Archive of SID

مجله مهندسی مکانیک مدرس، آبان ۱۳۹۴، دوره ۱۵، شماره ۱۳، ویژه‌نامه مجموعه مقالات کنفرانس، ص‌ص ۱۵۰-۱۵۷

مجموعه مقالات کنفرانس ماشین‌کاری و ماشین‌های ابزار پیشرفته، تهران، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳ و ۱۴ آبان ۱۳۹۴

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی استراتژی‌های مسیر ابزار در فرزکاری سه‌محوره و پنج‌محوره

حمید رمضانی ثالث[۱]، حسین امیرآبادی[۲*]

۱- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

* بیرجند، صندوق پستی ۹۷۱۷۵/۶۱۵، hamirabadi@birjand.ac.ir

چکیده

افزایش راندمان و دقت تولید قطعات دارای سطوح پیچیده توسط ماشین‌های کنترل عددی در دنیای صنعتی امروزه یک ضرورت است. انتخاب استراتژی مسیر ابزار در نرم‌افزارهای ساخت به کمک کامپیوتر، نقش به سزایی در تعیین میزان مسافت حرکت ابزار، میزان درگیری بین ابزار و قطعه‌کار و تعداد محورهای مورد استفاده در هر مرحله از عملیات ماشین‌کاری دارد. انتخاب مطلوب مسیر ابزار و تنظیم‌های پیرامون آن می‌تواند باعث بهبود راندمان ماشین‌کاری و بالا رفتن دقت عملیات ماشین‌کاری شود. هدف از این پژوهش، بررسی استراتژی‌های مسیر ابزار در ماشین‌کاری چندمحوره، به منظور انتخاب بهترین استراتژی برای مدل‌های کروی مقعر، کروی محدب، سطح دارای فرم آزاد، سطح دوران یافته، سطح دارای شیب تند و سطح اکسترود شده می‌باشد. در این راستا از نرم‌افزار پاورمیل به عنوان یکی از نرم‌افزارهای ساخت به کمک کامپیوتر و از نرم‌افزار وریکات به منظور شبیه‌سازی عملیات ماشین‌کاری و بهینه‌سازی برنامه‌های کنترل عددی استفاده گردید. سپس با انجام آزمایش‌های تجربی ماشین‌کاری سه‌محوره و شبیه‌سازی ماشین‌کاری سه‌محوره و پنج‌محوره، استراتژی‌های مختلف مسیر ابزار از لحاظ زمان ماشین‌کاری و متوسط بار باقی‌مانده بر واحد سطح با هم مقایسه و استراتژی بهینه‌ی مربوط به هر مدل انتخاب گردید. بررسی‌ها نشان داد که استفاده از نرخ پیشروی متغیر و بهینه در استراتژی‌های مختلف مسیر ابزار، باعث نزدیک شدن زمان ماشین‌کاری آن‌ها به یکدیگر می‌گردد.

کلید واژگان: فرزکاری چندمحوره، استراتژی مسیر ابزار، طراحی و ساخت به کمک کامپیوتر، شبیه‌سازی عملیات ماشین‌کاری

Investigation of Tool Path Strategies for Three-axes and Five-axes Milling with Feed Rate optimization

Hamid Ramazani Sales, Hossein AmirAbadi *

Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran
* P.O.B. 97175/615, Birjand, Iran, hamirabadi@birjand.ac.ir

ABSTRACT

Enhance in efficiency and accuracy of the parts production with complex surface by CNC machines is a necessity in nowadays industrial world. Selecting the type of tool-path strategy in CAM software has a significant role in determining the length of tool movement, the material removal rate and the number of axes required in each stage of machining operation. Optimal choice of the tool-path and its peripheral configuration can improve machining precision and efficiency. This research aim is to identify and evaluate the different tool-path strategies in multi-axes machining in order to choose the best strategy for each models of concave spherical, convex spherical, freeform surfaces, revolve surfaces, steep slope surfaces and extruded surfaces. In this regard, Powermill and Vericut softwares were used for simulation of machining operation and NC program optimization. Then, with experimental testing of three-axes machining and three-axes and five-axes machining simulation, different tool-path strategies were compared with each other in terms of machining time and the average of residual of machining on surface unit. Finally, the optimal strategy for each model was selected. Results demonstrated that incorporation of varying and optimal feed rates in different strategies of tool-paths causes their machining times to be close together.

Keywords: CAD/CAM, Complex Surfaces, Multi-axes Milling, Simulation of Machining Operation, Tool-path Strategy.

۱- مقدمه

انتخاب استراتژی مناسب مسیر ابزار در فرآیند فرزکاری سبب کاهش زمان ماشین‌کاری، بهبود کیفیت سطح قطعه‌کار، افزایش عمر ابزار، بالا رفتن قابلیت تولید و کاهش هزینه‌ها می‌گردد [۱]. در عملیات ماشین‌کاری چندمحوره، انتخاب استراتژی‌های مختلف فرزکاری طول مسافت حرکت ابزار و زمان ماشین‌کاری متفاوتی را ایجاد می‌نماید؛ همچنین ویژگی‌های این استراتژی‌ها از جمله جهت حرکت برشی ابزار، گام عرضی برش و پیوستگی ماشین‌کاری و غیره خروجی‌های عملیات ماشین‌کاری را به میزان چشم‌گیری تحت تأثیر خود قرار می‌دهند [۲]. در اغلب قطعات تولید شده به وسیله‌ی ماشین ابزارهای چندمحوره، کیفیت سطح قطعات تولید شده، حائز اهمیت است. هدف اصلی استراتژی‌های ماشین‌کاری کمینه کردن مواد باقی‌مانده[1] بین مسیرهای حرکت ابزار در هنگام فرزکاری است [۳]. این در حالی است که هنگام استفاده از استراتژی‌های فرزکاری پنج‌محوره، احتمال تصادف و برخورد اجزای ماشین‌ابزار، ابزار و ابزارگیر با قطعه‌کار و گیره بیشتر می‌شود. امروزه با به‌کارگیری نرم‌افزارهای شبیه‌سازی، می‌توان بدون اتلاف زمان، هدر رفتن ماده و بالا رفتن هزینه‌های ساخت، فرآیند فرزکاری کنترل عددی را شبیه‌سازی نمود. نرم‌افزار وریکات[2] یکی از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی عملیات ماشین‌کاری می‌باشد که مانند واحد کنترل ماشین‌های کنترل عددی عمل می‌کند. این نرم‌افزار که براساس یک پس‌پردازنده‌ی معکوس برنامه‌ریزی شده

1. Scallop
2. Vericut

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

H. Ramazani Sales, H. AmirAbadi, Investigation of Tool Path Strategies for Three-axes and Five-axes Milling with Feed Rate optimization, *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 150-157, 2015 (in Persian فارسی)

www.SID.ir

Archive of SID

است، کدهای ماشین‌کاری را به حرکت‌های محورهای ماشین‌ابزار تبدیل می‌کند [۴]. از قابلیت‌های دیگر این نرم‌افزار، بهینه‌سازی نرخ پیشروی از طریق در نظر گرفتن نرخ پیشروی متغیر برای هر یک از بخش‌های برنامه‌ی ماشین‌کاری می‌باشد که براساس میزان نرخ برداشت مواد برای هر بلوک برنامه محاسبه می‌شود و نهایتا باعث کاهش ۵٪ تا ۷۰٪ زمان ماشین‌کاری می‌گردد [۵]. با بهینه‌سازی نرخ پیشروی برنامه‌های استخراج شده برای استراتژی‌های فرزکاری سه‌محوره و پنج‌محوره می‌توان متناسب با متوسط بار باقی‌مانده بر واحد سطح حاصل از هر یک از این استراتژی‌ها بهترین استراتژی مسیر ابزار را با نرخ پیشروی بهینه شده، برای سطوح مختلف تعیین نمود.

برخی از پژوهشگران در زمینه‌ی بررسی استراتژی‌های مسیر ابزار و بهینه‌سازی نرخ پیشروی مطالعاتی را انجام داده‌اند. پرز و همکاران [۶]، به منظور تحلیل رفتارهای ماشین‌کاری پیرامون قطعات، استراتژی‌های مختلف ورود ابزار به قطعه‌کار را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه ابتدا ابزار با مسیر مستقیم وارد قطعه‌کار شد و بار دیگر این کار به صورت دورانی صورت گرفت. نیروهای ماشین‌کاری در جهت محورهای طولی و عرضی ماشین ابزار مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد در روش ورود ابزار به صورت دورانی به داخل قطعه‌کار، نیروهای ماشین‌کاری به طور تدریجی به قطعه‌کار وارد می‌شود. این امر باعث می‌گردد تا ارتعاشات، برآیند نیروهای برشی و گرمای ایجاد شده کاهش یافته و طول عمر ابزار افزایش یابد. به‌کمک این راهکار می‌توان عمق برش را افزایش داد و باعث کاهش زمان عملیات ماشین‌کاری و یکنواختی کیفیت سطح گردید. مصطفی‌پور و ابوالقاسمی [۷]، به بررسی اثر دو استراتژی رستر و پله‌ای بر کیفیت سطح و زمان ماشین‌کاری در مرحله‌ی پرداخت یک قطعه با هندسه‌ای مقعر پرداختند و نشان دادند که استراتژی رستر در زوایای کمتر از ۴۵ درجه و روش پله‌ای در زوایای بیشتر از آن، به علت ایجاد گام برشی کوچک‌تر، صافی سطح مناسب‌تری دارند. ژانگ و همکاران [۸]، استراتژی نرخ پیشروی برنامه‌ریزی شده برای ماشین‌کاری سطوح دارای فرم آزاد را از طریق مدل یکپارچه هندسی و مکانیکی انجام دادند. در این پژوهش ماشین‌کاری دو نرخ پیشروی ثابت و نرخ پیشروی متغیر برنامه‌ریزی شده که بر اساس نیروهای برشی در هر لحظه از عملیات ماشین‌کاری محاسبه گردید، مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که با نرخ پیشروی متغیر برنامه‌ریزی شده می‌توان زمان ماشین‌کاری را تا ۳۵٪ کاهش داد. راموس و همکاران [۹]، به بررسی تأثیر استراتژی‌های پرداخت‌کاری شعاعی[1]، رستر[2] و آفست سه‌بعدی[3] در ماشین‌کاری سطوح پیچیده پرداختند. این پژوهش از نظر بافت سطح[4]، زبری سطح[5] و انحراف ابعادی[6] به صورت آزمایش‌های تجربی انجام گرفت. مطالعات آن‌ها نشان داد که استراتژی آفست سه‌بعدی به علت ایجاد گام‌های برشی یکنواخت، حفظ جهت برشی ثابت و ساخت مسیر برش یکپارچه، از نظر بافت سطح، زبری سطح و کنترل ابعادی بهترین نتایج را حاصل می‌نماید. رائوچ و هاسکوئت [۱۰]، استراتژی فرزکاری نفوذی را از نظر میزان برداشت مواد اضافی و زمان ماشین‌کاری، در فرآیند ماشین‌کاری سرعت بالا مورد ارزیابی قرار دادند. این استراتژی با استراتژی رستر، مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که فرزکاری نفوذی در مرحله‌ی خشن‌کاری، در صورتی مقرون به صرفه است که عمق حفره نسبت به حجم برداشت، زیاد باشد. یانگ و همکاران [۱۱]، برای ماشین‌کاری یک پروانه‌ی گریز از مرکز، توسط ماشین‌های پنج‌محوره رویکرد جدیدی را پیشنهاد کردند. در این روش با تقسیم سطح تیغه‌ها به چند بخش و ماشین‌کاری جداگانه‌ی هر بخش طول مسیر ابزار و زمان ماشین‌کاری کاهش یافته و سطح ماشین‌کاری، یکنواختی بیشتری پیدا می‌کند. کوین سات و سابورین [۱۲]، با ایجاد یک برنامه به بهینه‌سازی جهت حرکت ابزار بر روی سطوح پیچیده در ماشین‌ابزارهای سه‌محوره پرداختند. در برنامه مذکور با توجه به زبری سطح تعیین شده توسط کاربر، جهت بهینه‌ی مسیر ابزار ماشین‌کاری در استراتژی پرداخت‌کاری رستر به منظور تعیین کوتاه‌ترین مسیر ابزار محاسبه می‌گردد. رن و همکاران [۱۳]، استراتژی مارپیچ را برای سطوح پیچیده در ماشین‌های پنج‌محوره بهبود بخشیدند. در روش‌های استاندارد، برای ماشین‌کاری سطوح پیچیده‌ی دارای انحنا با مرز نامنظم، مسیر به تعداد زیادی از مسیرهای کوتاه شکسته می‌شود تا مرز و مناطق مرزی حفظ گردد؛ این امر باعث ناپیوستگی مسیر ابزار و افزایش زمان ماشین‌کاری می‌گردد. در این پژوهش، آن‌ها یک طرح جدید را برای مسیر ابزار مارپیچ ارائه نمودند. در این طرح با در نظر گرفتن حداکثر فاصله‌ی بین خطوط مسیر و کمترین تغییرات در جابه‌جایی طولی و زاویه‌ای ابزار، یک مسیر پیوسته از حرکت ابزار در استراتژی مارپیچ برنامه‌ریزی می‌شود. گلگلو و همکاران [۱۴]، استراتژی‌های ماشین‌کاری برای عملیات حفره‌تراشی را مورد بررسی قرار دادند. این پژوهش به منظور ارزیابی زبری سطح حاصل از استراتژی‌های رستر یک‌سویه[7]، رستر دوسویه[8] و مارپیچ[9] انجام شد. در این مطالعه مهم‌ترین پارامتر تأثیرگذار بر استراتژی‌های یک‌سویه و مارپیچ، نرخ پیشروی شناخته شد؛ در حالی که عمق برش به عنوان تأثیرگذارترین پارامتر برای استراتژی رستر تعیین گردید.

بررسی نتایج تحقیقات اخیر در زمینه‌ی مطالعه‌ی استراتژی‌های مسیر ابزار نشان می‌دهد که تاکنون گزارش تحقیقی در زمینه‌ی بررسی استراتژی‌های مسیر ابزار در فرزکاری سه‌محوره و پنج‌محوره با نرخ پیشروی بهینه شده، ارائه نگردیده است. به همین منظور در این پژوهش با استفاده از آزمون‌های تجربی فرزکاری سه‌محوره و شبیه‌سازی عملیات ماشین‌کاری سه‌محوره و پنج‌محوره، استراتژی‌های مسیر ابزار با نرخ پیشروی بهینه شده (با توجه به زمان ماشین‌کاری و متوسط بار باقی‌مانده بر واحد سطح) مورد مقایسه و بررسی قرار گرفته و بهترین استراتژی متناسب با هندسه‌ی مدل‌های قطعه‌کار، ارائه شد. استراتژی‌های پرداخت سه‌محوره مورد استفاده در این پژوهش به ترتیب آفست سه‌بعدی، پله‌ای[10]، پله‌ای بهینه شده[11]، پله‌ای تفکیک شده[12]، شعاعی، رستر یک‌سویه، رستر دوسویه، مارپیچ و استراتژی‌های پرداخت پنج‌محوره به ترتیب پرداخت مارپیچ سطح[13]، پرداخت یک‌سویه سطح[14] و پرداخت دوسویه سطح[15] می‌باشد. این استراتژی‌ها بر روی مدل‌های مختلف کروی مقعر، کروی محدب، سطح دارای فرم آزاد، سطوح دوران یافته، سطوح دارای شیب تند و سطوح اکسترود شده مورد بررسی قرار گرفتند.

۲- استراتژی‌های فرزکاری

در فرزکاری سطوح به منظور پرداخت‌کاری سطح از استراتژی‌های مختلف

1. Radial
2. Raster
3. 3D offset
4. Texture
5. Roughness
6. Dimensional deviations

7. Raster one way
8. Raster two way
9. Spiral
10. Constant Z
11. Optimized constant Z
12. Interleaved constant Z
13. Spiral surface finishing
14. One way surface finishing
15. Two way surface finishing

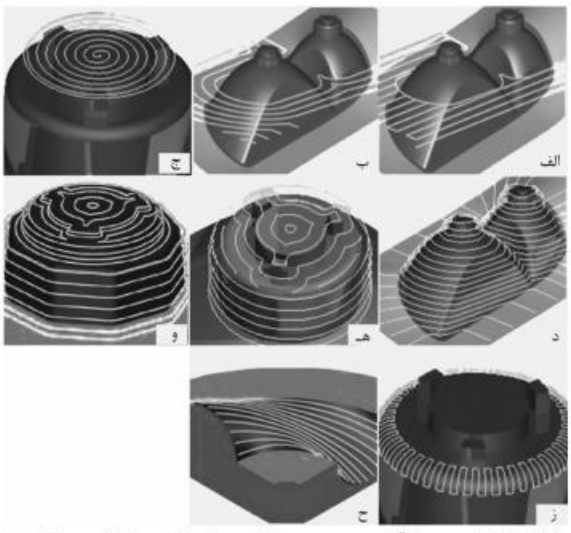
www.SID.ir

Archive of SID

استفاده می‌شود که با توجه به هندسه‌ی سطح قطعه‌کار، نتایج متفاوتی را حاصل می‌نمایند. در استراتژی آفست سه‌بعدی، ابزار معمولا از محیط قطعه شروع به حرکت کرده و به سمت داخل هدایت می‌شود سپس ابزار در هر سیکل به نقطه‌ی شروع حرکت خود باز می‌گردد و سیکل داخلی بعدی را طی می‌کند. در استراتژی پله‌ای، مسیر ابزار در برش‌های موازی ایجاد شده در راستای مؤلفه‌ی Z، تولید شده و قطعه‌کار به صورت لایه به لایه ماشین‌کاری می‌گردد. استراتژی پله‌ای بهینه شده، ترکیبی از استراتژی‌های پله‌ای و آفست سه‌بعدی می‌باشد و با استفاده از این استراتژی علاوه بر سطوح شیبدار، مناطق مسطح نیز ماشین‌کاری می‌گردد. استراتژی پله‌ای تفکیک شده نیز ترکیبی از استراتژی‌های پله‌ای و آفست سه بعدی می‌باشد که بخش‌های مختلف ماشین‌کاری با توجه به زاویه‌ای که توسط کاربر مشخص می‌گردد، از یکدیگر متمایز می‌گردد. در استراتژی شعاعی ابزار از یک نقطه‌ی مرکزی شروع به حرکت می‌کند و مسیرهای حرکت ابزار به این نقطه همگرا می‌شوند. در استراتژی رستر یک‌سویه ابزار به صورت خطوط موازی در یک راستا و در یک جهت تعیین شده، سطح قطعه را ماشین‌کاری می‌کند. در استراتژی رستر دوسویه ابزار به صورت حرکت‌های رفت و برگشتی و با خطوط موازی بر روی قطعه عملیات ماشین‌کاری را به انجام می‌رساند. در استراتژی مارپیچ ابزار از یک نقطه کانونی به صورت مارپیچ به عملیات ماشین‌کاری می‌پردازد. در استراتژی پنج‌محوره پرداخت سطح، محور ابزار همواره در زاویه‌ای مشخص و یا در بازه‌ی تعیین شده‌ی آن قرار می‌گیرد که مسیر ابزار بر اساس الگوهای مارپیچ، یک‌سویه و دوسویه ایجاد می‌گردد. شکل شماتیک استراتژی‌های ذکر شده، در شکل ۱ نشان داده شده است.

۳- تجهیزات و مواد آزمایشی

در این پژوهش از نرم‌افزار پاورمیل[1] به منظور پیاده‌سازی استراتژی‌های مسیر ابزار، استخراج برنامه‌ی کنترل عددی، ایجاد مدل ماشین‌کاری شده و محاسبه بار باقی‌مانده حاصل از استراتژی‌های مختلف فرزکاری در دو حالت سه‌محوره و پنج‌محوره استفاده گردید. از نرم‌افزار وریکات نیز به منظور شبیه‌سازی عملیات ماشین‌کاری و بهینه‌سازی نرخ پیشروی استفاده شد.



شکل ۱ الف) رستر ب) آفست سه‌بعدی ج) مارپیچ د) پله‌ای هـ) پله‌ای‌بهینه‌شده و) پله‌ای تفکیک‌شده ز) شعاعی ح) پرداخت سطح

1. Powermill

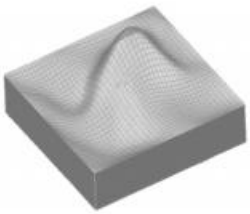
آزمایشات تجربی با استفاده از دستگاه فرز کنترل عددی سه‌محوره FP4MB با کنترلر زیمنس ۸۱۰D با حداکثر سرعت دورانی ۱۵۰۰ دور بر دقیقه و نرخ پیشروی ۸۰۰ میلی‌متر بر دقیقه استفاده گردید. از ابزار فرز سرکروی فولاد تندبر چهار لبه با قطر ۸ میلی‌متر برای فرزکاری قطعه‌ی سطح دارای فرم آزاد مطابق شکل ۲ بهره گرفته شد. این آزمایش‌ها بر روی قطعات آلومینیوم اکسترود شده به ابعاد، طول ۵۰ میلی‌متر، عرض ۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۲۰میلی‌متر صورت گرفت. در مرحله‌ی شبیه‌سازی عملیات ماشین‌کاری برای فرزکاری قطعات مدل‌های کروی مقعر، کروی محدب، سطح دارای فرم آزاد، سطوح دوران یافته، سطوح دارای شیب تند و سطوح اکسترود شده از دستگاه فرز کنترل عددی پنج‌محوره هرمل[2] از نوع میز میز[3] با کنترلر فانوک ۱۵۰M با حداکثر سرعت دورانی ۱۵۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ثابت ۱۰۰۰میلی‌متر بر دقیقه مورد استفاده قرار گرفت.

۴- روش انجام آزمایش

به منظور انتخاب بهترین استراتژی فرزکاری با نرخ پیشروی بهینه شده از نظر زمان ماشین‌کاری و متوسط بار باقی‌مانده بر واحد سطح، ابتدا مدل‌های کروی مقعر، کروی محدب، سطح دارای فرم آزاد، سطوح دوران یافته، سطوح دارای شیب تند و سطوح اکسترود شده توسط نرم‌افزار کتیا[4] طراحی گردید. این مدل‌ها به گونه‌ای انتخاب شدند که هر یک از آن‌ها، ویژگی‌های هندسی گروهی از قطعات را دارا باشند. شکل ۳ مدل‌های مذکور را نشان می‌دهد. سپس هر یک از مدل‌های مذکور به منظور پیاده‌سازی استراتژی‌های مختلف مسیر ابزار، ایجاد مدل ماشین‌کاری و محاسبه‌ی بار باقی‌مانده بر واحد سطح به نرم‌افزار پاورمیل منتقل گردیده و برنامه‌ی کنترل عددی از هر یک از استراتژی‌های مسیر ابزار با نرخ پیشروی ثابت استخراج شد. در مرحله‌ی بعد برنامه‌های کنترل عددی به منظور بهینه‌سازی نرخ پیشروی با استفاده از نرخ پیشروی متغیر به نرم‌افزار وریکات منتقل شد و برنامه‌ی کنترل عددی بهینه شده ایجاد گردید. سپس زمان ماشین‌کاری هر یک از استراتژی‌های مسیر ابزار برای مدل‌های مختلف توسط شبیه‌سازی عملیات ماشین‌کاری محاسبه گردید. در نهایت با توجه به زمان ماشین‌کاری و متوسط بار باقی‌مانده بر واحد سطح، بهترین استراتژی مسیر ابزار برای هر یک از مدل‌های هندسی مذکور معرفی گردید.

۵- نتایج و بحث

پس از انجام آزمایش‌ها برای استراتژی‌های مختلف، مقادیر زمان ماشین‌کاری و متوسط بار باقی‌مانده بر واحد سطح، محاسبه و ثبت گردید. شکل ۴ مقادیر زمان ماشین‌کاری با نرخ پیشروی ثابت و بهینه شده در حالت شبیه‌سازی عملیات ماشین‌کاری را به همراه متوسط بار باقی‌مانده بر واحد سطح نشان می‌دهد. جدول ۱ مقدار عددی پارامترهای هر یک از این استراتژی‌ها را در

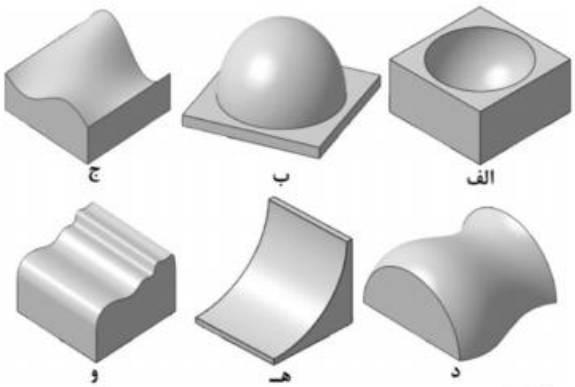


شکل ۲ مدل سطح دارای فرم آزاد در آزمون تجربی

2. Hermle
3. Table-Table
4. Catia

www.SID.ir

Archive of SID

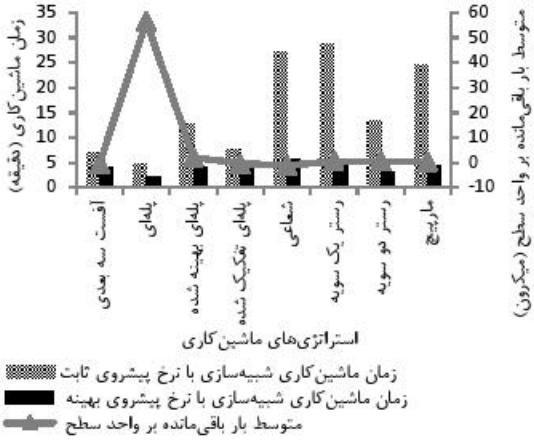


شکل ۳ سطوح با پایه‌ی الف) کروی مقعر ب) کروی محدب ج) فرم آزاد د) دوران یافته هـ) دارای شیب تند و) اکسترود شده

آزمایشات تجربی نشان می‌دهد. همچنین شکل ۵ مقادیر زمان ماشین‌کاری را با نرخ پیشروی ثابت و بهینه شده در حالت ماشین‌کاری تجربی نشان می‌دهد که مقدار عددی پارامترهای آن در جدول ۲ نشان داده شده است.

نتایج حاصل از عملیات ماشین‌کاری با نرخ پیشروی یکنواخت برای یک قطعه دارای سطح آزاد، مطابق شکل ۴ نشان می‌دهد که استراتژی پرداخت‌کاری مارپیچ با مقدار ۰/۳۳ میکرون، نزدیک‌ترین مقدار به مدل اصلی و استراتژی پرداخت‌کاری شعاعی با مقدار منفی ۱/۲۶ میکرون، کمترین و استراتژی پرداخت‌کاری پله‌ای با مقدار ۵۶/۴۳ میکرون، بیشترین مقدار متوسط بار باقی‌مانده بر واحد سطح را به خود اختصاص داده‌اند. با توجه به زمان‌های ماشین‌کاری تجربی، استراتژی پرداخت‌کاری رستر دو سویه، با زمان ۸/۱۷ دقیقه کمترین زمان ماشین‌کاری را به خود اختصاص داد. علت این امر را می‌توان در کمترین حرکت ابزار به سطح اطمینان و حرکت‌های هرز ابزار دانست. استراتژی پرداخت‌کاری پله‌ای ضمن آن که با زمان ۶ دقیقه کمترین زمان ماشین‌کاری را به خود اختصاص داده است اما به علت مقدار بار باقی‌مانده‌ی بسیار بالا و ایجاد سطح غیریکنواخت می توان این استراتژی را برای سطح مذکور نامناسب دانست.

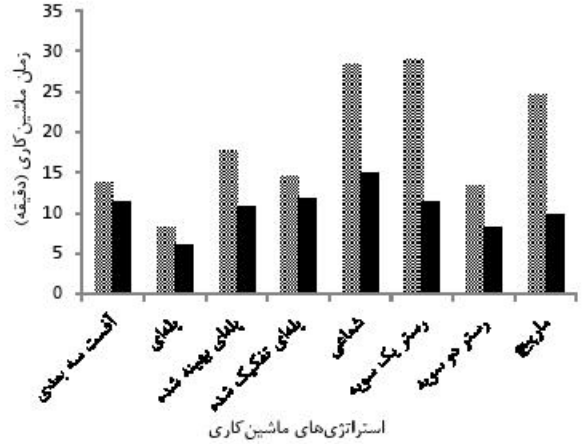
در مرحله‌ی بعد استراتژی‌های مختلف فرزکاری سه‌محوره و پنج‌محوره به منظور انتخاب بهترین استراتژی برای هر یک از شش مدل مذکور توسط نرم‌افزار شبیه‌سازی وریکات، از نظر زمان ماشین‌کاری مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین متوسط بار باقی‌مانده بر واحد سطح حاصل از هر یک از این



شکل ۴ زمان ماشین‌کاری و متوسط بار باقی‌مانده بر واحد سطح مدل آزمون تجربی دارای سطح فرم آزاد در شبیه‌سازی عملیات ماشین‌کاری

جدول ۱ زمان ماشین‌کاری و متوسط بار باقی‌مانده بر واحد سطح مدل آزمون تجربی دارای سطح فرم آزاد در شبیه‌سازی عملیات ماشین‌کاری

استراتژی مسیر ابزار	متوسط بار باقی‌مانده بر واحد سطح (میکرون)	زمان ماشین‌کاری شبیه‌سازی با نرخ پیشروی بهینه (دقیقه)	زمان ماشین‌کاری شبیه‌سازی با نرخ پیشروی ثابت (دقیقه)
آفست سه بعدی	-۰/۴۴	۴	۷/۱
پله‌ای	۵۶/۴۳	۲/۱۵	۴/۶۲
پله‌ای بهینه شده	۲/۰۷	۴/۱	۱۲/۸۱
پله‌ای تفکیک شده	-۰/۳۸	۳/۹۹	۷/۶۸
شعاعی	-۱/۲۶	۵/۷۲	۲۷/۲
رستر یک سویه	۰/۶۱	۵/۵۱	۲۸/۷۱
رستر دو سویه	۰/۶۲	۳/۱۵	۱۳/۵۲
مارپیچ	۰/۳۳	۴/۴۸	۲۴/۵۲



شکل ۵ زمان ماشین‌کاری و متوسط بار باقی‌مانده بر واحد سطح مدل سطح دارای فرم آزاد در آزمون تجربی

جدول ۲ زمان ماشین‌کاری و متوسط بار باقی‌مانده بر واحد سطح مدل سطح دارای فرم آزاد در آزمون تجربی

استراتژی مسیر ابزار	زمان ماشین‌کاری تجربی با نرخ پیشروی بهینه (دقیقه)	زمان ماشین‌کاری تجربی با نرخ پیشروی ثابت (دقیقه)
آفست سه بعدی	۱۱/۵	۱۳/۸۸
پله‌ای	۶	۸/۳۳
پله‌ای بهینه شده	۱۰/۹	۱۷/۶۷
پله‌ای تفکیک شده	۱۱/۷۸	۱۴/۵۵
شعاعی	۱۵/۰۵	۲۸/۴۲
رستر یک سویه	۱۱/۴۵	۲۸/۹۵
رستر دو سویه	۸/۱۷	۱۳/۴۵
مارپیچ	۹/۸	۲۴/۷۵

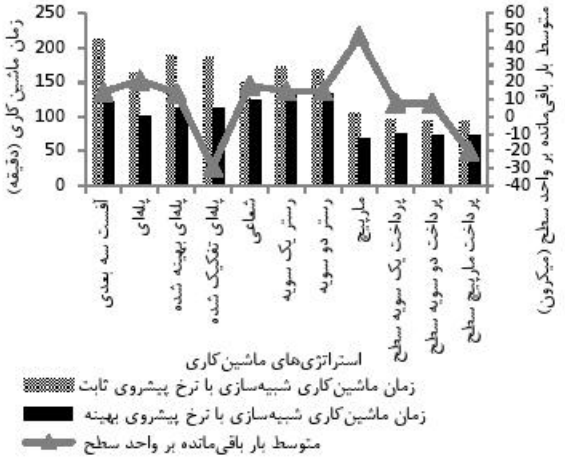
استراتژی‌ها به کمک نرم‌افزار پاورمیل محاسبه گردید. مقادیر زمان ماشین‌کاری حاصل از عملیات ماشین‌کاری شبیه‌سازی شده با نرخ پیشروی

www.SID.ir

Archive of SID

بهینه و متوسط بار باقی‌مانده بر واحد سطح حاصل از هر استراتژی در جدول ۳ ۸ آورده شده است. نمودارهای مربوط به هر یک از این جداول در شکل ۶ ۱۱ نشان داده شده است.

اندازه‌گیری زمان ماشین‌کاری مدل کروی مقعر مطابق جدول ۳ نشان می‌دهد در میان استراتژی‌های پرداخت‌کاری سه‌محوره، استراتژی پرداخت‌کاری مارپیچ با زمان ۶۹/۴۵ دقیقه، سریع‌تر از دیگر استراتژی‌های ماشین‌کاری سه‌محوره عملیات پرداخت را به پایان می‌رساند، در حالی که با مقدار ۴۶/۴۷ میکرون بیشترین مقدار متوسط بار باقی‌مانده بر واحد سطح را به خود اختصاص می‌دهد. دلیل این امر را می‌توان در پاس‌های ماشین‌کاری آخر دانست که در نواحی دارای شیب تند، فاصله‌ی پاس‌های ماشین‌کاری به شدت افزایش می‌یابد ولی در تمامی استراتژی‌های پرداخت نتایج نشانگر آن است که استراتژی‌های پنج‌محوره، زمان بسیار کمتری را نسبت به استراتژی‌های سه‌محوره به خود اختصاص می‌دهند. با در نظر داشتن متوسط بار باقی‌مانده بر واحد سطح حاصل از هر استراتژی، استراتژی پرداخت‌کاری



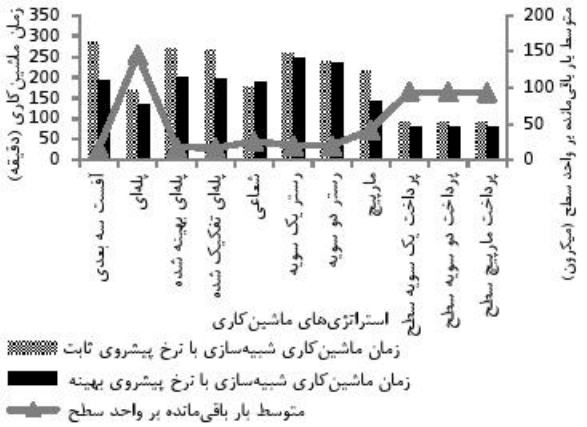
شکل ۶ زمان ماشین‌کاری و متوسط بار باقی‌مانده بر واحد سطح حاصل از استراتژی‌های مختلف برای مدل کروی مقعر

جدول ۳ زمان ماشین‌کاری و متوسط بار باقی‌مانده بر واحد سطح مدل کروی مقعر در شبیه‌سازی عملیات ماشین‌کاری

استراتژی مسیر ابزار	متوسط بار باقی‌مانده بر واحد سطح (میکرون)	زمان ماشین‌کاری شبیه‌سازی با نرخ پیشروی بهینه (دقیقه)	زمان ماشین‌کاری شبیه‌سازی با نرخ پیشروی ثابت (دقیقه)
آفست سه بعدی	۱۴/۳۰	۱۲۱/۲۴	۲۱۱/۹۳
پله‌ای	۲۱/۱۹	۱۰۱/۵۴	۱۶۳/۱۱
پله‌ای بهینه شده	۱۳/۷۹	۱۱۳/۵۳	۱۸۸/۹۶
پله‌ای تفکیک شده	-۲۹/۱۷	۱۱۳/۱۵	۱۸۶/۷۷
شعاعی	۱۸/۰۸	۱۲۳/۶۳	۱۵۰/۴۶
رستر یک سویه	۱۴/۸۳	۱۳۶/۲۷	۱۷۲/۷۳
رستر دو سویه	۱۴/۹۰	۱۳۲/۷۲	۱۶۹/۱۹
مارپیچ	۴۶/۴۷	۶۹/۴۵	۱۰۴/۸۵
پرداخت یک‌سویه سطح	۷/۹۳	۷۴/۸۵	۹۶/۳
پرداخت دوسویه سطح	۷/۷۹	۷۱/۹۱	۹۴/۲۶
پرداخت مارپیچ سطح	-۱۹/۹۶	۷۱/۸۳	۹۴/۴۱

پله‌ای تفکیک شده با مقدار منفی ۲۹/۱۷ میکرون، در میان استراتژی‌های پرداخت، کمترین متوسط بار باقی‌مانده بر واحد سطح را به خود اختصاص داد. در استراتژی‌های پنج‌محوره، استراتژی پرداخت‌کاری مارپیچ با کنترل محور نقطه‌ای، کمترین مقدار متوسط بار باقی‌مانده بر واحد سطح را دارا بوده و کمترین زمان ماشین‌کاری را در حالت نرخ پیشروی بهینه، حاصل می‌نماید.

برای مدل کروی محدب در میان استراتژی‌های پرداخت‌کاری سه‌محوره، استراتژی پله‌ای به علت مقدار بسیار زیاد متوسط بار باقی‌مانده بر واحد سطح، برای سطح مذکور نامناسب می‌باشد. از نظر زمان ماشین‌کاری با نرخ پیشروی بهینه شده استراتژی مارپیچ با مدت ۱۴۳/۰۹ دقیقه در کمترین زمان، عملیات پرداخت را به پایان رسانید. در میان تمام استراتژی‌های پرداخت، استراتژی پنج‌محوره‌ی پرداخت دو سویه سطح با زمان ماشین‌کاری ۸۱ دقیقه، کمترین زمان ماشین‌کاری را به خود اختصاص داده است. بر خلاف تصور، پس از بهینه‌سازی نرخ پیشروی، زمان استراتژی پرداخت‌کاری شعاعی، افزایش قابل ملاحظه‌ای به همراه داشت. این امر نشان می‌دهد که بهینه‌سازی نرخ پیشروی در تمام خطوط برنامه‌ی کنترل عددی، نرخ پیشروی را افزایش



شکل ۷ زمان ماشین‌کاری و متوسط بار باقی‌مانده بر واحد سطح حاصل از استراتژی‌های مختلف برای مدل کروی محدب

جدول ۴ زمان ماشین‌کاری و متوسط بار باقی‌مانده بر واحد سطح مدل کروی محدب در شبیه‌سازی عملیات ماشین‌کاری

استراتژی مسیر ابزار	متوسط بار باقی‌مانده بر واحد سطح (میکرون)	زمان ماشین‌کاری شبیه‌سازی با نرخ پیشروی بهینه (دقیقه)	زمان ماشین‌کاری شبیه‌سازی با نرخ پیشروی ثابت (دقیقه)
آفست سه بعدی	۱۵/۵۳	۱۹۱/۶۷	۲۸۷/۳۳
پله‌ای	۱۴۵/۵	۱۳۵/۱۶	۱۷۱/۴۲
پله‌ای بهینه شده	۱۷/۴	۱۹۸/۴۴	۲۶۹
پله‌ای تفکیک شده	۱۶/۸۱	۱۹۵/۴۷	۲۶۴/۷۹
شعاعی	۲۵/۷۴	۱۸۹/۶	۱۷۷/۷۲
رستر یک سویه	۱۹/۹۶	۲۴۸/۰۴	۲۵۷/۸۶
رستر دو سویه	۱۹/۸۹	۲۳۵/۴۷	۲۴۰/۵۹
مارپیچ	۴۱/۷	۱۴۳/۰۹	۲۱۶/۹۳
پرداخت یک‌سویه سطح	۹۴/۲۳	۸۱/۵۹	۹۲/۷۴
پرداخت دوسویه سطح	۹۴/۱۷	۸۱	۹۰/۸۴
پرداخت مارپیچ سطح	۹۳/۲۶	۸۱/۴۶	۹۰/۲۹

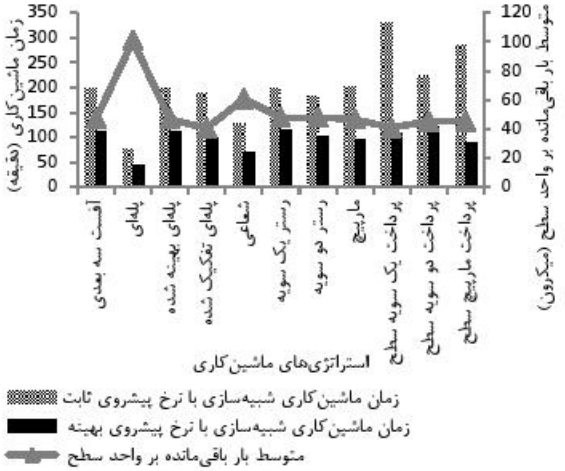
www.SID.ir

Archive of SID

نمی‌دهد، بلکه مقدار آن را در هر لحظه، متناسب با بار حذفی، به مقدار مطلوب می‌رساند.

نتایج حاصل از آزمایش‌های نرم‌افزاری برای مدل سطح دارای فرم آزاد مطابق جدول ۵ نشان می‌دهد از نظر متوسط بار باقی‌مانده بر واحد سطح، استراتژی پرداخت‌کاری پله‌ای با اختلاف بسیار زیاد و با مقدار ۱۰۰/۹۴ میکرون بیشترین مقدار را ایجاد نموده است که می‌توان گفت برای سطح مذکور نیز نامناسب محسوب می‌شود. در این میان، استراتژی پله‌ای تفکیک شده با مقدار ۴۰/۷۵ میکرون، کمترین متوسط بار باقی‌مانده بر واحد سطح را بر جای گذاشت. استراتژی پرداخت‌کاری شعاعی در حالت نرخ پیشروی ثابت با زمان ۱۲۹/۹۳ دقیقه و در حالت نرخ پیشروی بهینه شده با زمان ۷۱/۷۷ دقیقه، در کمترین زمان عملیات ماشین‌کاری را به پایان رساند.

نتایج حاصل از عملیات ماشین‌کاری مدل دوران یافته مطابق با جدول ۶ نشان می‌دهد که استراتژی‌های شعاعی با زمان ۱۵۸/۶۵ دقیقه در حالت نرخ پیشروی ثابت و با زمان ۹۷/۷۳ دقیقه در حالت نرخ پیشروی بهینه شده،



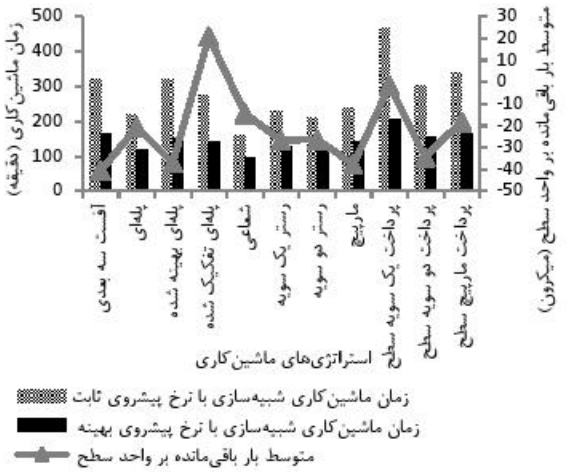
شکل ۸ زمان ماشین‌کاری و متوسط بار باقی‌مانده بر واحد سطح حاصل از استراتژی‌های مختلف برای مدل سطح دارای فرم آزاد

جدول ۵ زمان ماشین‌کاری و متوسط بار باقی‌مانده بر واحد سطح مدل سطح دارای فرم آزاد در شبیه‌سازی عملیات ماشین‌کاری

استراتژی مسیر ابزار	متوسط بار باقی‌مانده بر واحد سطح (میکرون)	زمان ماشین‌کاری شبیه‌سازی با نرخ پیشروی بهینه (دقیقه)	زمان ماشین‌کاری شبیه‌سازی با نرخ پیشروی ثابت (دقیقه)
آفست سه بعدی	۴۶/۸۳	۱۱۳/۳۹	۱۹۸/۶۳
پله‌ای	۱۰۰/۹۴	۴۵/۵۴	۷۵/۶۲
پله‌ای بهینه شده	۴۶/۸۸	۱۱۳/۲۲	۱۹۸/۵۳
پله‌ای تفکیک شده	۴۰/۷۵	۱۰۰/۴۲	۱۹۰/۰۱
شعاعی	۶۰/۹۸	۷۱/۷۷	۱۲۹/۳۶
رستر یک سویه	۴۸/۰۲	۱۱۴/۱۱	۱۹۷/۴۵
رستر دو سویه	۴۸/۰۱	۱۰۲/۹	۱۸۳/۱۳
مارپیچ	۴۶/۸۷	۹۶/۹۷	۲۰۱/۱۵
پرداخت یک‌سویه سطح	۴۰/۸۸	۱۰۹/۴۶	۳۲۸/۹۵
پرداخت دوسویه سطح	۴۵/۲۹	۱۲۱/۶۹	۲۲۴/۵۲
پرداخت مارپیچ سطح	۴۵/۱۹	۹۰/۰۸	۲۸۵/۸۸

در کمترین زمان عملیات پرداخت‌کاری را انجام دادند. در این مدل، استراتژی پرداخت‌کاری آفست سه‌بعدی با مقدار منفی ۴۰/۷۷ میکرون کمترین و استراتژی پرداخت‌کاری پله‌ای تفکیک شده با مقدار ۲۰/۶۶ میکرون بیشترین مقدار متوسط بار باقی‌مانده بر واحد سطح را ایجاد نمودند. همچنین در این مدل مشخص شد که در استراتژی پرداخت‌کاری پله‌ای در بخش‌هایی از سطوح که به راستای افق نزدیک می‌باشند، پاس‌های ماشین‌کاری از یکدیگر بسیار فاصله می‌گیرند و در مقابل آن، در نواحی با شیب تند، مقدار پاس‌های ماشین‌کاری به هم بسیار نزدیک می‌شوند.

نتایج بدست آمده از ماشین‌کاری مدل سطوح دارای شیب تند مطابق جدول ۷ نشان می‌دهد که در مرحله‌ی پرداخت، با وجود آنکه استراتژی پرداخت‌کاری پله‌ای با ۸۴/۰۵ دقیقه و استراتژی پرداخت‌کاری شعاعی با ۱۰۱/۲۹ دقیقه، در زمان کمتری، عملیات ماشین‌کاری را به پایان می‌رسانند، ولی به علت زیاد بودن متوسط بار باقی‌مانده بر واحد سطح حاصل از آن‌ها، برای سطح مذکور نامناسب می‌باشند. استراتژی پرداخت‌کاری پله‌ای تفکیک



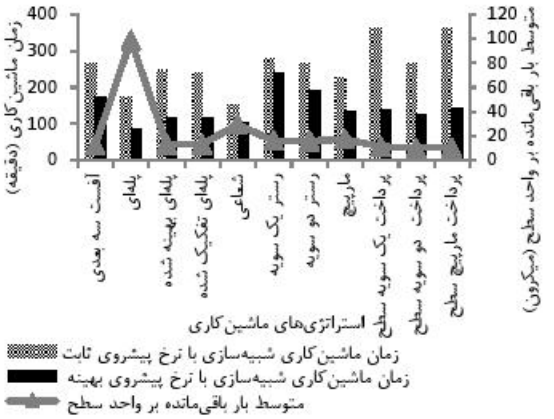
شکل ۹ زمان ماشین‌کاری و متوسط بار باقی‌مانده بر واحد سطح حاصل از استراتژی‌های مختلف برای مدل دوران یافته

جدول ۶ زمان ماشین‌کاری و متوسط بار باقی‌مانده بر واحد سطح مدل دوران یافته در شبیه‌سازی عملیات ماشین‌کاری

استراتژی مسیر ابزار	متوسط بار باقی‌مانده بر واحد سطح (میکرون)	زمان ماشین‌کاری شبیه‌سازی با نرخ پیشروی بهینه (دقیقه)	زمان ماشین‌کاری شبیه‌سازی با نرخ پیشروی ثابت (دقیقه)
آفست سه بعدی	-۴۰/۷۷	۱۶۳/۷	۳۱۸/۷۴
پله‌ای	-۲۰/۷۲	۱۱۶/۸۹	۲۱۸/۵
پله‌ای بهینه شده	-۳۷/۰۷	۱۵۰/۴۱	۳۱۸/۶۷
پله‌ای تفکیک شده	۲۰/۶۶	۱۴۲/۱۳	۲۷۵/۱۶
شعاعی	-۱۴/۴۹	۹۷/۷۳	۱۵۸/۶۵
رستر یک سویه	-۲۶/۸۶	۱۲۶/۵	۲۲۷/۴۳
رستر دو سویه	-۲۶/۳۳	۱۱۲/۸۸	۲۱۱/۹۲
مارپیچ	-۳۷/۷۷	۱۴۰/۷۷	۲۳۸/۳۷
پرداخت یک‌سویه سطح	-۱/۸۷	۲۰۵/۷۸	۴۶۵/۷۴
پرداخت دوسویه سطح	-۳۴/۳۳	۱۵۳/۲۱	۳۰۱/۵۶
پرداخت مارپیچ سطح	-۱۸/۱۸	۱۶۴/۰۹	۳۳۹/۷۶

www.SID.ir

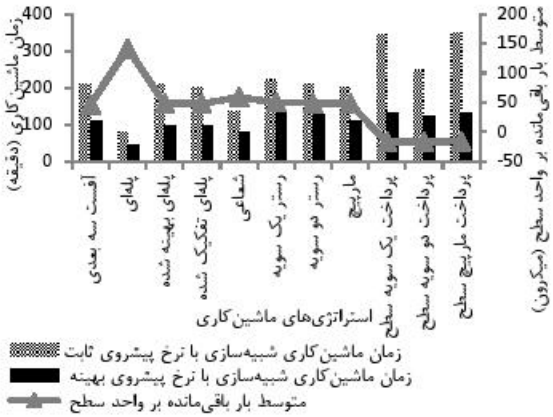
Archive of SID



شکل ۱۰ زمان ماشین‌کاری و متوسط بار باقی‌مانده بر واحد سطح حاصل از استراتژی‌های مختلف برای مدل سطح دارای شیب تند

جدول ۷ زمان ماشین‌کاری و متوسط بار باقی‌مانده بر واحد سطح مدل دارای شیب تند در شبیه‌سازی عملیات ماشین‌کاری

استراتژی مسیر ابزار	متوسط بار باقی‌مانده بر واحد سطح (میکرون)	زمان ماشین‌کاری شبیه‌سازی با نرخ پیشروی بهینه (دقیقه)	زمان ماشین‌کاری شبیه‌سازی با نرخ پیشروی ثابت (دقیقه)
آفست سه بعدی	۱۲/۵۹	۱۷۵/۶۳	۲۶۵/۶
پله‌ای	۹۸/۸۳	۸۴/۰۵	۱۷۳/۵۵
پله‌ای بهینه شده	۱۳/۲۳	۱۱۵/۴	۲۵۱/۰۵
پله‌ای تفکیک شده	۱۳/۴۲	۱۱۴/۸۱	۲۴۰/۴۶
شعاعی	۲۹/۴	۱۰۱/۲۹	۱۵۴/۱۵
رستر یک سویه	۱۶/۲۱	۲۳۹/۴۷	۲۸۰/۸۵
رستر دو سویه	۱۶/۰۷	۱۹۲/۵۲	۲۶۶/۵۹
مارپیچ	۱۷/۴۴	۱۳۲/۵۶	۲۲۴/۸۶
پرداخت یک‌سویه سطح	۱۰/۵	۱۳۸/۲۶	۳۶۳/۲۴
پرداخت دوسویه سطح	۱۰/۴۶	۱۲۶/۹	۲۶۵/۴۱
پرداخت مارپیچ سطح	۱۱/۶۱	۱۴۲/۲۵	۳۶۳/۶۵



شکل ۱۱ زمان ماشین‌کاری و متوسط بار باقی‌مانده بر واحد سطح حاصل از استراتژی‌های مختلف برای مدل سطح اکسترود شده

جدول ۸ زمان ماشین‌کاری و متوسط بار باقی‌مانده بر واحد سطح اکسترود شده در شبیه‌سازی عملیات ماشین‌کاری

استراتژی مسیر ابزار	متوسط بار باقی‌مانده بر واحد سطح (میکرون)	زمان ماشین‌کاری شبیه‌سازی با نرخ پیشروی بهینه (دقیقه)	زمان ماشین‌کاری شبیه‌سازی با نرخ پیشروی ثابت (دقیقه)
آفست سه بعدی	۴۶/۸۸	۱۰۸/۵۶	۲۱۱/۴۶
پله‌ای	۱۴۲/۴۳	۴۴/۶۹	۸۱/۷۶
پله‌ای بهینه شده	۴۸/۵	۹۷/۷۹	۲۱۰/۷
پله‌ای تفکیک شده	۴۸/۴۷	۹۶/۷۲	۲۰۰/۷۲
شعاعی	۵۹/۲۸	۷۸/۷۶	۱۳۵/۴۲
رستر یک سویه	۵۰/۵۶	۱۳۹/۹۲	۲۲۲/۹
رستر دو سویه	۴۹/۵۳	۱۲۵/۵۹	۲۱۰/۱۱
مارپیچ	۴۸/۶	۱۱۰/۵	۲۰۳/۲۵
پرداخت یک‌سویه سطح	-۱۶/۷۵	۱۳۲/۰۳	۳۴۷/۴۱
پرداخت دوسویه سطح	-۱۶/۵۶	۱۲۴/۲۹	۲۵۰/۹۳
پرداخت مارپیچ سطح	-۱۵/۴۵	۱۳۳/۱۵	۳۴۷/۹۹

شده، عملیات پرداخت را در کمترین زمان و به صورت قابل قبول به پایان می‌رساند. اختلاف زیاد نتایج حاصل از دو استراتژی پرداخت‌کاری پله‌ای و پرداخت‌کاری پله‌ای تفکیک شده را می‌توان در تفکیک شدن سطح مدل به بخش‌های مسطح و شیب‌دار دانست که به وسیله‌ی این تفکیک، بخش‌های مسطح مدل توسط استراتژی آفست سه‌بعدی و بخش‌های شیب‌دار مدل توسط استراتژی پله‌ای ماشین‌کاری گردیده است. در این میان استراتژی پنج‌محوره‌ی پرداخت سطح دو سویه، کمترین مقدار متوسط بار باقی‌مانده بر واحد سطح را ایجاد نموده است.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی عملیات ماشین‌کاری مدل سطح اکسترود شده، نشان می‌دهد که در بین استراتژی‌های پرداخت‌کاری، استراتژی پله‌ای با آن که کمترین زمان ماشین‌کاری را دارا می‌باشد ولی به علت زیاد بودن مقدار متوسط بار باقی‌مانده بر واحد سطح حاصل از آن، برای سطح مذکور نامناسب می‌باشد و پس از آن استراتژی پرداخت‌کاری شعاعی با زمان ۷۸/۷۶ دقیقه، کمترین زمان ماشین‌کاری را حاصل نمود. در بین استراتژی‌های استفاده شده، استراتژی پنج‌محوره‌ی پرداخت سطح یک سویه با مقدار منفی ۱۶/۷۵ میکرون، کمترین بار باقی‌ماده بر واحد سطح را ایجاد نمود. نتایج بدست آمده در تمامی آزمون‌های تجربی و نرم‌افزاری این پژوهش، نشان داد که استراتژی پله‌ای به علت مقدار متوسط بار باقی‌مانده بر واحد سطح بسیار بالا برای تمامی مدل‌های این پژوهش نامناسب می‌باشد. بر اساس زمان ماشین‌کاری در حالت نرخ پیشروی بهینه شده، بهترین استراتژی پرداخت برای مدل کروی مقعر، استراتژی پرداخت مارپیچ سطح، برای مدل کروی محدب استراتژی پرداخت دو سویه سطح و برای مدل‌های سطح آزاد، دوران یافته، دارای شیب تند و اکسترود شده، استراتژی شعاعی مشخص گردید. همچنین نتایج آزمایش‌های تجربی و نرم‌افزاری نشان داد که برای تمامی مدل‌ها با بهینه‌سازی نرخ پیشروی برنامه‌های کنترل عددی هر یک از استراتژی‌ها مشخص گردید که زمان ماشین‌کاری بین تمام استراتژی‌ها به یکدیگر نزدیک می‌گردد. از این امر می‌توان نتیجه گرفت که بهینه‌سازی نرخ پیشروی علاوه بر بهینه‌سازی عملیات ماشین‌کاری، می‌تواند زمان هدر رفته‌ی حاصل از انتخاب استراتژی نادرست را تا حد زیادی جبران نماید.

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش استراتژی‌های مختلف مسیر ابزار سه‌محوره بر روی نمونه‌ی

www.SID.ir

Archive of SID

تجربی و استراتژی‌های مختلف مسیر ابزار سه‌محوره و پنج‌محوره بر روی مدل‌های کروی مقعر، کروی محدب، سطوح آزاد، سطوح دوران یافته، سطوح دارای شیب تند و سطوح اکسترود شده به صورت شبیه‌سازی عملیات ماشین‌کاری (از نظر زمان ماشین‌کاری و متوسط بار باقی‌مانده بر واحد سطح) مورد مقایسه و بررسی قرار گرفتند. نتایج بدست آمده از این پژوهش به صورت خلاصه در ادامه آمده است:

۱ با توجه به زمان ماشین‌کاری و متوسط بار باقی‌مانده بر واحد سطح، بهترین استراتژی پرداخت‌کاری برای سطح کروی مقعر استراتژی پرداخت مارپیچ سطح، برای مدل کروی محدب استراتژی پرداخت دو سویه سطح، برای مدل دارای شیب تند استراتژی پله‌ای تفکیک شده و برای مدل‌های سطح دارای فرم آزاد، دوران یافته و اکسترود شده، استراتژی شعاعی می‌باشد.

۲ نتایج آزمایش‌های تجربی نتایج نشان داد که با بهینه‌سازی نرخ پیشروی، زمان ماشین‌کاری ۰/۲٪ تا ۵۳٪ کاهش می‌یابد.

۳ با استفاده از نرخ پیشروی متغیر و بهینه‌سازی نرخ پیشروی، زمان ماشین‌کاری استراتژی‌های مختلف به یکدیگر بسیار نزدیک می‌گردند. این امر می‌تواند زمان هدر رفته‌ی حاصل از انتخاب استراتژی نادرست را تا حد زیادی جبران نماید.

۴ نتایج حاصل از بهینه‌سازی نرخ پیشروی نشان می‌دهد که نرخ پیشروی متغیر به‌صورت کاملا مجزا از نرخ پیشروی ثابت اولیه تعیین می‌شود و تنها براساس مقدار بار برداشتی در هر خط از برنامه محاسبه می‌گردد.

۷- مراجع

[1] C. Toh, *Cutter path orientations when high-speed finish milling inclined hardened steel*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 27, No. 5-6, pp. 473-480, 2006.

[2] C. Toh, *A study of the effects of cutter path strategies and orientations in milling*, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 152, No. 3, pp. 346-356, 2004.

[3] A. Warkentin, F. Ismail, S. Bedi, *Intersection approach to multi-point machining of sculptured surfaces*, Computer Aided Geometric Design, Vol. 15, No. 6, pp. 567-584, 1998.

[4] K. Apro, *Secrets of 5-axis machining*: Industrial Press Inc, pp. 696-7.105, New York: 989 Avenue of the Americas, 2008.

[5] M. Kurt, E. Bagci, *Feedrate optimisation/scheduling on sculptured surface machining: a comprehensive review, applications and future directions*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 55, No. 9-12, pp. 1037-1067, 2011.

[6] H. Perez, E. Diez, J. Perez, A. Vizan, *Analysis of Machining Strategies for Peripheral Milling*, Procedia Engineering, Vol. 63, pp. 573-581, 2013.

[7] A. Mostafapour, M. Abolghasemi, Investigation the effect of milling strategies on milling of curved surfaces, in *The 2nd international conference of prouction and manufacturing eng*, Tehran, Iran, 2007. (In Persian)

[8] L. Zhang, J. Feng, Y. Wang, M. Chen, *Feedrate scheduling strategy for free-form surface machining through an integrated geometric and mechanistic model*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 40, No. 11-12, pp. 1191-1201, 2009.

[9] A. Ramos, C. Relvas, J. Simoes, *The influence of finishing milling strategies on texture, roughness and dimensional deviations on the machining of complex surfaces*, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 136, No. 1, pp. 209-216, 2003.

[10] M. Rauch, J.-Y. Hascoet, *Selecting a milling strategy with regard to the machine tool capabilities: application to plunge milling*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 59, No. 1-4, pp. 47-54, 2012.

[11] H.-T. Young, L.-C. Chuang, K. Gerschwiler, S. Kamps, *A five-axis rough machining approach for a centrifugal impeller*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 23, No. 3-4, pp. 233-239, 2004.

[12] Y. Quinsat, L. Sabourin, *Optimal selection of machining direction for three-axis milling of sculptured parts*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 27, No. 11-12, pp. 1132-1139, 2006.

[13] F. Ren, Y. Sun, D. Guo, *Combined reparameterization-based spiral toolpath generation for five-axis sculptured surface machining*, international journal of advanced manufacturing technology, Vol. 40, No. 7-8, pp. 760-768, 2009.

[14] C. Gologlu, N. Sakarya, *The effects of cutter path strategies on surface roughness of pocket milling of 1.2738 steel based on Taguchi method*, Journal of materials processing technology, Vol. 206, No. 1, pp. 7-15, 2008.

www.SID.ir