی (الف) مؤلفه نیروی $F_x - rf1$ ، (ب) $F_z - rf2$ و (ج) $F_y - rf3$ در آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی در نرم‌افزار آباکوس



(ب)

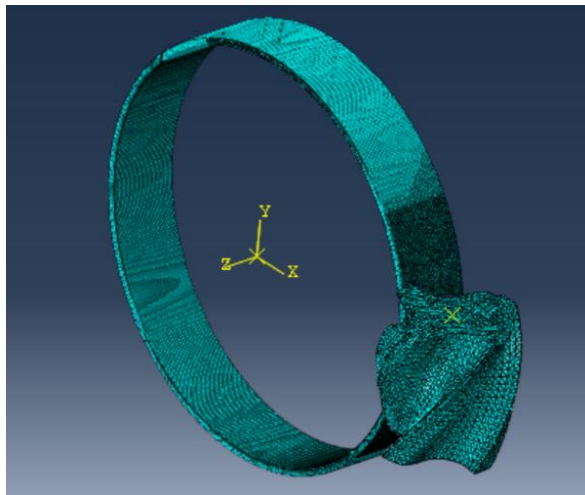


(الف)

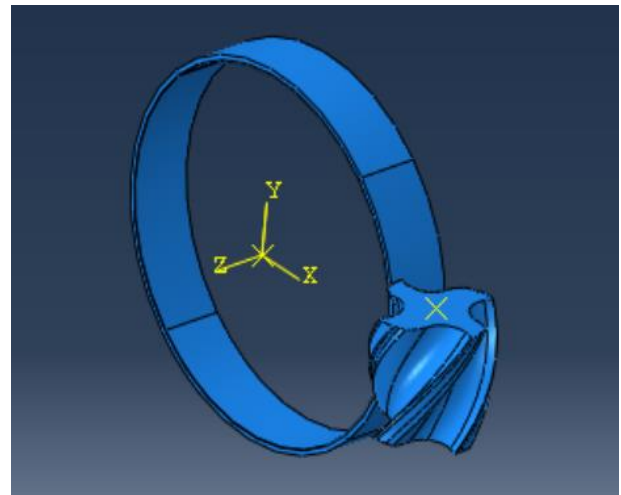


(ج)

شکل ۷ نمایش تأثیر افزایش نرخ پیشروی ابزار بر روی (الف) مؤلفه برابند نیروهای ماشین‌کاری F_r و (ب) مؤلفه توان برش p و (ج) انرژی مخصوص تراش P_s در آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی در نرم‌افزار آباکوس

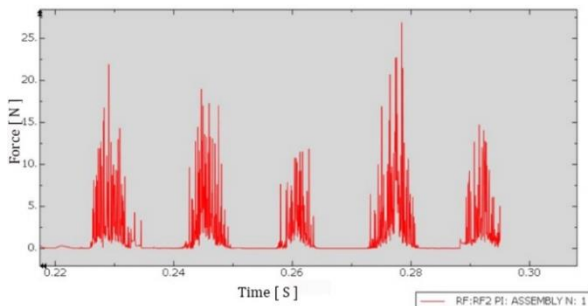


(ب)

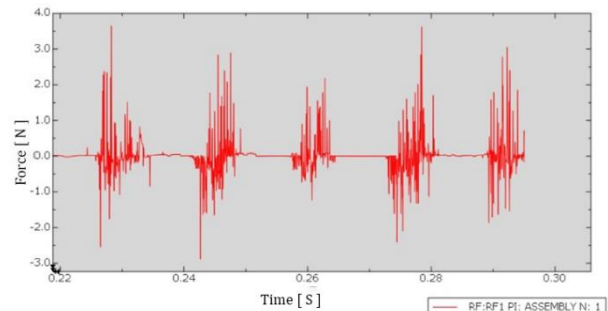


(الف)

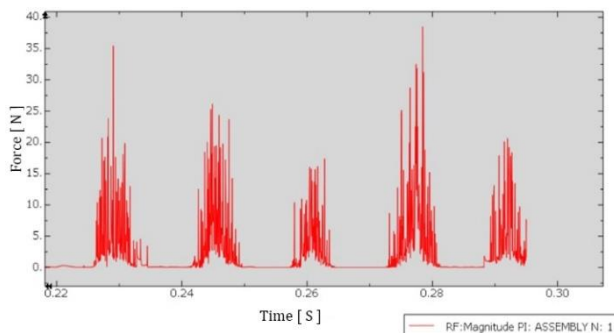
شکل ۸ الف) نمای کلی طرح مدل‌سازی شده، ب) نمایش شبکه‌بندی (مش) مدل فرز-تراش در محیط نرم‌افزار آباکوس، ابزار فرز انگشتی ۴ برش خورده و قطعه‌کار به صورت لوله نمایش داده شده است



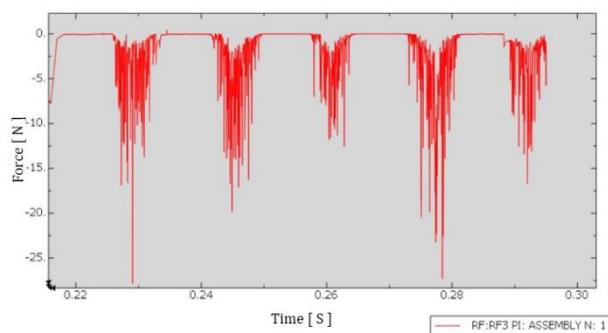
(ب)



(الف)



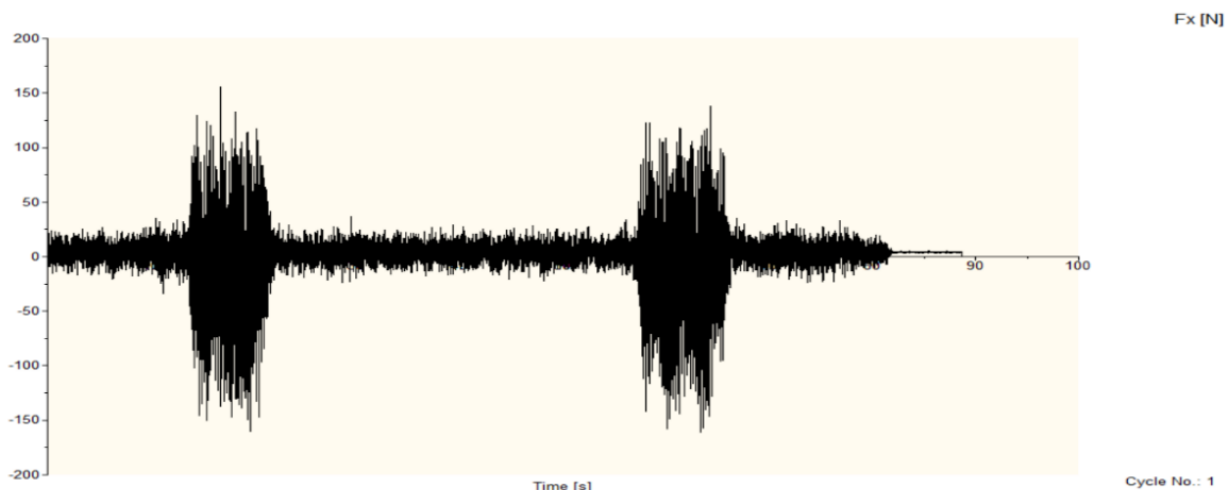
(د)



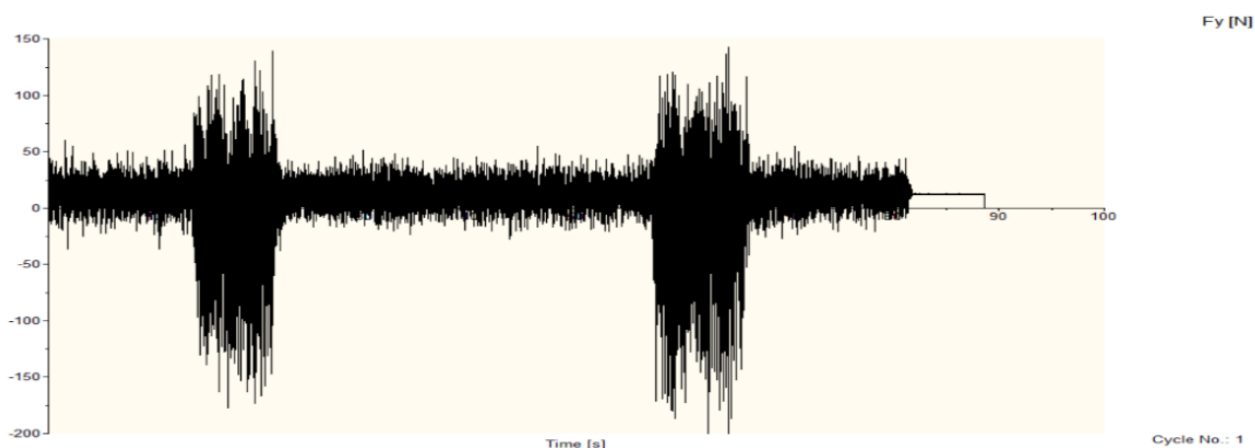
(ج)

شکل ۹ خروجی نرم‌افزار آباکوس برای مؤلفه‌های نیرویی rf1, rf2, rf3 و نیروی برش به ترتیب در الف، ب، ج، و د). جنس قطعه‌کار فولاد Mo40، ابزار فرز ۴ پر سالیید کارباید، سرعت دورانی ابزار ۹۵۰ دور بر دقیقه، سرعت دورانی قطعه کار ۳۰۰ دور بر دقیقه، نرخ پیشروی ابزار ۳۶ میلی‌متر بر دقیقه

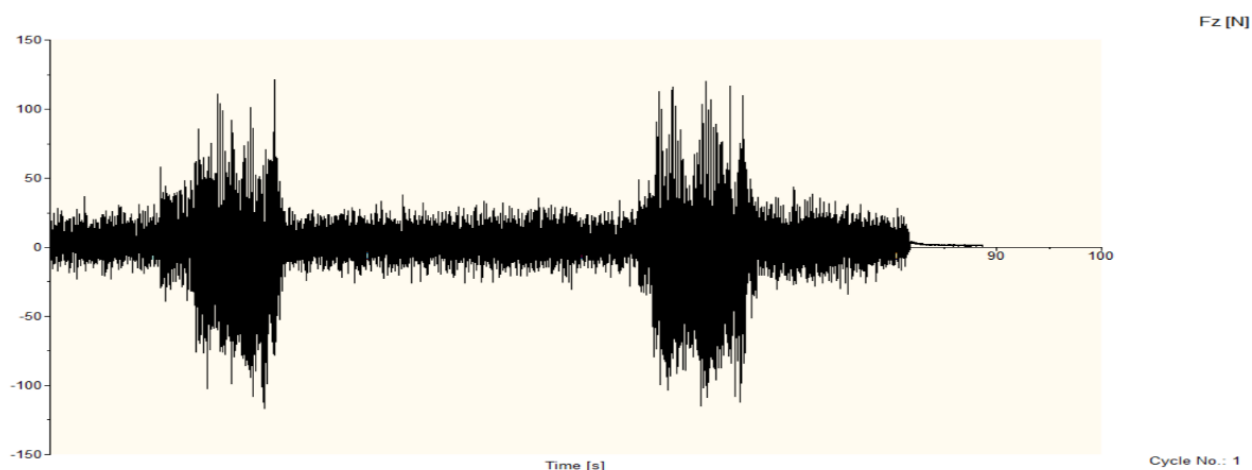
در شکل ۱۰ خروجی دینامومتر کیستلر برای مؤلفه‌های نیروئی F_x , F_y , F_z و برای دو حالت با ارتعاشات التراسونیک و بدون آن نمایش داده شده است. کل زمان اجرای آزمون برای هر دو حالت مذکور حدود ۸۰ ثانیه بوده است. مکث ۳۰ ثانیه‌ای بین دو درگیری ابزار و قطعه‌کار مربوط به تنظیمات ژنراتور تولید ارتعاشات التراسونیک می‌باشد. زمان درگیری ابزار و قطعه‌کار برای هر مرحله از تست با توجه به نرخ پیشروی ۶۳ میلی‌متر بر دقیقه کمتر از ۱۰ ثانیه بوده است. در این آزمایش تجربی سرعت دورانی قطعه‌کار ۱۰۰ دور بر دقیقه و سرعت دورانی ابزار ۱۵۰۰ دور بر دقیقه بوده است (لازم به ذکر است که بخش ارتعاشی شکل مذکور موضوع تحقیق دیگری از نویسندگان پژوهش حاضر می‌باشد).



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۰ خروجی دینامومتر کیستلر برای مولفه‌های نیرویی الف) F_x ، ب) F_y ، ج) F_z . شرایط آزمون: جنس قطعه‌کار فولاد 1.7225، ابزار فرز ۴ پر سالیید کارباید، سرعت دورانی ابزار ۱۵۰۰ دور بر دقیقه، سرعت دورانی قطعه‌کار ۱۰۰ دور بر دقیقه، نرخ پیشروی ابزار ۶۳ میلی‌متر بر دقیقه و اجرای آزمایش در دو حالت با اعمال ارتعاشات التراسونیک و بدون ارتعاشات

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش فرایند فرز-تراش بر روی فولاد کم‌آلیاژ ۱.۷۲۲۵ و با فرز انگشتی ۴ پر از جنس کاربید تنگستن و با طرح سر تخت و تحت پارامترهای مستقل ماشین‌کاری مختلف شامل سرعت دورانی قطعه‌کار، سرعت دورانی ابزار و نرخ پیشروی ابزار بررسی شد. مؤلفه‌های نیروی برش F_x , F_y , F_z در جریان انجام فرایند ماشین‌کاری از دینامومتر قرائت شده و نیروی برش و همچنین انرژی مخصوص تراش محاسبه شده است. خروجی نرم‌افزار آباکوس شامل مؤلفه‌های نیرویی r_f1 , r_f2 , r_f3 جهت مقایسه با نیروهای حاصل از آزمون‌های تجربی ثبت شده است. برای تعداد محدودی از آزمون‌ها تحلیل فرایند برش در محیط نرم‌افزار آباکوس انجام و جهت مقایسه با مقادیر نیرویی حاصل از آزمون‌های تجربی انجام شده است. از نتایج حاصل از پژوهش حاضر به‌طور اجمالی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- (۱) مطابق آزمون‌های تجربی و تحلیل عددی، افزایش نرخ پیشروی ابزار موجب افزایش نیروهای برش F_x , F_y , F_z و نیروی برآیند برش F_r می‌گردد.
- (۲) افزایش نیروهای ماشین‌کاری به نسبت افزایش نرخ پیشروی ابزار کمتر بوده و به همین دلیل انرژی مخصوص تراش در این فرایند با افزایش نرخ پیشروی ابزار کاهش یافته و راندمان برش افزایش یافته است؛ به‌طوری‌که با افزایش سه برابری نرخ پیشروی ابزار، نیروی برآیند ماشین‌کاری تا حدود ۲/۳ برابر زیاد شده و انرژی مخصوص تراش هم تا حدود ۱۸/۱ درصد کاهش می‌یابد.
- (۳) مطابق تحلیل عددی انجام شده، افزایش سه برابری نرخ پیشروی ابزار، نیروی برآیند ماشین‌کاری را تا حدود ۲/۷ برابر افزایش داده و انرژی مخصوص تراش را تا حدود ۴ درصد کاهش می‌دهد.
- (۴) با افزایش سرعت دورانی ابزار، مؤلفه 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 ۹۵۰ دور بر دقیقه ابزار بوده است. در این محدوده انرژی مخصوص تراش کمترین مقدار را به خود اختصاص داده است. به نظر می‌رسد که تأثیر تغییر هندسه قلم به‌واسطه تشکیل لبه انباشته و بروز پدیده ارتعاشات در کاهش نیروهای برشی و انرژی مخصوص تراش مؤثر بوده است.
- (۵) با افزایش سرعت دورانی قطعه‌کار مؤلفه نیروهای برش F_x , F_y , F_z و همچنین انرژی مخصوص تراش P_s کاهش یافته به‌طوری‌که شیب کاهش نیروها (و البته انرژی مخصوص تراش) در محدوده ۳۰۰-۶۰۰ دور بر دقیقه کمتر از محدوده ۱۰۰-۳۰۰ دور بر دقیقه است. مطابق تحقیق حاضر نقطه بهینه سرعت دورانی قطعه‌کار برای داشتن حداقل نیرو و انرژی مخصوص تراش حدود ۳۰۰ دور بر دقیقه است.

فهرست علائم

V_r	سرعت برآیند برش [m/min]
F_x, F_y, F_z	نیروهای برشی [N]
P_s	انرژی مخصوص تراش [N/mm ²]
D_w	قطر قطعه‌کار [mm]
D_t	قطر ابزار [mm]
V	سرعت برشی ابزار [m/min]
a_f	نرخ پیشروی ابزار [mm/rev]
R_m	استحکام کششی [N/mm ²]
n_w	سرعت دورانی قطعه‌کار [rpm]
n_t	سرعت دورانی ابزار [rpm]

References

- [1] Choudhury S, Bajpai J. Investigation in orthogonal turn-milling towards better surface finish. *Journal of Materials Processing Technology*. 2005 Jan 15;170(3):487–493. doi: [10.1016/j.jmatprotec.2004.12.010](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.12.010)
- [2] Berenji KR, Karagüzel U, Özlü E, Budak E. Effects of turn-milling conditions on chip formation and surface finish. *CIRP Annals*. 2019 Jan 1;68(1):113–6. doi: [10.1016/j.cirp.2019.04.067](https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.04.067)
- [3] Schulz H, Spur G. High speed turn-milling—a new precision manufacturing technology for the machining of rotationally symmetrical workpieces. *CIRP annals*. 1990 Jan 1;39(1):107–9. doi: [10.1016/S0007-8506\(07\)61013-0](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61013-0)
- [4] Pogacnik M, Kopac J. Dynamic stabilization of the turn-milling process by parameter optimization. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2000 Feb 1;214(2):127–35. doi: [10.1243/0954405001517504](https://doi.org/10.1243/0954405001517504)
- [5] Lei S, Liu W. High-speed machining of titanium alloys using the driven rotary tool. *International journal of machine tools and manufacture*. 2002 May 1;42(6):653–61. doi: [10.1016/S0890-6955\(02\)00012-3](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(02)00012-3)
- [6] Savas V, Ozay C. Analysis of the surface roughness of tangential turn-milling for machining with end milling cutter. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007 Feb 19;186(1–3):27–38. doi: [10.1016/j.jmatprotec.2006.09.040](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.09.040)
- [7] Karagüzel U, Lazoglu I, Altintas Y, Budak E. Analytical modeling of turn-milling process geometry, kinematics and mechanics. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2015 Mar;91:24–33. doi: [10.1016/j.ijmachtools.2014.11.014](https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2014.11.014)
- [8] Karagüzel U, Özlü E, Budak E. Effects of tool axis offset in turn-milling process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2016 Feb;231:239–247. doi: [10.1016/j.jmatprotec.2015.12.020](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.12.020)
- [9] Amini S, Baraheni M, Khaki M. Empirical study on ultrasonic assisted turn-milling. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2021 Jun;235(3):699–708. doi: [10.1177/09544089211008714](https://doi.org/10.1177/09544089211008714)
- [10] Amini SJ, Saebi Rad R. Experimental investigation of the effect of changes in the machining parameters of the turn-milling process. *Modares Mechanical Engineering*. 2023;23(10):43–9. [In Persian]
- [11] Sun J, Li P, Zhang S, Chen Y, Lu H, Chen G, Shao D. Simulation and experimental study of ultrasonic vibration-assisted milling of GH4169 high-temperature alloy. *Alexandria Engineering Journal*. 2023 Jul;73:403–413. doi: [10.1016/j.aej.2023.04.065](https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.04.065)
- [12] Feng X, Dong Z, Li B, Peng H. Finite element simulation and experimental analysis of axial ultrasonic vibration-assisted micro-milling of 316L stainless steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024 Aug;133(9):4365–83. doi: [10.1007/s00170-024-13807-1](https://doi.org/10.1007/s00170-024-13807-1)
- [13] Huahong M, Wenchao X, Lan W, Ziyuan Z, Zhibiao T, Zhibiao L. Experimental study and modeling of cutting force in high-speed milling of Ti-6Al-4V titanium alloy. *Journal of Mechanics*. 2025;41:55–63. doi: [10.1093/jom/ufaf006](https://doi.org/10.1093/jom/ufaf006)
- [14] Liu X, Shan C, Xiong Y, Zhou C. Modeling and simulation for orthogonal cutting force in ultrasonic vibration-assisted machining in situ TiB₂/Al MMCs. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2025 Mar;137(3):1667–82. doi: [10.1007/s00170-025-15260-0](https://doi.org/10.1007/s00170-025-15260-0)
- [15] Fischer U, Gomeringer R, Heinzler M, Kilgus R, Näher F, Oesterle S, Paetzold H, Stephan A. *Manual de tecnologia metal mecânica*. Editora Blucher; 2011.
- [16] Maftah A. Finite element simulation of orthogonal metal cutting using an ALE approach [master's thesis]. Fredericton (NB): University of New Brunswick; 2008.
- [17] Kiliçaslan C. Modelling and simulation of metal cutting by finite element method. Master's degree thesis. İzmir Institute of Technology, Turkey. 2009 Dec.
- [18] Arrazola PJ, Özel T, Umbrello D, Davies M, Jawahir IS. Recent advances in modelling of metal machining processes. *Cirp Annals*. 2013 Jan 1;62(2):695–718. doi: [10.1016/j.cirp.2013.05.006](https://doi.org/10.1016/j.cirp.2013.05.006)
- [19] Jafarian F, Amirabadi H, Sadri J. Integration of finite element simulation and intelligent methods for evaluation of thermo-mechanical loads during hard turning process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2013 Feb;227(2):235–48. doi: [10.1177/0954405412466995](https://doi.org/10.1177/0954405412466995)
- [20] DeMange JJ, Prakash V, Pereira JM. Effects of material microstructure on blunt projectile penetration of a nickel-based super alloy. *International Journal of Impact Engineering*. 2009 Aug 1;36(8):1027–43. doi: [10.1016/j.ijimpeng.2009.01.007](https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2009.01.007)
- [21] Wang K. Calibration of the Johnson–Cook failure parameters as the chip separation criterion in the modelling of the orthogonal metal cutting process [doctoral dissertation]. Dayton (OH): Wright State University; 2016.