



Effect of Novel Finishing Strategies on the Machinability and Geometrical Tolerances of Free-Form Curved Surfaces

Farzad Pashmforoush^{ID}

Associate Professor, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran

HIGHLIGHTS

- Free-form components were manufactured using innovative machining strategies.
- The choice of the proper strategy depends on the component's application and the importance level of quality, accuracy, and speed criterion.
- The results indicate an improvement of 19%-76% in the performance of modern strategies compared to traditional ones.

ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 28 October 2024

Received in revised form: 17 December 2024

Accepted: 28 December 2024

Available online: 31 December 2024

*Correspondence:

f.pashmforoush@maragheh.ac.ir

How to cite this article:

F. Pashmforoush. Effect of novel finishing strategies on the machinability and geometrical tolerances of free-form curved surfaces. *Journal of Aerospace Mechanics*. 2025; 21(1):61-74.

Keywords:

Machining strategies

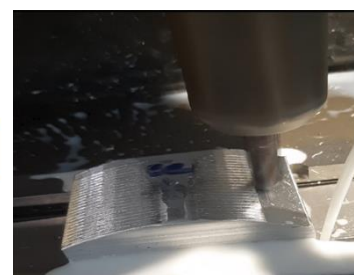
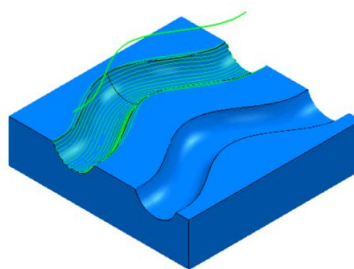
CAD/CAM

Curved free-form specimens

Geometrical tolerances

Surface roughness

GRAPHICAL ABSTRACT



ABSTRACT

Achieving high surface quality, dimensional accuracy, and productivity in free-form and complex 3D geometries is crucial, especially in industries such as aerospace and medicine. This study investigates the effects of three modern finishing strategies—spiral, curve machining, and steep and shallow—on surface roughness, form error (as a geometric tolerance), and material removal rate. Simulations were performed using PowerMILL software, and experimental tests were conducted on a CNC milling machine. The results showed that the steep and shallow strategy delivered the best performance in terms of surface quality and geometric accuracy, achieving a surface roughness of $0.077\mu\text{m}$ and a form error of 0.0184mm , with improvements of 27.49% and 76.86%, respectively, compared to other strategies. Conversely, the spiral strategy exhibited the highest productivity, with a material removal rate of 0.1325gr/s and a machining time of 30 minutes, demonstrating a 19.8% improvement in material removal rate compared to the lowest-performing strategy. These findings emphasize the importance of selecting a finishing strategy that balances surface quality, geometric accuracy, and process productivity to meet the specific requirements of each workpiece.



تأثیر استراتژی‌های نوین پرداخت کاری بر قابلیت ماشین کاری و تلورانس‌های هندسی سطوح انحنادار با فرم آزاد

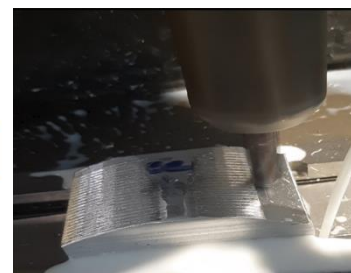
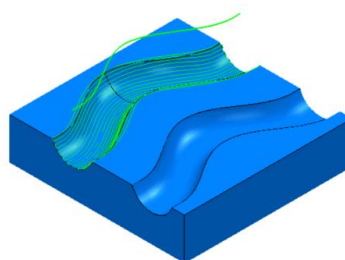
فرزاد پشم‌فروش^{ID}

دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

چکیده گرافیکی

برجسته‌ها

- قطعات انحنادار با فرم آزاد توسط استراتژی‌های نوین ماشین کاری ساخته شدند.
- انتخاب استراتژی مناسب باید متناسب با نیازها و کاربردهای خاص هر قطعه کار انتخاب شود.
- نتایج بیانگر بهبود ۱۹٪-۷۶٪ در عملکرد استراتژی‌های نوین نسبت به استراتژی‌های سنتی می‌باشد.



مشخصات مقاله

چکیده

تاریخچه مقاله:
نوع مقاله: علمی پژوهشی
دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۰۷
بازنگری: ۱۴۰۳/۰۹/۲۷
پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۰۸
ارائه برخط: ۱۴۰۳/۱۰/۱۱
*نویسنده مسئول:

f.pashmforoush@maragheh.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

استراتژی‌های ماشین کاری
طراحی و ساخت به کمک کامپیوتر
قطعات انحنادار با فرم آزاد
تلورانس‌های هندسی
صافی سطح

دستیابی به کیفیت سطح بالا، دقت ابعادی، و بهره‌وری در قطعات با فرم آزاد و هندسه‌های پیچیده سه بعدی، به‌ویژه در صنایعی مانند هوافضا و پزشکی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این پژوهش، تأثیر سه استراتژی نوین پرداخت کاری شامل اسپیرال، تصویرسازی منحنی، و پرداخت شیب‌های تند و ملایم بر زبری سطح، خطای فرم (به‌عنوان تلورانس هندسی)، و نرخ براده‌برداری بررسی شد. شبیه‌سازی‌ها توسط نرم‌افزار پاورمیل و آزمایش‌های تجربی با استفاده از دستگاه فرز CNC انجام شدند. نتایج نشان داد که استراتژی پرداخت شیب‌های تند و ملایم با ارائه زبری سطح $0.077 \mu m$ و خطای فرم $0.184 mm$ به ترتیب با بهبود $27/49\%$ و $76/86\%$ نسبت به سایر استراتژی‌ها، بهترین عملکرد را از منظر کیفیت سطح و دقت هندسی ارائه داده است. در مقابل، استراتژی اسپیرال با نرخ براده‌برداری $1325 gr/s$ و زمان ماشین کاری ۳۰ دقیقه، بالاترین بهره‌وری را نشان داد و نرخ براده‌برداری آن نسبت به کمترین مقدار، به میزان $19/8\%$ بهبود یافت. این نتایج تأکید می‌کنند که انتخاب استراتژی پرداخت کاری باید بر اساس تعادل میان کیفیت سطح، دقت هندسی، و بهره‌وری فرآیند، متناسب با نیازهای کاربردی هر قطعه کار صورت گیرد.



۱- مقدمه

در دنیای پیشرفته امروزی، تولید قطعات پیچیده و دارای سطوح انحادار با فرم آزاد به یکی از چالش‌های اساسی در ساخت و تولید تبدیل شده است. این چالش به‌ویژه در صنایعی مانند هوافضا، خودروسازی و پزشکی که نیازمند دقت ابعادی بسیار بالا و کیفیت سطح بی‌نقص هستند، بیش‌ازپیش مشهود است [۱ و ۲]. در این صنایع، هرگونه نقص در کیفیت سطح یا انحراف ابعادی می‌تواند به کاهش کارایی محصول نهایی، افزایش هزینه‌های تولید، و حتی به وقوع مسائل ایمنی جدی منجر شود. پرداخت کاری به‌عنوان یکی از مراحل نهایی فرآیند ماشین‌کاری، نقش تعیین‌کننده‌ای در دستیابی به این اهداف دارد [۳ و ۴]. این مرحله نه تنها به بهبود زبری سطح و دقت ابعادی کمک می‌کند، بلکه به‌طور مستقیم بر نرخ براده‌برداری، طول عمر ابزار، و زمان کل تولید تأثیر می‌گذارد. از این رو، انتخاب استراتژی مناسب برای پرداخت کاری می‌تواند تأثیر شگرفی بر کیفیت نهایی قطعه و بهره‌وری کلی فرآیند تولید داشته باشد [۵]. یکی از نکات مهم در پرداخت کاری این است که هر قطعه با توجه به جنس مواد، شکل هندسی، و کاربرد نهایی آن نیازمند استراتژی خاص خود است. برای مثال، در فرآیندهای ماشین‌کاری قطعات هوافضا، که معمولاً از آلیاژهای مقاوم و سبک استفاده می‌شود، انتخاب نادرست استراتژی پرداخت کاری ممکن است باعث افزایش زبری سطح، کاهش دقت ابعادی، و حتی ایجاد آسیب‌های غیرقابل جبران در قطعه شود. این موضوع نه تنها کیفیت محصول را تحت تأثیر قرار می‌دهد، بلکه می‌تواند هزینه‌های تولید را به‌طور چشم‌گیری افزایش دهد [۶]. به همین دلیل، بررسی دقیق و علمی استراتژی‌های مختلف پرداخت کاری و انتخاب مناسب‌ترین روش، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. پژوهش‌های مختلف نشان داده‌اند که استفاده از استراتژی‌های مناسب می‌تواند زبری سطح را به حداقل رسانده، دقت ابعادی را افزایش داده، و در نهایت هزینه‌های تولید را کاهش دهد. در نتیجه، انتخاب استراتژی پرداخت کاری نه تنها به بهبود کیفیت محصول نهایی کمک می‌کند، بلکه می‌تواند تأثیر بسزایی بر کاهش زمان و هزینه‌های تولید داشته باشد، که این

امر برای رقابت‌پذیری در بازارهای جهانی بسیار حیاتی است [۷].

پیمینو [۸] در یک مطالعه مروری به بررسی جامع قابلیت ماشین‌کاری و استراتژی‌های ماشین‌کاری آلیاژهای آلومینیوم پرداخته است. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که انتخاب استراتژی مناسب مسیر ابزار تأثیر بسزایی بر کاهش نیروهای برشی و تنش‌های حرارتی دارد. همچنین، بهینه‌سازی استراتژی‌های مسیر ابزار باعث افزایش طول عمر ابزار برشی و بهبود یکپارچگی سطح می‌شود. منظور از مسیرهای بهینه، مسیری است که تعادل مطلوبی میان کیفیت سطح، کاهش نیروهای ماشین‌کاری، تنش‌های پسماند و عمر ابزار ایجاد می‌کنند. این مسیرها، با در نظر گرفتن عواملی همچون الگوی حرکت ابزار، زوایای مناسب نسبت به قطعه کار و بهره‌گیری از فناوری‌هایی نظیر ماشین‌کاری ارتعاشی، منجر به کاهش تغییر شکل، بهبود مورفولوژی براده و افزایش قابلیت ماشین‌کاری می‌شوند. مشابه این مطالعه توسط دمیرپولات [۹] و ساح [۱۰] انجام پذیرفته است.

سرواناکومار و همکارانش [۱۱] به بررسی تأثیر دو استراتژی رستر و ارتفاع ثابت بر روی کیفیت سطح قطعات انحادار از جنس آلومینیوم A6063 پرداختند. هدف از این آزمایش، تحلیل اثر زاویه انحنای (بین ۰ تا ۹۰ درجه) بر روی صافی سطح قطعات مورد استفاده در صنعت هوافضا بود. نتایج به‌دست‌آمده نشان دادند که برای سطوح با زاویه انحنای کمتر از ۴۵ درجه، روش رستر و برای زوایای بیشتر از ۴۵ درجه، روش ارتفاع ثابت مناسب‌تر است. سرخوش و همکارانش [۱۲] به بررسی اثر متغیرهای ماشین‌کاری و استراتژی‌های مسیر حرکت ابزار بر زبری سطح و زمان فرزکاری قطعات شیب‌دار از جنس آلومینیوم T6 پرداختند. با استفاده از روش تاگوچی، پارامترهای بهینه و مؤثر بر نتایج از طریق آزمایش‌های عملی تعیین گردید. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، اثرگذاری مسیر حرکت ابزار بر صافی سطح حدود ۲۰ درصد و اثرگذاری نرخ پیشروی و سرعت دورانی ابزار هرکدام ۱۶ درصد بوده است. وارگا و همکارانش [۱۳] به بررسی تأثیر استراتژی‌های ماشین‌کاری بر روی تختی و زبری سطح آلیاژهای آلومینیومی پرداختند. بر اساس نتایج ایشان استراتژی ارتفاع ثابت بهترین کیفیت سطح را منجر شد. در تحقیقی دیگر از وارگا و

ماشین‌کاری سطوح پیچیده از آلیاژ آلومینیوم سری ۱۰۰۰ مطالعه کردند. نتایج نشان دادند که استراتژی آفست ۳ بعدی بهترین گزینه برای ماشین‌کاری سطوح محدب و مقعر می‌باشد.

مرور مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد که استراتژی‌های پرداخت‌کاری تأثیر قابل توجهی بر قابلیت ماشین‌کاری قطعات مختلف با مواد و ویژگی‌های هندسی متنوع دارند. باین‌حال، در بیشتر این مقالات، تمرکز اصلی بر روی پارامترهایی مانند صافی سطح و زمان تولید بوده است، و به بررسی تأثیر استراتژی‌های پرداخت‌کاری بر روی تلورانس‌های هندسی و خطاهای فرم توجه کمتری شده است. این در حالی است که این پارامترها از جمله مهم‌ترین خروجی‌ها در فرآیند پرداخت‌کاری به‌عنوان آخرین مرحله تولید یک قطعه هستند. همچنین، در اکثر تحقیقات، از استراتژی‌های سنتی پرداخت‌کاری مانند اسپیرال، رادیال و رستر استفاده‌شده است و استراتژی‌های نوین ماشین‌کاری که در سیستم‌های مدرن CAD/CAM امروزی توسعه یافته‌اند، به‌طور کامل مورد بررسی قرار نگرفته‌اند. در این مقاله، نوآوری اصلی ارائه یک تحلیل جامع از تأثیر سه استراتژی مدرن پرداخت‌کاری شامل تصویرسازی منحنی، پرداخت شیب‌های تند و ملایم و پرداخت‌کاری اسپیرال بر زبری سطح، خطای فرم، و نرخ براده‌برداری در ماشین‌کاری قطعات فرم آزاد با هندسه‌های پیچیده سه‌بعدی است. برخلاف تحقیقات پیشین که عمدتاً بر استراتژی‌های سنتی مانند رستر و رادیال تمرکز داشته‌اند، این پژوهش به بررسی استراتژی‌هایی می‌پردازد که در سیستم‌های مدرن CAD/CAM توسعه یافته‌اند و قابلیت بهبود کیفیت سطح و دقت ابعادی را دارند. این تحقیق نه تنها تأثیر هر یک از این استراتژی‌ها را به‌صورت جداگانه بررسی می‌کند، بلکه با مقایسه دقیق آن‌ها، راهکارهایی برای انتخاب استراتژی مناسب پرداخت‌کاری متناسب با نیازهای فرآیند ارائه می‌دهد. در این پژوهش، سه پارامتر کلیدی شامل زبری سطح، خطای فرم (به‌عنوان تلورانس هندسی)، و نرخ براده‌برداری به‌صورت هم‌زمان مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. این رویکرد جامع، که معمولاً در تحقیقات پیشین به‌طور جداگانه بررسی شده‌اند، تحلیل کاملی از قابلیت ماشین‌کاری ارائه می‌دهد. یکی دیگر از جنبه‌های نوآورانه این مقاله، تمرکز بر ماشین‌کاری قطعات

همکارانش [۱۴] روش‌های مختلف ماشین‌کاری سطوح کروی، محدب و مقعر را مورد مقایسه قرار دادند. ایشان از ۳ استراتژی رادیال، آفست ۳ بعدی و رستر استفاده نمودند. نتایج به‌دست‌آمده نشان دادند که برای پرداخت سطوح محدب، استراتژی رادیال و برای سایر سطوح استراتژی آفست ۳ بعدی مناسب‌ترین روش‌ها هستند. رضانی ثالث و امیرآبادی [۱۵]، استراتژی‌های مسیر ابزار را در ماشین‌کاری ۵ محوره بررسی کردند. ایشان تأثیر این استراتژی‌ها را بر روی سطوح فرم آزاد، سطوح دوران‌یافته و سطوح اکستروود شده مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که انتخاب استراتژی مناسب پرداخت‌کاری و بهینه‌سازی نرخ پیشروی می‌تواند زمان ماشین‌کاری را بین ۲۰ تا ۵۳ درصد کاهش دهد. حسن‌پور و همکارانش [۱۶] تأثیر استراتژی‌های مختلف ماشین‌کاری را بر میکروسختی سطوح منحنی شکل از جنس فولاد ضدزنگ ۱/۴۹۰۳ بررسی کردند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که مسیرهای مختلف حرکت ابزار بر میکروسختی سطح فرزکاری تأثیر متفاوتی دارند، به‌طوری‌که استراتژی اسپیرال بیشترین سختی و استراتژی رادیال کمترین سختی را ایجاد نمودند. ماکولاویچ و همکارانش [۱۷] به بررسی تأثیر استراتژی‌های پرداخت‌کاری بر روی اعوجاج شاسی ربات‌های ماشین‌کاری پرداختند. یکی از دلایل اعوجاج، تنش‌های پسماند می‌باشد که بر کنترل مسیر ربات تأثیر می‌گذارد. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از استراتژی‌های مناسب ماشین‌کاری می‌تواند میزان تنش‌های پسماند را به طرز قابل توجهی کاهش دهد. لبون و همکارانش [۱۸] به بررسی استراتژی‌های پرداخت‌کاری بر روی عمر ابزار و صافی سطح قطعات دوار پرداختند. شبیه‌سازی‌ها نشان دادند که استراتژی رستر نسبت به رادیال عمر ابزار و کیفیت سطح را بهبود می‌بخشد. مبراهیم و همکاران [۱۹] تأثیر شش استراتژی مختلف مسیر ابزار را بر پرداخت سطح و زمان ماشین‌کاری یک بلوک مستطیلی از جنس ESR Stavax بررسی کردند. نتایج حاصله نشان داد که استراتژی اسپیرال بهترین کیفیت سطح را ایجاد می‌کند، اما به زمان ماشین‌کاری بالایی نیاز دارد که منجر به افزایش هزینه تولید می‌شود. راموس و همکارانش [۲۰]، تأثیر ۳ استراتژی رادیال، اسپیرال و آفست ۳ بعدی را بر زبری سطح و تلورانس‌های ابعادی در

و مدل سازی سطوح استفاده می شود. یکی از دقیق ترین و پیشرفته ترین این روش ها، استفاده از توابع نربز است. این توابع به دلیل قابلیت بالای خود در نمایش دقیق منحنی ها و سطوح پیچیده، به ویژه در ماشین کاری قطعات فرم آزاد، جایگاه ویژه ای در سیستم های CAD/CAM دارند [۲۱ و ۲۲]. با استفاده از منحنی نربز، می توان مسیر ابزار را به طور دقیق مدل سازی کرده و به بهبود کیفیت سطح نهایی و افزایش دقت ابعادی قطعات دست یافت. این منحنی ها و سطوح به وسیله نقاط کنترل و توابع پایه نرمالیزه شده تعریف می شوند، که امکان نمایش دقیق و پیچیده تری از اشکال سه بعدی را فراهم می آورند. منحنی نربز توسط رابطه (۱) تعریف می شود [۲۳]:

$$C(t) = \frac{\sum_{i=0}^m w_i P_i N_i^n(t)}{\sum_{i=0}^m w_i N_i^n(t)} \quad (1)$$

که در این رابطه، m تعداد نقاط کنترل، n تعداد نقاط تأثیرگذار در موضع ماشین کاری، P_i مختصات نقاط کنترل، w_i وزن نقاط و N_i توابع پایه نرمالیزه شده از درجه t است. سطح نربز به عنوان حاصل ضرب تانسوری دو منحنی نربز تعریف می شود، طبق رابطه (۲) [۲۳]:

$$S(t) = \frac{\sum_{i=0}^q \sum_{j=0}^r w_{ij} P_{ij} N_i^m(u) N_j^n(v)}{\sum_{i=0}^q \sum_{j=0}^r N_i^m(u) N_j^n(v)} \quad (2)$$

که در این رابطه، q و r تعداد نقاط کنترل در جهت های u و v می باشد.

در سیستم های CAD-CAM، استفاده از توابع نربز به دلیل دقت بالایی که در نمایش اشکال پیچیده دارند، نقش مهمی ایفا می کند. این تکنیک به مهندسان و طراحان این امکان را می دهد که سطوح و منحنی های پیچیده را با دقت بالا مدل سازی کرده و به فرآیندهای ماشین کاری پیشرفته منتقل کنند.

انتخاب مناسب استراتژی پرداخت کاری، به ویژه در ماشین کاری قطعات فرم آزاد با هندسه پیچیده سه بعدی، می تواند به بهبود کیفیت سطح، تلورانس های ابعادی و هندسی و کاهش زمان ماشین کاری کمک کند. نوع مسیر حرکت ابزار و تغییرات نرخ پیشروی در گوشه ها و محل های تغییر جهت، به طور مستقیم بر زبری سطح و پروفیل ناهمواری های سطح تأثیر می گذارد. همچنین در

با انحنای آزاد و هندسه های پیچیده سه بعدی است. برخلاف مطالعات پیشین که بیشتر بر قطعات ساده و با هندسه های محدود متمرکز بوده اند، این پژوهش بر روی موضوعی جدید و کاربردی در صنایع پیشرفته ای مانند هوافضا و پزشکی تمرکز دارد. نتایج این مطالعه می تواند به مهندسان و پژوهشگران در انتخاب استراتژی های مناسب پرداخت کاری و بهبود فرآیندهای ماشین کاری کمک شایانی کند. این نوآوری ها پژوهش حاضر را از سایر مطالعات متمایز کرده و به عنوان گامی مؤثر در توسعه دانش ماشین کاری قطعات پیچیده معرفی می کند.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- تئوری تحقیق

در این پژوهش، شبیه سازی عددی به عنوان ابزاری برای طراحی و تحلیل فرآیند پرداخت کاری و ایجاد ارتباط میان تحلیل تئوری و آزمایش های تجربی استفاده شده است. مسیرهای ابزار برای هر استراتژی پرداخت کاری با استفاده از نرم افزار پاورمیل شبیه سازی شده است. این شبیه سازی ها بر مبنای اصول تئوری حرکت ابزار و مدل سازی دقیق سطح قطعه کار با هندسه پیچیده سه بعدی انجام شده اند. از ابزارهای پیشرفته نرم افزار، مانند توابع ریاضی نربز، برای تعریف دقیق هندسه قطعه و ایجاد مسیرهای بهینه بهره گرفته شده است. مدل های تئوری، از جمله اصول حرکت ابزار و تطابق مسیر ابزار با هندسه قطعه کار، در طراحی مسیرهای شبیه سازی شده در نظر گرفته شده اند. این مدل ها به طراحی مسیرهای یکنواخت و بدون تغییرات ناگهانی کمک کرده اند که تأثیر مستقیمی بر کیفیت سطح و تلورانس های هندسی داشته اند. خروجی های شبیه سازی، مانند مسیرهای حرکت ابزار، مستقیماً به دستگاه CNC منتقل شده و در آزمایش های تجربی اعمال شده اند. این فرآیند امکان بررسی تأثیر پیش بینی شده هر استراتژی در شرایط واقعی را فراهم کرده است. این رویکرد نه تنها دقت و کارایی نتایج پژوهش را تقویت می کند، بلکه امکان کاهش هزینه ها و زمان آزمایش ها را نیز فراهم می آورد.

همان طور که اشاره شد، در استراتژی های مختلف ماشین کاری، از توابع ریاضی متنوعی برای میانجیابی مسیر ابزار

جنس فولاد تندبر با قطر ۲۰ میلی‌متر استفاده شد. پارامترهای خشن‌کاری شامل سرعت اسپیندل ۱۰۰۰ دور بر دقیقه، سرعت پیشروی ۵۰۰ میلی‌متر بر دقیقه، سرعت نفوذ به قطعه ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه، و سرعت حرکت سریع ۳۰۰۰ میلی‌متر بر دقیقه بودند. در این مرحله، حجم عمده‌ای از ماده از قطعه کار برداشته شد تا قطعه به شکل اولیه خود نزدیک شود.

برای مرحله پرداخت‌کاری، از تیغ فرز تندبر با قطر ۱۰ میلی‌متر که از نوع ball nose است، استفاده شد. پارامترهای پرداخت‌کاری شامل سرعت اسپیندل ۱۵۰۰ دور بر دقیقه، سرعت پیشروی ۱۰۰۰ میلی‌متر بر دقیقه، سرعت نفوذ به قطعه ۵۰۰ میلی‌متر بر دقیقه، و سرعت حرکت سریع ۳۰۰۰ میلی‌متر بر دقیقه تنظیم شدند. این مرحله به‌منظور دستیابی به سطوح نهایی با کیفیت بالا و دقت هندسی بیشتر انجام شد.

ماشین‌کاری در هر دو مرحله خشن‌کاری و پرداخت‌کاری توسط دستگاه فرز CNC که در شکل ۱ نشان داده شده است، انجام شد. این دستگاه ساخت شرکت بیوور انگلستان با کنترلر هایدن هاین می‌باشد که قابلیت اجرای دقیق و خودکار فرآیندهای ماشین‌کاری را فراهم می‌کند.



شکل (۱): دستگاه فرز CNC مورد استفاده جهت انجام

تست‌های ماشین‌کاری.

در مقاله حاضر، سه پارامتر کلیدی شامل زبری سطح، خطای فرم (به‌عنوان یک تolerance هندسی)، و نرخ براده‌برداری به‌طور جداگانه مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته‌اند. این پارامترها از مهم‌ترین شاخص‌های کیفیت و کارایی فرآیند پرداخت‌کاری محسوب می‌شوند و انتخاب آن‌ها بر اساس نیازهای صنعتی و علمی بوده است. زبری سطح به‌عنوان معیار اصلی کیفیت

پرداخت‌کاری با ارتفاع ثابت، حفظ ارتفاع ثابت ابزار در طول مسیر ماشین‌کاری به دستیابی به دقت ابعادی بالای قطعات کمک می‌کند. همچنین، انتخاب صحیح زاویه ورود ابزار و کنترل نیروهای ماشین‌کاری می‌تواند به کاهش تolerance‌های هندسی و بهبود دقت نهایی قطعه منجر شود. علاوه بر این، انتخاب استراتژی مناسب می‌تواند به کاهش ارتعاشات و لرزش‌های غیر مطلوب، کاهش سایش ابزار، و افزایش عمر آن کمک کند. برای مثال، استراتژی‌های پرداخت‌کاری با مسیرهای حرکتی پایدارتر و سرعت‌های پیشروی کنترل‌شده معمولاً به پایداری بهتر فرآیند و کاهش مشکلات ناشی از لرزش‌ها و ارتعاشات منجر می‌شوند. نهایتاً، استراتژی مناسب ماشین‌کاری می‌تواند منجر به کاهش زمان ماشین‌کاری و در نتیجه افزایش نرخ باربرداری گردد که تأثیر بسیار زیادی بر هزینه تولید دارد.

۲-۲- آزمایش‌های تجربی

در این مطالعه، جهت بررسی تأثیر استراتژی‌های مختلف پرداخت‌کاری بر زبری سطح، خطای فرم، و نرخ براده‌برداری، آزمایش‌های تجربی بر روی نمونه‌های آلومینیومی انجام شد. آلومینیوم مورد استفاده آلیاژ سری T6-6061 است که به دلیل ترکیب مناسب خواص مکانیکی و قابلیت ماشین‌کاری انتخاب شده و به‌طور گسترده در صنایعی مانند هوافضا، خودروسازی و ساخت ابزارهای دقیق به کار می‌رود. ترکیب شیمیایی این آلیاژ شامل آلومینیوم به‌عنوان فلز پایه و مقادیر کنترل‌شده‌ای از منیزیم (حدود ۰.۸٪ تا ۱.۲٪) و سیلیکون (حدود ۰.۴٪ تا ۰.۸٪) است که به استحکام و مقاومت به خوردگی آن کمک می‌کنند. قطعات آلیاژی مورد استفاده با فرآیند اکستروژن تولید شده و تحت عملیات حرارتی T6 قرار گرفته‌اند. این عملیات شامل محلول‌سازی در دمای بالا، کوئنچ سریع و پیرسازی مصنوعی است که استحکام مکانیکی و پایداری ابعادی قطعه را تضمین می‌کند. قطعات کار به شکل بلوک‌های مستطیلی با ابعاد ۳۰×۷۰×۵۰ میلی‌متر برش داده شده و سطح آن‌ها پیش از فرآیند ماشین‌کاری تمیز و عاری از هرگونه اکسید یا آلودگی آماده‌سازی شده است. سپس فرآیند ماشین‌کاری آن‌ها در دو مرحله خشن‌کاری و پرداخت‌کاری انجام گرفت. برای خشن‌کاری از یک تیغ فرز از

قطعات فراهم کرده و زمینه‌ساز تحلیل‌های عمیق‌تر در بخش نتایج و بحث خواهد بود.

به‌منظور بررسی تکرارپذیری نتایج، برای ارزیابی پارامترهای مورد مطالعه، هر آزمون سه بار تکرار شد و میانگین مقادیر به‌دست‌آمده به‌عنوان نتیجه نهایی گزارش گردید. در اندازه‌گیری کمیت‌های مربوطه، شرایط محیطی، و موقعیت اندازه‌گیری یکسان نگه‌داشته شد تا از دقت و صحت اندازه‌گیری‌ها اطمینان حاصل شود. این روش تضمین می‌کند که نتایج تکرارپذیر و قابل‌اعتماد هستند.



شکل (۲): دستگاه زبری‌سنج مورد استفاده جهت بررسی کیفیت سطحی.

در این مطالعه، به‌منظور بررسی دقیق تأثیر استراتژی‌های نوین پرداخت‌کاری شامل اسپیرال، تصویرسازی منحنی، و پرداخت شیب‌های تند و ملایم، آزمایش‌های تجربی طراحی و اجرا شدند. در مرحله پرداخت‌کاری، هر یک از این استراتژی‌ها با استفاده از نرم‌افزار پاورمیل برای شبیه‌سازی مسیر ابزار و سپس پیاده‌سازی آن بر روی دستگاه فرز CNC اعمال شد.

- استراتژی اسپیرال: این روش با ایجاد الگوهای مارپیچ بر سطح قطعه، حرکت پیوسته ابزار را تضمین کرده و به کاهش تعداد توقف‌ها و شروع‌های ناگهانی ابزار کمک می‌کند. این ویژگی موجب کاهش نیروهای ناخواسته و بهبود کیفیت سطح می‌شود.

- استراتژی تصویرسازی منحنی: در این روش، یک الگوی منحنی بر روی سطح قطعه تصویر می‌شود و

سطح، خطای فرم به‌عنوان نماینده‌ای از دقت هندسی، و نرخ براده‌برداری به‌عنوان معیاری برای بهره‌وری فرآیند از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. ضرورت انتخاب این پارامترها در این است که در بیشتر مقالات پیشین، تمرکز اصلی بر روی پارامترهایی مانند صافی سطح و زمان تولید بوده است، اما به بررسی تأثیر استراتژی‌های پرداخت‌کاری بر تلورانس‌های هندسی و خطاهای فرم توجه کمتری شده است. این در حالی است که این پارامترها از جمله مهم‌ترین خروجی‌ها در فرآیند پرداخت‌کاری به‌عنوان آخرین مرحله تولید یک قطعه هستند. همچنین، در بسیاری از تحقیقات پیشین، استراتژی‌های سنتی مانند اسپیرال، رادیال، و رستر بیشتر مورد بررسی قرار گرفته‌اند، و استراتژی‌های نوین پرداخت‌کاری که در سیستم‌های مدرن CAD/CAM توسعه یافته‌اند، کمتر تحلیل شده‌اند. این مقاله، با پرداختن به پارامترهایی که هم از لحاظ علمی و هم از لحاظ صنعتی اهمیت بالایی دارند، تلاش می‌کند شکاف موجود در ادبیات تحقیق را پر کند.

پس از پایان ماشین‌کاری، زبری سطح قطعات با استفاده از دستگاه زبری سنج Time TR200 اندازه‌گیری شد (مطابق شکل ۲). این دستگاه قادر است زبری سطح را با دقت بالا و بر اساس پارامترهای استاندارد اندازه‌گیری کند. همچنین، برای اندازه‌گیری تلورانس‌های هندسی قطعات ماشین‌کاری شده از دستگاه CMM مدل Romer Absolute Arm استفاده شد که به‌طور خاص برای ارزیابی دقیق انحراف‌های ابعادی و هندسی طراحی شده است. قطعات مورد آزمایش پس از ماشین‌کاری، با این دستگاه اسکن شده و انحراف آن‌ها از مدل CAD مرجع محاسبه شده است. این انحراف‌ها نمایانگر خطای فرم بوده و در مقیاس میلی‌متر گزارش شده‌اند. برای محاسبه نرخ براده‌برداری نیز جرم ماده حذف‌شده در طول فرآیند پرداخت‌کاری با استفاده از مقیاسه وزن قطعه پیش و پس از فرآیند ماشین‌کاری اندازه‌گیری شده است. زمان کل ماشین‌کاری برای هر قطعه نیز به‌دقت ثبت شده و نرخ براده‌برداری به‌صورت نسبت جرم ماده حذف‌شده به زمان ماشین‌کاری محاسبه شده است. این مقدار برحسب گرم بر ثانیه گزارش شده است.

این آزمایش‌ها اطلاعات دقیق و جامعی در مورد تأثیر هر یک از استراتژی‌های پرداخت‌کاری بر کیفیت سطح و دقت ابعادی

صاف‌تری می‌شود و همچنین کنترل دقیقی بر هندسه سطح نهایی فراهم می‌کند. به علاوه، این استراتژی نیاز به فرآیندهای پرداخت‌کاری اضافی را کاهش داده و کارایی تولید را افزایش می‌دهد. استراتژی پرداخت‌کاری شیب‌های تند و ملایم یک استراتژی نوین ترکیبی است، به طوری که در مناطق شیب‌دار مدل، یک مسیر حرکت ابزار با ارتفاع ثابت ایجاد کرده و در مناطق کم‌شیب از تکنیک آفست سه‌بعدی بهره می‌برد. این ویژگی باعث بهینه‌سازی حرکت ابزار در تمامی نواحی سطح مدل می‌شود و از بروز خطاهای هندسی ناخواسته جلوگیری می‌کند. استراتژی پرداخت‌کاری اسپیرال به ایجاد یک الگوی مارپیچ دوبعدی درون یک مرز مشخص و سپس تصویر کردن آن بر روی مدل می‌پردازد. در این روش، ابزار به طور مداوم و پیوسته در سطح مدل حرکت می‌کند که این امر تعداد دفعات بالا رفتن ابزار را به حداقل رسانده و نیروی یکنواختی را بر ابزار اعمال می‌کند. نتیجه این امر کاهش زمان ماشین‌کاری و بهبود کیفیت نهایی قطعه است. این سه استراتژی به طور ویژه برای فرآیند پرداخت‌کاری در قطعات با هندسه‌های پیچیده طراحی شده‌اند و می‌توانند به طور مؤثری زمان تولید را کاهش داده و کیفیت سطح و دقت ابعادی و هندسی قطعات را بهبود بخشند.

جهت بررسی جامع عملکرد استراتژی‌های فوق که جزء پیشرفته‌ترین استراتژی‌های ماشین‌کاری محسوب می‌شوند، از ۳ استراتژی دیگر که در بین صنعت‌کاران ماشین‌کاری بسیار رایج است استفاده شد. این استراتژی‌های سنتی شامل رادیال، رستر و ارتفاع ثابت می‌باشد. هر یک از این ۶ استراتژی معرفی شده بر روی قطعات با هندسه پیچیده سه‌بعدی با استفاده از ماشین‌کاری CNC پیاده‌سازی شد و خروجی‌های مهم فرآیند از قبیل زبری سطح، خطای فرم و نرخ براده‌برداری مورد ارزیابی قرار گرفتند. نمونه‌ای از قطعاتی که در محیط نرم‌افزار پاورمیل شبیه‌سازی و توسط دستگاه فرز CNC پرداخت‌کاری شده، در شکل ۴ نشان داده شده است.

بر اساس نتایج به دست آمده از این آزمایش‌ها می‌توان به تحلیل دقیق و مقایسه‌ای در مورد کارایی و تأثیر هر استراتژی بر کیفیت نهایی قطعه کار و عملکرد فرآیند ماشین‌کاری پرداخت. در ادامه، نتایج به دست آمده به تفصیل بررسی شده و تحلیل‌های مربوطه برای هر یک از استراتژی‌ها ارائه شده است.

مسیر ابزار به گونه‌ای طراحی می‌گردد که با انحنای قطعه تطابق داشته باشد. این استراتژی به دلیل کنترل دقیق‌تر بر مسیر حرکت ابزار، نتایج بهتری از نظر کیفیت سطح و دقت ابعادی ارائه می‌دهد.

- استراتژی پرداخت شیب‌های تند و ملایم: این روش ترکیبی از حفظ ارتفاع ثابت در نواحی با شیب تند و استفاده از حرکت‌های سه‌بعدی در مناطق کم‌شیب است. این ویژگی به بهبود تطابق ابزار با سطوح پیچیده و کاهش خطای فرم کمک می‌کند.

۳- نتایج و بحث

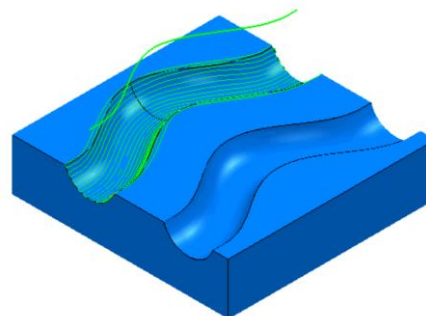
در این مطالعه، شبیه‌سازی عددی برای طراحی مسیر حرکت ابزار و تحلیل تأثیر استراتژی‌های مختلف پرداخت‌کاری بر روی پارامترهای خروجی فرآیند استفاده شد. این شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار پاورمیل انجام گرفت که امکان مدل‌سازی دقیق مسیر ابزار را برای قطعات با فرم آزاد و هندسه‌های پیچیده سه‌بعدی فراهم می‌کند. در این شبیه‌سازی‌ها، مسیرهای حرکت ابزار برای هر استراتژی به گونه‌ای طراحی شدند که بتوانند نیازهای خاص فرآیند ماشین‌کاری را برآورده کنند. نتایج این شبیه‌سازی‌ها مبنایی برای انتخاب استراتژی‌های مناسب در آزمایش‌های تجربی بودند. این شبیه‌سازی‌ها به طور قابل توجهی هزینه و زمان آزمایش‌ها را کاهش داده و اطلاعات جامعی در مورد تأثیر استراتژی‌های مختلف پرداخت‌کاری بر کیفیت سطح، دقت ابعادی، و نرخ براده‌برداری ارائه دادند. برای این منظور، از سه استراتژی نوین ماشین‌کاری شامل تصویرسازی منحنی، پرداخت شیب‌های تند و ملایم و پرداخت‌کاری اسپیرال استفاده شد، مطابق شکل ۳. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، استراتژی پرداخت‌کاری منحنی تصویر یافته شامل تصویر کردن یک الگوی منحنی بر روی سطح مدل سه‌بعدی است. در این روش، یک الگوی لوله‌ای یا منحنی بر روی سطح قطعه کار نقشه‌برداری می‌شود، به طوری که خط مرکزی لوله به عنوان نقطه کانونی الگو عمل می‌کند. این الگوی تصویر شده به عنوان یک سطح راهنما برای فرآیند ماشین‌کاری عمل کرده و تضمین می‌کند که کانتورهای سطح مدل با منحنی موردنظر هماهنگ باشند. این روش موجب ایجاد سطوح پیچیده‌تر و

۳-۱- تأثیر استراتژی‌های پرداخت کاری بر روی زبری سطح

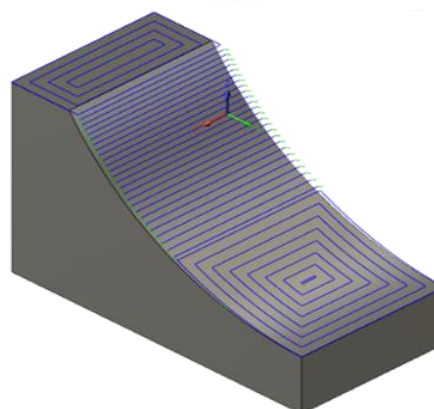
نتایج تست‌های ماشین‌کاری که در جدول ۱ خلاصه شده است، نشان می‌دهد که استراتژی‌های مختلف پرداخت کاری تأثیر قابل توجهی بر روی زبری سطح دارند. بر اساس نتایج ارائه شده، استراتژی پرداخت شیب‌های تند و ملایم با مقدار 0.77 میکرون بهترین کیفیت سطح را ارائه داده است. این نتیجه ناشی از کنترل دقیق مسیر ابزار و کاهش نوسانات سطحی است که به بهبود کیفیت سطح منجر می‌شود. در مقابل، استراتژی رادیال با مقدار 1.062 میکرون بیشترین زبری سطح را نشان داده است که دلیل آن تغییرات ناگهانی در مسیر ابزار و عدم یکنواختی حرکت ابزار است. مقایسه این دو مقدار نشان می‌دهد که زبری سطح در استراتژی پرداخت شیب‌های تند و ملایم نسبت به استراتژی رادیال به میزان $27/49$ بهبود یافته است. به‌طور کلی، استراتژی‌هایی که با حرکت یکنواخت و مسیرهای منظم همراه هستند، زبری سطح کمتری ایجاد کردند. در این راستا، استراتژی‌های شیب‌های تند و ملایم و تصویرسازی منحنی به‌عنوان روش‌های برتر برای دستیابی به سطوح با زبری کم شناخته شدند که علت این امر، کنترل دقیق مسیر حرکت ابزار و تطبیق آن با هندسه قطعه‌کار است. در استراتژی پرداخت شیب تند و ملایم، مسیر حرکت ابزار به‌گونه‌ای طراحی شده است که در مناطق با شیب زیاد از حرکت‌های با ارتفاع ثابت و در نواحی کم‌شیب از مسیرهای سه‌بعدی تطبیق‌پذیر استفاده می‌شود. این طراحی دقیق باعث کاهش تغییرات لرزش و نوسانات ابزار و در نتیجه بهبود کیفیت سطح منجر می‌شود. به همین ترتیب، در استراتژی تصویرسازی منحنی، مسیر ابزار به‌صورت دقیق با انحنای قطعه‌کار هم‌راستا می‌شود، که باعث کاهش تداخل‌های ناخواسته ابزار با سطح قطعه و درنهایت کاهش نواقص سطحی می‌گردد.

این استراتژی‌ها همچنین با توزیع یکنواخت نیروهای ماشین‌کاری در طول مسیر حرکت ابزار، از تمرکز تنش‌های موضعی که ممکن است منجر به ایجاد ترک‌های ریز یا نواقص سطحی شوند، جلوگیری می‌کنند. علاوه بر این، مسیر حرکت

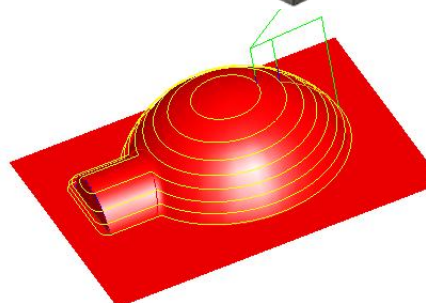
تا به درک عمیق‌تری از تأثیر این استراتژی‌ها بر فرآیند ماشین‌کاری و کیفیت نهایی قطعات دست یافت. (الف)



(ب)



(ج)



شکل (۳): تصویری شماتیک از استراتژی‌های پرداخت کاری مورد استفاده در این تحقیق: (الف) تصویرسازی منحنی؛ (ب) پرداخت شیب‌های تند و ملایم؛ (ج) پرداخت اسپیرال.



شکل (۴): نمونه‌ای از قطعه‌کار پرداخت کاری شده در نرم‌افزار پاورمیل و دستگاه فرز CNC.

به کنترل بهتری در طول فرآیند دست یافته است. استراتژی تصویرسازی منحنی نیز با طراحی مسیرهای ماشین‌کاری متناسب با انحنای قطعه‌کار، به‌طور چشمگیری در کاهش تغییرات ابعادی و خطای فرم مؤثر بوده است. این ویژگی باعث شده است که این استراتژی به‌طور خاص برای کاربردهایی که نیاز به دقت ابعادی بالا و کمینه کردن خطای فرم دارند، مناسب باشد. در مقابل، استراتژی‌های رستر و اسپیرال به دلیل ایجاد تغییرات پیچیده و مسیرهای غیرمنظم، عملکرد ضعیف‌تری در حفظ دقت ابعادی و کاهش خطای فرم نشان داده‌اند. این استراتژی‌ها، به دلیل پیچیدگی‌های ذاتی در مسیرهای ماشین‌کاری و تغییرات متعدد در ارتفاع و جهت حرکت ابزار، باعث افزایش خطای فرم و کاهش دقت ابعادی شده‌اند. در نتیجه، انتخاب استراتژی مناسب ماشین‌کاری نقشی کلیدی در دستیابی به دقت بالا و کاهش خطای فرم ایفا می‌کند. بررسی کمی نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که استراتژی پرداخت شیب‌های تند و ملایم با مقدار mm ۰/۱۸۴ دقیق‌ترین نتیجه را ارائه کرده است. طراحی دقیق مسیر ابزار در این استراتژی، به‌ویژه در نواحی با شیب زیاد، نقش کلیدی در کاهش خطای فرم داشته است. در مقابل، استراتژی رادیال با مقدار mm ۰/۰۷۹۵ بیشترین خطای فرم را داشته که ناشی از تغییرات نامنظم در ارتفاع و جهت حرکت ابزار است. کاهش خطای فرم میان این دو استراتژی برابر با ۷۶/۸۶٪ است که برتری استراتژی پرداخت شیب‌های تند و ملایم را در کنترل دقت هندسی قطعات نشان می‌دهد. این امر به دلیل توانایی این استراتژی‌ها در کنترل دقیق مسیر ماشین‌کاری، حفظ یکنواختی سطح و تطابق بهتر با هندسه پیچیده قطعات می‌باشد.

ابزار در این استراتژی‌ها به‌صورت روان و بدون تغییرات ناگهانی طراحی شده است که از بروز اثرات منفی ناشی از تغییر جهت ابزار، مانند نوسانات نیروی ماشین‌کاری و افزایش زبری سطح، جلوگیری می‌کند. ویژگی دیگری که به کاهش زبری سطح کمک می‌کند، تضمین عمق برش یکنواخت در طول مسیر حرکت ابزار است، که باعث کاهش ناهم‌آهنگی‌های سطحی و بهبود صافی سطح می‌شود. به‌طور خلاصه، طراحی مسیر حرکت ابزار در استراتژی‌های پرداخت شیب تند و ملایم و تصویرسازی منحنی، شامل حرکت‌های یکنواخت، توزیع متعادل نیرو، و کاهش نوسانات ابزار، دلایل اصلی بهبود کیفیت سطح در این روش‌ها هستند. این ویژگی‌ها استراتژی‌های مذکور را به گزینه‌هایی ایده‌آل برای دستیابی به صافی سطح بالا تبدیل می‌کنند.

۳-۲- تأثیر استراتژی‌های پرداخت‌کاری بر روی خطای فرم

در ارزیابی خطای فرم، استراتژی‌هایی که توانایی حفظ ارتفاع ثابت و مسیرهای منظم را داشتند، عملکرد بهتری از خود نشان دادند. همان‌طور که در جدول ۱ نشان داده شده است، استراتژی‌های پرداخت‌کاری شیب‌های تند و ملایم و تصویرسازی منحنی، دقیق‌ترین تلورانس هندسی و کمترین خطای فرم را به دنبال داشتند. این دو استراتژی به‌واسطه طراحی خاص مسیر حرکت ابزار، توانسته‌اند به‌طور مؤثر تغییرات ارتفاع را کاهش داده و دقت بالایی را در فرآیند ماشین‌کاری تضمین کنند. به‌ویژه استراتژی پرداخت‌کاری شیب‌های تند و ملایم با استفاده از ترکیبی از مسیرهای ثابت در نواحی با شیب زیاد و کاهش تدریجی در مناطق کم‌شیب،

جدول (۱): مقایسه عملکرد استراتژی‌های پرداخت‌کاری

استراتژی	زمان ماشین‌کاری (min)	نرخ براده‌برداری (gr/s)	زبری سطح (μm)	خطای فرم (mm)
شیب تند و ملایم	۳۶	۰/۱۱۰۶	۰/۷۷	۰/۱۸۴
تصویرسازی منحنی	۳۶	۰/۱۱۰۴	۰/۹۸۶	۰/۰۴۵۸
اسپیرال	۳۰	۰/۱۳۲۵	۱/۰۴۸	۰/۰۶۰۳
ارتفاع ثابت	۲۸	۰/۱۴۱۹	۱/۰۲۳	۰/۰۵۷۷
رستر	۳۳	۰/۱۲۰۴	۱/۰۵۳	۰/۰۷۸۱
رادیال	۳۴	۰/۱۱۶۹	۱/۰۶۲	۰/۰۷۹۵

۳-۳- تأثیر استراتژی‌های پرداخت‌کاری بر روی نرخ براده‌برداری

نرخ براده‌برداری به‌طور مستقیم تحت تأثیر استراتژی انتخابی قرار دارد. استراتژی‌های اسپیرال و ارتفاع ثابت به دلیل طراحی خاص مسیر و توانایی بالاتر در برداشتن مواد از سطح قطعه، نرخ باربرداری بیشتری نسبت به دیگر استراتژی‌ها ارائه داده و زمان ماشین‌کاری کمتری را به همراه دارند. استراتژی ارتفاع ثابت با حفظ ارتفاع یکنواخت در طول فرآیند و استراتژی اسپیرال با حرکت‌های منظم ماریچ، هر دو توانستند با سرعت بیشتری از قطعات براده‌برداری کنند. با این حال، استراتژی‌های تصویرسازی منحنی و پرداخت شیب‌های تند و ملایم که بر بهبود کیفیت سطح و دقت ابعادی تمرکز دارند، کمترین نرخ براده‌برداری و بیشترین زمان ماشین‌کاری را منجر شدند. این مسئله نشان‌دهنده تعادل بین کیفیت و کارایی در این استراتژی‌ها است.

تحلیل کمی نتایج نشان می‌دهد که استراتژی اسپیرال با مقدار 0.1325 gr/s بالاترین بهره‌وری را داشته است. این نتیجه به دلیل حرکت پیوسته و سریع ابزار در طول مسیر ماشین‌کاری حاصل شده است. در مقابل، استراتژی پرداخت شیب‌های تند و ملایم با مقدار 0.1106 gr/s کمترین نرخ براده‌برداری را ارائه داده است که نشان‌دهنده تمرکز این استراتژی بر کیفیت سطح و دقت هندسی به جای بهره‌وری است. اختلاف نرخ براده‌برداری میان این دو استراتژی 19.8% بوده که به دلیل تفاوت در اهداف این دو روش است. از نظر زمان ماشین‌کاری نیز، استراتژی اسپیرال و ارتفاع ثابت به ترتیب با مقادیر ۳۰ و ۲۸ دقیقه کمترین زمان را به خود اختصاص داده‌اند که نشان‌دهنده تمرکز این استراتژی‌ها بر کاهش زمان فرآیند و افزایش سرعت ماشین‌کاری است. در مقابل، استراتژی پرداخت شیب‌های تند و ملایم با زمان ۳۶ دقیقه طولانی‌ترین فرآیند را داشته است که به دلیل تمرکز بیشتر بر کیفیت سطح و دقت ابعادی است.

به‌طور خلاصه، استراتژی‌هایی که منجر به بهترین صافی سطح و کمترین خطای فرم شدند، از منظر نرخ براده‌برداری و زمان ماشین‌کاری عملکرد ضعیف‌تری داشتند. لذا انتخاب نهایی استراتژی پرداخت‌کاری بسته به اولویت‌های فرآیند تولید

ممکن است متفاوت باشد؛ اما نکته قابل توجه این است که در فرآیند خشن‌کاری، زمان و سرعت ماشین‌کاری به‌عنوان یک عامل کلیدی مطرح است، درحالی‌که در فرآیند پرداخت‌کاری که پاس نهایی عملیات ماشین‌کاری است، کیفیت سطح و تلورانس‌های ابعادی/هندسی نسبت به زمان و هزینه تولید اهمیت بیشتری دارد؛ بنابراین، تصمیم‌گیری در مورد استراتژی مناسب پرداخت‌کاری باید با توجه به تعادل میان کیفیت نهایی و کارایی محصول انجام شود.

نتایج حاصل از این پژوهش به‌طور کلی به قطعات انحنادار با فرم آزاد و هندسه‌های پیچیده که با استفاده از استراتژی‌های پرداخت‌کاری موردبررسی قرار گرفته‌اند، قابل‌تعمیم است. با این حال، عملکرد و تأثیر استراتژی‌های پرداخت‌کاری ممکن است بسته به جنس قطعه‌کار تغییر کند. به‌عنوان مثال، موادی با خصوصیات مکانیکی متفاوت، مانند سختی، چقرمگی و هدایت حرارتی می‌توانند بر نیروهای ماشین‌کاری، میزان سایش ابزار، و کیفیت سطح تأثیر بگذارند. مواد با سختی بالا، مانند فولاد سخت یا آلیاژهای تیتانیوم، ممکن است باعث افزایش نیروهای ماشین‌کاری و تنش‌های پسماند شوند که این امر می‌تواند به تغییر شکل الاستیک یا پلاستیک قطعه و در نتیجه کاهش دقت هندسی منجر شود. در مقابل، مواد با مدول الاستیسیته پایین، مانند پلاستیک‌ها، در برابر نیروهای ماشین‌کاری تغییر شکل بیشتری نشان می‌دهند که می‌تواند تلورانس‌های هندسی را تحت تأثیر قرار دهد.

در زمینه صافی سطح، مواد چقرمه معمولاً تمایل بیشتری به تولید براده‌های یکنواخت دارند که منجر به صافی سطح بهتر می‌شود؛ اما مواد شکننده، مانند سرامیک‌ها، ممکن است باعث ایجاد نواقص سطحی مانند ترک یا کنده شدن شوند. همچنین، مواد با هدایت حرارتی پایین می‌توانند دمای برش بیشتری ایجاد کنند که منجر به اکسیداسیون سطح یا ذوب شدن موضعی و در نتیجه کاهش کیفیت سطح می‌شود.

از نظر نرخ براده‌برداری، مواد سخت‌تر معمولاً نیاز به نیروی بیشتری برای براده‌برداری دارند و نرخ براده‌برداری کمتری ارائه می‌دهند. در مقابل، مواد چقرمه به دلیل تولید براده‌های پیوسته ممکن است نرخ براده‌برداری بالاتری داشته باشند، اما

- در زمینه نرخ براده‌برداری، استراتژی اسپیرال با نرخ 0.1325 gr/s و زمان ماشین‌کاری ۳۰ دقیقه، بالاترین بهره‌وری را ارائه داد و نسبت به کمترین نرخ براده‌برداری، بهبود $19/8\%$ را نشان داد. استراتژی ارتفاع ثابت نیز عملکرد مشابهی داشت و توانست مواد بیشتری را در مدت‌زمان کوتاه‌تری حذف کند. باین‌حال، این دو استراتژی کیفیت سطح و تلورانس‌های هندسی کمتری نسبت به استراتژی‌های نوین مانند پرداخت شیب‌های تند و ملایم ارائه دادند.

- نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که انتخاب استراتژی پرداخت‌کاری باید بر اساس نیازهای خاص فرآیند و کاربردهای قطعه‌کار انجام شود. استراتژی‌هایی که بر دقت ابعادی و کیفیت سطح تأکید دارند، ممکن است به کاهش نرخ براده‌برداری منجر شوند، درحالی‌که استراتژی‌هایی با تمرکز بر بهره‌وری بالاتر می‌توانند تأثیر منفی بر کیفیت سطح و تلورانس‌های هندسی داشته باشند؛ بنابراین، تعادل دقیق بین این معیارها برای انتخاب استراتژی مناسب ضروری است.

۵- مراجع

- [1] Dodok T, Čuboňová N, Císar M, Kuric I, Zajačko I. Utilization of strategies to generate and optimize machining sequences in CAD/CAM. *Procedia Engineering*. 2017; 192: 113-118. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.020>.
- [2] Zamani J, Hemati MH, Morsalu R. Statistical analysis on dimensional accuracy of wax patterns of gas turbine blades produced by rapid tooling. *Journal of Aerospace Mechanics*. 2015; 11(3): 59-68. DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455323.1394.11.2.3.4>
- [3] Davoudi B, Eskandari B. Surface roughness optimization in machining of n-155 iron-nickel-base superalloy using the Taguchi method. *Journal of Aerospace Mechanics*. 2015; 11(2): 43-53. DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455323.1394.11.2.5.6>
- [4] Pashmforoush F, Ebrahimi Araghizad A, Budak E. Physics-informed tool wear prediction in turning

این امر می‌تواند به افزایش دمای ابزار و سایش بیشتر منجر شود.

برای ارتباط دقیق میان جنس قطعه‌کار و پارامترهای فرآیند، انتخاب ابزار مناسب با مواد و پوشش مناسب برای جنس قطعه‌کار ضروری است. همچنین، تنظیم پارامترهای فرآیند مانند سرعت برش، پیشروی، و نرخ تغذیه بر اساس خواص مکانیکی مواد و استفاده از استراتژی‌های مناسب پرداخت‌کاری برای کاهش نیروها و دما، به‌ویژه در مواد سخت یا شکننده، الزامی است.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تأثیر استراتژی‌های نوین پرداخت‌کاری بر قابلیت ماشین‌کاری قطعات انحادار با فرم آزاد و هندسه پیچیده سه‌بعدی موردبررسی قرار گرفت. برای این منظور، از سه استراتژی نوین (پرداخت شیب‌های تند و ملایم، تصویرسازی منحنی، و اسپیرال) و سه استراتژی سنتی (رستر، رادیال، و ارتفاع ثابت) جهت فرزکاری CNC استفاده شد. در ادامه، تأثیر این استراتژی‌ها بر کیفیت سطح، تلورانس‌های هندسی، و نرخ براده‌برداری تحلیل شد. خلاصه‌ای از نتایج جدید و مهم تحقیق به شرح زیر ارائه می‌شود:

- استراتژی‌های پرداخت شیب تند و ملایم و تصویرسازی منحنی بهترین عملکرد را در دستیابی به صافی سطح بالا نشان دادند. این امر ناشی از حرکت‌های یکنواخت و کنترل‌شده ابزار در طول مسیر ماشین‌کاری است که منجر به کاهش نوسان‌های سطحی و بهبود کیفیت سطح می‌شود.
- بر اساس نتایج حاصله استراتژی پرداخت شیب‌های تند و ملایم توانست زبری سطحی برابر با $0.077 \mu\text{m}$ و خطای فرم 0.184 mm ارائه دهد که به ترتیب بهبود $27/49\%$ و $76/38\%$ در دقت هندسی نسبت به سایر استراتژی‌ها را نشان می‌دهد. در مقابل، استراتژی‌های رستر و رادیال بیشترین زبری سطح را به همراه داشتند، که این مسئله می‌تواند به دلیل تغییرات ناگهانی در زاویه ابزار و مسیرهای نامنظم باشد.

- Engineering. 2024;24(03):189-201. DOI: <https://doi.org/10.3390/app122010638>.
- [13] Varga J, Tóth T, Kaščák Ľ, Spišák E. The effect of the machining strategy on the surface accuracy when milling with a ball end cutting tool of the aluminum alloy AlCu4Mg. *Applied Sciences*. 2022; 12: 10638. DOI: <https://doi.org/10.3390/app122010638>.
- [14] Varga J, Spišák E, Gajdos I, Mulidrán P. Comparison of Milling Strategies in the Production of Shaped Surfaces. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2022; 16(6): 267–274. DOI: <https://doi.org/10.12913/22998624/156817>.
- [15] Ramazani Sales H, Amir Abadi H. Investigation of tool path strategies for three-axes and five-axes milling with federate optimization. *Modares Mechanical Engineering*. 2015; 15(13): 150-157. DOI: <https://doi.org/20.1001.1.10275940.1394.15.13.86.6>.
- [16] Hasanpour H, Shajari S, Rasti A, Sadeghi MH. Investigation of milling strategies effect on microhardness of a typical curved surface. *Modares Mechanical Engineering*. 2015, 15(2): 34-40. DOI: <https://doi.org/20.1001.1.10275940.1394.15.2.26.4>.
- [17] Makulavičius M, Petkevičius S, Rožėnė J, Dzedzickis A, Bučinskis V. Industrial Robots in Mechanical Machining: Perspectives and Limitations. *Robotics*. 2023; 12(6):1-27. DOI: <https://doi.org/10.3390/robotics12060160>.
- [18] Lebon N, Tapie L, Vennat E, Mawussi B. Influence of CAD/CAM tool and material on tool wear and roughness of dental prostheses after milling. *Journal of Prosthetic Dentistry*. 2015;114(2):236-47. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2014.12.021>.
- [19] Mebrahitom A, Rizuan D, Azmir M, Nassif. Effect of high-speed milling tool path strategies on the surface roughness of Stavax ESR mold insert machining. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016; 114:1-6. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757899X/114/1/012006>.
- [20] Ramos AM, Relvas C, Simoes JA. The influence of finishing milling strategies on texture, roughness and dimensional deviations on the machining of complex surfaces. *Journal of materials processing technology*. 2003; 136:209-216. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00160-2](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00160-2).
- [21] Scandola L, Erber M, Hagenlocher P, Steinlehner F, Volk W. Reconstruction of the bending line for free-form bent components extracting the centroids and exploiting NURBS curves. *Graphical Models*. 2024; process: A thermo-mechanical wear-included force model integrated with machine learning. *Journal of Manufacturing Systems*. 2024; 77: 266-283. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2024.09.008>.
- [5] Pilecco RO, Vaz Machry R, Baldi A, Paulo J Tribst M, Sarkis-Onofre R, Valandro LF, Kleverlaan CJ, Scotti N, Pereira GKR. Influence of CAD-CAM milling strategies on the outcome of indirect restorations: A scoping review. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. 2024; 131(5): 811-820. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2024.02.021>.
- [6] Tianchi D, Yingguang L, Xu L. An inexact subgraph matching algorithm for subpart retrieval in NC process reuse. *Journal of Manufacturing Systems*. 2023; 67: 410-423. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.02.011>.
- [7] Bosch G, Ender A, Mehl A. A 3-dimensional accuracy analysis of chairside CAD/CAM milling processes. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. 2014; 112(6): 1425-1431. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2014.05.012>.
- [8] Pimenov DY, Kiran M, Khanna N, et al. Review of improvement of machinability and surface integrity in machining on aluminum alloys. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023; 129: 4743–4779. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12630-4>.
- [9] Demirpolat H, Binali R, Kuntoğlu M, et al. The influences of alloying elements and processing conditions on the machinability of wrought aluminium alloys: A literature review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2024;0(0). DOI: <https://doi.org/10.1177/09544089241290395>.
- [10] Sah MK, Vijaya A. Experimental studies on reflective finishing of aluminum sheet by CNC abrasive lapping. *Materials and Manufacturing Processes*. 2023; 39(4): 546–562. DOI: <https://doi.org/10.1080/10426914.2023.2244034>.
- [11] Saravanakumar A, Karthikeyan SC, Dhamotharan B, Gokul kumar V. Optimization of CNC turning parameters on aluminum alloy 6063 using Taguchi robust design. *Materials Today: Proceedings*. 2018; 15(2): 8290-8298. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.520>.
- [12] Sarkhosh R, Kazemi Nasrabadi M, Nazari Googli Sh. The Effect of Machining Strategies on the Surface Roughness and Milling Time of Part with Convex, Concave, and Smooth Surfaces. *Modares Mechanical*

135: 101227. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.gmod.2024.101227>.

[22] Ji S, Lei L, Zhao J, Lu X, Gao H. An adaptive real-time NURBS curve interpolation for 4-axis polishing machine tool. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2021; 67: 102025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2020.102025>.

[23] Michal F, Peter I, Miroslav T, František K, Melichar K. Use of cam strategies for tool movement in machining surfaces of various shapes. *Acta Mechanica Slovaca*. 2020; 24(3):40-48. DOI: <https://doi.org/10.21496/ams.2020.020>.