

## Study of the Effect of Structural Rigidity of a 4-Dof Milling Machine with Parallel Mechanism on the Surface Roughness and Machining Accuracy of Parts

Mehdi Tayyari Kalajahi, Mehran Mahboubkhah\* 

Mechanical Engineering Department, University of Tabriz, Tabriz, Iran

### ARTICLE INFO

**Article Type**  
Original Research

### Article History

Received: September 12, 2025  
Revised: October 20, 2025  
Accepted: November 10, 2025  
ePublished: November 20, 2025

### ABSTRACT

The use of robots with parallel mechanisms in machine tools that have special capabilities is expanding. The main problem in these devices is the variability of the rigidity of the mechanism in its workspace, which directly affects the machining accuracy. In this paper, a four-degree-of-freedom robot with a parallel mechanism and using a milling machine, which was designed and built for the first time, is introduced and machining studies are carried out in its workspace. To investigate the effect of the rigidity of this machine tool on the accuracy and surface roughness of machined parts, a force and rigidity analysis of the machine structure in its workspace have been performed. Dimensional and geometric quality control of standard machined parts has been performed using a coordinate measuring machine (CMM). The dimensional and geometric quality and surface roughness of the machined parts, proved the direct relationship between the rigidity of the machine and these parameters. As is evident from the measurement results, the higher rigidity of the structure in the middle part of the workspace resulted in better dimensional and geometric accuracy of the machined parts. Machining accuracies in this area are about 15% higher than in other areas. Due to the low depth of cut in the finishing conditions, the surface roughness results of the machined parts are almost the same in all regions of the working space.

**Keywords:** Machining, Parallel Mechanism, Milling Machine, Stiffness.

### How to cite this article

Tayyari Kalajahi M, Mahboubkhah M, Study of the effect of structural rigidity of a four-degree-of-freedom milling machine with parallel mechanism on the machining accuracy of parts. Modares Mechanical Engineering; 2025;25(10):683-694.

\*Corresponding author's email: mahboobkhah@tabrizu.ac.ir

\*Corresponding ORCID ID: 0000-0003-0275-4837



Copyright© 2025, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-Noncommercial terms.



## مطالعه تاثیر سفتی سازه دستگاه فرز چهار درجه آزادی با ساز و کار موازی بر صافی سطح و دقت ماشینکاری قطعات

مهدی طیار کجاهی، مهران محبوب خواه\*

دانشکده مهندسی مکانیک، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

### چکیده

استفاده از ربات با ساز و کار موازی در ماشین‌های ابزار که دارای قابلیت‌های ویژه‌ای هستند، رو به گسترش است. مسئله عمده در این دستگاه‌ها، متغیر بودن سفتی مکانیسم در فضای کاری آن است که بطور مستقیم بر دقت ماشینکاری تأثیر می‌گذارد. در این مقاله، یک ربات چهار درجه آزادی با ساز و کار موازی و با کاربرد ماشین‌فرز که برای اولین بار طراحی و ساخته شده، معرفی و مطالعات ماشینکاری در فضای کاری آن انجام شده است. برای بررسی تأثیر سفتی این ماشین‌ابزار بر دقت و صافی سطح قطعات ماشینکاری شده، تحلیل نیرویی و سفتی سازه دستگاه در فضای کاری آن انجام شده است. کنترل کیفیت ابعادی و هندسی قطعات استاندارد ماشینکاری شده، با استفاده از دستگاه اندازه گیری مختصات (CMM)، انجام شده است. کیفیت ابعادی و هندسی و صافی سطح قطعات ماشینکاری شده، ارتباط مستقیم سفتی دستگاه با این پارامترها را اثبات کرد. بطوریکه از نتایج اندازه‌گیری‌ها مشهود است، سفتی بالاتر سازه در قسمت میانی فضای کاری، باعث ایجاد دقت بهتر ابعادی و هندسی قطعات ماشینکاری شده است. دقت‌ها ماشینکاری در این محدوده حدود ۱۵٪ بیشتر از سایر مناطق بدست آمده است. با توجه به عمق‌بار کم در شرایط پرداخت کاری، نتایج صافی سطح قطعات ماشینکاری شده در تمام قسمت‌های فضای کاری تقریباً یکسان بدست آمده است.

**کلیدواژه‌ها:** مکانیسم موازی، سفتی، دستگاه فرز چهار محور، ماشینکاری.

### اطلاعات مقاله

#### نوع مقاله

مقاله پژوهشی

#### تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۲۱

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۲۸

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۹

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۸/۲۹

### نحوه ارجاع به این مقاله

مهدی طیار کجاهی، مهران محبوب خواه، مطالعه تاثیر سفتی سازه دستگاه فرز چهار درجه آزادی با ساز و کار موازی بر دقت ماشینکاری قطعات، مهندسی مکانیک مدرس. ۷۹۴-۷۸۳ (۱۰): ۲۵؛ ۱۴۰۴.

\* پست الکترونیکی نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mahboobkhah@tabrizu.ac.ir

\* شناسه اراکید نویسنده عهده‌دار مکاتبات: 0000-0003-0275-4837



Copyright© 2025, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-Noncommercial terms.

## ۱- مقدمه

یکی از پارامترهای بسیار مهم در زمینه طراحی سازوکارهای موازی، خصوصاً آن دسته که به عنوان ماشین ابزار و در مقیاس صنعتی استفاده می‌شوند، تعیین و افزایش سفتی سازه ماشین ابزار می‌باشد. سفتی، قطعاً بر دقت ماشینکاری اثر مستقیم داشته و لازم است، کیفیت سفتی فضای کاری دستگاه ماشین ابزار با سازوکار موازی محاسبه و بر اساس آن، برای داشتن کیفیت ماشینکاری مطلوب، ماشینکاری در مناطق با سفتی بالا انجام شود. منظور از محاسبه سفتی، یافتن رابطه‌ی بین مقدار جابجایی عملکرد نهایی، نسبت به نیروی خارجی می‌باشد. هدف از این محاسبات یافتن ماتریس سفتی سازه می‌باشد [۱]. در سازوکارهای موازی، با توجه به وجود بازوهای طویل و میله‌های با قطرهای مختلف، سفتی آنها به شدت تحت تأثیر این اجزاء قرار می‌گیرد و انتخاب مناسب ابعادی این سازه‌ها، در دقت حرکتی ماشین ابزار، نقش اساسی دارد. علاوه بر آن، بالا بودن سفتی، باعث بالا رفتن سرعت ماشینکاری، تغذیه، بهبود صافی سطح و عمر ابزار می‌شود [۲]. بیشتر تحقیقات انجام شده در مورد سفتی، در خصوص مکانیزم‌های شش درجه آزادی می‌باشد. گاسلین [۳] در سال ۱۹۹۰ و سیوین [۴] در سال ۲۰۰۱ سفتی مکانیزم استوارت را با استفاده از ماتریس ژاکوبین و بر اساس روابط نیرو و تغییر شکل سکوی متحرک محاسبه کردند. روش پیشنهادی آن‌ها، نمی‌تواند به‌طور مستقیم برای سازوکارهای با درجه آزادی کمتر، سفتی را محاسبه کند، ولی می‌توان با استفاده از یک سری ساده‌سازی‌ها، از جمله در نظر نگرفتن تأثیر اتصال‌ها، مدلسازی سفتی را انجام داد [۵]. در سال ۲۰۰۸ رضایی و همکارانش [۶] در مورد مزایای ربات‌های موازی، از جمله سفتی بالا و دقت بالا در سرعت‌های بالای حرکتی، مقاله‌ای نوشته و یک ربات موازی صفحه‌ای جدید با ساختاری نامتقارن را، جایگزین زنجیره سری نمودند، سپس حل سینماتیک معکوس و مستقیم ربات، برای یک مسیر ماشینکاری را تحلیل نمودند. در سال ۲۰۱۹ چلیو و همکارانش [۷] به تولید مسیر ابزار یک ربات هیبریدی پنج‌محور به نام تریمول پرداختند که برای ماشینکاری قطعات بزرگ، در محل طراحی شده است. آنها مشاهده کردند که در حالت تکینگی (Singularity)، تغییرات ناگهانی در چرخش محور (C) و طول سه پایه تلسکوبی ربات رخ می‌دهد. این اکتشاف، امکان تعیین دقیق حداقل زاویه چرخش محور ابزار را برای جلوگیری از تکینگی و کاهش خطاهای ماشینکاری ناشی از اصلاح محور ابزار فراهم می‌کند و منجر به توسعه یک الگوریتم برای تولید مسیر ابزار غیرتکین می‌شود. در سال ۲۰۲۰ هوی توان‌فام و همکارانش [۸] در روشی جدید، سازوکارهای موازی خاصی را بکار گرفتند. مکانیسم‌های موازی مورد استفاده آنها، مزایای زیادی از جمله، سفتی بالا، ظرفیت حمل بار بالا و دقت بالا داشت و به‌طور گسترده در کاربردهای مختلف مهندسی دقیق، استفاده می‌شود. مکانیسم آن‌ها، توسط محرکه‌های پیزوالکتریک فعال می‌شود. در سال ۲۰۲۰، چانگ و

همکارانش [۹]، با عنایت به اینکه پردازش کارآمد و دقیق قطعات در مقیاس بزرگ، یک مشکل در صنعت است، روشی را برای صیقل دادن پره‌های توربین بادی در مقیاس بزرگ، با استفاده از ربات‌های متحرک هیبریدی پیشنهاد دادند. ربات‌های متحرک هیبریدی آن‌ها، ترکیبی از یک وسیله نقلیه خودکار هدایت شونده (AGV)، یک مازول هیبریدی (DOF۳) موازی و یک مازول موازی (T2R1) بود. مقاله آنها، بر روی طراحی مکانیسم موازی (T2R1) تمرکز دارد. در سال ۲۰۲۰، ازکا و همکارانش [۱۰]، پایداری ماشینکاری تحت تأثیر وضعیت و موقعیت ابزار فرزکاری بوسیله‌ی ابزار سرکروی با ماشین ابزار سینماتیک موازی را بررسی کردند. در ابتدا، سفتی ماشین در چندین موقعیت با چهار وضعیت مختلف ابزار اندازه‌گیری شده است. سپس، آزمون‌ها بر روی صافی سطح قطعه کار انجام شده است. سیگنال‌های نیروی برش و شتاب ابزار فرز، توسط دینامومتر سه‌محور و شتاب‌سنج، اندازه‌گیری شده است. نتایج نشان داد که، سفتی ماشین با افزایش طول کل بازوها برای هر موقعیت ابزار کاهش می‌یابد. در سال ۲۰۲۱، داروکار و همکارانش [۱۰]، عملکرد ماشینکاری یک نمونه اولیه طراحی بهینه شده از یک ماشین فرز موازی دو درجه آزادی را معرفی کردند. در این کار، تأثیر پارامترهای ماشینکاری بر کیفیت سطح قطعه ماشینکاری شده، مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین، عملیات فرزکاری، در سرعت‌ها و عمق برش‌های مختلف با دستگاه فرز معمولی انجام شد. زبری سطح ماشینکاری شده، اندازه‌گیری و نتایج با هم مقایسه شده است. عمق برش به عنوان مهمترین پارامتری که بر زبری سطح تأثیر می‌گذارد، مورد توجه قرار گرفته است. در سال ۲۰۲۲، اخباری و همکارانش [۱۱]، با توجه به اینکه قسمتی از خطاهای ماشین‌های سینماتیکی موازی در درجه اول به میزان غیرخطی بودن سینماتیک آنها بستگی دارد، یک مدل کامپیوتری یکپارچه از روش درون‌یابی غیرخطی سینماتیکی و مسیر، برای یک ماشین فرز موازی چهار درجه آزادی را توسعه دادند. در مقاله‌ی آنها، خطاهای غیرخطی ایجاد شده در طول حالت‌های مختلف مسیر، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. اثرات طول مسیر ابزار، موقعیت مکانی آن و خواص ماتریس ژاکوبین بر خطای غیرخطی سینماتیکی، مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان داده است که طول مسیر، عامل حاکم بر رفتار غیرخطی مکانیسم است. رسو و همکارانش [۱۲] در سال ۲۰۲۴، با اذعان به عملکرد بازوهای مکانیکی موازی عموماً با سرعت، سفتی و تکرارپذیری بالا، به دلایل محدودیت جذب صنعتی آنها در مقایسه با معماری‌های سریالی پرداخته‌اند. در مقاله‌ی آنها، دلایل شکاف بین پتانسیل ماشین ابزار موازی و کاربردهای واقعی آن، با تجزیه و تحلیل انتقادی از وضعیت فعلی، بررسی شده است. هدف این مقاله، ارائه درکی از ویژگی‌های عملکردی و تکنولوژیکی بازوهای مکانیکی موازی به کاربران ماشین ابزار و همچنین کمک به متخصصان رباتیک با رویکردی به کاربردهای ماشینکاری با دیدگاهی عمیق و مجموعه‌ای از منابع

برگزیده است. فانگ و همکارانش [۱۳] در سال ۲۰۲۵، در مقاله‌ای به صورت کمی، خواص سفتی یک ربات ماشین‌ایزار موازی با محرک‌های اضافی (RAPMR) Z4 جدید را محاسبه کردند. آنها دو مسئله مدل‌سازی سفتی و ساخت شاخص، برای انجام ارزیابی سفتی ماشین ابزار مورد مطالعه را معرفی کرده‌اند. سپس، عملکرد سفتی موضعی و کلی RAPMR Z4 محاسبه شده است و در نهایت یک نمونه آزمایشگاهی از RAPMR پیشنهادی، ساخته شده و آزمایش تجربی برای تأیید صحت مدل سفتی آن، انجام شده است. کراتنا و همکارانش [۱۴] در سال ۲۰۲۵، یک مدل ریاضی از داده‌های اندازه‌گیری شده تجربی از سفتی استاتیک یک ربات صنعتی را توسعه دادند و از این مدل برای کنترل آفلاین ربات در ماشینکاری استفاده کردند. آنها با تعیین سفتی جهت‌دار در حین عملیات ماشینکاری و محاسبه معیار سفتی انتگرالی برای پیکربندی ربات و موقعیت قطعه‌کار در فضای کاری، از یک الگوریتم ژنتیک برای یافتن موقعیت بهینه قطعه و زاویه چرخش اضافی عملکرد نهایی ربات استفاده کردند. دامبلی و همکارانش [۱۵] در سال ۲۰۲۵، در مقاله‌ای، بر تأثیر تغییر نرخ پیشروی در نواحی ناپایدار، بخصوص موقعیت‌های ورودی و خروجی ابزار در قطعه‌کار، اشاره کردند. در تحقیق آنها، یک طرح بهینه‌سازی برای به‌روزرسانی نرخ پیشروی ابزار با در نظر گرفتن تغییر موقعیت گره‌ها، برای جبران انحراف نوک ابزار از مسیر اصلی، پیشنهاد شده است. دانتین و همکارانش [۱۶] در سال ۲۰۲۵، بهبود کیفیت ماشینکاری را به کمک شبیه‌سازی ربات، برای دینامیک چندجسمی و مدل‌سازی نیروهای برشی، بررسی کردند. پتا و همکارانش [۱۷] در سال ۲۰۲۳ در مقاله‌ای، انواع موقعیت‌یابی مسیرها و پارامترهای حرکتی یک ربات صنعتی که با ماشین‌های ابزار کنترل‌عددی همکاری می‌کند را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. تحلیل‌های اصلی شبیه‌سازی، رابطه‌ی بین پارامترهای قابل برنامه‌ریزی حرکت ربات و مقادیر واقعی سرعت و شتاب نقطه مرکزی ابزار را نشان داد. نتایج تحلیل‌های آنها، امکان بهینه‌سازی زمان کار ربات را در عین حفظ کیفیت مناسب فرآیند، فراهم کرد. نان و همکارانش [۱۸] در سال ۲۰۲۵ در مقاله‌ای، برای بهبود دقت ماشینکاری کانتور قطعه، یک مدل پیش‌بینی خطای مبتنی بر یادگیری عمیق با ادغام شبکه‌های عصبی کانولوشن (CNN) و شبکه‌های حافظه بلند مدت دو طرفه (BiLSTM) برای استخراج ویژگی‌های مکانی-زمانی را توسعه دادند. نتایج تجربی حاصل از آزمایش‌های مسیر ماشینکاری، اثربخشی روش پیشنهادی آنها را تأیید و کاهش بیش از ۸۳ درصدی خطاهای ماشینکاری کانتور را اثبات کرد. عابد و همکارانش [۱۹] در سال ۲۰۲۵ در مقاله‌ای، یک محیط ماشینکاری چند مرحله‌ای هوشمند را برای گیره‌بندی و ماشینکاری کنترل‌شده سازه‌های با سفتی کم معرفی کردند. تحقیق آنها با یک قطعه کار دیواره نازک مستعد تغییر شکل که تحت گیره‌بندی کنترل‌شده قرار می‌گیرد و توسط اتوماسیون رباتیک قابل تعویض می‌باشد، نشان داده شده است. با

استفاده از این رویکرد کنترل‌شده‌ی گیره‌بندی، تغییر شکل‌های قطعه کار به حداقل می‌رسد. در عین حال، نیروی گیره‌بندی مطلوبی به دست می‌آید تا بتوان اصلاحات بعدی ماشینکاری را برای کاهش خطاهای صافی‌سطح ناشی از تغییر شکل انجام داد. پیر و همکارانش [۲۰] در سال ۲۰۲۵، سنتز، کنترل و اعتبارسنجی تجربی یک مینی‌ربات انتقالی سه درجه آزادی با قابلیت کنترل تعاملی بین ربات و یک قطعه ماشینکاری شده در حین انجام ماشینکاری را انجام دادند. همچنین، آنها عملیات پرداخت در قطعات، بدون نیاز به استفاده از حسگر نیرو، را توسعه دادند. ربات کوچک مورد استفاده در این تحقیق، به عنوان یک واسط تماسی فعال عمل می‌کند و به یک ربات صنعتی اجازه می‌دهد تا با استفاده از یک الگوریتم کنترل آمپدانس، با قطعه سازگار شود. در سال ۲۰۲۲، محبوب‌خواه و همکارانش [۲۱]، عملکرد یک ربات موازی چهار درجه آزادی با کاربرد ماشین فرز را معرفی و قسمت‌های سخت‌افزاری مکانیکی و کنترلی و روابط سینماتیکی و نحوه حرکت‌های آن را تشریح نمودند. برای بهبود کیفیت و کاهش خطاهای حرکتی آن، تنظیمات سخت‌افزاری انجام شد. همچنین، میزان خطاهای حرکتی، با آزمایش‌هایی اندازه‌گیری شد. با بدست آمدن شیب منحنی خطاهای موقعیت‌دهی، داده‌های لازم برای اصلاح آنها مشخص و در کنترلر دستگاه اعمال شد. پس از اندازه‌گیری مجدد، مشخص شد که اندازه خطاهای حرکتی هر محور، به میزان چشمگیری کاهش یافته است. در ادامه همین تحقیق و برای افزایش دقت، در مقاله حاضر، از کنترلر حرکتی خاص و نرم‌افزار تجاری مچ‌تری (Mach3) استفاده شده و روابط سینماتیکی حاکم بر مکانیسم به آن وارد شده است. بطوریکه، نرم‌افزار آن قادر است، فرمان‌های استاندارد و جی‌کدهای دریافتی از نرم‌افزارهای تجاری، مثل پاورمیل (PowerMill) را اجرا کند. با توجه به اینکه سفتی مکانیسم‌های موازی، بدلیل ساختار ویژه آنها، در مناطق مختلف فضای کاری متفاوت است و قطعاً این عامل در کیفیت حرکتی و ماشینکاری آن تأثیر خواهد گذاشت، بنابراین، برای مطالعه‌ی تأثیر این پارامتر در ماشین ابزار موازی حاضر نیز، سفتی مناطق مختلف فضای کاری تحلیل و محاسبه شده و سپس، با ماشین کاری یک قطعه استاندارد در مناطق مختلف فضای کاری، تأثیر سفتی، روی تolerانس‌های ابعادی، هندسی و صافی‌سطح ماشینکاری شده مطالعه شده است. در این مقاله و در ادامه، در قسمت مواد و روش‌ها، روند انجام تحلیل‌ها، ماشینکاری‌ها و اندازه‌گیری‌ها توضیح داده شده و در نهایت در قسمت نتایج، در مورد نتایج اندازه‌گیری‌ها روی قطعات ماشینکاری شده و تفسیر نتایج آنها، بحث و بررسی بعمل آمده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

در این بخش، ابتدا به معرفی مکانیسم ماشین ابزار و نرم‌افزارهای استفاده شده در این تحقیق، پرداخته شده و سپس، تحلیل سفتی

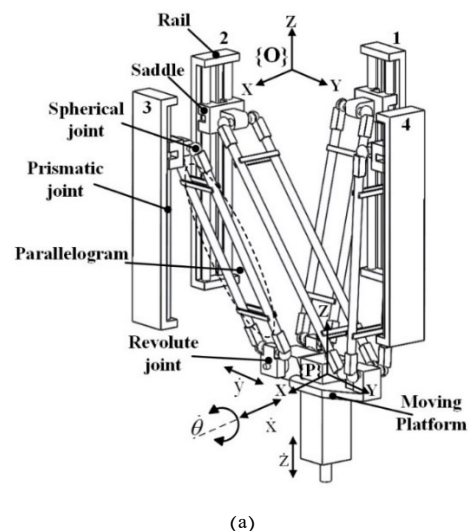
مکانیسم در فضای کاری و روابط مربوط به آن ارائه شده است. در ادامه، روش کار برای ماشینکاری قطعه استاندارد و سپس اندازه-گیری آن توضیح داده شده است.

## ۲-۱- معرفی ماشین ابزار چهار درجه آزادی

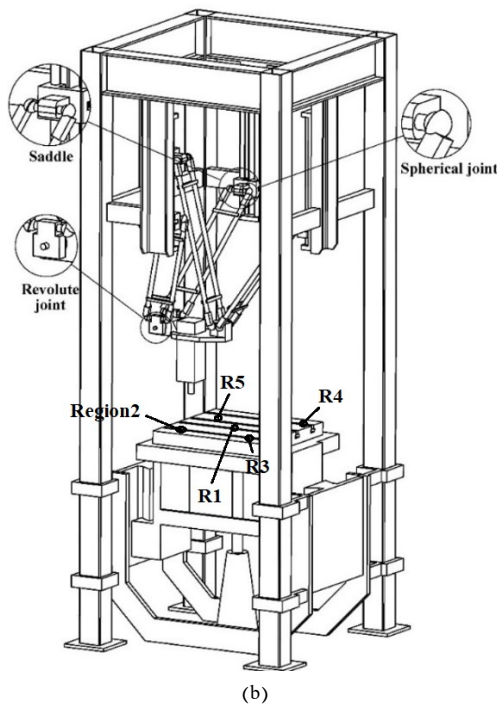
مکانیسم مورد استفاده در این مقاله مطابق شکل ۱، از نوع موازی است که دارای سه محور حرکت خطی و یک حرکت دورانی حول محور X است. بطوریکه در شکل ۱ نشان داده شده، میز دستگاه ثابت و کلگی دستگاه که اسپیندل به آن وصل شده است، حرکت نسبی نسبت به میز و قطعه کار را انجام می دهد. فرمان های حرکتی از طریق کنترلر، به موتورهای تغذیه که آنها هم لغزنده ها را به حرکت در می آورند، ارسال و با جابجائی لغزنده ها، بازوهای متوازی الاضلاع جابجا می شوند. بازوهای متوازی الاضلاع از طرف دیگر به سکوی متحرک متصل هستند و از طریق مفصل یونیورسال و لولایی، آنرا حرکت می دهند. در واقع، این مکانیسم دارای دو نوع زنجیره غیرهمسان R(Pa)U-2-PR(Pa)R2 است. Pa، R، P و U به ترتیب نشان دهنده مفصل کشویی، مفصل لولایی، متوازی الاضلاع و مفصل یونیورسال می باشند. استفاده از بازوهای متوازی الاضلاع در مکانیسم های موازی، باعث افزایش سفتی آن می شود.

## ۲-۲- سیستم کنترلی و بُرد ربات ماشین ابزار

برای طراحی سیستم کنترل حرکتی ربات ماشین ابزار، از یک بُرد تجاری کنترل حرکتی (Ethernet SmoothStepper CNC Motion Controller) و یک نرم افزار تجاری مچ تری، استفاده شده و با انجام تنظیمات لازم، برای استفاده در ماشین فرز چهار محور حاضر، شخصی سازی شده است. این بُرد (شکل ۲)، یک دستگاه کنترل حرکت خارجی است که به پُرت اینترنت کامپیوتر متصل می شود. این بُرد، دستورات را از یک بسته نرم افزاری مچ تری (شکل ۳) می پذیرد و زنجیره های پالسی با کیفیت بسیار بالایی، تولید می کند که موتورهای پله ای و جهت دار را به حرکت در می آورد.



(a)



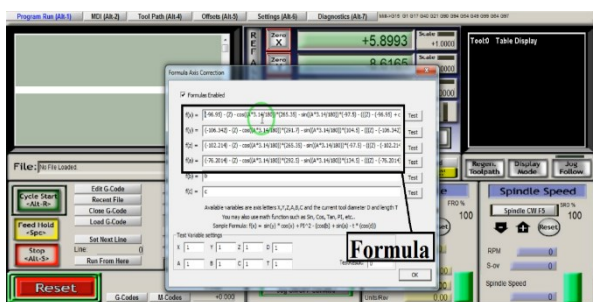
(b)

شکل ۱ (a) ساختار مکانیسم موازی و زنجیره سینماتیکی آن (b) سازه ماشین ابزار چهار درجه آزادی با سازوکار موازی

Fig. 1 (a) The structure of the parallel mechanism and its kinematic chain (b) Four-degree-of-freedom machine tool structure with parallel mechanism



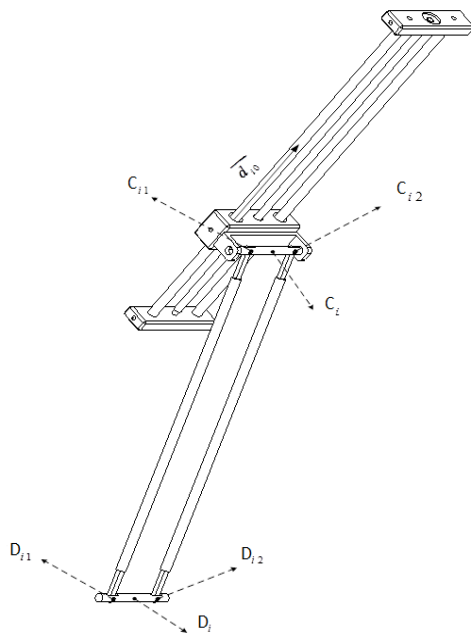
شکل ۲ بُرد کنترلی حرکتی مورد استفاده در ربات ماشین ابزار  
Fig. 2 Motion control board used in machine tool



شکل ۳ اعمال فرمول های تبدیل حرکت کارترین به جابجائی لغزنده ها در نرم افزار مچ تری

Fig. 3 Applying formulas for converting Cartesian motion to slider displacement in the Mach3 software





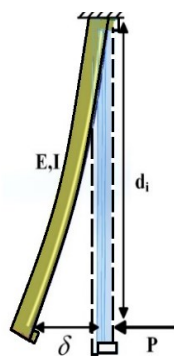
شکل ۴: شکل شماتیک محرکه مکانیسم و پایه‌های متصل به آن

Fig. 4 Schematic diagram of the mechanism and the bases connected to it.

با توجه به آنچه گفته شد، دو بخش از سازه که کمترین سفتی را دارند، در محاسبات سفتی در نظر گرفته شده‌اند که شامل بخش اول ریل‌ها و بخش دوم میله‌های متوازی‌الاضلاع هستند. در این قسمت، برای بدست آوردن سفتی ریل‌ها، با توجه به شکل ۴، می‌توان گفت که تغییرات نقطه  $C_{ij}$ ، مستقیماً به تغییرات ابعادی حاصل از اعمال نیروی محرکه‌ها وابسته می‌باشد. برای بدست آوردن ضریب سفتی لغزنده و ریل ( $K_s$ )، هرکدام از مجموعه پایه‌های دستگاه، به‌عنوان یک تیر یک سرگیردار در نظر گرفته می‌شوند (شکل ۵) و سفتی در این حالت، از رابطه پایه‌ای ۲ محاسبه می‌شود:

$$K_s = \frac{3EI}{d^3} \quad (2)$$

در رابطه ۲،  $E$  مدول الاستیسیته،  $I$  ممان اینرسی سطح مقطع تیر و  $d$  هم طول تیر یا همان موقعیت لغزنده بر روی ریل می‌باشد.



شکل ۵: شبیه سازی لغزنده و ریل بعنوان تیر یک سرگیردار

Fig. 5 Simulation of the slider and rail as a single-ended beam

### ۳-۲- تحلیل سینماتیکی مکانیسم ماشین ابزار موازی

مسئله سینماتیک معکوس مکانیسم چهار درجه آزادی پیشنهادی، محاسبه میزان جابجایی پایه‌های مکانیسم، نسبت به موقعیت مشخص سکوی متحرک می‌باشد. بنابراین، برای تعیین و محاسبه مقدار حرکت لازم هر کدام از ریل‌ها و به تناسب آن، میزان دوران هر کدام از موتورهای مربوط به آنها، بایستی محاسبات سینماتیک معکوس با مشخص شدن موقعیت سکوی متحرک به‌دست آید. روابط سینماتیکی مربوط به این مکانیسم، به‌همراه مراحل کالیبراسیون آن، در مقاله‌ای که توسط نویسندگان مقاله حاضر ارائه شده [۱۱]، بطور کامل توضیح داده شده است و بنابراین از بازنویسی آن صرف‌نظر شده است. پس از به‌دست آمدن روابط بین لغزنده‌ها با حرکت سکوی متحرک، اعمال فرمول‌های استخراج شده از سینماتیک معکوس، به نرم‌افزار مچ‌تری و سخت‌افزار کنترل حرکتی، انجام شده است (شکل ۳). نرم‌افزار مچ‌تری و بُرد کنترل حرکتی دستگاه، تنها قادر هستند به محورهای کارترزین، فرمانهای حرکتی ارسال کند. از آنجا که با حل سینماتیک معکوس جابجایی روابط بین جابجایی لغزنده‌ها ( $d_1, d_2, d_3$  و  $d_4$ ) با محورهای حرکتی اسپیندل ( $X, Y, Z$  و  $\theta$  زاویه میز حول  $X$ ) بدست می‌آید، می‌توان این فرمول‌ها را در نرم‌افزار مچ‌تری وارد کرد (شکل ۳). این نرم‌افزار، با بکارگیری جی‌کدهای حرکتی که از نرم‌افزار پاورمیل استخراج شده است، بر مبنای اطلاعات ورودی ( $X, Y, Z$  و  $\theta$  زاویه میز حول  $X$ ) و با اعمال فرمول ذکر شده، آنرا به به فرامین جابجایی لغزنده‌ها، تبدیل می‌کند. با این تبدیل، امکان حرکت سریع چهار لغزنده، با فرمانهای صادر شده از نرم‌افزار، فراهم می‌شود.

### ۴-۲- تحلیل سفتی مکانیسم ماشین ابزار موازی

در این قسمت، هدف دستیابی به روابط مربوط به سفتی مکانیسم می‌باشد، تا بتوان پارامترهای تأثیرگذار در دقت ماشینکاری دستگاه را در قسمتهای مختلف فضای کاری ماشین ابزار بدست آورد. در این روش، اجزاء مختلف سازه، به شکل فنر در نظر گرفته می‌شوند. این روش، بر اساس فرمول‌های کلاسیک مکانیک بوده و بسیار ساده است. رابطه سفتی با فرمول کلی (۱) تعریف می‌شود.

$$F = K \cdot \Delta x \quad (1)$$

ماتریس بدست آمده از این رابطه، به‌عنوان ماتریس سفتی ( $K$ ) شناخته می‌شود. در حل مسئله، چندین ساده‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در ابتدا باید توجه نمود که وارد نمودن تمام نیروها و تنش‌ها اعم از فشاری، کششی، پیچشی، خمشی و همچنین در نظر گرفتن سفتی برای تمام اجزاء مکانیسم، باعث می‌شود که روابط به شدت پیچیده و غیر قابل کنترل باشند. از طرفی، بسیاری از این ساده‌سازی‌ها، تأثیر زیادی بر کمیت سفتی ندارند. بنابراین، اجزائی از سازه مکانیسم مورد بررسی قرار می‌گیرند که دارای سفتی کمتری هستند و تغییر شکل‌های عمده در آنها اتفاق می‌افتد.

به این ترتیب می‌توان، رابطه بین  $dL$  و  $dC$  را بر اساس  $dX$  که متغیر تغییرمکان عملگر نهایی است، با استفاده از ماتریس ژاکوبین بدست آورد.

$$dL + dC = J_x dX \quad (۱۱)$$

با جاگذاری روابط (۶ و ۹) در رابطه ۱۱ می‌توان نوشت:

$$K_L^{-1} J_x^{-T} \begin{bmatrix} F_{ext} \\ M_{ext} \end{bmatrix} + K_s^{-1} J_x^{-T} \begin{bmatrix} F_{ext} \\ M_{ext} \end{bmatrix} = J_x dX \quad (۱۲)$$

بنابراین می‌توان  $dX$  را که به عنوان تغییرمکان‌های ناشی از نیرو و گشتاورهای وارده بر عملگر نهایی بدست آورد.

$$(J_x^{-1} K_L^{-1} J_x^{-T} + J_x^{-1} K_s^{-1} J_x^{-T}) \begin{bmatrix} F_{ext} \\ M_{ext} \end{bmatrix} = dX \quad (۱۳)$$

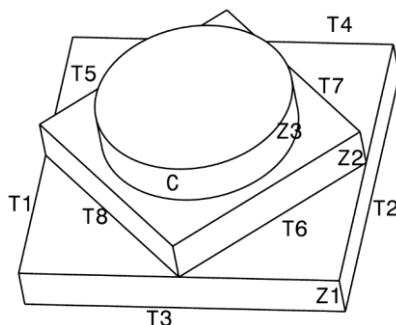
با توجه به رابطه ۱۳، می‌توان ماتریس سفتی ( $K$ ) را چنین بدست آورد:

$$K = (J_x^T K_L J_x + J_x^T K_s J_x) \quad (۱۴)$$

رابطه ۱۴، بیانگر ماتریس سفتی می‌باشد که رابطه بین تغییرشکل عملگر نهایی و نیروهای خارجی اعمالی را نشان می‌دهد.

## ۲-۵- ماشینکاری قطعه استاندارد نس در مناطق مختلف میز دستگاه

برای بررسی دقت ماشینکاری دستگاه فرز چهار محور بکار رفته در این مقاله، یک قطعه استاندارد نس، در پنج موقعیت مختلف فضای کاری ماشین ابزار (چهار گوشه و وسط میز) و در هر موقعیت با سه تکرار، ماشینکاری شده است (شکل ۱-الف) و قطعات حاصل از این ماشینکاری، برای انجام کنترل کیفی، شامل اندازه‌گیری ابعادی و هندسی، مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. یکی از استانداردهای رایج در بررسی ماشین‌های ابزار، NAS 979 [۲۲] است که توسط انجمن صنایع هوافضای آمریکا، در سال ۱۹۶۶ ایجاد شده است. هدف از این استاندارد، ارائه روشی یکسان، برای ارزیابی عملکرد ماشین‌ابزارهای معمولی و کنترل عددی و گزارش نتایج عملکرد واقعی آن‌ها می‌باشد. در این تحقیق نیز، برای بررسی کیفیت ماشینکاری دستگاه، از روش ماشینکاری این قطعه (شکل ۶) بهره گرفته شده است. سپس، پارامترهای ابعادی و هندسی متعدد، روی قطعه در نظر گرفته شده و مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۶ پارامترهای اندازه‌گیری ابعادی و هندسی قطعه نس

Fig. 6 Dimensional and geometric measurement parameters of the NAS part

## ۲-۶- طراحی و تولید چی‌کدهای استاندارد به وسیله نرم‌افزار پاورمیل

برای ماشینکاری قطعه استاندارد نس، از نرم‌افزار تجاری پاورمیل استفاده شده است. این نرم‌افزار، امکان تهیه اتوماتیک مسیر حرکت

می‌توان با استفاده از روابط نیرویی و با توجه به شکل ۴، چنین نوشت:

$$dC = M \begin{bmatrix} F_{ext} \\ M_{ext} \end{bmatrix} \quad (۳)$$

$F_{ext}$  و  $M_{ext}$  مولفه‌های نیرو و ممان خارجی می‌باشند که از طریق سکوی متحرک به بازوهای متوازی‌الاضلاع وارد می‌شوند و  $dC$  به عنوان تغییرات نقطه  $C_i$  در راستای پایه می‌باشد که  $dC$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$dC = [dC_1 \ dC_2 \ dC_3 \ dC_4]^T \quad (۴)$$

$dC_1$  و  $dC_4$  تغییرات نقطه  $C_i$  در پایه  $i$  ام می‌باشد. در رابطه ۳،  $M$  به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$M = K_s^{-1} J_x^{-T} \quad (۵)$$

$K_s$  به عنوان سفتی محرکه و  $J_x$  نیز به عنوان ماتریس ژاکوبین می‌باشد. ماتریس ژاکوبین، قبلاً در روابط سینماتیکی بدست می‌آید. در نهایت با توجه به روابط ۳ و ۵ می‌توان تغییرات نقطه  $C_i$  را بدین صورت بدست آورد:

$$dC = K_s^{-1} J_x^{-T} \begin{bmatrix} F_{ext} \\ M_{ext} \end{bmatrix} \quad (۶)$$

در بخش دوم، برای محاسبه سفتی بازوهای متوازی‌الاضلاع، تغییرشکل‌های ایجاد شده بر اثر اعمال نیروهای خارجی در میله یا پایه‌ها که ضعیف‌ترین قسمت‌های سازه محسوب می‌شوند، مورد بررسی قرار می‌گیرد. تنش در هر میله به صورت فشاری-کششی در نظر گرفته شده است. برای تعیین نیروهای پایه‌ها، از روابط زیر استفاده می‌شود. ضریب سفتی کششی-فشاری حقیقی هر جزء، می‌تواند با آزمایش عملی مشخص گردد، با این حال، سفتی تقریبی هر پایه و مفاصل با شبیه‌سازی پایه بعنوان یک میله قابل انعطاف، به ترتیب زیر قابل محاسبه می‌باشد

$$K_l = \frac{E_e A_e}{l_e} \quad (۷)$$

در این رابطه  $E_e$  مدول الاستیسیته،  $A_e$  سطح مقطع میله‌ها و  $l_e$  هم طول هر جزء می‌باشد. بنابراین تغییرات طول،  $dL$  نسبت به نیروی خارجی بدین صورت محاسبه می‌گردد.

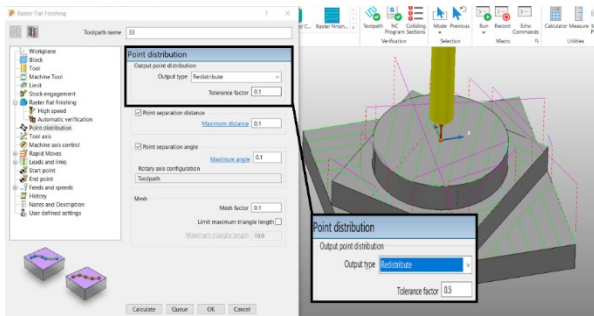
$$dL = K_L^{-1} F_b \quad (۸)$$

در نهایت با توجه به روابط **Error! Reference source not found.** و **Error! Reference source not found.**، رابطه نهایی برای تغییرات طول پایه بر اثر نیروی اعمالی بدین صورت محاسبه می‌گردد:

$$dL = K_L^{-1} J_x^{-T} \begin{bmatrix} F_{ext} \\ M_{ext} \end{bmatrix} \quad (۹)$$

در نهایت، برآیند جابجایی‌های عملگر نهایی در اثر تغییرشکل در طول پایه‌ها و موقعیت محرکه‌ها، قابل محاسبه می‌باشد. برآیند تغییرشکل‌های اجزای مختلف بر روی نقطه مشخصی از عملگر نهایی،  $dX$  را می‌توان با تعریف یک متغیر مستقل، به عنوان تغییرمکان عملگر نهایی، به ترتیب رابطه زیر نشان داد.

$$dX = [dx \ dy \ dz \ d\theta_x \ d\theta_y \ d\theta_z]^T \quad (۱۰)$$



شکل ۸ انتخاب استراتژی تبدیل منحنی سهمی به خطوط کوتاه در پرداخت کاری ثابت Z

Fig. 8 Choosing a strategy for converting a parabolic curve into short lines at a constant Z-axis



شکل ۹ ماشینکاری قطعه نس مطابق جی‌کدهای بدست آمده

Fig. 9 Machining the part according to the obtained G-codes

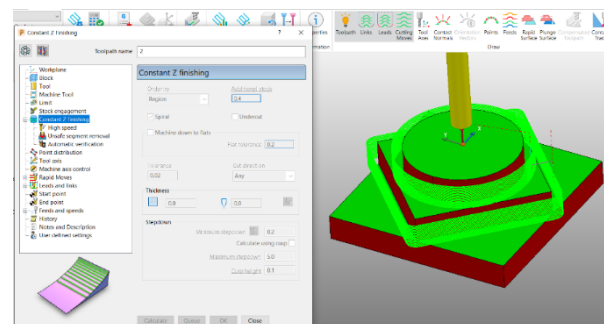
## ۲-۲- اندازه‌گیری ابعادی و هندسی و صافی سطح قطعه آزمایش نس با دستگاه CMM

برای بررسی دقت قطعات نس ماشینکاری شده با دستگاه فرز چهار محور، اندازه‌گیری ثلرانس‌های ابعادی و هندسی آن، شامل، توازی، تعامد، تختی، استوانه‌ای بودن و زاویه‌دار بودن، توسط دستگاه اندازه‌گیری مختصات CMM زایس انجام شده است. تکرارپذیری کاوش این دستگاه حدود ۲ میکرومتر می‌باشد (شکل ۱۰). همچنین، صافی سطح قطعات نس با دستگاه زبری‌سنج اندازه‌گیری شده است (شکل ۱۱). تمامی قطعات ماشینکاری شده در این مرحله، مطابق شکل ۱۲ مورد اندازه‌گیری قرار گرفته‌اند.

ابزار و جی‌کدهای لازم برای ماشینکاری چهار محور را فراهم می‌کند. مراحل تهیه جی‌کد استاندارد برای ماشینکاری قطعه نس، در دستگاه فرز چهار محور، به این شرح است که در ابتدا، مطابق شکل ۶، قطعه اصلی به محیط نرم‌افزار پاورمیل بارگذاری، در مرحله اولیه قطعه خام تعیین و مختصات آن مشخص می‌شود. در مرحله بعد، نوع استراتژی ماشینکاری برای داشتن صافی سطح مطلوب (در اینجا استراتژی با عنوان، پرداخت کاری ثابت Z) انتخاب و با انتخاب سطوح ماشینکاری قطعه، مطابق پارامترهای انتخاب شده در جدول ۱، تنظیم و مسیر حرکت ابزار بدست می‌آید. با توجه به اینکه ماشین‌ابزار مورد استفاده در این مقاله، از نوع ربات‌های با سازوکار موازی است و طبیعتاً در حرکت خطی، دارای خطای حرکتی غیرخطی است، برای حذف آن، از تبدیل حرکت سهمی به حرکت‌های کوتاه‌خطی استفاده شده است (شکل ۸). پس از اعمال این استراتژی، خطوط سهمی مسیر طرح‌ریزی شده، به خطوط منقطع کوتاه، تبدیل می‌شود و این باعث ایجاد صافی سطح بهتر و حذف خطای غیرخطی حرکتی مخصوص ماشین‌ابزارهای با سازوکار موازی می‌شود. پس از بدست آمدن جی‌کدهای مسیر حرکت ابزار از نرم‌افزار پاورمیل، ماشینکاری قطعه در چهار گوشه میز و مرکز میز مطابق شکل ۹ انجام شده است.

جدول ۱ پارامترهای برش در ماشینکاری قطعه نس  
Table 1 Cutting Parameters in Machining of NAS Part

| Machining Parameters |                  |
|----------------------|------------------|
| 75(m/min)            | Vc Cutting Speed |
| 3000 (rpm)           | n Spindel Speed  |
| 0.6(mm)              | Z Depth of Cut   |



شکل ۷ ایجاد مسیر حرکت ابزار با استفاده از نرم‌افزار پاورمیل

Fig. 7 Creating a toolpath using the PowerMill Software



عوامل موفقیت در ماشینکاری قطعات با صافی سطح بالا به علت بکارگیری استراتژی ماشینکاری خاص در نرم افزار پاورمیل، اشاره خواهد شد و در نهایت با بیان دلایل، به نتایج دقت های ابعادی، هندسی و صافی سطح حاصل از ماشینکاری قطعات استاندارد در مناطق مختلف فضای کاری، اشاره خواهد شد.

### ۳-۱- تحلیل نتایج کنترل سینماتیکی ماشین ابزار

با توجه به اینکه ربات های صنعتی با سازوکار موازی، معمولاً از کنترلر های صنعتی مخصوص به این ربات ها استفاده می کنند، در این تحقیق، از یک بُرد کنترل حرکتی ارزان قیمت و نرم افزار مچ تری که عموماً در ماشین های CNC چوب کاربرد دارد، استفاده شده است. در واقع، پس از سفارشی کردن عملکرد بُرد کنترلی، برای مکانیزم موازی حاضر، فرمول های سینماتیک معکوس مکانیزم به نرم افزار مچ تری وارد و کنترلر مورد استفاده، بدون درنگ، جی کدهای استاندارد ورودی از نرم افزار تجاری پاورمیل را برای حرکت مکانیزم چهار درجه آزادی و ماشینکاری قطعات، اجرا می کند. پیاده سازی این نوع کنترل، روی یک ربات ماشین ابزار موازی که حرکات بازو های ربات را با دقت بالایی، مشابه سایر دستگاه های ماشین- ابزار CNC انجام می دهد، می تواند موجب ساده سازی و هموار شدن مسیر استفاده از ربات های ماشین ابزار موازی با روش هایی ساده، کم هزینه و اثربخش گردد.

### ۳-۲- تحلیل نتایج سفتی سازه ماشین ابزار

با استخراج روابط مربوط به سفتی پایه ها و سکوی متحرک، محاسبه سفتی ابزار با برنامه ای که به زبان برنامه نویسی متلب (Matlab) نوشته شده، در نقاط مختلف فضای کاری، محاسبه و طی نمودارهایی ترسیم شده است. با تغییر موقعیت سکوی متحرک مکانیسم در صفحه افقی XY و در نتیجه تغییر موقعیت لغزنده روی ریل ها، سفتی معادل زنجیره ها تغییر پیدا کرده و در نتیجه، ماتریس سفتی سکوی متحرک عوض می شود. تغییر موقعیت سکوی متحرک در صفحه افقی ( $Z = -700$ ) با ( $X = -150 \sim 150$ ) و ( $Y = -150 \sim 150$ ) باعث پایین آمدن برخی لغزنده ها روی ریل و بالا رفتن لغزنده های دیگر می شود که این تغییرات سفتی که نهایتاً در سفتی سکوی متحرک تاثیر می گذارد، در شکل ۱۳ تا ۱۶ نشان داده شده است. بطوریکه از منحنی های سفتی مشهود است، سفتی در گوشه های فضای کاری از حدود ۳۰٪ تا ۵۰٪ کاهش پیدا می کند.



شکل ۱۰ اندازه گیری قطعه نس با دستگاه مختصات سه بعدی (CMM)

Fig. 10 Measuring a part with a 3D Coordinate Measuring Machine (CMM)



شکل ۱۱ اندازه گیری صافی سطح قطعه نس

Fig. 11 NAS part surface Roughness measurement

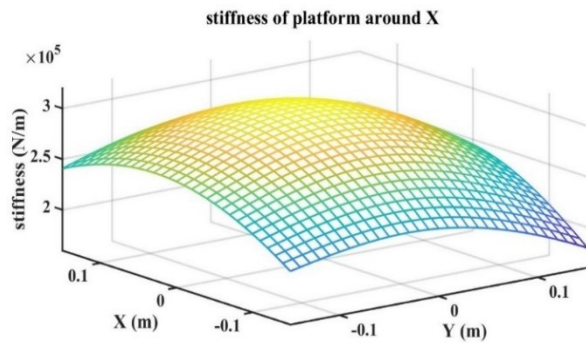


شکل ۱۲ قطعات ماشینکاری شده نس در مرحله اندازه گیری

Fig. 12 NAS machined parts in the measurement phase

### ۳- بحث و تحلیل نتایج

در این بخش از مقاله، در خصوص نتایج حاصل از عملکرد یک کنترلر حرکتی و نرم افزار مچ تری در ماشین ابزار موازی حاضر، بحث خواهد شد. همچنین، نتایج تحلیل های سینماتیکی و سفتی انجام شده روی ماشین ابزار در فضای کاری آن ذکر و نکات کلیدی در استفاده از فضای کاری مفید آن، معرفی خواهد شد. سپس، به



شکل ۱۶ تغییرات سفتی معادل سکوی متحرک حول محور X در صفحه افقی XY

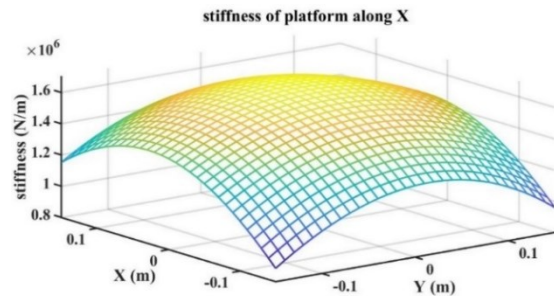
Fig. 16 Equivalent stiffness changes of the moving platform around the X axis in the horizontal XY plane

### ۳-۳- نتایج استراتژی خطی‌سازی حرکتی مکانیسم موازی

از آنجا که یکی از معایب بزرگ ربات‌های موازی، خطاهای غیرخطی حرکتی آنها می‌باشد و این خطا با تقسیم مسیرهای حرکتی بلند به خطوط حرکتی کوتاه‌تر قابل حل است، در این تحقیق، از یک استراتژی ویژه موجود در نرم‌افزار تجاری پاورمیل، برای تقسیم‌بندی مسیر حرکت به تکه‌های کوچک، استفاده شده است. با توجه به آنچه در بخش ۲-۶ گفته شد، استراتژی تبدیل مسیر حرکت منحنی سهمی به قطعات خطی کوچک‌تر، در عمل بسیار اثربخش بود و با استفاده از این استراتژی تولید مسیر حرکت ابزار، حرکت‌های غیرخطی ابزار که قبلاً بدون استفاده از این استراتژی کاملاً مشهود بود، به حرکت‌های خطی تبدیل شد و خطاهای ناشی از این غیرخطی مکانیسم کاملاً رفع شد.

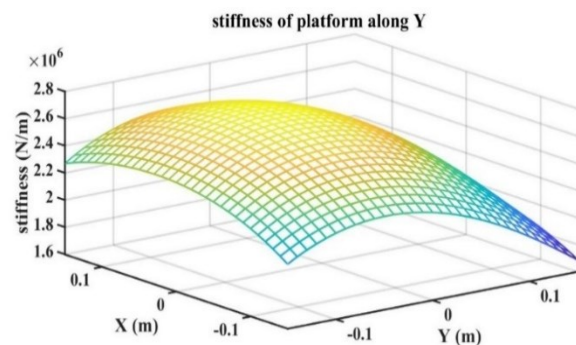
### ۳-۴- نتایج دقت‌ابعادی و هندسی و صافی‌سطح قطعات ماشینکاری شده نس

در این بخش، به بررسی نتایج اندازه‌گیری ابعادی و هندسی قطعات ماشینکاری شده، در پنج منطقه از فضای کاری ماشین‌ابزار پرداخته شده است. تمام این کمیت‌ها، حاصل میانگین‌گیری از نتایج اندازه‌گیری پارامترهای سه قطعه‌ی ماشینکاری شده در هر منطقه می‌باشد. در شکل‌های ۱۷ تا ۱۹، به ترتیب برخی از خطاهای ابعادی، تعامد و تختی قطعات نس ماشینکاری شده در مناطق پنجگانه، نشان داده شده است. نتایج اندازه‌گیری زبری‌سطح برخی سطوح مشخص شده در قطعه نس نیز در شکل ۲۰ نشان داده شده است. بطوریکه از نتایج اندازه‌گیری‌های ابعادی و هندسی مشهود است، خطاها در مناطق میانی میز در بیشترین مقدار در حدود ۰/۰۴ میلی‌متر و در قسمت‌های حاشیه‌ای و در چهار منطقه اطراف دو برابر این مقدار، یعنی حدود ۰/۰۸ میلی‌متر مشاهده می‌شود. تختی سطح، و زبری سطح دو پارامتر مربوط به بافت‌سطحی (Surface Texture)، می‌باشند که با توجه به اینکه در پرداخت کاری این پارامترهای سطحی شکل می‌گیرد، بنابراین در مقدار عمق‌بار کمتر



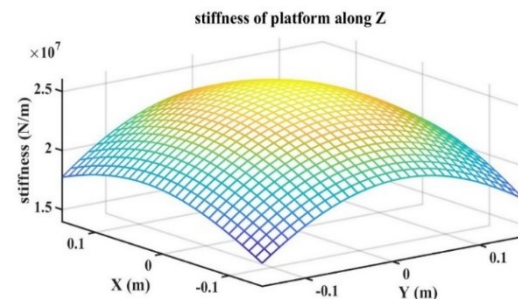
شکل ۱۳ تغییرات سفتی معادل سکوی متحرک در جهت X در صفحه افقی XY

Fig. 13 Equivalent stiffness changes of the moving platform in the X direction in the horizontal XY plane



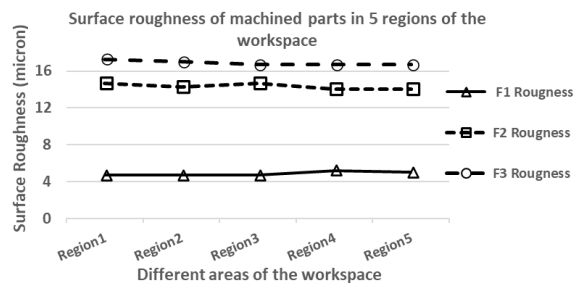
شکل ۱۴ تغییرات سفتی معادل سکوی متحرک در جهت Y در صفحه افقی XY

Fig. 14 Equivalent stiffness changes of the moving platform in the Y direction in the horizontal XY plane



شکل ۱۵ تغییرات سفتی معادل سکوی متحرک در جهت Z در صفحه افقی XY

Fig. 15 Equivalent stiffness changes of the moving platform in the Z direction in the horizontal XY plane



شکل ۲۰ زبری سطوح قطعات ماشینکاری شده در ۵ منطقه از فضای کاری

Fig. 20 Surface roughness of machined parts in 5 regions of the workspace

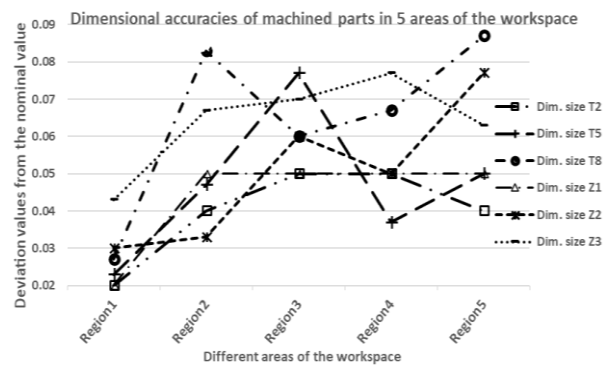
#### ۴- نتیجه گیری

در این مقاله، از یک کنترلر نیمه صنعتی و نرم افزار ارزان قیمت مچ-تری که برای دستگاه های CNC معمول کاربرد دارد، برای کنترل ربات ماشین ابزار چهار درجه آزادی استفاده شده است. روابط حاصل از تحلیل سینماتیکی مکانیسم و ضرایب اصلاحی حاصل از نتایج کالیبراسیون، در نرم افزار مچ-تری اعمال شده است و با استفاده از قابلیت سیستم کنترل حرکتی مچ-تری و سازگاری آن با فرامین استاندارد و جی-کدهای نرم افزار تجاری پاورمیل، امکان اجرای استراتژی های پیچیده چهارمحور نرم افزار پاورمیل برای ماشین ابزار معرفی شده در این مقاله فراهم شده است. همچنین، با استفاده از استراتژی پرداخت کاری ثابت Z، در نرم افزار پاورمیل، خطوط سهمی مسیر طرح ریزی شده، به خطوط منقطع کوتاه، تبدیل شده است که این قابلیت، باعث حذف خطاهای غیرخطی حرکتی مکانیسم های موازی و بخصوص ماشین ابزار این تحقیق شده است. این استراتژی، نقش بسزایی در ماشینکاری تخت و با صافی-سطح بالای سطوح قطعات ماشینکاری شده، ایفا کرده است.

خطاهای مشاهده شده در نمودارها (خطاهای حدود دهم میلی-متری) به دلیل استفاده از ریل های لغزشی سنتی می باشد که برای افزایش دقت حرکتی، استفاده از ریل های غلطشی و ضدلغزش (Anti-Backlash) اجتناب ناپذیر می باشد.

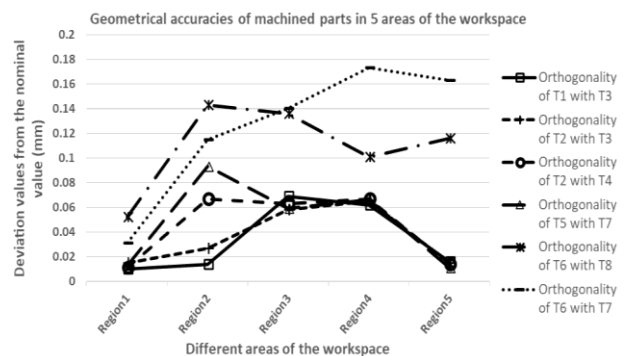
در این تحقیق، همچنین، تحلیل سفتی سازه ماشین ابزار، برای شناسایی نقاط قوت و ضعف فضای کاری و تأثیر آن در کیفیت ماشینکاری قطعات، با انجام ماشینکاری و آزمایش های تجربی روی قطعه ای استاندارد نس، مطالعه شده است. نتایج این تحلیل، همخوانی معناداری بین دقت و صافی سطح ماشینکاری با میزان سفتی سازه مکانیسم در مناطق مختلف فضای کاری را نشان داده است. بطوریکه از نتایج تحلیل و آزمایش تجربی مشهود است، سفتی در وسط میز بیشترین مقدار و با رفتن به حاشیه میز کار دستگاه، به حداقل خود می رسد. اثر کاهش سفتی در گوشه ها، بطور مستقیم، در دقت ابعادی و هندسی پارامترهای ماشینکاری موثر بوده و کاهش دو برابری دقت ها را بطور میانگین از حدود ۰/۰۴ میلی متر به حدود ۰/۰۸ میلی متر به همراه داشته است.

و نیروهای ماشینکاری کمتری بوجود می آید. در نتیجه، هرچه نیروها کمتر باشد، تأثیر کمیت سفتی سازه در آن کمتر خواهد بود. بنابراین دیده می شود که میزان تختی و صافی سطح در مناطق مختلف فضای کاری نسبتاً یکسان و متأثر از سفتی سازه نبوده است.



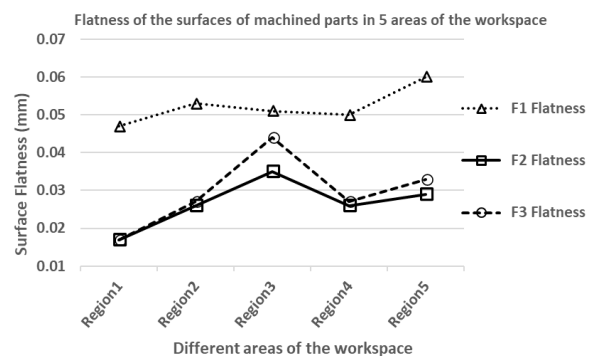
شکل ۱۷ دقت های ابعادی قطعات ماشینکاری شده در ۵ منطقه از فضای کاری

Fig. 17 Dimensional accuracies of machined parts in 5 areas of the workspace



شکل ۱۸ تolerانس هندسی تعامد قطعات ماشینکاری شده در ۵ منطقه از فضای کاری

Fig. 18 Geometric tolerance of orthogonality of machined parts in 5 regions of the workspace



شکل ۱۹ تolerانس هندسی تختی قطعات ماشینکاری شده در ۵ منطقه از فضای کاری

Fig. 19 Flatness geometric tolerance of machined parts in 5 regions of the workspace

Proceedings, vol. 45, pp. 3213-3218, 2021. DOI:10.1016/j.matpr.2020.12.376

[11] M. Azka, K. Yamada, "Influence of tool Posture and Position on Stability in Milling with Parallel Kinematic Machine Tool," The International Journal of Advanced-Precision Engineering and Manufacturing, vol. 21, pp. 2359-2373, Oct. 2020. DOI:10.22201/icat.24486736e.2022.20.1.1278

[12] Russo, M., Zhang, D., Liu, X.-J., & Xie, Z. A review of parallel kinematic machine tools: Design, modeling, and applications. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 196, 104118, 2024. DOI:10.1016/j.ijmachtools.2024.104118

[13] Hanliang Fang, Jian Wang, Shuyi Ge, Fufu Yang, Jun Zhang. Stiffness evaluation and experimental test of a novel redundantly actuated parallel machining robot. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 39, 100090, 2026. DOI:10.1016/j.cjme.2025.100090

[14] Kratěna, T., Vavruška, P., Švéda, J., & Zeman, P. Workpiece position optimization in robotic multi-axis machining. Results in Engineering, 27, 106421, 2025. DOI:10.1016/j.rineng.2025.106421

[15] Dambly, V., Olivier, B., Rivière-Lorphèvre, É., Ducobu, F., & Verlinden, O. Feed rate optimization scheme in robotic machining operations for dynamic error compensation. Procedia CIRP, 133, 412-417, 2025. DOI:10.1016/j.procir.2025.02.071

[16] Dantinne, H., Dambly, V., Verlinden, O., Ducobu, F., Rivière-Lorphèvre, E., & Olivier, B. Performance and efficiency of co-simulation for milling operations in robotic machining. Procedia CIRP, 133, 114-119, 2025. DOI:10.1016/j.procir.2025.02.021

[17] Peta, K., Włodarczyk, J., & Maniak, M. Analysis of trajectory and motion parameters of an industrial robot cooperating with a numerically controlled machine tool. Journal of Manufacturing Processes, 101, 1332-1342, 2023. DOI:10.1016/j.jmapro.2023.06.063

[18] NAN, J., YU, S., LIU, C., CHEN, M., & SUN, Y. Online compensation of contour errors in robotic milling based on multi-source characterization and path reconstruction. Chinese Journal of Aeronautics, 103827, 2025. DOI:10.1016/j.cja.2025.103827

[19] Abed, M., Mohammad, A., Axinte, D., Gameros, A., & Askew, D.. Digital-twin-assisted mlti-stage machining of thin-wall structures using interchangeable robotic and human-assisted automation. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 97, 103077, 2026. DOI:10.1016/j.rcim.2025.103077

[20] Beaulieu, P.-L., Laliberté, T., Foucault, S., & Gosselin, C.. Synthesis and prototyping of a backdrivable parallel robot for metal finishing tasks. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 93, 102934, 2025. DOI:10.1016/j.rcim.2024.102934

[21] M. Mahboubkhah, M. Tayyari, "Calibration and Error Compensation of a 4-DOF Milling Machine with Parallel Mechanism," The international journal of ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 23(05), 317-322, 2023. DOI: 10.22034/mme.23.5.317

[22] National Aerospace Standard: NAS 979 Uniform Cutting Tests, National Standards Association.

از آنجا که پارامترهای بافت سطح (تختی، اعوجاج و زبری)، متأثر از شرایط عملیات پرداخت کاری می‌باشد و در مرحله‌ی نهایی ماشینکاری انجام شده و مقدار نیروهای پرداخت کاری پائین است، تأثیر سفتی فضای کاری در کیفیت تختی و صافی سطح ناچیز بوده و نتایج آزمون‌های تختی و صافی سطح قطعات ماشینکاری شده در مناطق مختلف، صحت این موضوع را اثبات نموده است.

**تأییدیه اخلاقی:** محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیرایرانی منتشر نشده است.

**تعارض منافع:** تعارض منافی برای اظهار وجود ندارد.

## منابع

- [1] T. Huang, X. Zhao, and D. J. Whitehouse, "Stiffness estimation of a tripod-based parallel kinematic machine," Robot. Autom. IEEE Trans., vol. 18, no. 1, pp. 50-58, 2002. DOI:10.1109/70.988974
- [2] C. Corradini, J. Fauroux, S. Krut, and O. Company, "Evaluation of a 4-Degree of Freedom Parallel Manipulator Stiffness," Proc. 11th World Congr. Mech. Mach. Sci., p. 5, 2003.
- [3] C. Gosselin, "Stiffness Mapping for Parallel Manipulators," IEEE Trans. Robot. Autom., vol. 6, no. 3, pp. 377-382, 1990. DOI: 10.1109/70.56657
- [4] M. Svinin, M.M. Hosoe, S. Uchiyana, "On the stiffness and stability of Gough-Stewart platforms," IEEE Int. Conf. Robot. Autom., pp. 3268-3273, 2001. DOI:10.1109/ROBOT.2001.933122
- [5] J. C. Fauroux, "A method for modeling analytical stiffness of a lower mobility parallel manipulator," Proc.- IEEE Int. Conf. Robot. Autom., vol. 2005, pp. 3232-3237, 2005. DOI:10.1109/ROBOT.2005.1570608
- [6] ا. رضایی، ع. اکبرزاده توتونچی، "تحلیل سینماتیک معکوس و مستقیم یک ربات موازی صفحه ای جدید برای استفاده در فرز cnc پنج محور با ساختار ترکیبی" دهمین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید ایران، ۱۳۸۸.
- [7] J. L. Xiao, S. Lei Zhao, "Simultaneous Calibration of Multicoordinates for a Dual-Robot System by Solving the AXB = YCZ Problem," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 105, pp. 4071-4084, 2019. DOI:10.1109/TRO.2020.3043688
- [8] H.T. Pham, "Optimization Desing of a 2-DOF Compliant Parallel Mechanism Using NSGA-2 Algorithm for Vibration-Assisted Milling," Proceedings of the International Conference on, Physics and Mechanics of new Materials, pp.529-539, Jun. 2020.
- [9] Z. Chong, F. Xie, X. Liu, "Design of the parallel mechanism for a hybrid mobile robot in wind turbine blades polishing," International Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol. 61, Feb. 2020. DOI:10.1016/j.rcim.2019.101857
- [10] S. Darvekae, A. Koteswara, "Machining capability of a 2-DOF parallel kinematic machine tool and conventional CNC milling machine." Materials Today: