



ماشین کاری قطعات دارای سطوح با فرم آزاد به روش 3+2 محور

وحید آقایی¹، حسین امیرآبادی^{2*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه بیرجند، بیرجند
2- دانشیار، مهندسی مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه بیرجند، بیرجند
* بیرجند، صندوق پستی 97175/376، hamirabadi@birjand.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 22 تیر 1395
پذیرش: 14 شهریور 1395
ارائه در سایت: 06 آذر 1395
کلید واژگان:
ماشین کاری 3+2 محور
سطوح با فرم آزاد
تقسیم‌بندی سطح

با توجه به رشد سریع صنعت و افزایش رقابت میان شرکت‌ها، نیاز به ساخت قطعات دارای سطوح با فرم آزاد با هزینه کمتر و دقت بالاتر احساس می‌شود. امروزه با وجود مزایای زیاد ماشین‌های CNC پنج محوره، به دلیل هزینه‌ی بالای خرید، اپراتوری و نگهداری این ماشین‌ها و پایداری دینامیکی پایین و برنامه‌نویسی پیچیده‌ی آنها، در صنعت تا حد امکان استفاده از ماشین‌های سه محوره ترجیح داده می‌شود. به دلیل عدم توانایی ماشین‌کاری قطعات پیچیده توسط ماشین‌های سه محوره، ماشین‌کاری 3+2 محوره پیشنهاد داده شده است. در این پژوهش برای تعیین جهت‌گیری‌های مناسب ابزار برای ماشین‌کاری 3+2 محوره روش جدیدی استفاده شده است. در این روش نقاط قابل روئیت و مخفی قطعه‌کار و کمترین طول ابزار با استفاده از ابرنقاط قطعه‌کار به دست آمد و سطح قطعه‌کار بر اساس جهت‌گیری‌های ابزار به تکه سطح‌هایی تقسیم‌بندی شد. در این پژوهش کمترین تعداد جهت‌گیری ابزار محاسبه شد تا علاوه بر کمتر شدن زمان کلی ماشین‌کاری، مرز بین تکه سطح‌ها کاهش یابد و در نتیجه باعث بهبود کیفیت سطح شود. برای ارزیابی کارایی روش ماشین‌کاری 3+2 محوره، دقت سطوح ماشین‌کاری شده با این روش توسط دستگاه اندازه‌گیری مختصات اندازه‌گیری شد و با مدل قطعه مقایسه گردید.

Free-Form Surfaces Machining by 3+2 Axis Method

Vahid Aghaei, Hossein Amirabadi*

Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran
* P.O.B. 97175/376, Birjand, Iran, hamirabadi@birjand.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 12 July 2016
Accepted 04 September 2016
Available Online 26 November 2016

Keywords:
3+2 -Axis Machining
Free Form Surface
Surface Clustering

ABSTRACT

Due to the rapid growth of manufacturing industry and increased competition among companies, the need to produce parts with free-form surfaces with lower cost and higher accuracy is felt. Nowadays, besides all of the great benefits of 5-axis CNC machines the use of 3-axis CNC machines is more common in industry because of the high capital investment, high operating and maintenance cost, the low dynamic stability and their complex programming in 5-axis machining. Therefore it is preferred that 3-axis machines be used in industry where possible. Due to the inability of machining some complex parts by 3-axis machines, the 3+2-axis machining technology has been proposed. In this paper, a new method has been used to determine the tool appropriate orientation for 3+2-axis machining. In the proposed method, visible and invisible points of the surface and the shortest tool length are calculated for the workpiece and surface partitioning is finally performed. The minimum number of tool orientation results from this method reduces overall machining time and the boundaries between machining partitions to improve the surface quality. A 3+2-axis machining of an impeller is performed and the efficiency and surface accuracy are evaluated by the use of a coordinate measuring machine.

1- مقدمه

بالای این ماشین‌ها و پشتیبانی ضعیف سیستم‌های طراحی و ساخت به کمک کامپیوتر²، استقبال صنعت ساخت و تولید از این فناوری محدود است. همچنین ماشین‌های CNC پنج محوره نیاز به فرآیند برنامه نویسی پیچیده و هزینه بالای سرمایه‌گذاری و آموزش اپراتورهای متخصص دارد. درحالی‌که ماشین‌کاری سطوح توسط ماشین‌های CNC سه محور، به دلیل قیمت نسبتاً پایین این ماشین‌ها، سادگی در ارتباط با سیستم‌های طراحی و ساخت به کمک کامپیوتر و تولید مسیر ابزار، پایداری دینامیکی ماشین در هنگام برابرداری و... به‌طور معمول بیشتر ترجیح داده می‌شوند. هرچند ماشین‌کاری

قطعات پیچیده¹ در صنایع هوافضا، اتومبیل، لوازم خانگی، قالب تزریق و قالب فلزی کاربرد گسترده‌ای دارند. برخی از این قطعات را به دلیل دارا بودن سطوح پیچیده که ابزار نمی‌تواند با یک راستای منحصربه‌فرد آن سطح را ماشین‌کاری نماید، نمی‌توان توسط ماشین CNC سه محوره ماشین‌کاری نمود. قطعات پیچیده معمولاً به وسیله‌ی ماشین‌های CNC پنج محوره ماشین‌کاری می‌گردند [1].
با وجود مزایا و خصوصیات ماشین‌کاری چند محوره، به دلیل قیمت

² CAD/CAM

¹ Sculptured

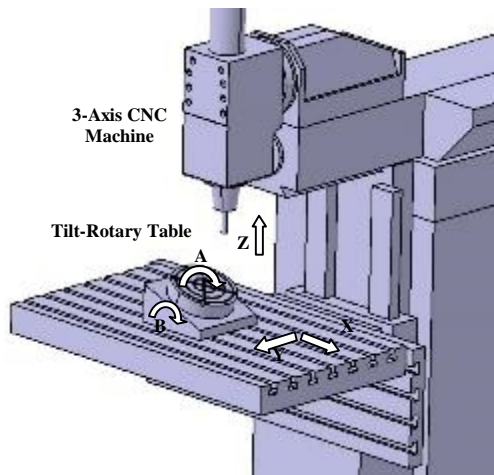


Fig. 1 3+2-axis machine

شکل 1 ماشین 3+2 محور

ماشین کاری می‌شود. جهت‌گیری ابزار و مرزهای هر قسمت طوری تعیین شده‌اند که زمان ماشین کاری کلی کمینه گردد.

سو و لی [3] جدول BMT^2 ، که نشان دهنده قابلیت ماشین کاری هر لبه موقعیت ابزار³ (CE) می‌باشد را تشکیل دادند. آنها با توجه به سه ویژگی شرایط دید، اجتناب از تصادف و محدوده ماشین کاری، قابلیت ماشین کاری هر CE را مشخص نمودند. این جدول به صورت باینری می‌باشد که عدد 1 نشان‌دهنده این است که لبه موقعیت ابزار توسط راستای تعیین شده ابزار قابلیت ماشین کاری دارد و عدد صفر نشان دهنده عدم قابلیت ماشین کاری لبه موقعیت ابزار توسط این راستا می‌باشد.

چن و همکاران [1] برای بهبود روش تولید مسیر ابزار ماشین CNC 3+2 محور، ابتدا سطوح پیچیده را بر اساس محدب و مقعر بودن تقسیم‌بندی نمودند که تقسیم‌بندی کلی سطح نام‌گذاری کردند؛ سپس هر تکه سطح را بر اساس ویژگی‌هایی از جمله انحنا، گوسی، انحنا میانی، بردار نرمال سطح و بیشترین و کمترین انحنا با استفاده از روش c -میانگین فازی دوباره تقسیم‌بندی نمودند که تقسیم‌بندی دقیق سطح نام‌گذاری کردند.

رومان [2] سطوحی با فرم آزاد را برای ماشین کاری 3+2 محور بر اساس ویژگی بردار نرمال سطح با استفاده از الگوریتم دسته‌بندی k -میانگین فازی، تقسیم‌بندی نمود.

شان و همکاران [4] توسط ماشین CNC سه محور و میز چرخشی دوار قطعاتی را که توسط ماشین‌های CNC چهار محور ماشین کاری می‌گردند، بدون ظاهر شدن اثر برش بیشینه⁴ ماشین کاری نمودند.

3- تعیین جهت‌گیری‌های ابزار

استفاده از مدل‌های سه‌بعدی بر پایه‌ی ابر نقاط، به دلایلی چون سرعت، ظرفیت رایانه‌های شخصی، سادگی ساختار، در دسترس بودن داده‌های به‌دست‌آمده از وسایل اندازه‌گیری و افزایش سرعت داده‌گیری، به‌تازگی مورد توجه قرار گرفته است. یکی از روش‌های نمایش سطوح مدل استفاده از نقطه به‌عنوان عنصر پایه ساختار هندسی است. بر این اساس یک سطح شامل مجموعه‌ای از نقاط می‌شود که ابر نقاط نامیده می‌شود [5].

1-3- تعیین نقاط موقعیت ابزار و نقاط تماسی ابزار

سه محوره به طور کلی نیازمند زمان ماشین کاری طولانی‌تری است [2]. پاسخی مؤثر و کاربردی برای رفع برخی معایب ماشین‌های CNC پنج محوره استفاده از ماشین کاری 3+2 محور است. ماشین کاری 3+2 محور از سادگی موقعیت‌یابی ابزار ماشین CNC سه محور و جهت‌گیری ابزار ماشین CNC پنج محور استفاده می‌کند تا سطوح پیچیده را ماشین کاری نماید [2]. در عملیات خشن کاری به دلیل اعمال نیروهای زیاد ماشین کاری، نیاز به استفاده از ماشین‌های صلب‌تر می‌باشد. بنابراین از ماشین کاری 3+2 محور به دلیل دارا بودن صلبیت بالای ماشین‌های CNC سه محور، در فرآیند خشن‌تراشی قطعات پیچیده می‌توان استفاده نمود.

در روش ماشین کاری 3+2 محور، سطح به قسمت‌هایی تقسیم می‌شود و سپس هر قسمت با استفاده از یک جهت‌گیری ثابت ابزار، ماشین کاری می‌گردد [2]. این تقسیمات باید به گونه‌ای باشد که ابزار بتواند توسط یک جهت‌گیری ثابت به تمامی نواحی آن قسمت دسترسی داشته باشد.

در پژوهش حاضر روش جدیدی برای تعیین نقاط قابل روئیت و مخفی قطعه در جهت‌گیری‌های مختلف ابزار ارائه شده است. در این روش تمامی زوایای قابل دسترسی ابزار برای هر نقطه از سطح قطعه‌کار به‌دست می‌آید. نقاط سطح قطعه‌کار با استفاده از ابر نقاط قطعه و به فاصله معینی (این فاصله بستگی به صافی سطح دارد) از یکدیگر تعیین می‌گردند. در الگوریتم پیشنهادی تعداد کمترین جهت‌گیری‌های ابزار برای ماشین کاری کلی قطعه‌کار با توجه به کمترین طول ابزار و به‌طور مستقیم از ابر نقاط قطعه‌کار به‌دست می‌آید.

روش ماشین کاری 3+2 محوره و کارهای صورت گرفته در این زمینه در بخش 2 مرور می‌گردد. در بخش 3 الگوریتم مورد استفاده برای تعیین جهت‌گیری‌های ابزار تشریح می‌گردد. در بخش 4 تعیین نواحی ماشین کاری توسط نرم‌افزار به‌صورت عملی مورد بررسی قرار می‌گیرد و در بخش 5 نتایج به دست آمده مورد تحلیل قرار گرفته و خطای ماشین کاری در روش پیشنهادی بررسی می‌گردد.

2- ماشین کاری 3+2 محور

به‌عنوان پیشنهادی کم هزینه برای ماشین کاری CNC پنج محور، فناوری ماشین کاری CNC پنج محور گسسته مطرح شده است؛ این شیوه از ماشین CNC سه محور عادی به‌اضافه‌ی میز ایندکسی خودکار و یا دستی استفاده می‌کند. در این نوع از ماشین‌ها به دلیل اینکه چرخش‌های میز هماهنگ نیستند و به‌طور هم‌زمان با سه محور خطی کنترل نمی‌شوند، هرکدام از این چرخش‌ها به‌عنوان $\frac{1}{2}$ محور نامیده می‌شوند؛ بنابراین یک ماشین CNC سه محوره به همراه میز ایندکسی دو محور دوار را ماشین $3\frac{1}{2}$ محور و به‌طور اختصار ماشین 3+2 محور نام‌گذاری می‌نمایند [1]. شکل 1 ماشین 3+2 محور را نشان می‌دهد. در این نوع از ماشین‌ها تعداد محورهای قابل‌کنترل هم‌زمان، 3 محور است درحالی‌که تعداد محور مورد نیاز برای ماشین کاری قطعه‌کار، پنج محور می‌باشد.

در ماشین کاری CNC 3+2 محور راستای¹ ابزار هنگام ماشین کاری ثابت باقی می‌ماند. اگر یک سطح توسط یک راستای ابزار ماشین کاری نشود (قابل ماشین کاری نباشد) می‌بایست سطح تقسیم‌بندی گردد. هر تکه سطح دارای خواص سطح مشابه است که می‌تواند توسط یک راستای ابزار ماشین کاری گردد؛ بنابراین هر تکه سطح با استفاده از یک جهت‌گیری ثابت ابزار

² Binary Machinability Table

³ Cutter Location-edge (CE)

⁴ Overcut

¹ Orientation

قابل روئیت، اجتناب از برخورد و محدوده کاری ماشین ابزار برقرار باشد [3]. موقعیت ابزار⁵ توسط مرکز و بردار محور ابزار مشخص می‌شود. مرکز ابزار به فاصله‌ی شعاع ابزار از نقطه تماسی ابزار و در جهت بردار نرمال در نقطه‌ی تماسی ابزار، قرار دارد [6]. در شکل 3 بردار محور ابزار (T)، مرکز ابزار یا نقطه موقعیت ابزار (O) و زوایای تشکیل دهنده‌ی محور ابزار نشان داده شده است. موقعیت ابزار در فضا توسط دو زاویه‌ی θ و ϕ تعیین می‌شود.

پس از تعیین نقاط موقعیت ابزار و قرارگیری مرکز ابزار (O) بر روی این نقاط، جهت‌گیری ابزار باید بررسی گردد. جهت‌گیری ابزار باید به گونه‌ای باشد که پدیده‌ی تصادف رخ ندهد و همچنین این جهت‌گیری در محدوده‌ی زوایای میزاینده‌ی قرار داشته باشد. به این منظور ابزار با گامی مشخص در جهت دو زاویه θ و ϕ دوران می‌کند. در هر مرحله از جهت‌گیری ابزار، فاصله‌ی تمامی نقاط تماسی ابزار با بردار محور ابزار محاسبه می‌گردد. اگر این فاصله کمتر از شعاع ابزار باشد، در نتیجه تصادف رخ خواهد داد و این نقطه را نمی‌توان با این جهت‌گیری ابزار ماشین کاری نمود و این جهت‌گیری رد خواهد شد. فاصله‌ی یک نقطه از یک خط از رابطه (2) به دست می‌آید.

$$D = \frac{|u \times P_0 \vec{P}|}{|u|} \quad (2)$$

اگر L خطی باشد که با بردار غیر صفر u موازی و P نقطه‌ای خارج (یا روی) L باشد؛ در این صورت فاصله‌ی P از L برابر با D می‌باشد. P₀ نقطه‌ی دلخواهی روی L است.

با توجه به محاسبه تصادف و عدم تصادف هر جهت‌گیری ابزار برای هر نقطه موقعیت ابزار، می‌توان جدول BMT را تعیین نمود که نشان دهنده قابلیت ماشین کاری هر نقطه موقعیت ابزار می‌باشد. این جدول بر اساس کار سو و همکاران [3] می‌باشد، با این تفاوت که آنها این جدول را برای هر مسیر ابزار به کار بردند. در این جدول به هر نقطه‌ی موقعیت ابزار که توسط زوایای بتوان آن را ماشین کاری نمود، عدد 1 اختصاص می‌یابد؛ در غیر این صورت عدد آن صفر می‌باشد.

به عنوان نمونه در شکل 4 سطحی دو بعدی به همراه نقاط تماسی ابزار، نقاط موقعیت ابزار و بردارهای نرمال واقع در نقاط تماسی نشان داده شده است. زمانی که ابزار بر روی نقاط موقعیت قرار می‌گیرد، می‌تواند جهت‌گیری‌های متفاوتی داشته باشد. به دلیل آنکه منحنی دوطرفه‌ی است، فقط زاویه‌ی θ بررسی می‌گردد و زاویه ϕ صفر می‌باشد. با فرض اینکه گام حرکت دورانی 45 درجه و محدوده‌ی دوران میزاینده‌ی 180 درجه باشد، جدول BMT برای نقاط موقعیت ابزار به صورت جدول 1 می‌باشد.

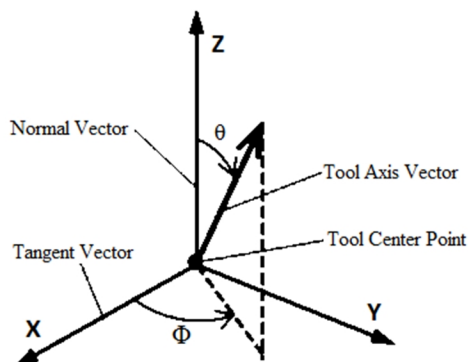


Fig. 3 Cutter Location

شکل 3 تعیین موقعیت ابزار

نقاط تماسی ابزار¹ (CC) نقاط تماس یا تداخل لبه‌ی برنده‌ی ابزار با سطح قطعه کار می‌باشند. نقاط موقعیت ابزار² (CL) نقطه‌ی می‌باشند که مرکز نوک ابزار در این نقاط واقع می‌گردد. ابزار می‌تواند در نقاط موقعیت قرار گیرد ولی جهت‌گیری‌های متفاوتی داشته باشد. نقاط موقعیت ابزار با توجه به نقاط تماسی ابزار به دست می‌آیند؛ این نقاط در فاصله‌ی به اندازه‌ی شعاع ابزار و در راستای بردار نرمال سطح قطعه از نقاط تماسی ابزار، قرار دارند. در شکل 2 نقطه تماسی و موقعیت ابزار نشان داده شده است.

نقاط تماس ابزار با سطح قطعه بر اساس میزان ارتفاع کاسپ و تلرانس و تری، به دست می‌آیند. در این پژوهش برای سهولت در محاسبات، ابر نقاط گرفته‌شده از قطعه کار به عنوان نقاط تماسی ابزار در نظر گرفته شده است. البته شایان ذکر است که ابر نقاط به صورت همگن و با فواصل نقاط تقریبی به اندازه‌ی شعاع ابزار، فیلتر شده است.

برای به دست آوردن نقاط موقعیت ابزار به طور مستقیم از ابر نقاط قطعه، بردار نرمال سطح در هر نقطه از این ابر نقاط، باید محاسبه گردد. تعیین بردار نرمال از روی ابر نقاط قطعه به روش هوپ³ صورت گرفته است. در روش هوپ برای هر نقطه‌ی P از ابر نقاط S، نزدیک‌ترین k همسایگی⁴ این نقطه به دست می‌آید. نزدیک‌ترین k همسایگی با N_k نشان داده می‌شود. برای محاسبه‌ی بردار نرمال، مرکز O_i مربوط به N_k ابتدا محاسبه می‌شود. مرکز O_i نقطه‌ی میانگین نقاط همسایگی نقطه‌ی P می‌باشد. برای اندازه‌گیری بردار نرمال، ماتریس مرتبط کوواریانس N_k بر اساس رابطه‌ی (1) تشکیل می‌شود.

$$M_{cov} = \sum_{x_i \in N_k} (X_i - O_i)(X_i - O_i)^T \quad (1)$$

اگر $\lambda_1^1, \lambda_1^2, \lambda_1^3$ مقادیر ویژه ماتریس M_{cov} باشند و بردارهای ویژه متناظر با هریک از مقادیر ویژه بردارهای $\xi_i^1, \xi_i^2, \xi_i^3$ باشند و همچنین $\lambda_1^1 < \lambda_1^2 < \lambda_1^3$ باشد، ξ_i^1 بردار نرمال نقطه‌ی P است [5].

3-2- تقسیم‌بندی سطح

هدف از تقسیم‌بندی سطح، تقسیم سطح پیچیده به تعدادی از تکه سطح‌ها با ویژگی‌های یکسان می‌باشد به طوری که هر تکه سطح می‌تواند به طور صحیح در هر تنظیم قطعه در دسترس قرار گیرد و به طور مؤثر توسط ماشین‌های CNC سه محوره ماشین کاری شود [1].

برای اینکه یک تکه سطح بتواند ماشین کاری شود باید 3 شرط، نقاط

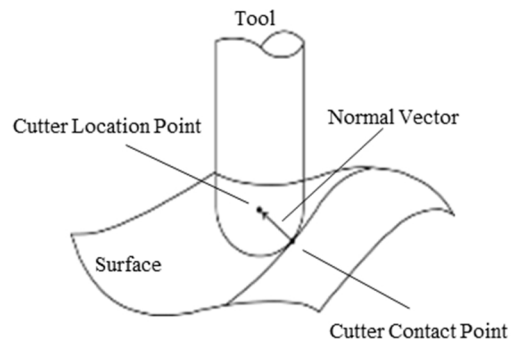


Fig. 2 Cutter Location and Cutter Contact Points

شکل 2 نقاط موقعیت و تماسی ابزار

¹ Cutter Contact Point (CC-Point)

² Cutter Location Point (CL-Point)

³ Hoppe

⁴ k-Nearest Neighbor

موقعیت ابزار باشد، می توان با یک جهت گیری ابزار، قطعه کار را ماشین کاری نمود؛ این جهت گیری ابزار همان زاویه ی مربوط به ستون است. بنابراین تنها با ماشین CNC 3 محور می توان این نوع قطعات را ماشین کاری نمود.

در صورتی که با یک جهت گیری ابزار نتوان قطعه کار را ماشین کاری نمود، دو جهت گیری ابزار بررسی می گردد. در این مرحله دو ستون از جدول BMT به صورت سطر به سطر با یکدیگر جمع می شوند، اگر تمامی سطرها عددی غیر از صفر باشند، با این دو جهت گیری می توان قطعه کار را ماشین کاری نمود. در غیر این صورت این دو جهت گیری رد خواهد شد. این عمل برای تمامی حالات دو ستونی اجرا می شود؛ در صورتی که هیچ کدام از دو ستون ها این شرایط را دارا نباشند، با دو جهت گیری نمی توان قطعه کار را ماشین کاری نمود و باید شرایط سه جهت گیری بررسی گردد. این روند ادامه می یابد تا کمترین تعداد جهت گیری های ابزار به دست آید.

در نتیجه برای ماشین کاری منحنی سطح قطعه کار شکل 4 ابزار با دو زاویه صفر و 90 درجه می تواند این قطعه را ماشین کاری نماید، بنابراین کمترین تعداد جهت گیری های ابزار (تنظیمات قطعه کار)، 2 جهت گیری می باشد. همچنین علاوه بر دو زاویه صفر و 90 درجه با دو جهت گیری 45 و 90 درجه و 45 و 135 درجه نیز می توان این قطعه را ماشین کاری نمود.

3-2-2- تعیین نواحی ماشین کاری در هر تنظیم قطعه کار

در هر جهت گیری در جدول BMT تنها نقاطی که ستون مربوط به آن جهت گیری عدد 1 می باشد می توانند ماشین کاری شوند. در قطعاتی با تعداد دو و بیشتر از دو جهت گیری ابزار، نقاطی وجود دارند که می توان آنها را در چند جهت گیری ماشین کاری نمود. به عنوان مثال نقطه ی موقعیت ابزار شماره ی (11) در شکل 4 را می توان هم با زاویه ابزار صفر درجه و هم با زاویه ی 90 درجه ماشین کاری نمود. در صورتی که این نقطه با زاویه ی صفر درجه ماشین کاری شود، به دلیل اینکه نقاط اطراف نقطه ی (11) را فقط می توان با زاویه ی 90 درجه ماشین کاری نمود، ابزار باید دو ناحیه ی جدا از هم را ماشین کاری نماید؛ این خود باعث افزایش سطح های تقسیم شده و در نتیجه افزایش مرز بین تکه سطح ها می شود. در مرز بین تکه سطح ها به دلیل آنکه ابزار با دو جهت گیری مختلف، سطح را ماشین کاری می نماید، صافی سطح کمتری را دارا می باشد؛ از این رو هرچه تعداد تکه سطح ها کمتر باشد، مرز بین آنها نیز کمتر و سطح یکنواخت تر می گردد.

بنابراین نقاطی که با چند جهت گیری ابزار می توانند ماشین کاری شوند بر اساس نقاط همسایگی آنها، جزو زاویه های قرار می گیرند که بیشترین همسایگی را این نقطه داشته باشد. در شکل 4 ماشین کاری با دو زاویه ی صفر و 90 درجه، نقاط 1، 2 و 3 با زاویه ی صفر درجه و نقاط 6 و 11 با زاویه ی 90 درجه ماشین کاری می گردند.

3-2-3- تعیین کمترین طول ابزار

اگر بتوان در ماشین کاری قطعات از ابزاری با طول کمتر استفاده نمود، انحراف ابزار و ارتعاشات به حداقل می رسند، این خود باعث بهبود سطح ماشین کاری شده می گردد. همچنین احتمال شکست ابزار نیز در این حالت کمتر می شود. محاسبه کمترین طول ابزار برای هر حالت از جهت گیری های مختلف ابزار به این صورت است که فاصله ی تصویر تمامی نقاطی که در محدوده ی اطراف ابزار قرار دارند روی محور ابزار با نقطه ی موقعیت ابزار به دست می آید. سپس بزرگترین این فواصل به عنوان کوچکترین اندازه ی طول ابزار در نظر گرفته می شود. شکل 6 نحوه محاسبه کمترین طول مجاز ابزار را نشان می دهد.

جهت گیری های مختلف ابزار تحت گام مشخص شده نیز برای نقطه (1) شکل 4 نشان داده شده است.

جدول 1 قابلیت ماشین کاری نقاط موقعیت ابزار (جدول BMT) را در محدوده دوران میزایندکسی نشان می دهد. به عنوان مثال برای نقطه ی (1) سه زاویه ی 0، 45 و 90 درجه قابل دسترس ابزار هستند بنابراین عدد 1 در جدول به این زوایا اختصاص داده شده است و در دو زاویه ی 135 و 180 درجه ابزار تصادف خواهد داشت که عدد قابلیت ماشین کاری آن صفر می باشد. این جدول برای تمامی نقاط موقعیت ابزار به دست می آید. سطرهای این جدول نشان دهنده تعداد نقاط موقعیت ابزار و ستون های آن جهت گیری های مختلف ابزار را نشان می دهد. در اینجا نکته ی بسیار مهم این است که مجموع اعداد هر یک از سطرها ی جدول BMT نباید صفر شود؛ در غیر این صورت با این گام حرکتی نمی توان قطعه کار را ماشین کاری نمود و باید میزان گام حرکتی کوچک تر گردد.

روند نمای محاسبه ی جدول BMT در شکل 5 آمده است. نقاط CC و CL به ترتیب همان نقاط تماسی ابزار و نقاط موقعیت ابزار می باشند.

3-2-1- محاسبه کمترین حالات جهت گیری های ابزار

در جدول BMT اگر مجموع اعداد یک ستون برابر با تعداد نقاط کلی

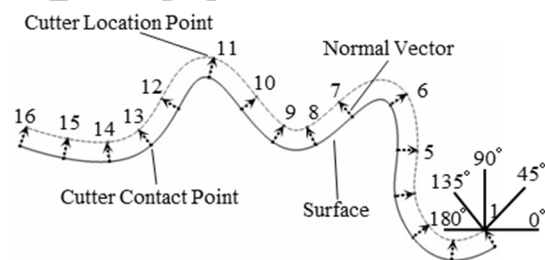


Fig. 4 variety tool orientation for machining point (1)

شکل 4 جهت گیری های مختلف ابزار برای ماشین کاری نقطه (1)

جدول 1 قابلیت ماشین کاری نقاط موقعیت ابزار

Table 1 machinability of cutter location points

	180	135	90	45	0	θ	P
0	0	0	1	1	1	1	1
0	0	1	1	1	1	2	2
0	0	1	1	1	1	3	3
0	0	0	1	1	1	4	4
0	0	0	1	1	1	5	5
0	0	1	1	1	1	6	6
0	1	1	0	0	0	7	7
0	1	1	1	0	0	8	8
0	0	1	1	0	0	9	9
0	0	1	1	0	0	10	10
1	1	1	1	1	1	11	11
1	1	1	0	0	0	12	12
0	1	1	0	0	0	13	13
0	1	1	0	0	0	14	14
0	1	1	1	0	0	15	15
1	1	1	1	0	0	16	16

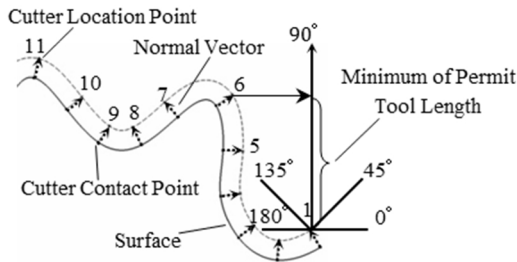


Fig. 6 calculating of permit tool length minimum

شکل 6 محاسبه کمترین طول مجاز ابزار

4- ماشین کاری تجربی به روش 3+2 محور

در این پژوهش یک ایمپلر که دارای پره‌هایی با زاویه منفی می‌باشد به‌عنوان قطعه‌کار انتخاب شده است (شکل 7). این نوع قطعات را به دلیل دارا بودن سطوح با فرم آزاد به‌طور معمول توسط ماشین‌های CNC پنج محوره ماشین کاری می‌نمایند. در اینجا توسط ماشین 3+2 محور که از ماشین فرز CNC سه محور مدل FP4MB به همراه دستگاه تقسیم (به عنوان میز ایندکسی) تشکیل شده، استفاده شده است.

ابتدا ابر نقاط قطعه از روی مدل قطعه توسط نرم‌افزار کتیا¹ محاسبه می‌گردد. این ابرنقاط به‌عنوان نقاط تماسی ابزار در نظر گرفته می‌شود و با فواصلی کمتر از قطر ابزار کمینه می‌گردد. سپس با توجه به شعاع ابزار، نقاط موقعیت ابزار به‌دست می‌آید. ابزار مورد استفاده برای ماشین کاری این قطعه تیغه فرز انگشتی سر کرومی HSS با قطر 10 میلی‌متر می‌باشد. به دلیل متقارن بودن قطعه و کم شدن حجم محاسبات، تنها ابرنقاط یک شیار بین دو پره از ایمپلر محاسبه می‌گردد. شکل 8 ابر نقاط یک شیار از قطعه به همراه بردارهای نرمال واقع بر این نقاط را نشان می‌دهد.

با توجه به جدول BMT این شیار و کوچک‌ترین طول ابزار ممکن، دو



Fig. 7 the sample of impeller to machining

شکل 7 مدل ایمپلر به عنوان قطعه ماشین کاری

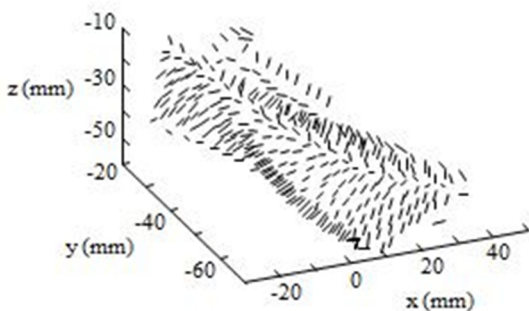


Fig. 8 cutter contact points and normal vectors on this points

شکل 8 نقاط تماسی ابزار و بردارهای نرمال واقع بر این نقاط

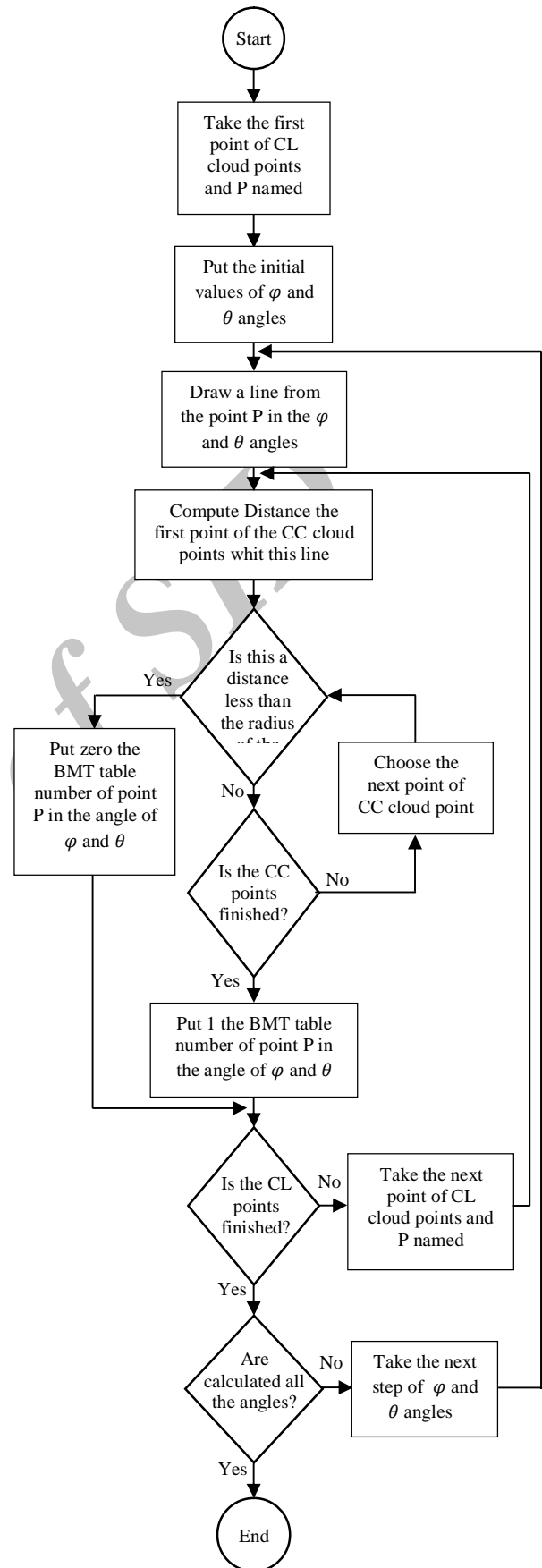


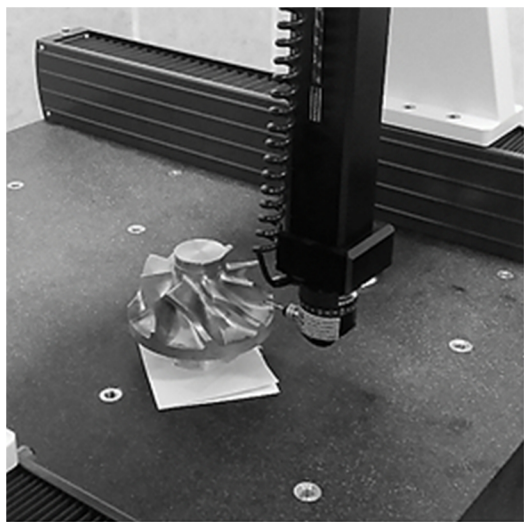
Fig. 5 flowchart for calculating of BMT table

شکل 5 روندنمای محاسبه جدول BMT

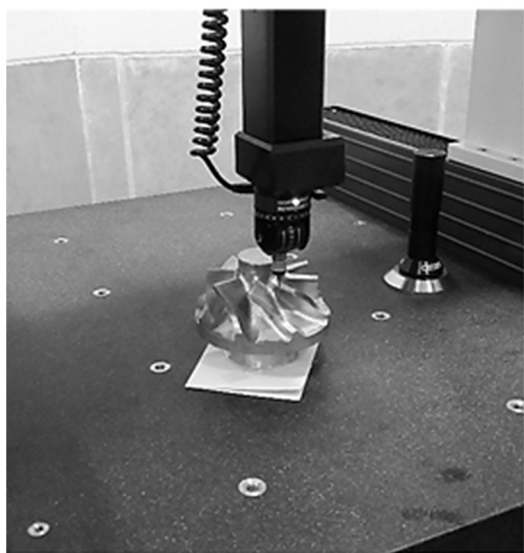
¹ CATIA

محدوده‌های ماشین کاری دارای صافی سطح یکنواختی نمی‌باشد. از جمله دلایل این امر خطا در حرکت‌های چرخشی میز ایندکسی و خطای اپراتوری در محاسبه‌ی نقطه صفر قطعه کار می‌باشد.

میزان خطای ماشین کاری در نواحی مرز بین محدوده‌های ماشین کاری در تنظیمات مختلف قطعه کار مورد بررسی قرار گرفته است و توسط دستگاه اندازه‌گیری مختصات¹ هگزاگن مدل سی-دبلیو-450² ساخت شرکت چین-وی پرسیس تکنولوژی³ کشور تایوان اندازه‌برداری گردیده است. این دستگاه مجهز به نرم‌افزار کاپس دی-ام-ای-اس⁴ و سیستم پراب تماسی نیروی استاندارد تی پی⁵ 20 می‌باشد. آزمایشات با پراب به قطر 3 میلی‌متر و طول سوزن پراب 20 میلی‌متر اجرا گردیده است. شکل 11 قطعه کار در حین



(a)



(b)

Fig 11 workpiece during measuring by CMM a) horizontal probe b) vertical probe

شکل 11 قطعه کار در حین اندازه‌برداری توسط دستگاه اندازه‌گیری مختصات (a) پراب افقی (b) پراب عمودی

¹ Coordinate Measuring Machine (CMM)

² CMM (Hexagon) CWB-450

³ CHIEN WEI PRECISE TECHNOLOGY

⁴ CAPPS DMIS

⁵ TP20 Standard Force

جهت‌گیری برای ماشین کاری این شیار از قطعه به دست آمده است. نواحی قابل ماشین کاری برای این دو جهت در شکل 9 به صورت نواحی تیره رنگ نشان داده شده است.

در شکل 10 قطعه کار در حین ماشین کاری در دو جهت‌گیری ابزار نشان داده شده است.

5- بحث و نتیجه‌گیری

در فرآیند ماشین کاری پنج محوره قطعات دارای سطوح با فرم آزاد، به دلیل آنکه در مرحله پرداخت کاری نیازی به بلند شدن ابزار از روی سطح نمی‌باشد، صافی سطح یکنواخت است؛ اما در ماشین کاری 3+2 محوره، مرز بین

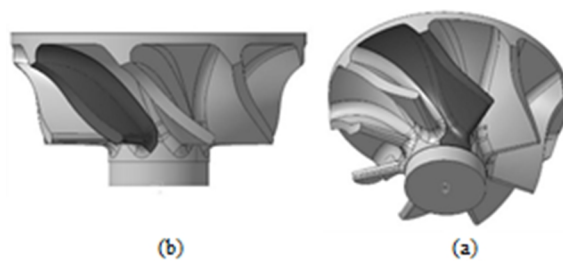
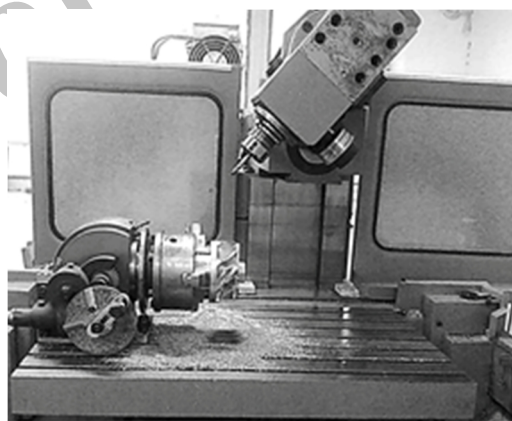
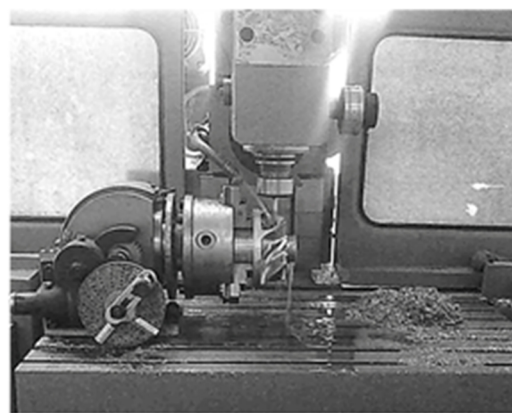


Fig. 9 machining limits. a) first tool orientation b) second tool orientation

شکل 9 محدوده ماشین کاری. (a) جهت‌گیری اول ابزار (b) جهت‌گیری دوم ابزار



(a)



(b)

Fig. 10 Impeller machining. a) first tool orientation b) second tool orientation

شکل 10 ماشین کاری ایمپلر (a) جهت‌گیری اول ابزار (b) جهت‌گیری دوم ابزار

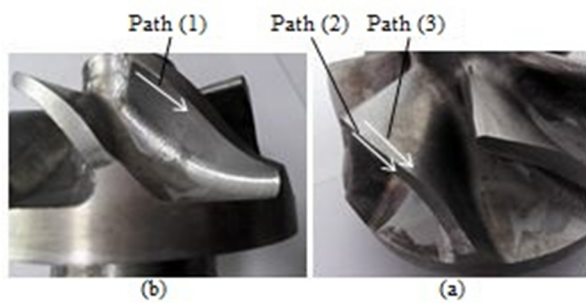


Fig. 14 paths of measurement between two workpiece setups. a) first setups b) second setups

شکل 14 مسیرهای اندازه‌گیری بین دو تنظیم قطعه‌کار. (a) تنظیم اول (b) تنظیم دوم

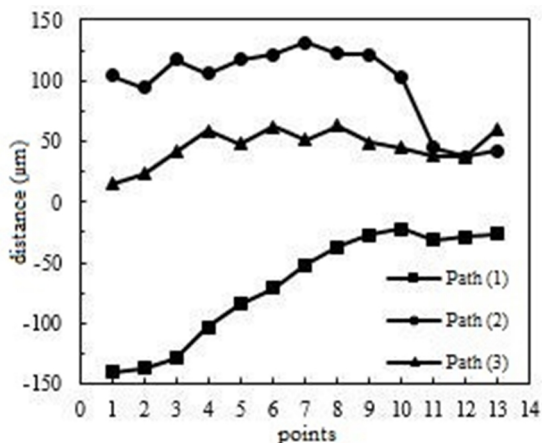


Fig. 15 distance between measured points and workpiece model on illustrated three paths in Fig 14

شکل 15 فاصله نقاط اندازه‌گیری شده از مدل قطعه در سه مسیر نشان داده شده در شکل 14



Fig. 16 path of measurement on root of the blade

شکل 16 مسیر اندازه‌گیری بر روی ریشه پره

میزان خطا در دو مسیر نشان داده شده در شکل 18 محاسبه گردیده و در شکل 19 نشان داده شده است.

با توجه به مقادیر خطای اندازه‌گیری شده سطح قطعه توسط ماشین اندازه‌گیری مختصات (CMM)، میزان خطا در هر تنظیم قطعه‌کار به جهت‌گیری ابزار نسبت به سطح قطعه نیز بستگی داشته و با تغییر در زاویه محور ابزار نسبت به سطح قطعه، میزان خطای ماشین‌کاری تغییر می‌نماید. با این وجود به دلیل ایجاد امکان دسترسی ابزار به تمامی قسمت‌های یک تکه

اندازه‌برداری توسط دستگاه اندازه‌گیری مختصات در دو حالت پراب به صورت عمودی و تحت زاویه را نشان می‌دهد.

در ناحیه مرزی (مرز بین دو تنظیم) نشان داده شده در شکل 12، نواحی دو تنظیم مشخص شده است. میزان خطا در دو طرف این مرز و بر روی مسیر نشان داده شده در شکل 12 محاسبه گردیده و در شکل 13 نشان داده شده است. نمودار شکل 13 نشان دهنده میزان اضافه بار و برش بیشینه (میزان اختلاف نقاط اندازه‌گیری شده از مدل طراحی شده قطعه) در این ناحیه مرزی می‌باشد.

محور افقی در شکل 13 نشان‌دهنده مدل قطعه اصلی می‌باشد. نقاط اندازه‌گیری شده در بالای این محور بیانگر نقاط دارای اضافه بار و نقاط اندازه‌گیری شده در زیر این محور بیانگر نقاطی می‌باشند که برش اضافی در آنها صورت گرفته است.

در شکل 14 مسیرهای داده‌برداری دستگاه اندازه‌گیری مختصات در نواحی بین دو تنظیم مشخص گردیده است. مسیر (1) مربوط به تنظیم دوم و مسیرهای (2) و (3) مربوط به تنظیم اول هستند. میزان خطا بر روی مسیرهای نشان داده شده در شکل 14 و در لیه پره برای هر سه ناحیه (الف)، (ب) و (ج) محاسبه گردیده و در شکل 15 نشان داده شده است. میزان خطا در مسیر نشان داده شده در شکل 16 محاسبه گردیده و در شکل 17 نشان داده شده است.

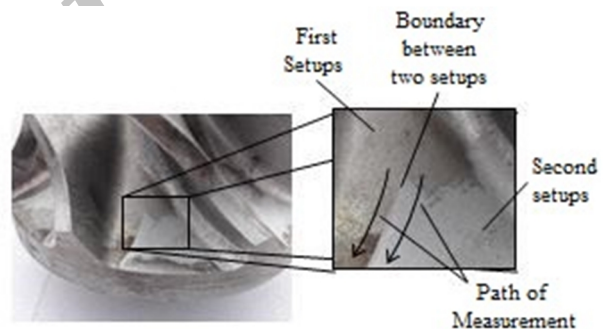


Fig. 12 Boundary between two workpiece setups (1,2) and path of measurement CMM

شکل 12 خط مرزی بین دو تنظیم (1و2) قطعه‌کار و مسیر داده‌برداری دستگاه اندازه‌گیری مختصات

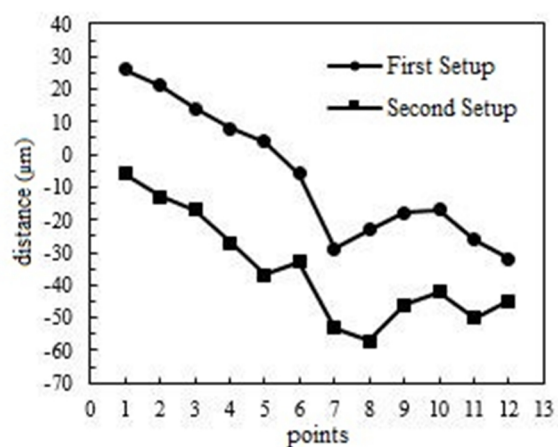


Fig. 13 distance between measured points and workpiece model on illustrated two paths in Fig 12

شکل 13 فاصله نقاط اندازه‌گیری شده از مدل قطعه در دو مسیر نشان داده شده در شکل 12

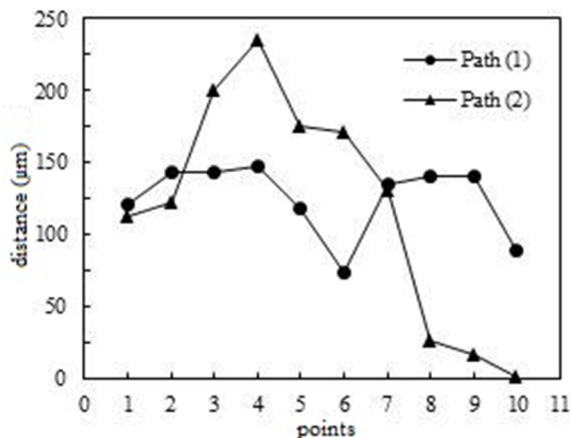


Fig. 19 distance between measured points and workpiece model on illustrated two paths in Fig 18

شکل 19 فاصله نقاط اندازه‌گیری شده از مدل قطعه در دو مسیر نشان داده شده در شکل 18



Fig. 20 machined impeller by 3+2-axis machining method

شکل 20 ایمپلر ماشین‌کاری شده به روش 3+2 محور

6- مراجع

- [1] Z. C. Chen, Z. Dong, G. W. Vickers, Automated surface subdivision and tool path generation for 3½-axis CNC machining of sculptured parts, *Computers in Industry*, Vol. 50, No. 3, pp. 319-331, 2003.
- [2] A. Roman Flores, *Surface partitioning for 3+2-axis Machining*, PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, University of Waterloo, Canada, 2007.
- [3] S.-H. Suh, J.-J. Lee, Five-axis part machining with three-axis CNC machine and indexing table, *Journal of manufacturing science and engineering*, Vol. 120, No. 1, pp. 120-128, 1998.
- [4] C.-W. Shan, W.-W. Liu, X.-J. Lin, D.-H. Zhang, Three half-axis tool orientation optimization for spiral machining of blades, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 68, No. 9-12, pp. 2601-2609, 2013.
- [5] A. Foorginejad, Kh. Khalili, Using homogeneous neighborhood in point clouds normal vector calculation, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 5, pp. 155-163, 2014. (in Persian)
- [6] K. Morishige, K. Kase, Y. Takeuchi, Collision-free tool path generation using 2-dimensional C-space for 5-axis control machining, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 13, No. 6, pp. 393-400, 1997.

سطح در ماشین کاری 3+2 محوره، الزاماً زوایای بین محور ابزار و سطح قطعه در حین ماشین کاری یک تکه سطح تغییر خواهد نمود که باعث تغییر در کاسپ‌های به‌وجود آمده می‌شود و در نتیجه صافی سطح غیر یکنواخت را به دنبال دارد. به همین دلیل فرآیند پرداخت بر روی ماشین 3+2 محوره دارای زمان طولانی‌تری نسبت به ماشین‌های CNC پنج محوره می‌باشد. اما با توجه به افزایش صلیبیت در ماشین‌های 3+2 محوره می‌توان میزان باربرداری ابزار در مرحله خشن کاری را افزایش و در نتیجه زمان ماشین کاری در این مرحله را کاهش داد. استفاده از ماشین‌های 3+2 محوره در مرحله خشن کاری باعث کاهش هزینه‌ها نسبت به ماشین کاری پنج محوره می‌گردد.

با توجه به خطاهای به‌دست‌آمده توسط دستگاه اندازه‌گیری مختصات، که در حدود تolerانس ± 0.4 میلی‌متر می‌باشد و با در نظر گرفتن زمان فرآیندهای خشن کاری و پرداخت، قطعات پنج محوره را می‌توان توسط روش 3+2 محوره خشن کاری نمود.

در شکل 20 ایمپلر ماشین‌کاری شده به روش 3+2 محوره نشان داده شده است.

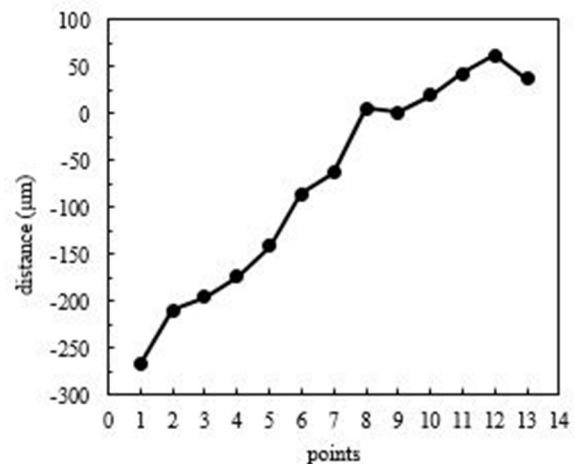


Fig. 17 distance between measured points and workpiece model on illustrated path in Fig 16

شکل 17 فاصله نقاط اندازه‌گیری شده از مدل قطعه در مسیر نشان داده شده در شکل 16

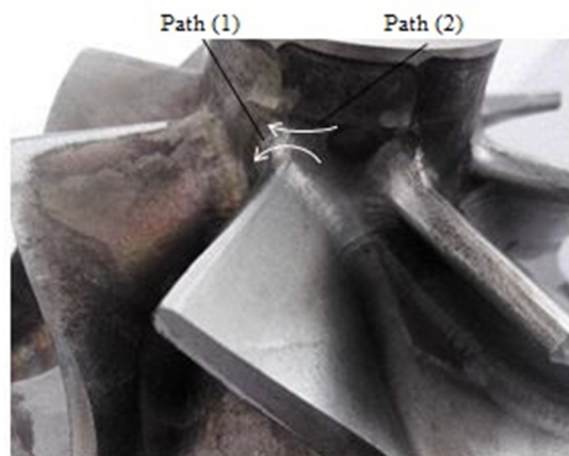


Fig. 18 two paths of measurement on root of blade

شکل 18 دو مسیر اندازه‌گیری بر روی ریشه پره