



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

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

تقسیم بندی 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 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

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

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 برنامه‌نویسی پیچیده و هزینه بالای سرمایه‌گذاری و آموزش اپراتورهای متخصص دارد. درحالی‌که ماشین‌کاری سطوح توسط ماشین‌های CNC سه محوره، 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

² CAD/CAM

¹ Sculptured

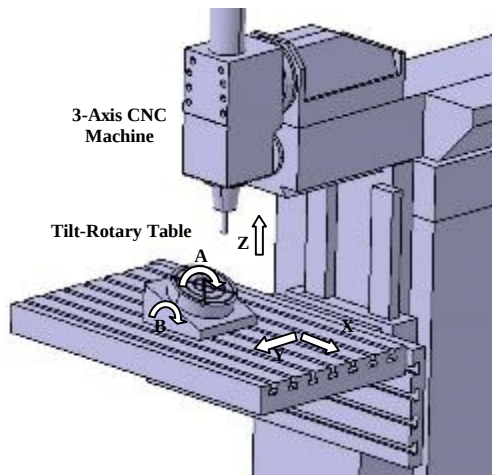


Fig. 1 3+2-axis machine

شکل 1 ماشین 3+2 محور

ماشین کاری می شود. جهت گیری ابزار و مرزهای هر قسمت طوری تعیین شده اند 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) می باشد 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 می باشد که عدد 1 نشان دهنده 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 می باشد.

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 تقسیم بندی نمودند که تقسیم بندی کلی سطح نام گذاری کردند؛ سپس هر تکه سطح را بر اساس ویژگی هایی از جمله انحنا، گوسی، انحنا میانی، بردار نرمال سطح و بیشترین و کمترین انحنا با استفاده از روش k -میانگین فازی دوباره تقسیم بندی نمودند که تقسیم بندی دقیق سطح نام گذاری کردند.

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

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

3- تعیین جهت گیری های ابزار

استفاده از مدل های سه بعدی بر پایه ی ابر نقاط، به دلایلی چون سرعت، ظرفیت رایانه های شخصی، سادگی ساختار، در دسترس بودن داده های به دست آمده از وسایل اندازه گیری و افزایش سرعت داده گیری، به تازگی مورد توجه قرار گرفته است. یکی از روش های نمایش سطوح مدل استفاده از نقطه به عنوان عنصر پایه ساختار هندسی است. بر این اساس یک سطح شامل مجموعه ای از نقاط می شود که ابر نقاط نامیده می شود [5].

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

سه محوره به طور کلی نیازمند زمان ماشین کاری طولانی تری است [2]. پاسخی مؤثر و کاربردی برای رفع برخی معایب ماشین های CNC پنج محوره استفاده از ماشین کاری 3+2 محور است. ماشین کاری 3+2 محور از سادگی موقعیت یابی ابزار ماشین CNC سه محور و جهت گیری ابزار ماشین CNC پنج محور استفاده می کند تا سطوح پیچیده را ماشین کاری نماید [2]. در عملیات خشن کاری به دلیل اعمال نیروهای زیاد ماشین کاری، نیاز به استفاده از ماشین های صلب تر می باشد. بنابراین از ماشین کاری 3+2 محور به دلیل دارا بودن صلبیت بالای ماشین های CNC سه محور، در فرآیند خشن تراشی قطعات پیچیده می توان استفاده نمود.

در روش ماشین کاری 3+2 محور، سطح به قسمت هایی تقسیم می شود و سپس هر قسمت با استفاده از یک جهت گیری ثابت ابزار، ماشین کاری می گردد [2]. این تقسیمات باید به گونه ای باشد که ابزار بتواند توسط یک جهت گیری ثابت به تمامی نواحی آن قسمت دسترسی داشته باشد.

در پژوهش حاضر روش جدیدی برای تعیین نقاط قابل روئیت و مخفی قطعه در جهت گیری های مختلف ابزار ارائه شده است. در این روش تمامی زوایای قابل دسترسی ابزار برای هر نقطه از سطح قطعه کار به دست می آید. نقاط سطح قطعه کار با استفاده از ابر نقاط قطعه و به فاصله معینی (این فاصله بستگی به صافی سطح دارد) از یکدیگر تعیین می گردند. در الگوریتم پیشنهادی تعداد کمترین جهت گیری های ابزار برای ماشین کاری کلی قطعه کار با توجه به کمترین طول ابزار و به طور مستقیم از ابر نقاط قطعه کار به دست می آید.

روش ماشین کاری 3+2 محوره و کارهای صورت گرفته در این زمینه در بخش 2 مرور می گردد. در بخش 3 الگوریتم مورد استفاده برای تعیین جهت گیری های ابزار تشریح می گردد. در بخش 4 تعیین نواحی ماشین کاری توسط نرم افزار به صورت عملی مورد بررسی قرار می گیرد و در بخش 5 نتایج به دست آمده مورد تحلیل قرار گرفته و خطای ماشین کاری در روش پیشنهادی بررسی می گردد.

2- ماشین کاری 3+2 محور

به عنوان 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 به اضافه ی میز ایندکسی خودکار و یا دستی استفاده می کند. در این نوع از ماشین ها به دلیل اینکه چرخش های میز هماهنگ نیستند و به طور هم زمان با سه محور خطی کنترل نمی شوند، هر کدام از این چرخش ها به عنوان $\frac{1}{2}$ محور نامیده می شوند؛ بنابراین یک ماشین CNC سه محوره به همراه میز ایندکسی دو محور دوار را ماشین $3\frac{1}{2}$ محور و به طور اختصار ماشین 3+2 محور نام گذاری می نمایند [1]. شکل 1 ماشین 3+2 محور را نشان می دهد. در این نوع از ماشین ها تعداد محورهای قابل کنترل هم زمان، 3 محور است در حالی که تعداد محور مورد نیاز برای ماشین کاری قطعه کار، پنج محور می باشد.

در ماشین کاری CNC 3+2 محور راستای¹ ابزار هنگام ماشین کاری ثابت باقی می ماند. اگر یک سطح توسط یک راستای ابزار ماشین کاری نشود (قابل ماشین کاری نباشد) می بایست سطح تقسیم بندی گردد. هر تکه سطح دارای خواص سطح مشابه است که می تواند توسط یک راستای ابزار ماشین کاری گردد؛ بنابراین هر تکه سطح با استفاده از یک جهت گیری ثابت ابزار

² Binary Machinability Table³ Cutter Location-edge (CE)⁴ Overcut¹ Orientation

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

پس از تعیین نقاط موقعیت ابزار و قرارگیری مرکز ابزار (O) بر روی این نقاط، جهت گیری ابزار باید بررسی گردد. جهت گیری ابزار باید به گونه ای باشد که پدیده تصادف رخ ندهد و همچنین این جهت گیری در محدوده زوایای میزاندکسی قرار داشته باشد. به این منظور ابزار با گامی مشخص در جهت دو زاویه θ و ϕ دوران می کند. در هر مرحله از جهت گیری ابزار، فاصله تمامی نقاط تماسی ابزار با بردار محور ابزار محاسبه می گردد. اگر این فاصله کمتر از شعاع ابزار باشد، در نتیجه تصادف رخ خواهد داد و این نقطه را نمی توان با این جهت گیری ابزار ماشین کاری نمود و این جهت گیری رد خواهد شد. فاصله یک نقطه از یک خط از رابطه (2) به دست می آید.

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

اگر L خطی باشد که با بردار غیر صفر u موازی و P نقطه ای خارج (یا روی) L باشد، در این صورت فاصله P از L برابر با D می باشد. P_0 نقطه ای دلخواهی روی L است.

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

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 می گیرد، می تواند جهت گیری های متفاوتی داشته باشد. به دلیل آنکه منحنی دوعبده ای است، فقط زاویه θ بررسی می گردد و زاویه ϕ صفر می باشد. با فرض اینکه گام حرکت دورانی 45 درجه و محدوده دوران میزاندکسی 180 درجه باشد، جدول BMT برای نقاط موقعیت ابزار به صورت جدول 1 می باشد.

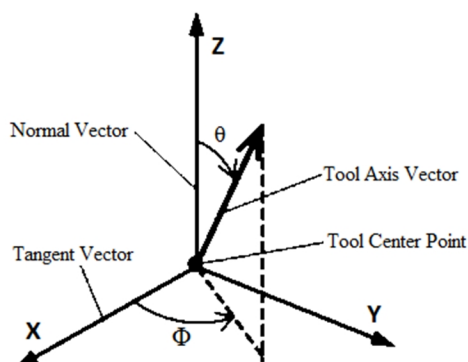


Fig. 3 Cutter Location

شکل 3 تعیین موقعیت ابزار

نقاط تماسی ابزار¹ (CC) نقاط تماس یا تداخل لبه ی برنده ی ابزار با سطح قطعه کار می باشند. نقاط موقعیت ابزار² (CL) نقطه ای می باشند که مرکز نوک ابزار در این نقاط واقع می گردد. ابزار می تواند در نقاط موقعیت قرار گیرد ولی جهت گیری های متفاوتی داشته باشد. نقاط موقعیت ابزار با توجه به نقاط تماسی ابزار به دست می آیند؛ این نقاط در فاصله ای به اندازه ی 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 می آیند. در این پژوهش برای سهولت در محاسبات، ابر نقاط گرفته شده 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 اندازه ی 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 نقطه ی P از ابر نقاط S ، نزدیک ترین k همسایگی⁴ این نقطه به دست می آید. نزدیک ترین k همسایگی با N_k نشان داده می شود. برای محاسبه ی بردار نرمال، مرکز O_i مربوط به N_k ابتدا محاسبه می شود. مرکز O_i نقطه ی میانگین نقاط همسایگی نقطه ی P می باشد. برای اندازه گیری بردار نرمال، ماتریس مرتبط کوواریانس N_k بر اساس رابطه ی (1) تشکیل می شود.

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

اگر $\lambda_1^3, \lambda_2^3, \lambda_3^3$ مقادیر ویژه ماتریس M_{cov} باشند و بردارهای ویژه متناظر با هریک از مقادیر ویژه بردارهای $\xi_1^3, \xi_2^3, \xi_3^3$ باشند و همچنین $\lambda_1^1 < \lambda_2^1 < \lambda_3^1$ باشد، ξ_1^1 بردار نرمال نقطه ی P است [5].

2-3- تقسیم بندی سطح

هدف از تقسیم بندی سطح، تقسیم سطح پیچیده به تعدادی از تکه سطح ها با ویژگی های یکسان می باشد به طوری که هر تکه سطح می تواند به طور صحیح در هر تنظیم قطعه در دسترس قرار گیرد و به طور مؤثر توسط ماشین های CNC سه محوره ماشین کاری شود [1].

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

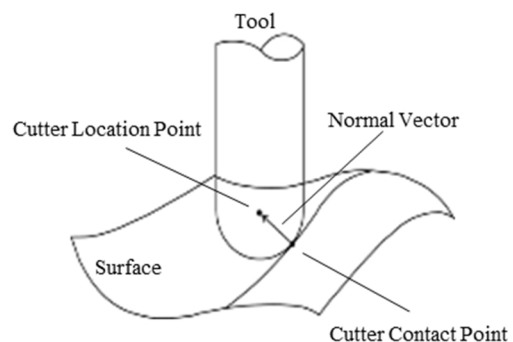


Fig. 2 Cutter Location and Cutter Contact Points

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

⁵ Cutter Location

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. در صورتی که با یک جهت‌گیری ابزار نتوان قطعه‌کار را ماشین‌کاری نمود، دو جهت‌گیری ابزار بررسی می‌گردد. در این مرحله دو ستون از جدول BMT به صورت 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؛ در صورتی که هیچ کدام 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 به دست 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 علاوه بر 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. به عنوان مثال نقطه‌ی موقعیت ابزار شماره‌ی (11) در شکل 4 را می‌توان هم با زاویه ابزار صفر درجه و هم با زاویه‌ی 90 درجه ماشین‌کاری نمود. در صورتی که 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؛ از این رو 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 به عنوان کوچک‌ترین اندازه‌ی طول ابزار در نظر گرفته می‌شود. شکل 6 نحوه محاسبه کمترین طول مجاز ابزار را نشان می‌دهد.

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. به عنوان مثال برای نقطه‌ی (1) سه زاویه‌ی 0، 45 و 90 درجه قابل دسترسی 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 به دست 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 سطرها 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

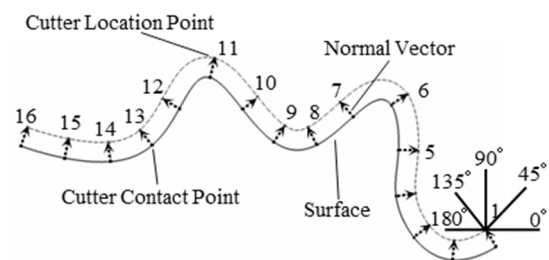


Fig. 4 variety tool orientation for machining point (1)

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	0	1	1	1	1	1
0	0	0	1	1	1	2	2
0	0	0	1	1	1	3	3
0	0	0	0	1	1	4	4
0	0	0	0	1	1	5	5
0	0	0	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	1	0	0	12	12
0	1	1	1	0	0	13	13
0	1	1	0	0	0	14	14
0	1	1	1	0	0	15	15
1	1	1	1	1	0	16	16

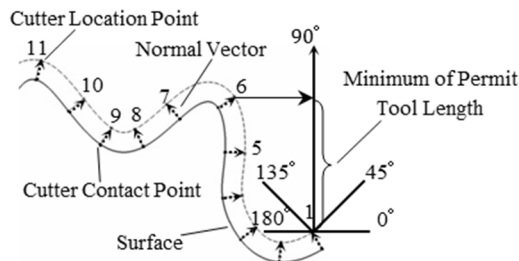


Fig. 6 calculating of permit tool length minimum

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 زاویه‌ی 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 ابر نقاط 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 کروی HSS با قطر 10 میلی‌متر می‌باشد. به دلیل متقارن بودن قطعه و کم شدن حجم محاسبات، تنها ابر نقاط 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

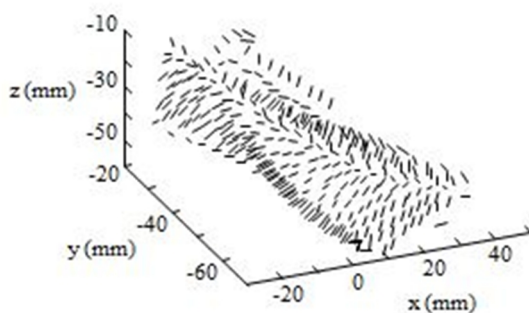


Fig. 8 cutter contact points and normal vectors on this points

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

¹ CATIA

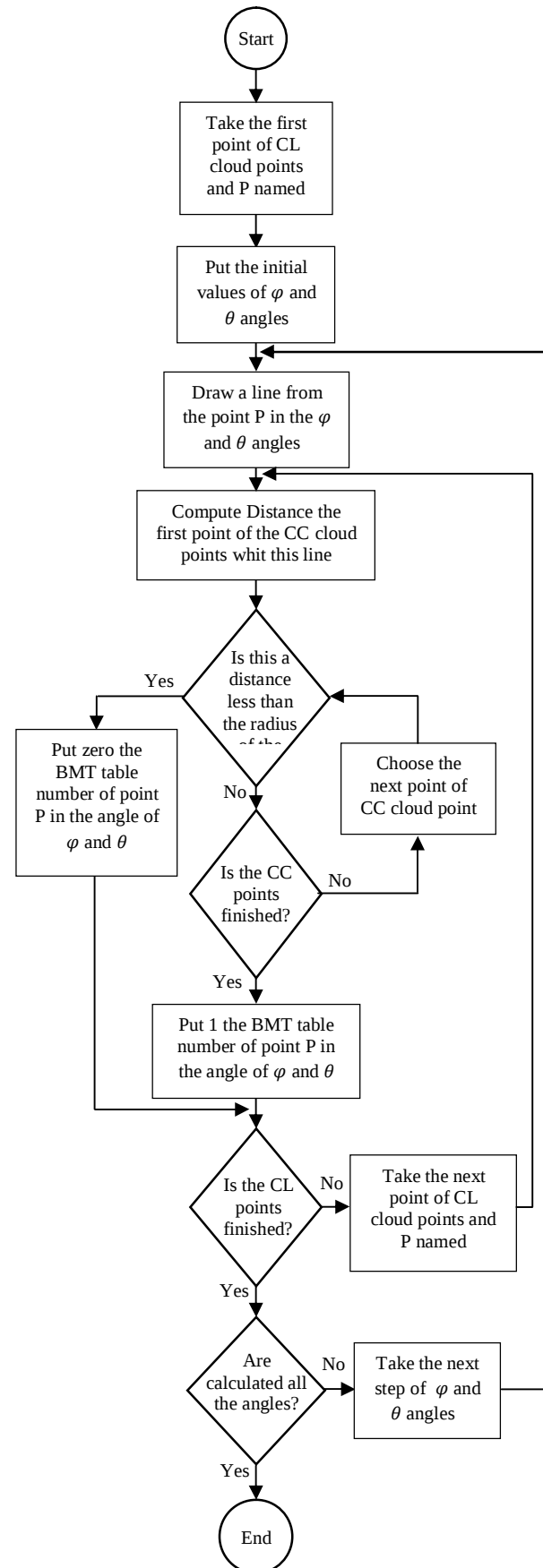
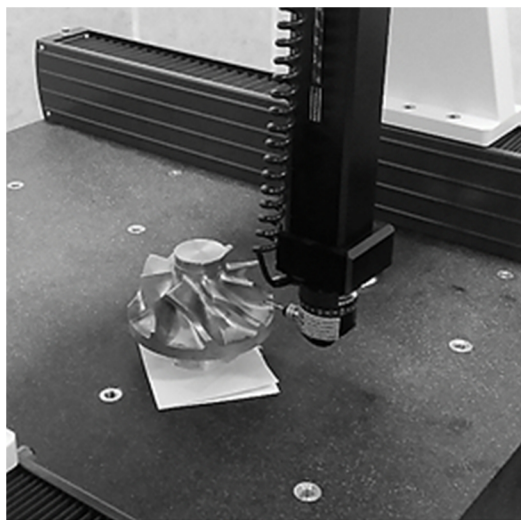


Fig. 5 flowchart for calculating of BMT table

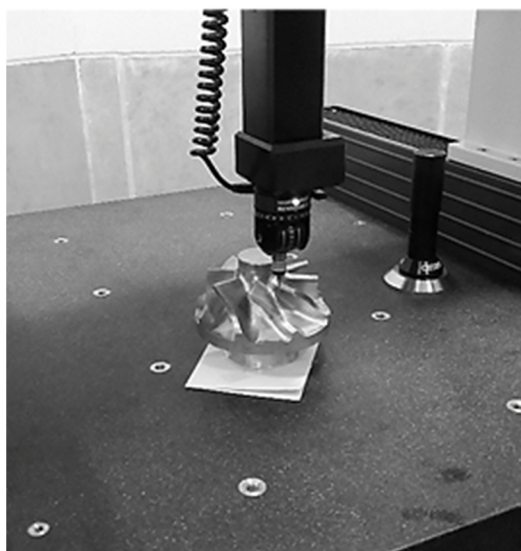
شکل 5 روندنمای محاسبه جدول BMT

محدوده‌های ماشین کاری دارای صافی سطح یکنواختی نمی‌باشد. ازجمله 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 اندازه گیری مختصات¹ هگزاگن مدل سی-دبلیو-450² ساخت شرکت چین-وی پرسیس تکنولوژی³ کشور تایوان اندازه برداری گردیده است. این دستگاه مجهز به نرم افزار کاپس دی-ام-ای-اس⁴ و سیستم پراب تماسی نیروی استاندارد تی پی 20⁵ می‌باشد. آزمایشات با پراب به قطر 3 میلی متر و طول سوزن پراب 20 میلی متر 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 اندازه برداری توسط دستگاه اندازه گیری 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

جهت گیری برای ماشین کاری این شیپار 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 جهت گیری ابزار نشان داده شده است.

5- بحث و نتیجه گیری

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

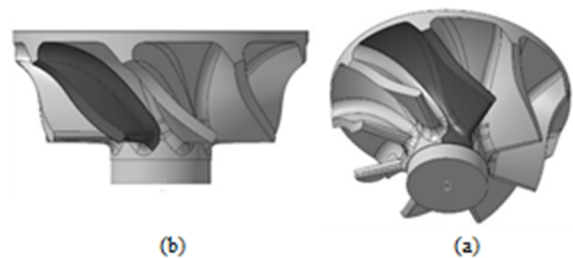
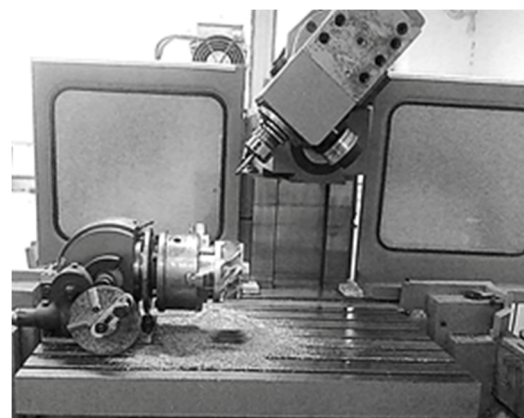
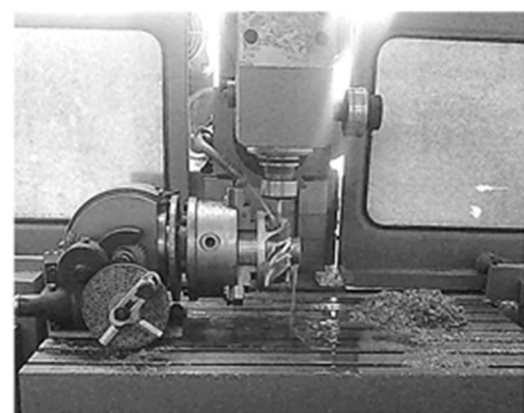


Fig. 9 machining limits. a) first tool orientation b) second tool orientation

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



(a)



(b)

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

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

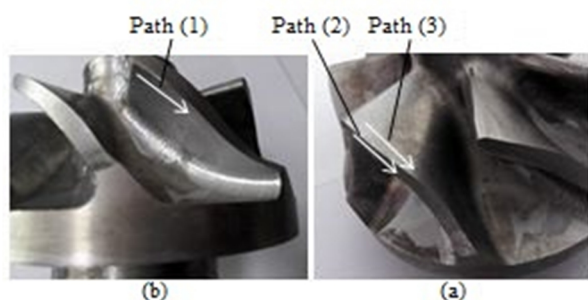


Fig. 14 paths of measurement between two workpiece setups. a) first setups b) second setups

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

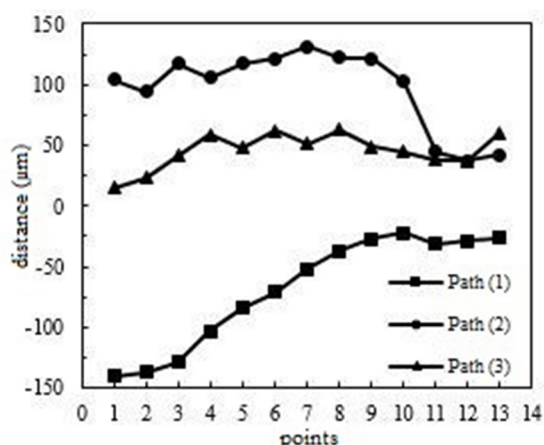


Fig. 15 distance between measured points and workpiece model on illustrated three paths in Fig 14

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.

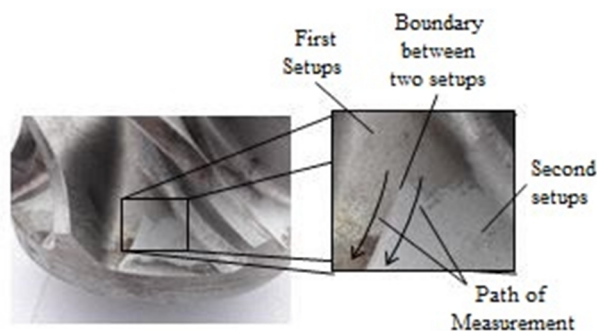


Fig. 12 Boundary between two workpiece setups (1,2) and path of measurement CMM

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

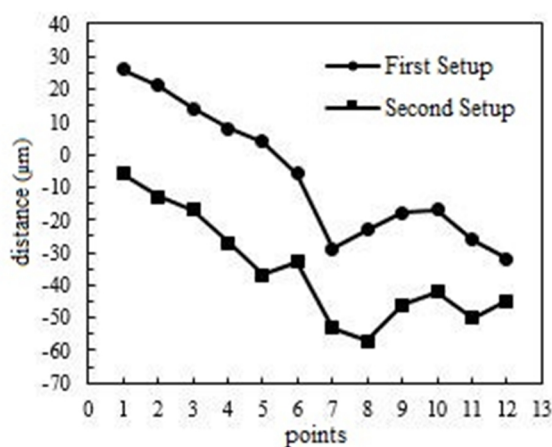


Fig. 13 distance between measured points and workpiece model on illustrated two paths in Fig 12

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

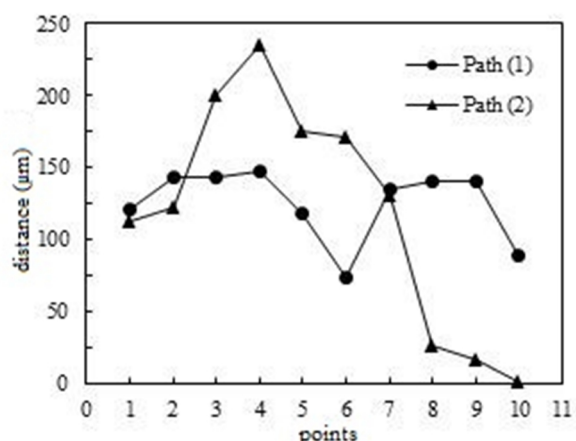


Fig. 19 distance between measured points and workpiece model on illustrated two paths in Fig 18

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

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 صلیبیت در ماشین‌های 3+2 محوره می‌توان میزان باربرداری ابزار در مرحله خشن‌کاری را افزایش و در نتیجه 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 تolerانس ± 0.4 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.

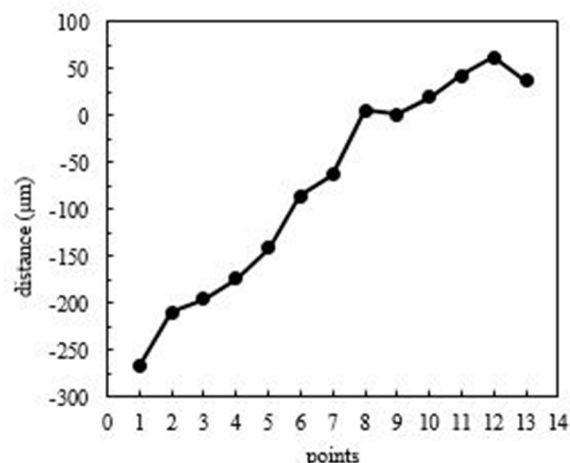


Fig. 17 distance between measured points and workpiece model on illustrated path in Fig 16

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

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.

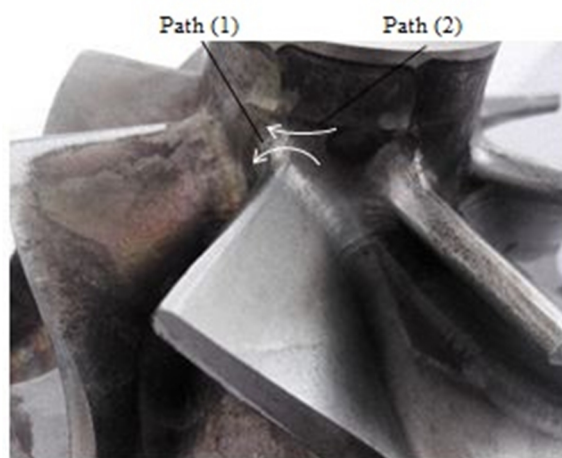


Fig. 18 two paths of measurement on root of blade

شکل 18 دو مسیر اندازه‌گیری بر روی ریشه پره