



# The Effect of Machining Strategies on the Surface Roughness and Milling Time of Part with Convex, Concave, and Smooth Surfaces

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Sarkhosh R.<sup>1\*</sup>,  
Kazemi Nasrabadi M.<sup>1</sup>,  
Nazari Googli Sh.<sup>2</sup>

### How to cite this article

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 Engineering; 2024;24(03):189-201.

<sup>1</sup> Department of Aerospace Engineering, Aeronautical University of Science and Technology, Tehran, Iran.

<sup>2</sup> Aeronautical University of Science and Technology, Tehran, Iran .

### \*Correspondence

Address: Department of Aerospace Engineering, Aeronautical University of Science and Technology, Tehran, Iran.

R.sarkhosh@ssau.ac.ir

### Article History

Received: April 28, 2024

Accepted: July 8, 2024

ePublished: July 26, 2024

## ABSTRACT

The milling process is widely used in the manufacturing industry to shape complex geometric parts. Considering the flexibility of the cutting process and the various variables involved, process optimization has become a key issue in achieving higher productivity and quality. To optimize the process planning, it is important to choose a suitable machining strategy. Implementation and selection of tool path strategies and orientations are very important in the machining process, especially in the aerospace and molding industries. The right choice can lead to significant savings in machining time, improvement of work-piece surface quality, and improvement in tool life, thus leading to overall cost reduction and higher productivity. Therefore, this article aims to identify the best strategy in terms of surface roughness and milling time. In this article, Shallow's strategy has been investigated, and the milling of its finishing stage has been studied and compared with three strategies of the milling process, including raster, 3D offset, and raster flat. In this article, the comparison of the strategies in the Powermill software and with the flat-head finger mill, which can grind the floor and the wall simultaneously, has been done. Tool-cutting parameters were considered constant for all tested strategies. Machining quality was evaluated by comparing surface roughness, surface Topography, and dimension control parameters. The results indicate that the Shallow machining strategy has the lowest surface roughness and the best surface quality, and the raster strategy has the highest surface roughness and the worst surface quality in this test.

**Keywords** Milling Strategies, Shallow , Surface Topography, Surface Roughness, Milling Time , Powermill Software

## CITATION LINKS

1- Practical Treatise on Milling and ... 2- Effect of cutter mark on surface ... 3- Ball-mills versus end-mills for ... 4- Multi-point machining of sculptured ... 5- The influence of finishing milling ... 6- A study of the effects of cutter ... 7- Cutter path orientations when high-speed ... 8- The influence of tool-path strategies and ... 9- The influence of tool path strategies on ... 10- Comparison of milling strategies in ... 11- Investigation of surface roughness in ... 12- Analysis of surface roughness during ... 13- Effect of cutting fluid application on ... 14- The Effects of Milling Strategies on Forces ... 15- Influence of tool path strategies on machining ... 16- Investigation the Milling Strategies Effects ... 17- Effect of Milling Strategy on the ... 18- Evaluation of different milling strategies ... 19- The influence of the machining strategy ... 20- Experimental Study on surface roughness ... 21- The use of a neuro-fuzzy network coupled with meta-heuristic learning methods to predict surface roughness in the machining of aluminum alloys. 22- Experimental Investigation of the ... 23- Powermill Manual. 24- Experimental investigation of the effect of milling strategies on time and roughness of curved surfaces 25- Investigating the effect of various milling strategies in machining a sample of convex surfaces made of stainless steel.

## بررسی اثر استراتژی‌های ماشین‌کاری بر روی زبری سطح و زمان فرزکاری قطعه‌ای با سطوح محدب، مقعر و صاف

رضا سرخوش<sup>۱\*</sup>، محمد کاظمی نصرآبادی<sup>۱</sup>، شاهین نظری گوگلی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

<sup>۲</sup>مرکز تحصیلات تکمیلی، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

### چکیده

فرایند فرزکاری به طور گسترده در صنعت تولید برای شکل‌دهی قطعات هندسی پیچیده استفاده می‌شود. باتوجه به انعطاف‌پذیری فرایند برش و متغیرهای مختلف درگیر، بهینه‌سازی فرایند به یک مسئله کلیدی به‌منظور دستیابی به بهره‌وری و کیفیت بالاتر تبدیل شده است. برای بهینه‌سازی برنامه‌ریزی فرایند، انتخاب یک استراتژی ماشین‌کاری مناسب مهم است. پیاده‌سازی و انتخاب استراتژی‌ها و جهت‌گیری‌های مسیر ابزار در فرایند ماشین‌کاری به‌ویژه در صنایع هوافضا و قالب‌سازی بسیار مهم است. انتخاب مناسب می‌تواند منجر به صرفه جویی قابل‌توجه در زمان ماشین‌کاری، بهبود کیفیت سطح قطعه کار و بهبود در عمر ابزار و در نتیجه منجر به کاهش هزینه کلی و بهره‌وری بالاتر شود. بنابراین، هدف این مقاله شناسایی بهترین استراتژی پرداخت از نظر زبری سطح و زمان پرداخت است. در این مقاله استراتژی شلو مورد بررسی قرار گرفته و فرزکاری مرحله پرداخت آن با سه استراتژی فرایند فرزکاری از جمله شطرنجی، آفست سه‌بعدی، شطرنجی مسطح مورد مطالعه و مقایسه قرار گرفته است. در مقاله حاضر مقایسه استراتژی‌ها در نرم افزار پاورمیل و با فرزندگشتی سخت انجام شده است که قابلیت کف تراشی و دیواره تراشی را به طور همزمان دارد. پارامترهای برش ابزار برای تمام استراتژی‌های آزمایش شده ثابت در نظر گرفته شد. کیفیت ماشین‌کاری از طریق مقایسه زبری سطح، توپوگرافی سطح و پارامترهای کنترل ابعاد مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که استراتژی ماشین‌کاری شلو کم‌ترین زبری سطح و بهترین کیفیت سطح و استراتژی شطرنجی بیشترین زبری سطح و بدترین کیفیت سطح را در این آزمایش دارد. **کلیدواژه‌ها:** استراتژی‌های فرزکاری، شلو، توپوگرافی سطح، زبری سطح، زمان فرزکاری، نرم‌افزار پاورمیل

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۱۸

\*نویسنده مسئول: R.sarkhosh@ssau.ac.ir

### ۱- مقدمه

فرزکاری به فرایند ماشین‌کاری توسط ابزارهای دوار برای براده‌برداری گفته می‌شود [1]. باتوجه به گسترش به‌کارگیری قطعات با پیچیدگی‌های بیشتر و مدل‌های هندسی جدید در صنایع قالب‌سازی، هوافضا و خودروسازی، مهندسی به دنبال روش‌های موثرتری برای تولید این‌گونه قطعات باکیفیت سطح بالاتر و نیز راندمان بالاتری هستند. در این راستا بعضی از قالب‌سازان به این نتیجه رسیدند که با تغییر ماشین‌کاری سه

محوره به پنج محوره راندمان ماشین‌کاری ۱۰ تا ۲۰ برابر افزایش می‌یابد [2, 3].

برخی دیگر از صنعتگران به دنبال انتخاب استراتژی‌های فرزکاری مناسب مسیر ابزار و بهینه‌سازی شرایط ماشین‌کاری این نوع از سطوح هستند، چرا که انتخاب استراتژی‌های مناسب منجر به کیفیت بالای قطعات، کاهش زمان ماشین‌کاری، افزایش عمر ابزار و کاهش ارتعاشات ماشین‌ابزار می‌شود استراتژی‌های موقعیت‌دهی ابزار برای تعیین موقعیت و جهت ابزار برشی در نقاط مشخص روی مسیر ابزار استفاده می‌شوند. هدف این استراتژی‌ها حداقل کردن مواد باقیمانده بین مسیرهای ایجاد شده حاصل از حرکت ابزار در هنگام ماشین‌کاری است [4]. تحقیقاتی به بهینه‌سازی پارامترهای ماشین‌کاری و الگوهای تولید مسیر ابزار پرداخته‌اند مثلاً راموس و همکاران [5] به تأثیر استراتژی‌های شطرنجی زاویه‌دار، شعاعی و آفست سه‌بعدی (3D-offset) بر بافت سطحی، زبری سطح و زمان پرداخت یک پروانه موتور کشتی پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که از نظر زبری، در جهت عمود بر پیشروی ابزار، استراتژی آفست سه‌بعدی و در جهت پیشروی ابزار، قطعه تولید شده با استراتژی شطرنجی زاویه‌دار دارای کیفیت سطح بهتری هستند.

توه [6] اثر زوایای مختلف استراتژی شطرنجی را از نظر سایش ابزار بررسی کرد و زاویه ۶۰ درجه را به‌عنوان بهترین زاویه معرفی کرد. در پژوهشی دیگر توه [7] به بررسی استراتژی‌های آفست سه‌بعدی، شطرنجی یک‌طرفه (Raster one way)، شطرنجی دوطرفه، استراتژی پله‌ای بهینه شده ابزار فرزکاری بر شرایط سطحی و زمان ماشین‌کاری آلومینیوم پرداخت. او به این نتیجه رسید که استراتژی پله‌ای بهینه‌شده بیشترین زمان و کمترین زبری و استراتژی شطرنجی دوطرفه کمترین زمان و بیشترین زبری را دارد. تأثیر استراتژی‌های مسیر ابزار و پارامترهای برش بر نیروهای برش، سایش ابزار و کیفیت سطح در فرزکاری سطح منحنی آلومینیوم ۷۰۷۵ توسط آ مالی و همکاران [8] انجام شد. شجری و همکاران [9] اثر استراتژی‌های آفست سه‌بعدی، مارپیچی، شطرنجی بر شرایط سطحی مورد بررسی قرار دادند، آنها در این پژوهش دریافتند که استراتژی مارپیچی بیشترین زبری سطح و آفست سه‌بعدی کمترین زبری سطح را دارد. مقایسه انواع استراتژی‌های ماشین‌کاری در تولید سطوح، توسط وارگا و همکاران [10] انجام شد. آنها به این نتیجه رسیدند که بهترین مقادیر برای زبری از استراتژی ثابت Z به دست آمد و کمترین زمان تولید توسط استراتژی خطی و خطی ۹۰ به دست آمد. راستی و همکاران [11] به مطالعه زبری سطح در فرزکاری سرعت بالا با روش روان‌کاری با حداقل سیال برشی پرداختند آنها در این تحقیق نشان دادند که با شرایط برشی مناسب و در حضور روان‌کاری نیمه‌خشک، صافی سطح مطلوب ۰/۲ میکرومتر در فرزکاری سرعت بالای آلیاژ به دست می‌آید. همچنین کمترین

روانکاری کمینه (MQL) پرداختند. پیش‌بینی زبری سطح در فرزکاری آلیاژهای آلومینیوم با استفاده از شبکه فازی عصبی همراه با روش‌های یادگیری فراابتکاری توسط سیاوشی و همکاران [21] انجام شد. باقری و همکاران [22] به بررسی تجربی پارامترهای موثر در فرآیند ماشین‌کاری آلومینیوم T6-7075 بر زبری سطح با استفاده از روانکاری کمینه و سیال سرد پرداختند. تحقیقات زیادی به بهینه‌سازی پارامترهای ماشین‌کاری و الگوهای تولید مسیر ابزار پرداخته‌اند، حال آنکه کیفیت سطح قطعات متأثر از نوع استراتژی ماشین‌کاری نیز می‌باشد. در همه تحقیقات بالا این مقایسه‌ها با فرز سر کروی انجام شده است که برای سطوح صاف مناسب نیست. در واقع در تحقیقات مرور شده، اشکال مقعر یا محدب هستند که با فرز سر کروی انجام شده است و پارامترهای برش ابزار برای تمام استراتژی‌های تست شده تغییر کرده است. در تمام این تحقیقات فقط از زبری سطح صحبت شده است. با توجه به مرور مقالات و به دانش نویسندگان استراتژی شلو کم‌تر مورد بررسی قرار گرفته است و کیفیت سطح و زمان پرداخت آن با دیگر استراتژی‌ها مورد مقایسه و مطالعه قرار نگرفته است. در این مقاله به مقایسه استراتژی شلو با استراتژی‌های مختلف شطرنجی، آفست سه بعدی و شطرنجی مسطح با فرز انگشتی سر تخت که هم توانایی کف‌تراشی را داشته و هم توانایی دیواره تراشی را داشته پرداخته شده است و پارامترهای برش ابزار برای تمام استراتژی‌های تست شده ثابت نگه داشته شده‌اند. بدین منظور قطعه‌ای که دارای سطوح محدب، مقعر و مسطح است طراحی و این قطعه با استراتژی‌های مختلف فرزکاری گردید. در ادامه به منظور بررسی صافی و زبری سطح قطعه و هم چنین زمان پرداخت استراتژی‌های مختلف آزمایش زبری سنجی انجام گرفت. در این تحقیق علاوه بر زبری سطح از توپوگرافی برای به‌دست‌آوردن میانگین قله‌ها و دره‌ها به‌منظور افزایش اطمینان از صحت آزمایش‌ها استفاده شده است.

## ۲- استراتژی‌های فرزکاری

فرزکاری سطوح منحنی مورد استفاده در صنایع قالب‌سازی و هوافضا مانند سطوح محدب و مقعر قالب‌ها و نیز سطح ایرفویل پره‌های توربین با به‌کارگیری استراتژی‌های مختلفی تسهیل می‌شود. در مقالات متعدد با به‌کارگیری از استراتژی‌های مختلف فرایند فرزکاری را تسهیل کرده‌اند. اما تاکنون استراتژی شلو استفاده نشده است. در این مقاله به بررسی و مقایسه کیفیت سطح قطعه‌ای دارای سطوح محدب، مقعر و مسطح با استراتژی‌های ماشین‌کاری شطرنجی مسطح، آفست سه‌بعدی، شطرنجی، شلو (Shallow) پرداخته شده است. استراتژی ماشین‌کاری شلو یک رویکرد تولیدی است که بر به حداقل رساندن عمق برش‌ها در طول فرآیند ماشین‌کاری تمرکز دارد.

مقدار زبری سطح در سرعت برشی  $450 \text{ m/min}$  و نرخ پیشروی  $0.08 \text{ mm/tooth}$  حاصل شد.

مانه و کومار [12] پژوهشی مروری تحت عنوان تجزیه و تحلیل زبری سطح در هنگام تراشکاری فولاد آلیاژی سخت شده AISI 52100 با استفاده از حداقل کاربرد سیال برش انجام دادند. حسن‌پور و همکاران [13] تأثیر شرایط مختلف روانکاری بر روی زبری سطح فولاد آلیاژی  $4340$  در فرآیند فرزکاری سخت را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که از بین پارامترهای برشی، به ترتیب نرخ پیشروی و سرعت برشی بیشترین تأثیر را بر روی زبری سطح داشته و زبری سطح با افزایش سرعت برشی و کاهش پیشروی کمتر شده است. باگچی و همکاران [14] به بررسی اثرات استراتژی‌های فرزکاری بر نیروها، نرخ براده‌برداری، انحراف ابزار و خطاهای سطح برای زبری ماشین‌کاری سطوح پیچیده پرداختند. آن‌ها در این آزمایش استراتژی‌های ماشین‌کاری شامل درجات مختلف زیگزگ، پروفیل و مارپیچ بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که استراتژی زیگزگ  $90$  درجه کمترین نیروی برشی، انحراف ابزار و مقدار خطای سطح را دارا می‌باشد.

تأثیر استراتژی‌های مسیر ابزار بر زمان ماشین‌کاری، سایش ابزار و زبری سطح در طول فرزکاری فولاد AISI X210Cr12 توسط اوزون و همکاران [15] انجام شد. آن‌ها در این مطالعه، تأثیر چهار روش مختلف ماشین‌کاری شامل تروکوئیدال (Trochoidal)، فالو پارت (Follow Part)، زیگ و زیگ زاگ که در برنامه‌های پکیج CAM رایج هستند و اغلب در صنعت استفاده می‌شوند، مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که استراتژی مسیر ابزار بهینه برای عمر ابزار برش، مسیر ابزار تروکوئیدال است. محمدی و همکاران [16] به تأثیر استراتژی‌های شعاعی، مارپیچی، آفست سه‌بعدی، شطرنجی و پارامترهای مختلف ماشین‌کاری مانند سرعت برشی، سرعت پیشروی، قطر ابزار و عمق ماشین‌کاری پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که استراتژی شعاعی کمترین زبری و شطرنجی بیشترین زبری سطح را دارد. تأثیر استراتژی فرزکاری بر کیفیت سطح قالب فولادی AISI P20 توسط عباس و همکاران [17] انجام شد. آن‌ها در این پژوهش به تأثیر استراتژی‌های مختلف فرزکاری، از جمله روش‌های فرز بالا، فرز پایین، و رویکردهای ترکیبی را بر زبری سطح قالب فولادی AISI P20 بررسی کردند. الهنداوی و الطیبانی [18] به ارزیابی استراتژی‌های مختلف فرزکاری بر عملکرد قطعات جدار نازک آلومینیومی پرداختند. تأثیر استراتژی ماشین‌کاری بر فرزکاری پلی اتر اتکتون توسط بانچسکو و همکاران [19] بررسی شد. آن‌ها در این پژوهش نتایج تجربی در مورد تأثیر برخی از شرایط ماشین‌کاری بر اندازه دما در منطقه فرزکاری، اندازه اجزای نیروی برش، زبری سطح ماشین‌کاری شده ارائه کرده‌اند. مقدسی و همکاران [20] به بررسی تجربی صافی سطح و سلامت سطح در فرآیند تراشکاری داغ فولاد ضدزنگ (630AISI) 4-17-ph به کمک

گزینه‌های قابل‌تنظیم مختلف به‌صورت گسترده، یکی از قدرتمندترین نرم‌افزارهای کم یا ساخت به کمک رایانه است. بعد از پایان مرحله طراحی، از نرم‌افزار کتیا خروجی با فرمت CATproduct و Stl که قابل خواندن در نرم‌افزار پاور میل هستند گرفته شد. در ادامه، خروجی به‌دست‌آمده از نرم‌افزار کتیا را به محیط نرم‌افزار پاور میل وارد کرده و چگونگی نمایش این قطعه در پاور میل در حالت ISO قرار داده شد. برای کار با نرم‌افزار پاور میل ابتدا می‌بایست بلوک خامی را که قرار است در دستگاه قرار بگیرد، تشکیل داده و بعد از آن نقطه صفر قطعه کار را مشخص کرد که در این مقاله جنس مواد بلوک خام، با توجه به کاربرد گسترده آلومینیوم T6 در صنعت هوافضا و هواپیما، از جنس آلومینیوم T6 انتخاب گردید.

بعد از تشکیل بلوک خام، نوبت به انتخاب ابزار مناسب، جهت انجام عملیات ماشین‌کاری است که برای این قطعه ابزار مورد استفاده از نوع END MILL و جنس HSS است که قطری برابر با ۱۰ میلی‌متر دارد. بعد از انتخاب نوع ابزار باید استراتژی مناسبی جهت مشخص کردن بهترین مسیر حرکت ابزار تعیین گردد. نرم‌افزار پاورمیل استراتژی‌های متنوعی را چه در مرحله خشن‌کاری و چه در مرحله پرداخت، در اختیار متخصصان قرار می‌دهد. استراتژی مورد استفاده برای خشن‌کاری این قطعه Model area clearance و از نوع Offset all است. همچنین مقادیر ۸ و ۱ به ترتیب برای عمق برش محوری (Step over) و عمق برش عرضی (Step down) انتخاب شده‌اند. شرایط خشن‌کاری در همه قطعات یکی می‌باشد اما مرحله فرزکاری و پرداخت قطعات با استراتژی‌های متفاوتی انجام شد. در ادامه به استراتژی‌های فرزکاری قسمت پرداخت سطح پرداخته شده است.

### ۳-۲- آزمایش‌های مربوط به استراتژی‌های فرزکاری

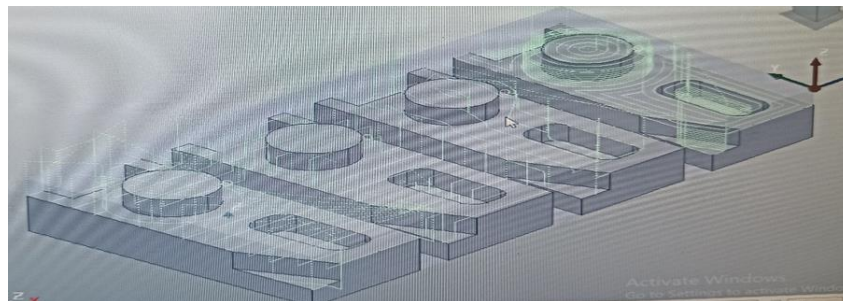
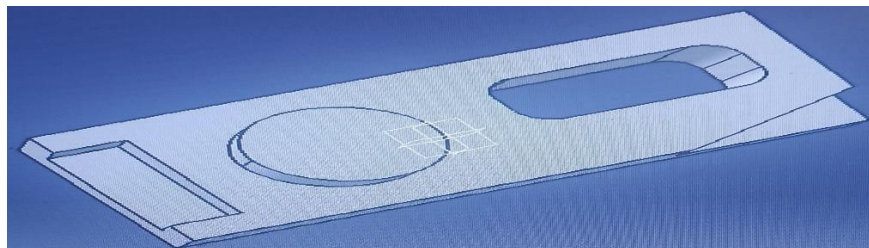
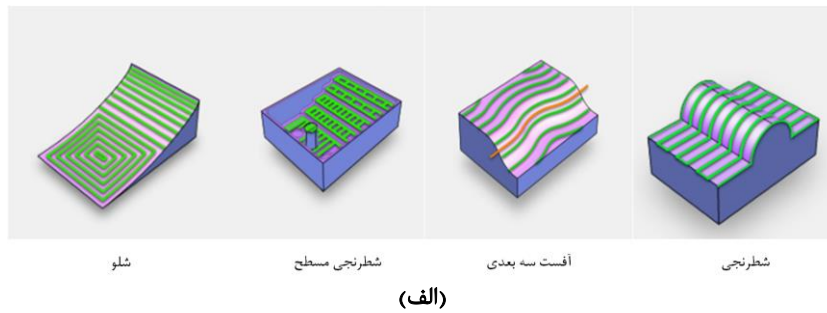
به‌منظور بررسی تأثیر چهار استراتژی مسیر ابزار آفست سه‌بعدی، شطرنجی، شلو و شطرنجی مسطح بر کیفیت سطح، دو آزمایش طرح‌ریزی و انجام شده است که در آن پارامترهای برش ابزار برای تمام استراتژی‌های آزمایش شده ثابت نگه داشته شده‌است. هر کدام از استراتژی‌ها با استفاده از نرم‌افزار پاورمیل شبیه‌سازی شدند. این نرم‌افزار توانایی شبیه‌سازی ماشین‌کاری قطعات با استراتژی‌های پیشرفته را دارد که با نمایش گرافیکی مسیر براده‌برداری و توانایی زیاد در کنترل نحوه شبیه‌سازی مسیرهای مختلف و ابزار، درک مسیر ماشین‌کاری ایجاد شده را قبل از اجرای آن را آسان‌تر می‌نماید. در شکل ۱ (ج) شبیه‌سازی استراتژی‌های مختلف پرداخت مورد استفاده در این مقاله برای ساخت قطعه دارای سطوح محدب، مقعر و مسطح نشان داده شده است.

هدف این استراتژی کاهش نیروهای برش، سایش ابزار و مصرف انرژی در عین حفظ سطوح قابل قبول بهره‌وری و پرداخت سطح است. استراتژی شلو اغلب در عملیات ماشین‌کاری مورد استفاده قرار می‌گیرد که در آن نرخ بالای حذف مواد دغدغه اصلی نیست و تمرکز بر روی دستیابی به دقت، به حداقل رساندن سایش ابزار و بهبود کیفیت سطح است. معمولاً در عملیات تکمیلی مانند کانتورینگ، پروفیل‌سازی و تکمیل سطوح مسطح استفاده می‌شود. ویژگی‌های کلیدی استراتژی شلو شامل استفاده از عمق برش کمتر، سرعت برش بالاتر و نرخ تغذیه کمتر است. با کاهش عمق برش، نیروهای برشی وارد بر ابزار و قطعه کار کاهش می‌یابد که منجر به بهبود عمر ابزار و کاهش مصرف برق می‌شود. علاوه بر این، استفاده از سرعت‌های بالاتر برش می‌تواند به حفظ بهره‌وری در حین دستیابی به سطح مورد نظر کمک کند. به طور کلی، استراتژی شلو یک رویکرد ارزشمند در کاربردهای ماشین‌کاری است که در آن دقت و کیفیت سطح بسیار مهم است و می‌تواند به بهبود کارایی، عمر ابزار و ثبات کلی فرآیند کمک کند. در شکل ۱ (الف) نحوه براده‌برداری استراتژی‌های ارائه شده در این پژوهش نمایش داده شده است.

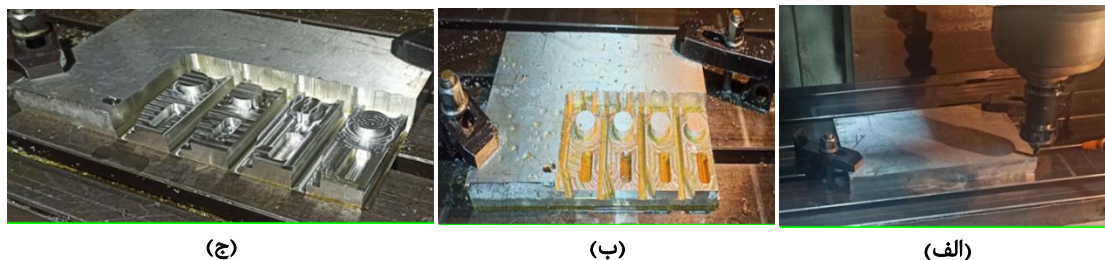
### ۳- طراحی آزمایش‌ها

#### ۳-۱- تجهیزات مورد نیاز آزمایش‌ها

به‌منظور انجام آزمایش‌های استراتژی‌های مختلف فرزکاری سطح انحادار از ماشین VECTORE مدل VMC1000 با کنترلر SIEMENS 802D SL دارای CNC استفاده شده است. ماشین SIEMENS 802D SL دارای حداکثر سرعت چرخش اسپیندل ۸۰۰۰rpm و حداکثر سرعت حرکتی ۲۶۰۰۰mm/Min می‌باشد. در آزمایش‌ها به‌منظور بررسی استراتژی‌های مختلف، از ابزار END MILL با جنس HSS استفاده شده است. در این آزمایش‌ها جنس مواد خام از آلومینیوم T6 می‌باشد. برای ساخت قطعه انحادار دارای سطوح محدب، مقعر و مسطح ابتدا با به‌کاربردن ابزارهای اندازه‌گیری مانند کولیس و خط کش، ابعاد را به طور دقیق اندازه‌گیری کرده و سپس با کمک این ابعاد، شکل قطعه موردنظر همراه با تمامی جزئیات در نرم‌افزار کتیا طراحی شده است. نمای سه‌بعدی قطعه طراحی شده مورد استفاده در این مقاله در شکل ۱ (ب) نشان داده شده است. نرم‌افزار کتیا از بهترین و پرکاربردترین نرم‌افزارها است که در محیط‌های مختلف آن می‌توان بهترین طراحی‌ها را انجام داد و با فرمت‌های مختلف ذخیره کرد. این نرم‌افزار برخلاف محیط طراحی قوی، محیط ماشین‌کاری خوبی نسبت به نرم‌افزارهایی که به این مورد اختصاص یافته‌اند ندارد. برای تعیین مسیر ابزار نیز، دو نرم‌افزار از بهترین و پرکاربردترین نرم‌افزارهای موجود یعنی نرم‌افزار پاور میل و مسترکم استفاده شده است. نرم‌افزار پاورمیل با استراتژی‌های متعدد مخصوصاً در پرداخت‌کاری و همچنین



شکل ۱) الف) نمایش نحوه براده‌برداری استراتژی‌های ارائه شده [23] (ب) قطعه سه‌بعدی طراحی شده در کتیا (ج) شبیه‌سازی استراتژی‌های مختلف پرداخت مورداستفاده برای ساخت قطعه موردنظر



شکل ۲) الف) تصویر بلوک خام آلومینیوم T6 قبل از عملیات خشن‌کاری (ب) تصویر واقعی بلوک بعد از پایان عملیات خشن‌کاری (ج) تصویر پایان عملیات پرداخت بلوک آلومینیومی با استراتژی‌های مختلف

مکانیکی قابل‌پیش‌بینی خواهد بود. برای مثال اشیا زبر بیشتر در معرض خوردگی و ترک‌دار شدن هستند. برای اندازه‌گیری زبری از روش‌های تماسی و غیرتماسی مختلفی استفاده می‌کنند. در تجهیزات معمول برای اندازه‌گیری زبری که به زبری‌سنج معروف هستند از روش تماسی استفاده می‌کنند و یک هد نظیر سوزن‌های گرامافون بر روی سطح حرکت کرده و باتوجه‌به تعداد نوسانات و حداکثر جابه‌جایی می‌تواند زبری سطح را مشخص کند.

در شکل ۲ (الف) تا (ج) به ترتیب تصویر بلوک خام آلومینیوم T6 قبل از عملیات خشن‌کاری، تصویر واقعی بلوک بعد از پایان عملیات خشن‌کاری و تصویر پایان عملیات پرداخت بلوک آلومینیومی با استراتژی‌های مختلف را نشان می‌دهد.

### ۳-۲-۱- آزمایش زبری‌سنجی

زبری‌سنجی برای تعیین بافت سطح است و با تعیین میزان تغییرات عمودی بر سطح نسبت به سطح صاف واقعی تعیین می‌شود. در صورتی‌که این تغییرات زیاد باشد سطح زبر و در صورت کم‌بودن نرم است. این کمیت نقش مهمی در تعیین اثر متقابل اشیا با هم داشته و با دانستن آن بسیاری رفتارهای اجزاء

جدول ۲) نتایج پارامترهای حاصل از دستگاه زبری سنجی برای استراتژی شطرنجی ( $\mu\text{m}$ )

کف قطعه	دیواره مستطیل	دیواره استوانه	
$R_a$	۱/۲	۲/۵	۵/۷
$R_z$	۸	۱۲/۵	۲۸/۸
$R_{Max}$	۱۷/۳	۱۶/۸	۳۲/۴

جدول ۳) نتایج پارامترهای حاصل از دستگاه زبری سنجی برای استراتژی آفست سه بعدی ( $\mu\text{m}$ )

کف قطعه	دیواره مستطیل	دیواره استوانه	
$R_a$	۰/۷	۲/۲	۴
$R_z$	۴/۵	۱۱/۲	۲۱/۵
$R_{Max}$	۶/۲	۱۶/۲	۲۴/۷

جدول ۴) نتایج پارامترهای حاصل از دستگاه زبری سنجی برای استراتژی شطرنجی سطح ( $\mu\text{m}$ )

کف قطعه	دیواره مستطیل	دیواره استوانه	
$R_a$	۰/۶۵	۱/۲	۳/۲
$R_z$	۳/۴	۶/۷	۱۷/۴
$R_{Max}$	۱۶/۵	۱۰/۱	۲۶/۱

جدول ۵) نتایج پارامترهای حاصل از دستگاه زبری سنجی برای استراتژی شلو ( $\mu\text{m}$ )

کف قطعه	دیواره مستطیل	دیواره استوانه	
$R_a$	۰/۶	۰/۶	۲/۹
$R_z$	۳/۲	۳/۵	۱۶/۳
$R_{Max}$	۶/۳	۶/۷	۲۳/۲

پارامترهای دستگاه زبری سنجی مانند میانگین زبری ( $R_a$ )، میانگین قله ها و دره ها ( $R_z$ ) و مجموع بیشترین قله و بیشترین دره ( $R_{Max}$ ) سطوح مختلف استراتژی های متفاوت جهت مقایسه به ترتیب در جداول ۶ تا ۸ آورده شده است.

جدول ۶) مقایسه ( $\mu\text{m}$ )  $R_a$

نام قطعه (استراتژی)	دیواره استوانه	دیواره مستطیل	کف
قطعه ۱ (استراتژی شطرنجی)	۲/۵	۱/۲	۵/۷
قطعه ۲ (استراتژی آفست سه بعدی)	۲/۲	۰/۷	۴
قطعه ۳ (استراتژی شطرنجی سطح)	۱/۲	۰/۶۵	۳/۲
قطعه ۴ (استراتژی شلو)	۰/۶	۰/۶	۲/۹



شکل ۳) دستگاه زبری سنج (Hommlerwerke T8000 ساخت آلمان)

جدول ۱) شرایط دستگاه زبری سنجی برای انجام آزمایش

TK300	نوع برخاست
800 $\mu\text{m}$	محدوده اندازه گیری
4.80 mm	طول ارزیابی
0.15 mm/s	سرعت
0.800 mm	Lc (Cut Off)
M1 DIN4777	فیلتر

در این مقاله از دستگاه زبری سنجی ساخت آلمان Hommlerwerke T8000 که در شکل ۳ نشان داده شده است استفاده شده است. آزمایش زبری سنجی بر روی قطعات برای هر استراتژی در سه سطوح محدب (دیواره استوانه ای)، مقعر (دیواره مستطیلی) و مسطح (کف قطعه) انجام شد. شرایط دستگاه زبری سنجی برای انجام آزمایش ها در جدول ۱ نشان داده شده است. بعد از انجام آزمایش زبری سنجی قطعات با استراتژی های متفاوت، پارامترها و نمودارهای مربوط به هر سطوح از استراتژی ها، از دستگاه زبری سنجی استخراج گردید. پارامترهایی که از دستگاه زبری سنجی حاصل شده است به صورت زیر است:

$R_a$ : Roughness average

$R_z$ : Average Peaks and Valleys ( $R_z = R_p + R_v$ )

$R_{Max}$  = Maximum Peak and Valley ( $R_{Max} = R_{V_{Max}} + R_{P_{Max}}$ )

#### ۴- نتایج

##### ۴-۱- نتایج آزمایش زبری سنجی

نتایج پارامترهای حاصل از دستگاه زبری سنجی برای استراتژی های مختلف شطرنجی، آفست سه بعدی، شطرنجی مسطح، شلو برای سه سطح دیواره استوانه، دیواره مستطیل و کف قطعه به ترتیب در جداول ۲ تا ۵ نشان شده است.



موضوع را می‌توان به عمق کم برش‌ها، کاهش نیروهای برش، سرعت برش بالاتر و نرخ تغذیه کمتر در طول فرآیند ماشین‌کاری در استراتژی شلو دانست. با کاهش عمق برش، نیروهای برشی وارد بر ابزار و قطعه کار کاهش می‌یابد که منجر به بهبود عمر ابزار و کاهش مصرف برق می‌شود. علاوه بر این، استفاده از سرعت‌های بالاتر برش می‌تواند به حفظ بهره‌وری در حین دستیابی به سطح مورد نظر کمک کند. به طور کلی، استراتژی شلو یک رویکرد ارزشمند در کاربردهای ماشین‌کاری است که در آن دقت و کیفیت سطح بسیار مهم است و می‌تواند به بهبود کارایی، عمر ابزار و ثبات کلی فرآیند کمک کند. با توجه به نتایج جدول ۶ و نمودار شکل ۴ استراتژی شطرنجی در تمامی سطوح (کف قطعه، دیواره مستطیلی و دیواره استوانه‌ای) بیشترین مقدار پارامتر میانگین زبری ( $R_a$ ) در بین تمام استراتژی‌های مورد مطالعه در این پژوهش را دارد. در استراتژی شطرنجی حرکت‌های رفت و برگشتی مطابق با پروفیل سطح قطعه و همزمان موازی با صفحه XY انجام می‌دهد و تنها ارتفاع Z آن تغییر می‌کند. در این حالت زمان ماشین‌کاری بسیار کاهش می‌یابد. یکی از مزایای این روش این است که زاویه ی مسیر حرکت ابزار روی قطعه قابل‌تغییر است. این روش برای نیمه‌پرداخت‌کاری و از بین بردن ردهای باقیمانده‌ی ابزار روی سطح قطعه از مرحله‌ی خشن‌کاری و همچنین پرداخت‌کاری مناطق با انحنای کم مناسب است [9]. در تمامی سطوح (کف قطعه، دیواره مستطیلی و دیواره استوانه‌ای)، مقدار پارامتر میانگین زبری ( $R_a$ ) استراتژی آفست سه‌بعدی از استراتژی شطرنجی کمتر است که تحقیقات شجری و همکاران [9] این موضوع را تایید می‌کند.

#### ۴-۲- توپوگرافی سطح با استفاده از میکروسکوپ نوری

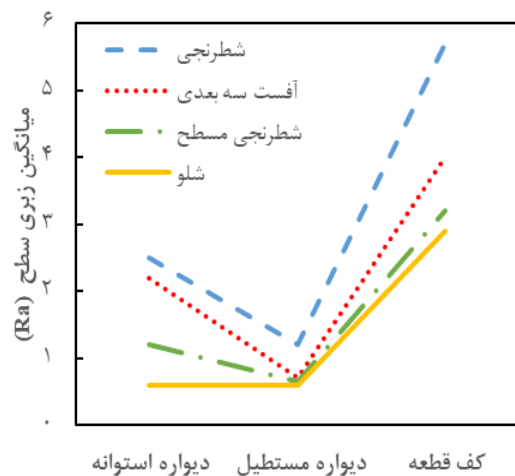
میکروسکوپ نوری یک ابزار نوری است که با استفاده از اصل نوری برای بزرگ کردن و تصویرکردن اشیای کوچک که توسط چشم انسان قابل‌تشخیص نیست، به‌منظور استخراج‌کردن اطلاعات میکروساختار برای افراد استفاده می‌شود. میکروسکوپ نوری اصل بزرگ‌نمایی و تصویربرداری یک شیء توسط یک لنز نوری با یک سطح منحنی است که اندازه یک شیء کوچک را به چشم انسان بزرگ می‌کند. در شکل‌های زیر تصاویری از بزرگ‌نمایی ۱۰ برابری قطعات مورد آزمایش نمایش داده شده است که با استفاده از نتایج حاصل شده از زبری‌سنجی ( $R_z$ ) آنها مورد بررسی قرار داده شده است. نتایج حاصل از میکروسکوپ نوری برای استراتژی شطرنجی در شکل ۵ (الف) نشان داده شده است. در شکل ۵ (ب)  $R_z$  های مربوط به سطوح مختلف استراتژی شطرنجی با هم مقایسه شده‌اند.

جدول ۷) مقایسه  $R_z$  ( $\mu m$ )

نام قطعه (استراتژی)	دیواره استوانه	دیواره مستطیل	کف
قطعه ۱ (استراتژی شطرنجی)	۱۲/۵	۸	۲۸/۸
قطعه ۲ (استراتژی آفست سه‌بعدی)	۱۱/۲	۴/۵	۲۱/۵
قطعه ۳ (استراتژی شطرنجی مسطح)	۶/۷	۳/۴	۱۷/۴
قطعه ۴ (استراتژی شلو)	۳/۵	۳/۲	۱۶/۳

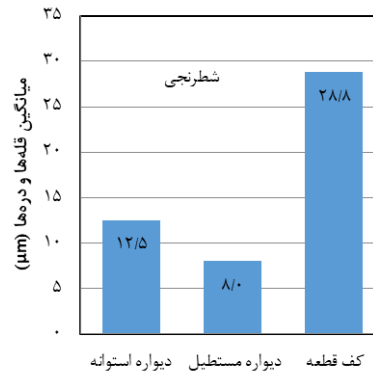
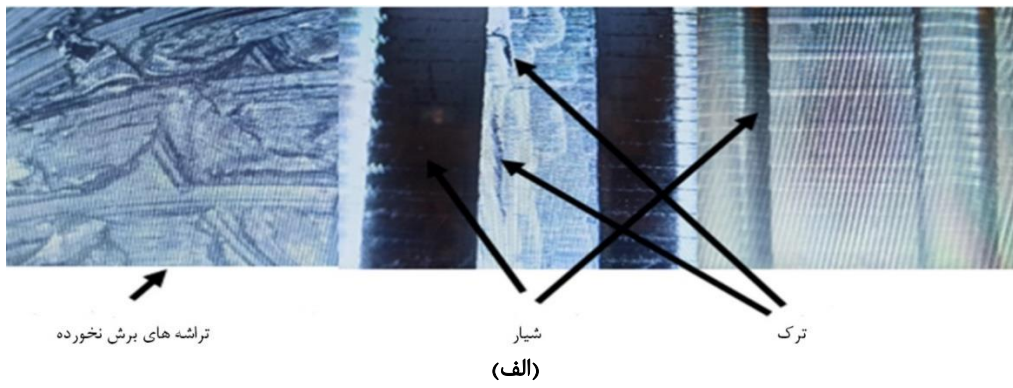
جدول ۸) مقایسه  $R_{Max}$  ( $\mu m$ )

نام قطعه (استراتژی)	دیواره استوانه	دیواره مستطیل	کف
قطعه ۱ (استراتژی شطرنجی)	۱۶/۸	۱۷/۳	۳۲/۴
قطعه ۲ (استراتژی آفست سه‌بعدی)	۱۶/۲	۶/۲	۲۴/۷
قطعه ۳ (استراتژی شطرنجی مسطح)	۱۰/۱	۶/۵	۲۶/۱
قطعه ۴ (استراتژی شلو)	۶/۷	۶/۳	۲۳/۲



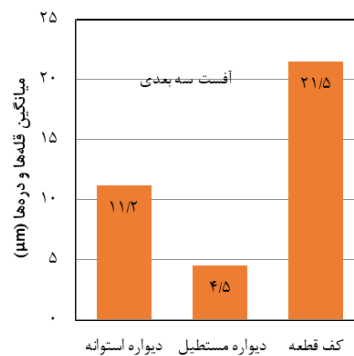
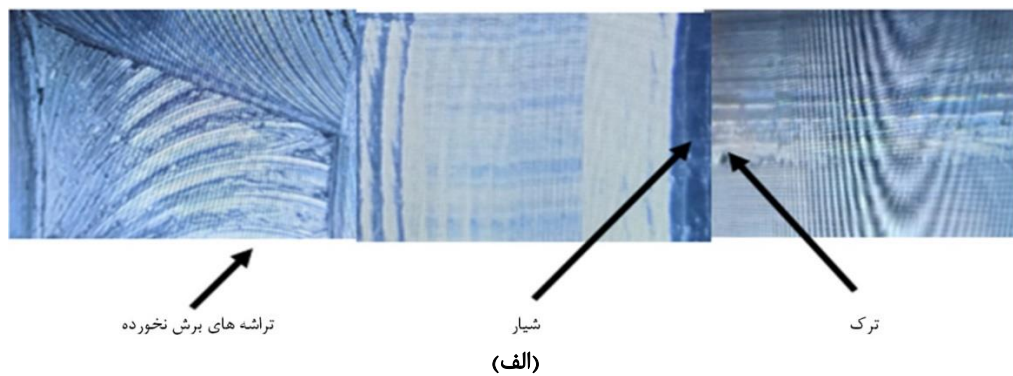
شکل ۴) مقایسه زبری سطح استراتژی‌ها

نتایج جدول ۶ و شکل ۴ نشان می‌دهد که در تمامی استراتژی‌ها مقادیر پارامتر میانگین زبری ( $R_a$ )، در دیواره مستطیلی از بقیه سطوح کمتر است. هم‌چنین با توجه به نتایج جدول ۶ و نمودار شکل ۴ می‌توان دید که در تمامی استراتژی‌ها مقادیر پارامتر میانگین زبری ( $R_a$ )، در کف قطعه از بقیه سطوح بیشتر است. در ماشین‌کاری کف قطعه، مقدار پارامتر میانگین زبری ( $R_a$ ) استراتژی شلو از بقیه استراتژی‌ها پایین‌تر است. علت این



(ب)

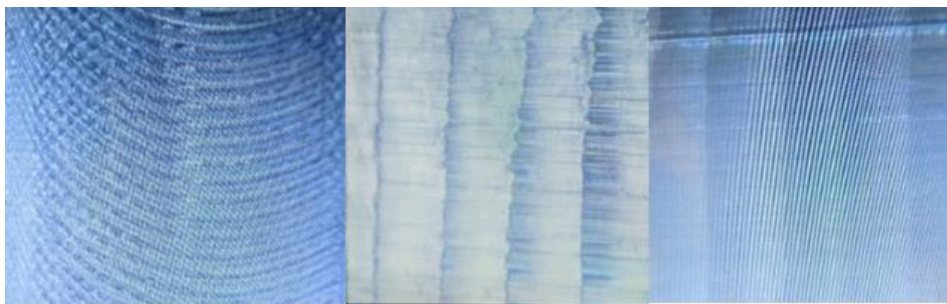
شکل ۵) الف) تصویری از بزرگ‌نمایی قطعه ۱ (استراتژی شطرنجی) ب) استراتژی شطرنجی



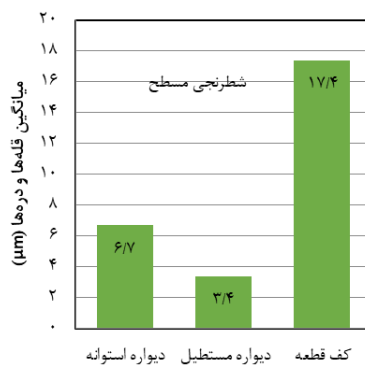
(ب)

شکل ۶) الف) تصویری از بزرگ‌نمایی قطعه ۲ (استراتژی آفست سه بعدی) ب) استراتژی آفست سه بعدی





(الف)

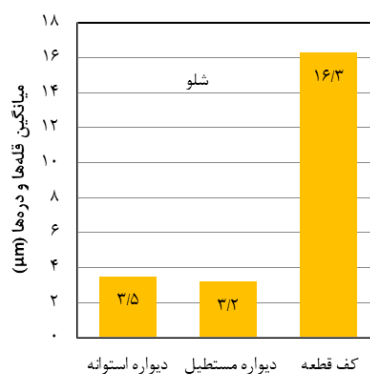


(ب)

شکل ۷ (الف) تصویری از بزرگ‌نمایی قطعه ۳ (استراتژی شترنجی مسطح) ب)  $R_z$  استراتژی شترنجی مسطح



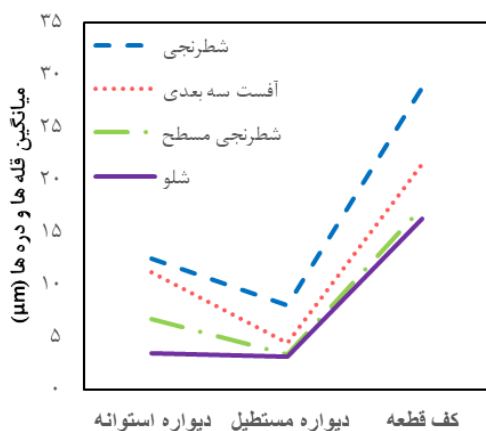
(الف)



(ب)

شکل ۸ (الف) تصویری از بزرگ‌نمایی قطعه ۴ (استراتژی شلو) ب)  $R_z$  استراتژی شلو

محاسبه گردید. در جدول ۹ زمان پرداخت فرزکاری هر استراتژی در برنامه پاورمیل و در واقعیت نشان داده شده است و می‌توان از آن برای تخمین هزینه و جدول زمانی پروژه استفاده کرد. اختلاف زمانی پیش آمده در برنامه با واقعیت به دلیل پردازش اطلاعات دستگاه و... می‌باشد. باتوجه به شکل ۱۰ که زمان پرداخت استراتژی‌های مختلف را نشان می‌دهد می‌توان دریافت که استراتژی شلو، شطرنجی مسطح، آفست سه‌بعدی، شطرنجی به ترتیب بیشترین تا کمترین زمان پرداخت را دارند. همان‌طور که مشاهده می‌گردد استراتژی شطرنجی دارای نازل‌ترین صافی سطح و بیشترین عدد زبری می‌باشد. همان‌طور که قابل مشاهده است در تمامی آزمایش‌ها استراتژی آفست سه‌بعدی دارای عدد زبری کمتر نسبت به استراتژی شطرنجی می‌باشد. در همه آزمایش‌ها استراتژی شلو دارای بهترین صافی سطح و کمترین عدد زبری می‌باشد که دلیل این امر این است که این استراتژی هم دیواره و هم کف را براده‌برداری می‌کند؛ ولی استراتژی شلو زمان را به شدت افزایش می‌دهد. در جدول ۱۰ مقایسه کمی بین نتایج حاصل شده در این مقاله با سایر پژوهش‌ها در این زمینه انجام شده است. با توجه به جدول ۱۰ و شکل ۴ مشاهده می‌شود که در این مقاله، استراتژی شطرنجی بیشترین زبری سطح را دارد که تحقیقات شجری و همکاران [7] آن را تایید می‌کند. در این مقاله، میانگین زبری ( $R_a$ ) استراتژی آفست سه‌بعدی از شطرنجی بهتر است که تحقیقات [2, 24, 25] آن را تایید می‌کند. جدول ۱۱ نتایج میانگین زبری ( $R_a$ ) این پژوهش با سایر تحقیقات در این زمینه (با ابزار متفاوت و سطح یکسان و استراتژی متفاوت) را نشان می‌دهد با توجه به نتایج جدول ۱۱ می‌توان دریافت که ماشین‌کاری با ابزار فرز انگشتی سرتخت و استراتژی شلو چقدر در بهبود میانگین زبری سطوح محدب تاثیرگذار است. البته کاربرد اصلی استراتژی شلو سطوح صاف است و بهترین عملکرد در سطوح صاف دارد.



شکل ۹) مقایسه  $R_a$  های هر چهار استراتژی

باتوجه به نتایج زبری‌سنجی و مقایسه  $R_z$  ها و شکل ۵ (ب) می‌توان دریافت که استراتژی شطرنجی دارای نازل‌ترین صافی سطح و بیشترین عدد زبری می‌باشد.

در شکل ۶ (الف) نتایج حاصل از میکروسکوپ نوری برای استراتژی آفست سه‌بعدی نشان داده شده است. از شکل ۶ (الف) می‌توان دریافت که این استراتژی در بعضی نقاط نتوانسته براده‌برداری کند و شکل نهایی قطعه را به صورت مطلوب در بیاورد. در شکل ۶ (ب)  $R_z$  های مربوط به سطوح مختلف استراتژی آفست سه‌بعدی با هم مقایسه شده‌اند. باتوجه به نتایج زبری‌سنجی و مقایسه  $R_z$  ها استراتژی آفست سه‌بعدی نسبت به استراتژی شطرنجی صافی سطح بالاتر و زبری پایین‌تری دارد. از شکل ۶ (ب) می‌توان دریافت که این استراتژی هم مانند استراتژی شطرنجی در بعضی نقاط نتوانسته براده‌برداری کند و شکل نهایی قطعه را به صورت مطلوب در بیاورد. پس می‌توانیم نتیجه بگیریم که این دو استراتژی مناسب این قطعه و قطعه‌های مشابه نیستند.

در شکل ۷ (الف) نتایج حاصل از میکروسکوپ نوری برای استراتژی شطرنجی مسطح نشان داده شده است. در شکل ۷ (ب)  $R_z$  های مربوط به سطوح مختلف استراتژی شطرنجی مسطح با هم مقایسه شده‌اند. باتوجه به نتایج زبری‌سنجی و مقایسه  $R_z$  ها و شکل ۷ (ب) استراتژی شطرنجی مسطح دارای صافی سطح مطلوبی نسبت به استراتژی‌های آفست سه‌بعدی و شطرنجی می‌باشد.

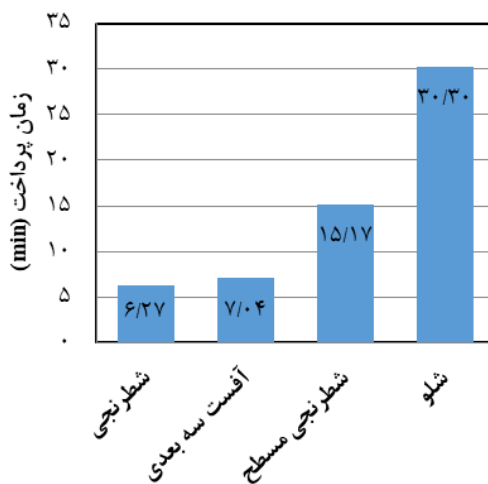
در شکل ۸ (الف) نتایج حاصل از میکروسکوپ نوری برای استراتژی شلو نشان داده شده است. در شکل ۸ (ب)  $R_z$  های مربوط به سطوح مختلف استراتژی شلو با هم مقایسه شده‌اند. باتوجه به نتایج زبری‌سنجی و مقایسه  $R_z$  ها و شکل ۸ (ب) استراتژی شلو بهترین صافی سطح را دارد.

باتوجه به شکل ۹ که میانگین قله‌ها و دره‌ها ( $R_z$ ) سطوح مختلف هر چهار استراتژی را نشان می‌دهد می‌توان دریافت که استراتژی شلو، شطرنجی مسطح، آفست سه‌بعدی، شطرنجی به ترتیب بیشترین تا کمترین صافی سطح را دارند.

محاسبه زمان ماشین‌کاری CNC می‌تواند یک فرآیند پیچیده باشد، زیرا عوامل زیادی وجود دارد که می‌تواند کل زمان مورد نیاز را تحت تاثیر قرار دهد. نوع عملیات ماشین‌کاری، تعداد کل چرخه‌های ماشین‌کاری، زمان لازم برای تنظیم و تغییرات ابزار، عملیات ماشین‌کاری بر روی زمان کل ماشین‌کاری موثر هستند. در این پژوهش ابتدا نوع عملیات ماشین‌کاری تعیین شد و سپس تعداد کل چرخه‌های ماشین‌کاری مورد نیاز و زمان مورد نیاز برای هر چرخه ماشین‌کاری محاسبه گردید. در مرحله بعد زمان لازم برای تنظیم و تغییرات ابزار محاسبه گردید. در ادامه زمان عملیات ماشین‌کاری اندازه‌گیری گردید. در نهایت، با توجه به مجموع موارد مطرح شده کل زمان پرداخت هر استراتژی

جدول ۹) زمان پرداخت استراتژی‌های مختلف

نام قطعه (استراتژی)	زمان فرزکاری در برنامه پاورمیل با فید ۲۰	زمان فرزکاری در واقعیت با فید ۲۰
قطعه ۱ (استراتژی شطرنجی)	۵:۳۵"	۶:۲۷"
قطعه ۲ (استراتژی آفست سه‌بعدی)	۶:۲۵"	۷:۰۴"
قطعه ۳ (استراتژی شطرنجی مسطح)	۱۳:۶۵"	۱۵:۱۷"
قطعه ۴ (استراتژی شلو)	۲۶:۰۰"	۳۰:۳۰"



شکل ۱۰) مقایسه زمان پرداخت استراتژی‌ها

جدول ۱۰) مقایسه کمی نتایج این پژوهش با تحقیقات مشابه

ردیف	مرجع	سطح مورد بررسی	استراتژی‌های مورد بررسی	ابزار کار	نتیجه
۱	[7]	سطح انحنا دار (محدب)	آفست سه بعدی، شطرنجی یک طرفه، شطرنجی دو طرفه، Optimize constant Z	فرزانگشتی سر تخت	Optimized بیشترین زمان و کمترین زبری، شطرنجی دوطرفه کمترین زمان و بیشترین زبری
۲	[9]	سطح انحنا دار (محدب)	شعاعی، مارپیچی، آفست سه بعدی، شطرنجی	فرزانگشتی سر کروی	شعاعی کمترین نیروی برشی و مارپیچی بیشترین نیروی برشی
۳	[24]	سطح انحنا دار (محدب)	آفست سه‌بعدی، شطرنجی، مارپیچی	فرز انگشتی سر کروی	مارپیچی بیشترین زبری سطح و آفست سه‌بعدی کمترین زبری سطح
۴	[25]	سطح انحنا دار (محدب) سطح با زاویه ۰ تا ۳۰ درجه	مارپیچی، شطرنجی، شعاعی، آفست سه بعدی	فرز انگشتی سر کروی	مارپیچی بیشترین نیرو، زبری و بدترین سطح، شعاعی بهترین سطح
۵	پژوهش حاضر	سطح انحنا دار (محدب و مقعر)، سطوح صاف	شطرنجی، شطرنجی مسطح، آفست سه بعدی، شلو	فرزانگشتی سر تخت	شلو کمترین زبری، شطرنجی بیشترین زبری سطح

جدول ۱۱) نتایج میانگین زبری پژوهش حاضر با سایر تحقیقات در این زمینه (با ابزار متفاوت و سطح یکسان و استراتژی متفاوت)

ردیف	مرجع	سطح مورد بررسی	ابزار مورد استفاده	استراتژی	میانگین زبری ( $R_a$ ) ( $\mu m$ )
۱	[24]	محدب	فرز انگشتی سر کروی	مارپیچی	۲/۵
۲	[9]	محدب	فرز انگشتی سر کروی	مارپیچی	۲/۰۳۷
۳	پژوهش حاضر	محدب	فرز انگشتی سرتخت	شلو	۰/۶

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله استراتژی نوآورانه شلو برای اولین بار مورد بررسی و مقایسه با سایر استراتژی‌ها قرار گرفته است. در این مقاله مقایسه استراتژی‌ها با فرز انگشتی سر تخت انجام شده است که هم توانایی کف تراشی را دارد و هم توانایی دیواره تراشی را دارد و پارامترهای برش ابزار برای تمام استراتژی‌های تست شده ثابت نگه داشته شده‌اند. با بررسی زبری‌سنجی و توپوگرافی سطح استراتژی‌های ماشین‌کاری در طول انجام این پژوهش، نتایج مهم زیر در مورد چهار استراتژی معروف ماشین‌کاری و همچنین بهبود کیفیت فرایند ماشین‌کاری به دست آمده است.

- با توجه به نتایج به دست آمده، برای ساخت قطعات با کمک استراتژی‌های ماشین‌کاری اگر صافی سطح بسیار مطلوبی مورد نظر باشد می‌توان از استراتژی شلو استفاده کرد؛ اما باید به این نکته توجه کرد که این استراتژی زمان ماشین‌کاری را به شدت افزایش می‌دهد.
- اگر صافی سطح نسبتاً مناسب همراه با زمان ماشین‌کاری کوتاه‌تر نسبت به زمان ماشین‌کاری سایر روش‌ها مدنظر باشد استفاده از استراتژی شطرنجی مسطح پیشنهاد می‌شود.
- استراتژی شطرنجی مسطح بهترین استراتژی است؛ چون زمان پرداخت آن نسبت به زمان پرداخت استراتژی شلو تقریباً نصف می‌باشد و صافی سطح مطلوبی دارد.
- استراتژی‌های شطرنجی و آفست سه‌بعدی نتوانستند شکل قطعه مورد نظر را به صورت مطلوب درآوردند در نتیجه پیشنهاد می‌شود در قطعاتی مانند قطعه مورد آزمایش که دارای صفحات محدب، مقعر و مسطح هستند از این دو استراتژی استفاده نگردد.
- بهترین مقدار پارامتر  $R_a$  در بین تمام سطوح استراتژی‌های متفاوت، مربوط به سطح دیواره استوانه با ماشین‌کاری استراتژی شلو است که مقدار آن برابر با ۰/۶ است.
- بهترین مقدار پارامتر  $R_z$  در بین تمام سطوح استراتژی‌های متفاوت، مربوط به سطح دیواره

مستطیلی با ماشین‌کاری استراتژی شلو است که مقدار آن برابر با ۳/۲ است.

- نتایج زبری‌سنجی و مقایسه  $R_z$ ها نشان داد که استراتژی شطرنجی دارای نازل‌ترین صافی سطح و بیشترین عدد زبری است.
- نتایج زمان پرداخت استراتژی‌ها نشان داد که استراتژی شلو، شطرنجی مسطح، آفست سه‌بعدی، شطرنجی به ترتیب بیشترین تا کمترین زمان پرداخت را دارند.

## ۶- چشم‌انداز تحقیق

با توجه به مطالعه جامعی که در این مقاله بر روی استراتژی‌های پرداخت ماشین‌کاری صورت گرفت می‌توان گفت که در ماشین‌کاری قطعات با تکنولوژی بالا مانند صنعت هوافضا، صنعت دفاعی و غیره که صافی سطح بسیار مطلوبی مورد نظر است؛ در واقع سطحی صاف به هزینه و زمان پرداخت ارجحیت دارد می‌توان از استراتژی شلو استفاده کرد؛ اما باید به این نکته توجه کرد که این استراتژی زمان ماشین‌کاری را به شدت افزایش می‌دهد. اما اگر صافی سطح نسبتاً مطلوب همراه با زمان ماشین‌کاری کوتاه‌تر مدنظر باشد استفاده از استراتژی شطرنجی مسطح پیشنهاد می‌شود. استراتژی شطرنجی مسطح بهترین استراتژی است؛ چون زمان پرداخت آن نسبت به زمان پرداخت استراتژی شلو تقریباً نصف می‌باشد و صافی سطح نسبتاً مطلوبی نسبت به سایر استراتژی‌ها دارد.

**تاییدیه اخلاقی:** همه نویسندگان اعلام می‌کنند که این مقاله در زمان ارسال برای این نشریه، در هیچ نشریه ایرانی یا غیرایرانی در حال بررسی نبوده و تا تعیین تکلیف قطعی در این نشریه برای هیچ نشریه ایرانی یا غیرایرانی دیگری ارسال نخواهد شد.

**تعارض منافع:** همه نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ تضاد منافی ندارند. تحقیقات مستقل است و تحت تأثیر عوامل خارجی مانند منابع مالی، روابط شخصی یا حرفه‌ای یا وابستگی‌های سیاسی نیست. در انجام تحقیق و تجزیه و تحلیل نتایج اصول صداقت آکادمیک و رفتار اخلاقی در طول این پروژه کاملاً رعایت شده است.

**منابع مالی:** همه نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچگونه منبع مالی و حمایتی برای این پژوهش وجود ندارد.

AISI X210Cr12 steel. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2022 Mar;119(3):2709-20.

16- Mohammadi H, Eskandari H, Danaee I. Investigation the Milling Strategies Effects on Machining of Convex Surfaces made of Glass/Epoxy Composite. Journal of Simulation and Analysis of Novel Technologies in Mechanical Engineering.;10(1):759-70.

17- Abbas AT, Abdelnasser E, Naeim N, Alqosaibi KF, Al-Bahkali EA, Elkaseer A. Effect of Milling Strategy on the Surface Quality of AISI P20 Mold Steel. Metals. 2023 Dec 29;14(1):48.

18- Elhendawy GA, El-Taybany Y. Evaluation of different milling strategies on the performance of aluminium thin-walled parts. International Journal of Machining and Machinability of Materials. 2024;26(1):85-96.

19- Beşliu-Băncescu I, Tamaşag I, Slătineanu L. The influence of the machining strategy on milling of polyetheretherketone (PEEK). The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2024 May;132(5):2773-85.

20- Moghadasi AH, Hadad MJ, Kazemi Nasrabadi M. Experimental Study on surface roughness and quality of Hybrid MQL and Thermally-Enhanced Turning of Stainless Steel 17-4 PH (AISI 630). Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2020 Jan 21;6(8):21-32.

21- Siahvashi A, Shahbazi M, Niknam S.A. The use of a neuro-fuzzy network coupled with meta-heuristic learning methods to predict surface roughness in the machining of aluminum alloys, International Journal of Manufacturing Engineering 2023-11-06, Volume 10, Issue 11 - Serial Number 73, January 2024, Pages 49-60.

22- Bagheri A, Abedini V, Hajjalimohammadi A. Experimental Investigation of the Effective Parameters in 7075-T6 Aluminum Machining Process on Surface Roughness Using Minimum Quantity Lubrication (MQL) and Cold Fluid. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2021 Aug 23;8(6):7-14.

23- Powermill Manual, Delcam, 2010.

24- Shajari SH, Sadeghi M.H, Hasanpour H, Khoran M. Experimental investigation of the effect of milling strategies on time and roughness of curved surfaces. The 12th Conference of Manufacturing and Production Engineering of Iran. 2011. [In Persian]

25- Shajari SH, Sadeghi M.H. Investigating the effect of various milling strategies in machining a sample of convex surfaces made of stainless steel. Dissertation of Tarbiat Modares University - Technical Faculty. 2011. [In Persian]

1- Brown & Sharpe Manufacturing Company (Providence, RI). Practical Treatise on Milling and Milling Machines. Brown & Sharpe Manufacturing Company; 1914.

2- Kim BH, Chu CN. Effect of cutter mark on surface roughness and scallop height in sculptured surface machining. Computer-Aided Design. 1994 Mar 1;26(3):179-88.

3- Vickers GW, Quan KW. Ball-mills versus end-mills for curved surface machining.

4- Warkentin A. Multi-point machining of sculptured surfaces.

5- 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 May 10;136(1-3):209-16.

6- Toh CK. A study of the effects of cutter path strategies and orientations in milling. Journal of materials processing technology. 2004 Oct 30;152(3):346-56.

7- Toh CK. Cutter path orientations when high-speed finish milling inclined hardened steel. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2006 Jan;27:473-80.

8- Mali RA, Aiswadesh R, Gupta TV. The influence of tool-path strategies and cutting parameters on cutting forces, tool wear and surface quality in finish milling of Aluminium 7075 curved surface. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020 May;108:589-601.

9- Shajari S, Sadeghi MH, Hassanpour H. The influence of tool path strategies on cutting force and surface texture during ball end milling of low curvature convex surfaces. The Scientific World Journal. 2014;2014(1):374526.

10- Varga J, Spišák E, Gajdoš I, Mulidrán P. Comparison of milling strategies in the production of shaped surfaces. Adv. Sci. Technol. Res. J. 2022 Dec 1;16:267-74.

11- Rasti A, Hassanpour H, Sadeghi MH, Sabbaghi Farshi S. Investigation of surface roughness in high speed milling of titanium alloy. Modares Mechanical Engineering. 2016 Feb 10;15(13):82-5.

12- Mane S, Kumar S. Analysis of surface roughness during turning of AISI 52100 hardened alloy steel using minimal cutting fluid application. Advances in Materials and Processing Technologies. 2022 Aug 31;8(sup1):138-49.

13- Hassanpour H, Sadeghi MH. Effect of cutting fluid application on surface roughness in hard milling of 4340-alloyed steel. Modares Mechanical Engineering. 2015 Mar 10;14(14):50-60.

14- Bagci E, Yüncüoğlu EU. The Effects of Milling Strategies on Forces, Material Removal Rate, Tool Deflection, and Surface Errors for the Rough Machining of Complex Surfaces. Journal of Mechanical Engineering/Strojniški Vestnik. 2017 Nov 1;63(11).

15- Uzun M, Usca ŪA, Kuntoğlu M, Gupta MK. Influence of tool path strategies on machining time, tool wear, and surface roughness during milling of