



## ماشین‌کاری منحنی‌های نریز با استفاده از میز هگزپاد

علی ربانی<sup>۱</sup>، رضا احدی<sup>۱</sup>، محمدجواد ناطق<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

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

\* تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵، nategh@modares.ac.ir

## چکیده

با توجه صنعت رقابتی، برای بالا بردن سرعت تولید همراه با کم کردن هزینه‌ها، نیاز به ماشین‌ابزارهایی با عملکرد دینامیکی بالا، سفتی زیاد و جرم محرک کمتر احساس شد. با توجه به این‌که مکانیزم حرکتی ماشین‌ابزارهای سنتی به‌صورت سری می‌باشد، پاسخگوی نیازهای فوق نبودند. به‌همین دلیل ربات‌هایی با مکانیزم موازی مانند ربات هگزپاد مورد توجه قرار گرفتند. میز ماشین‌ابزار هگزپاد نیز یک ربات موازی است که براساس سکوی استوارت کار می‌کند. این میز از دو سکو تشکیل شده است. سکوی پایینی در جای خود ثابت است و سکوی بالایی با تغییر طول پایه‌ها، موقعیت آن تغییر می‌یابد. این سکو دارای شش درجه آزادی است و به‌عنوان میز ماشین‌ابزار اعمال وظیفه می‌کند. این دستگاه با قرار گرفتن کنار یک ماشین‌ابزار معمولی قدیمی می‌تواند به یک ماشین‌ابزار CNC شش محوره تبدیل گردد. در این پژوهش برای اولین بار با قرار دادن دستگاه هگزپاد زیر کلنگی یک دستگاه فرز، ماشین‌کاری صورت پذیرفت. در ابتدا مراحل آماده‌سازی دستگاه برای ماشین‌کاری آورده شده است. ابتدا بر روی چوب و سپس بر روی آلومینیوم گرید سه هزار منحنی‌های نریز با استفاده از نقاط کنترلی ماشین‌کاری شد. سپس این قطعات با استفاده از روش سنتی ماشین‌کاری شدند و نتایج با یکدیگر مقایسه گردند.

**کلید واژگان:** هگزپاد، ماشین‌کاری، منحنی نریز

## Machining NURBS curves with hexapod machine tool

Ali Rabbani, Reza Ahadi, Mohammad Javad Nategh\*

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran  
\* P.O.B. 14115-143, Tehran, Iran, nategh@modares.ac.ir

## ABSTRACT

For increasing the production speed along with decreasing the costs in competitive industry, machines with high dynamic performance and stiffness are needed with low driven mass. Since serial mechanism of the traditional machine tools is not appropriate for above requirement, robots with parallel mechanism have been given attention. Hexapod machine tool is a parallel robot which is based on Stewart platform. The latter consists of two platforms. The lower platform is fixed in its place and the upper platform's position changes by changing the lengths of pods. This platform has six degrees of freedom and acts as a table of machine tool. This machine is able to convert an ordinary machine tool into a new CNC machine tool. In this research, machining experiments have been done with the developed hexapod machine for the first time. At the beginning of this paper, preparation of hexapod machine for machining is explained. Then machining of NURBS curve on wood and aluminum grade 3000 specimens has been carried out. Then, similar experiments were carried out with the traditional machine. Finally, the result of each method has been compared with each other.

**Keywords:** Hexapod, Machining, NURBS Curve.

## ۱- مقدمه

میز ماشین و یا هر دو اعمال می‌شود [۲]. برخلاف ماشین‌های سه محوره، ماشین‌های پنج محوره می‌توانند سطوح پیچیده را با کیفیت و کارایی بهتر تولید نمایند. ماشین‌های  $3\frac{1}{2}$  محوره نیز به دلیل هزینه کمتر نیز در صنعت کاربرد خاص خود را دارند. این ماشین‌ها در مقایسه با ماشین‌های پنج محوره از استحکام و سفتی بالایی برخوردار هستند. زیرا محورهای چرخشی در حین حرکت برشی دستگاه قفل می‌گردند [۳]. اگر چه برخلاف دستگاه‌های پنج محوره، در ماشین‌های  $3\frac{1}{2}$  جهت دستگاه در حین عملیات برش نمی‌تواند به صورت پیوسته تغییر یابد [۲] و لذا زمان ماشین‌کاری افزایش می‌یابد.

در ضمن ساختار ماشین‌ابزارهای سنتی براساس مختصات کارتزین می‌باشد. بیشتر شکل‌های پیچیده در حالت بهینه فقط توسط ماشین‌های پنج محوره قابل ماشین‌کاری هستند. این ساختار ماشین‌های پنج محوره به دو محور چرخشی دیگر نیازمند است. برای داشتن ماشین‌ابزار دقیق با سفتی مورد نیاز و قابلیت حمل قطعات سنگین، ماشین‌ابزارهایی بزرگ و سنگین

ماشین‌ابزارهای هگزپاد نسل جدیدی از ماشین‌های ابزار می‌باشند که محققین به خاطر نیاز به دقت و سرعت‌های بالای ماشین‌کاری به آن‌ها روی آورده‌اند. این نیاز با حرکت سیستم‌های تولیدی به سوی ماشین‌کاری پر-سرعت بیشتر احساس شد. زیرا این در این حالت نیاز به ماشین‌ابزاری با عملکرد دینامیکی بالا، سفتی بهبود یافته و جرم در حال حرکت کمتر، بیشتر است. از آنجایی که ساختار ماشین‌ابزارهای سنتی پاسخگوی نیازهای فوق نبود، برای برآورده کردن این نیازها به ربات‌های موازی می‌باشد که توسط محققین زیادی مورد پژوهش قرار گرفته است [۱].

از ماشین‌های ابزار سه محوره و پنج محوره به‌طور گسترده در ماشین‌کاری سطوح با شکل دلخواه استفاده می‌گردد. پنج حرکت توسط پنج محور ماشین به طور پیوسته و همزمان کنترل می‌شوند. حرکت‌های انتقالی در سه راستای مختصات کارتزین و نیز دو حرکت دورانی هر کدام به گیره ابزار یا

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

A. Rabbani, R. Ahadi, M.J. Nategh, Machining NURBS Curves with Hexapod Machine Tool, Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference, Vol. 15, No. 13, pp. 490-494, 2015 (in Persian)



شکل ۲ ماشین‌ابزار ابرادونی ساخت شرکت اینگرسول [۶]

سکوی بالای با شش درجه آزادی به عنوان میز ماشین‌ابزار انجام وظیفه می‌کند. این میز قادر است که سه حرکت انتقالی در راستای  $x, y, z$  و سه حرکت دورانی حول محورهای نامبرده انجام دهد. مکانیزم فوق کاربردهای فراوانی دارد که عبارت‌اند از:

- ماشین‌کاری قطعات پیچیده با اندازه‌های متوسط و کوچک
  - ماشین‌کاری میکرو
  - کنترل ابزار برای ماشین‌کاری و ساخت دقیق
  - موقعیت‌دهی و جهت‌دهی تلسکوپ و تجهیزات ماهواره
  - جراحی پزشکی
- این نوع پیکر بندی به عنوان یک میز فرز مزایای زیر را دارد:
- سفتی و صلبیت بالای سیستم در نتیجه ساختار موازی و محوری بودن نیروها
  - نسبت بار به وزن زیاد
  - خطاهای اتصال غیرتجمعی (یعنی خطاهای محرکه‌ها جمع نمی‌شود)
  - حرکت‌های دقیق حتی در بارهای متناوب سنگین و شتاب‌های بالا
  - افزایش سرعت ماشین‌کاری
  - عدم نیاز به موتور پایه قوی

به‌طور کلی این طرح برای فرایندهای ساخت و تولید متغیر و ماشین‌کاری با سرعت بالا، تبدیل ماشین‌ابزارهای معمولی قدیمی به ماشین‌ابزارهای CNC جدید و شبیه سازه‌های پرواز مناسب می‌باشد.

در شکل ۳ نمونه ساخته شده این دستگاه را در آزمایشگاه فناوری‌های پیشرفته در ماشین‌های ابزار مشاهده می‌نمایید.

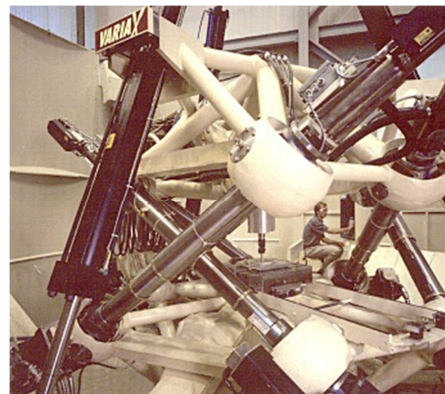
در مکانیزم هگزاپاد که یک مکانیزم موازی به‌شمار می‌آید، دو پارامتر موقعیت میز بالایی و طول پایه‌های مکانیزم توسط سینماتیک دستگاه به یکدیگر مرتبط می‌شوند. بدین معنی که با معلوم بودن هر یک دیگری را می‌توان به دست آورد. سینماتیک معکوس مکانیزم، موقعیت مشخص مکانیزم را به طول پایه‌ها تبدیل می‌کند. ولی برای یک مجموعه طول پایه‌ها در مکانیزم می‌توان از طریق سینماتیک مستقیم مکانیزم، یک موقعیت منحصر به فرد برای میز بالایی به‌دست آورد.

لازم است. در ضمن اگر به زنجیره سینماتیکی یک دستگاه پنج محوره رجوع شود می‌توان دید که محور اول زنجیره، بقیه محورها را حمل می‌کند. بنابراین پاسخ دینامیکی توسط اینرسی مجموعه محدود می‌گردد. لذا مکانیزمی ایده-آل می‌باشد که بتواند قطعه‌کار را حرکت دهد بدون این که نیاز باشد محوره‌های دیگر را حمل کند. در نتیجه این ایده دستگاه هگزاپاد مورد طراحی قرار گرفت. با توجه به این ایده استفاده‌های زیادی مطرح گردیدند، ولی به دلیل پیچیدگی کنترل شش پایه از این مکانیزم تنها به‌عنوان شبیه‌ساز سکوی هواپیما استفاده می‌گردید. اما اخیراً با توجه به پیشرفت خیره‌کننده در سرعت محاسبات و همچنین کاهش هزینه آن از این ایده برای طراحی میز ماشین‌ابزار مورد استفاده واقع گردید. ماشین‌ابزار اولی که با ایده ساخته شد دستگاه واریاکس<sup>۱</sup> ساخت شرکت گیدینگس و لوئیس<sup>۲</sup> می‌باشد که در شکل ۱ آمده است. این ماشین‌ابزار دارای فضای کاری  $۶۳۰ \times ۶۳۰ \times ۶۳۰$  میلی‌متر و با قابلیت چرخش حدود  $۲۵$  درجه حول محوره‌های اصلی و هم-چنین با دقت  $۱۱$  میکرومتر می‌باشد. ماشین دوم با نام هگزاپاد ابرادونی است که ساخت شرکت اینگرسول می‌باشد. این ماشین‌ابزار با فضای کاری  $۱۲۰۰ \times ۱۰۰۰ \times ۱۰۰۰$  میلی‌متر و چرخش حدود  $۱۵$  درجه حول محوره‌های اصلی و دقت  $۲۰$  میکرومتر موجود می‌باشد که در شکل ۲ نمونه‌ای از این دستگاه آورده شده است [۴]. بعد از این شرکت‌ها، نمونه‌های دیگری توسط دیگر شرکت‌های صنعتی برای موارد مختلف ساخته شد که به بازار نیز عرضه گردیدند.

در این پژوهش ابتدا دستگاه ماشین‌ابزار هگزاپاد ساخته شده در آزمایشگاه فناوری‌های پیشرفته در ماشین‌ابزار در دانشگاه تربیت مدرس معرفی می‌گردد. سپس مراحل آماده‌سازی دستگاه برای ماشین‌کاری آورده شده است. در انتها نیز چند نمونه از آزمایش‌های انجام شده توسط این مجموعه به‌همراه تحلیل آن آورده شده است. لازم به‌ذکر است که این مجموعه یک نمونه آزمایشگاهی می‌باشد و برای اولین بار است که ماشین-کاری توسط آن صورت می‌گیرد.

## ۲- دستگاه هگزاپاد

میز ماشین‌ابزار هگزاپاد از دو سکو تشکیل شده است که این دو سکو توسط شش پایه با طول قابل تغییر به کمک مفاصل کشویی از بالا و شش مفصل یونیورسال از پایین به یکدیگر متصل شده‌اند. سکوی پایینی در جای خود ثابت است و به عنوان پایه برای سکوی بالایی مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۱ نمونه‌ای از دستگاه واریاکس ساخت شرکت گیدینگ و لوئیس [۵]

1. VARIAX
2. Giddings and Lewis

همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌گردد محدوده ماشین کاری تمام منحنی نمی‌باشد و بین دو خطی که در شکل مشخص گردیده‌اند می‌باشد. دلیل این امر بزرگی طول منحنی نسبت به اندازه قطعه کار می‌باشد. لازم به ذکر است که اطلاعات این منحنی از قبیل نقاط کنترلی، تابع وزن و بردار گرهِ از برنامه نوشته شده در زبان برنامه‌نویسی پایتون<sup>۳</sup> استخراج گردید. در شکل ۶ تصویری از این برنامه به همراه قطعه کار که وارد آن شده است، مشاهده می‌گردد.

#### ۴- روش انجام آزمایش

همان‌طور که پیش‌تر مطرح گردید، از دستگاه هگزاپاد برای اولین بار به‌عنوان میز ماشین‌ابزار مورد استفاده قرار می‌گرفت. لذا انجام یک سری مقدمات لازم به نظر می‌رسید. از جمله این کارها خرید یک دستگاه فرز و افزودن یک قطعه رابط به آن برای افزایش محدوده فضای کاری آن می‌باشد. در شکل ۷ مجموعه گیره و قطعه کار و دستگاه فرز به همراه دستگاه هگزاپاد را مشاهده می‌گردد.

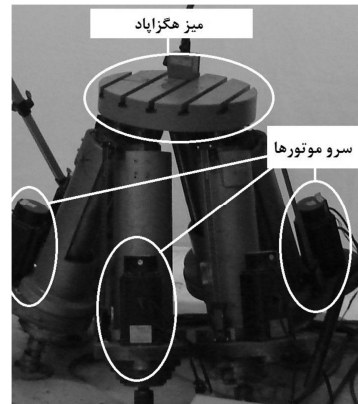
برای شروع آزمایش ابتدا از ماشین کاری یک دایره و تحلیل آن شروع شد. دایره‌ای با شعاع ۴۰ میلی‌متر و مرکز مختصات  $(X=15, Y=20)$  و در صفحه  $Z=700$  ماشین کاری شد. در ادامه منحنی نریز معرفی شده در شکل ۵ به همراه محدوده آن توسط دو روش ماشین کاری شد. یک بار از طریق روش سنتی با استفاده از G01 و بار دیگر با استفاده از فرمول‌بندی و برنامه منحنی نریز دستگاه. در شکل ۸ عملیات ماشین کاری دایره و شکل ۹ نمونه نهایی ماشین کاری شده و شکل‌های ۱۰ و ۱۱ ماشین کاری منحنی نریز آورده شده است.



شکل ۶ قطعه کار و استخراج اطلاعات لازم برای ماشین کاری



شکل ۷ مجموعه دستگاه هگزاپاد، فرز و گیره‌بندی در حین ماشین کاری



شکل ۳ نمونه آزمایشگاهی هگزاپاد ساخته شده در دانشگاه تربیت مدرس

#### ۳- منحنی نریز

سطوح با شکل دلخواه به‌طور گسترده در صنایع هوافضا و خودرو استفاده می‌شوند و همچنین در صنعت قالب‌سازی کاربرد فراوانی دارند. تعریف این سطوح بدین صورت است که به سطحی گفته می‌شود که شامل یک یا چند سطح غیرمسطح یا درجه دو باشد [۷].

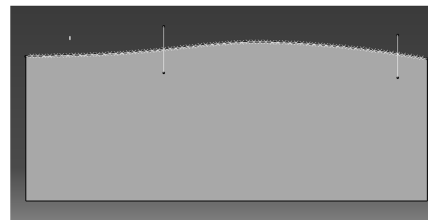
برای بیان یک منحنی به زبان ریاضی از فرمول‌بندی نریز استفاده می‌شود. این نوع فرمول‌بندی در نرم‌افزارهای مکانیکی کاربرد خاص خود را دارا می‌باشد. برای بیان یک منحنی نریز به یک بردار نقاط کنترل به همراه وزن هر نقطه و همچنین بردار گرهِ نیاز می‌باشد. اطلاعات منحنی نریزی که در این پژوهش ماشین کاری گردید، در جدول ۱ آمده است. همچنین در شکل ۴ و ۵ این منحنی در نرم‌افزار راینو<sup>۱</sup> و کتیا<sup>۲</sup> شبیه‌سازی شده است.

جدول ۱ اطلاعات منحنی نریز ماشین کاری توسط دستگاه هگزاپاد

شماره نقطه	X	Y	Z	وزن
۱	-۱۴۰	۰	۷۰۰	۱
۲	-۹۰	۰	۷۰۹	۱
۳	-۱۰	۰	۷۱۵	۱
۴	۴۰	۰	۷۱۰	۰/۹
۵	۱۰۰	۰	۷۰۳	۱/۱
۶	۱۷۰	۰	۷۰۲	۱



شکل ۴ شبیه‌سازی منحنی در محیط نرم‌افزار راینو با نقاط کنترلی آن



شکل ۵ محدوده ماشین کاری شده منحنی در نرم‌افزار کتیا

1. Rhino  
2. Catia

3. Python

## ۵- نتایج و تحلیل آن

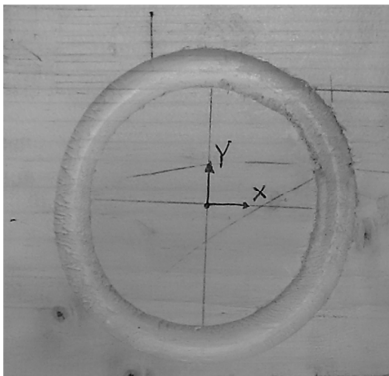
در اولین قدم توسط دستگاه یک دایره با مختصات مرکز  $(X=-15, Y=20)$  و با شعاع ۴۰ میلی‌متر ماشین کاری گردید که در شکل ۸ و ۹ تصاویر آن آمده است. با توجه به آزمایشگاهی بودن دستگاه اما نتایج خوبی حاصل گردید. قطر دایره در راستای محور Y دستگاه حدود  $85/055$  میلی‌متر اندازه‌گیری شد که میزان خطای دستگاه در این راستا حدود  $6/32\%$  و همچنین در راستای X قطر دایره  $80/94$  میلی‌متر اندازه‌گیری شد و در نتیجه میزان خطای آن حدود  $1/2\%$  برآورد گردید. لازم به ذکر است که این دایره دو بار ماشین کاری شد و در هر دو بار نتایج بسیار نزدیک به هم بودند. لذا می‌توان این نتیجه را دریافت که این خطا تکرارپذیر است و با کالیبراسیون قابل رفع است. با به عبارتی با تغییرات در برنامه نوشته شده برای میان‌یابی دایره می‌توان این خطا را کاهش داد. در ضمن تکرارپذیری دستگاه نیز مورد بررسی قرار گرفت. بدین صورت که در هر دو دفعه دایره بزرگتر از اندازه واقعی و با خطاهایی تقریباً یکسان ارزیابی شد که حاکی از تکرارپذیری قابل دستگاه می‌باشد.

در قدم بعدی منحنی نریز توضیح داده شده در جدول ۱ و شکل‌های ۴ و ۵ ماشین کاری گردید. این منحنی توسط دو روش ماشین کاری شد. روش اول با استفاده از نقاط کنترل منحنی که توسط برنامه مربوط به آن (شکل ۶) اطلاعات لازم برای دستگاه استخراج گردید، ماشین کاری صورت پذیرفت. در روش بعدی این منحنی به تکه‌های کوچکی تقسیم شد و اطلاعات هر منحنی در نرم‌افزار کتیا مطابق شکل ۱۰ استخراج گردید و با استفاده از G01 ماشین کاری انجام شد. در این حالت منحنی به ۶۶ تکه خط تقسیم شد و هر قسمت نقطه شروع و پایان و زاویه منحنی با خط راست ذخیره شد و در نهایت مجموع این خطوط وارد دستگاه شد و ماشین کاری صورت پذیرفت. در حالت اول زمان ماشین کاری قسمت مشخص شده در شکل ۵ با سرعت پیشروی ۵ میلی‌متر بر ثانیه حدود ۴۰ ثانیه به طول انجامید. در حالی که در روش دوم ماشین کاری همین قسمت از منحنی حدود ۱۱۵ ثانیه به طول انجامید. در شکل ۱۱ قطعه ماشین کاری شده توسط این دو روش را مشاهده می‌نمایید. در روش سنتی دستگاه هر تکه خط را با یک شتاب افزایشی شروع به پیمایش می‌کند و پس از رسیدن به اواسط پاره‌خط شروع به کاهش سرعت می‌کند و لذا همین امر باعث افزایش چشم‌گیر زمان ماشین کاری در این حالت نسبت به حالت ماشین کاری با نقاط کنترلی نریز شد. مشکل دیگر این روش این است که چون میان‌یابی هر تکه خط با مقداری خطا همراه است با افزایش این تکه خطاها میزان خطای دستگاه به صورت تجمعی افزایش می‌یابد. این خطا حتی به صورت چشمی قابل مشاهده است. نقطه پایانی هر دو روش یکی است اما به دلیل خطای تجمعی روش سنتی، مکان واقعی آن در نقطه‌ای دیگر قرار دارد. با وجود زمان بیشتر ماشین کاری در روش سنتی اما در پایان مشاهده شد که کیفیت سطح هر دو روش تقریباً یکی می‌باشد. زبری سطح هر دو منحنی حدود  $(Ra=3/4\mu)$  به دست آمد. لازم به ذکر است که از دستگاه زبری سنج پرتابل ماهر برای اندازه‌گیری زبری استفاده شده است.

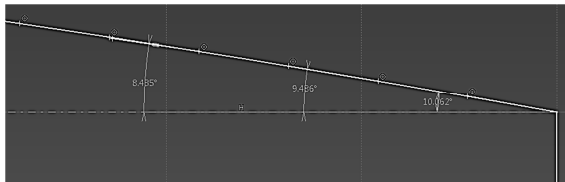
در قدم بعدی قطعه‌کار زیر دستگاه اندازه‌گیری مختصات قرار گرفت و ابر نقاط مربوط به هر منحنی استخراج گردید. از این ابر نقاط یک منحنی عبور داده شد و دقت منحنی ماشین کاری شده مطابق شکل ۱۱ و ۱۲ مورد بررسی قرار گرفت. همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌گردد منحنی ماشین کاری شده توسط روش سنتی بین دو منحنی اصلی قرار گرفته است. فاصله این دو



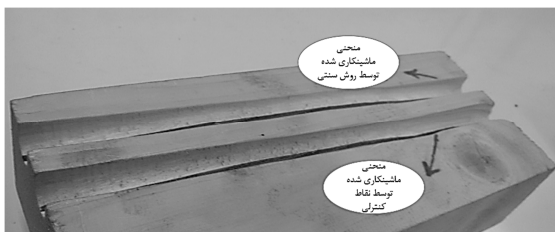
شکل ۸ دستگاه در حین ماشین کاری دایره



شکل ۹ دایره ماشین کاری شده توسط دستگاه هگزاپاد



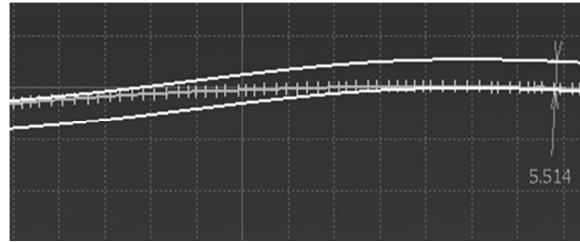
شکل ۱۰ منحنی نریز و تقسیم آن به تکه‌های کوچک



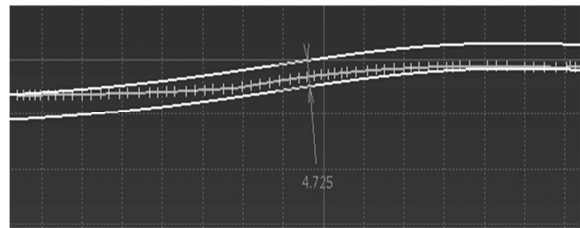
شکل ۱۱ منحنی ماشین کاری شده توسط دو روش نریز و سنتی

منحنی  $5/514$  میلی‌متر محاسبه شده است. در شکل ۱۲ نیز منحنی ماشین کاری شده توسط نقاط کنترلی نریز آمده است. در این حالت فاصله بین دو منحنی اصلی  $4/725$  میلی‌متر گزارش شده است که با توجه به آزمایشگاهی بودن دستگاه این مقادیر قابل قبول می‌باشند. لازم به ذکر است که طول منحنی ماشین کاری شده حدود ۲۰۰ میلی‌متر می‌باشد. در نتیجه دقت تolerانس هندسی ماشین کاری با استفاده از نقاط کنترلی منحنی نریز بهتر از روش سنتی می‌باشد. همچنین در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ منحنی هاشوردار منحنی ماشین کاری شده می‌باشد که بین دو منحنی اصلی قرار گرفته است. در آخرین مرحله این منحنی بر روی یک نمونه آلومینیومی ماشین کاری شد که در شکل ۱۳ آورده شده است. صافی سطح این قطعه کار توسط دستگاه زبری‌سنج ماهر مورد بررسی قرار گرفت و زبری سطح آن  $2/25$  گزارش گردید.

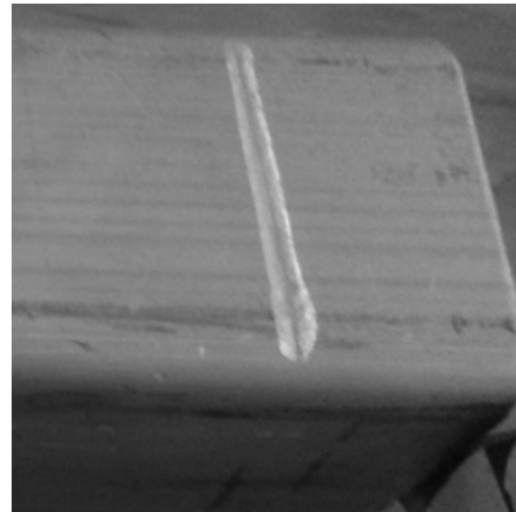
- زمان ماشین کاری منحنی پیچیده در روش سنتی سه برابر روش منحنی نریز با استفاده از نقاط کنترلی می‌باشد.
- دقت ماشین کاری در روش سنتی پایین‌تر از روش نقاط کنترلی منحنی نریز است.
- در روش ماشین کاری منحنی‌های پیچیده با استفاده از نقاط کنترلی منحنی نریز، به وضوح تاثیر چالاکتی دستگاه همراه با کاهش زمان ماشین کاری و همچنین افزایش دقت سطح نهایی قابل مشاهده است.



شکل ۱۱ ابر نقاط و منحنی ماشین کاری توسط روش سنتی



شکل ۱۲ ابر نقاط و منحنی ماشین کاری توسط نقاط نریز



شکل ۱۳ نمونه منحنی ماشین کاری شده بر روی آلومینیوم

## ۷- مراجع

- [1] D. Zhang, *Parallel Robotic Machine Tools*, Oshawa, ON, Springer, 2010.
- [2] Chen ZC, Dong Z, Vickers GW. Automated surface subdivision and tool path generation for 3 ½ ½ axis CNC machining of sculptured parts. *Computers in Industry* 2003; 50:319\_31
- [3] Gray PJ, Ismail F, Bedi S. Arc-intersect method for 3 ½ ½ axis tool paths on a 5 axis machine. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 2007; 47(1):182\_90.
- [4] E.L.J. Bohez. Five-axis milling machine tool kinematic chain design and analysis. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 42, pp. 505-520, 2002
- [5] Myriam Terrier, Arnaud Dugas, Jean-Yves Hascoët. Qualification of parallel kinematics machines in high-speed milling on free form surfaces. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. Vol 44, Issues 7-8, Pages 865-877, 2004.
- [6] Falco, Joseph A. Simulation tools for collaborative exploration of hexapod machine capabilities and applications. *Proc. of the 1997 International Simulation Conference and Technology Showcase*. 1997
- [7] Ali Lasemi, Deyi Xue., Peihua Gu. Recent development in CNC machining of freeform surfaces: A state-of-the-art review. *Computer-Aided Design*. Vol. 42, pp. 641\_654, 2010.

## ۶- نتیجه‌گیری

- در این پژوهش برای اولین بار از دستگاه هگزآپاد به عنوان میز ماشین‌ابزار استفاده گردید و توسط آن ماشین کاری انجام شد. برای ماشین کاری ابتدا خطوط ساده و بعد از آن دایره و در نهایت هم منحنی نریز بر روی چوب ماشین کاری شدند. منحنی نریز ابتدا با استفاده از روش سنتی یا همان G01 ماشین کاری شدند. سپس بعد از استخراج اطلاعات منحنی با استفاده از نقاط کنترلی و بردار وزن ماشین کاری صورت پذیرفت. در نهایت هم این منحنی بر روی آلومینیوم ماشین کاری شد. نتایج حاصل به شرح زیر می‌باشند:
- دستگاه هگزآپاد موجود با وجود آزمایشگاهی بودن آن، از نتایج قابل قبولی برای ماشین کاری برخوردار است.
  - میزان خطای شعاعی ماشین کاری دایره در راستای Y بیشتر از راستای X است که این خطا به دلیل تکرار پذیری با کالیبراسیون قابل رفع است.
  - ماشین کاری منحنی‌های پیچیده با استفاده از نقاط کنترلی منحنی نریز بسیار ساده‌تر از روش سنتی می‌باشد.