

# بررسی سایش ابزار و توان مصرفی دستگاه در تراشکاری خشک فولاد ۳۰۴ با روش رویه پاسخ

رضا بنزاده<sup>۱</sup>، محمد ریاحی<sup>۲</sup>، محمد خسروآبادی<sup>۳</sup>

۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، rezabannazadeh@yahoo.com

۲ استاد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

۳ کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۵/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۹/۰۲

## چکیده

فولاد آستنیتی ۳۰۴ بیشترین کاربرد را در بین فولادهای زنگ‌نزن دارد. استحکام بالا، هدایت حرارتی کم، انعطاف‌پذیری بالا و تمایل به کارسختی زیاد فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی، اصلی‌ترین عواملی هستند که فولادهای ۳۰۴ را به موادی سخت در ماشینکاری مبدل کرده‌اند. هدف از انجام این پژوهش بررسی تأثیر پارامترهای ماشینکاری بر عمر ابزار و توان مصرفی دستگاه در فرایند تراشکاری خشک فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۰۴ است. برای این منظور سرعت برشی و زمان ماشینکاری هر کدام در سه سطح، به‌عنوان متغیرهای مسئله انتخاب شدند. روش رویه پاسخ، با به‌کارگیری طرح مرکب مرکزی، به‌منظور طراحی آزمایش‌های تجربی مورد استفاده قرار گرفت. ارتباط بین پارامترهای ماشینکاری و متغیرهای خروجی با استفاده از روش رویه پاسخ مدل شدند. همچنین به‌منظور بررسی کفایت و مؤثر بودن مدل ریاضی و متغیرهای مربوطه از روش آنالیز واریانس استفاده شده است. نتایج حاصل تطابق خوبی را بین مقادیر اندازه‌گیری شده سایش ابزار و توان مصرفی دستگاه و مقادیر بهینه پیش‌بینی شده مدل توسعه‌یافته نشان دادند. با در نظر گرفتن ترم‌های مؤثر و مقادیر P کمتر از ۰/۰۵ (سطح اطمینان ۹۵ درصد) با استفاده از روش آنالیز واریانس، مدل‌های ریاضی مناسب برای پاسخ‌های خروجی انتخاب شدند.

**واژگان کلیدی:** سایش ابزار، توان مصرفی، فولاد ۳۰۴، روش رویه پاسخ، تراشکاری خشک

## ۱. مقدمه

می‌شوند. در بین تمامی فولادهای زنگ‌نزن، فولادهای آستنیتی بزرگترین گروه را تشکیل می‌دهند. قابلیت شکل‌پذیری عالی و چقرمگی بالا حتی در دمای کرایونیک از ویژگی‌های این نوع فولادهاست که قابلیت قابل ملاحظه‌ای در سخت‌شوندگی با کار سرد را دارا می‌باشند. به‌طور کلی مقاومت در برابر خوردگی و

فولادهای زنگ‌نزن جزء آلیاژهای پایه آهنی هستند که در آنها کروم نقش تعیین‌کننده‌ای را برعهده دارد و نیکل عنصر اصلی در پایداری آستنیت است. این فولادها به پنج دسته اصلی فولاد زنگ‌نزن فریتی، مارتنزیتی، آستنیتی، آستنیتی - فریتی و فولادهای قابل سخت شدن با روش رسوب‌سختی تقسیم

اکسیدشدن، قابلیت شکل‌پذیری بالا، چقرمگی بالا و خواص مکانیکی مناسب پارامترهایی هستند که در انتخاب این فولادها مورد توجه قرار می‌گیرند. فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی ۳۰۴ بیشترین کاربرد را در بین فولادهای زنگ نزن دارند [۱] به‌گونه‌ای که در صنایع غذایی، خودروسازی، صنایع هوایی و ساخت تجهیزات آزمایشگاهی به‌طور وسیعی از این فولادها استفاده می‌شود [۲]. استحکام کششی بالا، قابلیت هدایت گرمایی پایین، فاصله زیاد بین استحکام تسلیم کششی و استحکام نهایی، نرخ کارسختی بالا، شکل‌پذیری خوب و چقرمگی بالا از ویژگی‌های این نوع فولادها هستند که فولاد ۳۰۴ را به یکی از فولادهای سخت در ماشینکاری تبدیل کرده‌اند [۳-۴]. در ماشینکاری این فولادها می‌توان برای کاهش سایش ابزار و حرارت منطقه برش، از سیال خنک‌کننده استفاده کرد. افزایش کیفیت سطح، افزایش نرخ برداشت ماده، افزایش عمر ابزار، بهبود کیفیت تولید و کاهش دمای ناحیه برش، از مزایای ماشینکاری با استفاده از سیال خنک‌کننده هستند [۵-۶]؛ اما مشکلات زیست‌محیطی سیالات خنک‌کاری همواره به‌عنوان یکی از معایب بزرگ آنها مورد توجه قرار گرفته است. علاوه بر این ۱۶ تا ۲۰ درصد هزینه‌های تولید مربوط به هزینه‌های مواد خنک‌کننده می‌باشند [۷-۸]. در مقابل، ماشینکاری خشک به‌عنوان یک فرایند مطلوب برای محیط زیست به‌حساب می‌آید. از جمله مزایای ماشینکاری خشک می‌توان عدم آلودگی اتمسفر و آب، هزینه‌های تمیزکاری کمتر، خطرناک نبودن برای سلامتی، مضر نبودن برای پوست، عدم حساسیت‌های بدن، کاهش تنش‌ها و شوک‌های حرارتی وارد به قطعه‌کار را نام برد [۹-۱۰]. در چند دهه اخیر، به‌دلیل مشکلات زیست‌محیطی سیالات خنک‌کننده، صنایع تولیدی به شکل وسیعی از فرایندهای ماشینکاری خشک استفاده کرده‌اند [۱۱]. در راستای استفاده از ماشینکاری خشک، تحقیقات مختلفی انجام شده است. هارن (۲۰۰۱) به بررسی نواحی ساییده‌شدن ابزار در تراشکاری خشک آلیاژ تیتانیوم<sup>۱</sup> با ثابت نگاه‌داشتن عمق بار پرداخت [۱۲]. پس از انجام آزمایش‌ها علت از کار افتادگی بیشتر ابزارها سایش سطح آزاد آنها بود. وی مشاهده کرد که با افزایش زمان ماشینکاری، سایش ابزار بیشتر شده و تغییر شکل پلاستیک در سطح ماشینکاری شده رخ داده است. سپس دینیز و میکارونی (۲۰۰۲) تراشکاری خشک فولاد ۱۰۴۵ را با ثابت نگاه

داشتن عمق بار بررسی کردند [۱۳]. افزایش کیفیت سطح در هنگام استفاده از ابزار با شعاع لبه بیشتر و کاهش توان مصرفی در هنگام استفاده از سرعت برشی کمتر از نتایج تحقیقات آنها گزارش شده است. نوردین و همکاران (۲۰۰۷) تأثیر سرعت برشی و پیشروی بر عمر ابزار در تراشکاری خشک فولاد ابزار مارتنزیتی با سختی ۴۳ تا ۴۵ راکول سی. را مورد مطالعه قرار دادند [۱۴]. نتایج آنها نشان داد که با کاهش سرعت برشی و پیشروی عمر ابزار افزایش پیدا خواهد کرد. در تحقیقی دیگر کاتوکو و همکاران (۲۰۰۹) به بررسی تأثیر سرعت برشی بر سایش ابزار<sup>۲</sup> در تراشکاری خشک چدن نشکن آستمپرینگ شده<sup>۳</sup> پرداختند [۱۵]. نرخ بالای سایش ابزار تا سرعت برشی ۲۰۰ متر بر دقیقه و کاهش نرخ سایش ابزار بین سرعت‌های ۲۰۰ تا ۶۰۰ متر بر دقیقه از نتایج اصلی تحقیق انجام شده بود. دوپلز و همکاران (۲۰۱۱) با ثابت نگاه داشتن عمق بار و پیشروی به بررسی کیفیت سطح در تراشکاری خشک سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ پرداختند [۱۶]. آنها در سرعت‌های برشی ۴۰، ۶۰ و ۸۰ متر بر دقیقه آزمایش‌هایشان را انجام دادند و مشاهده کردند که کیفیت سطح وقتی سرعت برشی ۶۰ متر بر دقیقه است بهترین مقدار را دارا می‌باشد. پس از آنها فیلیپ و همکاران (۲۰۱۴) با رویکرد بررسی کیفیت سطح و عمر ابزار به ماشینکاری خشک فولاد زنگ نزن پرداختند [۱۷]. با استفاده از روش آنالیز واریانس و بررسی نتایج مشخص شد که مقدار پیشروی تأثیر بیشتری نسبت به سرعت برشی بر کیفیت سطح داشته و همچنین تأثیر سرعت برشی نسبت به مقدار پیشروی بر عمر ابزار بسیار بیشتر است. یکی از پژوهش‌های جدید که در زمینه عمر ابزار مربوط به سرا و میلی (۲۰۱۶) می‌باشد که با استفاده از سیگنال‌های ارتعاشی به بررسی سایش ابزار در تراشکاری خشک چدن خاکستری<sup>۴</sup> پرداختند [۱۸]. وگنر و همکاران (۲۰۱۵) نیز به مطالعه تراشکاری خشک آلیاژ تیتانیوم<sup>۵</sup> پرداختند [۱۹]. آنها گزارش کردند که افزایش سرعت برشی باعث بالا رفتن دما در ناحیه برش شده و لبه برنده ابزار ساییده شده و ابزار رو به زوال می‌رود. هان و چن (۲۰۱۵) در تراشکاری خشک فولاد ۴۱۱۹ و با ثابت نگاه‌داشتن عمق بار و پیشروی به این نتیجه رسیدند که عمر ابزارهای پوشش دار از عمر ابزارهای بدون پوشش بیشتر است [۲۰]. سلیک و همکاران (۲۰۱۶) نیز به مطالعه ابزارهایی با پوشش CVD و PVD در تراشکاری

خشک آلیاژ تیتانیوم<sup>۶</sup> پرداختند [۲۱]. نتایج حاکی از این بود که با افزایش سرعت برشی و پیشروی سایش ابزارها افزایش و کاهش مقدار پیشروی زبری سطح کاهش پیدا کرده است.

جدا از تحقیقاتی که در فرایند تراشکاری خشک و عمر ابزار صورت گرفته است، امروزه انرژی مصرفی ماشین‌آلات از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. افزایش دائمی انرژی مصرفی در دنیا و تأثیر مستقیم آن بر اقتصاد دنیا سبب افزایش شدید هزینه انرژی در چند دهه اخیر شده است. همچنین افزایش تولید محصولات و مصرف انرژی می‌تواند سبب تشدید آلودگی هوا و تغییر شرایط آب‌وهوایی در آینده شود. به همین دلایل حفظ انرژی به بخش مهمی از اقتصاد دنیا تبدیل شده است که در همین راستا پارلمان اروپا در یک نشست ویژه مجموعه‌ای از راه‌کارها به منظور کاهش انرژی مصرفی در صنایع تولیدی را تصویب کرد. همچنین در سال ۲۰۰۸ م، سازمان محیط زیست ۱۰ اولویت اصلی که توانایی کاهش مصرف انرژی دارند را منتشر کرد که اولین گروه را ماشین‌های ابزار به خود اختصاص داده است. بنابراین اهمیت توجه به توان مصرفی ماشین‌های ابزار و بررسی شرایط ماشینکاری به منظور کاهش انرژی مصرفی دستگاه بیش از پیش ضروری می‌باشد [۲۲].

در حال حاضر واحدهای صنعتی حدود نیمی از انرژی جهان را مصرف می‌کنند. این میزان مصرف انرژی نسبت به ۶۰ سال گذشته تقریباً دو برابر افزایش یافته است [۲۳]. در زمینه فعالیت‌هایی که با رویکرد کاهش انرژی انجام گرفته است، می‌توان به بررسی هانافی و همکاران (۲۰۱۲) اشاره کرد [۲۴]. آنها با استفاده از روش تاگوچی به بهینه‌سازی پارامترهای ماشینکاری در فرایند تراشکاری خشک کامپوزیت PEEK-CF30 به منظور رسیدن به کمترین میزان انرژی مصرفی و بهترین کیفیت سطح پرداختند. در تحقیقی دیگر بوشان (۲۰۱۳) به مطالعه کامپوزیت آلومینیم- کاربید سیلیسیم پرداخت و با استفاده از روش رویه پاسخ و بهینه‌سازی پارامترهای ماشینکاری توانست عمر ابزار را تا ۲۲/۱۲ درصد و انرژی مصرفی را تا ۱۳/۵۵ درصد کاهش دهد [۲۵]. همچنین کامپوسکو (۲۰۱۳) با استفاده از روش تاگوچی توانست با بهینه‌سازی پارامترهای ماشینکاری به هنگام تراشکاری خشک آلیاژ 6061-T6 انرژی مصرفی را کاهش دهد [۲۶]. با توجه به اهمیت ماشینکاری خشک و کاربرد فراوان فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴، در مقاله حاضر به بررسی

سایش سطح آزاد ابزار و توان مصرفی دستگاه در فرایند تراشکاری خشک فولاد ۳۰۴ پرداخته شده است. از طرفی، زمان ماشینکاری به‌عنوان پارامتری مهم در فرایندهای ساخت و تولید مد نظر قرار می‌گیرد، اما متأسفانه در فعالیت‌های پژوهشی کمتر به آن توجه شده است. در این مقاله علاوه بر سرعت برشی، تأثیر زمان ماشینکاری بر توان مصرفی و عمر ابزار به‌عنوان یک فعالیت جدید در نظر گرفته شده است.

## ۲. معیارهای از کار افتادگی ابزار

یکی از مهم‌ترین پارامترهایی که در هنگام ماشینکاری مد نظر می‌باشد، عمر ابزار است. عمر ابزار نشان‌دهنده عمر مؤثر و مفید ابزار است که برحسب مدت زمان از لحظه شروع برش تا یک نقطه پایانی که از روی معیار از کار افتادگی مشخص می‌شود، بیان می‌گردد. عامل اصلی اتمام عمر ابزار سایش در سطوح آزاد و براده آن است که با افزایش حرارت در نواحی برش شدت پیدا می‌کند. مهم‌ترین معیارهایی که برای عمر ابزار در نظر گرفته می‌شوند عبارت‌اند از [۲۷]:

۱. اندازه ابعاد و منطقه فرسایش بر روی سطح آزاد ابزار
۲. عرض و عمق گودال فرسایش بر روی سطح براده
۳. مقدار افزایش ثابت نیروهای برش و یا توان لازم جهت انجام عمل براده‌برداری
۴. آسیب کلی وارده به ابزار
۵. مقدار صافی سطح و ابعاد قطعه
۶. ایجاد ترک‌های ریز در لبه‌های برنده ابزار

## ۳. مواد و تجهیزات آزمایش

تمامی آزمایش‌ها بر روی ماشین تراش TN50BR ساخت شرکت ماشین‌سازی تبریز، که دارای حداکثر توان موتور ۵/۵ کیلووات، سرعت دوران اسپیندل بین ۲۲/۴ تا ۲۰۰۰ دور در دقیقه، پیشروی ۰/۰۵ تا ۶/۴ میلی‌متر بر دور، وزن ۱۸۵۰ کیلوگرم و طول ۳۵۷۵ میلی‌متر بود، انجام گرفت. جنس قطعه‌کار فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۰۴ بود که در جدول ۱ خصوصیات فیزیکی و گرمایی و در جدول ۲ ترکیب شیمیایی این فولاد مشخص شده است. برای اندازه‌گیری توان مصرفی دستگاه در حین ماشینکاری از وات‌متر مدل مولتی کیوب ساخت شرکت ان. دی. استفاده شد. این وات‌متر سه فاز با ولتاژ ۴۰۰

ولت و فرکانس ۵۰ هرتز بود. برای کنترل سرعت برشی و تنظیم دقیق آن در هنگام ماشینکاری به دلیل محدودیت‌های دستگاه تراش و پله‌ای بودن سیستم تغییر سرعت در آن، دستگاه تغییردهنده فرکانس (اینورتر) مدل SV040 iG5-4 ساخت شرکت ال. جی. با ولتاژ ۳۸۰ تا ۴۶۰ ولت و بازه تغییر فرکانس ۰/۱ تا ۴۰۰ هرتز مورد استفاده قرار گرفت. همچنین برای کنترل دوران دستگاه پس از اعمال تغییر فرکانس از دورسنج مدل iG5 ساخت شرکت ال. جی. استفاده شده است. علاوه بر این، برای

اندازه‌گیری سایش سطح آزاد ابزار از میکروسکوپ نوری المپیوس مدل PMG3 استفاده شده است. برای انجام آزمایش‌ها با توجه به اینکه ماشینکاری باید روی فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۰۴ انجام می‌گرفت، اینسرت کارباید پوشش‌دار ساخت شرکت کورلوی<sup>۷</sup> با کد استاندارد DNMG 150604-HM و گرید NC3030 استفاده شد. این اینسرت روی هولدر با کد استاندارد SDJCR2525M15 نصب گردید. همچنین هر آزمایش با استفاده از یک لبه ابزار جدید و سالم صورت پذیرفت.

جدول ۱. خواص فیزیکی فولاد ۳۰۴

مقدار	واحد	مشخصه
۸	(gr/cm <sup>3</sup> )	چگالی
۸۶	(GPa)	مدول برشی
۲۹	(Rc)	سختی
۲۱۵	(MPa)	استحکام تسلیم
۱۹۳	(GPa)	مدول الاستیسیته
۰/۵	(J/gr.k)	قابلیت گرمایی ویژه
۱۶/۲	(W/m.k)	قابلیت هدایت حرارتی
۰/۲۹	-	ضریب پواسون

جدول ۲. ترکیب شیمیایی فولاد ۳۰۴

درصد وزنی	عنصر
۰/۰۲۹	کربن
۱۸/۱۱	کروم
۸/۲	نیکل
۰/۵۶	سیلیسیم
۱/۶۸	منگنز
۰/۰۳	فسفر
۰/۰۹	نیتروژن
۰/۰۲	گوگرد
۰/۱۲	کبالت
۰/۶۶	مس
۰/۴۹	مولیبدن

#### ۴. طراحی آزمایش‌ها با استفاده از روش رویه پاسخ

##### ۴-۱. روش رویه پاسخ

در پژوهش حاضر، روش رویه پاسخ به‌عنوان روش طراحی آزمایش مورد استفاده قرار گرفته است. روش رویه پاسخ مجموعه تکنیک‌های ریاضی و آماری است که برای مدل‌سازی و

تحلیل مسائلی که پاسخ مورد نظرتحت تأثیر چندین متغیر قرار می‌گیرد، مفید است و هدف آن بهینه‌سازی این پاسخ است [۲۸]. اساس روش رویه پاسخ بر طراحی آزمایش‌ها و بهینه‌سازی آماری استوار است. طرح آزمایش به‌عنوان ابزاری مناسب برای مهندسان در توسعه، اصلاح و صرفه‌جویی در وقت،

هزینه‌های آزمایش‌ها و رفع عیوب آنها به‌کار گرفته می‌شود و استفاده به‌موقع از آن سبب کاهش زمان تولید و هزینه‌ها خواهد شد [۲۹]. مهم‌ترین هدف روش رویه‌پاسخ تعیین شرایط بهینه برای به‌دست آوردن بیشترین یا کمترین مقدار پاسخ در خروجی است.

#### ۴-۲. طراحی آزمایش

در پژوهش حاضر، از طرح مرکب مرکزی<sup>۸</sup> با ضریب چرخش‌پذیری ۱ برای بررسی فرایند برش استفاده شده است. این طرح یکی از طرح‌های مؤثر در بررسی اثر ترم‌های خطی و درجه دو و تعامل اثر آنها در مدلسازی فرایند است [۳۰]. در این طرح برای هر یک از متغیرها سه سطح در نظر گرفته می‌شود.

متغیرها در این تحقیق عبارت‌اند از: سرعت برشی و زمان ماشینکاری. جدول ۳ این متغیرها را به‌همراه سطوحشان نشان می‌دهد. در تمام آزمایش‌ها مقدار عمق برش ۱/۵ میلی‌متر و مقدار پیشروی ۰/۲۴ میلی‌متر بر دور در نظر گرفته شده است. این مقادیر با توجه به جنس قطعه‌کار، جنس و نوع ابزار برشی و شرایط ماشینکاری، از کتاب راهنمای شرکت سازنده انتخاب شده است. در واقع این مقادیر، مقادیر بهینه‌ای می‌باشند که شرکت کورلوی برای اینسرت و فولاد زنگ‌نزن مورد استفاده پیشنهاد کرده است. پاسخ‌های خروجی تحقیق حاضر، توان ماشینکاری برحسب کیلووات و سایش سطح آزاد ابزار برحسب میلی‌متر هستند. در جدول ۴ آزمایش‌های طراحی شده و نتایج آنها را قابل مشاهده می‌باشند.

جدول ۳. پارامترهای ورودی و سطوح آنها

سطوح کد شده			واحد	پارامتر
+۱	۰	-۱		
۱۶۰	۱۳۰	۱۰۰	m/min	سرعت برشی
۴	۳	۲	min	زمان ماشینکاری

جدول ۴. آزمایش‌های طراحی شده و نتایج آنها

شماره آزمایش	مقادیر گذشته		مقادیر واقعی		مقادیر خروجی	
	T	V	T	V	P <sub>(Kw)</sub>	V <sub>B(max)</sub>
۱	-۱	-۱	۲	۱۰۰	۰/۰۳۸	۰/۰۸۴
۲	۱	-۱	۲	۱۶۰	۰/۰۴۷	۰/۲۲۶
۳	-۱	۱	۴	۱۰۰	۰/۰۵۰	۰/۲۲۳
۴	۱	۱	۴	۱۶۰	۰/۰۶۰	۰/۸۶۸
۵	-۱	۰	۳	۱۰۰	۰/۰۴۵	۰/۰۸۷
۶	۱	۰	۳	۱۶۰	۰/۰۵۱	۰/۴۵۳
۷	۰	-۱	۲	۱۳۰	۰/۰۴۸	۰/۱۳۵
۸	۰	۱	۴	۱۳۰	۰/۰۵۶	۰/۳۳۲
۹	۰	۰	۳	۱۳۰	۰/۰۵۲	۰/۲۵۷
۱۰	۰	۰	۳	۱۳۰	۰/۰۵۲	۰/۲۵۹
۱۱	۰	۰	۳	۱۳۰	۰/۰۵۳	۰/۲۳۸
۱۲	۰	۰	۳	۱۳۰	۰/۰۵۴	۰/۱۹۶
۱۳	۰	۰	۳	۱۳۰	۰/۰۵۳	۰/۲۲۹

### ۳-۴. مدلسازی ریاضی

ارتباط بین پارامترهای ورودی و پاسخها به شکل ۱ نشان داده می‌شود.

$$Y = F(V, T) \quad (۱)$$

که در آن  $F$  تابع پاسخ یک مدل رگرسیون درجه دوم بوده که پاسخ را تخمین می‌زند. برای  $K$  فاکتور مدل رگرسیون به شکل ۲ می‌باشد.

$$Y = B_0 + \sum_{i=1}^k B_i X_i + \sum_{i,j=1}^k B_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^k B_{ii} X_i^2 \quad (۲)$$

در معادله ۲،  $B_0$  ضریب ثابت معادله،  $B_k, B_1, B_2$  ترم‌های خطی،  $B_{kk}, B_{11}, B_{22}$  ترم‌های درجه دوم،  $B_{k-1,k}, B_{12}, B_{13}$  ترم‌های برهم‌کنش هستند و  $X_i$  پارامترهای ورودی را نشان می‌دهند. مدل رگرسیون درجه دوم به دست آمده برای سایش ابزار در سطح آزاد پس از حذف متغیرهای غیر موثر با توجه به سطح اطمینان ۹۵ درصد در رابطه ۳ آمده است.

$$V_B = 0.235 + 0.182V + 0.135T + 0.079V^2 + 0.11VT \quad (۳)$$

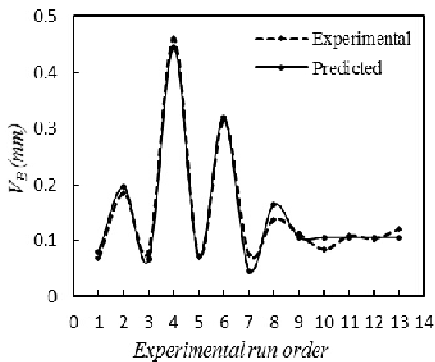
شکل ۱ نمودار توزیع احتمال نرمال باقیمانده‌ها را برای سایش در سطح آزاد ابزار در ماشینکاری خشک نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، توزیع داده‌ها در نزدیک خط مستقیم بوده و این بدان معناست که خطاها توزیع نرمال دارند. شکل ۲ مقادیر محاسبه شده از طریق مدل برازش شده را به همراه مقادیر تجربی نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده کرد نتایج محاسبه شده از مدل ریاضی به خوبی با نتایج تجربی با خطای ۱۵/۱ درصد مطابقت دارند. رابطه ۴ مدل رگرسیون درجه دوم به دست آمده برای توان ماشینکاری در حالت خشک، پس از حذف متغیرهای غیر موثر با توجه به سطح اطمینان ۹۵ درصد را نشان می‌دهد.

$$P = 0.0525 + 0.0041V + 0.0055T - 0.0040V^2 \quad (۴)$$

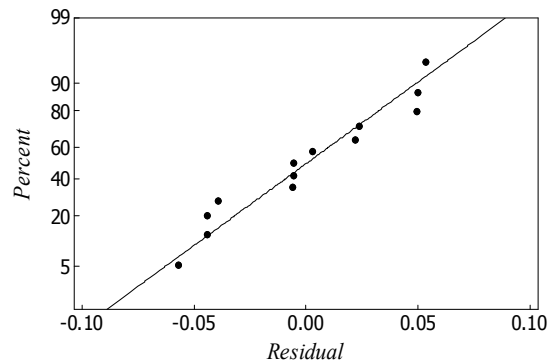
در شکل ۳ نمودار توزیع احتمال نرمال باقیمانده‌ها برای توان ماشینکاری در حالت خشک نمایش داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، توزیع داده‌ها در نزدیک خط مستقیم بوده و این بدان معناست که خطاها توزیع نرمال دارند. شکل ۴ نیز مقادیر محاسبه شده از طریق مدل برازش شده را به همراه مقادیر تجربی نشان می‌دهد. نتایج محاسبه شده از مدل به خوبی با نتایج تجربی با خطای متوسط ۱/۹۹ درصد مطابقت دارند.

### ۴-۴. تجزیه و تحلیل مدل رگرسیون

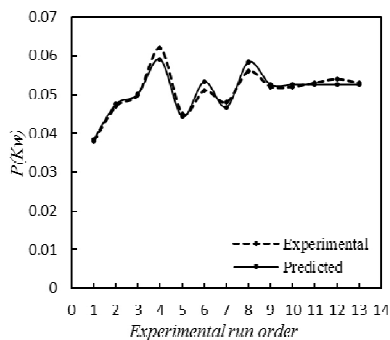
روش آنالیز واریانس به منظور بررسی کفایت و مؤثر بودن مدل‌های برازش شده و متغیرهای مربوط به آن به کار گرفته می‌شود. آنالیز واریانس برای هر دو پاسخ خروجی؛ یعنی توان ماشینکاری و سایش در سطح آزاد ابزار در جدول‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. با توجه به سطح اطمینان ۹۵ درصد مقدار  $P$  برای هر کدام از پارامترها که کمتر از ۰/۰۵ باشد، نشان‌دهنده این است که پارامتر مورد نظر از لحاظ آماری معنادار بوده است و در فرایند نیز تأثیرگذار است. برای هر دو پاسخ مقدار  $P$  برای مدل‌های رگرسیون کمتر از ۰/۰۵ بوده و این به معنای این است که مدل به خوبی با نتایج تجربی مطابقت دارد. در هر دو جدول، همان‌طور که مشاهده می‌شود، عبارت فقدان تطابق مدل غیرمؤثر بوده است که این موضوع نشان می‌دهد مدل به خوبی برازش شده است. برای هر یک از مدل‌های برازش شده یک ضریب همبستگی به دست می‌آید که نشان‌دهنده کیفیت مدل است. هرچه این ضریب بالاتر باشد، مؤید بهتر بودن مدل در برازش داده‌هاست. طبق نتایج، ضریب همبستگی برای توان ماشینکاری ۹۴/۱۶ درصد و برای سایش در سطح آزاد ۹۳/۸۶ درصد به دست آمده است. همچنین برای بررسی توان مصرفی و سایش سطح آزاد ابزار از شکل‌های سه بعدی نیز استفاده شده است. شکل ۵ تأثیر متقابل سرعت برشی و زمان ماشینکاری را روی توان مصرفی دستگاه تراش نشان می‌دهد. مطابق شکل ۵ مشاهده می‌شود در زمان‌های ماشینکاری مختلف تأثیر سرعت برشی بر توان مصرفی غیرخطی است، اما زمان ماشینکاری به صورت خطی در سرعت‌های برشی متفاوت روی توان مصرفی تأثیرگذار است. با افزایش سرعت برشی مقدار توان مصرفی در ابتدا افزایش پیدا می‌کند، اما هنگامی که سرعت برشی به بیشترین مقدار خود نزدیک می‌شود، توان مصرفی دستگاه کمی کاهش خواهد یافت. همان‌گونه که از تصویر مشخص است، کمترین توان مصرفی زمانی حاصل می‌شود که با سرعت برشی ۱۰۰ متر بر دقیقه به مدت ۲ دقیقه ماشینکاری انجام شود. با افزایش زمان ماشینکاری و یا سرعت برشی، سایش در سطح آزاد ابزار بیشتر و شرایط برش سخت‌تر می‌شود. در این حالت لبه برش تیز ابزار از بین رفته و متعاقب آن فشار بیشتری به دستگاه تراش وارد و توان بیشتری صرف برش ماده می‌شود.



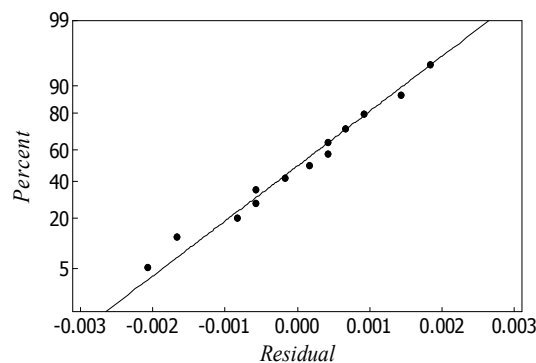
شکل ۲. مقایسه نتایج تجربی سایش سطح آزاد و مقادیر پیش‌بینی شده با استفاده از مدل درجه دوم



شکل ۳. نمودار توزیع احتمال نرمال باقیمانده‌ها برای سایش ابزار



شکل ۴. مقایسه نتایج تجربی توان مصرفی و مقادیر پیش‌بینی شده با استفاده از مدل درجه دوم



شکل ۵. نمودار توزیع احتمال نرمال باقیمانده‌ها برای توان مصرفی

جدول ۵. جدول آنالیز واریانس برای توان مصرفی پس از حذف ترم‌های غیر مؤثر

مقدار P	مقدار F	میانگین مربعات	جمع مربعات	درجه آزادی	ترم
۰/۰۰۰۱	۶۵/۴۵	۰/۰۰۰۱۱۳	۰/۰۰۰۳۳۹	۳	مدل
۰/۰۰۰۱	۸۲/۶۸	۰/۰۰۰۱۴۳	۰/۰۰۰۲۸۶	۲	ترم‌های خطی
۰/۰۰۰۱	۶۰/۳۰	۰/۰۰۰۱۰۴	۰/۰۰۰۱۰۴	۱	سرعت برشی
۰/۰۰۰۱	۱۰۵/۰۶	۰/۰۰۰۱۸۲	۰/۰۰۰۱۸۲	۱	زمان ماشینکاری
۰/۰۰۰۱	۳۱/۰۰	۰/۰۰۰۰۵۴	۰/۰۰۰۰۵۴	۱	ترم‌های درجه دو
۰/۰۰۰۱	۳۱/۰۰	۰/۰۰۰۰۵۴	۰/۰۰۰۰۵۴	۱	توان دوم سرعت ماشینکاری
-	-	۰/۰۰۰۰۰۲	۰/۰۰۰۰۱۶	۹	خطای باقیمانده‌ها
۰/۱۱۷	۳/۶۴	۰/۰۰۰۰۰۳	۰/۰۰۰۰۱۳	۵	فقدان تطابق مدل
-	-	۰/۰۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۰۳	۴	خطای خالص
-	-	-	۰/۰۰۰۳۵۵	۱۲	کل

آنچه در شکل ۶ مشاهده می‌شود، روند تغییرات سایش ابزار با تغییر زمان ماشینکاری در سرعت‌های برشی پایین، بسیار کم

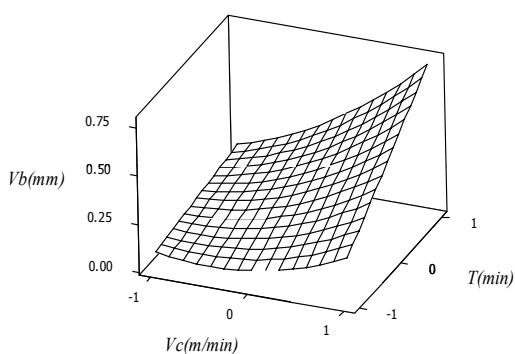
تأثیر سرعت برشی و مدت زمان ماشینکاری فولاد ۳۰۴ بر روی سایش ابزار در شکل ۶ نمایش داده شده است. مطابق با

است. بیشترین تغییرات سایش ابزار مربوط به زمانی است که در بیشترین سرعت برشی، زمان ماشینکاری تغییر می‌کند. در سرعت برشی ۱۶۰ متر بر دقیقه با افزایش زمان ماشینکاری میزان سایش ابزار به شدت و با شیبی بسیار زیاد افزایش پیدا کرده است. همان‌گونه که از نمودار سه‌بعدی مشخص است، سرعت برشی به صورت غیرخطی بر سایش ابزار تأثیر می‌گذارد.

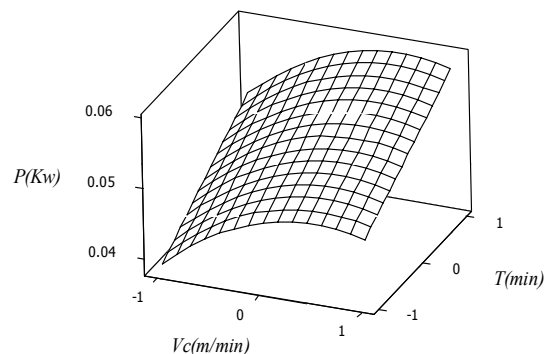
با افزایش سرعت برشی در ابتدا به مقدار ناچیزی سایش ابزار کاهش پیدا می‌کند و سپس رفته‌رفته با افزایش میزان سایش ابزار مواجه خواهیم شد. با تعامل بیشترین سرعت برشی و بیشترین زمان ماشینکاری؛ یعنی وقتی سرعت برشی ۱۶۰ متر بر دقیقه و زمان ماشینکاری ۴ دقیقه انتخاب شوند، سایش سطح آزاد ابزار به حداکثر مقدار خود در ماشینکاری خشک می‌رسد.

جدول ۶. جدول آنالیز واریانس برای سایش سطح آزاد پس از حذف ترم‌های غیرمؤثر

مقدار P	مقدار F	میانگین مربعات	جمع مربعات	درجه آزادی	ترم
۰/۰۰۰۱	۴۶/۸۳	۰/۱۰۳۰۹۴	۰/۴۱۲۳۷۶	۴	مدل
۰/۰۰۰۱	۷۷/۷۳	۰/۱۷۱۱۲۴	۰/۳۴۲۲۴۹	۲	ترم‌های خطی
۰/۰۰۰۱	۹۱/۱۰	۰/۲۰۰۵۶۸	۰/۲۰۰۵۶۸	۱	سرعت برشی
۰/۰۰۰۱	۶۴/۳۵	۰/۱۴۱۶۸۱	۰/۱۴۱۶۸۱	۱	زمان ماشینکاری
۰/۰۱۶	۹/۱۶	۰/۰۲۰۱۷۵	۰/۰۲۰۱۷۵	۱	ترم‌های درجه دو
۰/۰۱۶	۹/۱۶	۰/۰۲۰۱۷۵	۰/۰۲۰۱۷۵	۱	توان دوم سرعت ماشینکاری
۰/۰۰۱	۲۲/۶۹	۰/۰۴۹۹۵۲	۰/۰۴۹۹۵۲	۱	ترم‌های تعامل اثر
۰/۰۰۱	۲۲/۶۹	۰/۰۴۹۹۵۲	۰/۰۴۹۹۵۲	۱	تعامل اثر سرعت برشی و زمان ماشینکاری
-	-	۰/۰۰۲۲۰۲	۰/۱۷۶۱۳	۸	خطای باقیمانده‌ها
۰/۰۰۶	۵/۷۲	۰/۰۰۳۷۴۷	۰/۰۱۴۹۹۰	۴	فقدان تطابق مدل
-	-	۰/۰۰۰۶۵۶	۰/۰۰۲۶۳۳	۴	خطای خالص
-	-	-	۰/۴۲۹۹۸۹	۱۲	کل



شکل ۶. طرح رویه پاسخ سه‌بعدی سایش سطح آزاد



شکل ۵. طرح رویه پاسخ سه‌بعدی توان مصرفی

## ۵. نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر به بررسی عمر ابزار و توان مصرفی دستگاه در طی فرایند تراشکاری خشک فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ به کمک ابزار برشی کاربردی پوشش‌دار پرداخته شد. از روش رویه پاسخ برای

توسعه مدل‌های ریاضی و ارتباط بین پارامترهای ورودی و متغیرهای خروجی استفاده شد. کفایت مدل‌ها و متغیرهای مربوطه با استفاده آنالیز واریانس بررسی شدند و تأثیر سرعت برشی و زمان ماشینکاری بر سایش سطح آزاد ابزار برشی و توان



واریانس، تأثیرگذار بودن و کفایت‌الای مدل‌های رگرسیون را نشان دادند. سرعت برشی به‌صورت غیرخطی و زمان ماشینکاری به‌صورت خطی بر توان مصرفی دستگاه و سایش سطح آزاد ابزار تأثیرگذار بودند. بیشترین سایش ابزار زمانی به‌وجود آمد که بیشترین مقادیر سرعت برشی و زمان ماشینکاری در نظر گرفته شده بودند.

مصرفی دستگاه به‌کمک نمودارهای سه‌بعدی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. به نتایج زیر می‌توان به‌عنوان یافته‌های این پژوهش اشاره کرد. مدل درجه دوم به‌عنوان مدل‌های رگرسیون برای عمر ابزار و توان مصرفی در ماشینکاری خشک انتخاب شد. این مدل‌ها تطابق خوبی را بین مقادیر پیش‌بینی شده و نتایج تجربی نشان دادند. مقادیر F و P مدل‌ها در جداول آنالیز

## ۶. مآخذ

- [1] J. R. Davis., *ASM Specialty Handbook*, Stainless Steel, 1999.
- [2] M. P. Groover, *Fundamentals of modern manufacturing-materials, process and systems*, Prentice-Hall; 1996.
- [3] E. M. Trent, *Metal cutting*, Butterworths Press; 1989.
- [4] J. Paro, H. anninen, V. Kauppinen, Tool wear and machinability of X5 CrMnN 18 18 stainless steels, *Journal of materials processing technology*, Vol. 119, pp.14-20, 2001.
- [5] D. Umbrello, F. Micari, I.S. Jawahir, The effects of cryogenic cooling on surface integrity in hard machining, A comparison with dry machining, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 61, pp. 103-106. 2012.
- [6] P. Atul, Kulkarny, G. Joshi, G. Vikas, Sargade, Dry turning of AISI 304 austenitic stainless steel using AlTiCrN coated insert produced by HPPMS technique, *International Conference on DESIGN AND MANUFACTURING, IConDM2013*, Procedia Engineering, Vol. 64, pp. 737-746, 2013.
- [7] J. Kouam, V. Songmene, M. Balazinski, P. Hendrick, Dry, *Semi-Dry and Wet Machining of 6061-T6 Aluminum Alloy*, chapter 8, INTECH, 2013.
- [8] M. Nouari, G. List, F. Girot, D. Coupard, Experimental analysis and optimization of tool wear in dry machining of aluminum alloys, *Wear*, Vol. 255, pp. 1359-1368, 2003.
- [9] P. S. Sreejith, B. K. A. Ngoi, Dry machining: Machining of the future, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 101, pp. 287-291, 2000.
- [10] D. Jianxin, C. Tongkun, L. Lili, Self-lubricating behaviors of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiB<sub>2</sub> ceramic tools in dry high-speed machining of hardened steel, *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 25, pp. 1073–1079, 2005.
- [11] T. Kagnaya, C. Boher, L. Lambert, M. Lazard, T. Cutard, Microstructural analysis of wear micromechanisms of WC-6Co cutting tools during high speed dry machining, *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, Vol. 42, pp. 151–162, 2014.
- [12] C. H. Che-Haron, Tool life and surface integrity in turning titanium alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 118, No. 1, pp.231-237, 2001.
- [13] A. E. Diniz, R. Micaroni, R., Cutting conditions for finish turning process aiming: the use of dry cutting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 42, No. 8, pp.899-904, 2002.
- [14] M. Y. Noordin, V. C. Venkatesh, S. Sharif, Dry turning of tempered martensitic stainless tool steel using coated cermet and coated carbide tools, *Journal of materials processing technology*, Vol. 185, No. 1, pp.83-90, 2007.
- [15] K. Katuku, A. Koursaris, I. Sigalas, Wear, cutting forces and chip characteristics when dry turning ASTM Grade 2 austempered ductile iron with PcBN cutting tools under finishing conditions, *Journal of Materials processing technology*, Vol. 209, No. 5, pp.2412-2420, 2009.
- [16] A. Devillez, G. Le Coz, S. Dominiak, D. Dudzinski, Dry machining of Inconel 718, workpiece surface integrity, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 211, No. 10, pp.1590-1598, 2011.
- [17] D. P. Selvaraj, P. Chandramohan, M. Mohanraj, Optimization of surface roughness, cutting force and tool wear of nitrogen alloyed duplex stainless steel in a dry turning process using Taguchi method, *Measurement*, Vol. 49, pp.205-215, 2014.

- [18] R. Serra, W. Rmili, Experimental Evaluation of Flank Wear in Dry Turning from Accelerometer Data, *INTERNATIONAL JOURNAL OF ACOUSTICS AND VIBRATION*, Vol. 21, No. 1, pp.50-58, 2016.
- [19] V. Wagner, M. Baili, G. Dessen, The relationship between the cutting speed, tool wear, and chip formation during Ti-5553 dry cutting, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 76, No. 5-8, pp.893-912, 2015.
- [20] W. Han, S. Chen, the Machinability and Wear Mechanism of TiN Coated Tools in Dry Turning of AISI 4119, 2015.
- [21] Y. H. Çelik, E. Kilickap, M. Güney, Investigation of cutting parameters affecting on tool wear and surface roughness in dry turning of Ti-6Al-4V using CVD and PVD coated tools, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, pp.1-9, 2016.
- [22] S. Velchev, I. Kolev, K. Ivanov, S. Gechevski, Empirical models for specific energy consumption and optimization of cutting parameters for minimizing energy consumption during turning, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 80, pp.139-149, 2014.
- [23] K. Fang, N. Uhan, F. Zhao, J. W. Sutherland, A new approach to scheduling in manufacturing for power consumption and carbon footprint reduction, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 30, No. 4, pp.234-240, 2011.
- [24] I. Hanafi, A. Khamlichi, F. M. Cabrera, E. Almansa, A. Jabbouri, Optimization of cutting conditions for sustainable machining of PEEK-CF30 using TiN tools, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 33, pp.1-9, 2012.
- [25] R. K. Bhushan, Optimization of cutting parameters for minimizing power consumption and maximizing tool life during machining of Al alloy SiC particle composites, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 39, pp.242-254, 2013.
- [26] C. Camposeco-Negrete, Optimization of cutting parameters for minimizing energy consumption in turning of AISI 6061 T6 using Taguchi methodology and ANOVA, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 53, pp.195-203, 2013.
- [27] M. R. Razfar, *Fundamental of machining and tools*, Amir Kabir University, Tehran, 1389.
- [28] C. Douglas, *Montgomery, Design and analysis of experiments*, 7<sup>th</sup> Edition, pp. 457-460, New York: John Wiley and Son, 2011.
- [29] C. H. Hsieh, H. Zhu, T. Y. Wei, Z. J. Chung, W. D. Yang, Y. H. Ling, Applying the experimental statistical method to deal the preparatory conditions of nanometric-sized TiO<sub>2</sub> powders from a two-emulsion process, *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 28, pp. 1177-1183, 2008.
- [30] S. Assarzadeh, M. Ghoreishi, a dual response surface desirability approach to process modeling and optimization of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powder-mixed electrical discharge machining (PMEDM) parameters, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 64, pp.1459–1477, 2013.

پی‌نوشت

- 
1. Ti-6246
  2. PCBN
  3. ASTM Grade2
  4. AISI CL20
  5. Ti-5553
  6. Ti6Al4V
  7. KORLOY
  8. face center design