



# Calibration of the 4-Dof Milling Machine Based on Parallel Mechanism



## ARTICLE INFO

### Authors

Mahboubkhah M.<sup>1\*</sup>,  
Taiari M.<sup>1</sup>,  
Akhbari S.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Mechanical Engineering Department,  
University of Tabriz, Tabriz, Iran.

### \* Correspondence

Address: Mechanical Engineering  
Department, University of Tabriz,  
Tabriz, Iran.  
mahboobkhah@tabrizu.ac.ir

### How to cite this article

Mahboubkhah M, Taiari M, and Akhbari S. Calibration of the 4-Dof Milling Machine based on parallel mechanism. Modares Mechanical Engineering. Proceedings of 2<sup>nd</sup> Iranian National Conference on Advanced Machining and Machine Tools (CAMMT). 2022;22(10):155-159.

## ABSTRACT

The milling machines based parallel mechanisms with more than 3-dof. have high stiffness and flexibility in machining of the complicated workpieces. Accuracy and repeatability of these machines will be enhanced by applying calibration procedures. In this paper a 4-Dof milling machine based parallel mechanism was introduced. The required tests to find positioning errors have been done. After applying error compensation process on controller, the positioning errors of each of the rails were measured again. It was resulted the positioning errors of rails have been decreased and the accuracy of milling machine was enhanced.

**Keywords** Milling Machine, Parallel Mechanism, Calibration

ماهنامه علمی مهندسی مکانیک مدرس، ویژه نامه مجموعه مقالات دومین کنفرانس ملی ماشین‌کاری و ماشین‌های ابزار پیشرفته. مهر ۱۴۰۱، دوره ۲۲، شماره ۱۰، صفحه ۱۵۹-۱۵۵.



## کالیبراسیون یک دستگاه فرز چهار درجه آزادی با ساز و کار موازی



### چکیده

ماشینهای فرز با ساز و کار موازی و درجات بیش از سه محور، از سفتی و انعطاف‌پذیری بالایی در ماشینکاری قطعات پیچیده برخوردار می‌باشند. کالیبراسیون این نوع از دستگاهها افزایش دقت و تکرارپذیری قطعات تولیدی را امکان‌پذیر می‌سازد. در این مقاله یک دستگاه فرز چهار درجه آزادی با ساز و کار موازی معرفی و آزمایش‌های لازم برای تشخیص خطاهای حرکتی ریل‌های آن انجام شده است. پس از تعیین میزان خطاهای هر محور حرکتی و سپس اعمال ضرایب خطایی در کنترلر دستگاه، مجدداً خطاهای حرکتی دستگاه اندازه‌گیری شده است. اندازه‌گیری خطاها پس از انجام کالیبراسیون نشان داده که خطاهای دستگاه به میزان چشمگیری کاهش داده شده است. این فرآیند باعث افزایش دقت در محورهای حرکتی دستگاه فرز شده است.

### مشخصات مقاله

نویسنده‌ها  
مهران محبوب‌خواه<sup>۱\*</sup>  
مهدی طباری کلجاهی<sup>۱</sup>  
سینا اخباری<sup>۱</sup>  
<sup>۱</sup> دانشکده فنی مهندسی مکانیک،  
دانشگاه تبریز، تبریز

### \* نویسنده مسئول

آدرس:  
mahboobkhah@tabrizu.ac.ir

**کلیدواژه‌ها** مکانیزم موازی، دستگاه فرز، کالیبراسیون

## ۱- مقدمه

امروزه، اهمیت رباتیک در زندگی روزمره بر کسی پوشیده نیست. علم رباتیک به لطف کاربردهای وسیع در کشاورزی، صنعت، خانه، بیمارستانها و غیره، به طور روزافزون در حال توسعه می‌باشد. ربات‌های صنعتی به دو شاخه اصلی، با عناوین مکانیزم‌های سری و موازی تقسیم می‌شوند. مکانیزم‌های موازی از چندین زنجیره سینماتیکی سری تشکیل شده‌اند که یک سکو یا فریم یا پایه ثابت را به یک سکو متحرک یا اند افکتور یا متحرک نهایی متصل می‌سازند. ربات‌های نوع سری در قابلیت تحمل بارهای سنگین و برخورداری از فضای کاری به مراتب بزرگتر نسبت به ربات‌های موازی برتری دارند. با وجود ویژگی منفی فضای کاری کوچک، مکانیزم‌های موازی دارای سرعت و دقت بالایی هستند. همچنین برخلاف مکانیزم‌های سری، سفتی بیشتر و در نتیجه مانورپذیری و عملکرد دینامیکی بهتر از ویژگی‌های مثبت ربات‌های موازی محسوب می‌شود[1].

به دلیل تمایل صنعت به سمت ماشینکاری با سرعت بالا، تقاضا برای توسعه ماشین‌های ابزار با عملکرد دینامیکی مناسب، با ویژگی‌های سفتی بالا و جرم حرکتی کم، افزایش یافته است[2]. به طبع آن، ماشین‌های ابزار بر پایه مکانیزم‌های موازی در سال‌های اخیر به طرز گسترده‌ای توسعه یافته‌اند. روپن و آرای[3] دقت مکانیزم استوارتی را که برای مانورپذیری بیشتر طراحی شده بود را آزمایش کردند. آنها در آنالیز خود خطای طولی محرکها و خطای موقعیتی مفاصل را مد نظر قرار دادند. صدقیان وان و احمان[4] در مقاله خود مدل خطای درجه اول و دوم را برای مکانیزم استوارت مورد بررسی قرار دادند. در این مقاله خطای موقعیتی مفاصل، نه پارامتر خطایی برای محرک‌ها و خطای حرکتی مفاصل کروی مد نظر گرفته شده است.

در مجموع تحقیقات فراوانی برای اندازه‌گیری خطاها و جبران آنها و کالیبراسیون ماشین‌ابزارهای موازی انجام گرفته است. در این مقاله نیز با توجه به وجود نوآوری در طراحی مکانیزم موازی روش اندازه‌گیری خطی برای یافتن خطاهای محورهای حرکتی و سپس اصلاح آن‌ها با اعمال در کنترلر دستگاه انجام شده است. مراحل اندازه‌گیری و نتایج اصلاح خطاها که بصورت تجربی انجام و باعث افزایش دقت حرکتی دستگاه شده است در ادامه توضیح داده شده است.

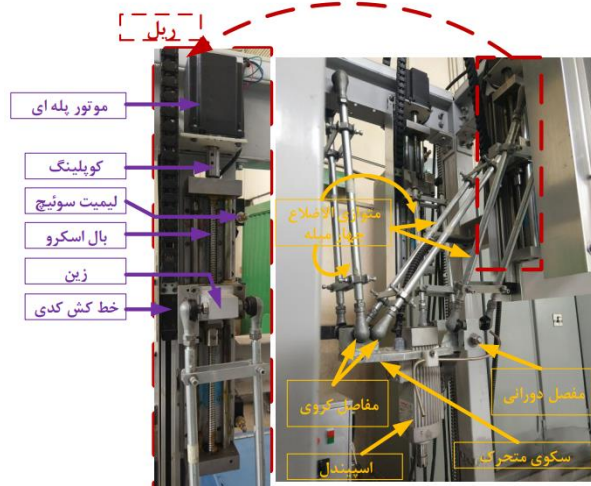
## ۲- معرفی مکانیزم موازی چهار درجه آزادی

همانطور که در شکل ۱ نمایش داده شده، ربات حاضر که از یک مکانیزم موازی بهره می‌گیرد دارای چهار زنجیره سینماتیکی هست که به یک پلت فرم نهایی متصل می‌باشند. مکانیزم حاضر از نوع ربات موازی با طول پایه ثابت می‌باشد که طول پایه ثابت باعث سفتی هر چه بیشتر مکانیزم می‌شود. مکانیزم موازی این

ربات چهار درجه آزادی را تأمین می‌کند که شامل جابجایی در محورها  $x$ ،  $y$ ،  $z$  و دوران حول محور افقی  $x$  می‌باشد. وجود درجه آزادی چهارم باعث افزایش مانورپذیری و کارایی مکانیزم در مقایسه با مکانیزم‌های سه درجه آزادی می‌شود. این مکانیزم به واسطه دو نوع زنجیر غیرهمسان  $PR(Pa)U-2-PR(Pa)R2$ ،  $R$ ،  $Pa$ ،  $U$  و  $Pa$  به ترتیب نشان دهنده مفصل کشویی، مفصل لولایی، متوازی‌الاضلاع و مفصل یونیورسال هستند. برای اتصال سکوی متحرک به سکوی ثابت، سیستم متوازی‌الاضلاع مدنظر قرار گرفته است. این سیستم اتصال بین دو مفصل را توسط دو میله موازی ممکن می‌سازد که به نوبه خود باعث بالا رفتن سفتی اتصال می‌گردد. از طرفی با زیادتیر بودن تعداد لینک‌ها سفتی کل مکانیزم نیز افزایش می‌یابد. همچنین تسمه‌هایی که دو بازوی هر لینک متوازی‌الاضلاع را به هم متصل کرده‌اند که این امر باعث سلب درجه آزادی مفصل‌های گروهی حول محور  $z$  شده و باعث تبدیل این مفصل‌ها به مفصل‌های یونیورسال گردیده است. در نتیجه، بازوهای متوازی‌الاضلاع همیشه موازی یکدیگر نگه داشته می‌شوند. چهارچوب اصلی مکانیزم نیز به گونه‌ای طراحی شده است که بهینه‌ترین فضای کاری عاری از نقاط تکین فراهم کند. در شکل ۲ مکانیزم ساخته شده از ماشین فرز چهار درجه آزادی نمایش داده شده است.

## ۳- اجزاء مکانیکی و الکتریکی ماشین فرز

حرکت کشویی‌ها روی ریل‌های راهنما به واسطه کویلینگ بال اسکرو به موتور پله‌ای همانطور که در شکل ۳ مشخص بوده، فراهم شده است. فرمان حرکتی ابتدا بسته به نوع مسیر و طرح‌ریزی در رایانه پردازش شده و تبدیل به جابجایی موتورها شده و از طریق ارتباط شبکه یو دی پی به ریزپردازنده با معماری آرم ۸۴ مگاهرتزی به نام آردوینو فرستاده می‌شود. سپس، این ریزپردازنده داده‌های دریافت شده را به مقدار پالس لازم در هر بازه میانبایی را مطابق نوع طرح‌ریزی حساب کرده و به درایو موتور ارسال می‌کند. در ادامه، درایوها پالس‌های دریافتی را مطابق ولتاژ و جریان موتور تنظیم کرده و پالس حرکت و جهت دوران را به موتور ارسال می‌کند. خط‌کشهای کدی تعبیه شده در مکانیزم، از طریق مدار الکتریکی طراحی شده، پالس‌هایی با دقت یک‌صدم میلی‌متر به یک ریزپردازنده ۱۶ مگاهرتزی از نوع ای وی آر ارسال شده و این ریزپردازنده عملیات شمارش و تشخیص جهت حرکت را انجام داده و از طریق پروتکل شبکه به نرم‌افزار رابط کاربری در رایانه می‌فرستد.



شکل ۳) شماتیک سیستم کنترل حرکت ریلها

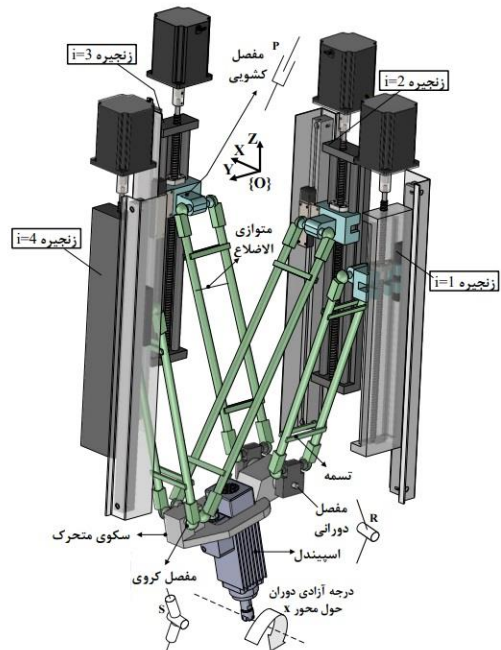
#### ۴- سینماتیک مکانیزم

به منظور کنترل و یافتن محل سکوی متحرک ربات لازم است معادلات لازم برای ارتباط بین عملگرها و اتصالات بدست آید. به کمک سینماتیک مستقیم با استفاده از موقعیت عملگرها می توان موقعیت سکوی متحرک ربات را پیدا کرد و به کمک سینماتیک معکوس با داشتن موقعیت سکوی متحرک، می توان موقعیت عملگرها را به دست آورد.

برای یک موقعیت مشخص از سکوی متحرک یک مجموعه منحصر به فرد از طول پایه ها از طریق سینماتیک معکوس مکانیزم به دست می آید. لذا سینماتیک معکوس مکانیزم، موقعیت مشخص سکوی متحرک مکانیزم را به طول پایه ها تبدیل می کند. منظور از موقعیت، ترکیبی از مکان سکوی متحرک در دستگاه مختصات عمومی و جهت آن در دستگاه مختصات محلی است. در حالیکه سینماتیک معکوس با داشتن موقعیت سکوی متحرک به طول پایه ها می رسد، سینماتیک مستقیم عکس آن عمل می کند. به این معنی که برای یک مجموعه طول پایه ها در مکانیزم می توان از طریق سینماتیک مستقیم مکانیزم، یک موقعیت منحصر به فرد برای سکوی متحرک مکانیزم، به دست آورد. بنابراین سینماتیک مستقیم مکانیزم طول پایه ها را به موقعیت سکوی متحرک تبدیل می کند.

#### ۴-۱- سینماتیک معکوس مکانیزم

برای کنترل حرکت سکوی متحرک که در این دستگاه بعنوان میز متحرکی که قطعه کار روی آن قرار می گیرد، نیاز است که میزان حرکت خطی هر کدام از ریلها که در شکل ۴ مشخص است مشخص باشد. بنابراین برای تعیین و محاسبه مقدار حرکت لازم موتورهای مربوط به آنها بایستی محاسبات سینماتیک معکوس با مشخص شدن موقعیت سکوی متحرک بدست آید. برای این منظور یک زنجیره سینماتیکی با بردارهایی که در شکل ۴



شکل ۴) ساختار مکانیزم موازی پنج درجه آزادی



شکل ۵) ماشین فرز ۴ درجه آزادی ساخته شده

گیری دقیق نظیر تراز الکلی ۰/۱ میلی‌متر و گونیا انجام شده است. همچنین در شکل ۶ نحوه اندازه‌گیری خطاهای حرکتی محورهای دستگاه با استفاده از کولیس پایه دار با تفکیک‌پذیری ۰/۱ میلی‌متر نشان داده شده است. برای انجام این آزمایش پایه کولیس پایه‌دار روی قسمت ثابتی از دستگاه با استفاده از پایه مغناطیس موقعیت‌دهی شده و حرکت‌های خطی دستگاه مورد اندازه‌گیری قرار گرفته است.



شکل ۵) تنظیمات سخت‌افزاری ربات ماشین فرز



شکل ۶) اندازه‌گیری خطاهای موقعیت‌دهی محورهای حرکتی

### ۶- تحلیل منحنی‌های خطایی و تشخیص میزان جبران خطا

پس از انجام اندازه‌گیری خطاهای موقعیت‌دهی هر کدام از محورها، در مسیرهای رفت و برگشت ریل‌های دستگاه، خطاهای موقعیت‌دهی، مطابق شکل‌های ۷ تا ۱۰ ترسیم شده و شیب منحنی خطایی برای هر ریل محاسبه شده است.

مشخص شده تشکیل می‌شود و رابطه برداری بین آنها مطابق روابط زیر نوشته می‌شود.

$${}^0\mathbf{p}_i + {}^0\mathbf{R}_p {}^p\mathbf{b}_i = {}^0\mathbf{a}_i + {}^0\mathbf{d}_i + {}^0\mathbf{I}_i + {}^0\mathbf{c}_i \quad (1)$$

در رابطه فوق  ${}^0\mathbf{p}_i$  بردار رابط بین سکوی متحرک و ثابت می‌باشد. بردار رابط بین مفاصل کروی روی سکوی متحرک و در دستگاه مختصات محلی  $\{O\}$  می‌باشد.  ${}^0\mathbf{I}_i$  هم طول بازوهای ربات می‌باشد که سکوی متحرک را به هرکدام از ریلها متصل می‌کند. در رابطه ۱ همچنین ارتباط بین دستگاه مختصات محلی  $\{O\}$  و  $\{P\}$  به ترتیب زیر تعریف می‌شود.

$$(\mathbf{p}_i + \mathbf{b}_i - \mathbf{a}_i - c_i \hat{\mathbf{d}}_i) - \mathbf{I}_i = d_i \hat{\mathbf{d}}_i \quad (2)$$

رابطه ۲ به ترتیب زیر بازنویسی می‌شود:

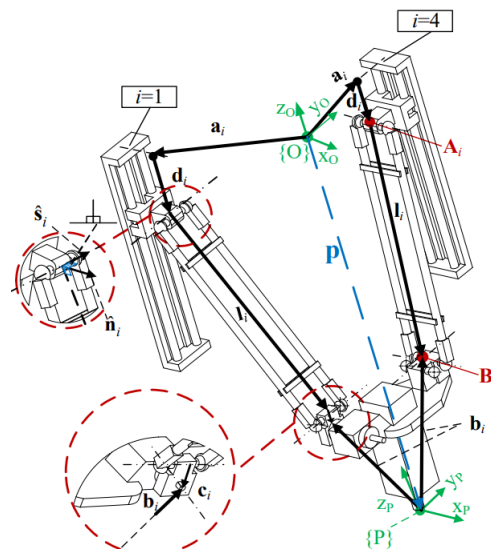
$$\|(\mathbf{p}_i + \mathbf{b}_i - \mathbf{a}_i - c_i \hat{\mathbf{d}}_i) - d_i \hat{\mathbf{d}}_i\|^2 = l_i^2 \quad (3)$$

در رابطه ۳ بردار  $\hat{\mathbf{d}}_i$  بردار یکه در راستای ریل‌های ربات می‌باشد. شکل دیگر رابطه ۳ را میتوان به ترتیب زیر بازنویسی کرد:

$$((\mathbf{p}_i + \mathbf{b}_i - \mathbf{a}_i - c_i \hat{\mathbf{d}}_i) - d_i \hat{\mathbf{d}}_i) \cdot ((\mathbf{p}_i + \mathbf{b}_i - \mathbf{a}_i - c_i \hat{\mathbf{d}}_i) - d_i \hat{\mathbf{d}}_i) = l_i^2 \quad (4)$$

در نهایت میزان حرکت هر کدام از زینهای پایه‌ها برای اینکه سکوی متحرک در موقعیت کارترین مورد نظر قرار گیرد به ترتیب رابطه ۵ مشخص می‌شود:

$$d_i = \frac{-c_i + \hat{\mathbf{d}}_i^T (\mathbf{p} + \mathbf{b}_i - \mathbf{a}_i) \pm \sqrt{l_i^2 - (\mathbf{p} + \mathbf{b}_i - \mathbf{a}_i)^T (I_{3 \times 3} - \hat{\mathbf{d}}_i \hat{\mathbf{d}}_i^T) (\mathbf{p} + \mathbf{b}_i - \mathbf{a}_i)}}{\hat{\mathbf{d}}_i^T \hat{\mathbf{d}}_i} \quad (5)$$



شکل ۴) مدل زنجیره سینماتیکی ربات ماشین فرز

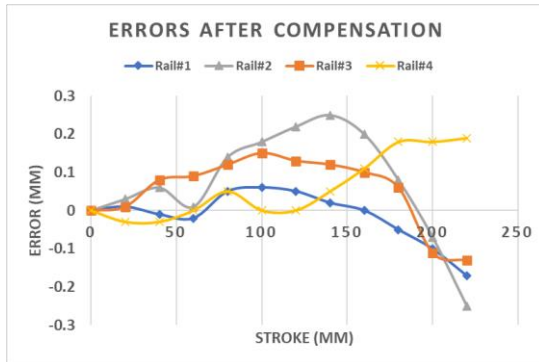
### ۵- اندازه‌گیری خطاهای ماشین ابزار

برای بهبود عملکرد ماشین ابزار معرفی شده در این مقاله، خطاهای موقعیت‌دهی و سپس تنظیمات نرم‌افزاری و سخت-افزاری انجام شده است. نمونه‌ای از تنظیمات سخت‌افزاری شامل تراز کردن میز دستگاه، سکوی متحرک حامل اسپیندل و همچنین عمود کردن اسپیندل به میز دستگاه در شکل ۵ نمایش داده شده است که این تنظیمات با استفاده از ابزارهای اندازه-

در نهایت با اعمال ضریب تصحیح مطابق جدول زیر برای هرکدام از ریلها در نرم افزار کنترلر دستگاه، اصلاح موقعیت دهی حرکتی مطابق منحنی برای هرکدام از ریلها بدست آمده است. میزان خطای ریلها همانطوریکه در منحنی های شکل ۱۱ نشان داده شده استبه مقدار چشمگیری نسبت به هرکدام از خطاهای قبلی کاسته شده است.

جدول ۱) ضرایب اعمال شده به هرکدام از ریلها جهت جبران خطا

ریل شماره	۴	۳	۲	۱
ضریب تصحیح	0.0001	0.0014	-0.003	-0.00025



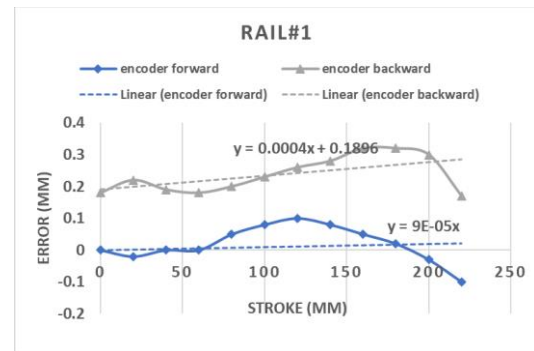
شکل ۱۱) میزان خطای رفت و برگشت ریل ها پس از انجام جبران خطا توسط کنترلر دستگاه

## ۷- بحث و نتیجه گیری

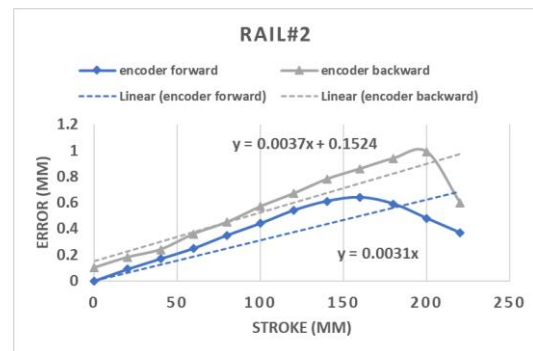
در این مقاله یک ربات موازی چهار درجه آزادی با کاربرد ماشین فرز معرفی و قسمتهای سخت افزاری مکانیکی و کنترلی آن معرفی شده است. روابط سینماتیکی و نحوه حرکت های آن تشریح شده است. برای بهبود کیفیت و کاهش خطاهای حرکتی آن تنظیمات سخت افزاری و تشخیص خطاهای حرکتی با آزمایشهای تجربی انجام شده است. با بدست آمدن شیب منحنی های خطاهای موقعیت دهی، میزان اصلاح آنها مشخص و در کنترلر دستگاه اعمال شده است. پس از اندازه گیری مجدد مشخص شده که اندازه خطاهای حرکتی هر محور به میزان چشمگیری کاهش یافته است.

## مراجع

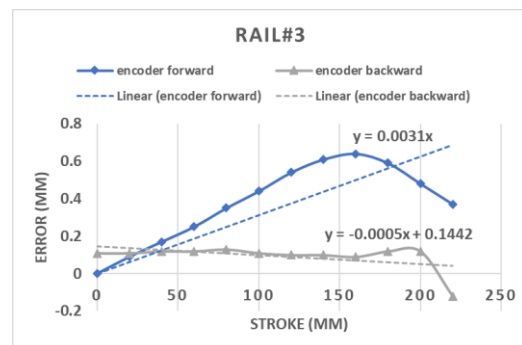
- 1- Jean-Pierre M. Parallel robots: Springer Science & Business Media; 2012.
- 2- Zhang D. Parallel robotic machine tools: Springer Science & Business Media; 2009.
- 3- Roppenen, Timo, and Arai, Tatsuo. Accuracy Analysis of a Modified Stewart Platform Manipulator. Proceeding of the 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol. 1, 1995, pp. 521-525.
- 4- Wang, Shih-Ming, and Ehmann, Kornel F. Error Model and Accuracy Analysis of a Six-DOF Stewart Platform. Manufacturing Science and Engineering Vol. 2, NO. 1, 1995, pp. 519-530.



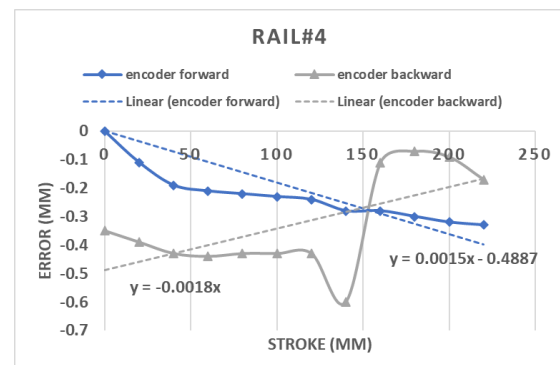
شکل ۷) میزان خطای رفت و برگشت ریل شماره ۱ در طول کورس حرکتی



شکل ۸) میزان خطای رفت و برگشت ریل شماره ۲ در طول کورس حرکتی



شکل ۹) میزان خطای رفت و برگشت ریل شماره ۳ در طول کورس حرکتی



شکل ۱۰) میزان خطای رفت و برگشت ریل شماره ۴ در طول کورس حرکتی