



Effect of Process Parameters on Burr Size and Surface Roughness in Micromilling of AISI1045 Steel

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Ahmadlou A.¹ MSc,
Sadeghi M.H.*¹ PhD,
Ghaffari Torab Torki R.¹ MSc

How to cite this article

Ahmadlou A, Sadeghi M.H, Ghaffari Torab Torki R. Effect of Process Parameters on Burr Size and Surface Roughness in Micromilling of AISI1045 Steel. Modares Mechanical Engineering, 2020;20(2):515-529.

ABSTRACT

Micro milling is widely used for producing industrial micro parts. In micromachining, approaching the depth of cut to tool cutting tip radius causes some problems in achieving desired surface quality and burr formation. It is impossible to use conventional deburring methods in micro parts due to the reduction of machining scale and the importance of high dimensional accuracy and surface quality. Therefore, it is important to comprehend micro end milling and the effect of process parameters on reducing these problems. In this study, the effect of spindle speed, feed rate and depth of cut on surface roughness and burr size during micro end milling of AISI1045 steel have been investigated using the response surface method. Two flute endmills with 0.8 mm diameters have been used in this study. Results show that feed rate with 55.26, 37.53 and 44.55 percent contribution on burr size in up milling side, down milling side and surface roughness is the most effective parameter in the micro end milling process. Selecting the maximum amount of spindle speed, feed rate, and the minimum amount of depth of cut causes minimum burr size in both up milling and down milling side. 36000RPM spindle speed, 5.7mm/s feed rate and 0.086 mm depth of cut causes the best surface quality in micro-milling of mentioned steel.

Keywords Micromachining; Micromilling; Burr Size; Surface Roughness

CITATION LINKS

¹Mechanical Engineering Department, Manufacturing Engineering Faculty, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Manufacturing Engineering Faculty, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
Phone: +98 (21) 82883359
Fax: -
sadeghim@modares.ac.ir

Article History

Received: October 28, 2018
Accepted: June 15, 2019
ePublished: February 01, 2020

- [1] A review on current research aspects in tool-based micromachining processes [2] Deburring microparts using a magnetorheological fluid [3] Burrs-Analysis, control and removal [4] Effect of machining parameters on burr size of micromilled foils [5] Analysis of micro burr formation in austenitic stainless steel X5CrNi18-10 [6] Failure mechanisms of high temperature components in power plants [7] Stress and integrity analysis of steam superheater tubes of a high pressure boiler [8] Failure investigation on deformed superheater tubes [9] An experimental study on burr formation in micro milling aluminium and copper [10] Burr controlling in micro milling with supporting material method [11] Burr formation in micro-machining aluminum, 6061-T6 [12] Machining NiTi micro-parts by micro-milling [13] Prediction of burr formation in fabricating MEMS components by micro end milling [14] Characterization and modeling of burr formation in micro-end milling [15] Multi-objective process optimization for micro-end milling of Ti-6Al-4V titanium alloy [16] Burr formation and surface quality in high speed micromilling of titanium alloy (Ti6Al4V) [17] Micro-end milling of NiTi biomedical alloys, burr formation and phase transformation [18] Experimental investigation on the effects of process variables in micro-end milling of Ti-6Al-4V titanium alloy [19] Investigation on the burr formation mechanism in micro cutting [20] Burr height prediction of Ti6Al4V in high speed micro-milling by mathematical modeling [21] FE modeling of burr size in high-speed micro-milling of Ti6Al4V [22] Investigations into the effect of process parameters on surface roughness and burr formation during micro end milling of Ti-6Al-4V [23] Effect of cutting fluid on micromilling of Ti-6Al-4V titanium alloy [24] 2D modeling of surface roughness in micromilling [25] Study of heat distribution and surface quality in micromilling of Titanium alloy Ti6Al4V [26] Size effect and tool geometry in micromilling of tool steel

تاثیر پارامترهای فرآیند روی اندازه پلیسه و زبری سطح در میکروفرزکاری فولاد AISI1045

اتابک احمدلو MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

محمدحسین صادقی* PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

رضا غفاری تراب ترکی MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

چکیده

میکروفرزکاری به طور گسترده در تولید میکروقطعات صنعتی استفاده می‌شود. در میکروماشین‌کاری نزدیک‌شدن عمق براده به شعاع نوک ابزار باعث کاهش کیفیت سطح و تشکیل پلیسه می‌شود. در مقیاس میکرو به دلیل کاهش مقیاس ماشین‌کاری و اهمیت بالای دقت ابعادی و کیفیت سطح نمی‌توان از روش‌های معمول برای پلیسه‌زدایی استفاده کرد لذا شناخت شرایط حاکم بر میکروفرزکاری و تاثیر پارامترهای فرآیند در کاهش مشکلات یادشده بسیار موثر است. در این تحقیق با استفاده از روش طراحی آزمایش رویه پاسخ به بررسی تاثیر پارامترهای سرعت اسپیندل، نرخ پیشروی و عمق برش روی اندازه پلیسه و زبری سطح در میکروفرزکاری فولاد AISI1045 پرداخته شده است. آزمایش‌ها توسط ابزار دو پره به قطر ۰/۸ میلی‌متر انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که پارامتر نرخ پیشروی به ترتیب با ۵۵/۲۶، ۳۷/۵۳ و ۴۴/۵۵٪ سهم تاثیر به ترتیب روی اندازه‌های پلیسه در نواحی فرزکاری مخالف و موافق و زبری سطح مهم‌ترین پارامتر تاثیرگذار در فرآیند میکروفرزکاری است. کمترین اندازه پلیسه در فرزکاری مخالف و موافق مربوط به حالتی است که سرعت اسپیندل و نرخ پیشروی در بیشترین حالت و پارامتر عمق برشی در کمترین حالت، با توجه به جدول طراحی آزمایش و محدوده تغییر پارامترهای ورودی انتخاب شود. با انتخاب سرعت اسپیندل ۳۶۰۰۰ RPM، نرخ پیشروی ۵/۷ mm/s و عمق برش ۰/۰۸۶ mm بالاترین کیفیت سطح در میکروفرزکاری فولاد مورد مطالعه قابل دستیابی است.

کلیدواژه‌ها: میکروماشین‌کاری، میکروفرزکاری، اندازه پلیسه، زبری سطح

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۸/۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۳/۲۵

*نویسنده مسئول: sadeghim@modares.ac.ir

۱- مقدمه

افزایش تقاضا برای کاهش وزن و ابعاد و در عین حال افزایش دقت و کیفیت سطح قطعات صنعتی، باعث ایجاد و توسعه روش‌های نوین تولید میکروقطعات صنعتی شده است. میکروفرزکاری با در نظر گرفتن ویژگی‌های فرآیندی خاص نظیر توانایی ساخت قطعات پیچیده سه بعدی، دقت ماشینکاری بالا، انعطاف پذیری بالا در تولید میکرونقش‌های پیچیده، نیروی براده برداری بالا و قابلیت ماشینکاری مواد متنوع فلزی و غیرفلزی از اهمیت و کاربرد فراوانی برخوردار است. از میکروفرزکاری به طور گسترده در تولید

میکروقالب‌های تزریق پلاستیک، میکروقالب‌های شکل‌دهی، تجهیزات میکروجریان، کانال‌های میکرو، میکرومبدل‌های حرارتی، میکروچرخ‌دنده‌ها و غیره استفاده می‌شود[1].

تشکیل پلیسه یکی از مهم‌ترین مشکلات فرآیندهای ماشینکاری مکانیکی است. با کاهش مقیاس ماشینکاری، به دلیل بزرگی نسبت اندازه پلیسه به ابعاد کلی قطعه‌کار، اهمیت کمینه کردن اندازه پلیسه دوچندان می‌شود[2]. تشکیل پلیسه در ناحیه برش باعث ایجاد مشکلاتی در زمینه ساخت و کاربرد میکرو قطعات می‌شود. کاهش دقت ابعادی و کیفیت سطح، شکست ناگهانی میکروابزار بر اثر برخورد با پلیسه‌های ایجاد شده از عملیات ماشینکاری قبلی، خرابی سطوح زیرین برش در لبه‌های ماشینکاری شده، ایجاد مشکلات گسترده در اتوماسیون فرآیند، تضعیف عملکرد قطعات دقیق، محل تجمع انواع آلودگی‌ها و گردوغبار، ایجاد مشکلات اساسی در مرحله مونتاژ و ایجاد اختلال در عملکرد سیستم‌های دقیق به دلیل کنده شدن پلیسه از لبه برش و تبدیل آن به براده از جمله مهم‌ترین مشکلات وجود پلیسه در میکروفرزکاری است[3-5]. به دلیل ایجاد خطاهای ابعادی و تنش‌های پسماند، ایجاد انحنای در لبه‌های تیز و محدودیت امکان کنترل فرآیند پلیسه‌زدایی نمی‌توان از روش‌های معمول برای پلیسه‌زدایی در مقیاس میکرو استفاده کرد[6-8].

تاثیرات ناشی از تغییر پارامترهای ماشینکاری بر اندازه پلیسه و کاهش ابعاد پلیسه‌های تولید شده در اثر فرآیند میکروفرزکاری با انتخاب بهینه پارامترهای ماشینکاری از جمله مهم‌ترین رویکردها در زمینه میکروماشینکاری و موضوع تحقیق بسیاری از محققان با در نظر گرفتن جنس و هندسه ابزار و قطعه‌کار و شرایط ماشینکاری است. لی و دورنفلد[9] نشان دادند که در مقادیر بالای نرخ پیشروی با افزایش سرعت برشی، ارتفاع پلیسه افزایش می‌یابد ولی در نرخ پیشروی‌های پایین به دلیل سایش ابزار، افزایش سرعت برشی باعث کاهش ارتفاع پلیسه می‌شود.

چرن و همکاران[10] به بررسی مکانیزم تشکیل پلیسه در آلیاژ آلومینیومی Al 6061-T6 پرداختند و به این نتیجه رسیدند که هرچه میزان نرخ پیشروی و عمق برش کمتر باشد، ابعاد پلیسه‌های تولید شده نیز کوچک‌تر خواهد بود.

تاثیر پارامترهای ماشینکاری بر روند تشکیل پلیسه در میکروماشینکاری آلیاژ Al 6061-T6 توسط لی و همکاران[11] بررسی شد. آنها به این نتیجه رسیدند که با افزایش نرخ پیشروی، ابعاد پلیسه افزایش می‌یابد. این در حالی است که وینرت و پترولد[12] با انجام آزمایش‌های تجربی روی قطعاتی از جنس NiTi به نتایج متفاوتی دست یافتند و نشان دادند که افزایش نرخ پیشروی باعث تسهیل مکانیزم تشکیل براده و در نتیجه باعث کاهش ابعاد پلیسه می‌شود.

مکانیزم تشکیل پلیسه در میکروفرزکاری فولاد AISI 304 توسط علی محمد و همکاران[13] بررسی شد. آنها به این نتیجه رسیدند که هنگام استفاده از مایع خنک‌کننده، تاثیر نرخ پیشروی و در صورت عدم استفاده از مایع خنک‌کننده، تاثیر پارامتر سرعت برشی بر ابعاد

کومار و همکاران^[20]، مدل آنالیزی برای پیش‌بینی سایز پلیسه معرفی کرده و با استفاده از این مدل، تاثیر تغییرات ناشی از سرعت برشی بر ابعاد پلیسه را بررسی کردند. آنها نشان دادند که با افزایش سرعت برشی، ارتفاع پلیسه کاهش می‌یابد. نتایج به‌دست‌آمده از انجام آزمایش‌های عملی میزان خطای انطباق ۳٪ را برای سرعت‌های برشی پایین و ۷٪ را برای سرعت‌های برشی بالا نشان می‌دهد.

یاداو و همکاران^[21]، مکانیزم تشکیل پلیسه را به روش المان محدود، مدل‌سازی کرده و سرعت برشی را به‌عنوان مهم‌ترین پارامتر تاثیرگذار بر ابعاد پلیسه معرفی کردند که با افزایش آن، ارتفاع و عرض پلیسه در ناحیه خروج ابزار از قطعه‌کار کاهش می‌یابد.

در هر مرحله از دوران و براده‌برداری هر یک از لبه‌های ابزار برشی، ابتدا فرزکاری مخالف و سپس فرزکاری موافق اتفاق می‌افتد. در فرزکاری مخالف، جهت پیشروی قطعه‌کار مخالف جهت چرخش ابزار است. لذا ضخامت براده از صفر شروع می‌شود و در نهایت به مقدار ماکزیمم می‌رسد. در فرزکاری موافق، جهت پیشروی قطعه‌کار و چرخش ابزار یکسان بوده و ضخامت پلیسه از حداکثر مقدار خود تا اندازه ضخامت صفر کاهش می‌یابد. مکانیزم براده‌برداری و تشکیل پلیسه در دو قسمت فرزکاری مخالف و موافق متفاوت است، لذا ابعاد پلیسه‌های تولیدشده در دو ناحیه متفاوت خواهد بود.

ویپینداس و همکاران^[22] به بررسی تاثیر پارامترهای ماشینکاری بر مکانیزم تشکیل پلیسه در میکروفرزکاری آلیاژ Ti6Al4V پرداخته و نشان دادند که ابعاد پلیسه‌های تشکیل‌شده در فرزکاری موافق بزرگ‌تر از فرزکاری مخالف است. در مقابل زیبروف و همکاران^[23] پلیسه‌های فرزکاری مخالف را بزرگ‌تر دانستند.

زبری سطح قطعات ماشینکاری‌شده یکی از مهم‌ترین پارامترهای تعیین کیفیت قطعات و در بسیاری از مواقع مهم‌ترین معیار برای قبول یا رد کردن میکروقطعات است. زبری، عبارت است از فاصله بین دره و قله‌های تشکیل‌شده در بافت سطح. زبری سطح در اکثر موارد به‌عنوان یک نیاز فنی برای کیفیت قطعات تولیدی و معیاری از عمر کارکرد آنها شناخته می‌شود. معیار ارزیابی زبری در این تحقیق، زبری سطح متوسط است که به صورت متوسط ارتفاعات نسبت به یک خط میانگین در نظر گرفته می‌شود.

باجپای و همکاران^[16] به بررسی تاثیر پارامترهای ماشینکاری و هندسه ابزار بر زبری سطح پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که افزایش سرعت دورانی، نرخ پیشروی و عمق برش باعث افزایش کیفیت سطح میکروقطعات می‌شود. از طرفی قطر بزرگ‌تر ابزار باعث ایجاد سطحی با کیفیت پایین و افزایش تعداد لبه‌های برنده ابزار باعث یکنواختی و کیفیت بالای سطح می‌شود.

ویپینداس و همکاران^[22] نیز به بررسی تاثیر پارامترهای ماشینکاری بر زبری سطح پرداخته و به این نتیجه رسیدند که هنگام استفاده از ابزار برشی به قطر ۵/۵ میلی‌متر، عمق برشی و هنگام کار با ابزار امیلی‌متری، نرخ پیشروی مهم‌ترین پارامتر تاثیرگذار بر کیفیت سطح است.

پلیسه بیشتر خواهد بود. سرعت برشی و نرخ پیشروی هم به‌طور مستقیم و هم با اثر متقابل روی ارتفاع پلیسه تاثیرگذارند.

ک/ا و همکاران^[14] نیز به بررسی تاثیر هندسه ابزار برشی و پارامترهای ماشینکاری روی ابعاد پلیسه پرداختند و به این نتیجه رسیدند که قطر ابزار، عمق برشی، تعداد لبه‌های برنده ابزار و نرخ پیشروی به‌ترتیب مهم‌ترین پارامترهای تاثیرگذار بر ارتفاع و عرض پلیسه هستند. نتایج نشان داد که با افزایش نرخ پیشروی و قطر ابزار میزان ارتفاع پلیسه تولیدشده افزایش می‌یابد.

تیسونتی و وزل^[15] به بررسی فرآیند میکروفرزکاری آلیاژ تیتانیومی Ti6Al4V و مکانیزم تشکیل پلیسه پرداختند و نتیجه گرفتند که حالت بهینه در کمینه‌کردن عرض پلیسه، انتخاب سرعت اسپیندل و عمق برشی در بیشترین و انتخاب میزان نرخ پیشروی در کمترین حالت خود است.

بیرمن و استینر^[5] به بررسی پارامترهای موثر بر ارتفاع پلیسه تولیدشده در میکروفرزکاری فولاد ضدزنگ پرداختند. نتایج نشان داد که سرعت برشی مهم‌ترین عامل در تعیین ارتفاع پلیسه است و با افزایش آن به دلیل افزایش دما، ارتفاع پلیسه افزایش می‌یابد. افزایش نرخ پیشروی نیز به دلیل افزایش نرخ براده‌برداری باعث افزایش ارتفاع پلیسه می‌شود.

باجپای و همکاران^[16] تاثیر پارامترهای برش روی ابعاد پلیسه تولیدشده را بررسی کرده و نشان دادند که کاهش عمق برش و افزایش سرعت دورانی و نرخ پیشروی، ارتفاع و عرض پلیسه را کاهش می‌دهد. کاهش عرض پلیسه با شیب ملایم‌تری مشاهده شده است که دلیل این امر، کاهش ضخامت براده تغییرشکل‌نیافته است.

بررسی تاثیر پارامترهای برشی بر ابعاد پلیسه در میکروفرزکاری NiTi توسط پیکارد و همکاران^[17] انجام پذیرفته است. آنها نشان دادند که کاهش عرض برش و افزایش نرخ پیشروی و عمق برش، باعث کاهش ارتفاع پلیسه می‌شود. استراتژی ماشینکاری، مهم‌ترین عامل در تعیین ضخامت پلیسه است، به‌گونه‌ای که پلیسه‌های قسمت فرزکاری موافق ضخیم‌تر هستند. افزایش سرعت برشی و کاهش عمق برش، نرخ پیشروی و عرض برش باعث ضخیم‌تر شدن پلیسه می‌شود. از طرفی افزایش نرخ پیشروی و کاهش عرض برش باعث کاهش عرض پلیسه می‌شود.

پار/تاپ و پاتر^[18] با هدف بهینه‌کردن شرایط میکروفرزکاری آلیاژ تیتانیومی Ti6Al4V و انجام آزمایش‌های عملی به این نتیجه رسیدند که عرض پلیسه، بیشتر تحت تاثیر تغییرات عمق برشی است و با انتخاب بیشترین مقدار سرعت اسپیندل و عمق برش و کمترین مقدار نرخ پیشروی می‌توان عرض پلیسه را کمتر کرد.

وو و همکاران^[19] به بررسی مکانیزم تشکیل پلیسه در میکروبرشکاری با در نظر گرفتن جنس ماده و نحوه توزیع تنش در ناحیه برش پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که مواد با شکل‌پذیری بالا، پلیسه‌های بزرگ‌تری تولید می‌کنند.

انجام شد. به منظور استراحت ابزار برشی بین هر یک از قسمت‌های انجام آزمایش شبیاری به عرض ۵ میلی‌متر ماشینکاری شده است. برای کنترل عمق برش در حین میکروفورزکاری و در تمامی قسمت‌های قطعه‌کار، سطوح بالایی و زیرین آن سنگ‌زنی شده است. به منظور انجام آزمایش‌ها از ماشین میکروفورزکاری ۵ محوره (Pixdent ECO Desk) با حداکثر دور اسپیندل ۴۰۰۰ دور بر دقیقه استفاده شد. شکل ۲ دستگاه میکروفورزکاری مورد استفاده برای انجام آزمایش‌های تجربی را نشان می‌دهد. از میکروابزار کاربردی سر تخت ۲ لبه، با پوشش TiAlN و قطر ۸/۰ میلی‌متر برای انجام آزمایش‌های تجربی استفاده شده است. به منظور جلوگیری از تاثیر سایش ابزار بر نتایج به دست آمده، بعد از هر ۵ مرحله آزمایش، میکروابزار تعویض و با ابزار جدید جایگزین شد. لذا بایستی مکانیزمی برای کنترل طول ابزار و اعمال تغییرات ناشی از تفاوت طول ابزارهای استفاده شده برای کنترل عمق برش وجود داشته باشد. در دستگاه میکروفورزکاری، به منظور کنترل عمق برش در طول انجام آزمایش‌ها از مکانیزم کنترل طول ابزار استفاده شد که بعد از هر مرحله تعویض ابزار، طول ابزار را با توجه به طول از پیش تعیین شده و با استفاده از سنسورهای کنترلی، تنظیم می‌کند. قبل از انجام آزمایش‌های عملی، میزان لنگی دستگاه توسط ساعت اندازه‌گیری دیجیتالی با دقت ۰۰۱/۰ میلی‌متر کنترل شد. در هر مرحله تعویض ابزار نیز میزان لنگی کنترل شده و در صورت لنگی بیش از یک میکرون، ابزار از روی ابزارگیر باز شده و دوباره روی آن بسته شده است.



شکل (۱) قطعه‌کار فولادی مورد آزمایش



شکل (۲) دستگاه میکروفورزکاری مورد استفاده برای آزمایش

کورانند و ایمانی^[24]، به معرفی مدلی برای پیش‌بینی پروفیل و زبری سطح کف شیار میکروفورزکاری شده پرداختند. آنها تاثیر پارامتر نرخ پیشروی بر زبری سطح را بررسی کرده و نشان دادند که در نرخ پیشروی‌های کمتر از مقدار بحرانی ضخامت براده نتراشیده، شخم‌زنی باعث افزایش زبری سطح و تشکیل پلیسه می‌شود. تاثیر پارامترهای مختلف ماشینکاری بر مشخصه‌های آلیاژ تیتانیومی Ti6Al4V همانند کیفیت سطح، نیروی برشی، دما و سایش میکروابزار توسط رضایی^[25] بررسی شد. نتایج آزمایش‌های ایشان نشان داد که نرخ پیشروی موثرترین پارامتر تاثیرگذار بر زبری سطح است. تغییرات زبری با نرخ پیشروی دارای طبیعتی دوگانه است، به گونه‌ای که در ابتدا به علت کاهش اثر شخم‌زنی، روندی کاهنده داشته، سپس روندی یکنواخت و در نهایت روندی افزایشی داشته است. افزایش سرعت برشی و کاهش عمق برشی باعث کاهش زبری سطح می‌شود.

هدف این تحقیق، بررسی تاثیر پارامترهای سرعت اسپیندل، نرخ پیشروی و عمق برش بر کیفیت سطح و اندازه پلیسه تشکیل شده در میکروفورزکاری فولاد AISI 1045 در نواحی فرزکاری مخالف و موافق و در نهایت پیدا کردن پارامترهای بهینه ماشینکاری برای دستیابی به کمترین اندازه پلیسه و بالاترین کیفیت سطح است. بدین منظور با استفاده از طراحی آزمایش به روش رویه پاسخ (Response Surface) و تحلیل آماری، روند تاثیر هر یک از پارامترهای ذکر شده بر ابعاد پلیسه‌های نواحی فرزکاری مخالف و موافق و کیفیت سطح بیان شده و مهم‌ترین پارامتر تاثیرگذار بر مکانیزم تشکیل پلیسه معرفی می‌شود.

۲- تجهیزات و روش انجام آزمایش

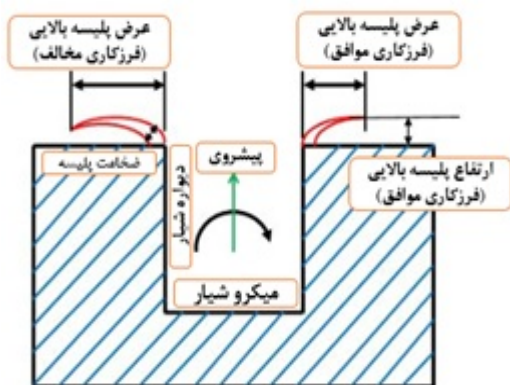
جنس قطعه‌کار مورد استفاده در این تحقیق، فولاد AISI 1045 است. جدول ۱ ترکیب شیمیایی و درصد عناصر تشکیل‌دهنده قطعه‌کار را نشان می‌دهد که به روش کوانتومتری و با استاندارد ASTM E 415 به دست آمده است.

جدول (۱) ترکیب شیمیایی فولاد AISI 1045

عنصر	درصد وزنی
کربن	۰/۴۵۴
نیکل	۰/۰۵۲
کروم	۰/۰۵۸
منگنز	۰/۰۶۴
سیلیسیوم	۰/۲۱۵
آلومینیوم	۰/۰۱۲
مس	۰/۰۸۱
آهن	پایه

شکل ۱ قطعه‌کار مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد. با توجه به قسمت نگه‌دارنده دستگاه میکروفورزکاری، قسمت زیرین آن به صورت استوانه‌ای طراحی و ساخته شده است. آزمایش‌های تجربی روی نمونه‌هایی به شکل مکعب مستطیل با ابعاد ۱۰×۱۰×۴۴ میلی‌متر

ناحیه از طول شیارها اندازه‌گیری و مقدار میانگین به‌عنوان پارامتر خروجی ثبت شد. شکل ۳ طرح‌واره‌ای از نمای روبروی پلیسه‌های تشکیل‌شده در لبه برش و پارامترهای اندازه‌گیری آن را نشان می‌دهد. برای عکس‌برداری از سطوح شیارهای میکروفزکاری‌شده و همچنین اندازه‌گیری عرض پلیسه‌های تولیدی بر اثر فرآیند میکروفزکاری از میکروسکوپ دیجیتال (Euroscope Digital Microscope) با حداکثر بزرگنمایی ۵۰۰ و برای اندازه‌گیری ارتفاع و ضخامت پلیسه نیز از میکروسکوپ نوری با حداکثر بزرگنمایی ۱۰۰۰ استفاده شد.



شکل ۳) طرح‌واره نمای روبروی پلیسه و پارامترهای اندازه‌گیری آن

اندازه‌گیری زبری سطح با استفاده از دستگاه زبری‌سنج پرتابل مار (Mahr) مدل PS1 انجام پذیرفت. برای تعیین میزان زبری سطح در هر مرحله آزمایش، اندازه‌گیری‌ها با استفاده از دستگاه زبری‌سنج در ۶ ناحیه و هرکدام به طول ۱/۷۵ میلی‌متر صورت پذیرفت و میانگین نتایج، به‌عنوان زبری متوسط سطح ماشینکاری‌شده گزارش شد. از نرم‌افزار مینی‌تپ (Minitab 18) برای تحلیل نتایج حاصل از آزمایش‌های عملی استفاده شده است.

۳- نتایج و بحث

به‌منظور مشاهده تاثیر پارامترهای ماشینکاری بر ابعاد پلیسه، تعریف واحدی از اندازه پلیسه، مورد نیاز خواهد بود. در اکثر مقالات مربوط به پلیسه، هر یک از پارامترهای ارتفاع، ضخامت و عرض پلیسه به‌صورت جداگانه به‌عنوان معیاری برای تعریف اندازه پلیسه معرفی شده‌اند. برخی محققان ارتفاع پلیسه را مبنای بررسی قرار داده‌اند^[14]. عده‌ای نیز ارتفاع و عرض پلیسه را به‌عنوان معیاری برای تعیین اندازه پلیسه بررسی کرده‌اند^[16]. با توجه به اهمیت هر سه پارامتر مربوط به اندازه پلیسه، بایستی رابطه‌ای وجود داشته باشد که هر سه پارامتر خروجی ارتفاع، ضخامت و عرض پلیسه را در بر گیرد. بدین منظور با تخصیص وزن مناسب برای هر یک از مشخصه‌های اندازه‌گیری پلیسه، می‌توان به تعریف کلی از اندازه پلیسه دست یافت و از آن تعریف واحد، برای کمینه‌کردن ابعاد پلیسه استفاده کرد. به‌منظور معادل‌سازی وزن‌ها از روش نرمال‌سازی خطی استفاده شد. بیشترین مقادیر اندازه‌گیری‌شده برای

به‌منظور بررسی تاثیر پارامترهای ماشینکاری بر اندازه پلیسه تشکیل‌شده در دو فرزکاری مخالف و موافق، سه پارامتر سرعت اسپیندل (n)، نرخ پیشروی (f) و عمق برش (a) به‌عنوان پارامترهای فرزکاری در ۵ سطح تغییر داده شدند. با توجه به اینکه در میکروفزکاری، شعاع لبه برنده ابزار پارامتری مهم در تعیین سطوح تغییر نرخ پیشروی است، لذا بایستی قبل از طراحی آزمایش و تعیین نحوه تغییر پارامترها و به‌منظور مشاهده تاثیر تغییرات ناشی از پارامتر نرخ پیشروی بر نتایج، شعاع لبه برنده میکروابزارها اندازه‌گیری می‌شد. بدین منظور یکی از ابزارها توسط دستگاه وایبرکات (با دقت ابعادی ۰/۰۱ میلی‌متر) برش داده شده و زیر میکروسکوپ به‌منظور اندازه‌گیری شعاع لبه برنده قرار داده شد. برای میکروابزار مورد استفاده، شعاع لبه برنده برابر ۶ میکرومتر اندازه‌گیری شد. سرعت‌های دورانی انتخاب‌شده برای انجام آزمایش‌های عملی با دینزگرگفتن سرعت برشی مناسب برای جنس قطعه‌کار، قطر ابزار و شرایط آزمایش انتخاب شده است. به دلیل محدودیت‌های مربوط به ماشین میکروفزکاری، سطوح انتخابی برای پارامتر سرعت اسپیندل دارای فاصله یکسان نیستند. با توجه به اهمیت نسبت نرخ پیشروی به شعاع لبه برنده ابزار در فرآیند میکروفزکاری، میزان نرخ پیشروی برای هر سه حالتی که این نسبت بزرگ‌تر، کمتر و برابر یک باشد در ۵ سطح متفاوت انتخاب شده است. پارامترهای میکروفزکاری، تعداد سطوح و مقادیر آنها در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲) پارامترهای آزمایش و سطوح تغییر آنها

پارامترهای آزمایش	سطوح تغییر پارامترهای آزمایش				
	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	سطح ۴	سطح ۵
سرعت اسپیندل (RPM)	۲۸۰۰۰	۳۱۰۰۰	۳۳۰۰۰	۳۶۰۰۰	۳۹۰۰۰
نرخ پیشروی (mm/s)	۱	۲	۵	۷	۱۰
عمق برش (mm)	۰/۰۷	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۱۰	۰/۱۱

از روش روبه پاسخ برای طراحی آزمایش در این تحقیق استفاده شده است. با استفاده از این روش تعداد ۱۵ آزمایش به‌دست آمد که هر یک با ۳ بار تکرار انجام پذیرفت. بر این اساس تعداد ۴۵ آزمایش انجام پذیرفت.

پارامترهای اندازه‌گیری ابعاد پلیسه عرض، ارتفاع و ضخامت هستند. به‌منظور اندازه‌گیری عرض پلیسه‌های تشکیل‌شده در هر دو قسمت فرزکاری مخالف و موافق شیارهای میکروفزکاری‌شده، قطعه‌کار مورد آزمایش زیر میکروسکوپ قرار گرفته و مقادیر مربوط به عرض پلیسه‌ها در ۵ نقطه تصادفی از طول شیار اندازه‌گیری شده و مقدار میانگین به‌دست‌آمده به‌عنوان عرض پلیسه در این ناحیه ثبت شد. برای اندازه‌گیری مقادیر مربوط به ارتفاع و ضخامت پلیسه‌ها نیز قطعه‌کار در جهت عمود بر راستای ماشینکاری‌شده وایبرکات شد و زیر میکروسکوپ قرار گرفت. ارتفاع و ضخامت پلیسه‌ها نیز در ۶

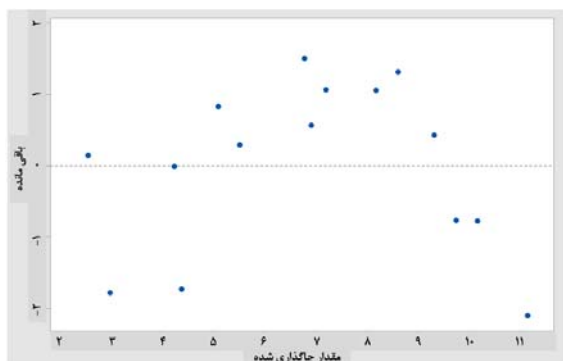
۳-۱- اندازه پلیسه در فرزکاری مخالف

با انجام آزمایش‌های عملی و اندازه‌گیری عرض، ارتفاع و ضخامت پلیسه بالایی در قسمت فرزکاری مخالف، اندازه پلیسه در این ناحیه به دست آمد. به منظور تخمین دقیق‌تر اندازه پلیسه در فرزکاری مخالف از آنالیز واریانسی استفاده شد. در ابتدا یک مدل درجه ۲ شامل تمامی پارامترهای خطی، تداخل دوگانه و توان ۲ پارامترها بسط داده شد. سپس پارامترهایی که مقدار p آنها بزرگ‌تر از ۵٪ بود، حذف و به عنوان خطا در نظر گرفته شد. تحلیل واریانسی مدل توسعه‌یافته نهایی بعد از حذف پارامترهای بی‌معنی در جدول ۴ نشان داده شده است. با توجه به جدول ۴ می‌توان دریافت که تداخل درجه ۲ پارامترهای ماشینکاری و همچنین توان دوم آنها در تعیین ابعاد پلیسه در فرزکاری مخالف بی‌معنی بوده و تنها اثر خطی پارامترهای ماشینکاری در تعیین اندازه پلیسه موثر هستند. آخرین ستون از جدول آنالیز واریانسی مربوط به سهم تاثیر هر یک از پارامترهای معنی‌دار بر اندازه پلیسه در فرزکاری مخالف است. نرخ پیشروی با ۵۵/۲۶٪، عمق برشی با ۲۱/۵۳٪ و سرعت اسپیندل با ۶/۹٪ به ترتیب مهم‌ترین پارامترهای تاثیرگذار بر ابعاد پلیسه در فرزکاری مخالف هستند. تاثیر پارامتر نرخ پیشروی تقریباً دو برابر دیگر پارامترها است.

R-sq مربوط به مدل توسعه‌یافته نهایی برابر ۸۳/۶۹٪ است که از پوشش مناسب و نسبتاً کامل اندازه پلیسه در نواحی مختلف پارامترهای مورد آزمایش خبر می‌دهد. نمودار ۱ نمودار پراکندگی و نمودار ۲ نمودار توزیع نرمال مقادیر باقی‌مانده‌ها برای مدل پیشنهاد شده را نشان می‌دهند.

جدول (۴) تحلیل واریانس مدل اندازه پلیسه در فرزکاری مخالف

عامل	درجه آزادی	مجموع مربعات	مقدار F	مقدار P	سهم تاثیر (%)
مدل	۳	۹۹/۴۷۵	۱۸/۸۲	۰/۰۰۰	
N	۱	۸/۲۰۵	۴/۹۲	۰/۰۴۹	۶/۹۰
F	۱	۶۵/۶۸۱	۳۷/۲۷	۰/۰۰۰	۵۵/۲۶
A	۱	۲۵/۵۸۸	۱۴/۵۲	۰/۰۰۳	۲۱/۵۳
خطا	۱۱	۱۹/۳۸۵	-	-	۱۶/۳۱
کل	۱۴	۱۱۸/۸۶۰	-	-	۱۰۰/۰۰



نمودار ۱) پراکندگی باقی‌مانده‌ها در مدل توسعه‌یافته اندازه پلیسه در فرزکاری مخالف

هر مشخصه (۴۱/۲۱ میکرومتر برای ضخامت، ۸۸/۴۳ میکرومتر برای ارتفاع و ۳۴۴/۳۷۵ میکرومتر برای عرض پلیسه) بر مجموع مقادیر بیشینه تقسیم شده و نتیجه به عنوان ضریب هر مشخصه در تعیین اندازه پلیسه ثبت شد. بنابراین، اندازه پلیسه تحت عنوان پارامتر g به صورت رابطه ۱ خواهد بود که در آن T ضخامت، H ارتفاع و W عرض پلیسه است.

$$g = T + 2.15 H + 8.36 W \quad (۱)$$

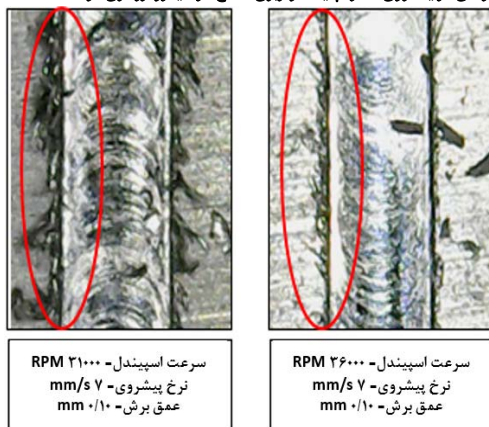
رابطه ۱ اهمیت بالای عرض پلیسه در اندازه‌گیری ابعاد آن را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه بیشترین مقدار اندازه‌گیری شده بین پارامترهای اندازه‌گیری ابعاد پلیسه مربوط به عرض است و همچنین وجود پلیسه‌های با عرض بالا در لبه‌های برش باعث ایجاد مشکلات گسترده در تولید و مونتاژ میکروقطعات می‌شود، لذا بایستی اندازه پلیسه (g) وابستگی بیشتری نسبت به عرض پلیسه (w) داشته باشد که در رابطه ۱ این موضوع به وضوح دیده می‌شود. برای محاسبه اندازه پلیسه برای هر یک از مراحل آزمایش، بایستی مقادیر مربوط به ضخامت، ارتفاع و عرض پلیسه استانداردسازی شوند. از رابطه ۲ برای استانداردسازی داده‌های مربوط به مشخصه‌های اندازه‌گیری ابعاد پلیسه برای هر مرحله آزمایش استفاده شد. x_i مقدار اندازه‌گیری شده در هر مرحله آزمایش، x_{min} کمترین و x_{max} بیشترین مقادیر اندازه‌گیری شده برای هر یک از مشخصه‌های اندازه‌گیری پلیسه هستند.

$$x = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (۲)$$

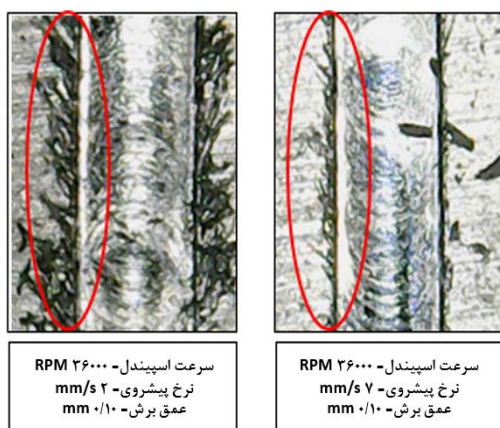
نتایج حاصل از اندازه‌گیری زبری سطح و اندازه پلیسه تشکیل شده برای هر مرحله آزمایش در دو فرزکاری مخالف و موافق در جدول ۳ نشان داده شده است. از این نتایج برای بررسی روند تاثیر پارامترهای ماشینکاری بر اندازه پلیسه و زبری سطح و دستیابی به حالت بهینه به منظور کمینه کردن اندازه پلیسه و افزایش کیفیت سطح استفاده شده است.

جدول (۳) جدول طراحی آزمایش به همراه نتایج

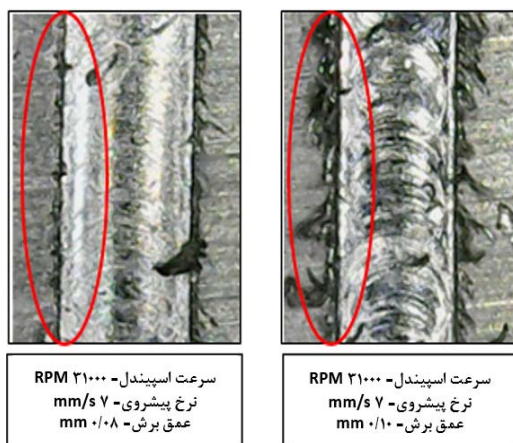
شماره آزمایش	n (RPM)	f (mm/s)	a (mm)	Ra	مخالف	موافق
۱	۳۱۰۰۰	۲	۰/۰۸	۱/۹۵۹	۹/۹۱۸	۷/۰۱۶
۲	۳۶۰۰۰	۲	۰/۰۸	۱/۵۲۶	۸/۲۶۹	۳/۳۱۲
۳	۳۱۰۰۰	۷	۰/۰۸	۱/۱۵۲	۲/۶۵۱	۲/۰۲۷
۴	۳۶۰۰۰	۷	۰/۰۸	۰/۹۹۱	۱/۲۰۴	۱/۱۸۳
۵	۳۱۰۰۰	۲	۰/۱۰	۲/۰۳۲	۹/۰۲۸	۱۰/۰۷۶
۶	۳۶۰۰۰	۲	۰/۱۰	۱/۵۱۵	۸/۹۶۳	۸/۷۷۰
۷	۳۱۰۰۰	۷	۰/۱۰	۱/۳۵۸	۷/۴۸۱	۶/۷۶۱
۸	۳۶۰۰۰	۷	۰/۱۰	۱/۲۸۹	۵/۸۱۴	۶/۴۷۳
۹	۲۸۰۰۰	۵	۰/۰۹	۱/۷۰۴	۹/۲۳۴	۷/۷۶۰
۱۰	۳۹۰۰۰	۵	۰/۰۹	۱/۱۳۸	۵/۹۳۸	۵/۰۷۸
۱۱	۳۳۰۰۰	۱	۰/۰۹	۱/۹۴۷	۹/۳۷۰	۸/۷۷۶
۱۲	۳۳۰۰۰	۱۰	۰/۰۹	۱/۴۶۷	۲/۷۰۴	۱/۶۸۳
۱۳	۳۳۰۰۰	۵	۰/۰۷	۱/۴۲۸	۴/۲۳۸	۲/۴۷۳
۱۴	۳۳۰۰۰	۵	۰/۱۱	۱/۵۹۲	۹/۷۳۳	۸/۳۴۸
۱۵	۳۳۰۰۰	۵	۰/۰۹	۱/۲۵۲	۸/۲۸۴	۶/۲۶۱



شکل ۴) تاثیر سرعت اسپیندل بر اندازه پلیسه فرزکاری مخالف

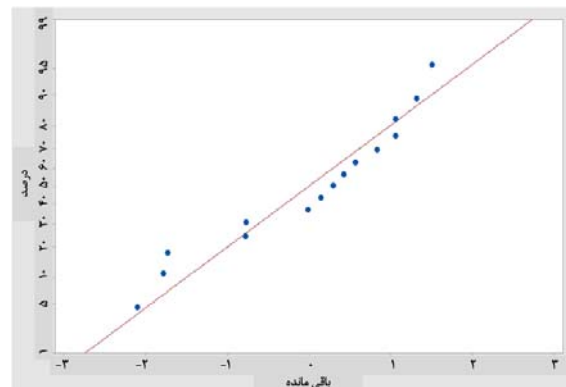


شکل ۵) تاثیر نرخ پیشروی بر اندازه پلیسه فرزکاری مخالف



شکل ۶) تاثیر عمق برش بر اندازه پلیسه فرزکاری مخالف

نمودارهای سطح پاسخ و هم‌تزاری مربوط به تاثیر دوگانه پارامترهای ماشینکاری بر اندازه پلیسه در فرزکاری مخالف به‌ترتیب در نمودارهای ۴ تا ۹ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین اندازه پلیسه مربوط به حالتی است که عمق برش در بیشترین حالت و سرعت اسپیندل در کمترین حالت خود تنظیم شود. انتخاب کمترین مقدار پارامتر عمق برشی باعث کاهش نرخ براده‌برداری و افزایش زمان تولید می‌شود. لذا بایستی تاثیر پارامترهای ماشینکاری بر زمان تولید نیز در نظر گرفته شود.

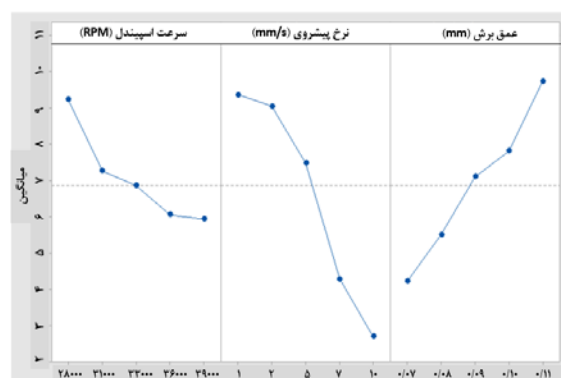


نمودار ۲) توزیع نرمال باقی‌مانده‌ها در مدل توسعه‌یافته اندازه پلیسه در فرزکاری مخالف

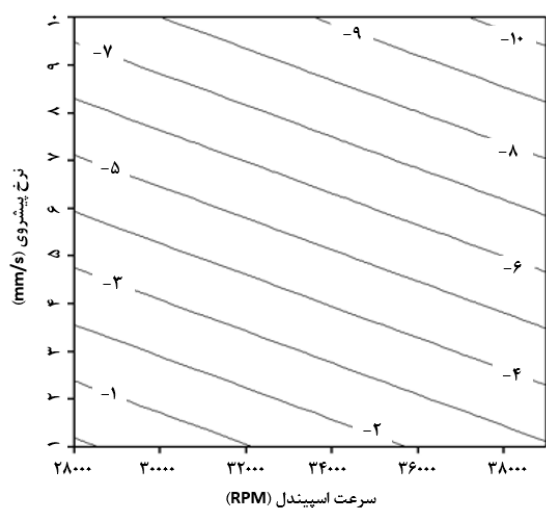
نتایج نشان از پراکندگی مناسب مقادیر باقی‌مانده برای مدل توسعه‌یافته نهایی است. مقادیر باقی‌مانده نسبت به توزیع نرمال نزدیک خط مدل توسعه‌یافته نهایی هستند. رابطه رگرسیونی حاصل از مدل توسعه‌یافته نهایی به‌صورت رابطه ۳ است که در آن g اندازه پلیسه در فرزکاری مخالف است.

$$g = 8.82 + 0.000279 n + 0.843 f + 126.5 a \quad (3)$$

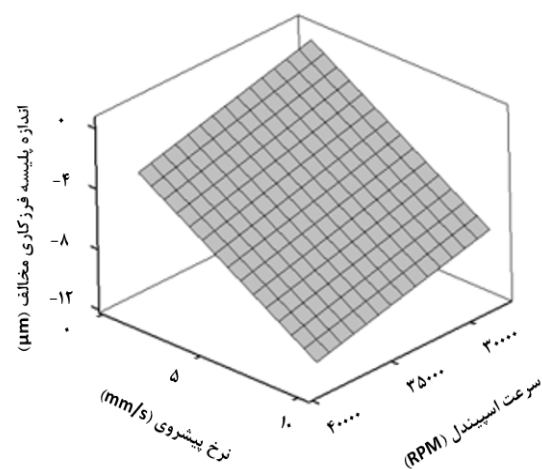
نمودار نحوه تاثیر پارامترهای ماشینکاری بر اندازه پلیسه در فرزکاری مخالف در نمودار ۳ نشان داده شده است. با افزایش سرعت اسپیندل و نرخ پیشروی و همچنین کاهش عمق برشی، ابعاد پلیسه در این ناحیه کاهش می‌یابد. شکل‌های ۴ تا ۶، نمونه‌هایی از عکس‌های گرفته‌شده از سطح بالای شیارهای میکروفزکاری شده هستند که تاثیر پارامترهای ماشینکاری بر اندازه پلیسه در فرزکاری مخالف را نشان می‌دهند. با کاهش سرعت اسپیندل به دلیل کاهش عمق براده‌تراشیده‌شده، اندازه پلیسه افزایش می‌یابد (شکل ۴). کاهش میزان نرخ پیشروی باعث تشدید پدیده شخم و لهیدگی ماده می‌شود که باعث افزایش ابعاد پلیسه‌های تولیدشده خواهد شد (شکل ۵). با افزایش عمق برش، نرخ براده‌برداری در هر پاس دوران ابزار برشی افزایش می‌یابد در نتیجه پلیسه‌های تشکیل‌یافته بر لبه برش نیز بزرگ‌تر خواهند بود (شکل ۶).



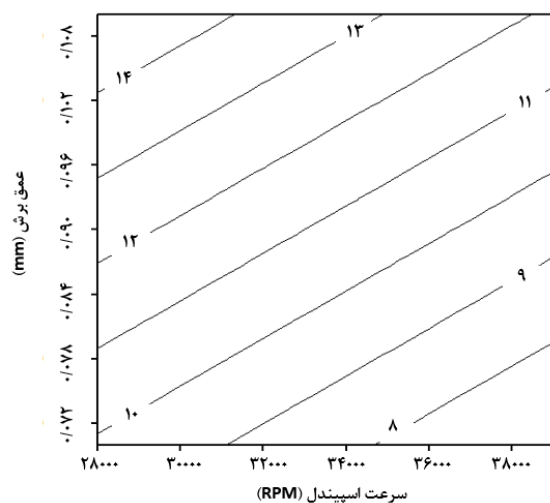
نمودار ۳) نمودار تاثیر پارامترهای ماشینکاری بر اندازه پلیسه در فرزکاری مخالف



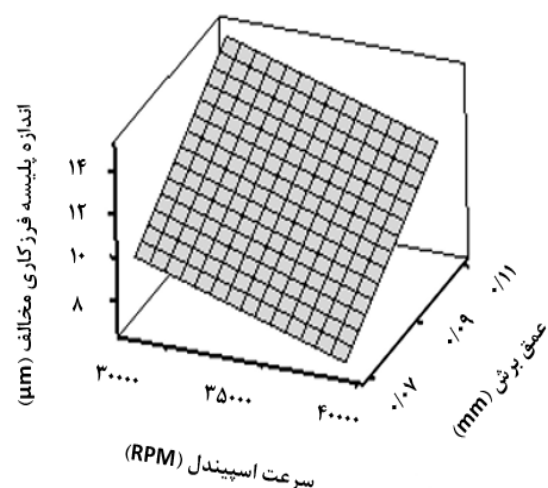
نمودار ۷) هم‌ترازی تأثیر تداخل نرخ پیشروی و سرعت اسپیندل بر اندازه پلیسه فرزکاری مخالف



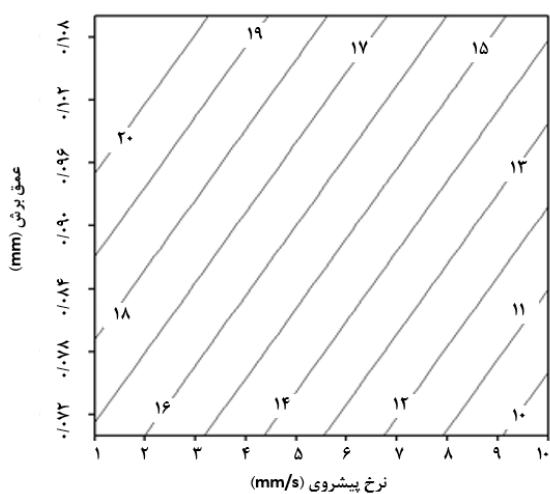
نمودار ۴) سطح پاسخ تأثیر تداخل نرخ پیشروی و سرعت اسپیندل بر اندازه پلیسه فرزکاری مخالف



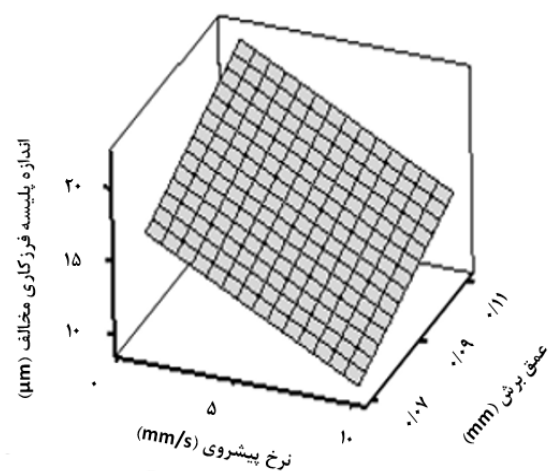
نمودار ۸) هم‌ترازی تأثیر تداخل سرعت اسپیندل و عمق برش بر اندازه پلیسه فرزکاری مخالف



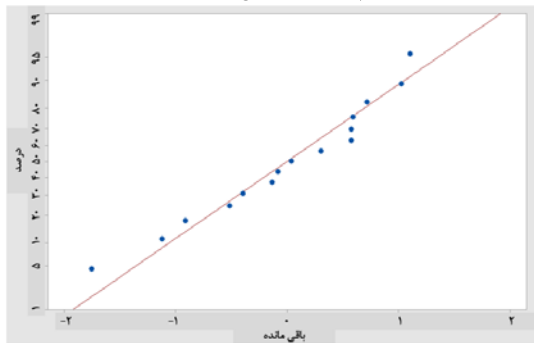
نمودار ۵) سطح پاسخ تأثیر تداخل عمق برش و سرعت اسپیندل بر اندازه پلیسه فرزکاری مخالف



نمودار ۹) هم‌ترازی تأثیر تداخل نرخ پیشروی و عمق برش بر اندازه پلیسه فرزکاری مخالف

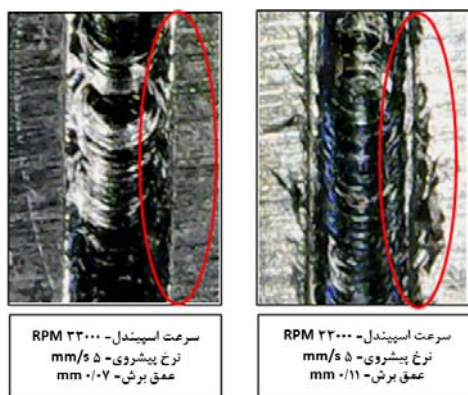


نمودار ۶) سطح پاسخ تأثیر تداخل نرخ پیشروی و عمق برش بر اندازه پلیسه فرزکاری مخالف

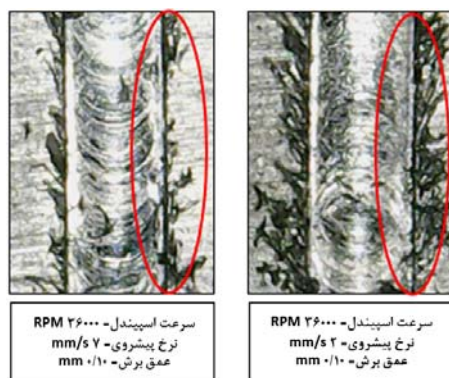


نمودار (۱۱) توزیع نرمال باقی‌مانده‌ها در مدل توسعه‌یافته اندازه پلیسه در فرزکاری موافق

با افزایش عمق برشی، عمق براده نتراشیده‌شده و نرخ براده‌برداری افزایش می‌یابد. در نتیجه در هر بار دوران ابزار برشی، جریان ماده بیشتری به سمت لبه برشی تمایل می‌یابد که نتیجه آن ایجاد پلیسه‌های بزرگ‌تر است (شکل ۷). با کاهش میزان نرخ پیشروی، به دلیل ایجاد و تشدید پدیده شخم، ماده به‌جای برش، لهیده می‌شود. بنابراین با اعمال تنش لهیدگی و ایجاد تغییر شکل پلاستیک در لبه برش، پلیسه‌های بزرگ‌تری ایجاد می‌شود (شکل ۸). سرعت اسپیندل با ۶/۵۶٪، کمترین میزان تاثیر را بر ابعاد پلیسه در فرزکاری موافق دارد. با افزایش سرعت اسپیندل از ۲۸۰۰۰ به ۳۹۰۰۰ RPM، ابعاد پلیسه‌های تولیدشده در فرآیند میکروفزکاری کاهش می‌یابد (شکل ۹).



شکل (۷) تاثیر عمق برش بر اندازه پلیسه فرزکاری موافق



شکل (۸) تاثیر نرخ پیشروی بر اندازه پلیسه فرزکاری موافق

۲-۳- اندازه پلیسه در فرزکاری موافق

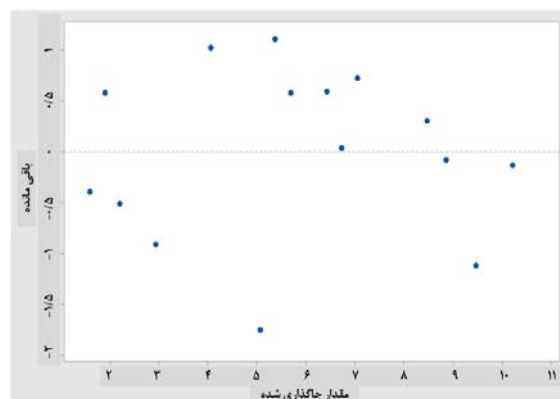
نتایج حاصل از آنالیز واریانس اندازه پلیسه در فرزکاری موافق نشان می‌دهد که همانند قسمت فرزکاری مخالف، پارامترهای خطی سرعت اسپیندل، نرخ پیشروی و عمق برش برای تعیین اندازه پلیسه در این ناحیه دارای معنی هستند. جدول ۵، نتایج آنالیز واریانس و سهم تاثیر پارامترهای ماشینکاری بر اندازه پلیسه در فرزکاری موافق را نشان می‌دهد. پارامترهای تداخلی و توان ۲ که دارای مقدار p بیشتر از ۰/۰۵ بودند (قابلیت اطمینان کمتر از ۹۵٪)، حذف و به‌عنوان پارامتر بی‌معنی در نظر گرفته شده‌اند. نتایج حاصل از تحلیل واریانس مدل اندازه پلیسه در فرزکاری موافق نشان می‌دهد که به‌ترتیب عمق برشی با ۴۷/۹۶٪، نرخ پیشروی با ۳۷/۵۳٪ و سرعت اسپیندل با ۶/۵۶٪ مهم‌ترین پارامترهای تاثیرگذار بر اندازه پلیسه بالایی در فرزکاری موافق هستند.

جدول (۵) تحلیل واریانس مدل اندازه پلیسه در فرزکاری موافق

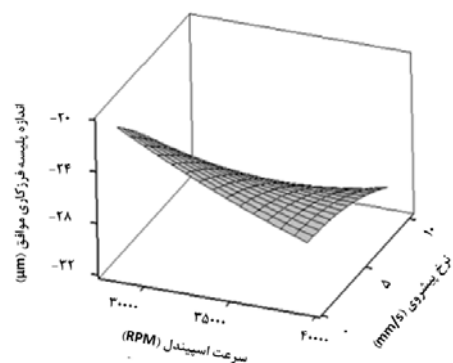
عامل	درجه آزادی	مجموع مربعات	مقدار F	مقدار P	سهم تاثیر (%)
مدل	۳	۱۱۰/۰۶۴	۴۲/۴۲	۰/۰۰۰	
n	۱	۷/۸۴۰	۹/۵۰	۰/۰۱۰	۶/۵۶
F	۱	۴۴/۸۷۴	۵۱/۸۸	۰/۰۰۰	۳۷/۵۳
a	۱	۵۷/۳۵۰	۶۶/۳۰	۰/۰۰۰	۴۷/۹۶
خطا	۱۱	۹/۵۱۴	-	-	۷/۹۶
کل	۱۴	۱۱۹/۵۷۸	-	-	۱۰۰/۰۰

نمودارهای ۱۰ و ۱۱ به‌ترتیب نمودارهای پراکندگی و توزیع نرمال مقادیر باقی‌مانده برای مدل پیشنهادشده را نشان می‌دهند. مدل توسعه‌یافته نهایی دارای پراکندگی مناسبی نسبت به مقادیر پیش‌بینی‌شده بوده و دارای توزیع نرمالی است. رابطه ۴، معادله رگرسیونی حاصل از مدل توسعه‌یافته برای اندازه پلیسه در فرزکاری موافق را نشان می‌دهد. اندازه پلیسه در فرزکاری موافق با q نشان داده شده است.

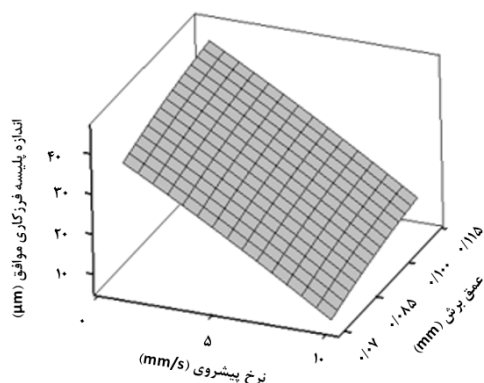
$$q = 1.09 + 0.000272 n + 0.6969 f + 189.3 a \quad (۴)$$



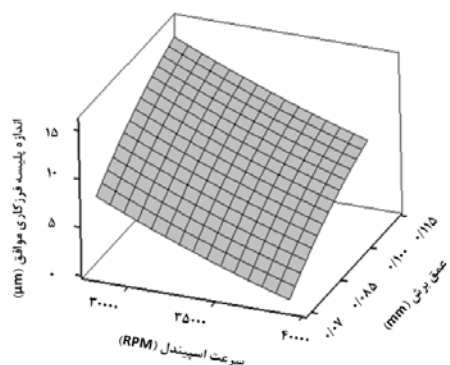
نمودار (۱۰) پراکندگی باقی‌مانده‌ها در مدل توسعه‌یافته اندازه پلیسه در فرزکاری موافق



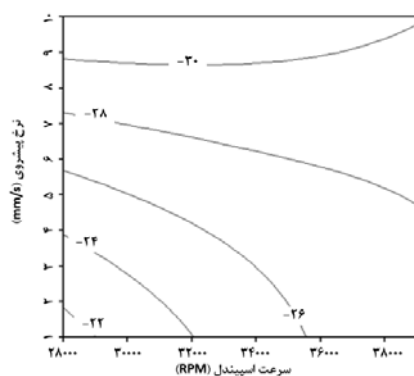
نمودار ۱۳) سطح پاسخ تاثیر تداخل نرخ پیشروی و سرعت اسپیندل بر اندازه پلیسه فرزکاری موافق



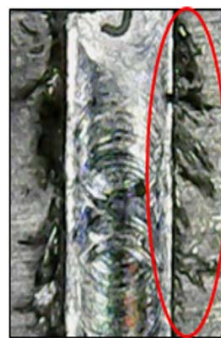
نمودار ۱۴) سطح پاسخ تاثیر تداخل نرخ پیشروی و عمق برش بر اندازه پلیسه فرزکاری موافق



نمودار ۱۵) سطح پاسخ تاثیر تداخل عمق برش و سرعت اسپیندل بر اندازه پلیسه فرزکاری موافق



نمودار ۱۶) هم‌ترازی تاثیر تداخل نرخ پیشروی و سرعت اسپیندل بر اندازه پلیسه فرزکاری موافق



سرعت اسپیندل = ۲۸۰۰۰ RPM
نرخ پیشروی = ۵ mm/s
عمق برش = ۰.۰۹ mm

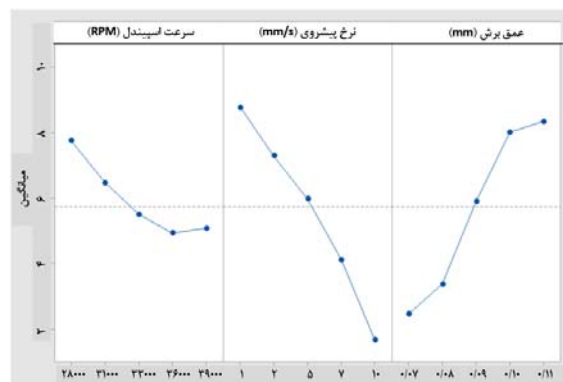


سرعت اسپیندل = ۲۹۰۰۰ RPM
نرخ پیشروی = ۵ mm/s
عمق برش = ۰.۰۹ mm

شکل ۹) تاثیر سرعت اسپیندل بر روی اندازه پلیسه فرزکاری موافق

نمودار تاثیر پارامترهای ماشینکاری بر ابعاد پلیسه در فرزکاری موافق در نمودار ۱۲ نشان داده شده است. عمق برشی و نرخ پیشروی، مهم‌ترین پارامترهای تاثیرگذار بر ابعاد پلیسه در فرزکاری موافق هستند. نمودارهای سطح پاسخ در نمودارهای ۱۳ تا ۱۵ و نمودارهای هم‌ترازی مربوط به تاثیر تداخل دوگانه پارامترهای ماشینکاری بر ابعاد پلیسه‌های فرزکاری موافق در نمودارهای ۱۶ تا ۱۸ نشان داده شده است. با توجه به نمودارهای مذکور می‌توان دریافت که انتخاب بیشترین مقدار سرعت اسپیندل و نرخ پیشروی و همچنین کمترین مقدار پارامتر عمق برشی، با توجه به جدول طراحی آزمایش و محدوده تغییر پارامترهای ورودی آزمایش، باعث کاهش ابعاد پلیسه‌های تولیدشده در این ناحیه خواهد شد.

بایستی تاثیر پارامترهای ماشینکاری بر سایر عوامل و پدیده‌های مهم در میکروفرزکاری مانند دمای بالای ماشینکاری، سایش ابزار، شکست ناگهانی ابزار، نیروی بالای ماشینکاری و دقت ابعادی و کیفیت سطح در نظر گرفته شود. انتخاب پارامترهای ماشینکاری در فرآیند میکروفرزکاری بایستی به گونه‌ای باشد که مشکلات ناشی از کاهش مقیاس ماشینکاری، کمترین میزان تاثیرگذاری را بر دقت و کیفیت سطح میکروقطعات تولیدشده توسط این روش داشته باشد.



نمودار ۱۷) نمودار تاثیر پارامترهای ماشینکاری بر اندازه پلیسه در فرزکاری موافق

جدول ۶) تحلیل واریانس مدل زبری سطح

عامل	درجه آزادی	مجموع مربعات	مقدار F	مقدار P	سهم تاثیر (%)
مدل	۷	۱/۳۴۱۸۲	۲۹/۹۰	۰/۰۰۰	
n	۱	۰/۳۴۳۱۶	۱۰/۶۰	۰/۰۱۴	۲۷/۷۴
f	۱	۰/۶۱۷۷۱	۲۷/۰۸	۰/۰۰۱	۴۴/۵۵
a	۱	۰/۰۴۹۹۵	۱۰/۰۴	۰/۰۱۶	۳/۶۰
n×n	۱	۰/۰۱۱۷۰	۷/۲۲	۰/۰۳۱	۰/۸۴
f×f	۱	۰/۱۹۰۷۵	۴۱/۹۱	۰/۰۰۰	۱۳/۷۶
a×a	۱	۰/۰۶۵۲۴	۱۰/۹۵	۰/۰۱۳	۴/۷۰
n×f	۱	۰/۰۶۳۳۱	۹/۸۸	۰/۰۱۶	۴/۵۷
خطا	۷	۰/۰۴۴۸۷	-	-	۳/۲۴
کل	۱۴	۱/۳۸۶۶۹	-	-	۱۰۰/۰۰

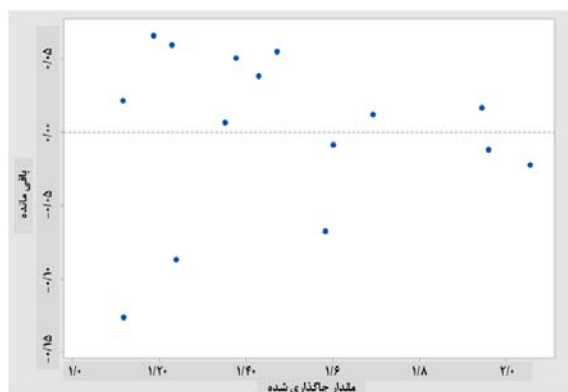
رابطه رگرسیونی حاصل از مدل توسعه یافته نهایی به صورت رابطه ۵ است که در آن میزان زبری سطح متوسط را نشان می دهد.

$$Ra = 21.08 + 0.000668 n + 0.816 f + 130.7 a + 130.7 f^2 + 130.7 a^2 + 130.7 nf \quad (5)$$

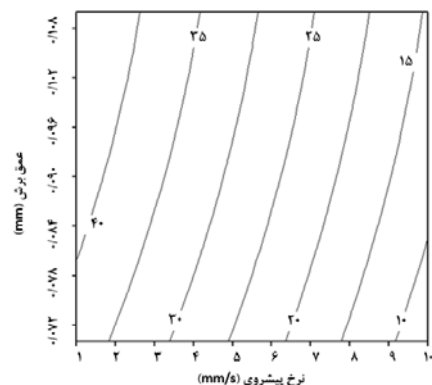
در رابطه ۵، n سرعت دورانی اسپیندل بر حسب RPM، f میزان نرخ پیشروی میکروابزار بر حسب mm/s و a عمق برشی بر حسب mm است.

با توجه به اینکه میزان R-sq مدل توسعه یافته برابر ۹۶/۷۶٪ است، لذا می توان گفت که مدل مذکور دارای پوشش مناسب و نسبتاً کامل از زبری سطح متوسط برای مقادیر متفاوتی از پارامترهای ماشینکاری است. نمودار مربوط به پراکندگی و توزیع نرمال مقادیر باقی مانده برای مدل توسعه یافته نهایی در نمودارهای ۱۹ و ۲۰ نشان داده شده است. مقادیر باقی مانده نسبت به توزیع نرمال نزدیک به خط مدل پیشنهاد شده هستند.

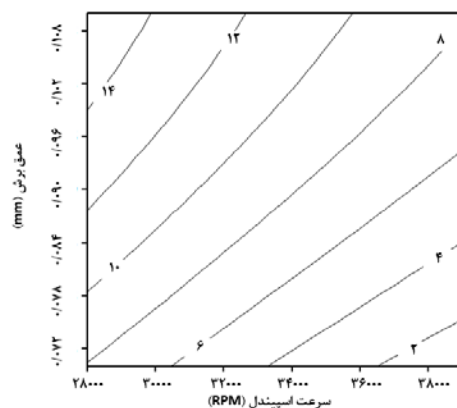
نمودار تاثیر پارامترهای ماشینکاری بر زبری سطح متوسط در نمودار ۲۱ نشان داده شده است. از بین پارامترهای مورد مطالعه، نرخ پیشروی با ۴۴/۵۵٪ تاثیر بر زبری سطح، مهم ترین پارامتر تاثیرگذار بر کیفیت سطح در میکروفرزکاری است که دارای تاثیر دوگانه و متفاوت بر زبری سطح است.



نمودار ۱۹) پراکندگی باقی مانده ها در مدل توسعه یافته زبری سطح



نمودار ۱۷) هم ترازی تاثیر تداخل نرخ پیشروی و عمق برش بر اندازه پلیسه فرزکاری موافق

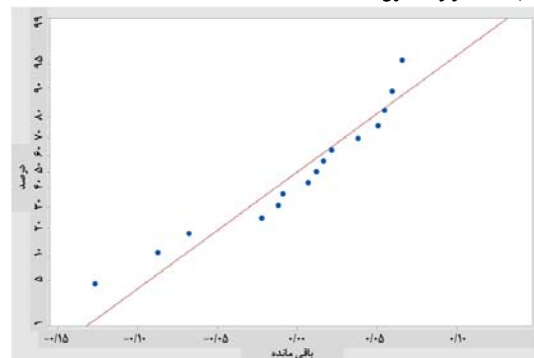


نمودار ۱۸) هم ترازی تاثیر تداخل عمق برش و سرعت اسپیندل بر اندازه پلیسه فرزکاری موافق

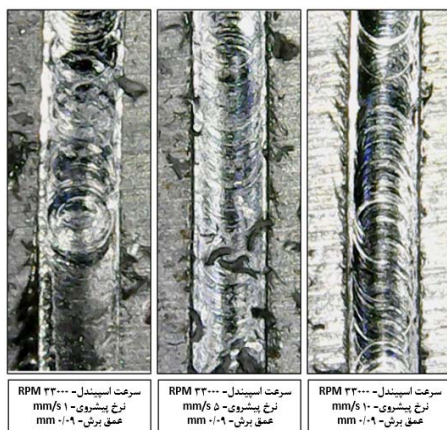
۳-۳- زبری سطح

زبری سطح متوسط، یکی از مهم ترین معیارهای تعیین کیفیت سطح است. کیفیت سطح در مقیاس میکرو دارای اهمیتی به مراتب بالاتر از مقیاس ماکرو است. بعد از انجام آزمایش های تجربی، میزان زبری سطح در هر یک از میکروشیارها در ۶ نقطه متفاوت و هر یک با طول ۱/۷۵ میلی متر اندازه گیری شد و میانگین نتایج حاصل ثبت شد و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج حاصل از آنالیز واریانس زبری سطح متوسط در جدول ۶ نشان داده شده است. با توجه به جدول آنالیز واریانس می توان دریافت که تمامی پارامترهای خطی، توان دوم پارامترهای ماشینکاری و همچنین تداخل دو پارامتر نرخ پیشروی و سرعت اسپیندل در تعیین میزان زبری سطح میکروفرزکاری شده تاثیرگذار و معنی دار هستند (تاثیر توان دوم سرعت ماشینکاری بسیار ناچیز است). آخرین ستون از جدول آنالیز واریانس مربوط به سهم تاثیر هر یک از پارامترهای معنی دار بر میزان زبری سطح میکروشیار ماشینکاری شده است. از بین پارامترهای خطی، نرخ پیشروی با ۴۴/۵۵٪، سرعت اسپیندل با ۲۷/۷۴٪ و عمق برشی با ۳/۶٪ به ترتیب مهم ترین پارامترهای تاثیرگذار بر زبری سطح هستند. توان دوم نرخ پیشروی با ۱۳/۷۶٪ از دیگر پارامترهای تاثیرگذار بر زبری سطح متوسط است.

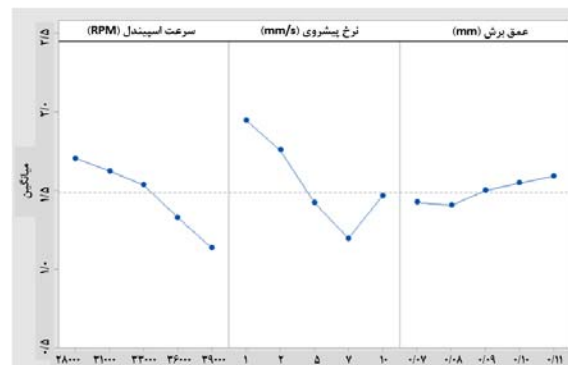
باعث افزایش زبری سطح و در نتیجه کاهش کیفیت سطح می‌شود. تاثیر پارامتر عمق برشی بر زبری سطح ناچیز و کمتر از دیگر پارامترهای ماشینکاری است (شکل ۱۱). شکل ۱۲ تاثیر پارامتر سرعت اسپیندل بر زبری سطح را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۲ می‌توان دریافت که با افزایش سرعت اسپیندل، مکانیزم برش از برشکاری معمول به برشکاری با سرعت بالا تغییر یافته و به دلیل کاهش ضخامت براده تغییر شکل نیافته، زبری سطح کاهش می‌یابد [16].



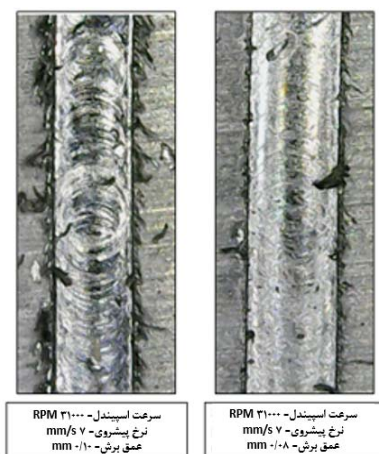
نمودار ۲۰) توزیع نرمال باقی‌مانده‌ها در مدل توسعه‌یافته زبری سطح



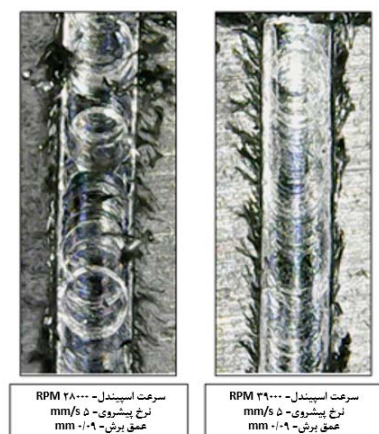
شکل ۱۰) تاثیر نرخ پیشروی بر زبری سطح



نمودار ۲۱) نمودار تاثیر پارامترهای ماشینکاری بر زبری سطح

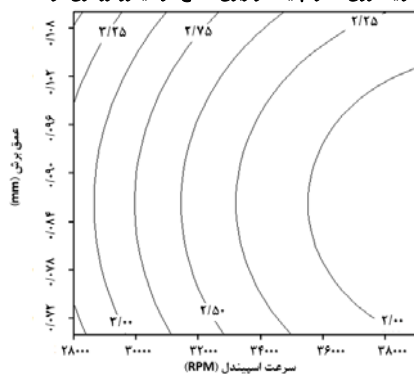


شکل ۱۱) تاثیر عمق برش بر زبری سطح

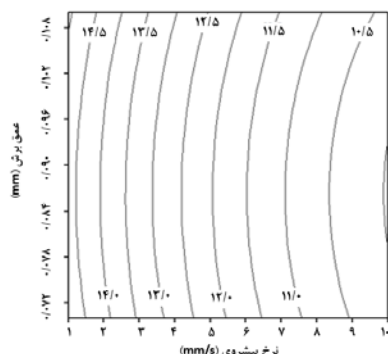


شکل ۱۲) تاثیر سرعت اسپیندل بر زبری سطح

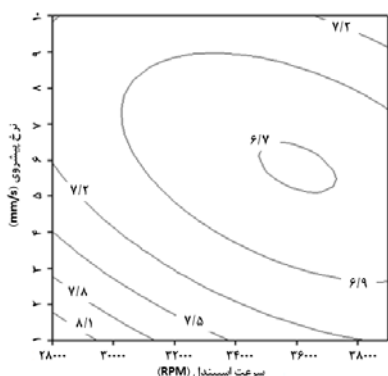
با توجه به روند تغییرات زبری با نرخ پیشروی، نمودار تاثیر نرخ پیشروی بر زبری سطح را به سه ناحیه مجزا تقسیم‌بندی می‌کنند: در ناحیه اول (ناحیه میکرو)، با افزایش نرخ پیشروی زبری سطح میانگین کاهش می‌یابد. آرامجارون و ماتیونگا [26] در میکروفزکاری آلیاژ فولادی به این نتیجه رسیدند که در پیشروی‌های کمتر از شعاع لبه برنده، زبری سطح به دلیل افزایش اثر شخم، با کاهش مقدار پیشروی افزایش می‌یابد. در ناحیه دوم (ناحیه گذار) زبری سطح در کمترین میزان خود تقریباً به صورت ثابت باقی می‌ماند. در ناحیه سوم (ناحیه ماکرو) نیز زبری سطح میانگین با افزایش نرخ پیشروی افزایش می‌یابد. با حذف اثرات شخم‌زنی و جایگزینی آن با اثر حرکتی ابزار، سطحی یکنواخت‌تری در این ناحیه قابل مشاهده است [25]. بالاترین کیفیت سطح مربوط به انتخاب نرخ پیشروی نزدیک به محدوده اندازه‌گیری شده برای شعاع لبه برنده ابزار است. شکل‌های ۱۰ تا ۱۲، تصاویر شیارهای میکروفزکاری شده تحت شرایط خاص و نحوه تغییر زبری سطح با تغییر نرخ پیشروی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۰، می‌توان دریافت که با انتخاب نرخ پیشروی برابر با ۱ mm/s به دلیل تشدید بیش از حد پدیده لهیدگی و اثر شخم، میزان زبری سطح افزایش می‌یابد. با انتخاب نرخ پیشروی ۱۰ mm/s نیز به دلیل ایجاد خطوط مربوط به نرخ پیشروی ابزار بر قطعه‌کار، کیفیت سطح کاهش می‌یابد. از بین آزمایش‌های انجام‌شده، بهترین کیفیت سطح مربوط به انتخاب میزان نرخ پیشروی ۵ mm/s است. می‌توان نتیجه گرفت که با انتخاب میزان نرخ پیشروی نزدیک به شعاع لبه برنده میکروابزار بهترین کیفیت سطح به‌دست می‌آید [25]. افزایش عمق برش نیز



نمودار (۲۵) هم‌ترازی تأثیر تداخل عمق برش و سرعت اسپیندل بر زبری سطح



نمودار (۲۶) هم‌ترازی تأثیر تداخل عمق برش و نرخ پیشروی بر زبری سطح



نمودار (۲۷) هم‌ترازی تأثیر تداخل نرخ پیشروی و سرعت اسپیندل بر زبری سطح

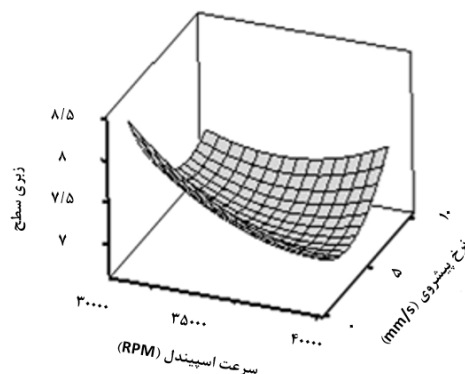
جدول (۷) پارامترهای بهینه برای کمینه‌کردن زبری سطح

n (RPM)	f (mm/s)	a (mm)	Ra
۳۶۰۰۰	۵/۷	۰/۰۸۶	۱/۰۵

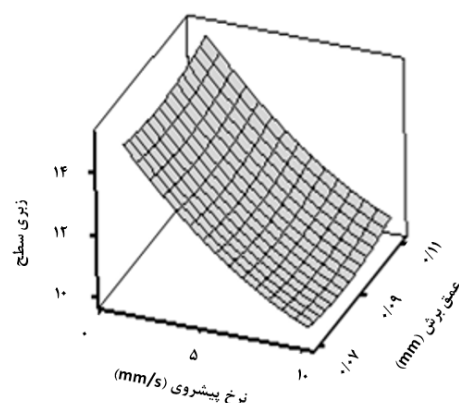
۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تأثیر پارامترهای ماشینکاری از جمله سرعت اسپیندل، نرخ پیشروی و عمق برش بر کیفیت سطح و ابعاد پلیسه تشکیل‌شده در فرآیند میکروفزکاری فولاد AISI 1045 توسط ابزاری به قطر ۸ میلی‌متر بررسی شده است. مهم‌ترین پارامتر تأثیرگذار بر اندازه پلیسه‌های تشکیل‌شده در هر دو فرزکاری مخالف و موافق به روش رویه پاسخ تعیین شده و مورد تحلیل قرار گرفته است. در این بخش به بیان خلاصه‌ای از نتایج به‌دست آمده از انجام آزمایش‌های تجربی پرداخته شده است.

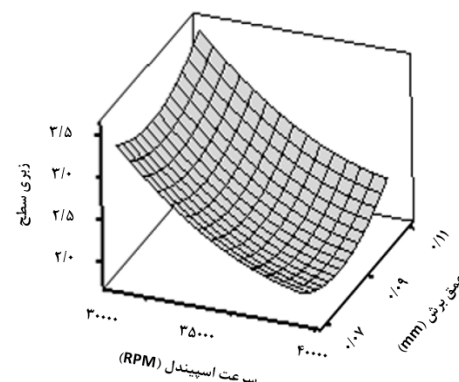
نمودارهای ۲۲ تا ۲۴، نمودارهای مربوط به رویه پاسخ تأثیر تداخل دوگانه پارامترهای ماشینکاری بر زبری سطح و نمودارهای ۲۵ تا ۲۷ مربوط به نمودارهای هم‌ترازی هستند. با توجه به نمودار ۲۷ می‌توان دریافت که با انتخاب نرخ پیشروی 6 mm/s که در محدوده نزدیک به شعاع لبه برنده ابزار است، می‌توان زبری سطح میکروفزکاری‌شده را تا حد بسیار زیادی کاهش داد. نتایج حاصل از آنالیز واریانس در جدول ۷ نشان می‌دهد که با انتخاب سرعت اسپیندل 36000 RPM ، نرخ پیشروی $5/7 \text{ mm/s}$ و عمق برش $0/086 \text{ mm}$ میزان زبری سطح کمینه شده و سطحی با بهترین کیفیت به‌دست خواهد آمد.



نمودار (۲۲) سطح پاسخ تأثیر تداخل نرخ پیشروی و سرعت اسپیندل بر زبری سطح



نمودار (۲۳) سطح پاسخ تأثیر تداخل نرخ پیشروی و عمق برش بر زبری سطح



نمودار (۲۴) سطح پاسخ تأثیر تداخل عمق برش و سرعت اسپیندل بر زبری سطح

micro milling with supporting material method. *Procedia Manufacturing*. 2015;1:501-511.

8- Jeong YH, HanYoo B, Lee HU, Min BK, Cho DW, Lee SJ. Deburring microfeatures using micro-EDM. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009;209(14):5399-5406.

9- Lee K, Dornfeld DA. Micro-burr formation and minimization through process control. *Precision Engineering*. 2005;29(2):246-252.

10- Chern GL, Wu YJ, Cheng JC, Yao JC. Study on burr formation in micro-machining using micro-tools fabricated by micro-EDM. *Precision Engineering*. 2007;31(2):122-129.

11- Lee K, Stirn B, Dornfeld DA. Burr formation in micro-machining aluminum, 6061-T6. In: Inasaki I, editor. *Initiatives of precision engineering at the beginning of a millennium*. Boston: Springer; 2002. pp. 47-51.

12- Weinert K, Petzoldt V. Machining NiTi micro-parts by micro-milling. *Materials Science and Engineering: A*. 2008;481-482:672-675.

13- Ali Mohammad Y, Omar MA, Othman KI, Hung WN. Prediction of burr formation in fabricating MEMS components by micro end milling. *Advanced Materials Research*. 2009;74:247-250.

14- Lekkala R, Bajpai V, Singh RK, Joshi SS. Characterization and modeling of burr formation in micro-end milling. *Precision Engineering*. 2011;35(4):625-637.

15- Thepsonthi T, Özel T. Multi-objective process optimization for micro-end milling of Ti-6Al-4V titanium alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2012;63(9-12):903-914.

16- Bajpai V, Kushwaha AK, Singh RK. Burr formation and surface quality in high speed micromilling of titanium alloy (Ti6Al4V). *Proceedings of the ASME 2013 International Manufacturing Science and Engineering Conference, (MSEC 2013), 10-14 June 2013, Madison, Wisconsin, USA*. New York: American Society of Mechanical Engineers; 2013.

17- Piquard R, D'Acunto A, Laheurte P, Dudzinski D. Micro-end milling of NiTi biomedical alloys, burr formation and phase transformation. *Precision Engineering*. 2014;38(2):356-364.

18- Pratap T, Patra K. Experimental investigation on the effects of process variables in micro-end milling of Ti-6Al-4V titanium alloy. *International Conference on Precision, Meso, Micro and Nano Engineering (COPEN9-2015)*, December 2015, Mumbai, India. Unknown Publisher; 2015.

19- Wu X, Li L, He N. Investigation on the burr formation mechanism in micro cutting. *Precision Engineering*. 2017;47:191-196.

20- Kumar P, Bajpai V, Singh R. Burr height prediction of Ti6Al4V in high speed micro-milling by mathematical modeling. *Manufacturing Letters*. 2017;11:12-16.

21- Yadav AK, Kumar M, Bajpai V, Singh NK, Singh RK. FE modeling of burr size in high-speed micro-milling of Ti6Al4V. *Precision Engineering*. 2017;49:287-292.

22- Vipindas K, Kuriachen B, Mathew J. Investigations into the effect of process parameters on surface roughness and burr formation during micro end milling of Ti-6Al-4V. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019;100(5-8):1207-1222.

23- Ziberov M, Da Silva MB, Jackson M, Hung WN. Effect of cutting fluid on micromilling of Ti-6Al-4V titanium alloy. *Procedia Manufacturing*. 2016;5:332-347.

۱- تاثیر سرعت اسپیندل بر اندازه پلیسه تولیدشده بر اثر میکروفرزکاری فولاد AISI 1045 بسیار ناچیز است.

۲- پارامتر نرخ پیشروی با ۵۵/۲۶٪ تاثیر، مهم‌ترین پارامتر تاثیرگذار بر اندازه پلیسه‌های فرزکاری مخالف است که با افزایش آن ابعاد پلیسه‌ها به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابند.

۳- عمق برش با ۴۷/۹۶٪ و نرخ پیشروی با ۳۷/۵۳٪ سهم تاثیر، مهم‌ترین پارامترهای تاثیرگذار بر اندازه پلیسه در فرزکاری موافق هستند.

۴- کمترین اندازه پلیسه در هر دو فرزکاری مخالف و موافق مربوط به حالتی است که سرعت اسپیندل و نرخ پیشروی در بیشترین حالت و پارامتر عمق برشی در کمترین حالت، با توجه به جدول طراحی آزمایش و محدوده تغییر پارامترهای ورودی انتخاب شود.

۵- پارامتر نرخ پیشروی با ۴۴/۵۵٪ سهم تاثیر، مهم‌ترین پارامتر در تعیین زبری سطح شیارهای میکروفرزکاری شده است.

۶- نرخ پیشروی، مهم‌ترین پارامتر فرایند میکروفرزکاری فولاد AISI 1045 است.

۷- ابعاد پلیسه‌های تشکیل‌شده در فرزکاری مخالف، بزرگ‌تر از پلیسه‌های فرزکاری موافق است.

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشد.

تأییدیه اخلاقی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشد.

تعارض منافع: موردی توسط نویسندگان گزارش نشد.

سهم نویسندگان: موردی توسط نویسندگان گزارش نشد.

منابع مالی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشد.

منابع

1- Leo Kumar SP, Jerald J, Kumanan S, Prabakaran R. A review on current research aspects in tool-based micromachining processes. *Materials and Manufacturing Processes*. 2014;29(11-12):1291-1337.

2- Jang KI, Kim DY, Maeng S, Lee W, Han J, Seok J, et al. Deburring microparts using a magnetorheological fluid. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2012;53(1):170-175.

3- Aurich JC, Dornfeld D, Arrazola PJ, Franke V, Leitz L, Min S. Burrs-Analysis, control and removal. *CIRP Annals*. 2009;58(2):519-542.

4- Mathai GK, Melkote SN, Rosen D. Effect of machining parameters on burr size of micromilled foils. *Proceedings of the 7th International Conference on MicroManufacturing*, 2012 March 11-14, Illinois, USA. Illinois: Department of Mechanical Engineering, Northwestern University; 2012.

5- Biermann D, Steiner M. Analysis of micro burr formation in austenitic stainless steel X5CrNi18-10. *Procedia CIRP*. 2012;3:97-102.

6- Lee K, Dornfeld DA. An experimental study on burr formation in micro milling aluminium and copper [Report]. Dearborn: Society of Manufacturing Engineers; 2002. Contract NO.: MR02-202.

7- Kou Z, Wan Y, Cai Y, Liang X, Liu Z. Burr controlling in

[Dissertation]. Tehran: Tarbiat Modares University; 2017. [Persian]

26- Aramcharoen A, Mativenga PT. Size effect and tool geometry in micromilling of tool steel. Precision Engineering. 2009;33(4):402-407.

24- Kouravand Sh, Moutakef Imani B. 2D modeling of surface roughness in micromilling. MAJLESI. 2010;3(3):47-54. [Persian]

25- Rezaei H. Study of heat distribution and surface quality in micromilling of Titanium alloy Ti6Al4V