



## ماشینکاری سطوح با شکل آزاد با استفاده از دستگاه هگزاپاد

علی ربانی<sup>1</sup>، محمدجواد ناطق<sup>2\*</sup>، داوود کریمی<sup>3</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

3- استادیار، مهندسی مکانیک، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، تهران

\* تهران، صندوق پستی 143-14115، nategh@modares.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 19 خرداد 1395

پذیرش: 06 مرداد 1395

ارائه در سایت: 21 شهریور 1395

کلید واژگان:

هگزاپاد

ماشین کاری

سطوح با شکل آزاد

سیستم CNC

فرمول‌بندی نربز

### چکیده

دستگاه هگزاپاد با دارا بودن ساختاری موازی از شش درجه آزادی برخوردار است. این دستگاه بر خلاف ماشین‌ابزارهای سنتی چالاک‌ی بالایی دارد. با توجه به این شش درجه آزادی از آن می‌توان برای ماشینکاری سطوح با شکل آزاد استفاده نمود. سطوح با شکل آزاد از جمله سطوح پرکاربرد در صنعت امروز می‌باشند. از این سطوح در صنایع خودرو سازی، هوا فضا و قالب‌سازی به وفور استفاده می‌گردد. با توجه به این کاربرد روزافزون، ماشین کاری این سطوح نیز بسیار مورد توجه پژوهشگران واقع شده است. در ماشین‌ابزارهای فرز پنج محوره در این زمینه کارهای فراوانی صورت پذیرفته است. در این مقاله ماشینکاری سطوح با شکل آزاد با استفاده از دستگاه هگزاپاد مورد بررسی قرار گرفته است و بحث اصلی آن تأیید امکان پذیری استفاده از دستگاه هگزاپاد به عنوان میز ماشین‌ابزار و ماشینکاری به کمک آن است. ابتدا نحوه میانمایی این سطوح با توجه به ساختار موازی دستگاه آورده شده است. در ادامه استخراج اطلاعات سطوح با شکل آزاد به کمک فرمول‌بندی نربز توضیح داده شده است. سپس ماشینکاری سطوح نربز با دستگاه هگزاپاد بررسی شد. در نهایت هم دو قطعه با شکل آزاد در نرم‌افزار کتیا طراحی شدند و سپس ماشین کاری گردیدند.

## Machining Free Form Surfaces with Hexapod Machine Tool

Ali Rabbani<sup>1</sup>, Mohammad Javad Nategh<sup>1</sup>, Davoud Karimi<sup>2</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Iranian Research Organization for Science and Technology, Tehran, Iran

\* P.O.B. 14115-143, Tehran, Iran, nategh@modares.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 08 June 2016  
Accepted 27 July 2016  
Available Online 11 September 2016

#### Keywords:

Hexapod  
Machining  
Free form surfaces  
CNC system  
NURBS formulation

### ABSTRACT

A hexapod machine tool with a parallel structure has six degrees of freedom. This machine has a high dexterity unlike traditional machine tools. The hexapod can be used in machining free form surfaces. Free form surfaces are widely used in today's industries. These surfaces are much encountered in auto, aerospace and mold design industries. Consequently, machining of these surfaces has attracted the attention of researchers. In this field much research has been done on five axis machine tools. In this paper machining free form surfaces with hexapod machine tool has been investigated. The main topic of this paper is the feasibility of using hexapod as a machine tool table and machining with it. First, the interpolation of free form surfaces for parallel structure machines is explained. Then NURBS curves and surfaces are described and its formulation in matrix form is explained. After that, extracting information of free form surfaces with NURBS formulation is explained. Subsequently, some explanations about preparation of machining are given. Finally, two free form surfaces designed in Catia have been machined with the developed hexapod machine tool.

### 1- مقدمه

برای ماشینکاری سطوح با شکل آزاد از ماشین‌ابزارهای سه محوره و پنج محوره به طور گسترده استفاده می‌شود. ماشین‌های پنج محوره انعطاف پذیری بیشتری داشته و می‌توانند سطوح پیچیده را با کیفیت بهتر و در زمان کمتر نسبت به ماشین‌ابزار سه محوره تولید کنند. ماشین‌ابزارهای 3/2 محوره نیز به دلیل اینکه در مقایسه با ماشین‌ابزار پنج محوره هزینه کمتری دارند و از استحکام و سفتی بهتری برخوردارند، در صنعت کاربرد خاص خود را دارا می‌باشند [1]. محور اول در زنجیره سینماتیکی یک ماشین‌ابزار سنتی پنج محوره

ماشین‌ابزار هگزاپاد به عنوان ماشین‌ابزاری که دارای شش درجه آزادی و هم چنین از چالاک‌ی بالایی برخوردار است، جایگاه ویژه‌ای در ماشین کاری قطعات با شکل آزاد دارد. ماشین کاری سطوح و منحنی‌های آزاد نیز در تولید قطعات پیچیده در صنایع مختلف مانند هوا فضا، قالب‌سازی و غیره کاربرد فراوانی دارند. در همین زمینه در دستگاه‌های فرز تلاش‌های زیادی صورت پذیرفته است. لذا انجام ماشین کاری این سطوح در ماشین‌ابزار هگزاپاد و همچنین بررسی نتایج نیز امری ضروری به نظر می‌رسد.



Fig. 3 a sample of octahedral machine manufactured by Ingersoll company

شکل 3 نمونه‌ای از دستگاه ابرادونی ساخت شرکت اینگرسول [3]

همان‌طور که در شکل 3 آورده شده است این ایده صنعتی شده است و نمونه‌هایی نیز روانه بازار شده است. اما راجع به نتایج ماشینکاری و همچنین در زمینه ماشینکاری سطوح به خصوص سطوح با شکل آزاد توسط این دستگاه پیشینه پژوهشی موجود نمی‌باشد. در ضمن در نمونه‌ی نشان داده شده در شکل 3 و همچنین دیگر نمونه‌های صنعتی شده‌ی هگزپاد، ابزار بر روی دستگاه قرار گرفته و مجموعه ابزار بالای قطعه‌کار واقع می‌گردد و سپس ماشینکاری صورت می‌پذیرد، ولی در این جا این قطعه‌کار است که بر روی دستگاه هگزپاد واقع می‌گردد و ابزار بالای قطعه‌کار ثابت می‌باشد. در این پژوهش این ابزار کلگی یک دستگاه فرز معمولی می‌باشد. بدین ترتیب یک دستگاه فرز معمولی توسط این ربات هگزپاد به یک دستگاه با شش درجه آزادی تبدیل شده است که از مزیت‌های این طرح می‌باشد. در این پژوهش برای اولین بار یک سطح با شکل آزاد توسط دستگاه هگزپاد ماشینکاری می‌گردد. برای تعریف سطوح با شکل آزاد نیز از فرمول بندی نربز بهره برده شده است. در زمینه ماشینکاری سطوح با شکل آزاد و با استفاده از فرمول بندی نربز در ماشین فرز 5 محور سنتی کارهای فراوانی صورت گرفته است که در ادامه مقدمه‌ای مختصر در این باره آورده شده است.

ورنر و همکاران در سال 1998 بر روی مهندسی معکوس قطعات با شکل آزاد پرداختند. آنها اطلاعات سطح را پس از استخراج، با استفاده از فرمول بندی نربز بهینه کرده و سپس قطعه را با دستگاه فرز 5 محور ماشینکاری کردند. نتایج آنها حاکی از افزایش دقت نهایی سطح پس از بهینه نمودن تعریف سطح است [4].

وی لی و همکاران در سال 2008 به بررسی نحوه ایجاد مسیر با استفاده از فرمول بندی نربز پرداختند. آنها یک پیش‌میانپای برای تولید مسیر ارائه دادند که این پیش‌میانپای مزیت فرمول بندی نربز را در برنامه‌های کنترل عددی کامپیوتر بیش از پیش نشان می‌دهد. تحقیقات آنها حاکی از این است که هموار کننده مسیر نربز، تغییرات سرعت و شتاب را خیلی کاهش می‌دهد که این کاهش تغییرات در افزایش صافی سطح موثر است [5].

ژینگ و همکاران در سال 2012 با استفاده از منحنی‌های دوآل نربز<sup>1</sup> به میانپایی سطوح پیچیده برای دستگاه فرز 5 محوره پرداختند. آنها با استفاده از این روش یک پره توربین را ماشینکاری کردند که نتایج حاکی از بهتر شدن کیفیت سطح در مقایسه با روش ماشینکاری سنتی است [6].

(شکل 1)، بقیه محورها را حمل می‌کند و در نتیجه پاسخ دینامیکی توسط اینرسی مجموعه محدود می‌شود. در شکل 2 یک ماشین پنج محور نشان داده شده است. در این ماشین همانطور که مشاهده می‌گردد همه محورها ابزار را حمل می‌کنند و قطعه‌کار ثابت در نظر گرفته می‌شود. در این حالت محور X دستگاه بر روی یک قاب ثابت قرار می‌گیرد. در ادامه محور چرخشی B بر روی این محور قرار می‌گیرد. به همین ترتیب محور Y بر روی B و سپس محور A بر روی Y و سپس محور Z بر روی A قرار گرفته است. در شکل 2 مشهود است که محور X بقیه محورها را حمل کرده و در صورت اعمال تغییری در راستای X همه محورها در این راستا بایستی انتقال یابند. این زنجیره پاسخ دینامیکی مجموعه را نیز محدود می‌کند. حال اگر قطعه‌کار بزرگ باشد و نیاز به دستگاهی با سفتی بالا باشد، ماشین‌ابزارهایی حجیم و سنگین بایستی طراحی گردند تا با دقت مطلوب ماشینکاری صورت پذیرد.

این عیب در مکانیزم سری، باعث شد تا دستگاه هگزپاد با ساز و کار موازی طراحی شود. در ساز و کار موازی هر محور خود را حمل می‌کند و در نتیجه قطعه‌کار تغییر موقعیت پیدا می‌کند در حالی که نیازی به حمل به بقیه محورها نیست. با این ایده چندین ماشین‌ابزار ساخته شده است. برای مثال ماشین‌ابزاری با نام هگزپاد ابرادونی است که ساخت شرکت اینگرسول می‌باشد. این ماشین‌ابزار دارای فضای کاری  $1000 \times 1000 \times 1200$  میلی‌متر می‌باشد. همچنین دستگاه قابلیت چرخش حدود 15 درجه حول محورهای اصلی را دارا می‌باشد و دقت آن نیز 20 میکرومتر می‌باشد. نمونه‌ای از این دستگاه در شکل 3 قابل مشاهده است [2].

با توجه به دارا بودن شش درجه آزادی و همچنین چالاک‌ی بالای دستگاه هگزپاد از آن می‌توان برای ماشینکاری سطوح با شکل آزاد بهره برد.

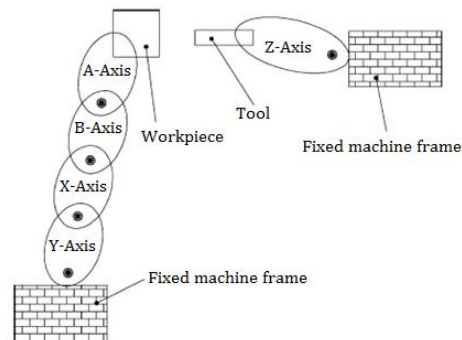


Fig. 1 Kinematic chain of a five axis mill

شکل 1 زنجیره سینماتیکی یک دستگاه پنج محوره [2]

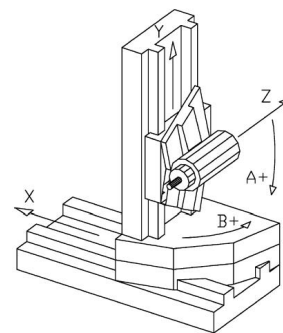


Fig. 2 Five axis machine

شکل 2 ماشین پنج محور [2]

<sup>1</sup> Dual NURBS

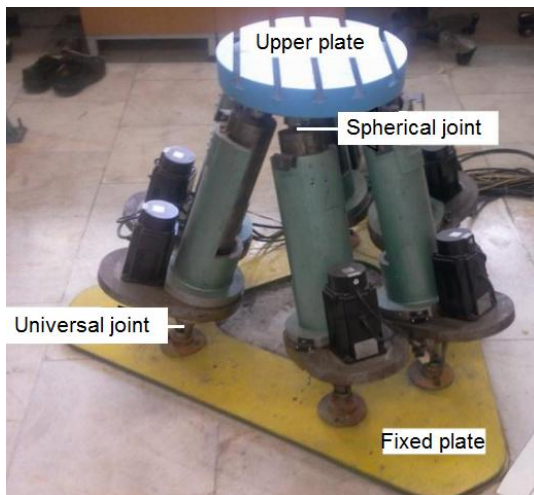


Fig. 4 Hexapod machine tool

شکل 4 دستگاه هگزپاد

داشته باشند. با استفاده از نقاط کنترلی و بردار گره و بردار وزن می‌توان انحنای و همواری منحنی را تنظیم نمود. این معادلات قادر به بیان منحنی‌های پیچیده با کمترین میزان اطلاعات می‌باشند. برای مثال یک دایره با شعاع 20 سانتی‌متر اگر توسط خطوط ساده تعریف شود، حدود 4 هزار پاره خط برای تعریف آن نیاز است تا از یک چند ضلعی به دایره شبیه گردد. در حالی که همین دایره با فرمول‌بندی نربز توسط هفت نقطه قابل تعریف است.

در این مقاله از شکل ماتریسی منحنی‌های رشنال در میانمایی آنها استفاده شده است. کوهن و رسنفلد نشان دادند که شکل عمومی  $m$ مین تکه از یک تابع بی اسپلین رشنال می‌تواند به شکل رابطه (1) ارائه شود [9].

$$B_m = [T][N][P] \quad (1)$$

$$1 < m < n - k + 1$$

که در آن  $k$  مرتبه تابع مینای بی اسپلین است و چندضلعی کنترلی  $n+1$  راس دارد.  $P$  برداری است حاوی  $k$  نقطه کنترلی متوالی و  $T$  مطابق رابطه (2) تعریف شده است.

$$T = [t^{k-1} \quad t^{k-2} \quad \dots \quad t \quad 1]^T \quad (2)$$

برای به دست آوردن بردار  $T$ ، منحنی باید مطابق رابطه (3) تغییر پارامتر دهد.

$$t = \frac{u - u_m}{u_{m+1} - u_m} \quad (3)$$

که در آن  $t$  پارامتر جدید منحنی و  $u_m$   $(m+k)^{th}$  امین مقدار گره منحنی است. المانهای  $N$  را می‌توان از رابطه (4) به دست آورد.

$$N_{i+1,j+1} = \frac{1}{(k-1)!} \binom{k-1}{i} \times \sum_{h=j}^{k-1} (k-(h+1))^i (-1)^{h-j} \binom{k}{h-j}; \quad (4)$$

$$0 < i, j < k - 1$$

به این ترتیب برای منحنی نربز می‌توان رابطه (5) را استخراج کرد.

$$C_m = \frac{[T][N][WP]}{[T][N][W]} \quad (5)$$

$$1 < m < n - k + 1$$

که در آن

$$[WP] = [W_m P_m \quad W_{m+1} P_{m+1} \quad W_{m+2} P_{m+2}]$$

$$[W] = [W_m \quad W_{m+1} \quad W_{m+2}]$$

که  $[W]$  بردار حاوی سه وزن متوالی مربوط به رئوس چندضلعی کنترلی

جیچون وو و همکاران در سال 2015 به بررسی یک روش برای پیش‌پردازش نقاط کنترلی با استفاده از منحنی‌های نربز برای ماشینکاری با سرعت بالا پرداختند. نتایج ماشینکاری آنان نشان داد که روش آنان کیفیت سطح ماشینکاری را افزایش داده و همزمان نیز زمان ماشینکاری را حدود 19% کاهش داده است [7].

در آزمایشگاه فناوری‌های پیشرفته در ماشین ابزار دانشگاه تربیت مدرس یک عدد دستگاه هگزپاد ساخته شده است که می‌تواند به عنوان میز ماشین-ابزار مورد استفاده قرار گیرد. این ربات موازی از یک سکوی ثابت پایینی، یک سکوی متحرک بالایی، شش محرکه و مفاصل یونیورسال و کروی تشکیل شده است. میز متحرک بالایی توسط شش مفصل کروی به محرکه‌های ماشین‌ابزار وصل شده است. این محرکه‌ها توسط شش مفصل یونیورسال به سکوی ثابت پایینی متصل گردیده‌اند. میز ماشین‌ابزار هگزپاد دارای شش درجه آزادی می‌باشد که سه درجه آن طولی و سه درجه آن آزادی زاویه‌ای در فضا است. نمونه ساخته شده این میز در شکل 4 آمده است.

ربات هگزپاد دارای شش پایه است که هر کدام از این پایه‌ها به یک سرو موتور متصل شده‌اند. هر کدام از این سرو موتورها با اتصال به سیستم کنترلی مرکزی ماشین با دریافت هر پالس مشخص، می‌توانند مقدار مشخصی تغییر طول در پایه‌ها ایجاد نمایند. هر تغییر مشخص پایه‌ها، باعث ایجاد یک موقعیت منحصر به فرد برای میز متحرک بالایی در فضا می‌شود.

## 2- ماشینکاری سطح نربز

در این قسمت امکان‌سنجی ماشینکاری سطح با شکل آزاد توسط دستگاه هگزپاد مورد بررسی می‌گردد. ماشینکاری سطح تاکنون توسط دستگاه هگزپاد انجام نشده است و در این پژوهش دو سطح با شکل آزاد ماشینکاری می‌گردد. روش کار بدین صورت است که ابتدا یک سطح با شکل آزاد انتخاب می‌گردد. این سطح می‌تواند از ابر نقاط به دست آمده باشد و یا اینکه در نرم‌افزارهای شبیه‌سازی طراحی شده باشد. سپس با استفاده از کد نوشته شده در نرم‌افزار برنامه‌نویسی پایتون اطلاعات سطح در قالب فرمول‌بندی نربز به دست می‌آید. لازم به ذکر است که این اطلاعات شامل: نقاط کنترلی، بردار گره و بردار وزن است. حال این نقاط وارد قسمت کنترلی دستگاه هگزپاد شده و میانمای سطوح نربز نیز این سطح را تشکیل می‌دهد. پس از تشکیل سطح، نقاط میانمایی شده استخراج می‌گردند و این نقاط به واحد سینماتیک دستگاه ارسال می‌شوند. این واحد نیز با توجه به نقاط میانمایی شده طول پایه‌ها را استخراج می‌نماید. این طول پایه‌ها به واحد کنترل حرکت ارسال شده و این واحد نیز سیگنال‌های حرکتی را برای سرو موتورها می‌فرستد و در نتیجه پیمایش سطح صورت می‌پذیرد.

## 2-1- سطح نربز

سطوح با شکل آزاد یا سطوح مجسمه‌ای شکل، در قالب سازی کاربرد زیادی داشته و از آنها در صنایع هوافضا و خودروسازی نیز استفاده می‌گردد. سطحی که شامل یک یا چند سطح غیر مسطح یا درجه دو باشد از جمله سطوح با شکل آزاد به حساب می‌آید [8].

بعد از تقریب منحنی‌ها با روش بی-اسپلین و معرفی سطوح توسط این معادلات مهندسان به مشکلاتی برخوردند که برای جبران این مشکلات از منحنی و سطوح نربز استفاده کردند. از فواید سطوح نربز این است که توسط آنها هر خط یا منحنی دلخواهی را می‌توان به زبان ریاضی بیان کرد. توسط این معادلات مهندسان قادر هستند که کنترل کاملی بر روی شکل منحنی

سطح نریز طراحی شده در نرم‌افزار کتیا آورده شده است و در شکل 7 استخراج آن توسط کد نوشته شده در برنامه پایتون مشاهده می‌گردد.

همانطور که در شکل 6 مشاهده می‌گردد این سطح دارای یک شکل دلخواه می‌باشد. اطلاعات سطح استخراج شده در جدول 1 آمده است. لازم به ذکر است که درجه سطح نریز استخراج شده برابر با 3 می‌باشد و از آنجایی که میانیاب دستگاه نیز سطح نریز را با درجه 3 ایجاد می‌نماید، مطابقت کامل بین درجه سطح شکل دلخواه با میانیاب دستگاه وجود دارد.

پس از استخراج اطلاعات حال بایستی این اطلاعات وارد دستگاه هگزپاد شوند. پس از وارد کردن اطلاعات به دستگاه، در این مرحله میانیاب دستگاه سطح را تشکیل می‌دهد. میانیاب دستگاه با توجه به فاصله تعیین شده توسط کاربر، سطح را به چند منحنی با فاصله تعیین شده تقسیم می‌کند و سپس با عبور از هر منحنی، سطح را پیمایش می‌کند. دستگاه در حین پیمایش هر منحنی برای تشکیل سطح، زاویه میز را هم در راستای  $X$  و هم در راستای  $Y$  تغییر می‌دهد. زوایای میز دستگاه در هر نقطه واقع بر روی منحنی، مطابق با زوایای بردار نرمال صفحه مماس بر سطح در این نقطه می‌باشد. راستای  $X$  و  $Y$  در شکل 5 مشخص شده اند.

در مرحله اول با ابزار سرتخت<sup>2</sup> با قطر 12 میلی‌متر خشن‌تراشی صورت می‌گیرد. در این حالت فاصله بین هر دو منحنی برابر 10 میلی‌متر است. برای مرحله نهایی با ابزار سر کروی با قطر 12 میلی‌متر ماشینکاری شده است. در این حالت فاصله بین دو منحنی نیز 1 میلی‌متر انتخاب می‌گردد تا کیفیت و دقت سطح نهایی بالا برود. در شکل 8 قطعه‌کار در حین خشن‌تراشی آورده شده است. در شکل 9 نیز قطعه کار بعد از ماشینکاری خشن و در شکل 10 نیز قطعه کار نهایی مشاهده می‌گردد.

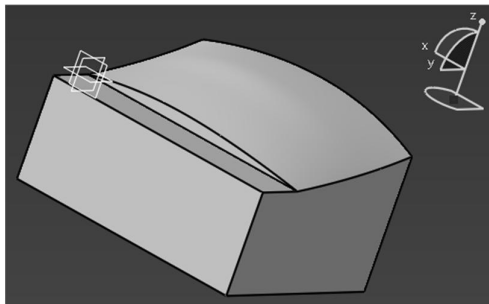


Fig. 6 Modeling of NURBS surface in Catia

شکل 6 سطح نریز شبیه سازی شده در نرم‌افزار کتیا به همراه نقاط کنترلی

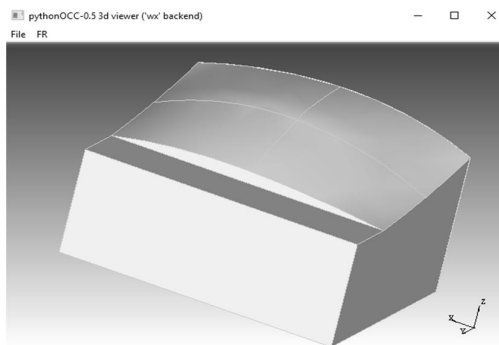


Fig. 7 Opening workpiece in Python programming language and extracting data

شکل 7 وارد نمودن قطعه در نرم‌افزار به زبان پایتون و استخراج اطلاعات

می‌باشند. استفاده از شکل ماتریسی منحنی های نریز در محاسبه مشتق مرتبه اول و دوم آن موجب سهولت و کاهش حجم محاسبات می‌شود [9].

## 2-2- تجهیزات آزمایش

همانطور که عنوان گردید دستگاه هگزپاد با دارا بودن شش درجه آزادی به عنوان میز ماشین‌ابزار مورد استفاده واقع شده است. در شکل 5 مجموعه آزمایش آورده شده است. حرکت دورانی ابزار را نیز کلگی دستگاه فرز تامین می‌کند. برای تطبیق فضای کاری دستگاه فرز با دستگاه هگزپاد، از یک قطعه واصل برای افزایش محدوده فضای کاری دستگاه استفاده شده است که در شکل 5 قابل مشاهده است. محفظه اجزای کنترلی دستگاه که در شکل 5 مشخص شده است، نیز شامل کامپیوتر صنعتی، کنترل کننده حرکت<sup>1</sup> و درایورهای سروو موتور می‌باشد.

همان‌طور که در شکل 5 مشاهده می‌گردد کلگی دستگاه فرز 180 درجه چرخانده شده است و بر روی دستگاه هگزپاد قرار گرفته است. در حقیقت با افزودن دستگاه هگزپاد، یک دستگاه فرز معمولی تبدیل به یک مجموعه ماشینکاری با شش درجه آزادی شده است. در عین حالی که با چرخاندن دوباره کلگی، می‌توان از دستگاه فرز نیز برای انجام کارهای معمولی بهره برد. برای تطبیق فضای کاری فرز با دستگاه هگزپاد از یک قطعه واصل استفاده شده است. این قطعه واصل فضای کاری دستگاه فرز را افزایش داده و باعث قرارگیری کلگی فرز بر روی میز دستگاه هگزپاد شده است.

## 3-2- ماشینکاری سطح

در این قسمت دو سطح با شکل آزاد معرفی شده‌اند. سپس مراحل ماشینکاری این دو سطح نریز در ادامه توضیح داده شده است. در شکل 6

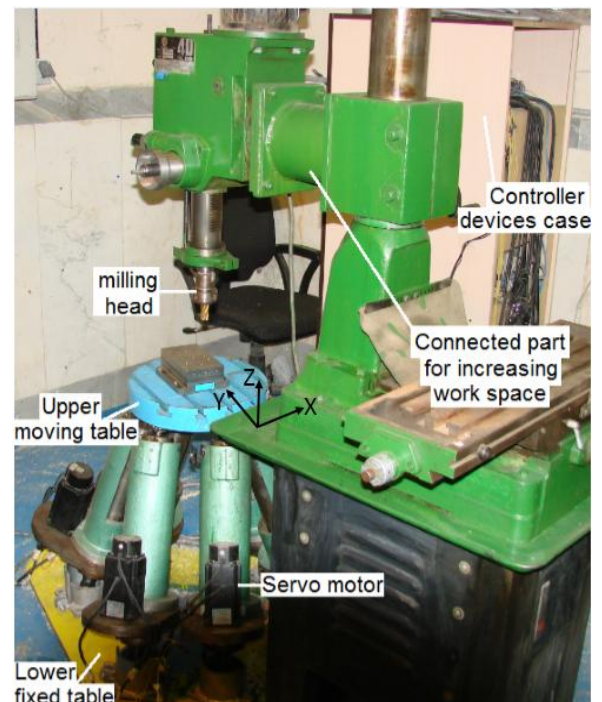


Fig. 5 set of Hexapod machine, milling machine and control system

شکل 5 مجموعه دستگاه فرز، دستگاه هگزپاد به همراه سیستم کنترل آن

<sup>2</sup> End mill tool

<sup>1</sup> Trajexia

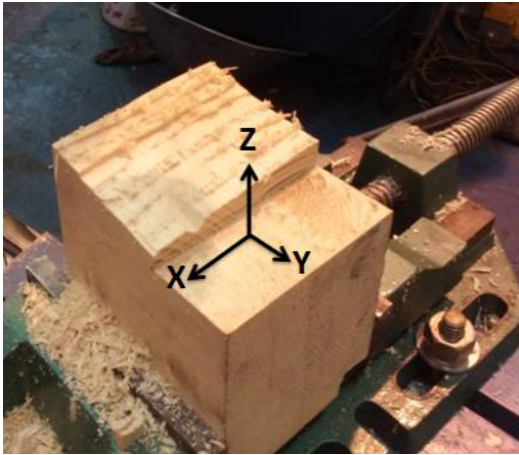


Fig. 9 NURBS surface after Rough machining

شکل 9 سطح نریز پس از ماشینکاری خشن

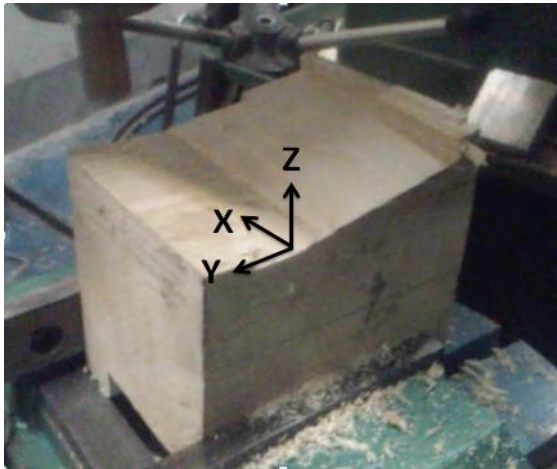


Fig. 10 Final machined NURBS surface

شکل 10 سطح نریز نهایی ماشینکاری شده

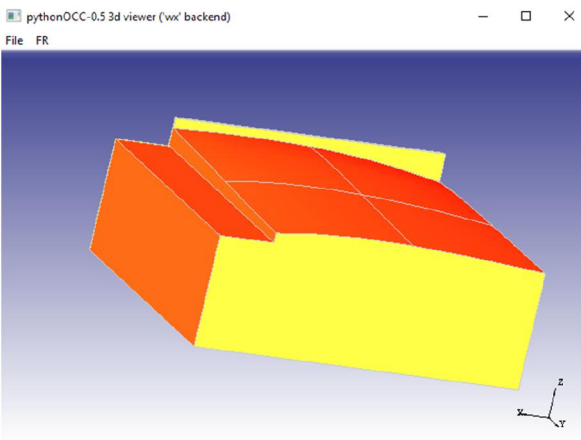


Fig. 11 extracting work piece data

شکل 11 استخراج اطلاعات قطعه کار

استفاده از دستگاه هگزپاد بحث گردید. دستگاه هگزپاد با ساختاری موازی دارای شش درجه آزادی می باشد که از آن به عنوان میز ماشین ابزار استفاده گردید. در این سیستم چرخش ابزار توسط کنگی یک دستگاه فرز تامین شد

جدول 1 اطلاعات استخراج شده برای سطح نریز

Table 1 Extracted data for NURBS surface

Z	Y	X	وزن	شماره نقطه	شماره منحنی
650	70	-140	1	1	
657	70	-90	1.1	2	منحنی اول
660	07	-10	0.9	3	
655	07	40	1.1	4	
654	40	-140	1	1	
660	40	-90	1.1	2	منحنی دوم
663	40	-10	0.9	3	
658	40	40	1.1	4	
658	10	-140	1	1	
664	10	-90	1.1	2	منحنی سوم
666	10	-10	0.9	3	
662	10	40	1.1	4	
662	-20	-140	1	1	
669	-20	-90	1.1	2	منحنی چهارم
670	-20	-10	0.9	3	
665	-20	40	1.1	4	

در مرحله اول با ابزار سرتخت با قطر 12 میلیمتر خشن تراشی صورت می گیرد. در این حالت فاصله بین هر دو منحنی برابر 10 میلیمتر است. برای مرحله نهایی با ابزار سر کروی با قطر 12 میلیمتر ماشینکاری شده است. در این حالت فاصله بین دو منحنی نیز 1 میلیمتر انتخاب می گردد تا کیفیت و دقت سطح نهایی بالا برود. شکل 8 قطعه کار در حین خشن تراشی آورده شده است. در شکل 9 نیز قطعه کار بعد از خشن تراشی و در شکل 10 نیز قطعه کار نهایی مشاهده می گردد.

در ادامه برای تایید امکان پذیری ماشینکاری سطوح با شکل آزاد توسط دستگاه هگزپاد، یک سطح دیگر نیز در نرم افزار کتیا شبیه سازی گردید که در شکل 11 مشاهده می گردد. سپس اطلاعات آن استخراج گردید و مانند نمونه قبلی وارد دستگاه گردید. در نهایت هم سطح نریز نهایی ماشینکاری شده در شکل 12 نشان داده شده است.

### 3- نتیجه گیری

در این مقاله در مورد بررسی امکان سنجی ماشینکاری سطوح با شکل آزاد با

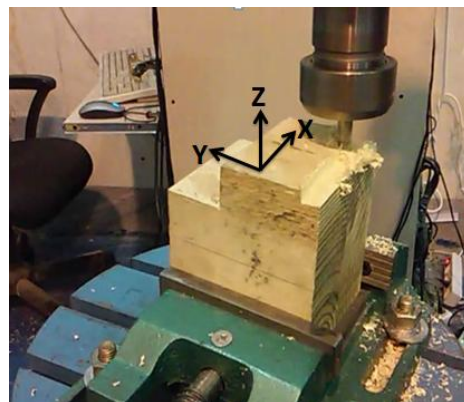


Fig. 8 Machine during rough machining of NURBS surface

شکل 8 دستگاه در حین خشن تراشی سطح نریز

گردید.

#### 4- مراجع

- [1] P. J. Gray, F. Ismail, S. Bedi, Arc-intersect method for-axis tool paths on a 5-axis machine, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, No. 1, pp. 182-190, 2007.
- [2] E. L. Bohez, Five-axis milling machine tool kinematic chain design and analysis, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 42, No. 4, pp. 505-520, 2002.
- [3] M. Terrier, A. Dugas, J. Y. Hascoet, Qualification of parallel kinematics machines in high-speed milling on free form surfaces, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 44, No. 7, pp. 865-877, 2004.
- [4] A. Werner, K. Skalski, S. Piszczatowski, W. Święszkowski, Z. Lechniak, Reverse engineering of free-form surfaces, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 76, No. 1, pp. 128-132, 1998.
- [5] W. Li, Y. Liu, K. Yamazaki, M. Fujisima, M. Mori, The design of a NURBS pre-interpolator for five-axis machining, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 36, No. 9-10, pp. 927-935, 2008.
- [6] Z. Qiao, T. Wang, Y. Wang, M. Hu, Q. Liu, Bézier polygons for the linearization of dual NURBS curve in five-axis sculptured surface machining, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 53, No. 1, pp. 107-117, 2012.
- [7] J. Wu, H. Zhou, X. Tang, J. Chen, Implementation of CL points preprocessing methodology with NURBS curve fitting technique for high-speed machining, *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 81, No. 1, pp. 58-64, 2015.
- [8] A. Lasemi, D. Xue, P. Gu, Recent development in CNC machining of freeform surfaces: A state-of-the-art review, *Computer-Aided Design*, Vol. 42, No. 7, pp. 641-654, 2010.
- [9] E. Cohen, R. F. Riesenfeld, General matrix representations for Bézier and B-spline curves, *Computers in Industry*, Vol. 3, No. 1, pp. 9-15, 1982.

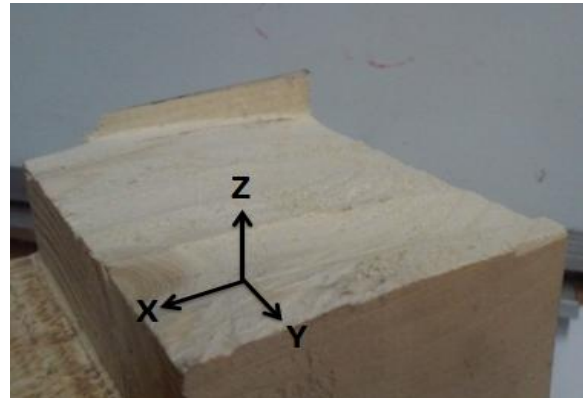


Fig. 12 Final machined NURBS surface

شکل 12 سطح نربز نهایی ماشینکاری شده

و حرکت قطعه کار، توسط شش درجه آزادی دستگاه هگزاپاد تامین گردید. در ادامه اطلاعات یک سطح با شکل آزاد در قالب فرمول بندی نربز استخراج گردید و وارد دستگاه شد. سپس این اطلاعات وارد دستگاه شد و در نهایت هم سطح نربز ماشینکاری شد. برای تایید امکان پذیری ماشینکاری سطوح با شکل دلخواه یک سطح دیگر نیز مورد تحلیل واقع شد و سپس ماشینکاری