



## بهینه‌سازی پارامترهای هندسی میکروباخت ابزار برش تراشکاری هنگام ماشینکاری فولاد زنگ‌نزن ۴PH-۱۷

رضا نیک‌صفت<sup>۱</sup>، محمدرضا رازفر<sup>۲\*</sup>، علی قاضی‌زاده<sup>۱</sup>، سلمان خانی<sup>۲</sup>

۱- دانشکده مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

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

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۲۷  
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۴/۰۹  
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۱۹  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۷/۰۱

### کلمات کلیدی:

نیروی برآیند برش  
ابزارهای میکروباخت‌دار  
لیزر  
آنالیز واریانس  
بهینه‌سازی

**خلاصه:** در این مقاله تأثیر بافت‌های موازی لبه برنده بر فرآیند تراشکاری فولاد زنگ‌نزن ۴PH-۱۷ مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای عمق، عرض و گام میکروباخت مطالعه شد. نیروی برش برآیند اندازه‌گیری شده و تأثیر پارامترهای بافت بر روی آن با استفاده از تحلیل واریانس بررسی شد. نتایج نشان داد با افزایش عرض شیارهای میکروباخت ابتدا نیروی برش کاهش می‌یابد و سپس رو به افزایش می‌گذارد. این روند نشان می‌دهد که عرض شیارهای میکروباخت یک مقدار بهینه‌ای دارد که در آن نیروی برش فرآیند تراشکاری فولاد کمینه است. همچنین با افزایش عمق شیارهای میکروباخت، نیروی برش کاهش یافت. با افزایش گام شیارهای میکروباخت نیز مشخص شد نیروی برش روند افزایشی را طی کرده است. به منظور دستیابی به پارامترهای میکروباخت که در آن کمترین نیروی برش و کمترین تغییر شکل قطعه‌کار در فرآیند تراشکاری حاصل شود، بهینه‌سازی انجام شد. بر اساس نتایج بهینه‌سازی، مقادیر بهینه پارامترهای عرض، عمق و گام شیارهای میکروباخت هنگام تراشکاری فولاد ۴PH-۱۷ به ترتیب برابر است با ۱۲۶ میکرومتر، ۱۵ میکرومتر، ۲۰۰ میکرومتر بدست آمد. درصد خطای محاسبه شده جهت صحت‌گذاری بهینه‌سازی برابر با ۵/۸۱٪ بدست آمد که بیانگر دقت بالای فرآیند بهینه‌سازی در نرم‌افزار دیزاین اکسپرت است. تغییر شکل قطعه‌کار با ابزار دارای میکروباخت بهینه ۳۰ میکرومتر و با ابزار ساده برابر با ۶۲ میکرومتر بدست آمد که کاهش ۵۱/۶ درصدی با ابزار دارای میکروباخت را نشان می‌دهد. در واقع دقت قطعه ماشینکاری شده با ابزار میکروباخت‌دار بهبود یافت.

### ۱- مقدمه

پرتو متمرکز یونی برای ایجاد بافت نانو و میکرونی در سطوح قطعات به کار گرفته شده است. با توجه به قابلیت انعطاف، دقت، هزینه و سرعت فرآیند، هر روشی دارای مزایا و محدودیت‌هایی است. محققان از لحاظ تئوری و تجربی ثابت کرده‌اند که بافت‌دار کردن سطوح موجب کاهش سایش و اصطکاک برای کاربردهای مختلف از جمله سیلندر و پیستون، آب‌بندهای مکانیکی، ابزارهای برش (ماشینکاری)، موتورهای هیدرولیکی، یاتاقان‌ها، بادامک‌ها، نوارهای مغناطیسی و اعضای مصنوعی کار گذاشته در بدن انسان شده است. چندین شکل بافت سطح برای بافت‌دار کردن سطوح به کار گرفته شده است مانند: سوراخ‌های میکرونی، نوارهای میکرونی، شیارهای میکرونی و نانویی [۲].

یکی از کاربردهای مهم بافت‌دار کردن سطوح در عملیات برش است. در سال‌های اخیر جهت افزایش عمر ابزار تکنولوژی‌هایی نظیر پوشش‌دهی‌های مختلف و جنس‌های مختلف برای ابزارهای برش توسعه داده شده است. چندین نوع پوشش ابزار مانند کربن الماسی شکل و پوشش نانو کامپوزیت

فضای رقابتی در صنعت نیاز به افزایش عمر قطعات مکانیکی را از طریق کنترل اصطکاک و سایش افزایش داده است. در چند دهه اخیر، شرایط عملکردی قطعات مکانیکی در تماس با یکدیگر شدیدتر شده است، در نتیجه حداکثر ضخامت روانکار مابین قطعات درگیر به اندازه زبری سطح آنها رسیده است. بنابراین محققان علاقمند هستند تا از طریق ایجاد تغییر در میکروتوپوگرافی سطوح، شرایط عملکردی آنها را بهبود بخشند. بافت‌دار کردن سطوح یکی از راه‌حل‌هایی ممکن برای بهبود بخشیدن به مشخصه‌های تریبولوژیکی قطعات مکانیکی است. بافت سطوح به عنوان نقاط تجمع روانکار و ذرات حاصل از سایش عمل کرده و خواص تریبولوژیکی سطوح را بهبود می‌بخشد. همچنین بافت سطوح به عنوان یاتاقان‌های هیدروپنماتیکی عمل می‌کند [۱].

چندین روش ساخت مانند لیزر، ماشینکاری تخلیه الکتریکی، ماشینکاری

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: razfar@aut.ac.ir



است تا قابلیت ذخیره روانکار درون بافت تحلیل شود [۳]. غلظت اتم آلومینیوم توسط روش طیفسنجی پراش انرژی پرتو ایکس<sup>۱</sup> اندازه‌گیری شده تا چسبندگی به صورت کمی بررسی شود. در مورد شرایط همراه با سیال برش، اتم‌های آلومینیوم برای ابزار با بافت شیاری باندی شکل، کمتر از بافت شیاری سینوسی و ابزار ساده گزارش شد. همچنین کاهش ضریب اصطکاک در ابزار با بافت شیاری باندی در مقایسه با ابزارهای دیگر بیشتر بود. دلیل این موضوع این است که در ابزار با بافت شیاری باندی روانکار داخل بافت محبوس می‌شود و باند پولیش شده، نشت روانکار را به حداقل می‌رساند، بنابراین روانکار یک لایه نازک در فصل مشترک ابزار با براده تشکیل می‌دهد [۴].

اصطکاک در فصل مشترک ابزار با براده موجب ایجاد حرارت و تغییر شکل پلاستیکی ماده قطعه کار می‌شود. قابلیت ماشینکاری را می‌توان از طریق بافت‌دار کردن ابزار بهبود بخشید و به تبع آن اصطکاک کاهش می‌یابد. بافت‌های با ابعاد نانو و میکرون کاهش بیشتری در اصطکاک در مقایسه با بافت‌های میلیمتری از خود نشان داده‌اند. کاواژگی و همکاران [۱] عملکرد بافت‌های نانو و میکرو را در تراشکاری آلومینیوم  $AA5052$  مقایسه کردند. بافت‌های میکرو و نانو بر روی سطح براده توسط سیستم لیزر ایجاد شده بود. بافت میکرونی دارای قطر  $1/7 \mu m$  و گام  $10 \mu m$  بود. در صورتی که در مورد بافت نانو به ترتیب  $1/5 \mu m$  و  $800 \text{ nm}$  انتخاب شد. نتایج آزمایش‌های تجربی نشان داد بافت نانو توسط جریان ماده قطعه کار پوشانده نشده است، اما در مورد بافت میکرونی این مسئله صادق نبود و بافت توسط جریان ماده مدفون گردید. این مسئله به دلیل اندازه و حالت موجی شکل بافت نانو می‌باشد. بافت میکرونی دارای عرض بیشتری بود و این امر موجب چسبندگی ماده قطعه کار بر روی سطح براده ابزار گردید. به این دلیل نیروهای برش در ابزار دارای بافت میکرونی افزایش پیدا کرد.

در یک مطالعه دیگر که توسط اویکاوا و همکاران [۶] صورت گرفت نتایج مشابهی به دست آمد. آن‌ها گزارش کردند که در سرعت‌های پایین به دلیل چسبندگی زیاد ماده نیروی اصطکاکی بیشتری تولید می‌شود.

انوموتو و همکاران [۴] نیز کاهش در چسبندگی هنگام تراشکاری آلومینیوم با ابزار دارای بافت نانو را نشان دادند. عمق بافت  $100-150 \text{ nm}$  و فواصل آن  $700 \text{ nm}$  بود. چسبندگی براده به دلیل تماس منقطع براده با سطح براده ابزار کاهش یافت. همچنین اصطکاک به دلیل تأمین روانکار در فصل مشترک ابزار با براده کاهش پیدا کرد. انوموتو و همکاران [۴] مشاهده

جهت افزایش عمر و کاهش سایش ابزار طراحی شده است. اما پوشش‌های مختلف و سایر تکنولوژی‌های مرتبط با ابزارهای برش تا اندازه محدودی توانسته است عمر ابزارهای برش را بهبود بخشد. در نتیجه جهت افزایش عمر ابزار و بهبود عملکرد آنها لازم است تکنولوژی‌های جدیدی ایجاد شده و مورد استفاده قرار گیرد.

به منظور کاهش اصطکاک و سایش، سیالات برش معمولاً حین فرآیند ماشینکاری استفاده می‌شود. عملکرد اصلی سیالات برش، روانکاری و خنک‌کاری ناحیه برش می‌باشد. اثر روانکاری در فرآیندهای تراشکاری و فرزکاری در سرعت‌های کم بهتر از سرعت‌های متوسط است. در سرعت‌های برش زیاد، زمان بسیار کمی برای خنک‌کاری فصل مشترک ابزار با براده وجود دارد و سیالات برش معمولی عملکرد چندانی از خود نشان نمی‌دهند. در نتیجه روش‌های خنک‌کاری مختلف نظیر آب فشار بالا و جذب نیتروژن مایع جهت دفع حرارت از ناحیه برش مورد استفاده قرار می‌گیرد. تمام روش‌های خنک‌کاری بر اساس دفع حرارت ایجاد شده در فصل مشترک ابزار با براده است، اما اصطکاکی که منشاء ایجاد این حرارت است کاهش نمی‌یابد. به منظور کاهش حرارت حاصل از اصطکاک، برخی از محققان بر روی کاهش اصطکاک فصل مشترک ابزار با براده از طریق ایجاد بافت بر روی سطح ابزار متمرکز شده‌اند. مزایای استفاده از ابزارهای برش بافت‌دار در چند سال اخیر توسط محققان مطالعه و آشکار شده است. این مزایا شامل کاهش در ضریب اصطکاک، کاهش چسبندگی ماده و کاهش نیروهای برش از طریق کاهش اصطکاک در فصل مشترک ابزار براده است [۲].

میکرو بافت‌ها سیالات برش را در فصل مشترک براده با ابزار حفظ می‌کنند، بنابراین اثرات روانکاری و خنک‌کاری را فراهم می‌سازد. این اثرات موجب کاهش اصطکاک و دما در فصل مشترک می‌شود. عملکرد دیگری که میکرو بافت‌ها دارند این است که ذرات ریز را درون خود نگه داشته و از سایش شخم‌زنی و سایش مواد ساینده جلوگیری می‌کنند. ساختارهای مختلف بافت بر روی سطح براده ابزار جهت بهبود عملکرد ابزار ایجاد شده است که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: میکرو بافت شیاری شکل، پوشش کربن الماسی شکل همراه باند پولیش شده که بافت‌ها، بین سطوح پولیش شده ساندویچ شده‌اند تا از نشت روانکار ممانعت به عمل آید، بافت دایره‌ای و مربعی [۳-۵].

مقایسه ابزار با بافت شیاری سینوسی شکل و ابزار بافت شیاری باندی شکل در کف تراشی در حالت خشک و همراه با سیال برشی انجام گردیده

به وجود خواهد آمد. همچنین نتایج نشان داد بافت‌های اریب، زاویه برش را تا ۲۴ درصد افزایش می‌دهد که این امر موجب کاهش نیروهای برش می‌شود. علاوه بر آن طول براده تا ۹/۶ برابر نسبت به ابزار ساده کاهش پیدا کرد.

شکل‌های بافت را می‌توان به دو نوع کلی دسته‌بندی کرد: بافت پیوسته مانند شیارها و ناپیوسته مانند حفره‌ها و نقطه‌های میکرونی. کاوازاکی و همکاران [۱]، اوییکاوا و همکاران [۶]، کیم و همکاران [۹] مشاهده کردند بافت‌های پیوسته عملکرد بهتری نسبت به بافت‌های ناپیوسته دارند. بر خلاف این مطالعات کومل و همکاران [۱۰] به این نتیجه رسیدند که عملکرد بافت‌های ناپیوسته میکروحفره‌ای در کاهش سایش بهتر از بافت‌های شیاری خطی است. این اختلاف را می‌توان به شکل بافت‌های ناپیوسته نسبت داد. جیانجین و همکاران [۱۲] و سیلوا و همکاران [۱۳] عملیات تراشکاری بر روی قطعه فولادی را انجام دادند. جیانجین و همکاران [۱۲] سه نوع بافت شیاری بیضی شکل، شیاری خطی موازی و شیاری عمود را بر روی ابزار ایجاد کردند. بافت با روانکار جامد مولیبدن دی سولفید پر شد تا تأثیر بافت پر شده با روانکار جامد در شرایط برش خشک مورد ارزیابی قرار گیرد. نتایج نشان داد نیروهای برش ۱۵ تا ۲۵ درصد کاهش یافته است. در مطالعه دیگری که توسط همان محققان انجام شد میکروسوراخ‌ها بر روی سطح آزاد و براده ابزار ایجاد شد. روانکار جامد مولیبدن دی سولفید درون آن پر شد. کاهش در نیروهای برش، ضریب اصطکاک و سایش با ابزار بافت‌دار پر شده با روانکار جامد در مقایسه با ابزار ساده مشاهده گردید [۱۴].

زی و همکاران [۱۵] شیارهای بیضی شکل در سطح براده یک ابزار و شیارهای خطی در سطح آزاد ابزار دیگر ایجاد کردند. ماشینکاری خشک تیتانیوم نشان داد نیروهای برش کاهش یافته است. در ابزاری که سطح براده بافت‌دار شده بود در مقایسه با ابزار ساده، کاهش در نیروی اصلی، شعاعی و پیشروی گزارش شد. همچنین مقاومت به سایش ابزار اول ۱۰ الی ۳۰ درصد و ابزار دوم ۱۰ الی ۱۵ درصد در مقایسه با ابزار ساده بهبود بخشیده شد.

عملکرد سایشی ابزار تنگستن کاربیدی که بر روی آن‌ها میکروبافت‌های موازی، دایره‌ای و ترکیبی ایجاد شده بود توسط ساهو و همکارانش بررسی شد [۱۶]. نتایج نشان داد که سایش ابزار با بافت موازی نسبت به ابزار ساده ۳۲ درصد کاهش یافته است.

ماشینکاری اینکونل ۷۱۸ با ابزار بافت‌دار شده توسط گوپتا و همکاران [۱۷] نشان داد که سایش ابزار، صافی سطح قطعه کار و دمای برش نسبت به ابزار بدون بافت بهبود یافته است. نتایج نشان داد ابزار بافت‌دار را می‌توان در صنعت به عنوان یک روش بهینه مورد استفاده قرار داد.

کردند ابزار بافت‌داری که هنگام تراشکاری آلومینیم مقاومت به سایش از خود نشان داده بود، حین تراشکاری فولاد عملکرد بهتری نشان نداد. زیرا برای ماشینکاری فولاد بافت با قابلیت ذخیره روانکار بیشتری مورد نیاز است. بر خلاف این مطالعه، خینگ و همکاران [۷] ابزاری را توسعه دادند که دارای بافت نانو با پوشش نرم  $WS_2 / Zr$  بود، آن‌ها مشاهده کردند ضریب اصطکاک، نیروهای برش و سایش ابزار کاهش یافت. کاهش در ضریب اصطکاک را به تشکیل لایه روانکار در ناحیه تماس نسبت دادند.

جهت بافت نسبت به لبه برنده می‌تواند موجب بهبود یا بدتر شدن عملکرد برش شود. انوموتو و همکاران [۴] دو نوع بافت موازی و عمود بر لبه برنده که پوشش‌دهی شبیه کربن<sup>۱</sup> شده بود را مطالعه کردند. آن‌ها پی بردند که در ابزار با بافت موازی ضریب اصطکاک و چسبندگی کاهش بیشتر نشان داد. سوگیهارا و انوموتو [۳] نیز مشاهده کردند مقدار چسبندگی ابزار با بافت موازی لبه برنده نسبت به عمود کمتر است. غلظت اتم‌های آلومینیم برای ابزار دارای بافت موازی بعد از فرآیند برش ۳/۹٪ و برای بافت موازی ۷/۲٪ اندازه‌گیری شد. ما و همکاران [۸] و کاوازاکی و همکاران [۱] نیز به نتایج مشابهی دست یافتند. نتایج نشان داد نیروی اصلی، پیشروی و شعاعی در مورد بافت عمود بر لبه برنده افزایش یافته است. به دلیل افزایش چسبندگی، اصطکاک در فصل مشترک ابزار با براده افزایش یافته و منجر به افزایش نیروهای برش می‌شود.

در تراشکاری خشک آلومینیم [۱] و فولاد [۷ و ۹] محققان به این نتیجه رسیدند که بافت‌های موازی لبه برنده بهتر عمل می‌کند. کومل و همکاران [۱۰] در تراشکاری خشک فولاد با ابزار بافت‌دار موازی مشاهده کردند سایش سطح آزاد در سرعت‌های برش مختلف نسبت به ابزار بافت‌دار عمود بر لبه برنده کمتر است. خینگ و همکاران [۷] نیز عملکرد بافت‌های موازی، عمود و بافت کلی سطح را مطالعه کردند. نتایج نشان داد عملکرد بافت موازی بهتر از بافت عمود است، اما ابزاری که دارای بافت کلی بود عملکرد بهتری نسبت به هر دو ابزار نشان داد.

خی و همکاران [۱۱] تأثیر بافت‌های اریب و عمود را در تراشکاری تیتانیوم مطالعه کردند. عمق میکروشیارها  $155 \mu m$  و فاصله آنها  $400 \mu m$  بود. نتایج نشان داد که شیارهای میکرونی اریب سایش در سطح تماس را تا ۶/۷ درصد کاهش می‌دهد. این امر به دلیل این است که جهت شیارها با جهت جریان براده یکی است و این مسئله کمک می‌کند تا براده با سرعت بیشتری از سطح تماس خارج شود. بنابراین حرارت در سطح تماس نیز کمتر

جدول ۱. خواص مکانیکی آلیاژ

Table 1. Mechanical properties of 17-4PH alloy

مدول الاستیک (GPa)	سختی HRC	افزایش طول (%)	استحکام کششی (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)
۱۹۰	۳۴	۱۴	۹۶۵	۷۹۵

جدول ۲. ترکیب شیمیایی (درصد وزنی) آلیاژ

Table 2. Chemical composition (Wt %) of 17-4PH alloy

Cu	Nb	Ni	Mo	Cr	S	Mn	Si	C	
۳	-	۳	-	۱۵	-	-	-	-	کمینه
۳	۰/۴۵	۵	۰/۶	۱۷	۰/۰۳	۱/۵	۰/۷	۰/۰۷	بیشینه

۴PH-۱۷ به شکل میله‌ای با قطر ۴۰ mm انجام شده است. این فولاد از فولادهای زنگ نزن رسوب سختی مقاوم در برابر گرما است. همچنین این فولاد جزو سوپرآلیاژها دسته‌بندی شده است. این آلیاژ از استحکام، چقرمگی و مقاومت به خوردگی بالایی برخوردار است و در صنایع هسته‌ای، فضایی و شیمیایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. از طرف دیگر با توجه به پایین بودن ضریب انتقال حرارت آن، در دسته آلیاژهای سخت ماشینکاری شونده قرار می‌گیرد [۱۸]. هنگام ماشینکاری محورهایی از این جنس، جهت کاهش تغییر شکل الاستیک و در نتیجه افزایش دقت ماشینکاری لازم است نیروهای برش کاهش یابند. خواص مکانیکی و ترکیب شیمیایی در دمای اتاق به ترتیب در جدول ۱ و جدول ۲ آمده است.

۲-۲- ابزار برش و ماشین ابزار

آزمایش‌های تراشکاری بر روی دستگاه تراش تبریز با حداکثر سرعت دورانی ۲۰۰۰ RPM و حداکثر توان ۵/۵ kW انجام گردیده است. از ابزار برش کارباید SNMA ۱۲۰۴۱۶ ساخت شرکت سندویک و ابزارگیر K۱۲ PSSNR ۲۰۲۰ ساخت شرکت آکو برای انجام آزمایش‌ها استفاده شده است.

بررسی پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که در اکثر آن‌ها چند نوع شکل مختلف بافت بر روی سطح ابزار ایجاد شده است و عملکرد شکل بافت‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته و با یکدیگر و با ابزار ساده مقایسه شده است و کارهای بسیار کمی در رابطه با بدست آوردن ابعاد بهینه یک بافت انجام شده است. بنابراین در این مقاله ابعاد بهینه بافت خطی بدست آمد تا منجر به نیروی برش کمینه و افزایش دقت ماشینکاری شود.

در این مقاله تأثیر بافت‌های موازی لبه برنده که توسط لیزر بر روی ابزارهای برش ایجاد شده بود بر فرآیند تراشکاری فولاد زنگ‌نزن ۴PH-۱۷ مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای عمق، عرض و گام شیار میکروباخت مطالعه شد و برای هر یک از پارامترها سه سطح در نظر گرفته شد. نیروی برش اندازه‌گیری شده و تأثیر پارامترهای بافت بر روی آن با استفاده از تحلیل آماری واریانس<sup>۱</sup> بررسی شده و مدل ریاضی پیش‌بینی کننده ارائه گردید. در نهایت مقادیر بهینه پارامترهای میکروباخت جهت رسیدن به حداقل نیروی برش بدست آمد.

۲- روش تحقیق و آزمایش

۲-۱- جنس قطعه‌کار

آزمایش‌های تراشکاری روی قطعه‌کاری از جنس فولاد زنگ نزن



شکل ۱. شماتیک سیستم اندازه‌گیری نیرو

Fig. 1. Schematic of the force measurement system

### ۲-۳- اندازه‌گیری نیروی برآیند برش

به منظور اندازه‌گیری نیروی برش، از دینامومتر سه مؤلفه‌ای پیزوالکتریک کیسلر استفاده شده است. شکل ۱ شماتیک سیستم اندازه‌گیری نیرو را نشان می‌دهد. ثبت اطلاعات از طریق انتقال سیگنال از دینامومتر پیزوالکتریک توسط واسط آر اس ۲۳۲<sup>۱</sup> به آمپلی‌فایر ۱۵۰۷۰<sup>۲</sup> انجام می‌گردد. سیگنال بعد از تقویت شدن در آمپلی‌فایر به نرم‌افزار داینو لایت<sup>۳</sup> که روی یک کامپیوتر نصب شده منتقل شده و قابل ثبت است.

### ۲-۴- لیزر

لیزر مورد استفاده جهت ایجاد بافت بر روی ابزارهای برش لیزر فایبر رایکوس است که حداکثر توان آن ۳۰ W است. در فرآیند میکروماشینکاری توسط لیزر بر روی سطح ابزار طول موج، فرکانس و سرعت حرکت پرتو لیزر به ترتیب برابر با ۱۰۶۴ nm، ۲۰ kHz و ۱۰۰ mm/s بود. قبل از فرآیند میکروماشینکاری سطوح ابزارها توسط اتانول از آلودگی‌های احتمالی پاکسازی گردید. همچنین جهت زدودن ذرات حاصل از پاشش ماده بر روی سطح بعد از فرآیند میکروماشینکاری توسط لیزر از حمام اولتراسونیک استفاده شد.

### ۲-۵- میکروسکوپ دیجیتال

برای اندازه‌گیری سایش ابزار از یک میکروسکوپ دستی دیجیتال با بزرگنمایی ۲۰ تا ۲۰۰ برابر استفاده شد. این میکروسکوپ ساخت کشور تایوان با نام تجاری داینو لایت<sup>۴</sup> می‌باشد.

### ۲-۶- طراحی آزمایش

پارامترهای ورودی در آزمایش‌های تجربی مربوط به فرآیند روتراشی در مرحله پرداختکاری قطعه‌کار با ابزارهای بافت‌دار را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم کرد:

الف: پارامترهای ماشینکاری: شامل سرعت برشی  $V_c$ ، نرخ پیشروی  $a_f$ ، عمق برش  $a_p$ . این پارامترها در تحقیق حاضر ثابت در نظر گرفته می‌شوند که در محدوده مجاز پارامترهای ماشینکاری ابزار مورد نظر بوده و از کاتالوگ سازنده ابزار انتخاب می‌شود. طبق کاتالوگ سازنده عمق برش در بازه mm ۰/۳ - ۰/۳، پیشروی در بازه mm/rev ۱ - ۰/۲ و سرعت برشی در بازه m/min ۱۳۵ - ۲۴۰ پیشنهاد شده است. در این پژوهش عمق برش mm ۰/۱، پیشروی mm/rev ۰/۲ و سرعت برشی m/min ۱۴۵ انتخاب می‌شود.

ب: پارامترهای بافت ابزار برشی: شامل عرض  $w$ ، گام  $p$ ، عمق  $d$  است. در جدول ۳ پارامترهای آزمایش‌های تجربی و سطوح آن آورده شده است. پارامتر مهم خروجی که نشانگر بازده فرآیند ماشینکاری است نیروهای برش است.

بافت‌های موازی لبه برنده توسط لیزر بر روی ابزارهای برش ایجاد شد. با توجه به تعداد پارامترها و سطوح انتخابی آن تعداد ۲۷ لبه برنده بافت‌دار شد. در مرحله بعد آزمایش‌های تراشکاری با ابزارهای ساخته شده انجام شده و نیروهای برش توسط دینامومتر به صورت آنلاین اندازه‌گیری گردید. نمودار عمق- طول میکروشیار با استفاده از پروفیلومتر میتوتویو SV2100<sup>۵</sup> بدست آمد. برای این منظور ابزار بر روی یک میز تخت قرار گرفت و سوزن پروفیلومتر به صورت عمود بر سطح ابزار قرار گرفت و بر روی آن حرکت داده شد و پروفیل سطح مقطع میکروشیار بدست آمد.

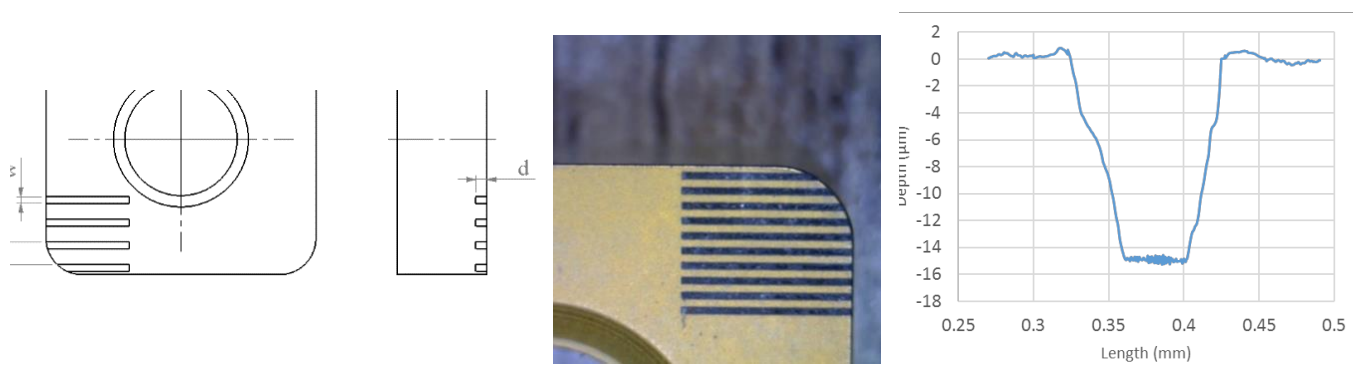
- 1 232-RS
- 2 5070A
- 3 Dynaware
- 4 Dino-lite

5 Mitutoyo SV2100

جدول ۳. پارامترهای آزمایش‌های تجربی و سطوح آن

Table 3. Experimental tests parameters and their levels

سطوح			پارامتر
۳	۲	۱	
۲۰۰	۱۵۰	۱۰۰	عرض شیار بافت: $w$ ( $\mu\text{m}$ )
۱۵	۱۰	۵	عمق شیار بافت: $d$ ( $\mu\text{m}$ )
۳۰۰	۲۵۰	۲۰۰	گام شیار بافت: $p$ ( $\mu\text{m}$ )



شکل ۲. تصویر میکروسکوپی سطح براده ابزارهای بافت‌دار و پروفیل سطح مقطع بافت‌ها

Fig. 2. Optical image of the developed textured tool and cross-section of microtexture

برش کاهش یافته است [۶]. لازم به ذکر است مقدار عمق میکروباخت نیز محدود است و آن را تا جایی می‌توان افزایش داد که استحکام مکانیکی ابزار برش را تحت تأثیر قرار ندهد. همچنین با افزایش گام شیارهای میکروباخت نیز مشخص است که نیروی برش روند افزایش را طی کرده است.

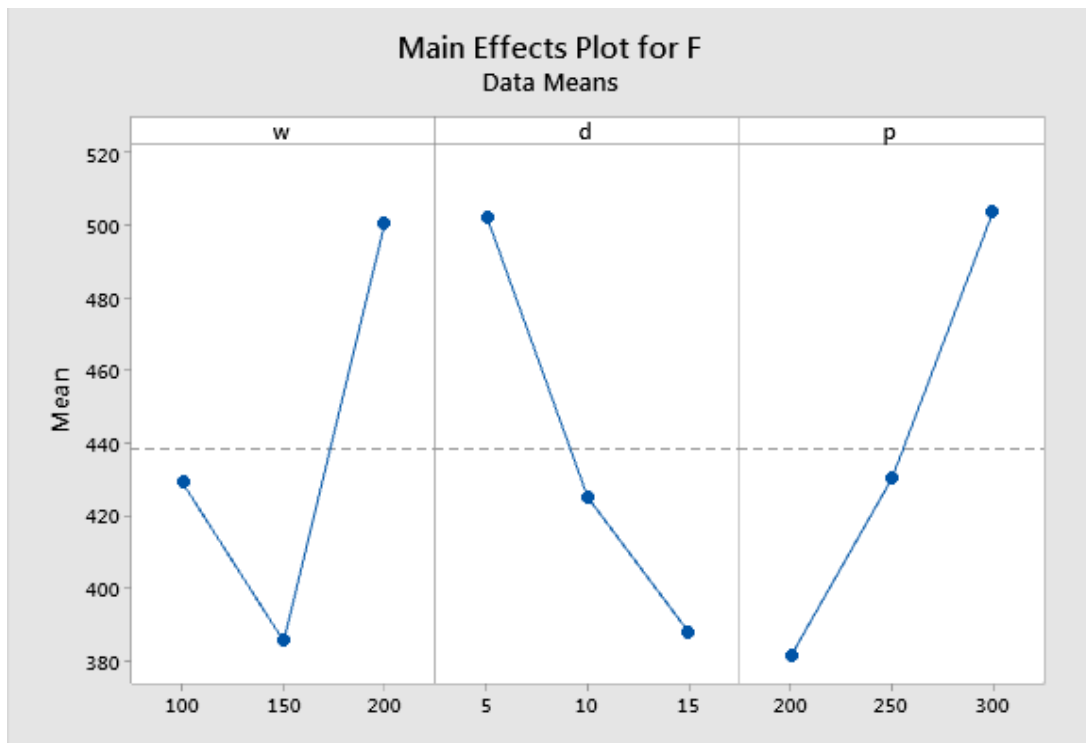
تصاویر سطح براده و پروفیل سطح مقطع بافت ابزارهای بافت‌دار در شکل ۲ آورده شده است.  $p$  گام شیار،  $w$  عرض شیار و  $d$  عمق شیارهای میکرونی را نشان می‌دهد.

### ۳- نتایج، بحث و اظهار نظر

#### ۳-۱- نیروی برش

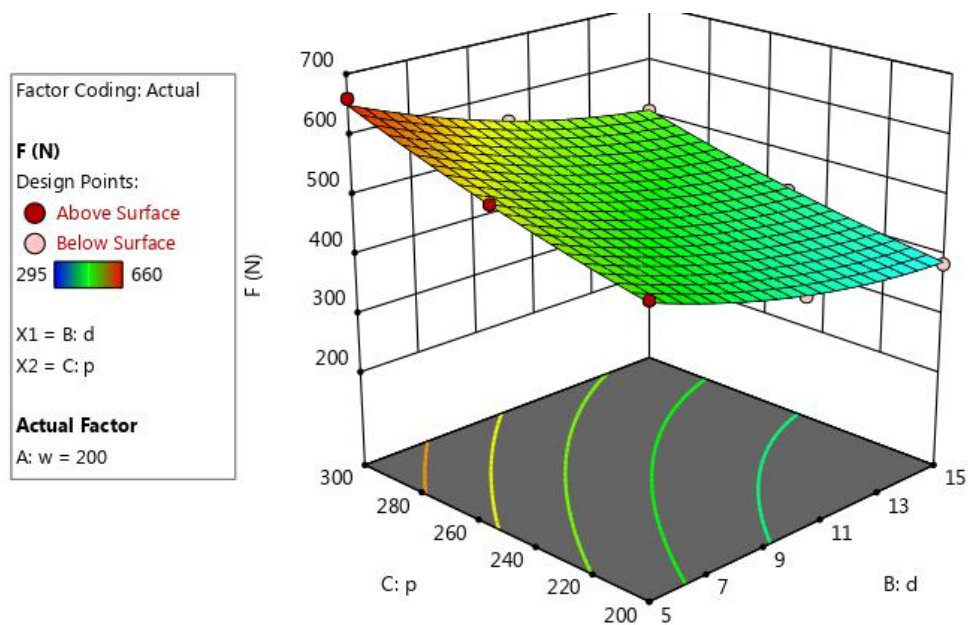
۳-۱-۲- تأثیر گام شیارهای میکروباخت بر نیروی برآیند برش  
تأثیر گام شیارهای میکروباخت بر نیروی برش برای عمق و عرض‌های مختلف شیار میکروباخت در شکل ۴ و ۵ آورده شده است. با توجه به این نمودارها مشخص است که با کاهش گام شیارهای میکروباخت نیروی برش کاهش می‌یابد. کاهش نیروی برش به کاهش طول تماس مؤثر براده با ابزار نسبت داده می‌شود. همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، طول تماس مؤثر ابزار با براده با کاهش گام شیار میکروباخت کاهش می‌یابد. رابطه نیروی برش با طول تماس را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

۳-۱-۱- تأثیر میانگین پارامترهای بافت بر نیروی برآیند برش  
در نمودار شکل ۳ تأثیر پارامترهای بافت بر نیروی برش به صورت متوسط نمایش داده شده است. همانطور که در این نمودارها مشخص است، با افزایش عرض شیارهای میکروباخت ابتدا نیروی برش کاهش می‌یابد و سپس رو به افزایش می‌گذارد. این روند نشان می‌دهد که عرض شیارهای میکرو بافت یک مقدار بهینه‌ای دارد که در آن نیروی برش فرآیند تراشکاری فولاد کمینه است. همچنین با افزایش عمق شیارهای میکروباخت، نیروی



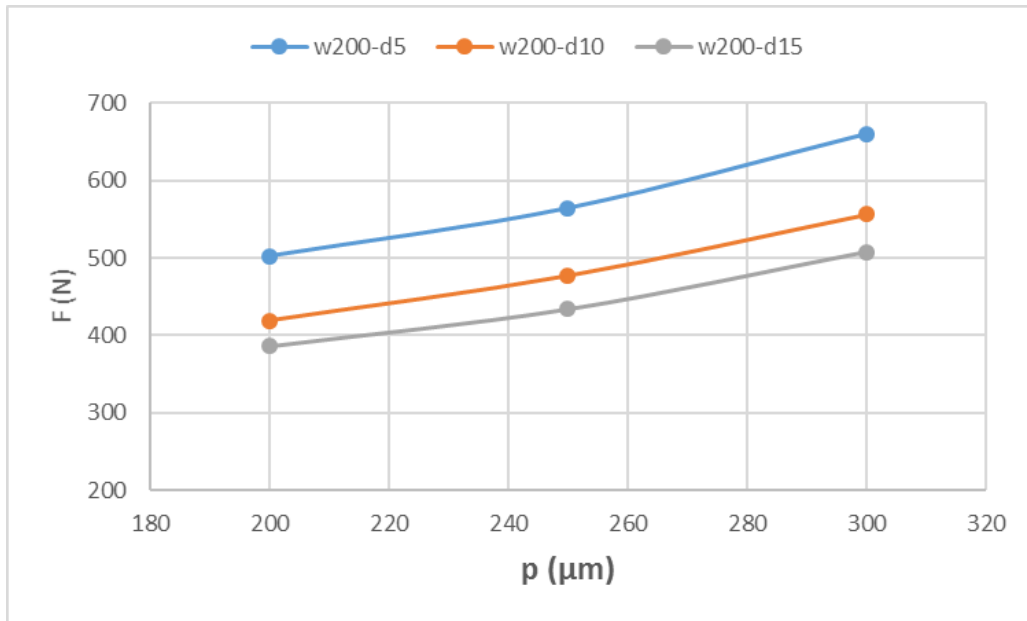
شکل ۳. تأثیر پارامترهای بافت بر نیروی برش به صورت متوسط

Fig. 3. Mean impact of microtexture parameters on the cutting force



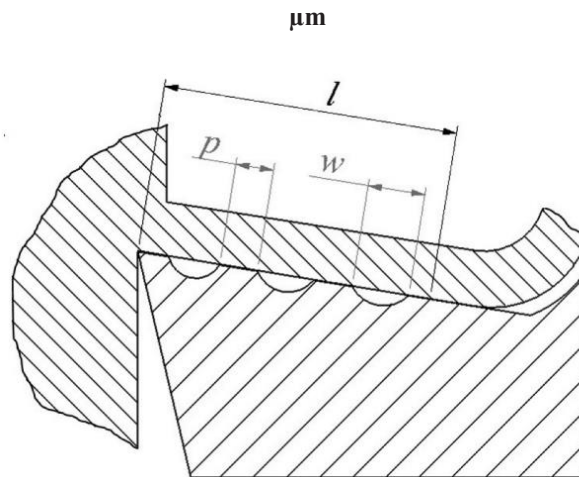
شکل ۴. نیروی برآیند برش بر حسب عمق و گام میکروباخت و عرض شیار ۲۰۰ میکرومتر

Fig. 4. Cutting force vs depth and pitch of the microtexture, the width of the microtexture 200 μm



شکل ۵. نیروی برآیند برش بر حسب گام میکروبافت در عمق‌های مختلف میکروبافت و عرض شیار ۲۰۰ میکرومتر

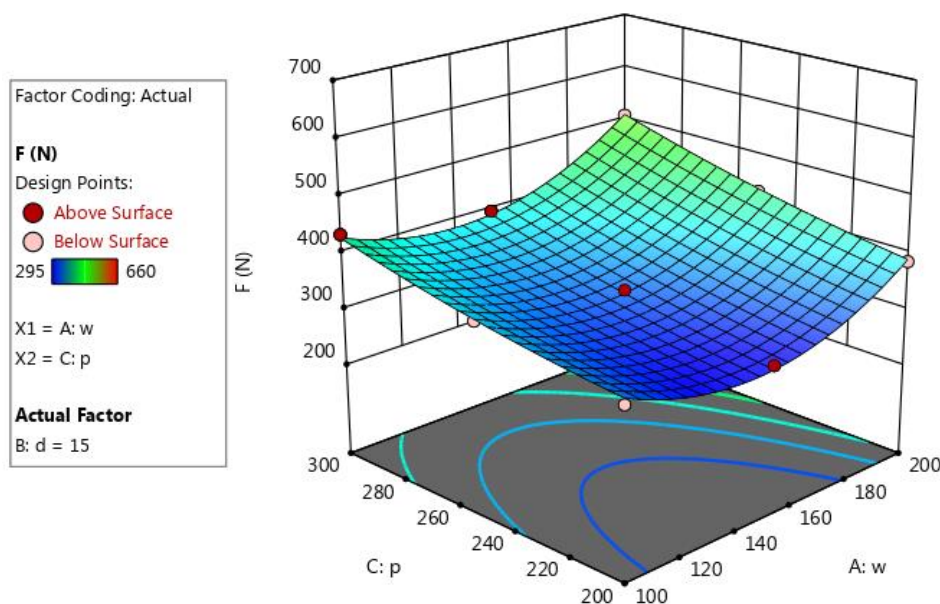
Fig. 5. Cutting force vs pitch of the microtexture at the different depth of the microtexture, the width of the microtexture 200  $\mu\text{m}$



شکل ۶. دیاگرام طول تماس ابزار با براده برای ابزار بافت‌دار

Fig. 6. Diagram of chip-tool contact length of textured tools





شکل ۷. نیروی برآیند برش بر حسب عرض و گام میکروبافت و عمق شیار ۱۵ میکرومتر

Fig. 7. Cutting force vs width and pitch of the microtexture, the depth of the microtexture 15  $\mu\text{m}$

و در نتیجه طول تماس ابزار با براده کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان کاهش نیروی برش هنگام استفاده از ابزارهای میکروبافت‌دار را به کاهش طول مؤثر تماس نسبت داد. در نتیجه طبق رابطه (۲) نیروی برش حین استفاده از ابزار بافت‌دار کمتر از ابزار ساده است.

### ۳-۱-۳- تأثیر عرض شیپارهای میکروبافت بر نیروی برآیند برش

تأثیر عرض شیپارهای میکروبافت بر نیروی برش برای عمق و گام‌های مختلف شیار میکروبافت در شکل ۷ و ۸ آورده شده است. با توجه به این نمودارها مشخص است که با افزایش عرض شیار میکروبافت، نیروی برش ابتدا کاهش یافته و سپس افزایش می‌یابد. این مسئله را می‌توان اینطور توضیح داد که با افزایش عرض شیار میکروبافت، طول تماس ابزار با براده کاهش می‌یابد که طبق رابطه (۲) منجر به کاهش نیروی برش می‌شود. برخلاف این موضوع هنگامی که عرض شیار میکروبافت خیلی زیاد است، براده تغییر شکل پلاستیکی داده و به سمت داخل میکروشیپار حرکت می‌کند که در نهایت منجر به افزایش سطح تماس می‌گردد؛ بنابراین نیروی برش افزایش پیدا می‌کند. در نتیجه عرض شیار میکروبافت یک مقدار بهینه دارد که در آن نیروی برش حداقل تولید می‌شود.

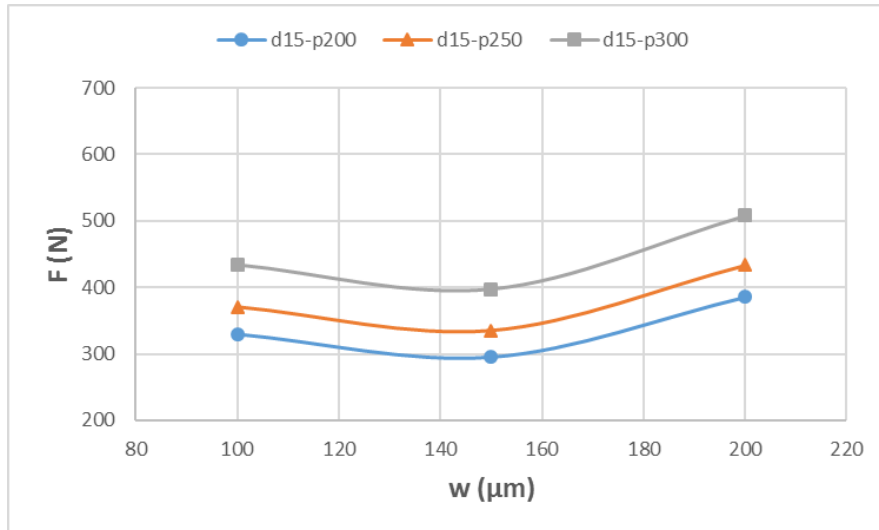
نیروی متوسط اصطکاکی  $F_f$  بین سطح براده ابزار و سطح پستی براده حین فرآیند برش با رابطه (۱) بیان می‌شود [۱۹]:

$$F_f = A_w \tau_c = a_w l \tau_c \quad (1)$$

که در آن  $A_w$  سطح تماس براده با ابزار،  $\tau_c$  استحکام برشی فصل مشترک براده با ابزار،  $a_w$  عرض براده و  $l$  طول تماس براده با ابزار است. نیروی برآیند  $F$  توسط رابطه (۲) بدست می‌آید [۱۹]:

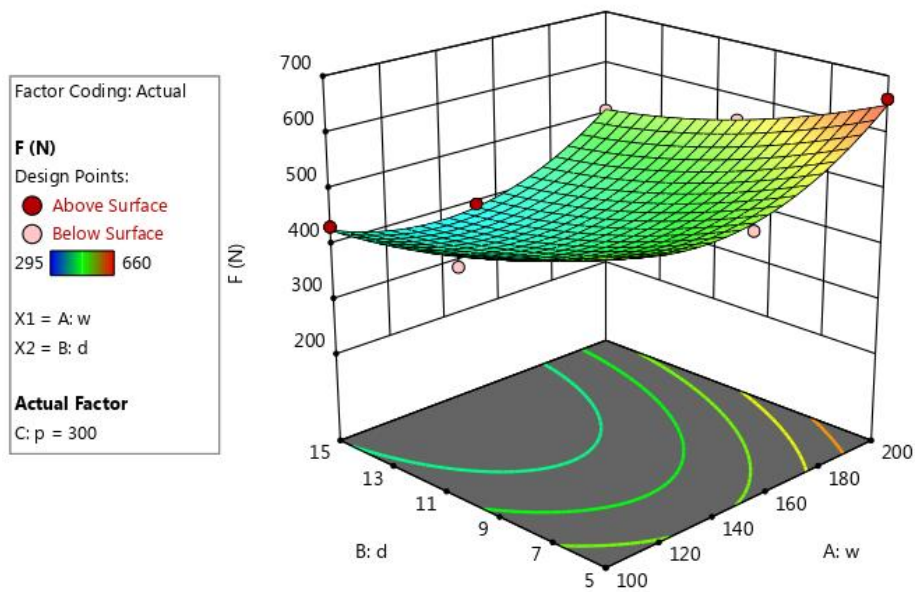
$$F = \frac{F_f}{\sin \beta} = \frac{a_w l \tau_c}{\sin \beta} \quad (2)$$

که در آن  $F$  نیروی برآیند و  $\beta$  زاویه اصطکاک است. بر اساس رابطه (۲)، واضح است که نیروی برآیند  $F$  تابعی خطی از طول تماس براده با ابزار  $l$  است. شکل ۵ طول تماس ابزار با براده را به صورت شماتیک نشان می‌دهد. با ایجاد میکروبافت در سطح براده ابزار، سطح تماس



شکل ۸. نیروی برآیند برش بر حسب عرض میکروبافت در گام‌های مختلف میکروبافت و عمق شیار ۱۵ میکرومتر

Fig. 8. Cutting force vs width of the microtexture at the different pitch of the microtexture, the depth of the microtexture 15 μm

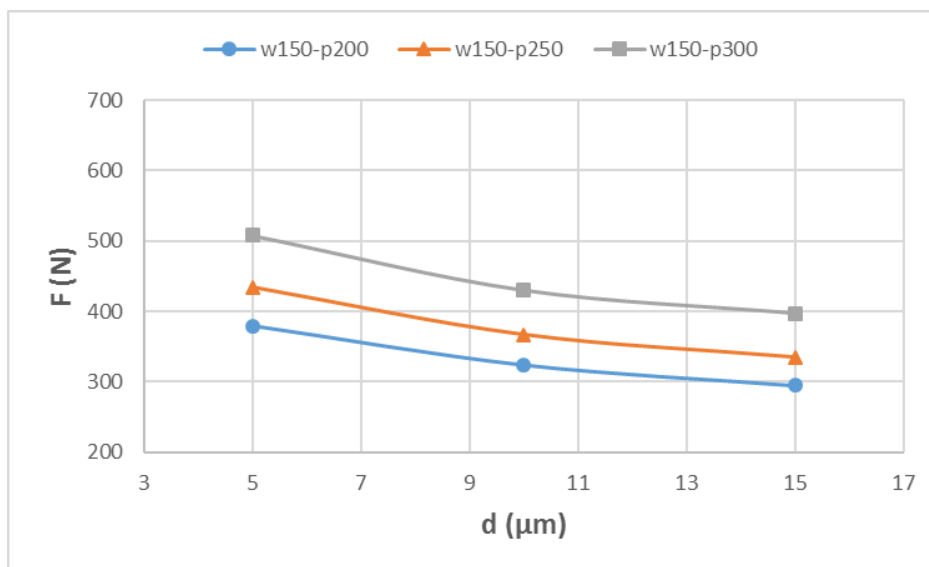


شکل ۹. نیروی برآیند برش بر حسب عرض و عمق میکروبافت و گام شیار ۳۰۰ میکرومتر

Fig. 9. Cutting force vs width and depth of the microtexture, the pitch of the microtexture 300 μm

چسبندگی جلوگیری کند. قابلیت به دام انداختن ذرات حاصل از سایش بافت با افزایش عمق میکروشیارها افزایش می‌یابد. در واقع شیاهای کم عمق حین عبور براده از سطح براده به سرعت با ذرات حاصل از سایش پر شده و کارایی خود را در کاهش نیرو از دست می‌دهند.

۳-۱-۴- تأثیر عمق شیاهای میکروبافت بر نیروی برآیند برش  
تأثیر عمق شیاهای بافت بر نیروی برش در شکل ۹ و ۱۰ آورده شده است. از این نمودارها مشخص است که با افزایش عمق شیاهای میکرو بافت نیروی برش کاهش می‌یابد. ذرات حاصل از سایش در داخل شیاهای بافت به دام می‌افتد و به این صورت بافت‌دار کردن سطح می‌تواند از سایش



شکل ۱۰. نیروی برآیند برش بر حسب عمق میکروبافت در گام‌های مختلف و گام شیار ۳۰۰ میکرومتر

Fig. 10. Cutting force vs depth of the microtexture at the different pitch of the microtexture, the pitch of the microtexture 300  $\mu\text{m}$

همچنین اگر مقدار نسبت  $P$  نیز کمتر از  $0/05$  باشد، آن پارامتر معنی‌دار بوده و روی خروجی مؤثر خواهد بود. در نتیجه با توجه به آنالیز واریانس انجام شده پارامترهای مستقل عرض ( $w$ )، عمق ( $d$ ) و گام ( $p$ ) شیارهای میکروبافت، و تداخل‌های عرض/گام ( $w/p$ )، عمق/گام ( $d/p$ ) و جملات توان دوم  $w^2$ ،  $d^2$  و  $p^2$  دارای اهمیت بوده و روی خروجی آزمایش مؤثر هستند. تعیین ترتیب اثر متغیرهای ورودی بر پاسخ فرایند، با توجه به مقادیر نسبت  $P$  و نسبت  $F$  مشخص می‌گردد. به نحوی که متغیری که دارای کمترین نسبت  $P$  و بیشترین نسبت  $F$  باشد، از اهمیت بیشتری برخوردار می‌باشد. در نتیجه ترتیب متغیرهای ورودی از منظر بیشترین تأثیر بر روی نیروی برش عبارت است از: گام ( $p$ )، عمق ( $d$ ) و عرض ( $w$ ) شیار میکروبافت. در ادامه، عبارتهایی که دارای مقدار نسبت  $P$  بیشتر از پنج صدم دارند، از بین عبارتهای مؤثر حذف شد و آنالیز واریانس مجدداً انجام پذیرفت. نتایج مربوط به آنالیز واریانس داده‌های تجربی پس از حذف عبارتهای کم اهمیت در جدول ۶ آورده شده است. با توجه به مقادیر مختلف  $R^2$  می‌توان گفت که مدل انتخاب شده می‌تواند با دقت خوبی خروجی آزمایش را در فضای پارامترهای ورودی مورد نظر پیش‌بینی کند.

۳-۱-۵- آنالیز واریانس نیروی برش و مدلسازی فرایند جهت ارائه مدل آماری مربوط به اثر متغیرهای در نظر گرفته شده (عرض، عمق و گام شیارهای میکروبافت) بر روی پاسخ فرایند (نیروی برش)، آنالیز واریانس در نرم‌افزار دیزاین اکسپرت انجام گرفت. لذا خروجی فرایند بر حسب متغیرهای ورودی در نظر گرفته شده، آنالیز واریانس به ازای چند جمله‌ای‌های مختلف بر مبنای پارامترهای آماری مقدار نسبت  $P$  و نسبت  $F$  با هدف تعیین درجه چند جمله‌ای مناسب مشخص گردید. نتایج مربوط به این تحلیل که در جدول ۴ ارائه شده است، نشان داد که چند جمله‌ای مرتبه دوم که دارای کمترین مقدار نسبت  $P$  و بیشترین مقدار نسبت  $F$  می‌باشد، بهترین انتخاب برای نوع چند جمله‌ای می‌باشد. پس از انتخاب چندجمله‌ای مناسب، داده‌های تجربی تحلیل شده و نتایج مربوط به آنالیز واریانس آن‌ها در جدول ۵ ارائه شده است. جهت تعیین میزان اهمیت هر یک از پارامترهای میکروبافت بر روی نیروهای برش از روش آنالیز واریانس استفاده شده است. در آنالیز واریانس مقدار نسبت  $F$  با توجه به سطح معنی‌دار بودن  $\alpha = 0/05$  محاسبه شده است. در جداول آنالیز واریانس هر پارامتر که نسبت  $F$  آن بیشتر یا مساوی نسبت  $F$  بحرانی باشد، معنی‌دار است و روی خروجی تأثیرگذار است.

جدول ۴. آنالیز واریانس برای چند جمله‌ای‌های مختلف

Table 4. Analysis of variance for different polynomials models

مدل متوالی مجموع مربعات					
منبع	مجموع مربعات	درجات آزادی	میانگین مربعات	مقدار $F$	مقدار $P$
میانگین در مقابل کل	۵۱۰۰۰۰	۱	۵۱۰۰۰۰		
خطی در مقابل میانگین	۱۴۰۰۰۰	۳	۴۶۶۵۶	۲۶	< ۰/۰۰۰۱
$\chi^2$ FI در مقابل خطی	۱۸۱۷	۳	۶۰۵/۶۷	۰/۲۸	۰/۸۳۲۳
درجه دوم در مقابل $\chi^2$ FI	۴۰۲۶۹	۳	۱۳۴۲۳	۱۴۸	< ۰/۰۰۰۱
درجه سوم در مقابل درجه دوم	۱۰۷۴	۷	۱۵۳/۵۶	۳/۳۴	۰/۰۴۱۷
باقیمانده	۴۵۹	۱۰	۴۵/۹۷		
مجموع	۵۳۰۰۰۰	۲۷	۱۹۰۰۰۰		

آمار خلاصه مدل			
منبع	مقدار $P$ متوالی	$R^2$ تنظیم شده	$R^2$ پیش‌بینی شده
خطی	< ۰/۰۰۰۱	۰/۷۴۳۲	۰/۶۹۱۵
$\chi^2$ FI	۰/۸۳۲۳	۰/۷۱۶۹	۰/۵۶۸۹
درجه دوم	< ۰/۰۰۰۱	۰/۹۸۷۸	۰/۹۷۷۳
درجه سوم	۰/۰۴۱۷	۰/۹۹۳۸	۰/۹۷۳۹

جدول ۵. آنالیز واریانس داده‌ها برای چند جمله‌ای مرتبه دوم

Table 5. ANOVA for quadratic model

منبع	مجموع مربعات	درجات آزادی	میانگین مربعات	مقدار $F$	مقدار $P$
مدل	۱۹۰۵۰۰	۹	۲۱۱۶۱	۲۳۴/۴۲	< ۰/۰۰۰۱
A-w	۲۵۲۳۷	۱	۲۵۲۳۷	۲۷۹/۵۷	< ۰/۰۰۰۱
B-d	۵۹۱۶۸	۱	۵۹۱۶۸	۶۵۵/۴۴	< ۰/۰۰۰۱
C-p	۶۳۹۶۲	۱	۶۳۹۶۲	۷۰۸/۵۵	< ۰/۰۰۰۱
AB	۲۸۰/۳۳	۱	۲۸۰	۳/۱۱	۰/۰۹۶۰
AC	۸۰۰/۳۳	۱	۸۰۰	۸/۸۷	۰/۰۰۸۴
BC	۷۳۶/۳۳	۱	۷۳۶	۸/۱۶	۰/۰۱۰۹
$A^2$	۳۶۲۹۶/۳۰	۱	۳۶۲۹۶	۴۰۲/۰۸	< ۰/۰۰۰۱
$B^2$	۳۲۹۷/۸۵	۱	۳۲۹۷	۳۶/۵۳	< ۰/۰۰۰۱
$C^2$	۶۷۵/۵۷	۱	۶۷۵	۷/۴۸	۰/۰۱۴۱
باقیمانده	۱۵۳۴/۶۳	۱۷	۹۰		
مجموع	۱۹۰۰۰۰	۲۶			

$$R^2 = ۰/۹۹۲$$

$$R^2 = ۰/۹۸۸ \text{ تنظیم شده}$$

$$R^2 = ۰/۹۷۷ \text{ پیش‌بینی}$$

جدول ۶. نتایج آنالیز واریانس پس از حذف عبارتهای کم اهمیت

Table 6. ANOVA for reduced quadratic model

منبع	مجموع مربعات	درجات آزادی	میانگین مربعات	مقدار $F$	مقدار $P$
مدل	۱۹۰۰۰۰	۸	۲۳۷۷۱/۸۳	۲۳۵/۷۶	< ۰/۰۰۰۱
A-w	۲۵۲۳۷	۱	۲۵۲۳۷/۵۶	۲۵۰/۲۹	< ۰/۰۰۰۱
B-d	۵۹۱۶۸	۱	۵۹۱۶۸/۰۰	۵۸۶/۸۰	< ۰/۰۰۰۱
C-p	۶۳۹۶۲	۱	۶۳۹۶۲/۷۲	۶۳۴/۳۵	< ۰/۰۰۰۱
AC	۸۰۰	۱	۸۰۰/۳۳	۷/۹۴	۰/۰۱۱۴
BC	۷۳۶	۱	۷۳۶/۳۳	۷/۳۰	۰/۰۱۴۶
$A^2$	۳۶۲۹۶	۱	۳۶۲۹۶/۳۰	۳۵۹/۹۷	< ۰/۰۰۰۱
$B^2$	۳۲۹۷	۱	۳۲۹۷/۸۵	۳۲/۷۱	< ۰/۰۰۰۱
$C^2$	۶۷۵	۱	۶۷۵/۵۷	۶/۷۰	۰/۰۱۸۵
باقیمانده	۱۸۱۴	۱۸	۱۰۰/۸۳		
مجموع	۱۹۰۰۰۰	۲۶			

$R^2 = ۰/۹۹۱$   
 $R^2$  تنظیم شده = ۰/۹۸۶  
 $R^2$  پیش‌بینی = ۰/۹۷۷

جدول ۷. صحت‌گذاری مدل رگرسیونی با آزمایش‌های تجربی

Table 7. Confirmation tests results for the developed model

شماره آزمایش	$w$ ( $\mu\text{m}$ )	$d$ ( $\mu\text{m}$ )	$p$ ( $\mu\text{m}$ )	$F_{exp}$ (N)	$F_{Pred}$ (N)	Error (%)
۱	۱۰	۱۳	۲۰۰	۳۲۵	۳۴۱	۴/۹۲
۲	۱۲۵	۱۰	۲۵۰	۳۴۶	۳۶۳/۵	۵/۰۶
۳	۱۷۵	۱۵	۳۰۰	۴۶۵	۴۳۳/۵	۶/۷۷

### ۳-۱-۶- صحت‌گذاری مدلسازی نیروی برش

در ادامه جهت صحت‌گذاری مدل ریاضی، سه آزمایش انجام گردید و نتایج آن‌ها با نتایج مدل ریاضی طبق رابطه ۳ مقایسه گردید. جدول ۷ نتایج مربوط به صحت‌گذاری نتایج آزمایش‌های تجربی با مدل رگرسیونی را ارائه می‌دهد. همانطور که در این جدول مشخص شده است، درصد خطاهای محاسبه شده بین نتایج تجربی و مدل ریاضی در محدوده قابل قبولی می‌باشد.

با توجه به انتخاب مدل چند جمله‌ای مرتبه دوم برای مدلسازی خروجی فرآیند در نهایت مدل ریاضی مربوط به نیروی برش بر حسب متغیرهای ورودی طبق رابطه (۳) بدست آمد. همانطور که در این مدل مشخص است پارامترهای دارای اهمیت ظاهر شده‌اند.

$$F = 1170 - 9.40hw - 22.389d - 1.106p + 0.003wp - 0.03ldp + 0.03hw^2 + 0.938d^2 + 0.004p^2 \quad (3)$$

جدول ۸. نتایج بهینه‌سازی و صحت‌گذاری

Table 8. Results of optimization and confirmation experiment

خطا	نیروی برش (N)		پارامترهای بهینه		
	تجربی	پیش‌بینی شده	$p$ ( $\mu\text{m}$ )	$d$ ( $\mu\text{m}$ )	$w$ ( $\mu\text{m}$ )
۵/۸۱٪	۲۷۵	۲۹۱	۲۰۰	۱۵	۱۲۶

خطا در وسط قطعه‌کار با توجه به نوع تکیه‌گاه‌ها ماکزیمم است. به عبارت دیگر مقدار تغییر شکل الاستیک حاصل از نیرو برش تیرانس قطر قطعه‌کار را کنترل می‌کند. خیز قطعه‌کار ( $\delta$ ) در نتیجه نیروی برش اعمال شده ( $F$ ) طبق تئوری تیرها محاسبه شده است. نوع گیره‌بندی در فرآیند تراشکاری و مدل قطعه‌کار به صورت شکل ۱۲ است. تغییر شکل قطعه‌کار با توجه به نوع تکیه‌گاه قطعه‌کار به صورت رابطه (۴) خواهد بود [۲۰].

$$\delta_{\max} = \frac{FL^3}{48\sqrt{5EI}} \quad (۴)$$

که در آن  $F$  نیروی برش،  $L$  طول قطعه‌کار،  $E$  مدول یانگ و  $I$  ممان اینرسی سطح مقطع قطعه‌کار است. ممان اینرسی سطح مقطع دایره‌ای طبق رابطه (۵) محاسبه می‌شود.

$$I = 0.049D^4 = 0.049 \times 40^4 = 125440\text{mm}^4 \quad (۵)$$

به منظور مقایسه تغییر شکل ابزار ساده با ابزار بافت‌دار بهینه دو آزمایش دیگر انجام شد و نیروهای برش اندازه‌گیری شد. نیروی برش با ابزار ساده ۵۷۵ N و با ابزار بافت‌دار بهینه ۲۷۵ N بدست آمد که کاهش ۵۱/۶ درصدی در نیروی برش برآیند برش را نشان می‌دهد. در جدول ۹ نتایج مربوط به تغییر شکل قطعه‌کار با ابزار ساده و ابزار دارای میکروباخت بهینه ارائه شده است. تغییر شکل قطعه‌کار با ابزار دارای میکروباخت بهینه ۳۰  $\mu\text{m}$  و با ابزار ساده برابر با ۶۲  $\mu\text{m}$  بدست آمد که کاهش ۵۱/۶ درصدی با ابزار دارای میکروباخت را نشان می‌دهد. در واقع دقت قطعه ماشینکاری شده با ابزار میکروباخت‌دار بهبود یافته است.

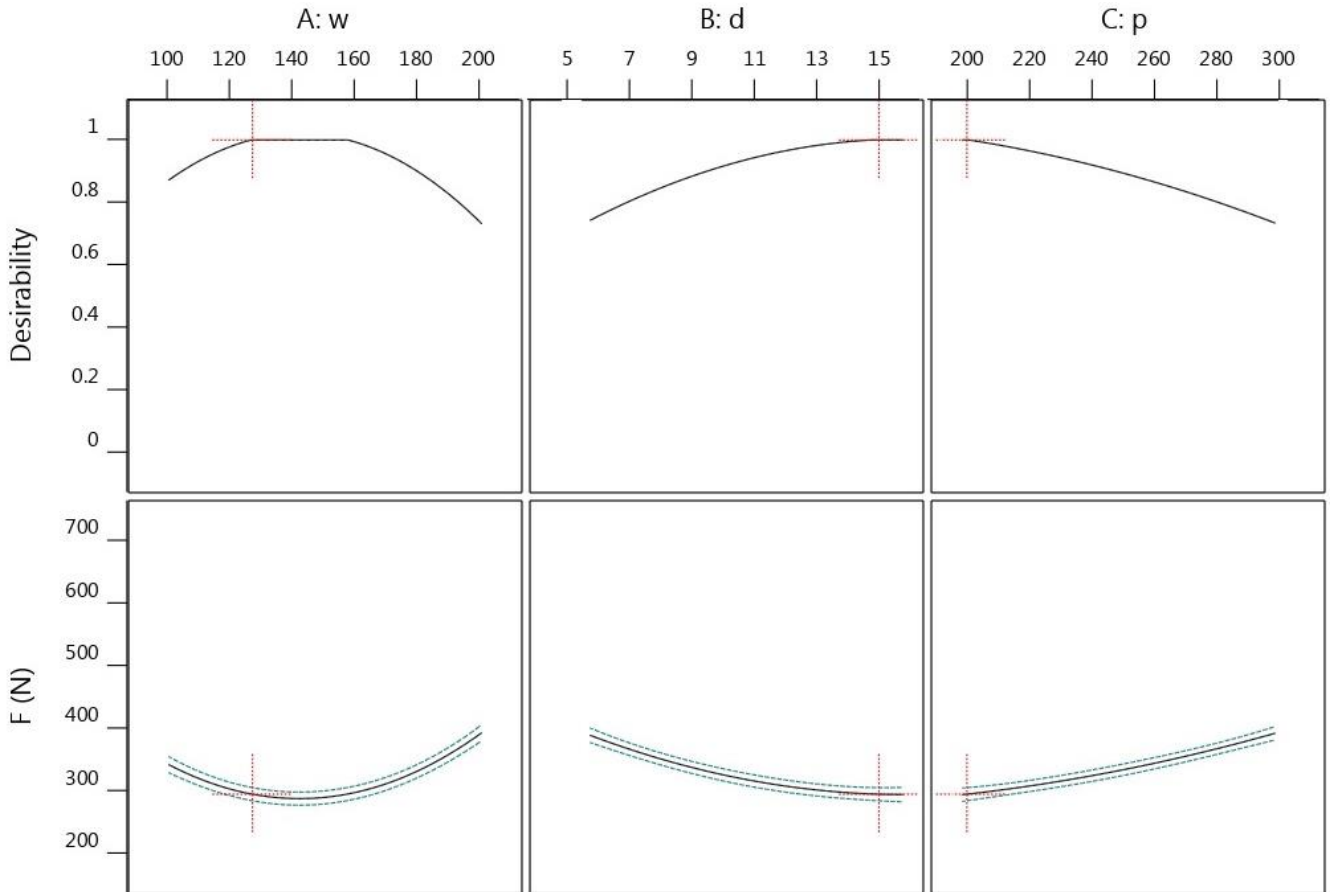
۳-۱-۷- بهینه‌سازی پارامترهای میکروباخت

به منظور دستیابی به پارامترهای میکروباخت که در آن کمترین نیروی برش در فرآیند تراشکاری فولاد تولید شود، بهینه‌سازی در نرم‌افزار دیزاین اکسپرت انجام شد. برای دستیابی به پارامترهای بهینه، تابع مطلوبیت در نرم‌افزار در بازه پارامترهای آزمایش محاسبه شده و جواب بهینه هنگامی اتفاق می‌افتد که مقدار تابع مطلوبیت در بازه ۰-۱ حداکثر باشد. بر اساس نتایج بهینه‌سازی، مقادیر بهینه پارامترهای عرض ( $w$ )، عمق ( $d$ ) و گام ( $p$ ) شیارهای میکروباخت هنگام فرآیند تراشکاری فولاد زنگ‌نزن ۱۷-۴PH به ترتیب برابر است با: ۱۲۶  $\mu\text{m}$ ، ۱۵  $\mu\text{m}$ ، ۲۰۰  $\mu\text{m}$ . مقدار نیروی برآیند برش در پارامترهای بهینه ۲۹۱ N پیش‌بینی گردید. در شکل ۱۱ تابع مطلوبیت برای هر یک از پارامترها رسم شده و مقدار بهینه هر پارامتر مشخص شده است. همانطور که از مقادیر بهینه پارامترهای مشخص است، برای عمق میکروباخت حداکثر بازه انتخاب شده و برای گام میکروباخت حداقل بازه انتخاب شده بدست آمد که با روند توضیح داده شده در بخش‌های قبلی همخوانی دارد. اما برای عرض میکروباخت مقدار بهینه آن در بازه مشخص شده ۱۰۰-۲۰۰  $\mu\text{m}$  بدست آمد که با نمودارهای بخش‌های قبلی منطبق است.

به منظور صحت‌گذاری بر نتایج بهینه‌سازی، میکروباختی با ابعاد بهینه شده توسط میکروماشینکاری لیزر بر روی یک ابزار ایجاد شد. آزمایش تراشکاری با این ابزار انجام شده و نیروهای برش توسط دینامومتر ثبت گردید. نتایج آزمایش صحت‌گذاری در جدول ۸ آورده شده است. درصد خطای محاسبه شده بیانگر دقت بالای فرآیند بهینه‌سازی در نرم‌افزار دیزاین اکسپرت است.

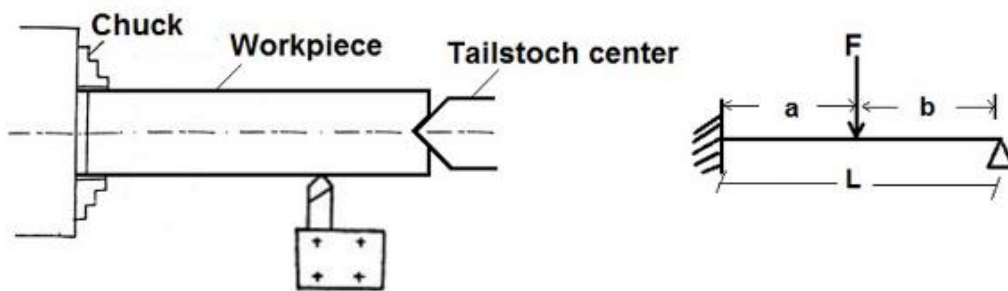
۳-۲- تغییر شکل قطعه‌کار و دقت ماشینکاری

نیروی ماشینکاری وارد شده به قطعه‌کار موجب تغییر شکل الاستیک آن شده و دقت ماشینکاری را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در واقع مقدار باربرداری به اندازه تغییر شکل الاستیک کمتر از مقدار تنظیم شده خواهد بود و این



شکل ۱۱. نمودار بهینه‌سازی برای حصول حداقل نیروی برش

Fig. 11. Optimization plot for maximum cutting force



شکل ۱۲. فرآیند تراشکاری (چپ) و مدل قطعه‌کار (راست)

Fig. 12. Turning process (left) and workpiece model (right)

جدول ۹. نتایج تغییر شکل قطعه کار با ابزار ساده و ابزار دارای میکروبافت بهینه

Table 9. Results of workpiece deflection with plain and optimized microtextured tools

شماره آزمایش	$w$ ( $\mu\text{m}$ )	$d$ ( $\mu\text{m}$ )	$p$ ( $\mu\text{m}$ )	$F$ (N)	$\delta$ ( $\mu\text{m}$ )
۲۸	-	-	-	۵۷۵	۶۲
۲۹	۱۲۶	۱۵	۲۰۰	۲۷۵	۳۰

#### ۴- نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از طراحی آزمایش انجام شده، به بررسی نتایج و تحلیل‌های آماری نیروی برش و تغییر شکل الاستیک قطعه کار پرداخته شد. پارامترهای مؤثر بر خروجی فرآیند با استفاده از آنالیز واریانس تعیین گردید و بر اساس آن معادلات رگرسیونی ایجاد شد. بر اساس مدل ایجاد شده، بهینه‌سازی در نرم‌افزار دیزاین اکسپرت انجام شد و مقدار بهینه پارامترهای میکروبافت جهت به حداقل رساندن نیروی برش و تغییر شکل الاستیک قطعه کار بدست آمد. جهت صحت‌سنجی نتایج مربوط به معادلات رگرسیونی، سه آزمایش تجربی دیگر نیز انجام پذیرفت و مطابقت خوبی بین نتایج آزمایش‌های تجربی و مدل رگرسیونی بدست آمد. دست‌آوردهای تحقیق به صورت زیر خلاصه می‌شود:

- با کاهش گام شیارهای میکروبافت نیروی برش کاهش می‌یابد. کاهش نیروی برش به کاهش سطح تماس و در نتیجه طول تماس مؤثر براده با ابزار نسبت داده می‌شود. طول تماس مؤثر ابزار با براده با کاهش گام شیار میکروبافت کاهش می‌یابد و در نتیجه با کاهش گام نیروی برش کاهش می‌یابد.

- با افزایش عرض شیار میکروبافت، نیروی برش ابتدا کاهش یافته و سپس افزایش می‌یابد. این روند نشان می‌دهد که عرض شیارهای میکرو بافت یک مقدار بهینه‌ای دارد که در آن نیروی برش فرآیند تراشکاری فولاد کمینه است. با افزایش عرض شیار میکروبافت، سطح و طول تماس ابزار با براده کاهش می‌یابد و منجر به کاهش نیروی برش می‌شود. برخلاف این موضوع هنگامی که عرض شیار میکروبافت خیلی زیاد است، براده تغییر شکل پلاستیکی داده و به سمت داخل میکروشیار حرکت می‌کند که در نهایت منجر به افزایش سطح تماس می‌گردد؛ بنابراین نیروی برش افزایش پیدا می‌کند.

- با افزایش عمق شیارهای میکروبافت نیروی برش کاهش می‌یابد. قابلیت به دام انداختن ذرات حاصل از سایش بافت با افزایش عمق میکروشیارها افزایش می‌یابد. در واقع شیارهای کم عمق حین عبور براده از سطح براده به سرعت با ذرات حاصل از سایش پر شده و کارایی خود را در کاهش نیرو از دست می‌دهند.

- بر اساس نتایج بهینه‌سازی، مقادیر بهینه پارامترهای عرض عمق ( $w$ )، عمق ( $d$ ) و گام ( $p$ ) شیارهای میکروبافت هنگام تراشکاری فولاد ۴PH-۱۷ به ترتیب برابر است با  $126 \mu\text{m}$ ،  $15 \mu\text{m}$ ،  $200 \mu\text{m}$ . مقدار نیروی برش در پارامترهای بهینه  $291 \text{ N}$  پیش‌بینی گردید.

- تغییر شکل قطعه کار با ابزار دارای میکروبافت بهینه  $30 \mu\text{m}$  و با ابزار ساده برابر با  $62 \mu\text{m}$  بدست آمد که کاهش  $51/6$  درصدی با ابزار دارای میکروبافت را نشان می‌دهد. در واقع دقت قطعه ماشینکاری شده با ابزار میکروبافت‌دار بهبود یافت.

#### منابع

- [1] N. Kawasegi, H. Sugimori, H. Morimoto, N. Morita, I. Hori, Development of cutting tools with microscale and nanoscale textures to improve frictional behavior, *Precis. Eng.*, 33(3) (2009) 248-254.
- [2] S. Lei, S. Devarajan, Z. Chang, A study of micropool lubricated cutting tool in machining of mild steel, *J. Mater. Process. Technol.*, 209(3) (2009) 1612-1620.
- [3] T. Sugihara, T. Enomoto, Development of a cutting tool with a nano/micro-textured surface—Improvement of anti-adhesive effect by considering the texture patterns, *Precis. Eng.*, 33(4) (2009) 425-429.
- [4] T. Enomoto, T. Sugihara, S. Yukinaga, K. Hirose, U.



- 13(10) (2012) 1845-1852.
- [12] D. Jianxin, W. Ze, L. Yunsong, Q. Ting, C. Jie, Performance of carbide tools with textured rake-face filled with solid lubricants in dry cutting processes, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 30(1) (2012) 164-172.
- [13] W. Da Silva, M. Suarez, A. Machado, H. Costa, Effect of laser surface modification on the micro-abrasive wear resistance of coated cemented carbide tools, *Wear*, 302(1-2) (2013) 1230-1240.
- [14] D. Jianxin, S. Wenlong, Z. Hui, Design, fabrication and properties of a self-lubricated tool in dry cutting, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 49(1) (2009) 66-72.
- [15] W. Ze, D. Jianxin, C. Yang, X. Youqiang, Z. Jun, Performance of the self-lubricating textured tools in dry cutting of Ti-6Al-4V, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 62(9-12) (2012) 943-951.
- [16] T.S. Sahu, A. George, B. Kuriachen, J. Mathew, P.B. Dhanish, Experimental investigations on the wear behaviour of micro-EDM-fabricated textured tools during dry turning of Ti6Al4V, *Industrial Lubrication and Tribology*, 74(1) (2022) 26-33.
- [17] M.K. Gupta, Q. Song, Z. Liu, R. Singh, M. Sarikaya, N. Khanna, Tribological behavior of textured tools in sustainable turning of nickel based super alloy, *Tribol. Int.*, 155 (2021) 106775.
- [18] S. Khani, M. Farahnakian, M.R. Razfar, Experimental study on hybrid cryogenic and plasma-enhanced turning of 17-4PH stainless steel, *Mater. Manuf. Process.*, 30(7) (2015) 868-874.
- [19] E. Armarego, R.H. Brown, *The machining of metals*, PRENTICE-HALL INC, ENGLEWOOD CLIFFS, 1969.
- [20] S. Timoshenko, *Strength of Materials*, Krieger Pub Co, 1983.
- Satake, Highly wear-resistant cutting tools with textured surfaces in steel cutting, *CIRP Ann.*, 61(1) (2012) 571-574.
- [5] T.D. Ling, P. Liu, S. Xiong, D. Grzina, J. Cao, Q.J. Wang, Z.C. Xia, R. Talwar, Surface texturing of drill bits for adhesion reduction and tool life enhancement, *Tribology Letters*, 52(1) (2013) 113-122.
- [6] T. Obikawa, A. Kamio, H. Takaoka, A. Osada, Micro-texture at the coated tool face for high performance cutting, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 51(12) (2011) 966-972.
- [7] Y. Xing, J. Deng, S. Li, H. Yue, R. Meng, P. Gao, Cutting performance and wear characteristics of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiC ceramic cutting tools with WS<sub>2</sub>/Zr soft-coatings and nano-textures in dry cutting, *Wear*, 318(1-2) (2014) 12-26.
- [8] J. Ma, N.H. Duong, S. Lei, Finite element investigation of friction and wear of microgrooved cutting tool in dry machining of AISI 1045 steel, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 229(4) (2015) 449-464.
- [9] D.M. Kim, V. Bajpai, B.H. Kim, H.W. Park, Finite element modeling of hard turning process via a micro-textured tool, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 78(9) (2015) 1393-1405.
- [10] J. Kümmel, D. Braun, J. Gibmeier, J. Schneider, C. Greiner, V. Schulze, A. Wanner, Study on micro texturing of uncoated cemented carbide cutting tools for wear improvement and built-up edge stabilisation, *J. Mater. Process. Technol.*, 215 (2015) 62-70.
- [11] J. Xie, M.-J. Luo, J.-L. He, X.-R. Liu, T.-W. Tan, Micro-grinding of micro-groove array on tool rake surface for dry cutting of titanium alloy, *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

R. Niksefat, M. R. Razfar, A. Ghazizadeh, S. Khani, *Optimization of Micro-Textured Tools Geometric Parameters in Turning of 17-4PH Stainless Steel*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 54(10) (2023) 2411-2428.

DOI: 10.22060/mej.2022.21072.7380



