



مطالعه تجربی تأثیر خنک کاری کرایوژنیک بر روی عمر ابزار و توان مصرفی دستگاه در تراشکاری فولاد ۳۰۴

رضا بنازاده^{۱*}، محمد ریاحی^۱، محمد خسروآبادی^۲

^۱دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
^۲دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۵ مهر ۱۳۹۵
بازنگری: ۱۰ اسفند ۱۳۹۵
پذیرش: ۱۱ تیر ۱۳۹۶
ارائه آنلاین: ۱۳ تیر ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

خنک کاری کرایوژنیک
سایش ابزار
توان مصرفی
فولاد زنگ‌زن آستنیتی ۳۰۴
روش رویه پاسخ

چکیده: عملکرد سیالات برشی در ماشین کاری مواد مختلف به‌منظور بهبود کارایی و اثربخشی در هر فرآیند ماشین کاری حیاتی است. هدف از انجام این پژوهش بررسی تأثیر استفاده از روش خنک کاری کرایوژنیک بر روی عمر ابزار و توان مصرفی دستگاه در فرآیند تراشکاری فولاد زنگ‌زن آستنیتی ۳۰۴ است. بدین منظور سرعت برشی و زمان ماشین کاری هرکدام در سه سطح به عنوان متغیرهای مسئله انتخاب شدند. روش رویه پاسخ، با به‌کارگیری طرح مرکب مرکزی، به‌منظور برنامه‌ریزی و تحلیل آزمایش‌های تجربی مورد استفاده قرار گرفت. ارتباط بین پارامترهای ماشین کاری و متغیرهای خروجی با استفاده از روش رویه پاسخ مدل‌سازی شدند. همچنین برای بررسی کفایت و مؤثر بودن مدل ریاضی و متغیرهای مربوطه، آنالیز واریانس انجام شد. نتایج حاصله تطابق خوبی را بین مقادیر اندازه‌گیری شده سایش ابزار و توان مصرفی دستگاه و مقادیر پیش‌بینی‌شده مدل توسعه‌یافته نشان دادند. با استفاده از روش آنالیز واریانس، مدل‌های ریاضی مناسبی برای پاسخ‌های خروجی با در نظر گرفتن ترم‌های مؤثر و مقادیر P کمتر از ۰/۰۵ (سطح اطمینان ۹۵٪) به دست آمدند. پس از انجام آزمایش‌های تجربی و تحلیل و بررسی نتایج، مشخص گردید استفاده از خنک کاری کرایوژنیک در مقایسه با ماشین کاری خشک باعث کاهش سایش ابزار تا ۶۷/۵٪ و کاهش توان مصرفی دستگاه تا ۲۴٪ می‌شود.

۱- مقدمه

فولادهای زنگ‌زن جزء آلیاژهای پایه آهنی هستند که حداقل حاوی ۱۱٪ کروم می‌باشند. برخی از فولادهای زنگ‌زن نیز بیش از ۳۰٪ کروم دارند. معمولاً درصد کربن در این فولادها بین ۰/۰۳٪ تا ۰/۱٪ است. این فولادها به ۴ گروه اصلی تقسیم می‌شوند. گروه‌های فولاد زنگ‌زن فریتی، مارتنزیتی، آستنیتی و آستنیتی-فریتی بر پایه خصوصیات ساختمان کریستالی و ریزساختار آلیاژهای آن‌ها دسته‌بندی می‌شوند. گروه آخر، آلیاژهای قابل سخت شدن با روش رسوب سختی می‌باشند که بر پایه نوع عملیات حرارتی استفاده‌شده در آن‌ها تقسیم‌بندی می‌شوند. فولادهای زنگ‌زن آستنیتی بزرگ‌ترین گروه در بین تمامی فولادهای زنگ‌زن هستند. این گروه از فولادهای زنگ‌زن قابلیت سخت‌شوندگی با عملیات حرارتی را ندارند. فولادهای زنگ‌زن آستنیتی غیر مغناطیسی هستند و دارای شبکه بلورهای اف سی سی^۱ می‌باشند. قابلیت شکل‌پذیری عالی و چقرمگی بالا حتی در دمای کرایوژنیک از ویژگی‌های این نوع فولادهاست. علاوه بر این قابلیت قابل‌ملاحظه‌ای در سخت‌شوندگی با کار سرد را دارا می‌باشند. در این فولادها نیکل عنصر اصلی در پایداری آستنیت است. به‌طور کلی پارامترهایی که در

انتخاب فولادهای زنگ‌زن مدنظر قرار می‌گیرند شامل مقاومت در برابر خوردگی، مقاومت در برابر اکسید شدن، قابلیت شکل‌پذیری بالا، چقرمگی بالا و خواص مکانیکی مناسب می‌باشند. در بین فولادهای زنگ‌زن، فولاد ۳۰۴، بیشترین کاربرد را دارند [۱]. فولاد زنگ‌زن آستنیتی ۳۰۴ در صنایع غذایی، خودروسازی، صنایع هوایی و ساخت تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲]. عموماً ماشین کاری فولادهای زنگ‌زن از دیگر فلزات نظیر آلومینیوم و فولادهای کم‌کربن سخت‌تر است. 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 ویژگی‌هایی هستند که فولاد ۳۰۴ را به یکی از فولادهای سخت در ماشین کاری تبدیل کرده‌اند [۳ و ۴]. به دلیل خواص منحصر به فرد فولاد ۳۰۴، در فرآیندهای ماشین کاری براده تمایل زیادی به چسبیدن به ابزار برش دارد که این امر باعث ایجاد لبه انباشته و کاهش شدید عمر ابزار و صافی سطح قطعه کار می‌شود. به طور معمول برای ماشین کاری فولادهای زنگ‌زن نیاز به صرف توان بیشتر دستگاه، کاهش سرعت دورانی، ابزار صلب و همچنین نگاه‌دارنده مناسب است [۱ و ۵]. در راستای استفاده از خنک کاری کرایوژنیک در سال‌های اخیر در فرآیندهای مختلف و مواد مختلف تحقیقات زیادی انجام شده است. راناجیت و همکاران [۶] تأثیر استفاده از سیال کرایوژنیک را در ماشین کاری قطعات سخت با ابزار سرامیکی آلومینا (Al₂O₃) و (PCBN) بررسی کردند.

1 Face Center Cubic (FCC)

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Rezabannazadeh@yahoo.com

خنک‌کاری کرایوژنیک گزارش شده است. از طرفی با توجه به هزینه بالای مصرف انرژی و مشکلات اقتصادی صنایع، کاهش هزینه‌ها در فرآیندهای تولیدی پرکاربرد نظیر تراشکاری امری ضروری و حیاتی به نظر می‌رسد. علاوه بر این با توجه به اینکه در مطالعه پژوهش‌های انجام شده هیچ موردی یافت نشد که به بررسی توان مصرفی دستگاه در تراشکاری فولاد ۳۰۴ و راهکاری برای کاهش آن پرداخته شده باشد، در تحقیق حاضر به مطالعه تجربی تأثیر استفاده از نیتروژن مایع به عنوان سیال خنک‌کننده کرایوژنیک بر عمر ابزار و توان مصرفی دستگاه تراش پرداخته شده است. با انجام این پژوهش مشخص گردید که استفاده از این روش خنک‌کاری در کاهش هزینه‌های مصرف انرژی و مصرف ابزار از طریق کاهش توان مصرفی دستگاه و کاهش سایش سطح آزاد ابزار تأثیرگذار است.

۲- سیالات برش

عملیات ماشین‌کاری همیشه با ایجاد حرارت همراه است. یکی از راه‌های کاهش ایجاد حرارت استفاده از روان‌کار مناسب است که انتخاب صحیح آن‌ها به عوامل مختلفی بستگی دارد. سیال‌های برش به چهار دسته کلی روغن‌های محلول در آب، محلول‌های شیمیایی محلول در آب، روغن‌های برش ساده و گازها دسته‌بندی می‌شوند. هدف اصلی در عملیات ماشین‌کاری، تولید قطعه با دقت لازم و صافی سطح موردنیاز و شرایط خوب اقتصادی می‌باشد. روان‌کارها به منظور رسیدن به این اهداف مفید می‌باشند. استفاده از یک روان‌کار مناسب مزایای زیر را به همراه دارد:

- الف. افزایش عمر ابزار
 - ب. بهبود کیفیت سطح قطعه‌کار
 - ج. کاهش دمای ناحیه برش
 - د. کاهش تغییر شکل قطعه‌کار (به دلیل کاهش درجه حرارت)
 - ه. راحت جدا شدن براده
 - و. کاهش تشکیل لبه انباشته
 - ز. دفع براده‌ها از ناحیه سطح ابزار (ناحیه برش)
- به‌طور کلی سیالات برش حداقل سه وظیفه اصلی دارند:
- الف. عمل خنک‌کاری
 - ب. عمل روان‌کاری (کاهش اصطکاک)
 - ج. کاهش مقاومت برش قطعه‌کار [۲۲].

در سال ۱۹۰۷ تیلور اولین مقاله را در مورد نقش حرارت در برش فلزات ارائه کرد که در آن عنوان شده بود که اگر دمای برش بالا رود، سایش ابزار زیاد شده، ممکن است باعث آسیب دیدن قطعه‌کار و موجب تشکیل لبه انباشته بر روی ابزار گردد که در نتیجه کیفیت سطح قطعه‌کار خراب می‌شود و همچنین تنش‌های حرارتی در قطعه‌کار ایجاد می‌شود [۲۳]. عملیات براده‌برداری یک فرآیند ترمومکانیکی است. در طول این فرآیند، حرارت در نتیجه تغییر شکل پلاستیک و اصطکاک در طول سطح تماس ابزار- براده و ابزار- قطعه‌کار حاصل می‌شود [۲۴].

نتایج آن‌ها نشان داد که عمر ابزار هنگام استفاده از سیال کرایوژنیک بهبود پیدا کرده است. بن‌فرد و همکاران [۷] نشان دادند که استفاده از خنک‌کاری کرایوژنیک در سنگ‌زنی فولاد آستنیتی ۳۰۴ باعث افزایش کیفیت سطح تا ۴۰ درصد می‌شود. علی‌خان و احمد [۸] برای ماشین‌کاری فولاد زنگ‌نزن از ابزار کاربیدی پوشش‌دار استفاده کردند و از نیتروژن مایع به عنوان سیال خنک‌کننده بهره گرفتند. نتایج آن‌ها نشان مشخص کرد که تأثیر نیتروژن مایع در سرعت‌های برشی بالاتر بیشتر محسوس است و عمر ابزار بیشتر از ۴ برابر افزایش پیدا کرده است. سان و همکاران [۹] از گاز فشرده کرایوژنیک در تراشکاری آلیاژهای تیتانیوم استفاده کردند. نتایج آزمایش‌ها کاهش سایش در سطح آزاد ابزار و افزایش عمر ابزار و افزایش نیروی برشی را نشان داد. جروولد و کومار [۱۰] در تراشکاری فولاد ۱۰۴۵ از دی‌اکسید کربن به عنوان سیال کرایوژنیک استفاده کردند و کاهش ۵ تا ۲۲ درصدی دمای برش و افزایش ۵ تا ۲۵ درصدی کیفیت سطح را مشاهده کردند. راوی و کومار [۱۱] استفاده از نیتروژن مایع در فرزکاری مواد سخت را بررسی کردند و به کاهش ۴۳ تا ۴۸ درصدی دمای برش، افزایش عمر ابزار و افزایش کیفیت سطح پی بردند. برمیگام و همکاران [۱۲] نشان دادند استفاده از سیال کرایوژنیک در تراشکاری آلیاژ تیتانیوم باعث کاهش دمای ناحیه برش و افزایش عمر ابزار می‌شود. گیل و همکاران [۱۳] نشان دادند به دلیل کاهش سایش در سطح آزاد ابزار، عمر ابزار برشی افزایش پیدا کرده است. نالبات و بیلدیز [۱۴] تأثیر استفاده از سیال کرایوژنیک در فرزکاری فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ را بررسی کردند و متوجه شدند نیروی برشی افزایش پیدا کرده است. جروولد و کومار [۱۵] تأثیر استفاده از کربن‌دی‌اکسید در ماشین‌کاری فولاد ۳۱۶ بررسی کردند. نتایج کاهش ۳۵ درصدی دمای برشی، افزایش ۴ تا ۵۲ درصدی افزایش سطح و کاهش سایش ابزار را نشان دادند. سیواستاوا و پاندی [۱۶] تأثیر خنک‌کاری در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی بر روی فولادهای تندبر را بررسی کردند. کاهش نرخ فرسایش ابزار مسی تا ۲۰ درصد، بهبود صافی سطح و افزایش پایداری هندسی الکتروود از نتایج حاصله آن‌ها بود. شکرانی و همکاران [۱۷] از نیتروژن مایع در فرزکاری سوپر آلیاژ پایه نیکل اینکونل ۷۱۸ استفاده کردند که نتایج حاکی از افزایش کیفیت سطح بود. استرانو و همکاران [۱۸] ماشین‌کاری کرایوژنیک را بر روی آلیاژ تیتانیوم انجام دادند و افزایش عمر ابزار، کاهش دمای برش و کاهش ضریب اصطکاک بین ابزار و قطعه‌کار را مشاهده کردند. سفری و همکاران [۱۹] فرزکاری با سرعت بالا با ابزار کاربیدی پوشش‌دار بر روی آلیاژ تیتانیوم انجام دادند که نتایج نشان دادند استفاده از سیال خنک‌کننده کرایوژنیک باعث افزایش عمر ابزار و بهبود کیفیت سطح می‌شود. گوویندراجو و همکاران [۲۰] عملیات سوراخ‌کاری بر روی فولاد کربن متوسط ۱۰۴۵ را با استفاده از نیتروژن مایع انجام دادند و کاهش ۶ تا ۵۱ درصدی دمای برش را ثبت کردند. ناندام و همکاران [۲۱] با استفاده از نیتروژن مایع در ماشین‌کاری منگنز نشان دادند که نرخ برداشت مواد تا ۳ برابر افزایش پیدا کرد.

تقریباً در تمامی تحقیقات که تاکنون انجام گرفته تأثیر مثبت روش

برودت‌شناسی) به بررسی و استفاده از مواد در دماهای بسیار پایین (زیر ۱۵۰- درجه سانتی‌گراد) می‌پردازد. نقطه جوش نرمال گازهای پایدار مثل هلیوم، هیدروژن، نئون، نیتروژن و اکسیژن به عنوان مخلوط سرمازا به زیر ۱۸۰- درجه سانتی‌گراد می‌رسد. گازهای کرایوژنیک در صنایعی مثل الکترونیک، خودروسازی و صنایع هوافضا به‌طور وسیعی به‌منظور خنک‌کاری استفاده می‌شوند. استفاده از نیتروژن مایع در علم کرایوژنیک بیشتر از سایر عناصر، مرسوم است. نیتروژن مایع از طریق تقطیر جزء به جزء هوای مایع تولید می‌شود. نیتروژن در دمای ۲۱۰- درجه سانتی‌گراد ذوب شده و در دمای ۱۹۶- درجه سانتی‌گراد به جوش می‌آید. نیتروژن فراوان‌ترین گاز است که حدود ۷۸/۰۳٪ حجم اتمسفر را تشکیل می‌دهد. از دیگر خصوصیات این گاز می‌توان به بی‌بو بودن، بی‌رنگ بودن، بی‌مزه بودن و غیرسمی بودن آن اشاره کرد. این خصوصیات باعث شده که از نیتروژن مایع به عنوان یک خنک‌کننده کارآمد نام‌برده شود. در جدول ۱ مشخصات نیتروژن مایع نشان داده شده است [۸].

جدول ۱: مشخصات نیتروژن مایع [۲۱].

Table 1. Specification of liquid nitrogen

مقدار	واحد	مشخصه
۱/۲۵	گرم بر سانتی‌متر مکعب	چگالی
-۲۱۰	درجه سانتی‌گراد	دمای ذوب
-۱۹۶	درجه سانتی‌گراد	دمای جوش
۱/۰۴	کیلوژول بر کیلوگرم کلوین	گرمای ویژه
۹/۲۵	وات بر متر کلوین	قابلیت هدایت حرارتی
۳۲	وات بر مترمربع کلوین	ضریب انتقال حرارت

۴- انتقال نیتروژن مایع بر روی دستگاه تراش

برای انتقال نیتروژن مایع یک مخزن مخصوص برای نگهداری نیتروژن مایع مورد استفاده قرار گرفت. برای نگهداری این مخزن یک فیکسچر خاص طراحی و ساخته شد تا مخزن حاوی نیتروژن مایع بر روی دستگاه تراش نصب شود. فیکسچر ساخته شده به گونه‌ای به میز دستگاه متصل شد که هم در راستای طولی و هم در راستای عرضی با میز حرکت کند. دو لوله آلومینیومی به درون مخزن نیتروژن مایع وارد کردیم که یکی کوتاه و دیگری بلند (تقریباً تا فاصله یک سانتی‌متری انتهای مخزن) می‌باشند. لوله کوتاه به کمک یک شیلنگ به کپسول گاز نیتروژن متصل شده و لوله بلند نیز به سمت قطعه‌کار و ابزار هدایت شد. در این حالت هنگامی که مخزن پر از نیتروژن مایع باشد، با باز کردن گاز نیتروژن و افزایش فشار گاز ورودی به درون مخزن، نیتروژن مایع از لوله دیگر خارج شده و به سمت ابزار هدایت می‌شود. در هنگام استفاده از این روش برای انتقال نیتروژن مایع قسمتهایی که لوله‌ها در درون مخزن قرار گرفتند و تمامی مسیر انتقال نیتروژن مایع عایق‌بندی شدند. شکل ۱ نمایی از نحوه انتقال نیتروژن مایع به محل

میزان افزایش دما ممکن است به بالای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد در منطقه برش برسد که این دما تحت تأثیر رفتار ماده و مکانیزم تشکیل براده است. بیشترین دما در سطح تماس ابزار و براده اتفاق می‌افتد. همچنین سایش و شکست ابزار به طور قابل‌ملاحظه‌ای در دماهای بالا، افزایش می‌یابد [۲۵].

در هنگام ماشین‌کاری با سرعت پایین خاصیت روان‌کاری یک سیال پیش از هر چیز بر سایدگی و چسبندگی تأثیر می‌گذارد، زیرا زمان نفوذ سیال به ناحیه تماس (ناحیه بین سطح ابزار و براده) و همچنین زمان لازم برای ترکیب شیمیایی سیال با قطعه‌کار کافی خواهد بود. بنابراین در سرعت‌های برشی پایین کاهش اصطکاک و تنش برشی از اهمیت بالایی برخوردار است [۲۶]. با افزایش سرعت برشی به دلیل افزایش سرعت حرکت براده، دمای ناحیه برش افزایش پیدا کرده و حتی ممکن است باعث تغییر شکل پلاستیک در لبه ابزار شود، بنابراین در این شرایط خنک‌کنندگی یک سیال بسیار تأثیرگذارتر از خاصیت روان‌کاری آن خواهد بود. در این شرایط طول عمر ابزار دیگر تابع قابلیت روان‌کاری سیال برش نبوده، بلکه تابع انتقال حرارت و قابلیت خنک‌کنندگی سیال خواهد بود. در نتیجه در ماشین‌کاری قطعاتی نظیر فولاد آستنیتی ۳۰۴ که قابلیت ماشین‌کاری پایینی داشته و امکان ایجاد لبه انباشته و تغییر شکل پلاستیک در لبه برنده ابزار وجود دارد، خاصیت خنک‌کنندگی سیال برش مهم‌تر از خاصیت روان‌کاری آن می‌باشد [۲۷ و ۲۸]. علاوه بر این به دلیل قابلیت ماشین‌کاری پایین فولاد آستنیتی ۳۰۴ ممکن است در زمان ماشین‌کاری دمای ناحیه برش بسیار بالا رفته و یک حالت شبیه عملکرد تسلیم خمیری در ناحیه تماس براده و ابزار ایجاد شود. در این حالت سیالات برشی که دارای خاصیت روان‌کاری بالایی هستند به‌ندرت تأثیرگذار خواهند بود و فقط قابلیت خنک‌کنندگی بالای سیال برشی مدنظر قرار می‌گیرد [۲۷].

۳- خنک‌کاری کرایوژنیک

امروزه دستیابی هم‌زمان به حداکثر نرخ براده‌برداری، صافی سطح و دقت ابعادی به‌منظور دستیابی به حداکثر راندمان و کاهش هزینه‌های تولید قطعات امری بسیار ضروری به شمار می‌رود. از طرفی شرایط کاری و خواص مکانیکی ابزارها در فرآیندهای ماشین‌کاری، تأثیر بسزایی در دستیابی به کیفیت پایدار قطعات و کنترل هزینه‌های تولید دارند. در ماشین‌کاری برخی مواد به دلیل نرخ بسیار بالای فرسایش ابزار، شرایط سختی در ماشین‌کاری به وجود می‌آید. در واقع بالا بودن نرخ حرارت تولیدشده در ماشین‌کاری این مواد که موجب بالا رفتن سریع دما در ناحیه برش می‌شود، عامل اصلی بروز مشکل در این‌گونه شرایط به شمار می‌رود. این دمای بسیار بالا در برخی موارد باعث تغییر ریزساختار و ترکیب شیمیایی قطعه‌کار می‌گردد [۲۹]. عملی‌ترین و مؤثرترین روش به‌منظور بهبود فرآیند ماشین‌کاری و سختی برش مواد، کاهش دمای برش است. یکی از روش‌های مؤثر در کاهش دمای برش استفاده از خنک‌کاری کرایوژنیک است [۱]. علم کرایوژنیک

جدول ۲: خواص فیزیکی و گرمایی فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۰۴ [۱].

Table 2. Physical and thermal properties of AISI 304 austenitic stainless steel

مقدار	واحد	مشخصه
۸	گرم بر سانتی‌متر مکعب	چگالی
۸۶	گیگا پاسکال	مدول برشی
۲۹	راکول سی	سختی
۲۱۵	مگا پاسکال	استحکام تسلیم
۱۹۳	گیگا پاسکال	مدول الاستیسیته
۰/۵	ژول بر گرم سانتی‌گراد	قابلیت گرمایی ویژه
۱۶/۲	وات بر متر کلوین	قابلیت هدایت حرارتی
۰/۲۹	-	ضریب پواسون

جدول ۳: ترکیب شیمیایی فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۰۴

Table 3. Chemical composition of AISI 304 austenitic stainless steel

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

شرکت کورلوی^۵ استفاده شد. این اینسرت بر روی هولدر دارای کد استاندارد SDJCR2525M15 نصب گردید. هر آزمایش نیز با استفاده از یک لبه ابزار جدید و سالم صورت پذیرفت.

۶- طراحی آزمایش با استفاده از روش رویه پاسخ

۶-۱- روش رویه پاسخ

روش رویه پاسخ مجموعه فن‌های ریاضی و آماری است که برای مدل‌سازی و تحلیل مسائلی که پاسخ موردنظر تحت تأثیر چندین متغیر قرار می‌گیرد، مفید است و هدف آن بهینه‌سازی این پاسخ است. اساس این روش بر طراحی آزمایش‌ها و بهینه‌سازی آماری استوار است. طرح آزمایش به عنوان ابزاری مناسب در توسعه، اصلاح و صرفه‌جویی در وقت و هزینه



Fig. 1. Cryogenic cooling system

شکل ۱: سیستم خنک‌کاری کرایوژنیک

ماشین‌کاری را نمایش می‌دهد.

۵- مواد و تجهیزات آزمایش

تمامی آزمایش‌ها بر روی ماشین تراش TN50BR ساخت شرکت ماشین‌سازی تبریز با حداکثر توان موتور ۵/۵ کیلووات و دوران ۱۴۵۰ دور در دقیقه، سرعت دوران اسپیندل بین ۲۲/۴ تا ۲۰۰۰ دور در دقیقه، پیشروی ۰/۰۵ تا ۶/۴ میلی‌متر بر دور، وزن ۱۷۵۰ کیلوگرم و طول تراشکاری ۱۵۰۰ میلی‌متر انجام گرفت. برای اندازه‌گیری توان مصرفی دستگاه در حین فرآیند ماشین‌کاری از وات‌متر مولتی‌کیوب^۱ ساخت شرکت ان‌دی^۲ استفاده شد. این وات‌متر سه فاز با ولتاژ ۴۰۰ ولت و فرکانس ۵۰ هرتز بود. به منظور کنترل سرعت برشی و تنظیم دقیق سرعت برشی در هنگام ماشین‌کاری به دلیل محدودیت‌های دستگاه تراش و پله‌ای بودن سیستم تغییر سرعت در دستگاه تراش، از دستگاه تغییردهنده فرکانس (اینورتر) ساخت شرکت ال‌جی^۳ مدل SV040 iG5-4 که دارای ولتاژ ۳۸۰ تا ۴۶۰ ولت و بازه تغییر فرکانس ۰/۱ تا ۴۰۰ هرتز بود، استفاده گردید. همچنین برای کنترل دوران دستگاه پس از اعمال تغییر فرکانس از دورسنج مدل iG5 ساخت شرکت ال‌جی استفاده شده است. علاوه بر این، برای اندازه‌گیری سایش سطح آزاد ابزار از میکروسکوپ نوری المپیوس^۴ مدل PMG3 بهره گرفتیم. جنس قطعه‌کار مورد استفاده در آزمایش‌ها فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۰۴ بوده که در جدول ۲ خصوصیات فیزیکی و گرمایی و در جدول ۳ ترکیب شیمیایی این فولاد مشخص شده است. با توجه به اینکه ماشین‌کاری می‌بایست بر روی فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۰۴ انجام می‌گرفت، اینسرت کارباید پوشش‌دار CVD با کد استاندارد DNMG150604-GM و گرید NC3030 ساخت

- 1 Multi Cube
- 2 ND
- 3 LG
- 4 Olympus

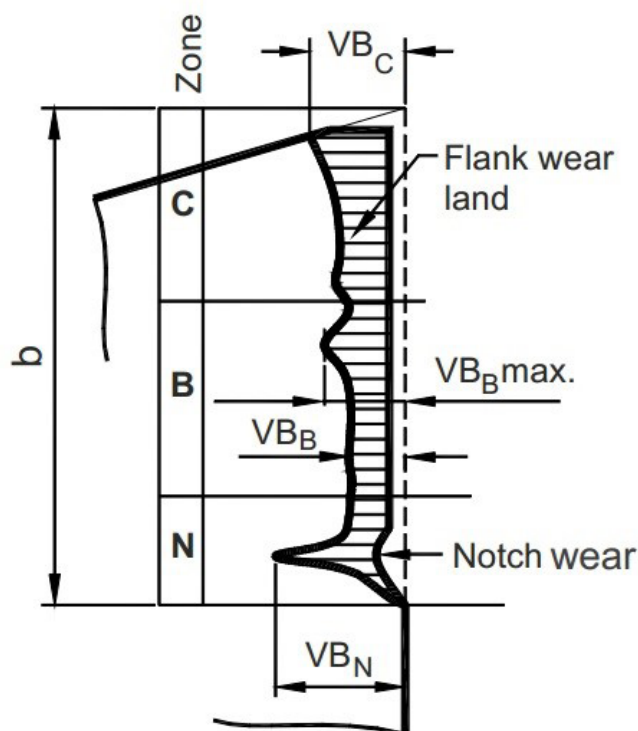


Fig. 2. Tool wear zones according to standard ISO 3685

شکل ۲: نواحی سایش ابزار مطابق با استاندارد ایزو ۳۶۸۵ [۳۴].

به منظور پیش‌بینی مقادیر پاسخ استفاده می‌شود. این مدل رگرسیونی برای تعداد K فاکتور مطابق رابطه (۲) است:

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

در معادله بالا B_0 ضریب ثابت و B_1, B_2, B_K ضرایب ترم‌های خطی و B_{11}, B_{22}, B_{KK} ضرایب ترم‌های درجه دوم و $B_{13}, B_{12}, B_{K-1,K}$ ضرایب ترم‌های برهم‌کنش بوده و X_i نشان‌دهنده پارامترهای ورودی است [۳۱] و [۳۵].

۶-۳-۱- مدل‌سازی سایش ابزار

برای تعداد دو فاکتور، مدل رگرسیونی به عنوان تابعی از پارامترهای سرعت برشی و زمان ماشین‌کاری به صورت رابطه (۳) ارائه می‌گردد:

$$Y = B_0 + B_1 V + B_2 T + B_{11} V^2 + B_{22} T^2 + B_{12} VT \quad (3)$$

با استفاده از داده‌های آزمایش، مقادیر ضرایب معادله غیرخطی فوق به کمک روش رگرسیونی و نرم‌افزار آماری مینی‌تب نسخه ۱۶ محاسبه شدند. با جایگزینی این مقادیر در رابطه (۳)، مدل نهایی سایش ابزار در ماشین‌کاری خشک و کرایونیک برای پارامترهای کدبندی شده به صورت رابطه (۴) و (۵) خواهند بود:

آزمایش‌ها و رفع عیوب آن‌ها به کار گرفته می‌شود و استفاده به‌موقع از آن سبب کاهش زمان تولید و هزینه‌ها خواهد شد. مهم‌ترین هدف روش رویه پاسخ تعیین شرایط بهینه برای به دست آوردن بیشترین یا کمترین مقدار پاسخ در خروجی است [۳۰ و ۳۱].

۶-۲- طراحی آزمایش و مدل‌سازی ریاضی.

در تحقیق حاضر یک طرح استاندارد از روش رویه پاسخ که افس‌دی نامیده می‌شود، برای بررسی فرآیند تراشکاری استفاده شده است. این طرح استاندارد یکی از معروف‌ترین طرح‌های مرکب مرکزی است [۳۲] که در آن برای هر کدام از متغیرها سه سطح در نظر گرفته می‌شود. متغیرها در این تحقیق سرعت برشی و زمان ماشین‌کاری هستند. جدول ۴ این متغیرها را به همراه سطوح آن‌ها نشان می‌دهد. در تمامی 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 ابزار انتخاب شده است [۳۳]. سایش سطح آزاد ابزار $(V_{B(max)})$ برحسب میلی‌متر و توان مصرفی دستگاه برحسب کیلووات پاسخ‌های خروجی تحقیق حاضر هستند. شکل ۲ نواحی مختلف سایش در سطح آزاد ابزار را بر اساس استاندارد ایزو ۳۶۸۵ نشان می‌دهد.

جدول ۴: پارامترهای ورودی و سطوح آن‌ها

Table 4. Input parameters and their levels

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

پس از طراحی آزمایش‌ها، در ابتدا تمامی آزمایش‌ها بدون استفاده از مواد خنک‌کننده و در حالت تراشکاری خشک انجام شدند. نتایج آزمایش‌ها در حالت خشک در جدول ۵ قابل مشاهده می‌باشند. پس از انجام آزمایش‌های حالت خشک، تمامی آزمایش‌ها در حالت کرایونیک و با استفاده از نیتروژن مایع به عنوان سیال خنک‌کننده تکرار شده که نتایج آن‌ها در جدول ۶ نشان داده شده است.

۶-۳- مدل‌سازی ریاضی

ارتباط بین متغیرهای ورودی (سرعت برشی V و زمان ماشین‌کاری T) و پاسخ‌های خروجی Y به صورت رابطه (۱) بیان می‌شود:

$$Y = F(V, T) \quad (1)$$

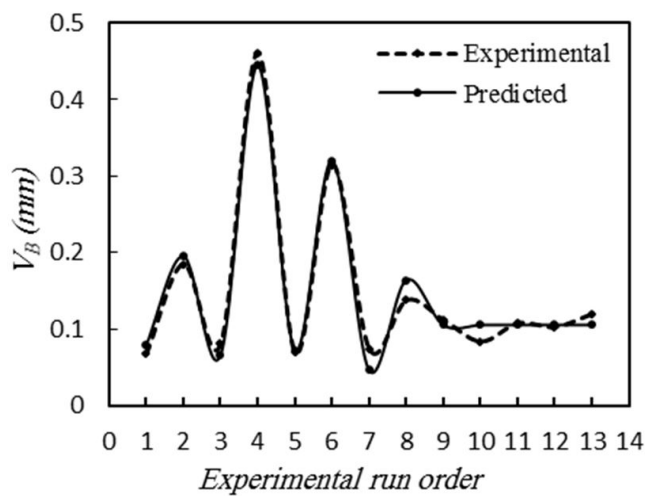
که در آن F (تابع پاسخ) یک مدل رگرسیون درجه دوم بوده و از آن

1 Face Center Design (FCD)

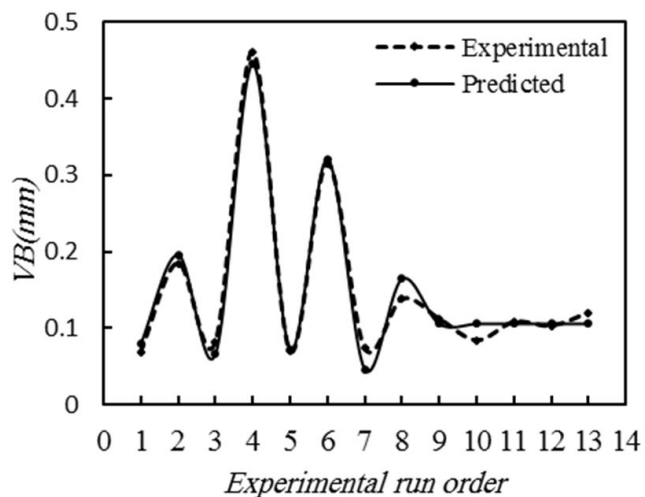
$$V_B (Dry) = 0.235 + 0.192V + 0.163T + 0.088V^2 + 0.125VT \quad (۴)$$

$$V_B (Cryogenic) = 0.105 + 0.123V + 0.058T + 0.091V^2 + 0.065V \cdot T \quad (۵)$$

شکل ۳ (الف) و (ب) به ترتیب مقادیر محاسبه شده از طریق مدل برازش شده را به همراه مقادیر تجربی برای سایش ابزار در حالت خشک و کرایونیک نشان می‌دهند. نتایج محاسبه شده از مدل ریاضی به خوبی با نتایج تجربی با خطای ۲/۰۵٪ برای حالت خشک و ۹/۱۱٪ برای حالت کرایونیک مطابقت دارند.



(الف)



(ب)

Fig. 3. Comparison between experimental results of the cutting tool flank wear and predicted values by regression model. a: Dry machining b: Cryogenic machining

شکل ۳: مقایسه نتایج تجربی سایش سطح آزاد و مقادیر پیش‌بینی شده با استفاده از مدل درجه دوم (الف) حالت خشک (ب) حالت کرایونیک

جدول ۵: آزمایش‌های طراحی شده و نتایج آن‌ها (حالت خشک)

Table 5. Design layout and experimental results (Dry machining)

شماره آزمایش	مقادیر کد شده		مقادیر واقعی		مقادیر پاسخ‌های خروجی	
	T	V	T	V	P (kW)	V _B (max)
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	۰/۸۱۲
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	۰	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

جدول ۶: آزمایش‌های طراحی شده و نتایج آن‌ها (حالت کرایونیک)

Table 6. Design layout and experimental results (Cryogenic machining)

شماره آزمایش	مقادیر کد شده		مقادیر واقعی		مقادیر پاسخ‌های خروجی	
	T	V	T	V	P (kW)	V _B (max)
۱	-۱	-۱	۲	۱۰۰	۰/۰۲۹	۰/۰۶۸
۲	۱	-۱	۲	۱۶۰	۰/۰۴۲	۰/۱۸۵
۳	-۱	۱	۴	۱۰۰	۰/۰۳۸	۰/۰۸۱
۴	۱	۱	۴	۱۶۰	۰/۰۵۴	۰/۴۶۱
۵	-۱	۰	۳	۱۰۰	۰/۰۳۵	۰/۰۷۰
۶	۱	۰	۳	۱۶۰	۰/۰۴۶	۰/۳۱۵
۷	-۱	۰	۲	۱۳۰	۰/۰۳۷	۰/۰۷۴
۸	۰	-۱	۴	۱۳۰	۰/۰۵۰	۰/۱۳۸
۹	۰	۰	۳	۱۳۰	۰/۰۴۴	۰/۱۱۲
۱۰	۰	۰	۳	۱۳۰	۰/۰۴۵	۰/۰۸۴
۱۱	۰	۰	۳	۱۳۰	۰/۰۴۳	۰/۱۰۸
۱۲	۰	۰	۳	۱۳۰	۰/۰۴۲	۰/۱۰۳
۱۳	۰	۰	۳	۱۳۰	۰/۰۴۴	۰/۱۲۰

که در این شکل‌ها مشخص است، باقیمانده‌ها در اطراف خط صفر به صورت تصادفی و بدون پیروی از الگوی خاصی قرار گرفته‌اند و دارای مقادیر مثبت و منفی می‌باشند که نشان‌دهنده استقلال داده‌ها و باقیمانده‌ها است.

• **آنالیز واریانس مدل رگرسیون**

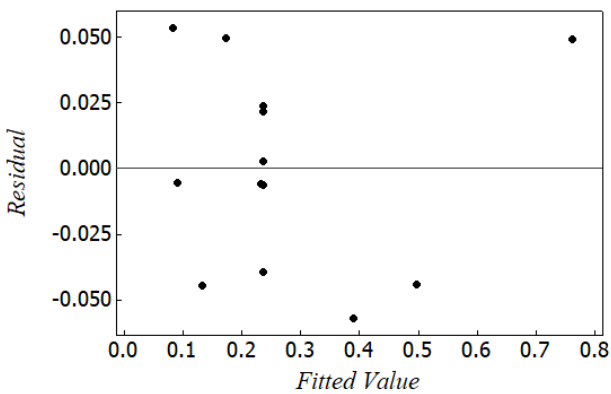
یکی از روش‌های قابل اطمینان برای بررسی کیفیت مدل برازش شده استفاده از آنالیز واریانس است. ایده اصلی آنالیز واریانس، مقایسه تغییرات حاصل از تغییر متغیرها، با تغییرات ناشی از خطای ذاتی موجود در اندازه‌گیری و تولید پاسخ‌ها است. با استفاده از مقایسه واریانس‌ها این امکان فراهم می‌آید که اهمیت رگرسیون استفاده شده برای پیش‌بینی پاسخ ناشی از واریانس‌های آزمایش، تعیین گردد [۳۵]. آنالیز واریانس برای سایش سطح آزاد ابزار در جدول‌های ۷ و ۸ برای ماشین‌کاری حالت‌های خشک و کرایوژنیک نشان داده شده است. با توجه به سطح اطمینان ۹۵٪ مقدار P برای هر کدام از پارامترها که کمتر از ۰/۰۵ باشد، نشان‌دهنده این است که پارامتر موردنظر از لحاظ آماری معنی‌دار بوده و در فرآیند نیز تأثیرگذار است. برای هر دو حالت

• **بررسی کفایت مدل‌های به‌دست‌آمده برای سایش ابزار**

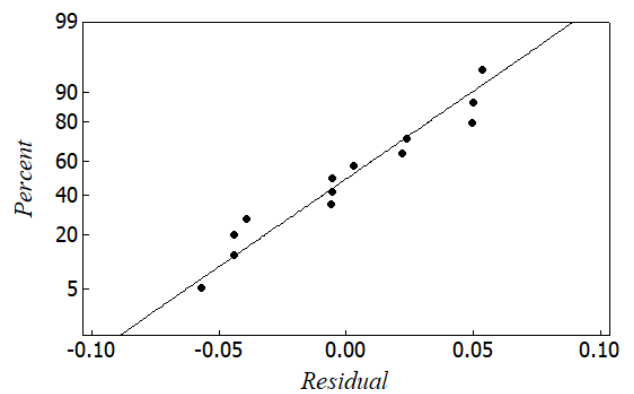
برای بررسی بیشتر در مورد کفایت مدل‌های به‌دست‌آمده برای حالت‌های خشک و کرایوژنیک نمودار باقیمانده‌ها را مورد بررسی قرار دادیم. شکل ۴ (الف) و (ب) به ترتیب نمودار توزیع احتمال نرمال باقیمانده‌ها را برای سایش در سطح آزاد ابزار در حالت ماشین‌کاری خشک و کرایوژنیک نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود توزیع داده‌ها در نزدیک خط مورب بوده و این بدین معنی است که خطاها دارای توزیع نرمال می‌باشند و مدل برازش شده کیفیت خوبی را داراست.

شکل ۵ (الف) و (ب) به ترتیب نمودار باقیمانده‌ها را در مقابل مقادیر به‌دست‌آمده از مدل رگرسیون برای ماشین‌کاری حالت خشک و کرایوژنیک نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود پراکندگی مناسبی در شکل وجود دارد. از این پراکندگی می‌توان نتیجه گرفت که مدل پیشنهادی مدل مناسبی برای پیش‌بینی سایش ابزار می‌باشد.

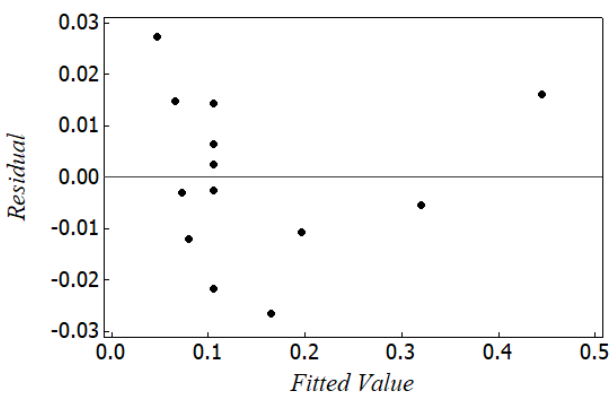
شکل ۶ (الف) و (ب) به ترتیب مقادیر باقیمانده‌ها را در مقابل شماره آزمایش برای ماشین‌کاری خشک و کرایوژنیک نشان می‌دهند. همان‌طور



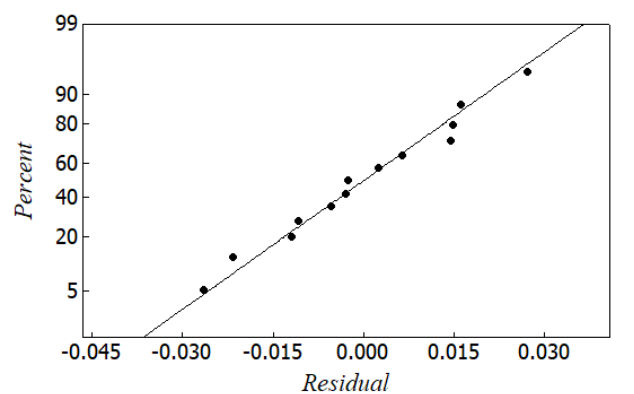
(الف)



(الف)



(ب)



(ب)

Fig. 5. Plot of residuals against the obtained values of the regression model for the flank wear. a: Dry machining b: Cryogenic machining

Fig. 4. Normal probability plot of residuals for the flank wear. a: Dry machining b: Cryogenic machining

شکل ۵: نمودار باقیمانده‌ها در مقابل مقادیر به‌دست‌آمده از مدل برای سایش ابزار (الف) حالت خشک (ب) حالت کرایوژنیک

شکل ۴: نمودار توزیع احتمال نرمال باقیمانده‌ها برای سایش سطح آزاد (الف) حالت خشک (ب) حالت کرایوژنیک

• مقایسه نتایج به دست آمده برای سایش ابزار در حالت خشک و

کرایونیک

پس از انجام آزمایش‌ها و بررسی نتایج به دست آمده مشخص شد که استفاده از نیتروژن مایع باعث بهبود عمر ابزار شده است. شکل ۷ درصد کاهش سایش ابزار در حالت ماشین‌کاری کرایونیک را در مقایسه با ماشین‌کاری خشک نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده کرد که استفاده از حالت کرایونیک باعث کاهش سایش ابزار از ۱۸/۱۴٪ تا ۶۷/۵۶٪ شده است.

در شکل‌های ۸ و ۹ تأثیر سرعت برشی و مدت‌زمان ماشین‌کاری فولاد ۳۰۴ بر روی سایش ابزار کاربیدی نشان داده شده است. مطابق با آنچه در شکل ۸ دیده می‌شود، روند تغییرات سایش ابزار با تغییر زمان ماشین‌کاری در سرعت‌های برشی پایین بسیار کم است. بیشترین تغییرات سایش ابزار مربوط به زمانی است که در بیشترین سرعت برشی، زمان ماشین‌کاری تغییر پیدا 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 روی سایش ابزار تأثیرگذار است. با افزایش سرعت برشی در ابتدا به مقدار ناچیزی سایش ابزار کاهش پیدا کرده و سپس رفته‌رفته با افزایش میزان سایش ابزار مواجه خواهیم شد. با تعامل بیشترین سرعت برشی و بیشترین زمان ماشین‌کاری یعنی هنگامی که از سرعت برشی ۱۶۰ متر بر دقیقه و زمان ۴ دقیقه برای ماشین‌کاری استفاده می‌شود، سایش سطح آزاد ابزار به حداکثر مقدار خود در ماشین‌کاری خشک می‌رسد. در شکل ۹ که سایش ابزار در حالت کرایونیک به نمایش گذاشته شده است نیز همین الگو مشاهده می‌شود. با کمی تأمل به این دو نمودار تشابه در روند کاهشی و یا افزایشی آن‌ها کاملاً مشهود است. تفاوت اصلی بین شکل‌های ۸ و ۹ در میزان سایش سطح آزاد ابزار برشی می‌باشد که با توجه به جداول ۵ و ۶ که مقادیر سایش ابزار حاصل از آزمایش‌های تجربی را نشان می‌دهند، این امر بارز است. تولید حرارت در حین فرایند ماشین‌کاری به عنوان مشکلی بزرگ برای عمر ابزار شناخته می‌شود. هرچه سرعت برشی و یا زمان ماشین‌کاری افزایش پیدا می‌کنند، تولید گرما در ناحیه برشی بیشتر می‌شود و سایش

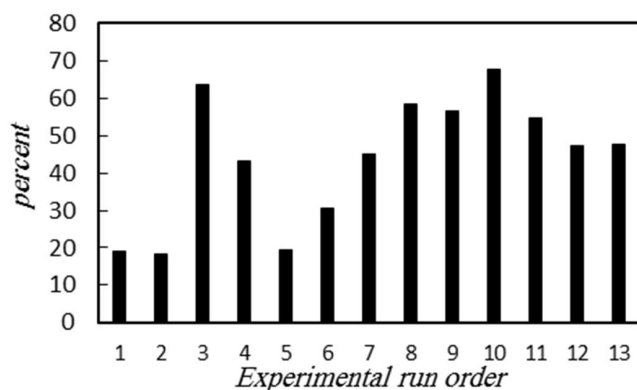
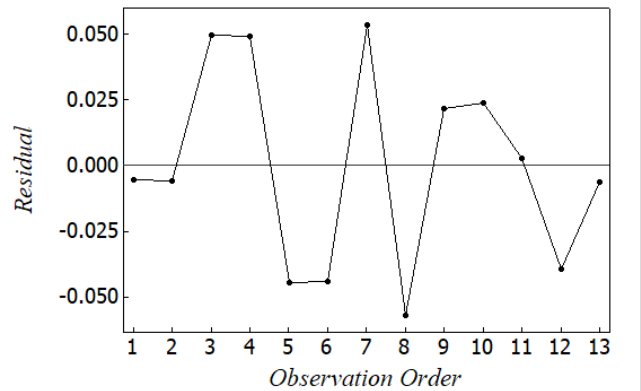
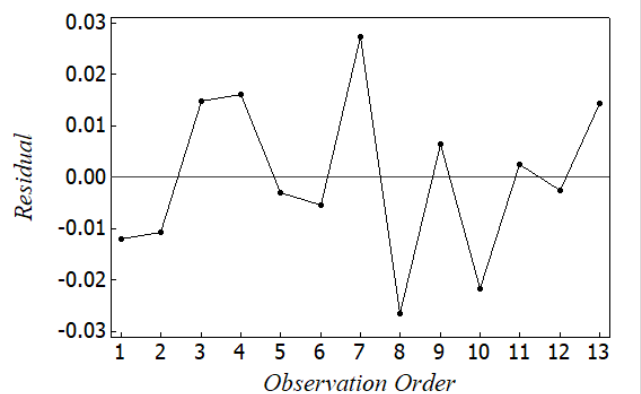


Fig. 7. Percent of tool wear improvement in cryogenic status

شکل ۷: درصد بهبود سایش ابزار حاصل از ماشین‌کاری کرایونیک



(الف)



(ب)

Fig. 6. Plot of residuals against the order of data for the flank wear. a: Dry machining b: Cryogenic machining

شکل ۶: نمودار باقیمانده‌ها در مقابل شماره آزمایش‌ها برای سایش ابزار (الف) حالت خشک (ب) حالت کرایونیک

ماشین‌کاری، مقدار P کمتر از ۰/۰۵ بوده که نشان از تطابق خوب مدل با نتایج تجربی دارد. (مقادیر صفر در جداول به معنای P کمتر از ۰/۰۰۰۱ می‌باشند).

مقدار R^2 در جدول آنالیز واریانس معادل ۹۵/۹۰٪ و ۹۸/۱۶٪ به ترتیب برای حالت‌های خشک و کرایونیک می‌باشند که نشان‌دهنده پوشش داده‌ها توسط تحلیل انجام‌شده و معادلات رگرسیون به دست آمده است. در واقع فاکتور R^2 میزان درصد تغییرپذیری خروجی را به وسیله کلیه پارامترهای ورودی توجیه می‌کند. ولی از آنجایی که با اضافه شدن یک پارامتر بدون آنکه آن پارامتر مؤثر باشد یا نباشد، مقدار R^2 افزایش می‌یابد، لذا استفاده از پارامتر R^2 تعدیل شده $R^2(adj.)$ برای بررسی کفایت مدل بهتر است که این مقدار برای سایش ابزار در ماشین‌کاری حالت خشک ۹۳/۸۶٪ و برای حالت کرایونیک ۹۷/۲۳٪ می‌باشند.

جدول ۷: جدول آنالیز واریانس برای سایش سطح آزاد ابزار پس از حذف ترم‌های غیرمؤثر (حالت خشک)

Table 7. ANOVA table for the flank wear after removing insignificant terms. (Dry machining).

مقدار P	مقدار F	میانگین مربعات	جمع مربعات	درجه آزادی	ترم
۰/۰۰۰	۴۶/۸۳	۰/۱۰۳۰	۰/۴۱۲۳	۴	مدل
۰/۰۰۰	۷۷/۷۳	۰/۱۷۱۱	۰/۳۴۲۲	۲	ترم‌های خطی
۰/۰۰۰	۹۱/۱۰	۰/۲۰۰۵	۰/۲۰۰۵	۱	سرعت برشی
۰/۰۰۰	۶۴/۳۵	۰/۱۴۱۶	۰/۱۴۱۶	۱	زمان ماشین‌کاری
۰/۰۱۶	۹/۱۶	۰/۰۲۰۱	۰/۰۲۰۱	۱	ترم‌های درجه‌دو
۰/۰۱۶	۹/۱۶	۰/۰۲۰۱	۰/۰۲۰۱	۱	توان دوم سرعت برشی
۰/۰۰۱	۲۲/۶۹	۰/۰۴۹۹	۰/۰۴۹۹	۱	ترم‌های تعامل اثر
۰/۰۰۱	۲۲/۶۹	۰/۰۴۹۹	۰/۰۴۹۹	۱	تعامل اثر سرعت برشی و زمان ماشین‌کاری
-	-	۰/۰۰۲۲	۰/۰۱۷۶	۸	خطای باقیمانده‌ها
۰/۱	۵/۷۲	۰/۰۰۳۷	۰/۰۱۴۹	۴	فقدان تطابق مدل
-	-	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۲۶	۴	خطای خالص
-	-	-	۰/۴۲۹۹	۱۲	کل

Note: $R-Sq. = 0.9590$, $R-Sq. (adj.) = 0.9386$

جدول ۸: جدول آنالیز واریانس برای سایش سطح آزاد ابزار پس از حذف ترم‌های غیرمؤثر (حالت کرایوژنیک)

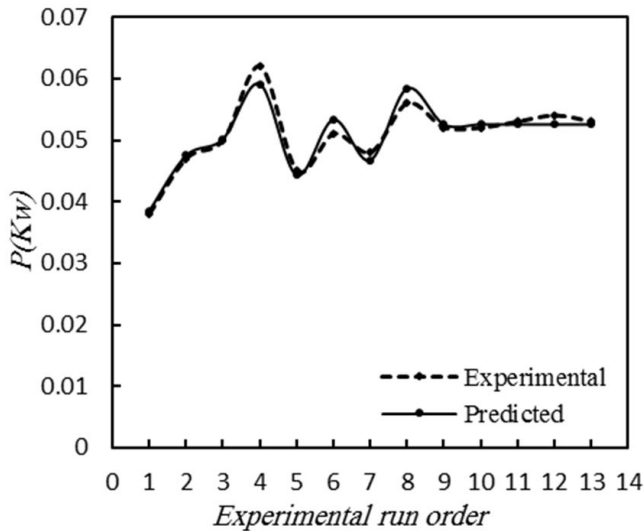
Table 8. ANOVA table for the flank wear after removing insignificant terms. (Cryogenic machining).

مقدار P	مقدار F	میانگین مربعات	جمع مربعات	درجه آزادی	ترم
۰/۰۰۰	۱۰۶/۴۱	۰/۰۳۹۱	۰/۱۵۶۶	۴	مدل
۰/۰۰۰	۱۵۲/۸۹	۰/۰۵۶۲	۰/۱۱۲۵	۲	ترم‌های خطی
۰/۰۰۰	۲۴۹/۳۵	۰/۰۹۱۷	۰/۰۹۱۷	۱	سرعت برشی
۰/۰۰۰	۵۶/۴۴	۰/۰۲۰۷	۰/۰۲۰۷	۱	زمان ماشین‌کاری
۰/۰۰۰	۷۲/۸۵	۰/۰۲۶۸	۰/۰۲۶۸	۱	ترم‌های درجه‌دو
۰/۰۰۰	۷۲/۸۵	۰/۰۲۶۸	۰/۰۲۶۸	۱	توان دوم سرعت برشی
۰/۰۰۰	۴۶/۹۹	۰/۰۱۷۲	۰/۰۱۷۲	۱	ترم‌های تعامل اثر
۰/۰۰۰	۴۶/۹۹	۰/۰۱۷۲	۰/۰۱۷۲	۱	تعامل اثر سرعت برشی و زمان ماشین‌کاری
-	-	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۲۹	۸	خطای باقیمانده‌ها
۰/۱۵۳	۳/۰۵	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۲۲	۴	فقدان تطابق مدل
-	-	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۷	۴	خطای خالص
-	-	-	۰/۱۵۹۵	۱۲	کل

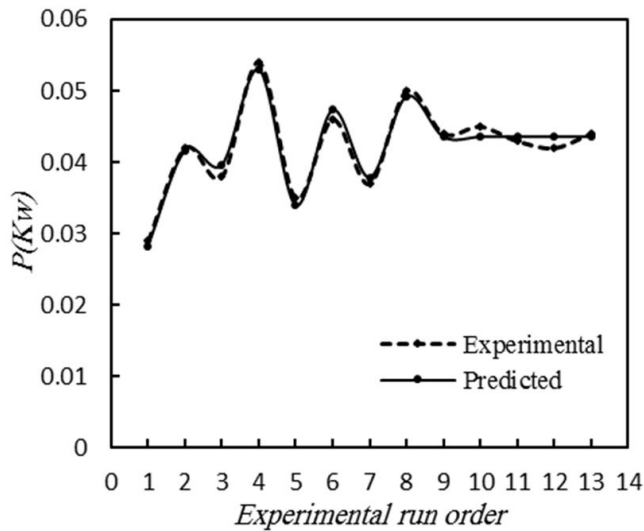
Note: $R-Sq. = 0.9590$, $R-Sq. (adj.) = 0.9386$

ایفا می‌کند. در سرعت‌های برشی بالا که نرخ تولید گرما زیاد است، تأثیر نیتروژن مایع بیشتر از سرعت‌های برشی پایین حائز اهمیت است. با انجام آزمایش‌های تجربی و بررسی نتایج مشخص شد استفاده از سیال کرایوژنیک باعث کاهش سایش سطح آزاد ابزار تا ۶۷/۵٪ در مقایسه با ماشین‌کاری خشک می‌شود.

بیشتری در ابزار اتفاق می‌افتد. این سایش باعث می‌شود لبه تیز و برنده ابزار از بین رفته و نیروهای برشی افزایش پیدا کنند. از طرفی سایش بیشتر ابزار یعنی تماس بیشتر لبه ابزار با قطعه کار که این اتفاق باعث ایجاد اصطکاک بیشتر بین ابزار و قطعه کار می‌شود. استفاده از سیال خنک‌کننده کرایوژنیک با کاهش دمای ناحیه برش نقش بسیار مهمی در افزایش عمر ابزار برشی



(الف)



(ب)

Fig. 10. Comparison between experimental results of the power consumption and predicted values by regression model. a: Dry machining b: Cryogenic machining

شکل ۱۰: مقایسه نتایج تجربی توان مصرفی و مقادیر پیش‌بینی شده با استفاده از مدل درجه دوم (الف) حالت خشک (ب) حالت کرایوژنیک

• بررسی کفایت مدل‌های به‌دست‌آمده برای توان مصرفی دستگاه
شکل‌های ۱۱ (الف) و (ب) به ترتیب نمودار توزیع احتمال نرمال باقیمانده‌ها را برای توان مصرفی دستگاه در ماشین‌کاری خشک و کرایوژنیک نشان می‌دهند که در آن‌ها توزیع داده‌ها نزدیک به خط مورب بوده و خطاها دارای توزیع نرمال هستند و مدل از کیفیت مناسبی برخوردار است. در شکل‌های ۱۲ (الف) و (ب) نمودار باقیمانده‌ها در مقابل مقادیر به‌دست‌آمده از مدل رگرسیون و در شکل‌های ۱۳ (الف) و (ب) نمودار باقیمانده‌ها در مقابل شماره آزمایش‌ها برای ماشین‌کاری خشک و کرایوژنیک نشان داده شده که در آن‌ها باقیمانده‌ها روند مشخصی را دنبال نکرده و دارای مقادیر مثبت و منفی هستند که نشان از استقلال داده‌ها بوده و مناسب بودن مدل رگرسیون برای پیش‌بینی توان مصرفی دستگاه را نشان می‌دهد.

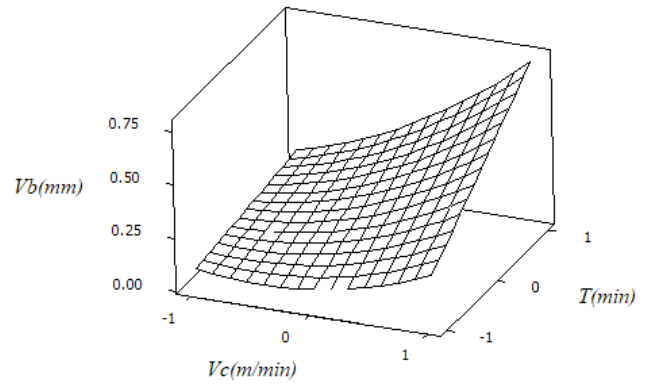


Fig. 8. 3D surface graph for the flank wear (Dry machining).

شکل ۸: طرح رویه پاسخ سه‌بعدی سایش ابزار (حالت خشک)

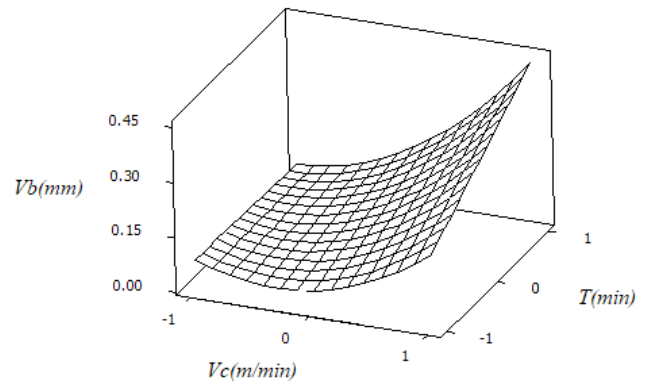


Fig. 9. 3D surface graph for the flank wear (Cryogenic machining).

شکل ۹: طرح رویه پاسخ سه‌بعدی سایش ابزار (حالت کرایوژنیک)

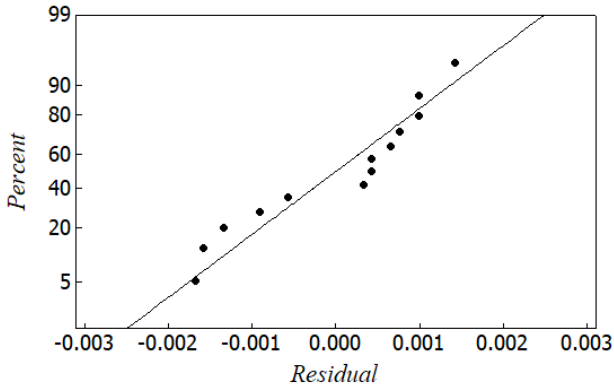
۶-۳-۲- مدل‌سازی توان مصرفی دستگاه

مدل رگرسیون درجه دوم به‌دست‌آمده برای توان مصرفی در حالت ماشین‌کاری خشک و کرایوژنیک پس از حذف متغیرهای غیر مؤثر با توجه به سطح اطمینان ۹۵٪ در رابطه‌های (۶) و (۷) آمده است.

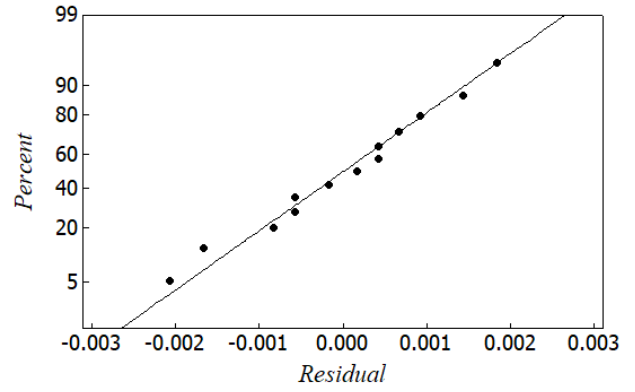
$$P(Dry) = 0.0525 + 0.0045V + 0.0058T - 0.0037V^2 \quad (6)$$

$$P(Cryogenic) = 0.0435 + 0.0066V + 0.0056T - 0.0029V^2 \quad (7)$$

شکل ۱۰ (الف) و (ب) به ترتیب مقادیر محاسبه‌شده از طریق مدل برازش شده را به همراه مقادیر تجربی برای توان مصرفی دستگاه در حالت‌های خشک و کرایوژنیک نشان می‌دهند. نتایج محاسبه‌شده از مدل ریاضی به‌خوبی با نتایج تجربی با خطای ۱/۹۹٪ و ۲/۲۴٪ به ترتیب برای ماشین‌کاری حالت‌های خشک و کرایوژنیک مطابقت دارند.



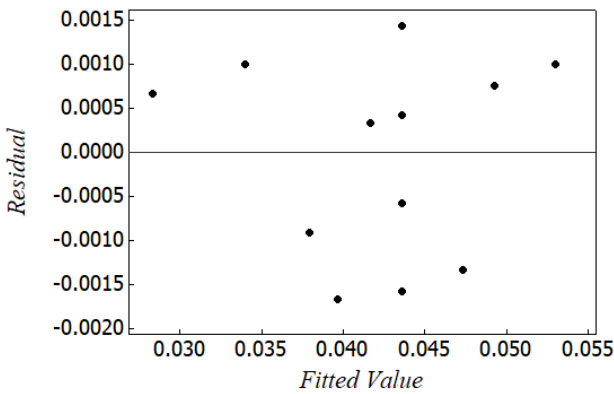
(ب)



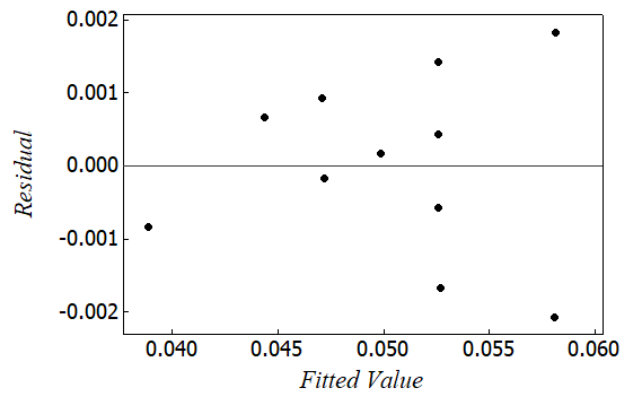
(الف)

Fig. 11. Normal probability plot of residuals for the power consumption. a: Dry machining b: Cryogenic machining

شکل ۱۱: نمودار توزیع احتمال نرمال باقیمانده‌ها برای توان مصرفی (الف) حالت خشک (ب) حالت کرایوژنیک



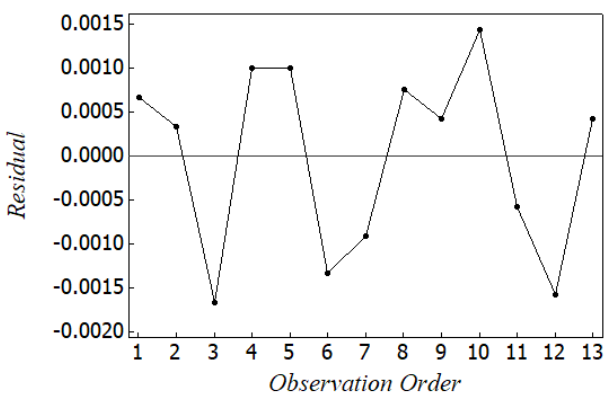
(ب)



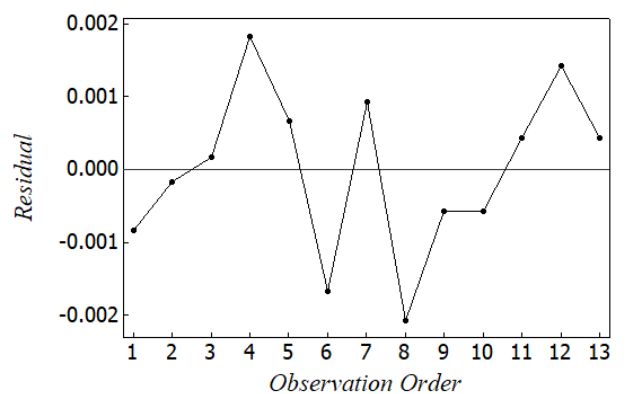
(الف)

Fig. 12. Plot of residuals against the obtained values of the regression model for the power consumption. a: Dry machining b: Cryogenic machining

شکل ۱۲: نمودار باقیمانده‌ها در مقابل مقادیر به دست آمده از مدل برای توان مصرفی (الف) حالت خشک (ب) حالت کرایوژنیک



(ب)



(الف)

Fig. 13. Plot of residuals against the order of data for the power consumption. a: Dry machining b: Cryogenic machining

شکل ۱۳: نمودار باقیمانده‌ها در مقابل شماره آزمایش‌ها برای توان مصرفی (الف) حالت خشک (ب) حالت کرایوژنیک

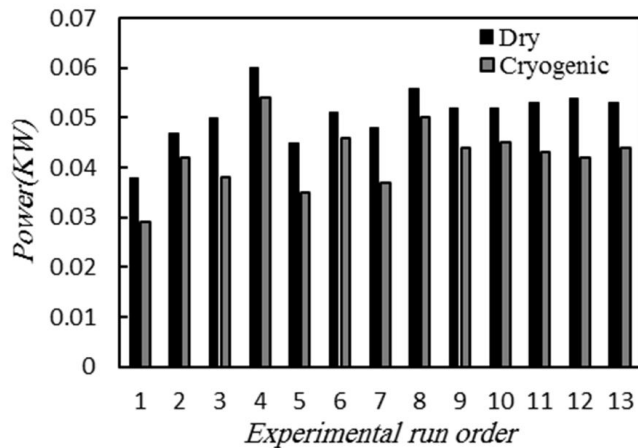


Fig. 14. Comparison of power consumption in cryogenic and dry machining

شکل ۱۴: مقایسه توان مصرفی در ماشین کاری خشک و کرایوژنیک

برشی متفاوت بر روی توان مصرفی دستگاه تأثیرگذار است. با افزایش سرعت برشی مقدار توان مصرفی در ابتدا افزایش پیدا می کند اما هنگامی که سرعت برشی به بیشترین مقدار خود نزدیک می شود، توان مصرفی دستگاه کمی کاهش خواهد یافت. همان گونه که از شکل ۱۵ مشخص است کمترین توان مصرفی زمانی حاصل می شود که با سرعت برشی ۱۰۰ متر بر دقیقه به مدت ۲ دقیقه ماشین کاری انجام شود. این مقادیر کمینه های سرعت برشی و زمان ماشین کاری هستند. با افزایش زمان ماشین کاری و یا سرعت برشی سایش در سطح آزاد ابزار بیشتر شده و شرایط برش سخت تر می شود. در این حالت لبه برش تیز ابزار از بین رفته و متعاقب آن فشار بیشتری به دستگاه تراش وارد شده و توان بیشتری صرف برش ماده می شود تا هنگامی که تعامل

• آنالیز واریانس مدل رگرسیون

حذف عوامل غیر مؤثر، جدول آنالیز واریانس توان مصرفی در حالت ماشین کاری خشک و کرایوژنیک به ترتیب در جداول ۹ و ۱۰ آمده است. برای هر کدام از مدل های برازش شده یک ضریب همبستگی به دست می آید که نشان دهنده کیفیت مدل است. هرچه این ضریب بالاتر باشد مؤید بهتر بودن مدل در برازش داده ها است. ضریب همبستگی برای توان مصرفی دستگاه در ماشین کاری حالت خشک ۹۵/۶۲٪ به دست آمده است. این ضریب برای ماشین کاری در حالت کرایوژنیک ۹۷/۲۶٪ است که بیانگر دقت بسیار خوب مدل سازی به روش رویه پاسخ به کاررفته می باشد.

• مقایسه نتایج به دست آمده برای توان مصرفی دستگاه در حالت خشک و کرایوژنیک

مقایسه نتایج به دست آمده برای توان مصرفی در ماشین کاری حالت های خشک و کرایوژنیک در شکل ۱۴ قابل مشاهده است. نتایج حاکی از آن است که توان مصرفی از ۹/۸٪ تا ۲۴٪ در حالت کرایوژنیک نسبت به حالت خشک کاهش یافته است که با توجه به هزینه بالای مصرف انرژی و لزوم صرفه جویی اقتصادی، مقدار قابل توجهی است.

شکل های ۱۵ و ۱۶ تأثیر متقابل سرعت برشی و زمان ماشین کاری بر روی توان مصرفی دستگاه تراش را در حالت های ماشین کاری خشک و ماشین کاری کرایوژنیک نشان می دهند. مطابق شکل ۱۵ مشاهده می شود که در زمان های ماشین کاری مختلف تأثیر سرعت برشی بر روی توان مصرفی دستگاه غیرخطی است اما زمان ماشین کاری به صورت خطی در سرعت های

جدول ۹: آنالیز واریانس برای توان ماشین کاری پس از حذف ترم های غیر مؤثر (حالت خشک)

Table 9. ANOVA table for the power consumption after removing insignificant terms. (Dry machining).

مقدار P	مقدار F	میانگین مربعات	جمع مربعات	درجه آزادی	ترم
۰/۰۰۰	۶۵/۴۵	۰/۰۰۰۱۱۳	۰/۰۰۰۳۳۹	۳	مدل
۰/۰۰۰	۸۲/۶۸	۰/۰۰۰۱۴۳	۰/۰۰۰۲۸۶	۲	ترم های خطی
۰/۰۰۰	۶۰/۳۰	۰/۰۰۰۱۰۴	۰/۰۰۰۱۰۴	۱	سرعت برشی
۰/۰۰۰	۱۰۵/۰۶	۰/۰۰۰۱۸۲	۰/۰۰۰۱۸۲	۱	زمان ماشین کاری
۰/۰۰۰	۳۱/۰۰	۰/۰۰۰۰۵۴	۰/۰۰۰۰۵۴	۱	ترم های درجه دو
۰/۰۰۰	۳۱/۰۰	۰/۰۰۰۰۵۴	۰/۰۰۰۰۵۴	۱	توان دوم سرعت برشی
-	-	۰/۰۰۰۰۰۲	۰/۰۰۰۰۱۶	۹	خطای باقیمانده ها
۰/۱۱۷	۳/۶۴	۰/۰۰۰۰۰۳	۰/۰۰۰۰۱۳	۵	فقدان تطابق مدل
-	-	۰/۰۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۰۳	۴	خطای خالص
-	-	-	۰/۰۰۰۳۵۵	۱۲	کل
-	-	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۷	۴	خطای خالص
-	-	-	۰/۱۵۹۵	۱۲	کل

Note: $R-Sq. = 0/9562$, $R-Sq. (adj.) = 0/9416$

جدول ۱۰: آنالیز واریانس برای توان ماشین کاری پس از حذف ترم‌های غیرمؤثر (حالت کرایوژنیک)

Table 10. ANOVA table for the power consumption after removing insignificant terms. (Cryogenic machining).

مقدار P	مقدار F	میانگین مربعات	جمع مربعات	درجه آزادی	ترم
۰/۰۰۰	۱۰۶/۴۴	۰/۰۰۰۴۸۷	۰/۰۰۰۱۶۲	۳	مدل
۰/۰۰۰	۱۵۰/۷۲	۰/۰۰۰۴۵۹	۰/۰۰۰۲۳۰	۲	ترم‌های خطی
۰/۰۰۰	۱۷۵/۰۰	۰/۰۰۰۲۶۷	۰/۰۰۰۲۶۷	۱	سرعت برشی
۰/۰۰۰	۱۲۶/۴۴	۰/۰۰۰۱۹۳	۰/۰۰۰۱۹۳	۱	زمان ماشین کاری
۰/۰۰۲	۱۷/۸۹	۰/۰۰۰۰۲۷	۰/۰۰۰۰۲۷	۱	ترم‌های درجه دو
۰/۰۰۲	۱۷/۸۹	۰/۰۰۰۰۲۷	۰/۰۰۰۰۲۷	۱	توان دوم سرعت برشی
-	-	۰/۰۰۰۰۰۲	۰/۰۰۰۰۱۴	۹	خطای باقیمانده‌ها
۰/۴۰۸	۱/۳۱	۰/۰۰۰۰۰۲	۰/۰۰۰۰۰۹	۵	فقدان تطابق مدل
-	-	۰/۰۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۰۵	۴	خطای خالص
-	-	-	۰/۰۰۰۰۵۰۰	۱۲	کل
-	-	۰/۰۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۰۷	۴	خطای خالص
-	-	-	۰/۱۵۹۵	۱۲	کل

Note: $R-Sq. = 0.9726$, $R-Sq. (adj.) = 0.9635$

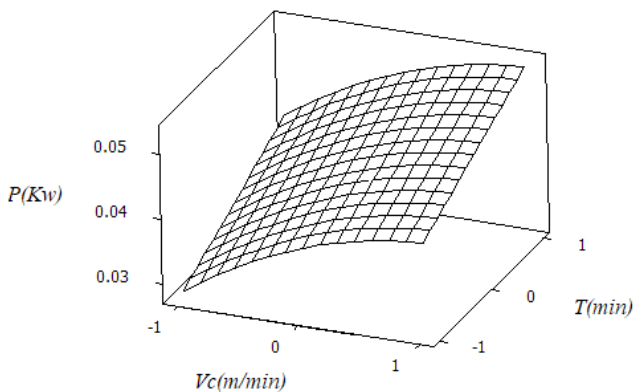


Fig. 16. 3D surface graph for the power consumption (Cryogenic machining).

شکل ۱۶: طرح رویه پاسخ سه‌بعدی توان مصرفی (حالت کرایوژنیک)

می‌کند. این کاهش توان مصرفی دستگاه با توجه به نتایج آزمایش‌ها که در جداول ۵ و ۶ آمده است، قابل تشخیص است. در زمان استفاده از نیتروژن مایع در مقایسه با ماشین کاری حالت خشک تا ۲۴٪ توان مصرفی دستگاه کاهش پیدا کرده است. در طی فرآیند ماشین کاری، تولید حرارت در ناحیه برش امری مهم تلقی می‌شود. تولید حرارت بین ابزار برشی و قطعه کار باعث مشکل ترشدن عملیات برش می‌شود. از طرفی قابلیت هدایت حرارتی پایینی که در فولاد ۳۰۴ وجود دارد باعث می‌شود دمای برش به شدت افزایش پیدا کند. در این شرایط استفاده از خشک کاری کرایوژنیک باعث می‌شود بخش زیادی از گرمای ایجاد شده در ناحیه برش از بین رفته و عملیات برش راحت تر و با صرف انرژی کمتر انجام شود. به عبارت دیگر هنگام استفاده از نیتروژن مایع به انرژی کمتری برای انجام براده برداری نسبت به ماشین کاری

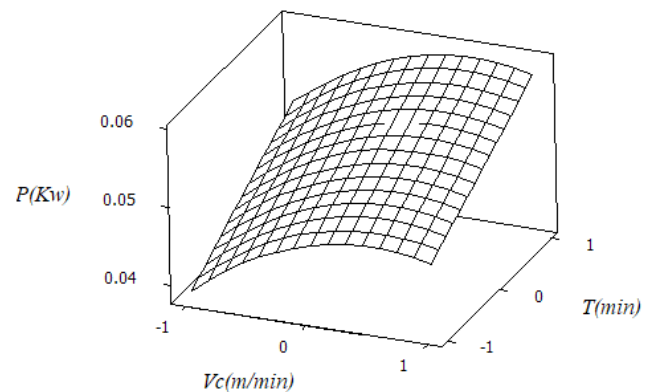


Fig. 15. 3D surface graph for the power consumption (Dry machining).

شکل ۱۵: طرح رویه پاسخ سه‌بعدی توان مصرفی (حالت خشک)

بیشترین سرعت برشی و بیشترین زمان ماشین کاری منجر به رسیدن توان مصرفی دستگاه به حداکثر مقدار می‌شود.

شکل ۱۶ توان مصرفی دستگاه در حالت ماشین کاری کرایوژنیک را به تصویر کشیده است. با کمی دقت تشابه ظاهری بین دو نمودار قابل رؤیت است. در زمان استفاده از نیتروژن مایع به عنوان سیال خنک کننده، کمترین توان مصرفی با ترکیب کمترین سرعت برشی و کمترین زمان ماشین کاری حاصل می‌شود. افزایش سرعت برشی و یا زمان ماشین کاری نیز باعث افزایش توان مصرفی دستگاه می‌شود تا هنگامی که تعامل بیشترین سرعت برشی و بیشترین زمان ماشین کاری منجر به رسیدن توان مصرفی دستگاه به حداکثر مقدار می‌شود. نکته حائز اهمیت آن است که در هنگام استفاده از نیتروژن مایع میزان توان مصرفی دستگاه تراش نسبت به حالت خشک کاهش پیدا

خشک نیاز داریم.

منابع

- [1] J.R. Davis, *ASM specialty handbook: heat-resistant materials*, Asm International, 1997.
- [2] M.P. Groover, *Fundamentals of modern manufacturing: materials processes, and systems*, John Wiley & Sons, 2007.
- [3] E.M. Trent, P.K. Wright, *Metal cutting*, Butterworth-Heinemann, 2000.
- [4] J. Paro, H. Hänninen, V. Kauppinen, Tool wear and machinability of X5 CrMnN 18 18 stainless steels, *Journal of Materials Processing Technology*, 119(1-3) (2001) 14-20.
- [5] K. Tetal, *Machining of Stainless Steels Handbook*, ASM International, (1989) 681.
- [6] R. Ghosh, Z. Zurecki, J.H. Frey, Cryogenic machining with brittle tools and effects on tool life, in: ASME 2003 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, *American Society of Mechanical Engineers*, 2003, pp. 201-209.
- [7] N.B. Fredj, H. Sidhom, C. Braham, Ground surface improvement of the austenitic stainless steel AISI 304 using cryogenic cooling, *Surface and Coatings Technology*, 200(16-17) (2006) 4846-4860.
- [8] A.A. Khan, M.I. Ahmed, Improving tool life using cryogenic cooling, *Journal of materials processing technology*, 196(1-3) (2008) 149-154.
- [9] S. Sun, M. Brandt, M. Dargusch, Machining Ti-6Al-4V alloy with cryogenic compressed air cooling, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 50(11) (2010) 933-942.
- [10] B.D. Jerold, M.P. Kumar, Experimental investigation of turning AISI 1045 steel using cryogenic carbon dioxide as the cutting fluid, *Journal of Manufacturing Processes*, 13(2) (2011) 113-119.
- [11] S. Ravi, M.P. Kumar, Experimental investigation of cryogenic cooling in milling of AISI D3 tool steel, *Materials and Manufacturing Processes*, 27(10) (2012) 1017-1021.
- [12] M. Bermingham, J. Kirsch, S. Sun, S. Palanisamy, M. Dargusch, New observations on tool life, cutting forces and chip morphology in cryogenic machining Ti-6Al-4V, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 51(6) (2011) 500-511.
- [13] S.S. Gill, H. Singh, R. Singh, J. Singh, Flank wear and machining performance of cryogenically treated tungsten carbide inserts, *Materials and Manufacturing Processes*, 26(11) (2011) 1430-1441.
- [14] M. Nalbant, Y. Yildiz, Effect of cryogenic cooling in

۷- نتیجه گیری

در مقاله حاضر به بررسی تأثیر استفاده از نیتروژن مایع به عنوان سیال خنک کننده کرایوژنیک بر روی عمر ابزار و توان مصرفی دستگاه در طی فرآیند تراشکاری فولاد زنگ نزن ۳۰۴ به کمک ابزار برشی کاربیدی پوشش دار پرداخته شد. از روش رویه پاسخ برای توسعه مدل های ریاضی و ارتباط بین پارامترهای ورودی و متغیرهای خروجی استفاده شد. بررسی کفایت مدل ها و متغیرهای مربوطه با استفاده آنالیز واریانس مورد بررسی قرار گرفتند. تأثیر سرعت برشی و زمان ماشین کاری بر روی سایش سطح آزاد ابزار برشی و توان مصرفی دستگاه به کمک نمودارهای سه بعدی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. به نتایج زیر می توان به عنوان یافته های این پژوهش اشاره کرد:

۱. مدل درجه دوم به عنوان مدل رگرسیون برای عمر ابزار و توان مصرفی در هر دو حالت ماشین کاری خشک و کرایوژنیک انتخاب شدند. این مدل ها تطابق خوبی را بین مقادیر پیش بینی شده و نتایج تجربی نشان دادند.
۲. مقادیر F و P مدل ها در جداول آنالیز واریانس، کفایت بالای مدل های رگرسیون را در هر دو حالت ماشین کاری خشک و کرایوژنیک نشان دادند.
۳. سرعت برشی و زمان ماشین کاری بر روی توان مصرفی دستگاه و سایش سطح آزاد ابزار تأثیر گذار بودند.
۴. بیشترین سایش ابزار و بیشترین توان مصرفی در هر دو حالت ماشین کاری خشک و کرایوژنیک زمانی به وجود آمدند که بیشترین مقادیر سرعت برشی و زمان ماشین کاری در نظر گرفته شده بودند.
۵. کاهش ۶۷/۵ درصدی سایش سطح آزاد ابزار از تأثیرات استفاده از سیال خنک کننده کرایوژنیک بود.
۶. استفاده از نیتروژن مایع به عنوان سیال خنک کننده کرایوژنیک باعث شد که توان مصرفی دستگاه تراش تا ۲۴٪ نسبت به حالت ماشین کاری خشک کاهش پیدا کند.

فهرست علائم

P	توان مصرفی (کیلووات)
T	زمان ماشین کاری (دقیقه)
V_B	سایش سطح آزاد (میلی متر)
V	سرعت برشی (متر بر دقیقه)

- Press, New York, NY, (1984).
- [24] A.Fata, M.R. Razfar, Determination of Tool Temperature in Orthogonal Metal Cutting by Finite Element Method and its Comparison with Experimental Work, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 42(3) (2011) 49-59. (In Persian).
- [25] Korkut, Ihsan, M. Boy, I. Karacan, U. Seker. "Investigation of chip-back temperature during machining depending on cutting parameters." *Materials & design* 28, no. 8 (2007) 2329-2335.
- [26] M.R Razfar, *Fundamental of machining and tools*, Amirkabir University, (2011). (In Persian).
- [27] A. Taleb, J. Zarkoub, *Standard for machine tools test in ISO and DIN systems*, Esfahan University of Technology, (2005). (In Persian).
- [28] M. Babamiri, Cryogenic cooling, *Iran Manufacturing Magazine*, No. 38.
- [29] M. Tajdari, S. Z. Chavoshi, E. Shahbazi, Design and requirements of cryogenic cooling process using liquid nitrogen in turning, *2nd manufacturing conference*, Esfahan, Iran, (2010). (In Persian).
- [30] M. Ghoreishi, V. Tahmasbi, Optimization of material removal rate in dry electro discharge machining process, *Modares Mech. Eng.*, 14(12) (2014) 113-121. (In Persian)
- [31] B. Davoodi, B. Eskandari, Investigation of tool life and wear mechanisms in turning of N-155 iron-nickel-base superalloy using response surface methodology, *Modares Mech. Eng.*, 14(15) (2015) 51-58. (In Persian)
- [32] S. Assarzadeh, M. Ghoreishi, A dual response surface-desirability approach to process modeling and optimization of Al₂O₃ powder-mixed electrical discharge machining (PMEDM) parameters, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 64(9-12) (2012) 1459-1477.
- [33] Korloy Inc., *Cutting Tools* (Catalogue), Section B Turning, (2008).
- [34] J. P. Davim, ed. *Machining: fundamentals and recent advances*. Springer Science & Business Media, (2008).
- milling process of AISI 304 stainless steel, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 21(1) (2011) 72-79.
- [15] B.D. Jerold, M.P. Kumar, Machining of AISI 316 stainless steel under carbon-di-oxide cooling, *Materials and Manufacturing Processes*, 27(10) (2012) 1059-1065.
- [16] V. Srivastava, P.M. Pandey, Performance evaluation of electrical discharge machining (EDM) process using cryogenically cooled electrode, *Materials and Manufacturing Processes*, 27(6) (2012) 683-688.
- [17] V. Dhokia, S. Newman, R. Imani-Asrai, An initial study of the effect of using liquid nitrogen coolant on the surface roughness of Inconel 718 nickel-based alloy in CNC milling, *Procedia CIRP*, 3 (2012) 121-125.
- [18] M. Strano, E. Chiappini, S. Tirelli, P. Albertelli, M. Monno, Comparison of Ti6Al4V machining forces and tool life for cryogenic versus conventional cooling, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 227(9) (2013) 1403-1408.
- [19] H. Safari, S. Sharif, S. Izman, H. Jafari, D. Kurniawan, Cutting force and surface roughness characterization in cryogenic high-speed end milling of Ti-6Al-4V ELI, *Materials and Manufacturing Processes*, 29(3) (2014) 350-356.
- [20] N. Govindaraju, L. Shakeel Ahmed, M. Pradeep Kumar, Experimental investigations on cryogenic cooling in the drilling of AISI 1045 steel, *Materials and Manufacturing Processes*, 29(11-12) (2014) 1417-1421.
- [21] S.R. Nandam, U. Ravikiran, A.A. Rao, Machining of tungsten heavy alloy under cryogenic environment, *Procedia materials science*, 6 (2014) 296-303.
- [22] S.A Mousavi, *Experimental investigation of surface roughness in dry and cryogenic turning of AISI 304*, B.S thesis, Shahid Montazeri technical university, Mashhad, (2012). (In Persian).
- [23] M. Shaw, *Metal Cutting Principles* Oxford University

Please cite this article using:

R. Bannazadeh, M. Riahi, M. Khosroabadi, Experimental Study of Cryogenic Cooling Effect on Tool Wear and Power Consumption During Turning of AISI304, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 50(3) (2018) 641-656.
DOI: 10.22060/mej.2017.12043.5248

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:



