



## ارتقاء سیستم سی‌ان‌سی ماشین‌های ابزار هگزپاد با افزودن سیکل سوراخ‌کاری پنج‌محوره

حسین شاه‌محمدی درمنی<sup>۱</sup>، محمدجواد ناطق<sup>۲\*</sup>، محمد مهدی عاقلی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک- ساخت و تولید، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک- ساخت و تولید، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۳- استادیار، مهندسی مکانیک- ساخت و تولید، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

\* تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۴۱۱۵، nategh@modares.ac.ir

### چکیده

استفاده از دستگاه هگزپاد به عنوان ماشین‌های ابزار سی‌ان‌سی به دلیل مزایای آن از جمله سفتی و دقت بالا رو به گسترش است. از این‌رو تحقیق حاضر درصدد اضافه کردن یکی از جی‌کدهای ماشین‌کاری مرسوم یعنی سیکل سوراخ‌کاری به سیستم سی‌ان‌سی هگزپاد است. کد ذکر شده شامل هر سه بخش اصلی یک برنامه سی‌ان‌سی یعنی واحد مترجم، واحد میان‌یاب و واحد سینماتیک بوده و اطلاعات موقعیت و جهت مطلوب ابتدا از جی‌کد نوشته شده توسط کاربر به وسیله واحد مترجم استخراج شده و سپس جهت دستیابی به طول پایه و سرعت تغییر طول پایه مطلوب به واحد میان‌یاب و سینماتیک معکوس آن ارسال می‌شود. مکانیزم هگزپاد مورد مطالعه از نوع ابزار ثابت- قطعه‌کار متحرک می‌باشد. همانند تمام دستگاه‌های استاندارد ابزار متحرک که دوران ابزار حول مرکز دوران موجب اختلاف موقعیت نوک ابزار می‌شود، در این نوع خاص از هگزپاد نیز دوران میز X و Y هر کدام به نوعی موجب تغییر موقعیت ابزار نسبت به میز متحرک می‌شوند ولی شیوه اصلاح این اختلاف موقعیت در مکانیزم هگزپاد ابزار ثابت با دستگاه‌های استاندارد متفاوت است. در کد سیکل سوراخ‌کاری برای اصلاح اختلاف موقعیت به وجود آمده که حاصل دوران میز است از روش ماتریس‌های انتقال همگن استفاده شده است. در واحد میان‌یاب برنامه نوشته شده در هر گام مقدار تغییر موقعیت در راستای محور X ناشی از دوران حول محور Y، تغییر موقعیت در راستای محور Y ناشی از دوران حول محور X و تغییر موقعیت در راستای محور Z ناشی از دوران حول هر دو محور X و Y محاسبه شده و اصلاح موقعیت انجام می‌گیرد. لزوم استفاده از الگوریتم ارائه شده این است که بتوان از جی‌کدهای استاندارد ماشین‌کاری خروجی گرفته شده از برنامه‌های رایج ماشین‌کاری که مشخص‌کننده موقعیت و جهت نوک ابزار است در مکانیزم ابزار ثابت به طور مستقیم استفاده کرد. به منظور صحت سنجی روش ارائه شده دو سوراخ یکی با استفاده از الگوریتم ارائه شده و دیگری بدون آن ماشین‌کاری گردید و با هم مقایسه شد. نتایج مقایسه صحت الگوریتم ارائه شده را تایید کرده و نشان می‌دهد سوراخ اول در مکان درست ماشین‌کاری شده است.

کلید واژگان: هگزپاد، کنترل عددی، سی‌ان‌سی، ماشین‌های ابزار، پنج‌محوره، سیکل سوراخ‌کاری

## Upgrading the CNC system of hexapod machine tool by adding the five axis drilling cycle

Hossein Shahmohammadi Dermani, Mohammad Javad Nategh\*, Mohammad Mahdi Agheli

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University (TMU), Tehran, Iran.

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

### ABSTRACT

Using hexapod as a CNC machine tool has been grown increasingly due to its advantages such as high stiffness and accuracy. This paper is seeking to add a CNC G-code to hexapod CNC system. The mentioned G-code is a five axes drilling cycle which contains all the main parts of a standard code such as: interpreter, interpolator and inverse kinematics unit. The interpreter unit extracts the position and orientation from the received code and sends it to the interpolation and kinematics units to correct the errors to achieve the desired six pods lengths. The studied hexapod is a "fixed tool-moveable workpiece" type machine tool. In this type and all other similar types of devices, the rotation of the cutting tool around the center of rotation causes a difference between the position of the tool tip and the workpiece; but the correcting procedure for this position difference is not similar to the other standard devices. In the present study, homogenous transformation matrix method has been used to correct the moving platform's position difference that is created as a result of the rotation of moving platform about X and Y axes. This method allows the operators to use the standard G-codes being imported from the CAM software that are commonly used by the part programmers. In order to verify the proposed method, a hole was machined by the proposed drilling cycle and compared with a hole that was not machined by this method. The results showed that the first hole was machined in its true place and thus confirmed the accuracy of the proposed method.

**Keywords:** CNC, Five Axis Drilling Cycle, Hexapod, Machine Tool.

خطاهای به‌وجود آمده را در نظر گرفت. در سال ۲۰۱۲ ساپورتا [۳] از دو سیستم هگزپاد جهت افزایش انعطاف‌پذیری مکانیزم پیشنهادی خود استفاده نمود. در سیستم پیشنهادی او یک ربات هگزپاد مخصوص حمل ابزار در بالا قرار گرفته و یک ربات هگزپاد دیگر وظیفه حمل قطعه‌کار را دارد که در این مکانیزم هم ابزار و هم قطعه‌کار متحرک می‌باشند. همچنین او یک سیستم کنترل CNC برای سیستم پیشنهادی خود طراحی نمود که ورودی آن جی‌کد

### ۱- مقدمه

در سال ۲۰۱۱ لارس اسکارت [۱] از سکوی استورات جهت ساخت یک مکانیزم نمونه‌سازی سریع استفاده نمود. همچنین سیستم کنترلی آن را نیز طراحی کرد. در سال ۲۰۱۲ چانگ [۲] یک سیستم سه‌محوره و پنج‌محوره CNC بر پایه سکوی استورات توسعه داد که قابلیت شبیه‌سازی عملیات ماشین‌کاری پیش از فرایند ماشین‌کاری را دارا بود. ولی او در طراحی خود

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایند:

Please cite this article using:

H. Shahmohammadi Dermani, M. J. Nategh, M. M. Agheli, Upgrading the CNC system of hexapod machine tool by adding the five axis drilling cycle, *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 485-489, 2015 (in Persian)

بود. در آزمایشگاه فناوری های پیشرفته در ماشین های ابزار دانشگاه تربیت مدرس نیز فعالیت هایی در این زمینه انجام شده است. در سال ۱۳۸۹ حمدی پور [۴] سیستم CNC مربوط به ربات هگزپاد با قابلیت میان یابی خطی را ارائه کرد. در سال ۱۳۹۱ چالاک [۵] الگوریتم مربوط به میان یابی دایروی سیستم CNC هگزپاد را ارائه کرد. در سال ۱۳۹۱ کریمی [۶] سیستم CNC ربات هگزپاد با قابلیت پیمایش منحنی و سطوح نرَبز را ارائه کرد. تحقیق حاضر در صدد اضافه کردن یکی از کدهای ماشین کاری مرسوم یعنی سیکل سوراخ کاری پنج محوره به سیستم CNC هگزپاد است. اضافه کردن این کد با در نظر گرفتن خصوصیات هگزپاد مورد مطالعه که از نوع ابزار ثابت و قطعه کار متحرک می باشد، بوده است.

### سیستم CNC

هر سیستم CNC از سه قسمت واحد مترجم، واحد میان یاب و واحد سینماتیک تشکیل شده است. واحد مترجم یا مفسر، اطلاعات موجود در هر بلوک برنامه شامل جی کد را به موقعیت ابزار و جهت ابزار تبدیل می نماید. سپس این اطلاعات جهت تصحیح به واحد میان یاب ارسال می شود. در واحد میان یاب اطلاعات ارسال شده از واحد مترجم اصلاح می شود. از جمله این اصلاحات انجام میان یابی خطی و یا اصلاح اختلاف موقعیت به وجود آمده بر اثر دوران می باشد که در ادامه توضیح داده خواهد. پس از اصلاح اطلاعات، موقعیت ها و جهت های جدید به دست آمده به واحد سینماتیک ارسال می شود که در دستگاه هگزپاد این اطلاعات در واحد سینماتیک به طول پایه متناظر با موقعیت و جهت مطلوب تبدیل می شوند.

### ۲- تئوری سیکل سوراخ کاری پنج محوره

بخش عمده ای از دستگاه های CNC ابزار قسمت متحرک دستگاه بوده و یا تعدادی از درجات آزادی مربوط به ابزار و تعدادی از آن ها مربوط به قطعه کار می باشد. بنابراین در غالب برنامه های استاندارد ماشین کاری و همچنین کدهای استاندارد ماشین کاری، عملیات ماشین کاری با فرض متحرک بودن ابزار انجام می شود. در صورتی که در هگزپاد مورد بررسی قرار گرفته تمام درجات آزادی مربوط به قطعه کار بوده و ابزار ثابت است. در نتیجه چنانچه بخواهیم با استفاده از جی کد خروجی گرفته شده از برنامه های استاندارد یا جی کد نوشته شده به زبان استاندارد که موقعیت نوک ابزار را مشخص می نماید برنامه ماشین کاری را انجام دهیم با خطا مواجه می شویم. برای درک بهتر مطلب فرض کنید ابزار در موقعیتی مانند شکل ۱ نسبت به میز قرار دارد. چنانچه میز دوران کند به دلیل آنکه این دوران حول مرکز میز صورت می پذیرد موقعیت ابزار نسبت به میز در راستای محورهای مختصات محلی واقع بر روی میز متحرک بالایی تغییر می کند. همان طور که در شکل ۲ مشاهده می شود بر اثر دوران میز حول محور Y، فاصله محل اثر ابزار تا مرکز، از ON1 به ON2 (در راستای محور X محلی) تغییر می کند، ضمن اینکه این دوران باعث اختلاف موقعیت در راستای Z به اندازه N1-N2 هم می شود. لازم به ذکر است که دوران حول محور X نیز موجب اختلاف موقعیت در راستای Y می شود. این اختلاف موقعیت به وجود آمده خاص مکانیزم هگزپاد نبوده و در سایر مکانیزم های سریال و موازی نیز این اختلاف موقعیت به دلیل آن که مرکز دوران با فاصله نسبت به مرکز ابزار قرار دارد، به وجود می آید؛ ولی شیوه اصلاح این اختلاف موقعیت در مکانیزم هگزپاد ابزار ثابت با مکانیزم های

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Ca & -Sa & 0 \\ 0 & Sa & Ca & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ Cb & 0 & Sb & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -Sb & 0 & Cb & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ Cc & -Sc & 0 & 0 \\ Sc & Cc & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

انتقال در راستای محور X:

انتقال در راستای محور Y:

انتقال در راستای محور Z:

دوران حول X:

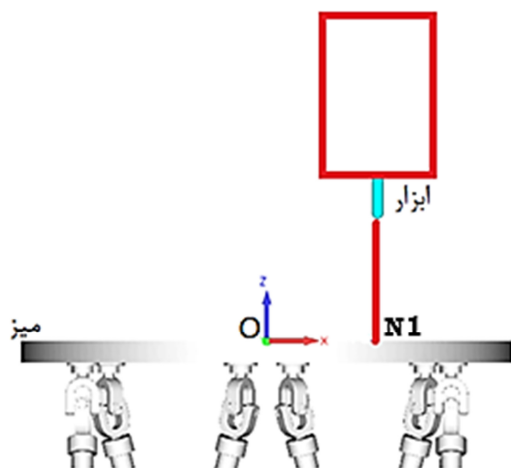
دوران حول Y:

دوران حول Z:

(۱)

که در آن  $a$ ،  $b$  و  $c$  نشان دهنده میزان اختلاف زاویه ای در انتقال از یک فریم به فریم دیگر به ترتیب حول محور  $x$ ،  $y$  و  $z$  می باشد. هم چنین  $x$ ،  $y$  و  $z$  نیز میزان جابجایی در راستای محورهای مختصات در انتقال از یک فریم به فریم دیگر را مشخص می کند.

بنابراین با توجه به رابطه (۱) و با در نظر گرفتن این که فاصله بین ابزار و مرکز میز پایینی همواره مقدار ثابتی است و هیچ دورانی حول محور  $X$ ،  $Y$  یا  $Z$



شکل ۱ موقعیت ابزار نسبت به میز قبل از دوران میز

منطبق است. در نتیجه برای ماشین‌کاری سوراخ حرکت ابتدایی در راستای  $X$ ،  $Y$  و  $Z$  باید هم اندازه ستون آخر ماتریس  $T_3^0$  و در جهت مخالف آن باشد تا اختلاف موقعیت ناشی از دوران اصلاح شود. شکل ۳ محل قرارگیری فریم‌ها طبق توضیحات گفته شده را نمایش می‌دهد.

### ۳- ضرورت استفاده از سیکل سوراخ‌کاری به جای کد حرکت خطی (G01)

فرض کنید قرار است بر روی قطعه‌ای با کدهای حرکت خطی و بدون استفاده از سیکل، سوراخ‌کاری در موقعیت  $X=20$ ،  $Y=20$  و با زاویه  $10^\circ$  درجه حول  $Y$  و  $10^\circ$  درجه حول  $X$  به عمق  $10$  انجام دهیم. بنابراین کد وارد شده به صورت زیر خواهد بود:

G00 X20 Y20 Z100 A10 B10;

G01 Z-10;

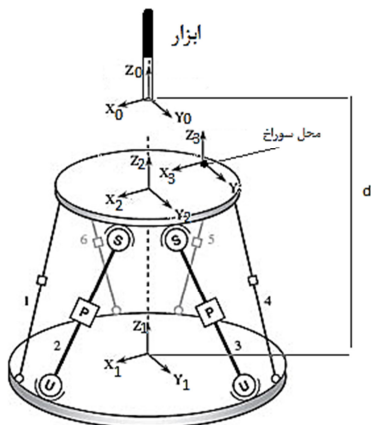
نتیجه کار سوراخی با زاویه  $10^\circ$  درجه حول  $X$  و  $Y$  ولی با موقعیتی متفاوت از موقعیت مورد انتظار خواهد بود. این مشکل به دلیل اختلاف موقعیت ناشی از دوران است که در بخش‌های پیشین به آن اشاره شد. ولی چنانچه از کد مربوط به سیکل سوراخ‌کاری استفاده شود سوراخ در موقعیت مطلوب با جهت مطلوب ماشین‌کاری خواهد شد. یعنی تنها کافی است کد زیر وارد شود:

G183 X20 Y20 Z100 A10 B10 H-10 q4;

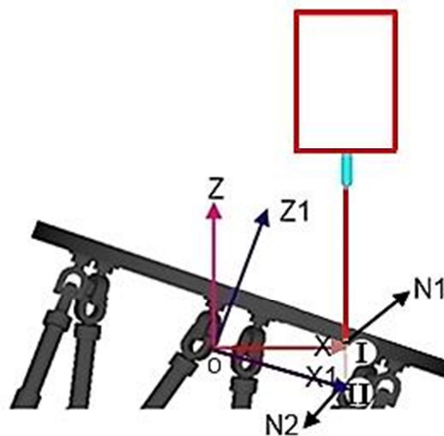
تا عملیات سوراخ‌کاری انجام شود. در این کد  $X, Y, Z$  موقعیت نقطه ای که می‌خواهیم سوراخ ماشین‌کاری شود را مشخص می‌کند.  $A, B$  زاویه سوراخ با محور  $X$  و  $Y$  را نشان داده و  $H$  عمق سوراخ و  $q$  مشخص‌کننده تعداد مراحل برای ماشین‌کاری سوراخ تا رسیدن به عمق نهایی می‌باشد. سیکل سوراخ‌کاری امکان سوراخ‌کاری عمیق چند مرحله‌ای را تنها با یک خط کدنویسی می‌دهد که چنانچه بخواهیم همان سوراخ را در چند مرحله با دستورات حرکت خطی ماشین‌کاری کنیم خطوط زیادی می‌بایست برنامه‌نویسی شود.

### ۴- جزئیات مربوط به سیکل سوراخ‌کاری پنج‌محوره

در سیکل سوراخ‌کاری تعریفی باید در نظر گرفت که چنانچه قرار است ابزار با زاویه  $D$  درجه نسبت به قطعه‌کار قرار گرفته و عمل سوراخ‌کاری را انجام دهد میز می‌بایست با زاویه  $+D$  درجه دوران کند. این اتفاق به دلیل ساختار دستگاه (یعنی ابزار ثابت و میز متحرک) به وجود می‌آید. این مطلب در شکل ۴ نمایش داده شده است.



شکل ۳ محل قرارگیری فریم‌های مربوط به جبران اختلاف موقعیت ناشی از دوران



شکل ۲ موقعیت ابزار نسبت به میز بعد از دوران میز به اندازه  $D$  درجه

وجود ندارد، ماتریس انتقال از فریم صفر به یک به راحتی از رابطه (۲) قابل محاسبه خواهد بود:

$$T_1^0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X_1 \\ 0 & 1 & 0 & Y_1 \\ 0 & 0 & 1 & Z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

فریم دو را بر روی مرکز میز متحرک قرار می‌دهیم. بنابراین ماتریس انتقال از فریم یک به فریم دو همان ماتریس چرخش مربوط به سکوی استوارت که قبلاً [۷] محاسبه شده به اضافه یک ستون اضافه (ستون چهارم) مربوط به جابجایی می‌باشد و از رابطه (۳) به دست می‌آید:

$$T_2^1 = \begin{bmatrix} Cb Cc & -Cb Sc & Sb & 0 \\ Sa Sb Cc + Ca Sc & -Sa Sb Sc + Ca Cc & -Sa Cb & 0 \\ -Ca Sb Cc + Sa Sc & Ca Sb Sc + Sa Cc & Ca Cb & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X_2 \\ 0 & 1 & 0 & Y_2 \\ 0 & 0 & 1 & Z_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

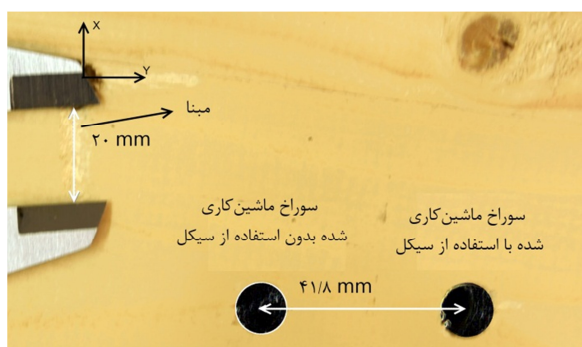
که در آن  $a, b, c$  نشان‌دهنده میزان اختلاف زاویه بین محورهای فریم یک و دو به ترتیب حول محور  $X, Y$  و  $Z$  می‌باشد. هم‌چنین  $X_2, Y_2$  و  $Z_2$  نیز میزان جابجایی در راستای محورهای مختصات از فریم یک به دو را مشخص می‌کند. فریم سه را بر روی محل سوراخ در نظر گرفته که ماتریس انتقال از فریم دو به سه با توجه به رابطه (۱) مطابق رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

$$T_3^2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X_3 \\ 0 & 1 & 0 & Y_3 \\ 0 & 0 & 1 & Z_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

در نهایت ماتریس انتقال کلی مربوط به فریم صفر تا سه از ضرب ماتریس‌های انتقال ذکر شده در روابط (۲)، (۳) و (۴) مطابق رابطه (۵) به دست می‌آید. در این ماتریس ستون یک تا سه نشان‌دهنده ماتریس دوران کلی بوده و ستون آخر بیان‌گر میزان اختلاف موقعیت کلی از فریم صفر به فریم سه می‌باشد.

$$T_3^0 = T_1^0 \quad (5)$$

برای ماشین‌کاری سوراخ ستون آخر ماتریس فوق می‌بایست برابر صفر باشد که این یعنی در ابتدا ابزار دقیقاً بر روی سطح کار و دقیقاً در محل سوراخ قرار داشته و کلیه اختلاف موقعیت‌های به وجود آمده بر اثر دوران نیز جبران شده است و فریم صفر (نوک ابزار) بر روی فریم سه (محل سوراخ)

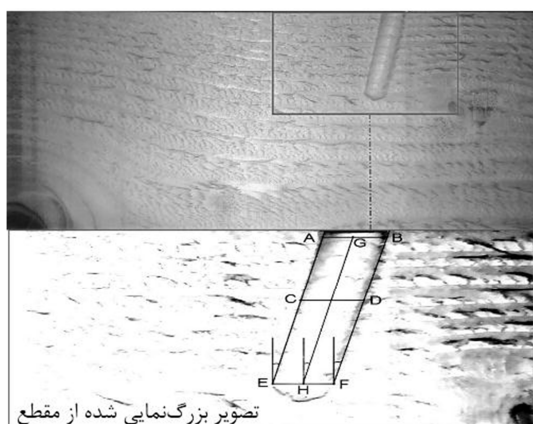


شکل ۵ تصویر تحلیل شده داخل نرم‌افزار ایمپج-جی

مقدار آن برابر  $41/8$  میلی‌متر می‌باشد و تقریباً با مقدار اندازه‌گیری شده توسط رابطه تحلیلی مربوط به اختلاف موقعیت در راستای  $Y$  یعنی  $42/132$  که در جدول ۱ آمده مطابقت دارد. اختلاف جزئی بین عدد محاسبه شده توسط رابطه تحلیلی و عدد اندازه‌گیری شده توسط نرم‌افزار به دلیل وجود خطای اندازه‌گیری و خطای سخت‌افزاری دستگاه می‌باشد.

یکی دیگر از مواردی که باید به آن توجه کرد مستقیم بودن محور سوراخ و برابر بودن قطر سوراخ در تمام طول آن است. برای این منظور سوراخی ماشین‌کاری شده با سیکل که در آن دوران تنها در یک راستا است (برای سادگی اندازه‌گیری و برش قطعه) انتخاب شد. این سوراخ در موقعیت  $X = -50$  mm،  $Y = 0$ ، به عمق  $60$  میلی‌متر و با زاویه دوران  $6$  درجه حول محور  $X$  ماشین‌کاری شده است. قطعه‌کار ماشین‌کاری شده در راستای محور آن مطابق شکل ۶ برش عمودی داده شد.

سیس از سطح برش داده شده در حالتی کاملاً تراز تصویری تهیه و داخل نرم‌افزار ایمپج-جی مورد تحلیل قرار گرفت. برای این منظور ابتدا به کمک فیلترهای تصویری مناسب لبه‌های جانبی سوراخ استخراج شده و سپس خطوطی از این لبه‌ها گذرانده شد که همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود این خطوط با نام‌های  $AE$  و  $BF$  نام‌گذاری شده است. سپس خطوط افقی  $AB$  در قسمت بالایی سوراخ  $CD$  در قسمت تقریباً میانی و  $EF$  در قسمت تقریباً انتهایی سوراخ و بین دو خط جانبی رسم شد. ضمناً از مرکز خط  $AB$  به مرکز خط  $EF$  نیز خطی رسم شد. اندازه‌گیری انجام شده در داخل نرم‌افزار ایمپج-جی برابر بودن سه زاویه  $E$ ،  $H$  و  $F$  را نشان داد (هر سه زاویه مقداری



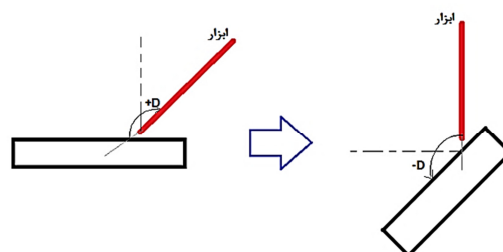
شکل ۶ تصویر برش عمودی سوراخ، تحلیل شده داخل نرم‌افزار ایمپج-جی به منظور اثبات مستقیم بودن محور سوراخ

نکته دیگری که باید به آن توجه داشت تفاوت دستگاه‌های مختصات ابزار و میز است. چنان‌چه بخواهیم ابزار فرضاً  $20$  میلی‌متر در جهت  $X$  حرکت کند میز باید  $20$  میلی‌متر در جهت منفی  $X$  حرکت کند. این نکته در مورد دیگر محورهای مختصات نیز صدق می‌کند و باید توجه داشت که اندام انتهایی<sup>۱</sup> در دستگاه هنگزپاد مرکز میز است ولی برای ماشین‌کاری نیاز است که اندام انتهایی را ابزار در نظر بگیریم.

## ۵- آزمایش عملی

جهت صحت سنجی الگوریتم ارائه شده آزمایش عملی انجام شد. برای این منظور یک سوراخ بدون استفاده از روش اصلاح موقعیت و با روش کدنویسی خطی مطابق بخش ۳- در موقعیت  $X=35$  و  $Y=60$ ، با زاویه  $4$  درجه حول محور  $X$  و به عمق  $40$  میلی‌متر ماشین‌کاری شد. سپس همان سوراخ در همان موقعیت و با استفاده از الگوریتم سیکل سوراخ‌کاری پنج‌محوره ماشین‌کاری شد. همان‌طور که انتظار می‌رفت مطابق مطالب گفته شده در بخش ۲- و ۳- سوراخ ماشین‌کاری شده بدون استفاده از الگوریتم با توجه به دوران میز فقط حول محور  $X$  می‌بایست فقط در راستای محور  $Y$  با محل مناسب اختلاف موقعیت داشته باشد. بنابراین برای تأیید این موضوع در مرحله بعد تصویر قطعه‌کار ماشین‌کاری شده برای اندازه‌گیری داخل نرم‌افزار ایمپج-جی<sup>۲</sup> مورد تحلیل قرار گرفت. به‌منظور معرفی اندازه مینا جهت اندازه‌گیری، دهانه کولیس به عنوان مقیاس می‌باشد که مقدار این اندازه مینا  $20$  میلی‌متر است. شکل ۵ نشان‌دهنده تصویر تحلیل شده در نرم‌افزار ایمپج-جی می‌باشد.

چنان‌چه اعداد مختصات و زاویه ماشین‌کاری مربوط به مثال تحلیل شده در نرم‌افزار ایمپج-جی که در بالا به آن اشاره شد را در رابطه (۵) (ماتریس انتقال کلی) قرار دهیم اعداد ستون آخر ماتریس حاصل از این رابطه که نشان‌دهنده میزان اختلاف موقعیت ناشی از دوران بر حسب میلی‌متر هستند به صورت جدول ۱ بدست می‌آید که نشان‌دهنده میزان اختلاف موقعیت ابزار با محل سوراخ در صورت عدم استفاده از الگوریتم سیکل سوراخ‌کاری است. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود میزان اختلاف موقعیت با توجه به این‌که دوران فقط حول محور  $X$  است، تنها در راستای محور  $Y$  بوده که



شکل ۴ تفاوت دوران میز و ابزار

جدول ۱ اختلاف موقعیت بین سوراخ ماشین‌کاری شده با جی‌کد معمولی و سیکل

سوراخ‌کاری محاسبه شده توسط رابطه (۵) بر حسب میلی‌متر	
محور مختصات	مقدار
محور $X$	۰
محور $Y$	$42/132$
محور $Z$	$21/47$

1. End-effector  
2. Imagej

برابر ۱۲ درجه داشتند) که این مطلب نشان‌دهنده مستقیم بودن محور سوراخ می‌باشد. همچنین اندازه‌گیری طول خطوط AB، CD و EF انجام شد که نتایج آن برابر بودن اندازه این خطوط را نشان داده و اثبات‌کننده برابر بودن قطر سوراخ در تمام طول آن است.

#### ۶- نتیجه‌گیری

استفاده از کدهای استاندارد ماشین‌کاری در دستگاه‌های ابزار ثابت-قطعه‌کار متحرک به طور مستقیم و بدون در نظر گرفتن خصوصیات این نوع مکانیزم‌ها موجب بروز اختلاف موقعیت ناشی از دوران میز حول محور X و Y حین ماشین‌کاری می‌شود. دوران حول محور X موجب اختلاف موقعیت در راستای محور Y و دوران حول Y موجب اختلاف موقعیت در راستای محور X می‌شود. ضمن این‌که هر دو دوران موجب اختلاف موقعیت در راستای Z هم می‌شوند. برای استفاده مستقیم از کدهای استاندارد در ماشین‌کاری با این نوع مکانیزم‌ها و به‌منظور اندازه‌گیری و اصلاح اختلاف موقعیت پدید آمده، از ماتریس‌های انتقال همگن استفاده شد. در هر مرحله ستون آخر ماتریس انتقال کلی که نشان‌دهنده اختلاف موقعیت بین ابزار و محل سوراخ بعد از دوران میز می‌باشد محاسبه شده و این اختلاف موقعیت جبران می‌شود. به منظور صحت‌سنجی الگوریتم ارائه شده یک سوراخ با استفاده از روش اصلاح موقعیت و یکی بدون استفاده از این روش ماشین‌کاری شد و اختلاف موقعیت بین این دو سوراخ در نرم‌افزار ایمیج-جی اندازه‌گیری شده و با اعداد ستون آخر ماتریس شرح داده شده مقایسه شد. نتایج آزمایش صحت روش گفته شده را نشان می‌دهد. همچنین زاویه سوراخ مورد نظر نیز با نرم‌افزار ذکر شده اندازه‌گیری شد که نتایج آزمایش صحت روش ارائه شده را نشان می‌دهد.

#### ۷- مراجع

- [1] L. Skaret, *A stewart platform based replicating rapid prototyping system with biologically inspired path-optimization*, Thesis, UNIVERSITY OF OSLO, 2011.
- [2] N. C. CHUNG, *3-Axis and 5-Axis Machining with Stewart Platform*, Ph.D Thesis, MECHANICAL ENGINEERING, NATIONAL UNIVERSITY OF SINGAPORE, 2012.
- [3] V. B. SAPUTRA, *Development of Two Cooperative Stewart Platforms for Machining*, Ph.D Thesis, MECHANICAL ENGINEERING NATIONAL UNIVERSITY OF SINGAPORE 2012.
- [4] V. Hamdipoor, *Toolpath generation for hexapod machine tools*, M.S. Thesis, Mechanical Engineering, Tarbiat Modares, 2010. (In Persian)
- [5] M. R. C. Ghazani, *Improvement of path interpolation and production for the machine tool Hexapod*, Master of Science Thesis, Mechanical Engineering, Tarbiat modares, 2012. (In Persian)
- [6] D. Karimi, *Development of Algorithms for Interpolation of Free-Form Toolpaths and Singularity Avoidance employed in the Control of Hexapod Machine Tools*, Ph.D Thesis, Mechanical Engineering, Tarbiat Modares, 2012. (In Persian)
- [7] D. Karimi, *Design, Manufacturing and Programming of Hexapod Machine Tool Table*. M.S. Thesis, Mechanical Engineering Department, Tarbiat Modares University, 2006. (In Persian)