مجله مهندسی مکانیک مدرس، اسفند 1395، دوره 16، شماره 12، ص‌ص 79-86

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

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

وحید آقایی[1]، 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

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 22 تیر 1395
پذیرش: 14 شهریور 1395
ارائه در سایت: 06 آذر 1395

کلید واژگان:
ماشین‌کاری 3+2 محور
سطوح با فرم آزاد
تقسیم‌بندی سطح

چکیده

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 رویت 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 علاوه‌بر کمتر شدن زمان کلی ماشین‌کاری، مرز بین تکه سطح‌ها کاهش یابد و در نتیجه باعث بهبود کیفیت سطح شود. برای ارزیابی کارآیی 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

قطعات پیچیده[1] 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 بالای این ماشین‌ها و پشتیبانی ضعیف سیستم‌های طراحی و ساخت به کمک کامپیوتر[2]، 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 باربرداری و... به‌طور معمول بیشتر ترجیح داده می‌شوند. هرچند ماشین‌کاری

[1] Sculptured

[2] CAD/CAM

سه محوره به طورکلی نیازمند زمان ماشین‌کاری طولانی‌تری است [2].

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

در روش ماشین‌کاری 3+2 محور، سطح به قسمت‌هایی تقسیم می‌شود و سپس هر قسمت با استفاده از یک جهت‌گیری ثابت ابزار، ماشین‌کاری 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 ماشین‌کاری کلی قطعه‌کار با توجه به کمترین طول ابزار و به‌طور مستقیم از ابر نقاط قطعه‌کار به‌دست می‌آید.

روش ماشین‌کاری 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 ماشین‌کاری توسط نرم‌افزار به‌صورت عملی مورد بررسی قرار می‌گیرد و در بخش 5 نتایج به دست آمده مورد تحلیل قرار گرفته و خطای ماشین‌کاری در روش پیشنهادی بررسی می‌گردد.

2- ماشین‌کاری 3+2 محور

به‌عنوان پیشنهادی کم هزینه برای ماشین‌کاری CNC پنج محور، فنّاوری ماشین‌کاری 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 $3\frac{1}{2}\frac{1}{2}$ 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 ماشین‌کاری قطعه‌کار، پنج محور می‌باشد.

در ماشین‌کاری CNC 3+2 محور راستای[1] ابزار هنگام ماشین‌کاری ثابت باقی می‌ماند. اگر یک سطح توسط یک راستای ابزار ماشین‌کاری نشود (قابل ماشین‌کاری نباشد) می‌بایست سطح تقسیم‌بندی گردد. هر تکه سطح دارای خواص سطح مشابه است که می‌تواند توسط یک راستای ابزار ماشین‌کاری گردد؛ بنابراین هر تکه سطح با استفاده از یک جهت‌گیری ثابت ابزار

[1] Orientation

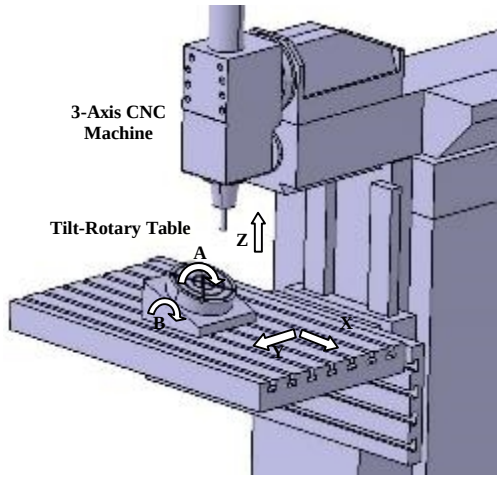


Fig. 1 3+2-axis machine

شکل 1 ماشین3+2 محور

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

سو و لی [3] جدول BMT[2]، که نشان دهنده‌ی قابلیت ماشین‌کاری هر لبه موقعیت ابزار[3] (CE) می‌باشد را تشکیل دادند. آنها با توجه به سه ویژگی شرایط دید، اجتناب از تصادف و محدوده‌ی ماشین‌کاری، قابلیت ماشین‌کاری 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 ماشین‌کاری دارد و عدد صفر نشان دهنده عدم قابلیت ماشین‌کاری 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 انحنای گوسی، انحنای میانگین، 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 ماشین‌کاری 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 ماشین‌کاری می‌گردند، بدون ظاهر شدن اثر برش بیشینه[4] ماشین‌کاری 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].

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

[2] Binary Machinability Table
[3] Cutter Location-edge (CE)
[4] Overcut

نقاط تماسی ابزار[1] (CC) نقاط تماس یا تداخل لبه‌ی برنده‌ی ابزار با سطح قطعه‌کار می‌باشند. نقاط موقعیت ابزار[2] (CL) نقاطی 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 فاصله‌ای به‌اندازه‌ی 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 وتری، به دست می‌آیند. در این پژوهش برای سهولت در محاسبات، ابر نقاط گرفته‌شده از قطعه‌کار به‌عنوان نقاط تماسی ابزار در نظر گرفته‌شده است. البته شایان‌ذکر است که ابر نقاط به‌صورت همگن و با فواصل نقاط تقریبی به‌اندازه‌ی شعاع ابزار، فیلتر شده است.

برای به دست آوردن نقاط موقعیت ابزار به‌طور 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 هوپ[3] صورت گرفته است. در روش هوپ برای هر نقطه‌ی P از ابر نقاط S، نزدیک‌ترین k همسایگی[4] 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.

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

اگر M_{cov} باشند و بردارهای ویژه $\lambda_i^3, \lambda_i^2, \lambda_i^1$ مقادیر ویژه ماتریس متناظر با هریک از مقادیر ویژه بردارهای $\xi_i^3, \xi_i^2, \xi_i^1$ باشند و همچنین $\lambda_i^1 < \lambda_i^2 < \lambda_i^3$ 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 به‌طوری‌که هر تکه سطح می‌تواند به‌طور صحیح در هر تنظیم قطعه در دسترس قرار گیرد و به‌طور مؤثر توسط ماشین‌های CNC سه محوره ماشین‌کاری شود [1].

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

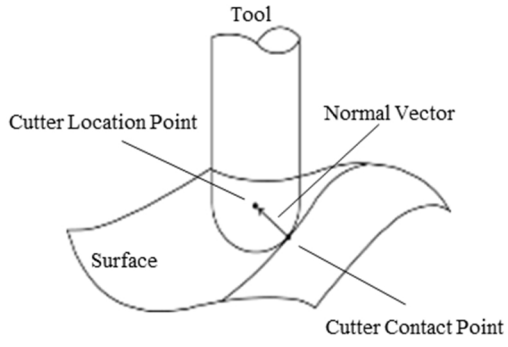


Fig. 2 Cutter Location and Cutter Contact Points

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

قابل روئیت، اجتناب از برخورد و محدوده کاری ماشین‌ابزار برقرار باشد [3].

موقعیت ابزار[5] 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 تشکیل‌دهنده‌ی محور ابزار نشان داده شده است. موقعیت ابزار در فضا توسط دو زاویه‌ی θ و $\emptyset$ 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 به‌گونه‌ای باشد که پدیده‌ی تصادف رخ ندهد و همچنین این جهت‌گیری در محدوده‌ی زوایای میزایندکسی قرار داشته باشد. به این منظور ابزار با گامی مشخص در جهت دو زاویه θ و $\emptyset$ 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 ماشین‌کاری نمود و این جهت‌گیری رد خواهد شد. فاصله‌ی یک نقطه از یک خط از رابطه (2) به دست می‌آید.

$$D = \frac{|u \times \overrightarrow{P_0P}|}{|u|} \qquad (2)$$

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. P_0 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 ماشین‌کاری 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 زاویه‌ای بتوان آن را ماشین‌کاری 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 دوبعدی است، فقط زاویه‌ی θ بررسی می‌گردد و زاویه $\emptyset$ صفر می‌باشد. با فرض اینکه گام حرکت دورانی 45 درجه و محدوده‌ی دوران میزایندکسی 180 درجه باشد، جدول BMT برای نقاط موقعیت ابزار به صورت جدول 1 می‌باشد.

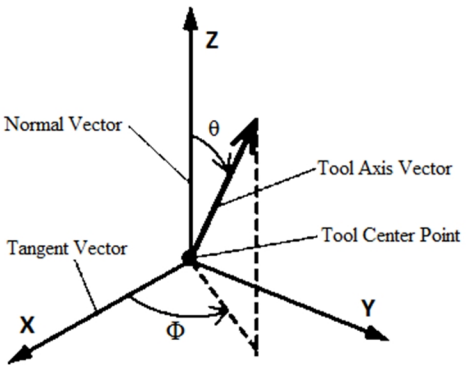


Fig. 3 Cutter Location

شکل 3 تعیین موقعیت ابزار

[5] Cutter Location

جهت‌گیری‌های مختلف ابزار تحت گام مشخص شده نیز برای نقطه (1) در شکل 4 نشان داده شده است.

جدول 1 قابلیت ماشین‌کاری نقاط موقعیت ابزار (جدول BMT) را در محدوده دوران میزایندکسی نشان می‌دهد. به‌عنوان‌مثال برای نقطه‌ی (1) سه زاویه‌ی 0 , 45 و 90 درجه قابل‌دسترس ابزار هستند بنابراین عدد 1 در جدول به این زوایا اختصاص داده شده است و در دو زاویه‌ی 135 و 180 درجه ابزار تصادف خواهد داشت که عدد قابلیت ماشین‌کاری آن صفر می‌باشد. این جدول برای تمامی نقاط موقعیت ابزار به‌دست می‌آید. سطرهای این جدول نشان دهنده تعداد نقاط موقعیت ابزار و ستون‌های آن جهت‌گیری‌های مختلف ابزار را نشان می‌دهد. در اینجا نکته‌ی بسیار مهم این است که مجموع اعداد هر یک از سطرهای جدول BMT نباید صفر شود؛ در غیر این صورت با این گام حرکتی نمی‌توان قطعه‌کار را ماشین‌کاری نمود و باید میزان گام حرکتی کوچک‌تر گردد.

روند نمای محاسبه‌ی جدول BMT در شکل 5 آمده است. نقاط CC و CL به ترتیب همان نقاط تماسی ابزار و نقاط موقعیت ابزار می‌باشند.

3-2-1- محاسبه کمترین حالات جهت‌گیری‌های ابزار

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

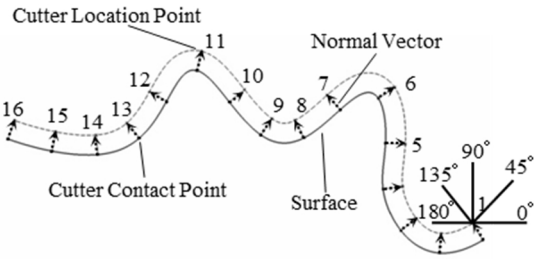


Fig. 4 variety tool orientation for machining point (1)

شکل 4 جهت‌گیری‌های مختلف ابزار برای ماشین‌کاری نقطه (1)

جدول 1 قابلیت ماشین‌کاری نقاط موقعیت ابزار

Table 1 machinability of cutter location points

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

موقعیت ابزار باشد، می‌توان با یک جهت‌گیری ابزار، قطعه‌کار را ماشین‌کاری نمود؛ این جهت‌گیری ابزار همان زاویه‌ی مربوط به ستون است. بنابراین تنها با ماشین CNC 3 محور می‌توان این نوع قطعات را ماشین‌کاری نمود.

درصورتی‌که با یک جهت‌گیری ابزار نتوان قطعه‌کار را ماشین‌کاری نمود، دو جهت‌گیری ابزار بررسی می‌گردد. در این مرحله دو ستون از جدول BMT به‌صورت سطر به سطر با یکدیگر جمع می‌شوند، اگر تمامی سطرها عددی غیر از صفر باشند، با این دو جهت‌گیری می‌توان قطعه‌کار را ماشین‌کاری نمود، در غیر این صورت این دو جهت‌گیری رد خواهد شد. این عمل برای تمامی حالات دو ستونی اجرا می‌شود؛ درصورتی‌که هیچ‌کدام از دو ستون‌ها این شرایط را دارا نباشند، با دو جهت‌گیری نمی‌توان قطعه‌کار را ماشین‌کاری نمود و باید شرایط سه جهت‌گیری بررسی گردد. این روند ادامه می‌یابد تا کمترین تعداد جهت‌گیری‌های ابزار به‌دست آید.

در نتیجه برای ماشین‌کاری منحنی سطح قطعه‌کار شکل 4 ابزار با دو زاویه صفر و 90 درجه می‌تواند این قطعه را ماشین‌کاری نماید، بنابراین کمترین تعداد جهت‌گیری‌های ابزار (تنظیمات قطعه‌کار)، 2 جهت‌گیری می‌باشد. همچنین علاوه‌بر دو زاویه صفر و 90 درجه با دو جهت‌گیری 45 و 90 درجه و 45 و 135 درجه نیز می‌توان این قطعه را ماشین‌کاری نمود.

3-2-2- تعیین نواحی ماشین‌کاری در هر تنظیم قطعه‌کار

در هر جهت‌گیری در جدول BMT تنها نقاطی که ستون مربوط به آن جهت‌گیری عدد 1 می‌باشد می‌توانند ماشین‌کاری شوند. در قطعاتی با تعداد دو و بیشتر از دو جهت‌گیری ابزار، نقاطی وجود دارند که می‌توان آنها را در چند جهت‌گیری ماشین‌کاری نمود. به‌عنوان‌مثال نقطه‌ی موقعیت ابزار شماره‌ی (11) در شکل 4 را می‌توان هم با زاویه ابزار صفر درجه و هم با زاویه‌ی 90 درجه ماشین‌کاری نمود. درصورتی‌که این نقطه با زاویه‌ی صفر درجه ماشین‌کاری شود، به دلیل اینکه نقاط اطراف نقطه‌ی (11) را فقط می‌توان با زاویه‌ی 90 درجه ماشین‌کاری نمود، ابزار باید دو ناحیه‌ی جدا از هم را ماشین‌کاری نماید؛ این خود باعث افزایش سطح‌های تقسیم‌شده و در نتیجه افزایش مرز بین تکه سطح‌ها می‌شود. در مرز بین تکه سطح‌ها به دلیل آنکه ابزار با دو جهت‌گیری مختلف، سطح را ماشین‌کاری می‌نماید، صافی سطح کمتری را دارا می‌باشد؛ ازاین‌رو هرچه تعداد تکه سطح‌ها کمتر باشد، مرز بین آنها نیز کمتر و سطح یکنواخت‌تر می‌گردد.

بنابراین نقاطی که با چند جهت‌گیری ابزار می‌توانند ماشین‌کاری شوند بر اساس نقاط همسایگی آنها، جزو زاویه‌ای قرار می‌گیرند که بیشترین همسایگی را این نقطه داشته باشد. در شکل 4 ماشین‌کاری با دو زاویه‌ی صفر و 90 درجه، نقاط 1، 2 و 3 با زاویه‌ی صفر درجه و نقاط 6 و 11 با زاویه‌ی 90 درجه ماشین‌کاری می‌گردند.

3-2-3- تعیین کمترین طول ابزار

اگر بتوان در ماشین‌کاری قطعات از ابزاری با طول کمتر استفاده نمود، انحراف ابزار و ارتعاشات به حداقل می‌رسند، این خود باعث بهبود سطح ماشین‌کاری شده می‌گردد. همچنین احتمال شکست ابزار نیز در این حالت کمتر می‌شود. محاسبه کمترین طول ابزار برای هر حالت از جهت‌گیری‌های مختلف ابزار به این صورت است که فاصله‌ی تصویر تمامی نقاطی که در محدوده‌ی اطراف ابزار قرار دارند روی محور ابزار با نقطه‌ی موقعیت ابزار به دست می‌آید. سپس بزرگ‌ترین این فواصل به‌عنوان کوچک‌ترین اندازه‌ی طول ابزار در نظر گرفته می‌شود. شکل 6 نحوه محاسبه کمترین طول مجاز ابزار را نشان می‌دهد.

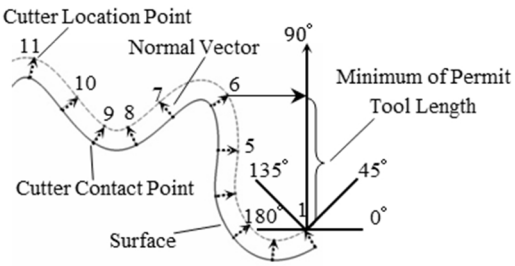


Fig. 6 calculating of permit tool length minimum

شکل 6 محاسبه کمترین طول مجاز ابزار

4- ماشین‌کاری تجربی به روش 2+3 محور

در این پژوهش یک ایمپلر که دارای پره‌هایی با زاویه‌ی منفی می‌باشد به‌عنوان قطعه‌کار انتخاب شده است (شکل 7). این نوع قطعات را به دلیل دارا بودن سطوح با فرم آزاد به‌طورمعمول توسط ماشین‌های CNC پنج محوره ماشین‌کاری می‌نمایند. در اینجا توسط ماشین 2+3 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 کتیا[1] 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 ماشین‌کاری این قطعه تیغه فرز انگشتی سر کروی HSS با قطر 10 میلی‌متر می‌باشد. به دلیل متقارن بودن قطعه و کم شدن حجم محاسبات، تنها ابرنقاط یک شیارِ 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 ماشین‌کاری

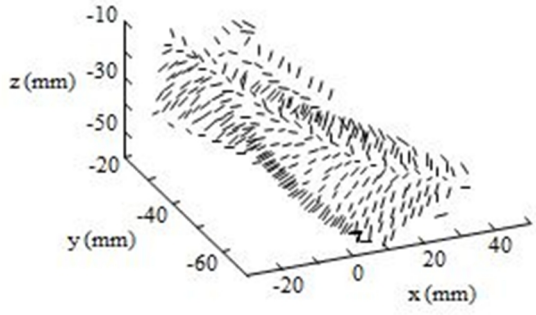


Fig. 8 cutter contact points and normal vectors on this points

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

[1] CATIA

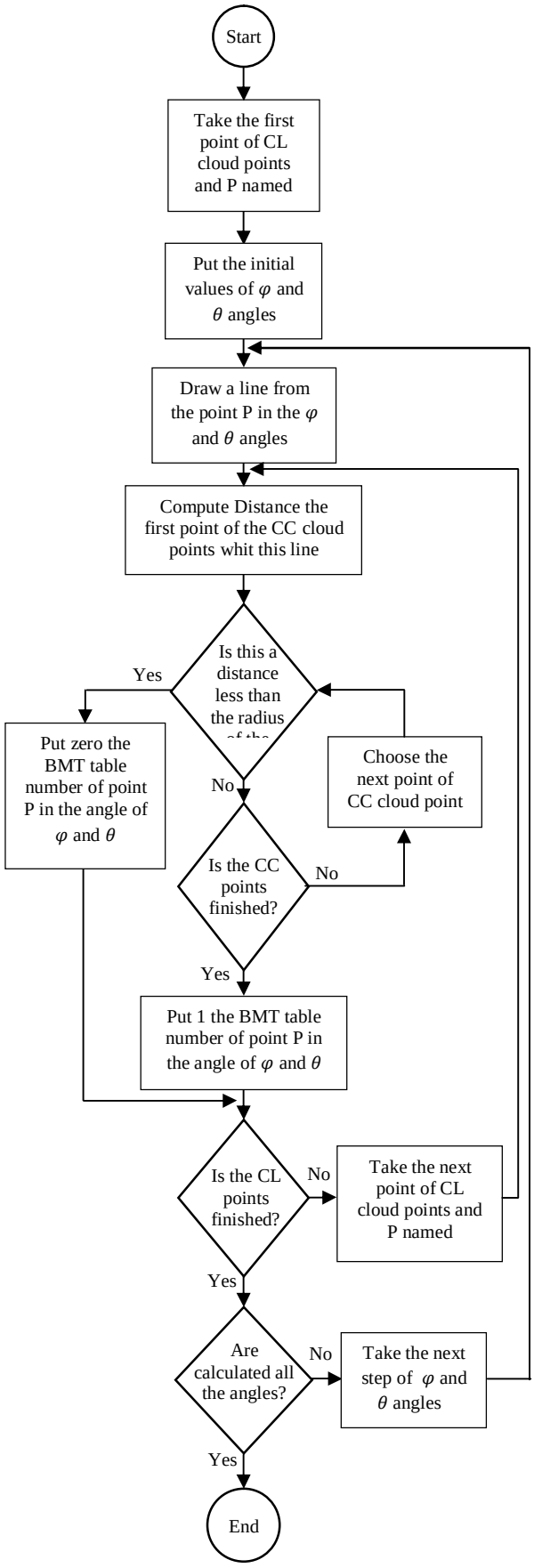


Fig. 5 flowchart for calculating of BMT table

شکل 5 روندنمای محاسبه جدول BMT

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

در شکل 10 قطعه‌کار در حین ماشین‌کاری در دو جهت‌گیری ابزار نشان داده شده است.

5- بحث و نتیجه‌گیری

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

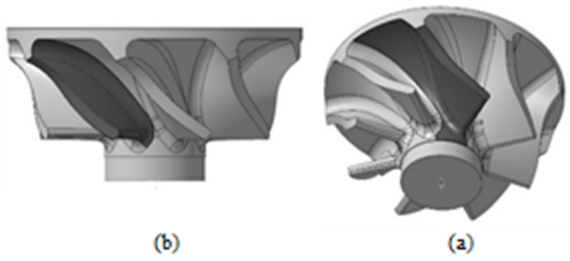
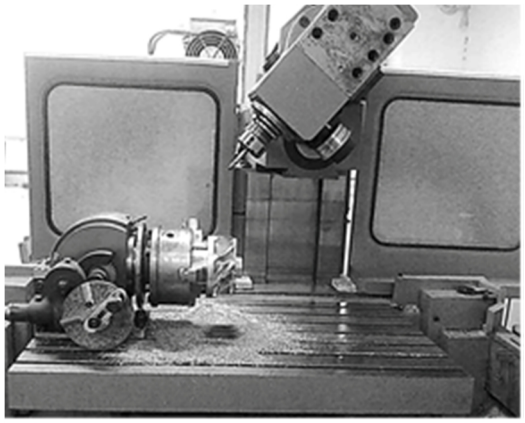


Fig. 9 machining limits. a) first tool orientation b) second tool orientation

شکل 9 محدوده ماشین‌کاری. a) جهت‌گیری اول ابزار b) جهت‌گیری دوم ابزار



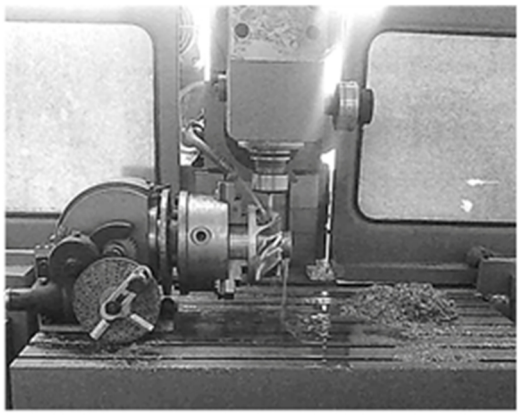
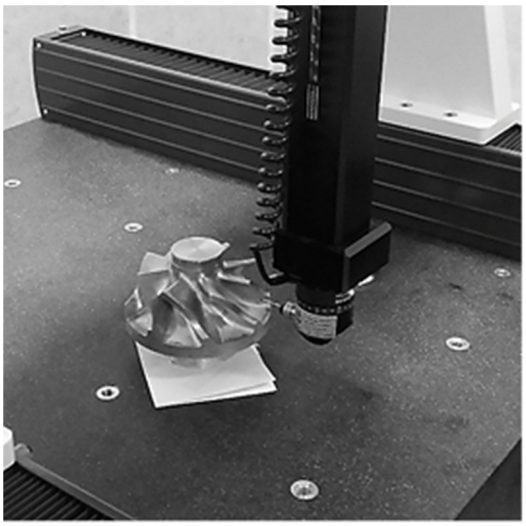


Fig. 10 Impeller machining. a) first tool orientation b) second tool orientation

شکل 10 ماشین‌کاری ایمپلر a) جهت‌گیری اول ابزار b) جهت‌گیری دوم ابزار

محدوده‌های ماشین‌کاری دارای صافی سطح یکنواختی نمی‌باشد. ازجمله دلایل این امر خطا در حرکت‌های چرخشی میز ایندکسی و خطای اپراتوری در محاسبه‌ی نقطه صفر قطعه‌کار می‌باشد.

میزان خطای ماشین‌کاری در نواحی مرز بین محدوده‌های ماشین‌کاری در تنظیمات مختلف قطعه‌کار موردبررسی قرار گرفته است و توسط دستگاه اندازه‌گیری مختصات[1] هگزاگن مدل سی- دبلیو- بی[2] 450 ساخت شرکت چین- وی پرسیس تکنولوژی[3] کشور تایوان اندازه‌برداری گردیده است. این دستگاه مجهز به نرم‌افزار کاپس دی- ام- ای- اس[4] و سیستم پراب تماسی نیروی استاندارد تی پی 20[5] می‌باشد. آزمایشات با پراب به قطر 3 میلی‌متر و طول سوزن پراب 20 میلی‌متر اجرا گردیده است. شکل 11 قطعه‌کار در حین



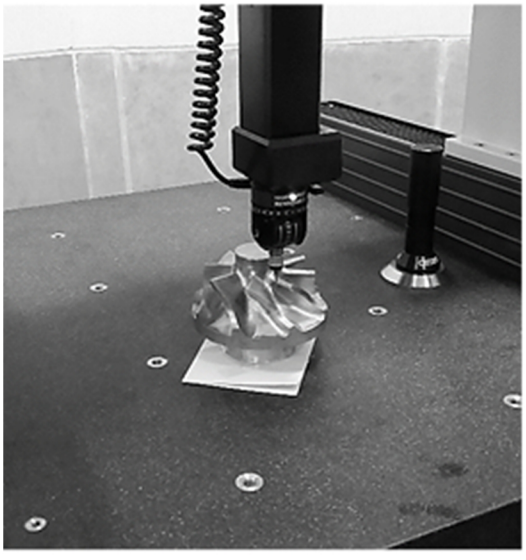


Fig 11 workpiece during measuring by CMM a) horizontal probe b) vertical probe

شکل 11 قطعه‌کار 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

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 لبه 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.

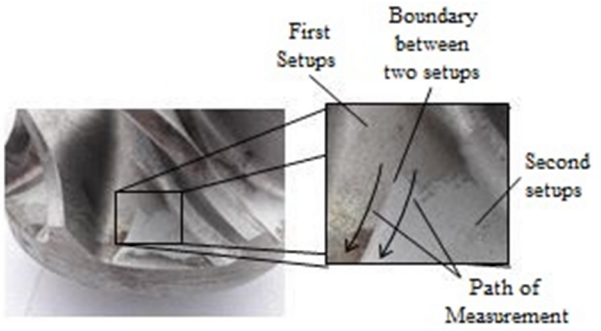


Fig. 12 Boundary between two workpiece setups (1,2) and path of measurement CMM

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

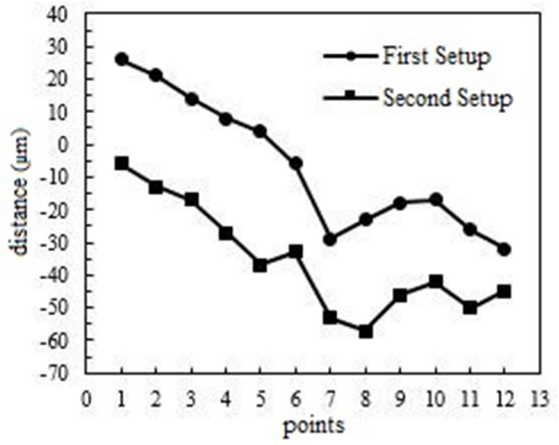


Fig. 13 distance between measured points and workpiece model on illustrated two paths in Fig 12

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

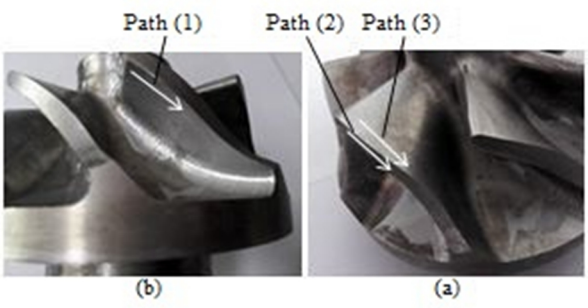


Fig. 14 paths of measurement between two workpiece setups. a) first setups b) second setups

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

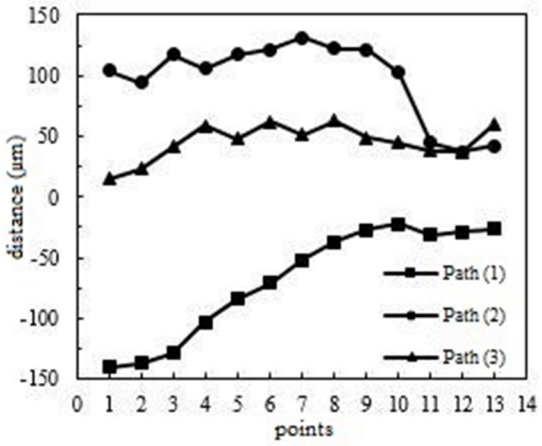


Fig. 15 distance between measured points and workpiece model on illustrated three paths in Fig 14

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

سطح در ماشین‌کاری 3+2 محوره، الزاماً زوایای بین محور ابزار و سطح قطعه در حین ماشین‌کاری 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 صلبیت در ماشین‌های 3+2 محوره می‌توان میزان باربرداری ابزار در مرحله خشن‌کاری را افزایش و درنتیجه زمان ماشین‌کاری در این مرحله را کاهش داد. استفاده از ماشین‌های 3+2 محوره در مرحله خشن‌کاری باعث کاهش هزینه‌ها نسبت به ماشین‌کاری پنج محوره می‌گردد.

با توجه به خطاهای به‌دست‌آمده توسط دستگاه اندازه‌گیری مختصات، که در حدود تلرانس0.4± میلی‌متر می‌باشد و با در نظر گرفتن زمان فرآیندهای خشن‌کاری و پرداخت، قطعات پنج محوره را می‌توان توسط روش 3+2 محوره خشن‌کاری نمود.

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

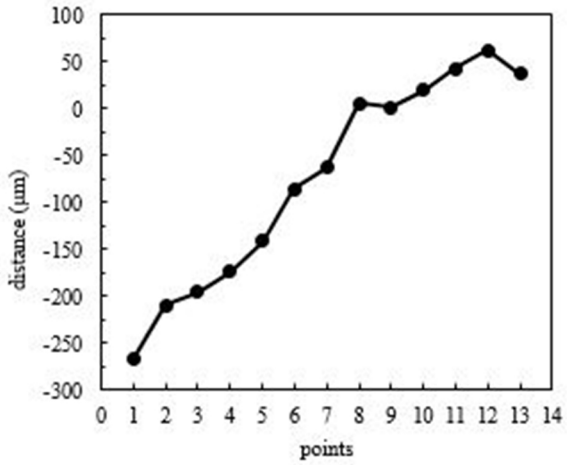


Fig. 17 distance between measured points and workpiece model on illustrated path in Fig 16

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

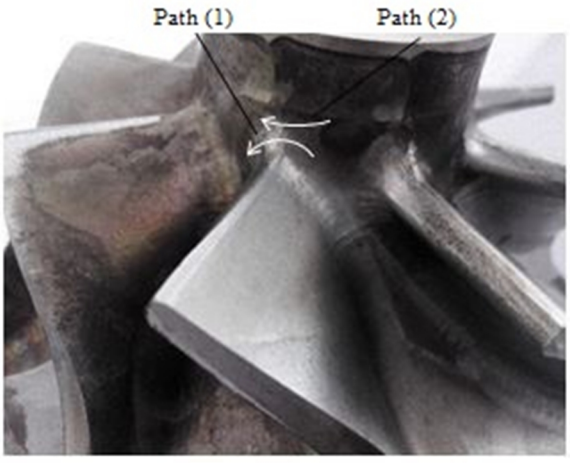


Fig. 18 two paths of measurement on root of blade

شکل 18 دو مسیر اندازه‌گیری بر روی ریشه پره

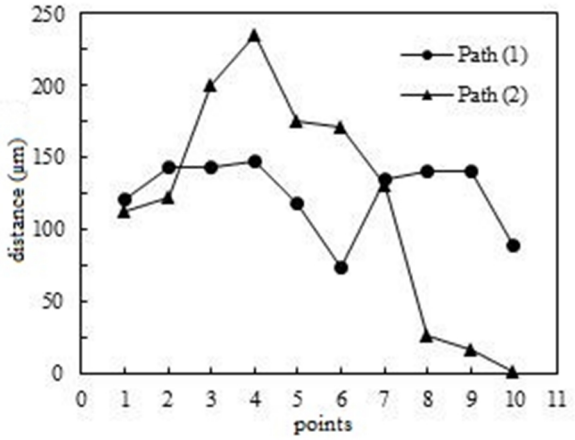


Fig. 19 distance between measured points and workpiece model on illustrated two paths in Fig 18

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 محوره

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 فارسی)

[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.