

# تأثیر انبساط طولی Ball Screw در محورهای خطی، بر حرکت محورهای چرخشی و درستی هندسی قطعه کار در ماشینهای فرز CNC پنج محور با کله گی چرخشی و آپشن RTCP فعال

امیر علی نقی زاده<sup>۱\*</sup>، میثم خاکی<sup>۲</sup>

۱- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

۲- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک- ساخت و تولید، وزارت آموزش و پرورش، تهران

\*سمنان، صندوق پستی: ۳۵۱۴۵-۱۷۹ (Amira\_11425@yahoo.com)(Alinaghizadeh\_11425@yahoo.com)

## چکیده

در هنگام ماشینکاری بخشی از حرارت ایجاد شده بر اثر عمل کنش لبه های برنده ابزار نسبت به قطعه کار که به ماشین منتقل می شود و علاوه بر آن، اصطکاک ایجاد شده در حرکت مداوم Ball Screw ها در داخل Nut (مهله حمل کننده محورهای خطی)، که بر اثر جابجا شدن محورهای ماشین بوجود می آید، باعث انبساط ابعادی Ball Screw خواهد شد. به دلیل طولیل بودن و نسبت طول به قطر زیاد، انبساط ایجاد شده در راستای طول Ball Screw حایز اهمیت خواهد بود. زیرا در پی هر حرکت اعمال شده در برنامه NC، با توجه به اختلاف اندازه میان خط قبلی برنامه تا خط کنونی، علاوه بر جابجایی اصلی یک جابجایی اضافی نیز به خاطر انبساط Ball Screw، انجام می پذیرد. در ماشینهای CNC پنج محور، علاوه بر تأثیر مستقیم انبساط طولی Ball Screw محورهای خطی بر درستی هندسی قطعه کار، تأثیر غیر مستقیمی نیز وجود دارد که با توجه به آپشن RTCP (Rotation Tool Center Point: چرخش ابزار حول نقطه مرکزی اش)، برای جابجایی محورهای چرخشی نمایان می گردد. در RTCP فعال، مرکز ابزار در فضا ثابت و بجای آن، مرکز محورهای چرخشی متحرک می باشند. در این حالت برای جبران جابجایی های ابزار، در اثر حرکت محورهای چرخشی، محورهای خطی جابجا خواهند شد. در این مقاله تأثیر مستقیم و غیر مستقیم انبساط طولی Ball Screw ها بر روی درستی هندسی قطعه کار با استفاده از روابط تحلیلی-ریاضی مورد بررسی قرار گرفته واز نتایج آن می توان برای کنترل تطبیقی با موضوعیت عنوان مقاله در ماشینهای CNC پنج محور بهره برد.

## کلیدواژگان

ماشینهای فرز CNC پنج محور، RTCP، درستی هندسی، انبساط طولی، Ball Screw

## Effect of Ball Screw linear expansion of linear axes on the movement of rotary axes and workpiece geometric accuracy in five-axis CNC milling machine with rotational head and RTCP active option

Amir Alinaghizadeh<sup>1\*</sup>, Meysam Khaki<sup>2</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran

2- Master Science of Mechanical Engineering-Manufacturing, Ministry of Education, Tehran, Iran

\*P.O.B. 35145-179 Semnan, Iran, email address: Amira\_11425@yahoo.com(Alinaghizadeh\_11425@yahoo.com)

## Abstract

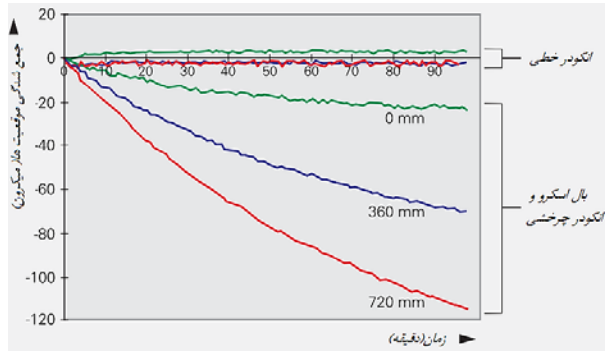
During machining a portion of the heat generated by operation activities edges of cutting tool relative to the workpiece is transferred to machine tool, and in addition, the friction generated in continuous motion of Ball Screw and the Nut (nut carrier linear axes) that Due to shift of axis machine is created, causing the expansion of the Ball Screw size will be. Because of the length of the high ratio of length to diameter, expansion of the length of Ball Screw to be important. Because after every movement applied to in the NC, according to the size difference between the previous program and the current line, in addition to the original displacement, had done an additional displacement due to the expansion of the Ball Screw. Machines CNC five-axis, in addition to the direct impact of linear expansion length of Ball Screw linear axes for the accuracy of the workpiece geometry, the indirect effect are also considering option RTCP (Rotation Tool Center Point: Rotate cutting tool around a central point of her), to move the axis rotary is shown. The RTCP active, the center of cutting tool is fixed in space instead of, the center of the rotary axes are moving. In this case, to compensate for displacement of cutting tool, In effect movement the rotary axes, linear axes will be moved. In this paper, directly or indirectly effect of Ball Screw linear expansion on the workpiece geometric accuracy studied using analytical-mathematical And the results can be compared with the adaptive control as five-axis CNC machines used in the paper.

## Keywords

Five-axis CNC milling machines, RTCP, geometric accuracy, linear expansion, Ball Screw

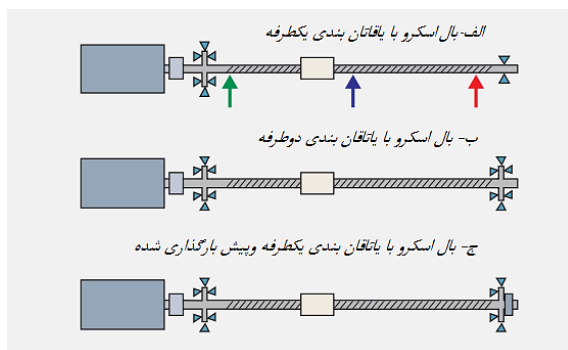
ماشین ابزارهای تولید شده در سالهای اخیر، قدرت و راندمان بالایی را به نمایش گذاشته اند. همچنین افزایش نرخ پیشروی و شتاب، باعث

۱- مقدمه



شکل ۱ مقایسه میان نقاط مختلف یک بال اسکرو در حین انبساط حرارتی [۷]

نکته حایز اهمیت دیگر مدل گیره بندی و یاتاقان بندی بال اسکرو است که بر اساس آن رفتارهای مختلفی در هنگام انبساط حرارتی از آن به چشم می خورد. شکل ۲ سه نمونه متعارف از روشهای نصب و یاتاقان بندی بال اسکرو ها را نشان می دهد. قسمت (الف) مربوط به بال اسکرویی است که یک سر آن یاتاقان بندی شده و سر دیگر آن آزاد می باشد. قابل پیشبینی ترین رفتار بر اثر انبساط حرارتی در این مورد از بال اسکرو ها به چشم می خورد. در قسمت (ب) یک بال اسکرو که در هر دو سر دارای یاتاقان بندی ثابت است ملاحظه می گردد. وجود دو یاتاقان ثابت و دارا بودن وضعیت دوسر گیر دار باعث می گردد تا تاثیر انبساط حرارتی بال اسکرو به صورت یک انحناء در طول آن رخ بنماید و مقدار خطای موقعیت در این نوع سیستم بستگی به موقعیت مکان مورد نظر در طول بال اسکرو و ارتباط آن با تابع انحناء ایجاد شده دارد. در قسمت (ج) نیز یک بال اسکرو دارای یک سر ثابت (یاتاقان بندی شده) و یک سر دارای پیش بار اعمال شده نشان داده شده است که در آن رفتار بال اسکرو بعد از انبساط حرارتی رابطه مستقیم با میزان پیش بار اعمالی دارد. در متن حاضر نوع نصب و یاتاقان بندی بال اسکرو برای ماشین فرز CNC پنج محور مشابه قسمت (الف) از شکل ۲ در نظر گرفته شده است.



شکل ۲ انواع روشهای نصب و یاتاقان بندی بال اسکروها [۷]

در هنگام ماشینکاری حرارت ایجاد شده که نتیجه عمل کنش لبه های برنده ابزار نسبت به قطعه کار است اثراتی منفی بر ماهیت براده

کاهش زمان ماشینکاری شده است. در اکثر اوقات افزایش دقت سبب ایجاد تolerانس های بسته تر می شود. از طرفی این پیشرفت ها، قابلیت ماشینکاری قطعات پیچیده و بحرانی را نیز افزایش میدهد و از طرف دیگر تولید مجموعه های مونتاژی پیچیده رانیز ساده می سازد.

در مجموع خطاهای موجود در ماشینهای ابزار، مقدار خطای موقعیتی محورهای در حال حرکت، نقشی مهم و حیاتی را ایفا می کند. ابتدایی ترین مشکل موجود در اندازه گیری موقعیت در استفاده از انکودرهای چرخشی ویا اسکرو، انبساط حرارتی بال اسکروست. وقتی از یک انکودر خطی برای اندازه گیری موقعیت استفاده می شود، انبساط حرارتی بال اسکرو تاثیر چندانی ندارد و خطای راندگی (جمع شوندگی) موقعیت ناچیز است. به نسبت نیازی که در ماشین ابزار برای دسترسی به دقت و صحت لمس می شود، نقش انکودرهای خطی نیز برای اندازه گیری موقعیت به صورت فزاینده ای رشد می کند. [۷]

گرچه طرحهای ماشین های ابزار بسیار متنوع بوده و با پیکربندی های مختلفی ساخته می شوند ولی به عنوان یکی از روشهای پرکاربرد امروزه از ترکیب انکودر چرخشی به همراه بال اسکرو دوار، بسیار بهره گرفته می شود. در این نوع از ماشینهای کنترل عددی تاثیرات بیشتری بر اساس مقدار انبساط حرارتی بال اسکرو ها متوجه موقعیت می شود.

شکل ۱ مقایسه ای میان سه نقطه مختلف که دارای فاصله کم، متوسط و زیاد نسبت به مکان یاتاقان بندی یک بال اسکرو است را نمایش می دهد. مقدار خطای جمع شدگی موقعیت که بر اثر انبساط حرارتی در طول بال اسکرو برای این سه نقطه رخ می دهد در این شکل برای دو حالت نمایش داده شده. حالت ابتدایی مربوط به وضعیتی است که ماشین دارای انکودر خطی است و حالت دوم مربوط به وضعیت است که ماشین دارای انکودر چرخشی (دورانی می باشد). همانطور که ملاحظه می شود مقدار خطای جمع شوندگی موقعیت در زمانی که ماشین دارای انکودر چرخشی به همراه بال اسکروی دوار بوده بسیار بزرگتر از نمونه مشابه با انکودر خطی است. فاصله سه نقطه در نظر گرفته شده نسبت به مکان یاتاقان بندی بر روی بال اسکرو در شکل ۲ (الف)، با پیکان هایی به رنگ های سبز، آبی و قرمز نمایش داده شده است.

که در آن خواهیم داشت: (۲)

$\lambda$ : ضریب انبساط حرارتی<sup>۱</sup>

$$\Delta\theta - \theta_0: \text{تغییرات درجه حرارت نسبت به حرارت اولیه ()}$$

**تأثیر غیر مستقیم انبساط حرارتی بال اسکرو های محورهای خطی بر روی درستی هندسی سطح قطعه کار:**

در ماشینهای CNC پنج محور، علاوه بر تأثیر مستقیم انبساط حرارتی محورهای خطی بر روی درستی هندسی سطح قطعه کار، تأثیر غیر مستقیمی نیز در کار است. با توجه به وجود حالت (آیشن) آر.تی.سی.پی<sup>۲</sup> برای جابجایی محورهای چرخشی، این خطا نمایان می گردد. زمانی که حالت آر.تی.سی.پی فعال می باشد، مرکز ابزار در فضا ثابت و به جای آن مرکز دوران محورهای چرخشی متحرک خواهد بود. در این وضعیت برای جبران جابجایی های ابزار در اثر حرکت محورهای چرخشی، محورهای خطی جابجا خواهند شد که مقدار جابجایی آنها به میزان حرکت محورهای چرخشی بستگی دارد.

حال با هر جابجایی در هر محور خطی، علاوه بر مقدار اصلی خواسته شده (لازم)، یک جابجایی ناخواسته نیز بواسطه انبساط حرارتی هر محور انجام می پذیرد. مقدار این جابجایی ناخواسته اولاً به مقدار انبساط حرارتی محور مورد نظر و ثانیاً به مقدار جابجایی لازم برای جبران حرکات محورهای چرخشی در حالت آر.تی.سی.پی فعال بستگی دارد. برای آنکه بتوان تأثیر غیر مستقیم انبساط طولی- حرارتی بال اسکرو های محورهای خطی بر درستی هندسی سطح قطعه کار را بدست آورد، ابتدا باید دانست که مقدار حرکتی (جابجایی) محورهای خطی برای حال آر.تی.سی.پی چقدر است؟

۲- آر. تی. سی. پی<sup>۳</sup>

حالت آر. تی. سی. پی (چرخش ابزار حول نقطه مرکزی اش)<sup>۴</sup> برای ماشین ابزارهای دارای کله گی چرخشی کاربرد دارد. این حالت اجازه می دهد، ماشینکاری پنج محوره، مستقیماً به جای مرکز چرخشی محورها، روی مسیر مرکز ابزار برنامه نویسی شود. جبران طول ابزار در فضا وقتی برنامه نویسی تحت پنج محور صورت می گیرد، همیشه کار مشکلی است. با استفاده از منطق آر. تی. سی. پی حتی می توان در ماشین های پنج محور در هنگام اجرای برنامه های سه محوره، محورهای چرخشی را در حالت های جاگ<sup>۵</sup> و هندویل<sup>۱</sup> حرکت داد.

برداری را به همراه خواهد داشت. در این زمینه همیشه تلاش بر این پایه بوده است که درصد کثیری از حرارت ایجاد شده همراه با انتقال براده از منطقه ماشینکاری خارج گردد. همچنین از مایع خنک کننده در راستای کاهش حرارت ماشینکاری و گاه در مورد بال اسکرو های توخالی، در راستای کاهش درجه حرارت بال اسکرو بهره گرفته می شود. با این حال دهمواره درصدی از این حرارت به ابزار و ماشین انتقال می یابد. حرارت در ماشین رفته رفته به قسمتهای دیگر از جمله بال اسکرو ها نیز سرایت می کند.

علاوه بر این بر اثر حرکت محورهای ماشین، بال اسکرو دائماً در حال جابجا کردن مهره حمل کننده محورهای مختلف که بر روی آنها ثابت شده است. اصطکاک ایجاد شده در اثر این جابجایی نیز افزایش درجه حرارت مضاعفی را برای بال اسکرو به همراه خواهد داشت. در نهایت مجموع حرارت های انتقال یافته بال اسکرو باعث انبساط ابعادی آن خواهد شد. البته باید ذکر کرد که تمامی اجزاء تشکیل دهنده یک ماشین با توجه به مقدار حرارت ایجاد شده در آنها و ضریب انبساط حرارتی دچار انبساط می گردند ولی در بال اسکرو ها به دلیل طولی بودن و نسبت طول به قطر زیاد، انبساط ایجاد شده در راستای طول بال اسکرو در مقایسه با انبساطی که در قطر آن رخ می دهد بسیار محسوس تر است. در تحقیق حاضر نیز تأثیر انبساط محورهای خطی بر حرکت محورهای چرخشی یک ماشین فرز CNC پنج محور، مورد بررسی قرار گرفته است.

**تأثیر منفی انبساط بر درستی هندسی سطح:**

در ماشینهای فرز CNC سه محور انبساط خطی بال اسکرو، مستقیماً بر روی درستی هندسی سطح قطعه کار تأثیر می گذارد. در واقع با افزایش طول کلی بال اسکرو، در پی هر حرکت اعمال شده در برنامه NC برای یک محور، با توجه به طول حرکتی (اختلاف اندازه میان خط قبلی برنامه تا خط کنونی) آن محور، علاوه بر جابجایی اصلی یک جابجایی اضافی نیز به خاطر انبساط بال اسکرو انجام می پذیرد. به عنوان مثال اگر طول کلی بال اسکرو محور X با  $X_0$  نمایش داده شود، جابجایی انجام شده در یک خط برنامه (نسبت به خط قبلی) با  $\Delta x$  و مقدار انبساط طولی بال اسکرو به ازای طول کلی آن با  $\varepsilon X$  نمایش داده شود، مقدار جابجایی ناخواسته انجام شده در اثر انبساط خطی برای محور X برابر خواهد بود با:

$$\frac{\varepsilon X}{X_0} \Delta x = \zeta X \quad (1)$$

در واقع جابجایی  $\zeta X$  باعث عدم درستی هندسی سطح قطعه کار می گردد. این تغییر ایجاد شده تأثیر مستقیم انبساط طولی- حرارتی محور X بر درستی هندسی سطح قطعه کار می باشد. در واقع  $\varepsilon X$  از رابطه زیر حاصل می گردد:

$$\varepsilon X = X_0 \lambda (\Delta\theta)$$

1- ThermoFactor  
2- R.T.C.P (Rotation Tool Center Point)  
5- RTCP  
6- Option  
7- Rotation Tool Center Point  
8- JOG

N50 X62.561 Y85.193 Z19.27 A36.077  
C8.92

N51 X62.895 Y84.235 Z18.881 A35.597  
C8.432

N52 X63.052 Y83.994 Z17.711 A35.512  
C8.01

در این برنامه A معرف زاویه ابزار با محور Z و C معرف زاویه تصویر ابزار روی صفحه XY می باشد (مبداء زاویه C با توجه به طراحی ماشین، یکی از دو محور X یا Y است). تنها اطلاعاتی که در هر خط برنامه پنج محور، می توان برای محاسبه جابجایی مرکز ابزار استفاده کرد، زوایای A و C است. در واقع با توجه به تغییرات A و C در خطوط پی در پی، جابجایی های پیوسته مرکز ابزار به دست می آید. زوایای A و C در نرم افزار CAM که برای ایجاد برنامه استفاده شده است. با توجه به منحنی های سطح و فرم قطعه کار تولید می شوند. در زیر پاره ای از یک برنامه نشان داده شده که در آن تنها حرکت چرخشی وجود دارد و حرکتی در محورهای دکارتی X، Y و Z صورت نمی گیرد.

N73 X76.281 Y59.637 Z14.12 A22.18  
C40.96

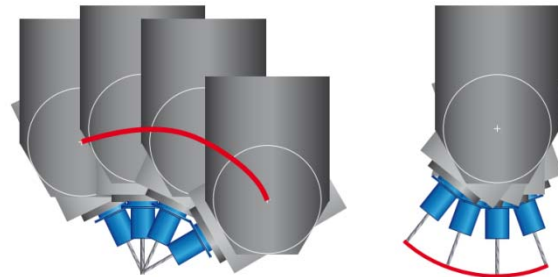
N74 X76.281 Y59.637 Z14.12 A21.62  
C41.63

N75 X76.281 Y59.637 Z14.12 A20.68  
C42.19

با اینکه هیچگونه حرکت خطی وجود ندارد ولی مرکز ابزار جابجا می شود. میزان جابجایی در وضعیتی که حالت آر . تی . سی . پی فعال است، منفی جابجایی کنونی می باشد، بنابراین اگر آر . تی . سی . پی فعال باشد و در خطوطی از برنامه تنها محورهای چرخشی حرکت کنند باید انتظار داشت که در عمل حرکت هایی نیز در محورهای خطی برای جبران جابجایی مرکز ابزار انجام شود. محاسبه این مقدار جابجایی در زیر بیان شده است.

### ۲-۱- برنامه نویسی با آر. تی. سی. پی

حفظ کردن موقعیت مرکز ابزار در فضا به این صورت است که هر حرکت محورهای چرخشی، با یک جابجایی خطی محورهای XYZ جبران می شود. بنابراین با یک حرکت سنتی در ماشین کنترل عددی می توان، حرکت یک یا چند محور چرخشی و نتیجتاً جابجایی محور ابزار را جبران نمود. در نهایت مرکز چرخش محور دائماً جابجا شده و مرکز ابزار به صورت پیوسته در یک موقعیت ثابت حفظ می گردد. (شکل ۳) در این مورد مسیر حرکت مرکز ابزار می تواند مستقیماً و بدون در نظر گرفتن یا دانستن میزان فاصله مرکز ابزار و مرکز چرخش کنگی برنامه نویسی شود. مقدار فاصله قبل از اجرای برنامه از طریق کنترلر وارد می گردد و روی برنامه تأثیر می گذارد.



شکل ۳ چپ: همراه آر. تی. سی. پی فعال-راست: آر. تی. سی. پی غیر فعال [۶]

### ۳- تحلیل جبران طول ابزار در فضا

جبران طول ابزار در فضا، وقتی برنامه نویسی تحت پنج محور صورت می گیرد، همیشه کار مشکلی است. حفظ موقعیت مرکز ابزار در فضا به این ترتیب انجام می شود که هر حرکت محورهای چرخشی، با یک جابجایی خطی محورهای XYZ جبران می شود. در این صورت می توان مستقیماً و بدون در نظر گرفتن میزان فاصله مرکز ابزار و مرکز چرخشی کنگی برنامه ماشینکاری را ایجاد نمود. برای تحلیل جبران طول ابزار در فضا می توان از صفحات سه گانه XZ، YZ و ZY باری جست.

در برنامه های پنج محوره که توسط نرم افزارهای CAM ایجاد می گردد، همراه با مختصات دکارتی X، Y و Z، دو زاویه نیز معرف وضعیت قرار گرفتن ابزار در فضا می باشد. این زوایا با توجه به نوع کنگی عبارتند از A یا B و C یا C و B. در زیر قسمتی از یک برنامه واقعی پنج محوره ارائه شده است.

$M_2$ : تصویر  $L_1'$  و  $L_1'''$  بر روی محور Z  
 $M_2'$ : تصویر  $L_2'$  و  $L_2'''$  بر روی محور X  
 $M_3$ : تصویر  $L_1'$  و  $L_1'''$  بر روی محور X  
 $M_3'$ : تصویر  $L_2'$  و  $L_2'''$  بر روی محور X  
 همچنین داریم:

$$|\Delta M_2| = |\Delta M_2'| \cdot |M_2 - M_2'| \cdot |\Delta M_1| = |M_1 - M_1'|$$

$$|\Delta M_3| = |\Delta_3 - M_3'|$$

$|CP_1| = |CP_2| = L$  (فاصله میان مرکز ابزار و مرکز چرخش کله گی)

$$\cos c_1 = \frac{M_1}{M_1''} = \frac{M_1}{L \sin(90 - a_1)} \rightarrow M_1 = L \sin(90 - a_1) \cos c_1$$

$$\cos(90 - a_1) = \frac{M_2}{M_1''} = \frac{M_2}{L \sin c_1} \rightarrow M_2 = L \sin c_1 \cos(90 - a_1)$$

$$\cos c_2 = \frac{M_1'}{M_2''} = \frac{M_1'}{L \sin(90 - a_2)} \rightarrow M_1' = L \sin c_2 \cos(90 - a_2)$$

$$\cos(90 - a_2) = \frac{M_2'}{L_2''} = \frac{M_2'}{L \sin c_2} \rightarrow M_2' = L \sin c_2 \cos(90 - a_2)$$

$$M_3' = L \sin(90 - a_2) \sin c_2$$

حال می توان مقادیر  $\Delta M_1$ ،  $\Delta M_2$  و  $\Delta M_3$  را بر حسب زوایای C و A به دست آورد.

رابطه (۳)

$$\Delta M_1 = M_1 - M_1' = L \sin(90 - a_1) \cos c_1 - L \sin(90 - a_2) \cos c_2$$

رابطه (۴)

$$\Delta M_2 = M_2 - M_2' = L \sin c_1 \cos(90 - a_1) L \sin c_2 - \cos(90 - a_2)$$

رابطه (۵)

$$\Delta M_3 = M_3 - M_3' = L \sin(90 - a_1) \sin c_1 - L \sin(90 - a_2) \sin c_2$$

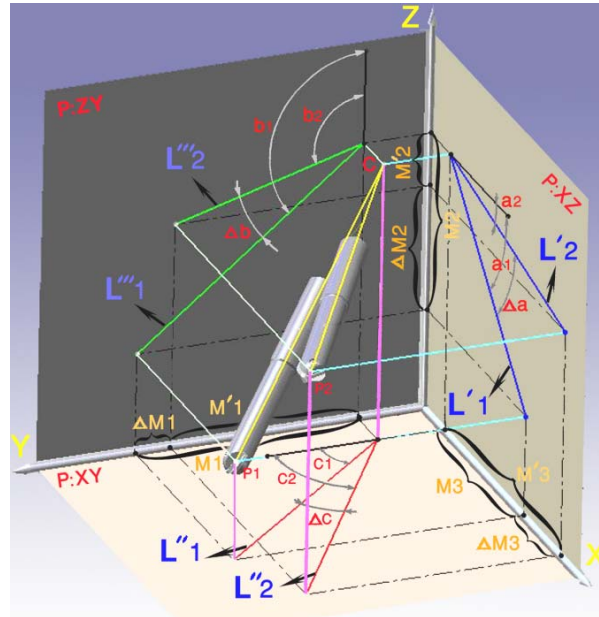
مقادیر  $\Delta M_1$ ،  $\Delta M_2$  و  $\Delta M_3$  به ترتیب میزان جابجایی در محورهای Y، Z و X در اثر تغییر زاویه  $A_1$  به  $A_2$  ( $\Delta A$ ) و  $C_1$  به  $C_2$  ( $\Delta C$ ) می باشند. اگر علاوه بر حرکت در محورهای چرخشی در محورهای خطی نیز تغییراتی وجود داشته باشد باید تغییر مکان های دکارتی را نیز در نظر گرفت. چنانچه دو خط متوالی از یک برنامه پنج محوره در نظر گرفته شود داریم:

$$\begin{matrix} N 80 & \frac{X 26}{x_1} / \frac{56}{x_1} & \frac{Y 58}{y_1} / \frac{91}{y_1} & \frac{Z 91}{z_1} / \frac{72}{z_1} & \frac{A 63}{a_1} / \frac{07}{a_1} & \frac{C 8.7}{c_1} \\ N 83 & \frac{X 27}{x_2} / \frac{03}{x_2} & \frac{Y 57}{y_2} / \frac{83}{y_2} & \frac{Z 90}{z_2} / \frac{50}{z_2} & \frac{A 62}{a_2} / \frac{39}{a_2} & \frac{C 8.4}{c_2} \end{matrix}$$

مقدار تغییرات دکارتی بر اثر تغییر مختصات X، Y و Z و بدون در

نظر گرفتن جابجایی مرکز ابزار (متأثر از تغییرات محورهای چرخشی)

عبارتست از:



شکل ۴ نمایش سه بعدی جهت یابی مختلف ابزار در فضا [۵]

شکل ۴ ابزار را در وضعیت متفاوت در فضا نمایش می دهد.

علائم موجود در این شکل عبارتند از:

XYZ: محورهای دکارتی

C: مرکز چرخش کله گی

L: فاصله میان مرکز ابزار و مرکز چرخش کله گی

$L_1', L_2'$ : تصویر L روی صفحه ZX به ترتیب قبل و بعد از جابجایی

$L_1'', L_2''$ : تصویر L روی صفحه XY به ترتیب قبل و بعد از جابجایی

$L_1''', L_2'''$ : تصویر L روی صفحه ZY به ترتیب قبل و بعد از جابجایی

$C_1, C_2$ : به ترتیب زوایای  $L_1'$  و  $L_1''$  با محور Y

$\Delta C$ : تصویر زاویه ای که بر اثر جابجایی مرکز ابزار ایجاد گشته روی صفحه XY

$Q_1, Q_2$ : به ترتیب زوایای  $L_1'$  و  $L_1''$  با محور X

$\Delta Q$ : تصویر زاویه ای که بر اثر جابجایی مرکز ابزار ایجاد گشته روی صفحه XZ

$M_1$ : تصویر  $L_1'$  و  $L_1''$  بر روی محور Y

$M_1'$ : تصویر  $L_2''$  و  $L_2'''$  بر روی محور Y

مناسب برای تأثیر مستقیم سه محور خطی باید رابطه ای خاص برای تأثیر غیر مستقیم آنها بر محورهای چرخشی و در نهایت درستی هندسی سطح قطعه کار نیز بدست آورد. رابطه بدست آمده با کد نویسی مناسب می تواند به عنوان یک روش برای کنترل تطبیقی با شناخت میزان انبساط طولی- حرارتی محورهای خطی یک فرز CNC پنج محور محسوب شود. محققان متن حاضر هم اکنون در حال تهیه یک برنامه مبدل برای رفع مشکل فوق و سپس اجرای آن به صورت یک کار آزمایشی بر روی یک ماشین فرز CNC پنج محور هستند. با ادغام این روش با دیگر روشهای جبران خطاهای موقعیتی در ماشینهای فرز CNC پنج محور، می توان گامی موثر در راستای دستیابی به درستی هندسی مناسب در قطعات پیچیده ودقیقی همچون پره های توربین، اجزاء قالب های صنعتی و.. برداشت.

### مراجع

- [1] D. K. Aspinwall, R. C. Dewes, E. G. Ng, C. Sage, S.L.Soo, The influence of cutter orientation and workpiece angle on machinability when high-speed milling Inconel 718 under Finishing Conditions, *International Journal of Machine Tools & Manufacturing* 47(2007)1839-1846
- [2] Amir Alinaghizadeh, FarhadNadjarian, Kinematic Design & analysis of Five-axis milling machine- *National Conference on Manufacturing Engineering(NMEC) Islamic Azad University of Najaf Abad branch-Iran.*
- [3] SINUMERIK 840D/840Di/810 D/FM-NC Programing Guide Advanced (PGA)-04.00 Edition, Siemens AG, 2000
- [4] FIDIA M&C CLASS User and Programming Manual, Copyright FIDIA S.P.A San Mauro Torinese, Italy, Edition January 1999
- [5] AbdolrezaRahimi, Mahdi Ahmadi Najafabadi, Amir Alinaghizadeh, Changing the orientation of tool and the work pieces in 5-axis CNC milling machines with Rotary head- *2nd National Conference on Manufacturing Engineering(NMEC) Islamic Azad University of Najaf Abad branch-Iran.*
- [6] NUM Information, journal for cnc-total solutions, www.num.com, No 55 - September 2014, page 10.
- [7] HEIDENHAIN, Technical Information, Accuracy of Feed Axes, www.Hwidenhain.de, August 2006, page6.

$\Delta x = x_2 - x_1$   $\Delta y = y_2 - y_1$   $\Delta z = z_2 - z_1$   
 همچنین تغییرات چرخشی بر اثر تغییر زاویه محورهای چرخشی A و C عبارتست از:

$$\Delta a = a_2 - a_1 \quad \Delta c = c_2 - c_1$$

ولی در واقع مرکز ابزار مقداری جابجایی بر اثر حرکت محورهای چرخشی نیز داشته است اگر در این حالت آر. تی. سی. پی فعال باشد مرکز ابزار در فضا ثابت مانده و مرکز چرخش محورها این جابجایی را انجام خواهد داد. البته چنانچه پیشتر گفته شد جابجایی مرکز چرخش محورها در جهت عکس جابجایی مرکز ابزار خواهد بود. بنابراین باید آن را در هر حال با تغییرات دکارتی (حاصل از تغییر مختصات X, Y و Z) جمع جبری نمود به عبارت دیگر [5]:

$$\Delta X_{Total} = \Delta x - \Delta M_3 \quad (6)$$

$$\Delta Y_{Total} = \Delta y - \Delta M_1 \quad (7)$$

$$\Delta Z_{Total} = \Delta z - \Delta M_2 \quad (8)$$

که در آنها به ترتیب :

$\Delta X_{Total}$ : میزان واقعی حرکت در محور X

$\Delta Y_{Total}$ : میزان واقعی حرکت در محور Y

$\Delta Z_{Total}$ : میزان واقعی حرکت در محور Z

از طرفی اگر جابجایی انجام شده در محور X، که به خاطر جبران حرکات محورهای چرخشی در آر. تی. سی. پی فعال صورت می گیرد با  $\Delta M_3$  و مجددا مقدار انبساط طولی با اسکرو به ازای طول کلی آن با  $\epsilon X$  نمایش داده شود، مقدار جابجایی نا خواسته انجام شده در اثر انبساط طولی برای حرکت جبرانی در محور X در آر. تی. سی. پی فعال  $\Delta M_3$ ، برابر خواهد بود با:

$$\frac{\epsilon X}{X_0} \Delta M_3 = \zeta \Delta M_3 \quad (9)$$

در نهایت با انبساط طولی- حرارتی در بال اسکرو محورهای خطی، خواهیم داشت:

$$\Delta X_{Total} = \Delta x + \zeta_x - (\Delta M_3 + \zeta \Delta M_3) \quad (10)$$

$$\Delta Y_{Total} = \Delta y + \zeta_y - (\Delta M_1 + \zeta \Delta M_1) \quad (11)$$

$$\Delta Z_{Total} = \Delta z + \zeta_z - (\Delta M_2 + \zeta \Delta M_2) \quad (12)$$

### ۴- نتیجه گیری

با توجه به اهمیتی که تأثیر انبساط طولی - حرارتی بال اسکرو ها بر روی درستی هندسی سطح قطعه کار دارد و نظر به اضافه شدن دو محور چرخشی در ماشینهای CNC پنج محور، جبران خطاهای موقعیتی، بسیار مشکل تر می شود. در واقع علاوه بر حصول رابطه ای