

## بررسی تأثیر استراتژی‌های فرزکاری در ماشینکاری سطوح محدب از جنس کامپوزیت شیشه/اپوکسی

هادی محمدی<sup>۱</sup>، هادی اسکندری<sup>۲\*</sup>، ایمان دانایی<sup>۳</sup>

\* نویسنده مسئول: eskandari@put.ac.ir

### چکیده

در این تحقیق تأثیر پارامترهای مختلف ماشینکاری مانند سرعت برشی، پیشروی، قطر ابزار و عمق ماشینکاری بر استراتژیهای مختلف فرزکاری مانند آفست سه بعدی، مارپیچ، خطوط موازی و شعاعی برای ایجاد سطوح محدب قطعاتی از جنس کامپوزیت شیشه/اپوکسی مورد بررسی و اثر پذیری پارامترهای خروجی مانند صافی سطح و نرخ براده برداری نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج به خوبی نشان می دهند که خروجی استراتژی رادیال دارای کمترین مقدار زبری و بالاترین کیفیت سطح می باشد و در مقابل استراتژی خطوط موازی با بیشترین مقدار زبری و نازل ترین کیفیت سطح همراه می باشد. بیشترین نرخ براده برداری و کوتاهترین زمان ماشینکاری مربوط به استراتژی آفست سه بعدی می باشد. در این تحقیق بهینه ترین پارامترهای ماشینکاری جهت دستیابی به بالاترین صافی سطح همراه با بیشترین نرخ براده برداری نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج این کار تحقیقاتی می تواند در واحدهای پژوهش و توسعه بسیاری از صنایع بزرگ مورد استفاده و عملیاتی گردد.

### واژه‌های کلیدی

پارامترهای تراشکاری  
فرآیند های فرزکاری  
سطوح محدب  
کامپوزیت شیشه/اپوکسی

تاریخ ارسال: ۹۵/۰۸/۲۶

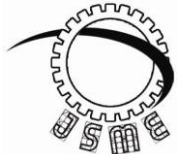
تاریخ بازنگری: ۹۵/۱۱/۰۲

تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۲/۲۱

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، آبادان، ایران

۲- استادیار، دانشکده نفت شهید تندگویان، دانشگاه صنعت نفت، آبادان، ایران.

۳- دانشیار، دانشکده نفت شهید تندگویان، دانشگاه صنعت نفت، آبادان، ایران



Journal of  
Solid Mechanics  
in Engineering

## Journal of Solid Mechanics in Engineering

<http://jsme.iaukhsh.ac.ir>



### Investigation the Milling Strategies Effects on Machining of Convex Surfaces made of Glass/Epoxy Composite

Hadi Mohammadi<sup>1</sup>, Hadi Eskandari<sup>2,\*</sup>, Iman Danaee<sup>3</sup>

\* Corresponding Author: mhdtaji.mt@gmail.com

---

#### Abstract:

In this study the effects of machining parameters such as shearing speed, feed rate, tool diameter and machining depth on different milling strategies i.e. 3D offset, spiral, raster and radial to produce the convex surface made of epoxy/glass composites is investigated. The effects of mentioned strategies on output parameters such as surface roughness and milling removal rate is also studied. The results show that the output of radial strategy has the minimum roughness with the highest surface quality. The raster strategy gives the maximum roughness with the lowest surface quality. Also it can be seen that in 3D offset strategy, the removal rate is maximum and subsequently the time of machining is minimum. In addition the optimized values of machining parameters to achieve the best conditions for surface smoothness and removal rate is obtained. The results of this work can be used in research and development units of industries for operational purposes.

---

#### Key words:

Machining Parameters  
Milling Strategies  
Convex Surface  
Glass/Epoxy Composite

---

1- MSc Student, Department of Engineering, Dezful Branch, Islamic Azad University, Abadan, Iran.

2- Assistant Prof., Department of Petroleum Shahid Tounghuyan, Petroleum University of Technology, Abadan, Iran.

3- Associate Prof., Department of Petroleum Shahid Tounghuyan, Petroleum University of Technology, Abadan, Iran.

## ۱- مقدمه

بسیاری از صنایع بزرگ امروزی (صنایع خودرو سازی، نظامی، قالبسازی، هوافضا و ...) به طور وسیعی با قطعات دارای سطوح پیچیده و منحنی شکل در تجهیزات خود مواجه هستند. در دنیای رقابت اقتصادی استفاده از مواد پیشرفته کامپوزیتی در تلفیق با تکنولوژی های روز تولید، بهینگی تمامی پارامترهای دخیل در چرخه طراحی را بیش از پیش پررنگ تر نموده و شاخص و وزن فاکتور هزینه را افزون تر می نماید. طراحی و تولید محصولاتی با هندسه پیچیده و سطوح منحنی با زمان تولید کم و کیفیت و دقت بالا از اهمیت زیادی برخوردار می باشد. سطوح پیچیده و منحنی با روشهای مختلفی مانند فرزکاری، کپی تراشی، ماشینکاری به کمک تخلیه الکتریکی و ماشینکاری الکتروشیمیایی و ... قابل تولید هستند. در بین روشهای مذکور فرزکاری به دلیل قابلیت بهره مندی از مزایای برنامه نویسی رایانه ای CNC کاربرد بیشتری داشته و امکان تولید سطح دقیق تر را میسر می سازد. روش دیگر استفاده از استراتژیهای فرزکاری مناسب و بهینه سازی شرایط ماشینکاری برای این سطوح است. همچنین جهت دستیابی به مواد با خواص جدید نیاز به استفاده از کامپوزیتها در صنایع مختلف به طور گسترده ای افزایش یافته است و لذا شناسایی و استفاده کامپوزیتها در صنایع گوناگون امری مهم تلقی می گردد.

با توجه به رقابت زیادی که بین شرکتهای تولیدی وجود دارد دانستن استراتژی ماشینکاری پیش از تولید محصول به ویژه تولید قطعات پیچیده تأثیر به سزایی در کیفیت محصول، افزایش تولید، پایین آمدن زمان ماشینکاری، افزایش طول عمر ابزار، بهره اقتصادی بیشتر و در نهایت افزایش بهره وری دارد و همه این شرایط ناشی از به کارگیری یک استراتژی مناسب می باشد.

از طرفی مواد جدید از جمله کامپوزیتها و تلفیق گوناگون مواد مختلف برای دستیابی به خواص جدید تنوع بسیاری در اختیار طراحان قرار داده و لذا علاقه به استفاده از کامپوزیت برای کاربردهای ویژه با تکنولوژی بالا روز افزون شده است. به عنوان مثال در صنایع هوایی و هوافضا، صنایع نظامی، صنعت خودروسازی، صنایع مرتبط با ورزش و ... استفاده از کامپوزیت رشد چشمگیری داشته است و بنابراین توجه به

فاکتورهایی نظیر نوع استراتژی فرزکاری و اثر پارامترهای ماشینکاری بر روی اینگونه مواد و انجام آزمایش تجربی روی کامپوزیتها و به دست آوردن حالت بهینه، لازم و ضروری می باشد و موجب افزایش بهره وری تولید می گردد.

## ۲- پیشینه تحقیق

راموس و همکارانش [۱] تأثیر استراتژیهای خطوط موازی، شعاعی و آفست سه بعدی را در پرداخت پروانه موتور کشتی بررسی کردند. نتایج نشان داد که استراتژی خطوط موازی در جهت پیشروی دارای کمترین زبری هستند. توه [۲] اثر زوایای مختلف مسیر ابزار را در استراتژی خطوط موازی تک جهته و دو جهته و آفست سه بعدی از نظر سایش ابزار بررسی کرد و زاویه ۶۰ درجه را به عنوان بهترین زاویه معرفی نمود. همچنین در استراتژی آفست سه بعدی، انتخاب نقطه شروع حرکت ابزار اثر قابل توجهی روی طول برش نداشت. اما در استراتژی موازی، یک طرفه یا دو طرفه بودن حرکت ابزار تأثیر زیادی روی طول برش داشت. گولوگلو و ساکاریا [۳] سه استراتژی مختلف را برای حفره تراشی یک قطعه استفاده نمودند. نتایج نشان داد که در روش خطوط موازی یک طرفه و آفست سه بعدی، نرخ پیشروی و در استراتژی خطوط موازی دو طرفه، عمق برش محوری تأثیر بیشتری بر زبری سطح داشتند. توه [۴] در سال ۲۰۰۶ استراتژی های مختلف raster یک طرفه و دو طرفه و 3D-Offset را در خشن کاری فولاد سخت کاری شده AISI H13 از نظر عمر ابزار و زمان ماشینکاری در سرعت ها و عمق برش های مختلف مورد سنجش قرار داد و بیان کرد که Raster دو طرفه کمترین زمان ماشینکاری با بیشترین نرخ براده برداری را نتیجه می دهد. مارشال و گریفیث [۵] از ترکیب استراتژیهای پله ای و خطوط موازی در ماشینکاری سطوح انحنا دار استفاده کردند. آنها مشاهده کردند که در استراتژی پله ای هر چه شیب قطعه بیشتر باشد، تراکم مسیر ابزار افزایش یافته و ارتفاع برآمدگی ها افزایش می یابد. در حالیکه این پدیده برای استراتژی خطوط موازی، در انحنا کمتری رخ می دهد. در نتیجه پیشنهاد شد که بر اساس شیب قطعه کار، ناحیه ماشینکاری به دو بخش تقسیم گردد و دو استراتژی به صورت همزمان بخش مورد نظر را ماشینکاری کنند. کیم و همکاران [۶] با انجام شبیه سازی و آزمایش نیروهای برشی بر روی سطوح شیبدار نشان دادند که

تابع جهت تعیین تغییرات موجود بین نتایج آزمایشها و مقادیر مطلوب استفاده می‌شود. در روش تاگوجی سطوحی از پارامترها که دارای بیشترین مقادیر سیگنال به نویز هستند به عنوان سطوح بهینه معرفی می‌گردند. تابع مذکور با توجه به شرایط مسأله و به-کمک فرمولهای زیر محاسبه می‌گردد [۷]:

حالت اول: مقدار کوچکتر معرف حالت بهینه است.

(۱)

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right]$$

حالت دوم: مقدار بزرگتر معرف حالت بهینه است.

(۲)

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right]$$

حالت سوم: اندازه اسمی مطلوب است.

(۳)

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\bar{y}_i}{s_{y_i}^2} \right]$$

در روابط بالا نسبت S/N مقدار سیگنال به نویز، n تعداد تکرار آزمایشها و y پارامتر خروجی هستند. انتخاب پارامترهای ورودی بستگی به شرایط مختلفی از جمله جنس قطعه کار، جنس ابزار، روش ماشینکاری، استفاده از مایع خنک کننده و غیره دارد. بر این اساس ۴ پارامتر سرعت برشی، نرخ پیشروی، قطر ابزار و عمق ماشینکاری به عنوان پارامترهای ماشینکاری قابل کنترل (پارامترهای ورودی) در نظر گرفته شدند. برای هر پارامتر ۳ سطح طبق جدول ۱ در نظر گرفته شد که انتخاب این سطوح با توجه به جنس قطعه کار و ابزار و مطالعات پیشین صورت گرفت. فاصله بین مسیرهای ابزار نیز در تمامی آزمایشها ۰٫۵ میلیمتر در نظر گرفته شد.

جدول (۱) پارامترهای ماشینکاری و سطوح انتخابی

پارامترهای ماشین کاری	سطوح پارامترها		
	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
سرعت برشی (m/min)	۶۰	۸۰	۱۰۰
نرخ پیشروی (mm/tooth)	۰٫۰۴	۰٫۰۸	۰٫۱۲
عمق ماشینکاری (mm)	۰٫۲	۰٫۳	۰٫۵
قطر ابزار (mm)	۴	۶	۸

بنابر آنچه گفته شد طراحی آزمایش با روش تاگوجی طبق آرایه عمودی L9 صورت گرفت که تعداد آزمایشها را از ۳<sup>۴</sup> به ۹ آزمایش کاهش داد. آرایه L9 چهار ستون دارد که ۴ پارامتر

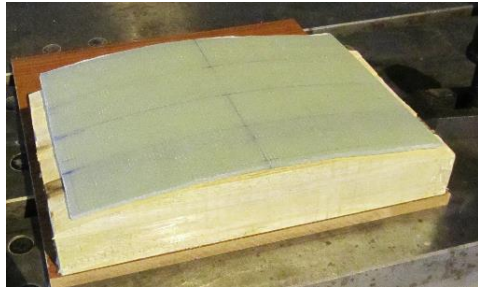
نیروهای برشی در جهت پیشروی ابزار در مقایسه با جهت عمود بر پیشروی ابزار مقدار کمتری دارد. شجری و همکاران [۷] اثر استراتژیهای مختلف ماشینکاری را در فرزکاری سرکروی قطعه ای انحنادار مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق نیروی ماشینکاری و زمان ماشینکاری روی یک نوع فولاد ضدزنگ مقاوم به دمای بالا بررسی شدند و از تحلیل واریانس برای تحلیل نتایج استفاده گردید. نتایج نشان دادند که استراتژی رادیال دارای کمترین نیروی برش و استراتژی اسپیرال دارای بیشترین نیروی برشی می باشد. فرای و همکارانش [۸] نتیجه گرفتند در ماشینکاری سطوح چند ضلعی استراتژی raster زمانی بهینه است که حرکتهای رفت و برگشتی ابزار به موازات بلندترین طول وجه قطعه کار باشد. البر [۹] نیز از استراتژی مسیر دو بعدی برای خشن کاری قطعات سه بعدی استفاده کردند. این روش به contour map method Z level یا parallel-plane contouring نامگذاری شده است. در این حالت با تبدیل مدل سه بعدی به چندین لایه و استفاده از استراتژیهای مناسب دو بعدی در هر لایه می توان علاوه بر افزایش بازده فرایند، برای انواع قطعات پیچیده و یا انحنادار این روش را بکار برد. کریمپنیس و همکاران [۱۰] step over را به عنوان مهمترین پارامتر در استراتژیهای radial, 3D-Offset معرفی کردند. و نتایج نشان داد زاویه خروج و ورود ابزار در این استراتژیها اثر چندانی ندارد. در استراتژیهای spiral گام حرکتهای مارپیچی و در Constant Z عمق برش محوری به عنوان عوامل مهم شناخته شدند. مسادک و همکاران [۱۱] نیز الگوی بهینه سازی پارامترهای ماشینکاری را در وضعیت سرعت بالا دنبال نمودند و از این رهگذر مقادیر بهینه فاکتورها را محاسبه نمودند.

### ۳- طراحی آزمایشها

جهت انجام آزمایشها از روش تاگوجی استفاده شد. این روش در سال ۱۹۶۰ توسط پروفیسور تاگوجی معرفی گردید. روش مذکور می‌تواند با کمترین تعداد آزمایشها، شرایط بهینه را معرفی کند و باعث کاهش زمان و هزینه انجام آزمایشهای مورد نیاز گردد. استفاده از فرآیند بهینه سازی پارامترهای ماشینکاری به کمک روش تاگوجی جایگاه خاصی بین محققان [۱۴-۱۲] داشته است. پس از انتخاب پارامترهای ورودی تابع زمان و مقادیر سیگنال به نویز برای هر سطح از پارامترها محاسبه می‌گردد. این

میلیتر مکعب استفاده شده است. قطعه کار استفاده شده کامپوزیت شیشه/اپوکسی می باشد که به صورت دستی و به روش زیر تهیه گردیده است:

ابتدا قالبی منحنی شکل تهیه کرده و کاملاً تمیز می شود. سپس قالب با واکس مخصوص جهت سهولت کنده شدن قطعه کار از قالب آغشته می گردد. واکس استفاده شده MOLD CARE PRODUCT REXCO، می باشد. در مرحله بعد رزین LR2025 با هاردنر و با درصد اختلاط ۱۰ درصد مخلوط میشود و با برس مخصوص الیافها به آن کاملاً آغشته می شوند. سپس الیاف بعدی روی الیافهای آغشته به رزین قرار داده شده و این عمل تکرار می گردد تا مرحله آخر که در این مرحله دو الیاف باقیمانده با هم روی بقیه الیافها قرار داده شده و با رزین آغشته می شوند. سپس بین ۳ تا ۵ روز قطعه ساخته شده در قالب باقی می ماند تا کاملاً خشک شده و کامپوزیت شکل نهایی خود را به دست آورد. پس از آماده شدن کامپوزیت، نمونه ساخته شده به صورت متقارن به پنج قسمت مساوی و یکسان تقسیم می شود و از هر نمونه جهت انجام دو آزمایش استفاده می گردد. شکل ۱ نمونه نهایی ساخته شده جهت آزمایش را نشان می دهد.



شکل (۱) نمونه کامپوزیت ساخته شده

به منظور زبری سنجی از دستگاه زبری سنج پرتابل Qualitest مدل TR200 با مدل سنسور TS100 ساخت کشور امریکا استفاده گردید.

### ۳-۲- آزمایش های مربوط به استراتژی های فرز کاری

به منظور بررسی تأثیر چهار استراتژی مسیر ابزار یعنی spiral، radial، raster و 3D-offset روی خروجی های فرایند فرز کاری چندین آزمایش طرح ریزی و مطابق جدول ۳ انجام گردیده است. هر کدام از استراتژیها با استفاده از نرم افزار power mill شبیه سازی شدند. این نرم افزار توانایی شبیه سازی ماشینکاری قطعات با استراتژیهای پیشرفته را دارد که با نمایش گرافیکی مسیر براده-

ماشینکاری در ستونها جای می گیرند و ۹ ردیف آن شامل ۹ آزمایش با ترکیب مختلف از سطوح انتخابی است. RASTER با زاویه صفر درجه، 3D-OFFSET، RADIAL و SPIRAL نیز استراتژیهای مورد بررسی بودند. ۹ آزمایش برای هر استراتژی و در کل ۳۶ آزمایش به منظور مقایسه آنها از نظر صافی سطح و نرخ براده برداری انجام گرفت. جدول ۲ طراحی آزمایش طبق آرایه L9 نشان می دهد و جدول ۳ طرح آزمایش برای هر استراتژی را نشان می دهد.

جدول (۲) طراحی آزمایش طبق آرایه L9

شماره آزمایش	فاکتورهای ورودی			
۱	۱	۱	۱	۱
۲	۱	۲	۲	۲
۳	۱	۳	۳	۳
۴	۲	۱	۲	۳
۵	۲	۲	۳	۱
۶	۲	۲	۱	۲
۷	۳	۱	۳	۲
۸	۳	۲	۱	۳
۹	۳	۳	۲	۱

جدول (۳) طرح آزمایش برای هر استراتژی

آزمایش ها	دور اسپیندل (rpm)	نرخ پیشروی (mm/min)	قطر ابزار	عمق ماشینکاری	نرخ پیشروی	سرعت برشی
۱	۷۷۷	۳۸۲	۴	۰/۲	۰/۴	۶۰
۲	۳۱۸۴	۵۰۹	۶	۰/۳	۰/۸	۶۰
۳	۲۳۸۸	۵۷۳	۸	۰/۵	۰/۱۲	۶۰
۴	۳۱۸۴	۲۵۴	۸	۰/۳	۰/۴	۸۰
۵	۶۶۶۹	۱۰۱۹	۴	۰/۵	۰/۸	۸۰
۶	۴۲۴۶	۱۰۱۹	۶	۰/۲	۰/۱۲	۸۰
۷	۵۲۰۷	۴۲۴	۶	۰/۵	۰/۴	۱۰۰
۸	۳۸۰	۶۶۶	۸	۰/۲	۰/۸	۱۰۰
۹	۷۶۶۱	۱۹۱۰	۴	۰/۳	۰/۱۲	۱۰۰

### ۳-۱- تجهیزات مورد نیاز آزمایش ها

به منظور انجام آزمایشهای استراتژیهای مختلف فرزکاری سطح انحنادار از ماشین فرز Bridgeport ساخت کشور تایوان با کنترلر Siemens 850 استفاده شده است. این ماشین دارای حداکثر سرعت پیشروی ۸۰۰۰ rpm و حداکثر نرخ پیشروی ۱۰۰۰۰ mm/min می باشد. در آزمایشها به منظور بررسی استراتژی های مختلف، از ابزار فرز انگشتی سرکروی دولبه با پوشش تنگستن کاربرد و با قطرهای ۴، ۶ و ۸ میلیمتر استفاده شده است. جهت انجام تمامی ۳۶ تست طرح ریزی شده در جدول ۳ از بلوکهای محذب شکل با ابعاد ۳/۵×۱۴×۲۰۰

جدول (۴) طرح آزمایش برای هر استراتژی

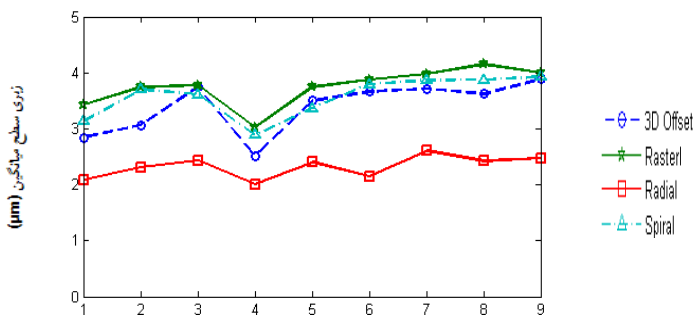
آزمایشها	صافی سطح (Ra) بر حسب $\mu\text{m}$			
	spiral	rsdial	raster	3D offset
۱	۳/۱۳۲	۲/۰۸۵	۳/۴۲۳	۲/۸۴۴
۲	۳/۷۰۶	۲/۳۱۲	۳/۷۴۸	۳/۰۵۹
۳	۳/۶۱۲	۲/۴۳۸	۳/۷۷۶	۳/۷۴۶
۴	۲/۸۸۹	۲/۰۱۱	۳/۰۱۹	۲/۵۲
۵	۳/۳۶۷	۲/۴۰۲	۳/۷۴۵	۳/۵۰۱
۶	۳/۷۹۲	۲/۱۵۳	۳/۸۷۶	۳/۶۶۵
۷	۳/۸۶۹	۲/۶۰۴	۳/۹۷۶	۳/۷۱۶
۸	۳/۸۷۵	۲/۴۲۶	۴/۱۵۱	۳/۶۱۹
۹	۳/۹۲۹	۲/۴۷۱	۴/۰۰۲	۳/۸۹

برداری و توانایی زیاد در کنترل نحوه شبیه سازی مسیرهای مختلف و ابزار، درک مسیر ماشینکاری ایجاد شده را قبل از اجرای آن آسانتر می نماید. این قابلیت باعث می گردد که اشکالات موجود در انتخاب روش ماشینکاری، قبل از اجرا دیده شده و نسبت به اصلاح آن اقدام گردد و به دلیل مزایای ذکر شده و با هدف گرفتن کد مسیرهای مختلف (NC Code) و ارسال به کنترلر دستگاه CNC از این نرم افزار در شبیه سازی استراتژیها استفاده شده است. سطح نمونه های قطعه کار آماده شده، برای انجام آزمایشهای فرزکاری به منظور کاهش هزینه های ماشینکاری به دو بخش مقارن تقسیم می شوند و هر نیمه نیز به چهار قسمت مساوی برای انجام چهار استراتژی ذکر شده تقسیم گردیده است و بدین ترتیب از هر قطعه برای انجام ۲ آزمایش و ۴ استراتژی و در مجموع ۸ آزمایش استفاده شده است. به منظور جلوگیری از تاب برداشتن و شکستن نمونه ها از تکیه های چوبی استفاده گردید. بدین صورت که سطح بیرونی چوبها طبق سطح منحنی داخلی نمونه ها ماشینکاری شده تا بدین ترتیب قطعات روی تکیه گاهها قرار گرفته و سپس مهار گردند. به منظور ارتقای دقت انجام آزمایشها، چوبها به میز دستگاه با چسب ثابت گردید و با پایان یافتن آزمایشهای مربوط به هر قطعه، قطعه بعدی روی چوبها قرار داده شد. جهت انجام دقیق تر هر آزمایش با استفاده از ساعت اندیکاتور تمام قسمتهای نمونه ها تنظیم گردیدند.

#### ۴- تحلیل نتایج و بحث

##### ۴-۱- زبری سطح

به منظور مقایسه زبری حاصل از استراتژیهای مختلف در آزمایشهای انجام گرفته، زبری سطح در قسمتهای مختلف هر آزمایش اندازه گیری شد. نتایج به دست آمده حاصل از مقادیر میانگین زبری سطح ( $R_a$ ) در قسمتهای مختلف قطعه، در جدول ۴ برای هر استراتژی و در تمامی آزمایشها ارائه گردیده است. برای مقایسه بهتر، نتایج جدول فوق در شکل ۲ ترسیم شده است. محور افقی این نمودار شماره آزمایش و محور عمودی نتایج زبری سطح بر حسب میکرومتر را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می گردد در همه آزمایشها استراتژی Radial دارای بهترین صافی سطح و کمترین عدد زبری، و استراتژی Raster دارای نازلترین صافی سطح و بیشترین عدد زبری می باشد.



شماره آزمایش

شکل (۲) مقایسه زبری سطح میانگین در استراتژیهای مختلف

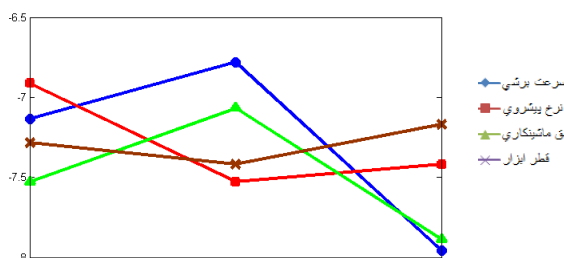
دلیل این امر می تواند مربوط به کمتر بودن میزان نیروی ماشینکاری در استراتژی Radial نسبت به سایر استراتژیها باشد و هر چه این نیرو افزایش یابد به تبع آن ارتعاشات نیز افزایش یافته و در نتیجه میزان زبری سطح زیادتر خواهد شد. پس از استراتژی Radial زبری سطح در استراتژی 3D-Offset دارای مقدار کمتری نسبت به سایر فرآیندها می باشد. از آنجا که در زبری سطح، کوچکترین مقدار سیگنال به نویز معرف بهینه ترین حالت است لذا با استفاده از رابطه (۱) مقادیر سیگنال به نویز و سپس میزان سیگنال به نویز میانگین برای سطوح مختلف در هر استراتژی محاسبه می شود. در جدول ۵ مقادیر سیگنال به نویز برای استراتژیهای مختلف آورده شده است.

جدول (۷) مقادیر سیگنال به نویز میانگین زبری سطح برای سطوح مختلف در

استراتژی Radial

پارامترهای فرآیند	مقادیر سیگنال به نویز میانگین برای سطوح مختلف در استراتژی Radial		
	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
سرعت برشی	-۷/۱۳۴	-۶/۷۸	-۷/۹۵۶
نرخ پیشروی	-۶/۹۱۳	-۷/۵۲۹	-۷/۴۱۹
عمق ماشینکاری	-۷/۵۲۹	-۷/۰۶۸	-۷/۸۸۸
قطر ابزار	-۷/۲۸۳	-۷/۴۱۷	-۷/۱۶۸

با توجه به شکل ۴ و مقادیر ماکزیمم سیگنال به نویز، حالت بهینه قابل دستیابی است. در این استراتژی، برای سرعت برشی، سطح ۲، برای نرخ پیشروی، سطح ۱، عمق ماشینکاری، سطح ۲ و برای قطر ابزار، سطح ۳ بهینه ترین حالت های انجام آزمایش می باشد.



شکل (۴) نمودار سیگنال به نویز میانگین زبری سطح برای سطوح مختلف در استراتژی

Radial

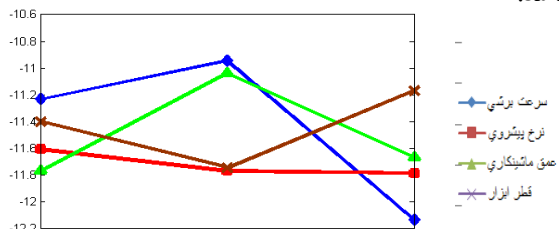
مقادیر سیگنال به نویز میانگین برای سطوح مختلف در استراتژی Raster در جدول ۸ و شکل ۵ ارائه شده است.

جدول (۸) مقادیر سیگنال به نویز میانگین زبری سطح برای سطوح مختلف در

استراتژی Raster

پارامترهای فرآیند	مقادیر سیگنال به نویز میانگین برای سطوح مختلف در استراتژی Raster		
	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
سرعت برشی	-۱۱/۲۳۴	-۱۰/۹۴۴	-۱۲/۱۳۲
نرخ پیشروی	-۱۱/۶۰۶	-۱۱/۷۶۹	-۱۱/۷۸۴
عمق ماشینکاری	-۱۱/۷۶۹	-۱۱/۰۳۹	-۱۱/۶۶۶
قطر ابزار	-۱۱/۴	-۱۱/۲۴۴	-۱۱/۱۶۷

با توجه به مقادیر ماکزیمم سیگنال به نویز، حالت بهینه در این استراتژی برای سرعت برشی، سطح ۲، برای نرخ پیشروی، سطح ۱، برای عمق ماشینکاری، سطح ۲ و برای قطر ابزار، سطح ۳ می باشد.



شکل (۵) نمودار سیگنال به نویز میانگین زبری سطح برای سطوح مختلف در استراتژی

Raster

این نتایج برای استراتژی 3D-Offset در جدول ۹ و شکل ۶ نشان داده شده اند.

جدول (۵) مقدار سیگنال به نویز زبری سطح برای استراتژی های مختلف

آزمایشها	مقادیر سیگنال به نویز (S/N)			
	spiral	radial	raster	3D offset
۱	-۹/۹۲	-۶/۳۸	-۱۰/۶۹	-۹/۰۸
۲	-۱۱/۳۸	-۷/۲۸	-۱۱/۴۸	-۹/۷۱
۳	-۱۱/۱۵	-۷/۷۴	-۱۱/۵۴	-۱۱/۴۷
۴	-۹/۲۱	-۶/۰۷	-۹/۶	-۸/۰۳
۵	-۱۰/۵۴	-۷/۶۱	-۱۱/۴۷	-۱۰/۸۸
۶	-۱۱/۵۸	-۶/۶۶	-۱۱/۷۸	-۱۱/۲۸
۷	-۱۱/۷۵	-۸/۳۱	-۱۱/۹۹	-۱۱/۴
۸	-۱۱/۷۶	-۷/۷	-۱۲/۳۶	-۱۱/۱۷
۹	-۱۱/۸۸	-۷/۸۶	-۱۲/۰۴	-۱۱/۸

جدول ۶ مقادیر سیگنال به نویز میانگین برای سطوح مختلف در

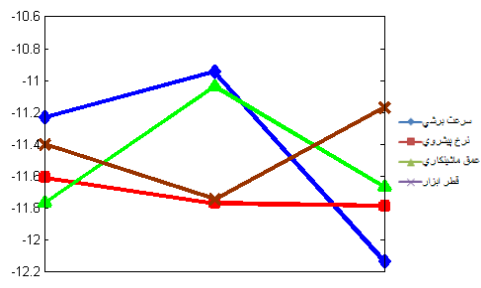
استراتژی Spiral را نمایش می دهد.

جدول (۶) مقادیر سیگنال به نویز میانگین زبری سطح برای سطوح مختلف در

استراتژی spiral

پارامترهای فرآیند	مقادیر سیگنال به نویز میانگین برای سطوح مختلف در استراتژی Spiral		
	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
سرعت برشی	-۱۰/۸۱۶	-۱۰/۴۴۵	-۱۱/۸۰۱
نرخ پیشروی	-۱۱/۰۸۶	-۱۱/۲۲۹	-۱۱/۵۳۹
عمق ماشینکاری	-۱۱/۲۲۹	-۱۰/۸۲۶	-۱۱/۱۵۱
قطر ابزار	-۱۰/۷۸۲	-۱۱/۵۶۹	-۱۰/۷۱۲

برای مقایسه بهتر، این نتایج در شکل ۳ نیز ترسیم گردیده اند. با توجه به شکل مزبور و مقادیر ماکزیمم سیگنال به نویز ارائه شده در جدول، حالت بهینه قابل دستیابی است. بدین صورت که برای سرعت برشی، سطح ۲، برای نرخ پیشروی، سطح ۱، برای عمق ماشینکاری، سطح ۲ و برای قطر ابزار، سطح ۳ بهینه ترین حالت ها برای انجام آزمایش می باشند.



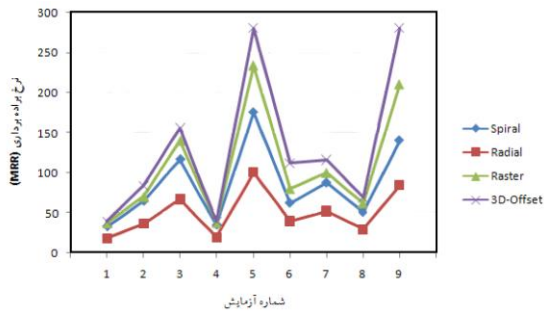
شکل (۳) نمودار سیگنال به نویز میانگین زبری سطح برای سطوح

مختلف در استراتژی spiral

جدول ۷ مقادیر سیگنال به نویز میانگین و شکل ۴ نمودار مربوطه را برای سطوح مختلف در استراتژی Radial نمایش می دهند.



می‌گردد در همه آزمایشها استراتژی 3D-Offset دارای بیشترین نرخ براده‌برداری و استراتژی رادیال دارای کمترین نرخ براده-برداری می‌باشد. با توجه به اینکه زمان انجام هر کدام از استراتژیها تأثیر زیادی بر نرخ براده‌برداری دارد و بلحاظ کمتر بودن زمان انجام آزمایش در استراتژی 3D-Offset نسبت به دیگر استراتژیها بیشترین نرخ براده‌برداری در این فرآیند حاصل گردیده است.



شکل (۷) مقایسه نرخ براده‌برداری در استراتژی‌های مختلف

از آنجا که در نرخ براده‌برداری، بزرگترین مقدار سیگنال به نویز معرف بهترین حالت است با استفاده از رابطه ۲ مقادیر سیگنال به نویز و سپس با استفاده از آنها سیگنال به نویز میانگین برای سطوح مختلف در هر استراتژی محاسبه می‌شود. در جدول ۱۱ مقادیر سیگنال به نویز نرخ براده‌برداری برای استراتژیهای مختلف به‌دست آمده است.

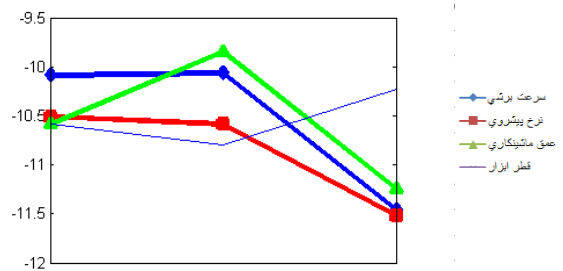
جدول (۱۱) مقادیر سیگنال به نویز نرخ براده‌برداری در استراتژی‌های مختلف

آزمایشها	مقادیر سیگنال به نویز (S/N)			
	spiral	radial	raster	3D offset
۱	۳۰/۳۸۸	۲۵/۴۵۵	۳۱/۴۷۵	۳۲/۰۷۵
۲	۳۶/۲۴۲	۳۱/۲۸۶	۳۶/۹۳۶	۳۸/۵۲
۳	۴۱/۳۷۳	۳۶/۵۱۲	۴۲/۹۵۷	۴۳/۸۷۲
۴	۳۰/۹۱۶	۲۵/۸۴۹	۳۱/۶۷	۳۲/۰۷۵
۵	۴۴/۸۹۵	۴۰/۰۳۴	۴۷/۳۹۴	۴۸/۹۷۷
۶	۳۵/۹۱۳	۳۲/۰۷۵	۳۸/۰۹۶	۴۱/۰۲۲
۷	۳۸/۸۷۴	۳۴/۳۳	۴۰/۰۳۴	۴۱/۳۷۳
۸	۳۴/۱۷	۲۹/۴۲۵	۳۵/۹۱۳	۳۶/۹۳۶
۹	۴۲/۹۵۷	۳۸/۵۲	۴۶/۴۷۹	۴۸/۹۷۷

جدول (۹) مقادیر سیگنال به نویز میانگین زبری سطح برای سطوح مختلف در استراتژی 3D-Offset

پارامترهای فرآیند	مقادیر سیگنال به نویز میانگین برای سطوح مختلف در استراتژی 3D-Offset		
	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
سرعت برشی	-۱۰/۰۸۷	-۱۰/۰۶۴	-۱۱/۴۵۷
نرخ پیشروی	-۱۰/۵۱	-۱۰/۵۸۹	-۱۱/۵۱۷
عمق ماشینکاری	-۱۰/۵۸۹	-۹/۸۴۶	-۱۱/۲۵۲
قطر ابزار	-۱۰/۵۸۷	-۱۰/۷۹۸	-۱۰/۲۲۳

با توجه به این داده‌ها، بهترین حالت در این استراتژی برای سرعت برشی، سطح ۲، برای نرخ پیشروی، سطح ۱، برای عمق ماشینکاری، سطح ۲ و برای قطر ابزار، سطح ۳ می‌باشد.



شکل (۶) نمودار سیگنال به نویز میانگین زبری سطح برای سطوح مختلف در استراتژی 3D-Offset

#### ۴-۲- نرخ براده‌برداری

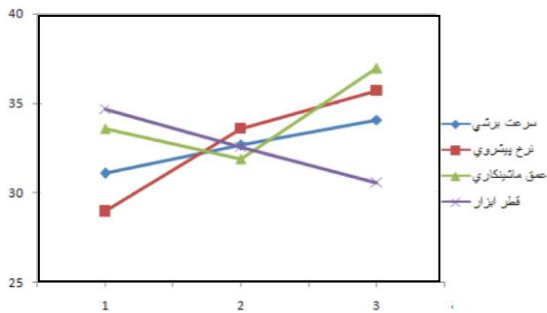
به‌منظور مقایسه نرخ براده‌برداری در استراتژیهای مختلف در آزمایشهای انجام شده، حجم براده برداشته شده در هر آزمایش محاسبه و به زمان انجام ماشینکاری تقسیم و نرخ براده‌برداری بر حسب  $\text{mm}^3/\text{min}$  محاسبه گردید. این نتایج در جدول ۱۰ و شکل ۷ ارائه گردیده‌اند.

جدول (۱۰) نتایج نرخ براده‌برداری در استراتژی‌های مختلف

آزمایشها	نرخ براده‌برداری (MMR)			
	spiral	radial	raster	3D offset
۱	۳۳/۰۷	۱۸/۷۴	۳۷/۴۸	۴۰/۱۶
۲	۶۴/۸۸	۳۶/۶۷	۷۰/۲۸	۸۴/۳۴
۳	۱۱۷/۱۳	۶۶/۹۳	۱۴۰/۵۶	۱۵۶/۱۸
۴	۳۵/۱۴	۱۹/۶۱	۳۸/۳۳	۴۰/۱۶
۵	۱۷۵/۷	۱۰۰/۴	۲۳۴/۲۷	۲۸۱/۱۲
۶	۶۲/۴۷	۴۰/۱۶	۸۰/۳۲	۱۱۲/۴۴۸
۷	۸۷/۸۵	۵۲/۰۶	۱۰۰/۴	۱۱۷/۱۳
۸	۵۱/۱۱	۲۹/۶	۶۲/۴۷	۷۰/۲۸
۹	۱۴۰/۵۶	۸۴/۳۴	۲۱۰/۸۴	۲۸۱/۱۲

محور افقی نمودار شکل ۷ مربوط به شماره آزمایش و محور عمودی معرف نرخ براده‌برداری می‌باشند. همانطور که مشاهده



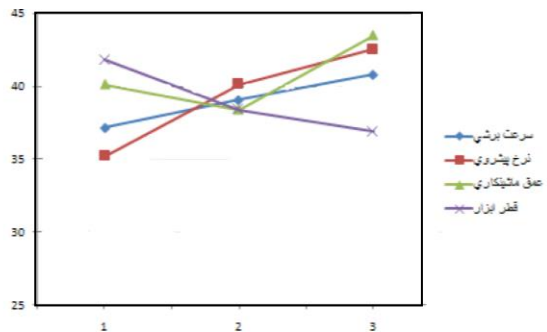


شکل (۹) نمودار سیگنال به نویز میانگین نرخ براده برداری برای سطوح مختلف در استراتژی radial

جدول (۱۴) مقادیر سیگنال به نویز میانگین نرخ براده برداری برای سطوح مختلف در استراتژی raster

پارامترهای فرآیند	مقادیر سیگنال به نویز میانگین برای سطوح مختلف در استراتژی Raster		
	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
سرعت برشی	۳۷/۱۱۳	۳۲/۰۵۳	۴۰/۰۸۹
نرخ پیشروی	۲۵/۱۶۱	۴۰/۰۸۱	۴۲/۰۵۱
عمق ماشینکاری	۴۰/۰۸۱	۳۸/۳۶۲	۴۳/۶۶۲
قطر ابزار	۴۱/۷۸۳	۳۸/۳۵۵	۳۶/۸۶۷

با توجه به نتایج جدول ۱۴ و شکل ۱۰، وضعیت بهینه در استراتژی raster با در نظر گرفتن پارامتر نرخ براده برداری برای سرعت برشی، سطح ۳، برای نرخ پیشروی، سطح ۳، برای عمق ماشینکاری، سطح ۳ و برای قطر ابزار، سطح ۱ می باشد.



شکل (۱۰) نمودار سیگنال به نویز میانگین نرخ براده برداری برای سطوح مختلف در استراتژی raster

جدول (۱۵) مقادیر سیگنال به نویز میانگین نرخ براده برداری برای سطوح مختلف در استراتژی 3D-Offset

پارامترهای فرآیند	مقادیر سیگنال به نویز میانگین برای سطوح مختلف در استراتژی Offset		
	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
سرعت برشی	۳۸/۱۵۶	۴۰/۶۹۲	۴۲/۴۲۹
نرخ پیشروی	۳۶/۶۷۸	۴۱/۴۷۸	۴۴/۶۲۴
عمق ماشینکاری	۴۱/۴۷۸	۳۹/۸۵۸	۴۴/۷۴۱
قطر ابزار	۴۲/۳۴۳	۴۰/۳۰۵	۳۷/۶۲۸

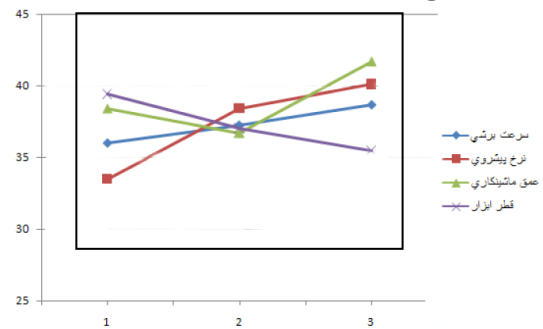
با در نظر گرفتن نتایج جدول ۱۵ و شکل ۱۱ وضعیت بهینه برای استراتژی 3D-offset برای سرعت برشی، سطح ۳، برای نرخ

جدول ۱۲ و شکل ۸ مقادیر سیگنال به نویز میانگین نرخ براده برداری برای سطوح مختلف در استراتژی spiral را نشان می دهند.

جدول (۱۲) مقادیر سیگنال به نویز میانگین نرخ براده برداری برای سطوح مختلف در استراتژی spiral

پارامترهای فرآیند	مقادیر سیگنال به نویز میانگین برای سطوح مختلف در استراتژی Spiral		
	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
سرعت برشی	۳۶/۰۰۱	۳۷/۲۴۱	۳۸/۶۶۷
نرخ پیشروی	۳۳/۴۹	۳۸/۴۳۵	۴۰/۰۸۱
عمق ماشینکاری	۳۸/۴۳۵	۳۶/۷۰۵	۴۱/۷۱۴
قطر ابزار	۳۹/۴۱۳	۳۷/۰۱	۳۵/۴۸۶

با توجه به نتایج مزبور، برای سرعت برشی، سطح ۳، برای نرخ پیشروی، سطح ۳، برای عمق ماشینکاری، سطح ۳ و برای قطر ابزار، سطح ۱ بهینه ترین حالت انجام آزمایش با توجه به پارامتر نرخ براده برداری می باشند.



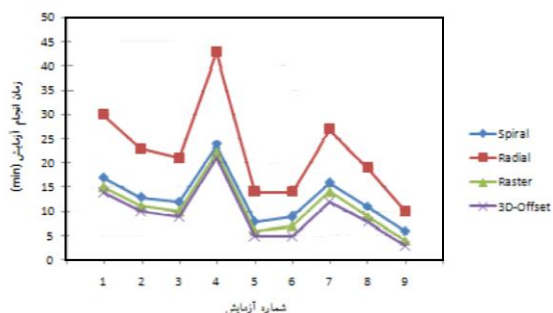
شکل (۸) نمودار سیگنال به نویز میانگین نرخ براده برداری برای سطوح مختلف در استراتژی spiral

این نتایج برای استراتژی های radial، raster و 3D offset به ترتیب در جداول ۱۳ الی ۱۵ و اشکال ۹ الی ۱۱ ارائه گردیده اند.

جدول (۱۳) مقادیر سیگنال به نویز میانگین نرخ براده برداری برای سطوح مختلف در استراتژی radial

پارامترهای فرآیند	مقادیر سیگنال به نویز میانگین برای سطوح مختلف در استراتژی Radial		
	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
سرعت برشی	۳۱/۰۸۴	۳۲/۶۵۳	۳۴/۰۹۲
نرخ پیشروی	۲۸/۹۸۵	۳۳/۵۸۲	۳۵/۷۰۲
عمق ماشینکاری	۳۳/۵۸۲	۳۱/۸۸۵	۳۶/۹۵۹
قطر ابزار	۳۴/۶۷	۳۲/۵۶۴	۳۰/۵۹۵

نتایج جدول ۱۳ و شکل ۹ حاکی از این است که در استراتژی radial برای سرعت برشی، سطح ۳، برای نرخ پیشروی، سطح ۳، برای عمق ماشینکاری، سطح ۳ و برای قطر ابزار، سطح ۱ بهینه ترین حالت انجام آزمایش می باشند.



شکل (۱۲) نمودار زمان ماشینکاری برای استراتژیهای مختلف

### ۵- نتیجه گیری

در این پژوهش اثرات استراتژیهای مختلف مسیر ابزار در فرزکاری سطحی محدب از جنس کامپوزیت شیشه/اپوکسی مورد بررسی قرار گرفته است. در فرآیند انجام این تحقیق، از ابزار فرز انگشتی با نوک کروی دو لبه بدلیل تطابق هندسی مطلوب این ابزار با سطوح پیچیده استفاده گردیده است. هدف از این آزمایشها بررسی استراتژیهای مختلف فرزکاری و پارامترهای ماشینکاری جهت سطوح محدب کامپوزیتی و شناسایی بهترین استراتژی فرزکاری و بهینه ترین پارامترهای ماشینکاری در فرزکاری سطوح محدب کامپوزیتی می باشد. با استفاده از بهینه ترین روش فرزکاری و پارامترهای ماشینکاری می توان به محصولی با کیفیت بالا دست یافت و برای تولید انبوه از آن استفاده کرد. نتایج کلی قابل استنباط از اینکار تحقیقاتی را می توان به شرح ذیل خلاصه نمود:

۱- استراتژی radial برای فرزکاری سطوح محدب کامپوزیت شیشه/اپوکسی بدلیل دارا بودن کمترین مقدار زبری و بهترین کیفیت سطح مناسب ترین حالت می باشد.

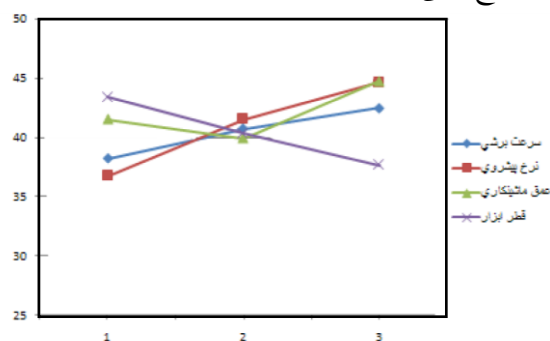
۲- استراتژی raster برای فرزکاری سطوح محدب کامپوزیت شیشه/اپوکسی بدلیل دارا بودن بیشترین مقدار زبری و نازلترین کیفیت سطح مناسب نمی باشد.

۳- نرخ براده برداری در استراتژی 3D-offset نسبت به روشهای دیگر بیشتر می باشد.

۴- در مواردی که نرخ تولید از اهمیت بالایی برخوردار باشد، استراتژی 3D-offset گزینه مناسبی است. چرا که در مدت زمان یکسان، کیفیت سطح قطعه تولید شده با این روش نسبت به روشهای spiral و raster مناسب تر است.

۵- استراتژی radial دارای کمترین میزان نرخ براده برداری می باشد، لذا در مواقعی که هدف اصلی بالا بودن نرخ تولید بوده

پیشروی، سطح ۳، برای عمق ماشینکاری، سطح ۳ و برای قطر ابزار، سطح ۱ می باشد.



شکل (۱۱) نمودار سیگنال به نویز میانگین نرخ براده برداری برای سطوح مختلف در استراتژی 3D-Offset

### ۴-۳- زمان ماشینکاری

زمان ماشینکاری برای استراتژیهای مختلف مسیر ابزار و برای هر آزمایش جداگانه اندازه گیری و نتایج در جدول ۱۶ و شکل ۱۲ ارائه شده اند.

جدول (۱۶) زمان ماشینکاری برای استراتژیهای مختلف

آزمایشها	زمان انجام آزمایش (دقیقه)			
	spiral	radial	raster	3D offset
۱	۱۷'۳۵"	۲۹'۵۵"	۱۵'۱۶"	۱۳'۵۱"
۲	۱۳'۲۰"	۲۳'۰۶"	۱۱'۲۵"	۱۰'۲۷"
۳	۱۲'۰۶"	۲۱'۰۲"	۱۰'۲۰"	۹'۱۷"
۴	۲۴'۳۸"	۴۲'۴۲"	۲۲'۰۲"	۲۰'۴۳"
۵	۸'۳۶"	۱۴'۰۱"	۶'۳۴"	۵'۳۰"
۶	۸'۵۰"	۱۴'۲۰"	۶'۵۴"	۵'۱۷"
۷	۱۶'۱۱"	۲۷'۲۴"	۱۳'۵۵"	۱۳'۳۰"
۸	۱۱'۱۷"	۱۹'۲۶"	۹'۳۰"	۸'۲۸"
۹	۶'۳۱"	۹'۵۰"	۴'۳۰"	۳'۰۵"

در نمودار شکل ۱۲ محور افقی شماره آزمایش را نشان می دهد و محور عمودی مبین زمان انجام آزمایش می باشد. همانطور که در نمودار مزبور مشخص است استراتژی 3D-Offset دارای کمترین زمان و استراتژی Radial دارای بیشترین زمان انجام آزمایش می باشد.

- [7] Shajari S., Sadeghi M.H., 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*, vol. 2014, 2014, pp 10-15.
- [8] Fry C.G., Fry T.L., Raman S., Experimental verification of tool wear effects in alternate path traversal in milling, *Proceedings of the 1999 ASME Energy Sources Technology Conference*, 1999, Houston, TX, USA.
- [9] Elber G., Freeform surface region optimization for 3-axis and 5-axis milling, *Computer-Aided Design*, vol. 27, No. 6, 1995, pp. 4S-470.
- [10] Krimpenis A., Fousekis A., Vosniakos G., Assessment of sculptured surface milling strategies using design of experiments, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 25, no. 5-6, 2005, pp. 444-453.
- [11] Msaddek E.B., Bouaziz Z., Dessein G., Baili M., Optimization of pocket machining strategy in HSM, *International Journal Advance Manufacturing Technology*, vol. 62, 2012, pp. 69-81.
- [12] Shukla R., Singh D., Experimentation investigation of abrasive water jet machining parameters using Taguchi and Evolutionary optimization techniques, *Swarm and Evolutionary Computation*, Vol. 32, 2017, pp. 167-183.
- [13] Lia C., Xiaoa Q., Tangb Y., Lic L., A method integrating Taguchi, RSM and MOPSO to CNC machining parameters optimization for energy saving, *Journal of Cleaner Production*, vol. 135, 2016, pp. 263-275.
- [14] Panga J.S., Ansaria M.N.M., Omar S.Z., Moaz H.A., Sapuanb S.M., Taguchi design optimization of machining parameters on the CNC end milling process of halloysite nanotube with aluminium reinforced epoxy matrix (HNT/Al/Ep) hybrid composite, *HBRC Journal*, vol. 10, No. 2, 2014, pp 138-144.
- و کیفیت سطح در درجه بعدی اهمیت قرار دارد استفاده از این روش مناسب نمی‌باشد.
- ۶- برای دستیابی به کیفیت سطح مطلوب و کاهش زبری سطح استفاده از نرخ پیشروی پایین، عمق ماشینکاری کم و ابزار با قطر بزرگتر مناسب می‌باشد.
- ۷- جهت دستیابی به نرخ براده‌برداری بالا می‌توان از نرخ پیشروی و عمق ماشینکاری بیشتر استفاده نمود و برای جلوگیری از افزایش زبری سطح از استراتژی radial استفاده کرد.
- ۸- استراتژی‌های radial و 3D-offset به ترتیب دارای بیشترین و کمترین زمان لازم جهت ماشینکاری می‌باشند. استراتژیهای raster و spiral پس از 3D-offset به ترتیب دارای کمترین زمان ماشینکاری هستند.

## مراجع

- [1] Ramos A.M., Relvas C., Simoes J.A., 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. 1-3, 2003, pp. 209-216.
- [2] Toh C.K., A study of the effects of cutter path strategies and orientations in milling, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 152, no. 3, 2004, pp. 346-356.
- [3] Gologlu C., Sakarya N., 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, 2008, pp. 7-15.
- [4] Toh C.K., Cutter path orientations when high-speed finish milling inclined hardened steel, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 27, No. 5-6, 2006, pp. 473-480.
- [5] Marshall S., Griffiths J.G., A new cutter-path topology for milling machines, *Computer-Aided Design*, Vol. 26, No. 3, 1994, pp. 204-214.
- [6] Kim G.M., Cho P.J., Chu C.N., Cutting force prediction of sculptured surface ball-end milling using Z-map, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 40, no. 2, 2000, pp. 277-291.

