



Optimization and Control of Agile Eye Mechanism to Stabilize Car Vibrations and Target Tracking

Maryam Mirchi, Majid Sadedel  *

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

ABSTRACT: In this research, an Agile Eye mechanism mounted on a moving car aims to maintain focus in the desired direction despite road disturbances and vibrations. The study investigates the system's performance on hilly and mountainous roads, considering two PID tuning methods: trial and error, and Ziegler-Nichols. To mitigate vibrations, a vibration absorber is employed, and its spring-damper coefficients are optimized using a genetic algorithm, ensuring improved response and cost efficiency. The optimized coefficients significantly reduce disturbances transmitted from the vehicle to the mechanism, enhancing system control and preventing damage. The error's root mean square value was reduced to 0.02-0.04 with the vibration absorber, demonstrating its effectiveness in minimizing disturbances and improving overall control performance.

Review History:

Received: Jun. 30, 2024

Revised: Oct. 18, 2024

Accepted: Oct. 20, 2024

Available Online: Nov. 07, 2024

Keywords:

Agile Eye

Stabilizer

Target Tracking

Parallel Mechanism

Optimization

1- Introduction

Precision systems like target tracking require effective damping and vibration control to maintain stability and counteract external disturbances. In [1] proposed a modified agile-eye mechanism aimed at enhancing robotic manipulation of wristed laparoscopic instruments, demonstrating advancements in surgical robotics and precision-oriented systems. [2] Developed a neural network-based approach for optimizing controller tuning in a parallel robot, showcasing advancements in intelligent control methods for complex mechanical systems.

2- Modeling

In research [3], Danaei et al. obtained the direct and inverse kinematics of a two-degree-of-freedom agile-eye robot, which serves as the foundation for the computational model in this study. In the direct kinematics of the agile-eye robot, the first and second motor angles are specified, and the objective is to achieve the joint coordinates.

The two-degree-of-freedom agile-eye robot consists of four links and five revolute joints. The joint coordinates are represented by symbols $\hat{u}_1, \hat{u}_2, \hat{w}_1, \hat{w}_2$ and \hat{v} as depicted in Figure 1. α_e is the angle between \hat{w}_1 and \hat{v} , and α_3 is the angle between \hat{w}_2 and \hat{v} . The inverse kinematics of the mechanism can be represented by the following equation.

$$\theta_1 = \cos^{-1}((\hat{w}_{10} \times \hat{u}_1)^T (\hat{w}_1 \times \hat{u}_1)) / \sin^2 \alpha_1 \quad (1)$$

$$\theta_2 = \cos^{-1}((\hat{w}_{20} \times \hat{u}_2)^T (\hat{w}_2 \times \hat{u}_2)) / \sin^2 \alpha_2 \quad (2)$$

In this research, reference devices {W}, {B}, and {E} are connected to the ground, the robot's base (car roof), and the end effector, respectively. The coordinate \hat{n} represents the end effector's orientation on its imaging surface. The primary objective is to maintain the stability of \hat{n} in the desired direction relative to the ground reference device.

To effectively stabilize the system using the kinematic relationships, the equations must be converted from the ground reference device to the one connected to the base. This allows for proper calculation of the desired joint angular velocities based on the end effector's orientation, which is crucial for stabilization.

Based on the calculations performed in the study [4], the desired angular velocities of the joints can be expressed in terms of the desired end effector (camera) orientation in the reference device attached to the base as follows:

*Corresponding author's email: majid.sadedel@modares.ac.ir



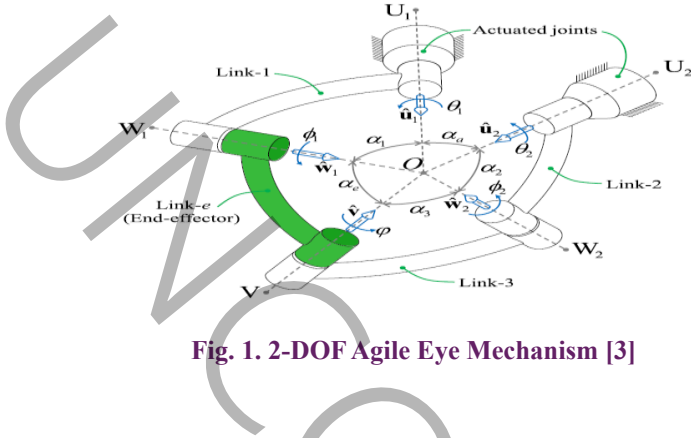


Fig. 1. 2-DOF Agile Eye Mechanism [3]

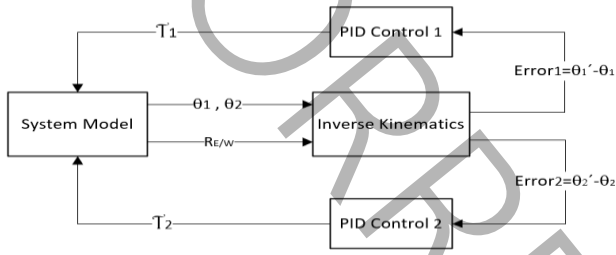


Fig. 2. Control Structure Used for Stabilizing the Agile Eye

$$\theta_1^* = \tan^{-1} \left(-\frac{B n_y^*}{B n_z^*} \right) \quad (3)$$

$$\theta_2^* = \tan^{-1} \left(-\frac{B n_x^* B n_z^*}{B n_y^{*2} + B n_z^{*2}} \right) \quad (4)$$

The movement of the mechanism is investigated under the influence of two types of hilly and mountainous roads, to evaluate their influence on the system and control methodologies.

3- Control and Stabilization

This study aims to control the orientation of the agile eye end effector in terms of azimuth $\theta=30^\circ$ and elevation $\phi=45^\circ$ angles. A unit direction vector is determined within the reference device $[0.35 \ 0.61 \ 0.70]^T$ to represent the desired orientation of the end effector. The control structure employed for the agile eye robot is illustrated in Figure. After several iterations of the trial-and-error method, the optimized control coefficients for the first controller are found to be $P=0.56 \ I=0.037 \ D=0.02$. For the second controller, the optimized coefficients are $D=0.23 \ I=9.43 \ P=2$. In the following section, the control mechanism's results for two different road profiles are presented.

Using the Ziegler-Nichols method, the system is perturbed

Table 1. Optimized Tuning Parameters

Value	Symbol
1.1098	$k_1 (N * m / deg)$
0.4897	$c_1 (N * m * s / deg)$
0.7249	$k_2 (N * m / deg)$
0.8048	$c_2 (N * m * s / deg)$
1.2763	$k_3 (N * m / deg)$
0.3778	$c_3 (N * m * s / deg)$

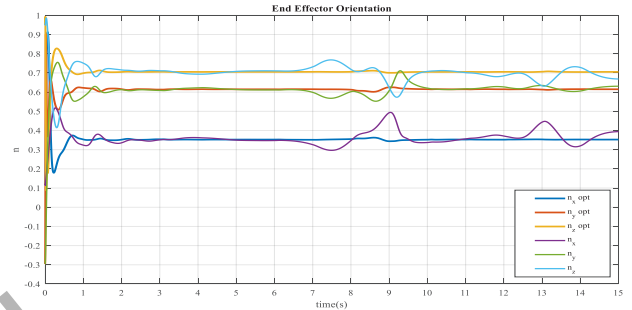


Fig. 3. Comparison of the steering performance of a mechanism's end-effector using PID tuning with both trial and error and Ziegler-Nichols methods on a hilly road

to obtain $K_u = 4.58$ and $T_u = 0.5$ values. These values are then substituted into the relevant equations to calculate control coefficients for the first controller as follows: $P=2.74 \ I=18.3 \ D=0.28$. For the second controller, the Ziegler-Nichols method is applied in a similar manner. $K_u = 8.628$ and $T_u = 0.333$ values specific to this controller. Consequently, the control coefficients for the second controller are as follows: $P=5.17 \ I=52 \ D=0.35$.

In this research, a vibration isolator was employed between the car roof and the agile eye mechanism to mitigate car-induced vibrations affecting the mechanism optimal parameters for the vibration damper are determined using a genetic algorithm. The parameters are listed in Table 1.

4- Results and Discussion

Figure 3 compares the robot's trajectory using two methods: PID controllers with trial-and-error tuning and PID controllers with the Ziegler-Nichols method. The arrows represent the end effector's orientation. Observing these changes shows that Ziegler-Nichols controllers effectively follow the trajectory and improve system response, even at

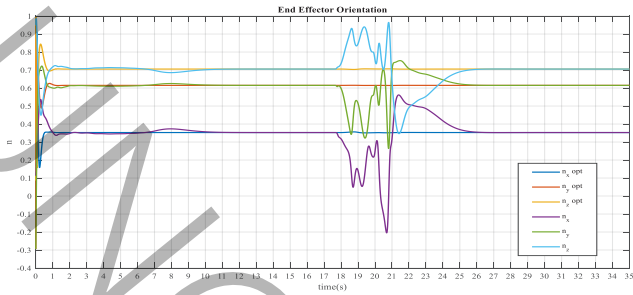


Fig. 4. Comparison of steering performance of a mechanism's end-effector with PID control and Ziegler-Nichols control in the presence of a vibration damper on a mountainous road

critical points. The vertical axis represents the unit vector orientation \hat{n} while the horizontal axis denotes time.

Figure 4 illustrates a comparison of the robot's trajectory using two tuning approaches: trial-and-error and Ziegler-Nichols using the vibration isolator. In the Ziegler-Nichols method significantly reduces errors and improves the robot's performance by efficiently handling vibrations. The arrows in the figure represent changes in the robot effector's orientation.

5- Conclusions

The Ziegler-Nichols method was used to adjust PID controller coefficients, effectively controlling the trajectory and reducing target tracking errors. However, this method

has limitations, such as potential risks when approaching instability margins and inapplicability for systems that cannot be unstable. While it works for conditionally stable systems, the obtained coefficients need further refinement for optimal performance. Vibration damper coefficients were optimized using a genetic algorithm to maintain the robot's trajectory. The system demonstrated favorable results in stabilizing the trajectory with the presence of a vibration damper. In comparison to the absence of a vibration damper, the target tracking error decreased with its presence. Additionally, the necessary control effort was reduced, allowing the system to be controlled with less force.

References

- [1] A. Alamdar, S. Hanifeh, F. Farahmand, A. Mirbagheri, A modified agile-eye mechanism for robotic manipulation of wristed laparoscopic instruments A modified agile-eye mechanism for robotic manipulation of wristed laparoscopic instruments, in, TechRxiv, 2021.
- [2] H. Kang, H. Lin, L. Wu, H. Chen, Y. Wu, Neural-optimal tuning of a controller for a parallel robot, *Mechatronics*, 74(1) (2024) 110314.
- [3] B. Danaei, A. Arian, M. Tale masouleh, A. Kalhor, Dynamic modeling and base inertial parameters determination of a 2-DOF spherical parallel mechanism, *Multibody System Dynamics*, 41(4) (2017) 367-390.
- [4] B. Danaei, M.R. Alipour, A. Arian, M.T. Masouleh, A. Kalhor, Control of a two degree-of-freedom parallel robot as a stabilization platform, in: 5th RSI International Conference on Robotics and Mechatronics, IcRoM 2017, IEEE, 2018, pp. 232-238.

بهینه‌سازی و کنترل مکانیزم چشم چابک جهت پایدارسازی ارتعاشات خودرو و ردیابی هدف

مریم میرچی، مجید ساده‌دل^{*}

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۱۰
بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۲۷
پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۲۹
ارائه آنلاین: ۱۴۰۳/۰۸/۱۷

کلمات کلیدی:

چشم چابک
پایدارسازی
ردیابی هدف
مکانیزم موازی
بهینه‌سازی

خلاصه: وجود ارتعاشات و اغتشاشات همواره مشکلی بزرگ بوده و آسیب‌های جدی به سیستم وارد می‌کند. در این پژوهش مکانیزم چشم چابک بر روی خودروی در حال حرکت نصب شده و همراه با خودرو حرکت می‌کند. ارتعاشات ناشی از ناهمواری‌های مسیر توسط خودرو به صفحه پایه چشم چابک وارد می‌شود. لازم به ذکر است بخش بسیار زیادی از اغتشاشات جاده توسط سیستم تعلیق خودرو میرا می‌شود. هدف پژوهش ثابت نگه داشتن کارگیر ربات چشم چابک در جهت‌گیری مطلوب می‌باشد. حرکت مکانیزم تحت تأثیر دو نوع جاده تپه ماهوری و کوهستانی بررسی می‌شود. کنترلر تناسبی-انتگرالی-مشتقی یک بار به روش سعی و خطا و یک بار به روش زیگلر نیکولز تنظیم شده و نتایج حاصل از این حالات در حضور جاذب ارتعاشی و حالت عادی مقایسه می‌گردد. برای تنظیم ضرایب فنرو میراگر از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. زیرا علاوه بر بهبود پاسخ سیستم موجب صرفه‌جویی در زمان و هزینه می‌گردد. ضرایب فنر و میراگر بدست آمده از الگوریتم بهینه‌سازی در عین کوچک بودن از نظر مقدار که خود یک مزیت محسوب می‌شود، نقش به‌سزایی در کم کردن ارتعاشات وارده از خودرو به پایه مکانیزم ایفا می‌کنند. در واقع جاذب علاوه بر اینکه کنترل سیستم را بهبود بخشیده و آن را امری ساده‌تر ساخته است از وارد شدن اغتشاشات به مکانیزم نیز جلوگیری و مانع آسیب دیدن مکانیزم در اثر ارتعاشات می‌شود. مقدار موثر خطا در حالت استفاده از جاذب ارتعاشی در چاه‌های مورد بررسی به بازه ۰/۰۲ تا ۰/۰۴ کاهش یافت.

۱- مقدمه

حرکت نامطلوب بی‌نهایت یا حرکت محدود خواهد داشت. در [۳] کونگ^۲ و همکارانش بر اساس تحلیل عدم قطعیت‌های سیستم سعی در شناسایی تکنیکی‌های مکانیزم کردند، تا این مشکل را مرتفع کرده و از ورود سیستم به نقاط تکین جلوگیری کنند. در پژوهش [۴] که هدف آن شبیه‌سازی حرکات سر و گردن افراد ناتوان بوده از ربات چشم چابک دو درجه آزادی برای شبیه‌سازی حرکات سر و گردن استفاده شده است. در راستای این پژوهش رفتار سینماتیکی ربات چشم چابک بررسی شده و به تحلیل تکنیکی‌های آن پرداخته شده است. مکانیزم کروی سه درجه آزادی چشم چابک در پژوهش [۵] برای تامین حرکت انتقالی و چرخشی ابزار لاپاراسکوپی استفاده شده است. ابزارهای جراحی لاپاراسکوپی معمولاً در جراحی‌های آسیب‌زا به کار می‌روند، از مکانیزم چشم چابک برای کنترل آن‌ها استفاده شده است. در پژوهش [۶] مکانیزم چشم چابک دو درجه آزادی به عنوان ابزاری برای جراحی لاپاراسکوپی طراحی شده است. سینماتیک ربات تحلیل و با توجه

پایدارسازی و جلوگیری از اغتشاش در بیشتر سیستم‌ها امری ضروری است. به خصوص سیستم‌هایی مانند سیستم ردیابی هدف که لازم است از دقت بالایی برخوردار باشند. در چند دهه اخیر ربات‌های موازی کروی از نوع دو درجه آزادی کاربردهای بسیاری در صنعت پیدا کرده‌اند، از جمله بیومکانیک، ربات‌های جراح، ربات‌های مچ، ابزارهای اشاره‌گر مانند دوربین، آنتن‌های رادار و تلسکوپ. در پژوهش [۱]، دینامیک یک ربات دو درجه آزادی موازی مورد بررسی قرار گرفته است. در پژوهش [۲] گانگلی^۱ و همکارانش یک ربات سه درجه آزادی موازی را مورد مطالعه قرار داده و مدل دینامیکی آن را با استفاده از ضرایب لاگرانژ بدست آورده‌اند. پس از آن با به حداقل رساندن جرم مکانیزم، آن را بهینه‌سازی کرده‌اند. زمانی که تمام ورودی‌های سیستم بی‌اثر یا قفل شوند مکانیزم ناپایدار می‌شود به این معنی که مکانیزم

1 Guanglei

2 Kong

^{*} نویسنده عهده‌دار مکاتبات: majid.sadedel@modares.ac.ir

مکانیزم چشم چابک بر روی یک وسیله نقلیه متحرک جهت‌گیری مطلوب را دنبال خواهد کرد. یعنی مسئله پایدارسازی و ردیابی به طور همزمان کنترل خواهد شد.

۲- مدل‌سازی

ربات چشم چابک دو درجه آزادی از ۴ لینک^۵ و ۵ مفصل دورانی تشکیل شده است. بردار یکه محور مفاصل در شکل ۱ با نمادهای $\hat{u}_1, \hat{u}_2, \hat{w}_1, \hat{w}_2$ و \hat{v} نمایش داده شده است. زوایای $\theta_1, \theta_2, \phi_1, \phi_2$ و θ به ترتیب، زاویه دوران لینک اول نسبت به موتور اول، زاویه دوران لینک دوم نسبت به موتور دوم، زاویه دوران مجری نهایی نسبت به لینک اول، زاویه دوران لینک سوم نسبت به لینک دوم و زاویه دوران مجری نهایی نسبت به لینک سوم می‌باشند.

۲-۱- سینماتیک مستقیم و معکوس ربات چشم چابک

در پژوهش [۱۴]، دانایی و همکارانش سینماتیک مستقیم و معکوس ربات دو درجه آزادی چشم چابک را به دست آورده‌اند، که در این پژوهش مبنای محاسبات قرار گرفته است.

در سینماتیک مستقیم ربات چشم چابک دو درجه آزادی زاویه موتور اول و دوم مشخص بوده و هدف به دست آوردن بردار یکه‌های محور مفاصل می‌باشد.

$$\hat{w}_1 = R_{u_1}(\theta_1)\hat{w}_{10} \quad (1)$$

$$\hat{w}_2 = R_{u_2}(\theta_2)\hat{w}_{20} \quad (2)$$

در روابط بالا، R_{u_1} و R_{u_2} مربوط ماتریس‌های دوران حول u_1 و u_2 با زاویه دوران‌های θ_1 و θ_2 می‌باشند. در این روابط \hat{w}_{10} و \hat{w}_{20} مقادیر اولیه \hat{w}_1 و \hat{w}_2 می‌باشند.

با توجه به اینکه α_e زاویه بین \hat{w}_1 و \hat{v} و α_3 زاویه بین \hat{w}_2 و \hat{v} می‌باشد، بردار \hat{v} به صورت معادله (۳) به دست می‌آید.

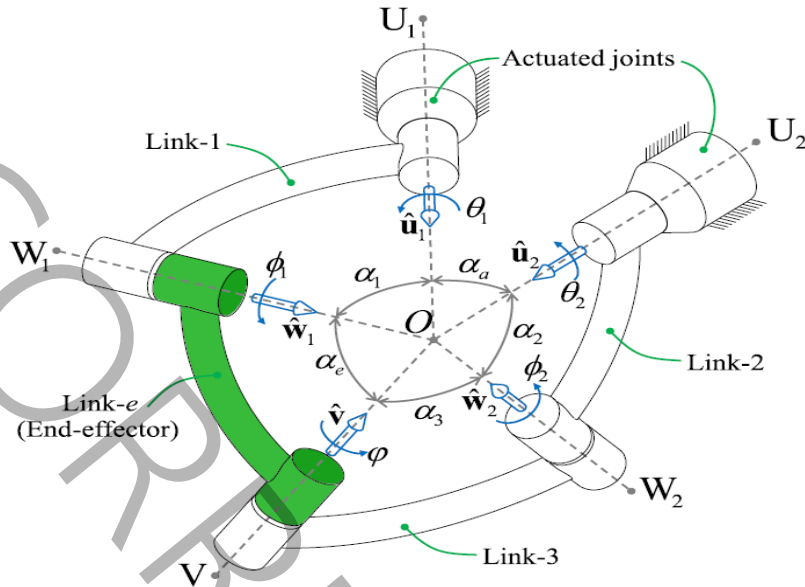
به کاربرد ربات لینک‌های ربات بهینه‌سازی شده اند. نمونه‌ای از این مکانیزم تولید و مورد آزمایش قرار گرفته است.

در پژوهش [۷] دانشمند و همکارانش حساسیت سینماتیکی مکانیزم‌های موازی را با در نظر گرفتن عدم قطعیت موجود در مفاصل غیر فعال بررسی کرده‌اند. در پژوهش [۸] دانایی و همکارانش چشم چابک دو درجه آزادی را به عنوان پایدارساز مکانیکی کنترل سینماتیکی کردند. در پژوهش [۹] انصاری‌راد و همکارانش با استفاده از کنترل تطبیقی ربات سه درجه آزادی چشم چابک را به عنوان یک پایدارساز مکانیکی کنترل کرده‌اند. در پژوهش [۱۰] یک مکانیزم موازی سه درجه آزادی با استفاده از کنترل مد لغزشی^۱ کنترل موقعیت شده است. در پژوهش [۱۱] یک راهکار برای جراحی رباتیکی قلب تپنده با استفاده همزمان از یک پایدارساز و یک جبران‌ساز ارائه گردیده است. یک مکانیزم چشم چابک تغییر یافته برای فعال‌سازی مچ ابزارگیر معرفی و سپس تحلیل و پیاده‌سازی شده است. در سال ۱۹۹۹، گوسلین^۲ ربات چشم چابک دو درجه آزادی^۳ را ارائه داد [۱۲]. طراحی و ساخت این مکانیزم برای اولین بار در دانشگاه لاول^۴ صورت گرفته است. این ربات عنوان ساده‌ترین مکانیزم موازی که دو درجه آزادی دورانی خالص، در اختیار می‌گذارد را دارد. پژوهش [۱۳] دو راهبرد برای بهینه‌سازی بهره‌های کنترلی، کنترلر تناسبی-انتگرالی ربات‌های موازی برای رسیدن به حداقل خطای جهت‌گیری کارگیر و بهبود عملکرد سیستم ارائه می‌کند. در راهبرد اول با استفاده از الگوریتم ژنتیک با در نظر گرفتن دینامیک سیستم، الگوریتم بهترین مقدار ممکن بهره‌های کنترلی را تعیین کرده و موجب کاهش خطای ردیابی کارگیر شده است. در راهبرد دوم با استفاده از شبکه عصبی بهترین بهره‌های کنترلی انتخاب شده است. روش پیشنهادی در این پژوهش مزایای الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی را به خوبی ترکیب کرده است که برای بهبود کنترل سیستم‌های رباتیک پیشرفته مفید است.

چالش اصلی بسیاری از تجهیزات مانند دوربین‌ها، رادارها، لیزرها و ابزارهای جهت‌یابی، دنبال کردن موقعیت جسم مورد نظر، می‌باشد. قطعا چنین سیستم‌هایی باید پایدار شوند تا بتوانند هدف را دنبال کنند. چشم چابک یک مکانیزم موازی کروی است که برای چنین مقاصدی مناسب می‌باشد. هدف این پژوهش بررسی پایداری و دنبال کردن هدف به صورت همزمان توسط ربات چشم چابک می‌باشد. در این پژوهش برای اولین بار

- 1 SMC
- 2 Gosselin
- 3 Agile Eye2- DOF
- 4 Laval University

5 Link



شکل ۱. مکانیزم چشم چابک دو درجه آزادی [۱۴]

Fig. 1. 2-DOF Agile Eye Mechanism [14]

زاویه دوران لینک i برای $i=1,2$ برابر با زاویه مربوط به دوران صفحه شامل دو بردار \hat{w}_i و \hat{u}_i می‌باشد، معادله (۵) را برای θ_i می‌توان نوشت.

$$\theta_i = \cos^{-1} \left(\frac{(\hat{w}_{i0} \times \hat{u}_i)^T (\hat{w}_i \times \hat{u}_i)}{\sin^2 \alpha_i} \right) \quad (۵)$$

بنابراین θ_1 و θ_2 به صورت معادله (۶) و معادله (۷) نمایش داده می‌شوند.

$$\theta_1 = \cos^{-1} \left(\frac{(\hat{w}_{10} \times \hat{u}_1)^T (\hat{w}_1 \times \hat{u}_1)}{\sin^2 \alpha_1} \right) \quad (۶)$$

$$\theta_2 = \cos^{-1} \left(\frac{(\hat{w}_{20} \times \hat{u}_2)^T (\hat{w}_2 \times \hat{u}_2)}{\sin^2 \alpha_2} \right) \quad (۷)$$

$$v = \frac{1}{\hat{w}_1 \times \hat{w}_2} \times \left\{ \begin{aligned} & (\hat{w}_1 \times \hat{w}_2) \times (\cos \alpha_3 \hat{w}_1) - (\cos \alpha_e \hat{w}_2) \\ & \pm \sqrt{(\cos(\alpha_3 + \alpha_e) - \hat{w}_1^T \hat{w}_2)(\hat{w}_1^T \hat{w}_2 - \cos(\alpha_3 - \alpha_e))} (\hat{w}_1 \times \hat{w}_2) \end{aligned} \right\} \quad (۳)$$

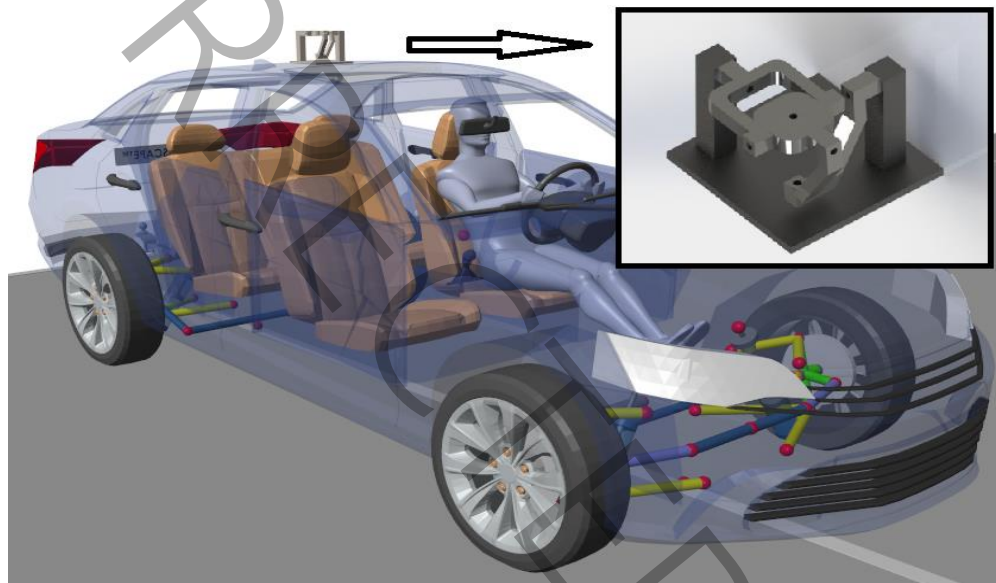
در سینماتیک معکوس جهت‌گیری کارگیر مشخص بوده و هدف به‌دست آوردن زوایای دورانی موتور اول و دوم یعنی θ_1 و θ_2 می‌باشد. با توجه به اینکه α_2 زاویه بین \hat{w}_2 و \hat{u}_2 و α_3 زاویه بین \hat{w}_2 و \hat{v} می‌باشد معادله (۴) را می‌توان برای \hat{w}_2 نوشت.

$$\hat{w}_2 = \frac{1}{\hat{u}_2 \times \hat{v}} \times \left\{ \begin{aligned} & (\hat{u}_2 \times \hat{v}) \times (\cos \alpha_3 \hat{u}_2) - (\cos \alpha_2 \hat{v}) \\ & \pm \sqrt{(\cos(\alpha_3 + \alpha_2) - \hat{u}_2^T \hat{v})(\hat{u}_2^T \hat{v} - \cos(\alpha_2 - \alpha_3))} (\hat{u}_2 \times \hat{v}) \end{aligned} \right\} \quad (۴)$$

جدول ۱. پارامترهای اینرسی مکانیزم چشم چابک (واحد SI)

Table 1. Agile Eye Mechanism Inertial Parameters (SI units)

$[I_{xyi} \ I_{xzi} \ I_{yzi}]$	$[I_{xxi} \ I_{yyi} \ I_{zzi}]$	${}^i r_{Ci}$	m_i	
$[0 \ 0 \ 0]$	$[10 \ 16 \ 25] \times 10^{-4}$	$[-6/1; 0; 0] \times 10^{-2}$	۰/۳۲۴	لینک ۱
$[-7 \ 0 \ 0] \times 10^{-4}$	$[12 \ 11 \ 22] \times 10^{-4}$	$[7/2; 7/6; 0] \times 10^{-2}$	۰/۱۵۹	لینک ۲
$[-4 \ 0 \ 0] \times 10^{-4}$	$[8 \ 8 \ 15] \times 10^{-4}$	$[6/2; 6/2; 0] \times 10^{-2}$	۰/۱۴۸	لینک ۳
$[0 \ 0 \ 0]$	$[9 \ 12 \ 20] \times 10^{-4}$	$[6/6; 0; 0] \times 10^{-2}$	۰/۴۵۹	کارگیر



شکل ۲. قرارگیری مکانیزم چشم چابک بر روی سقف خودرو

Fig. 2. Mounting Mechanism of the Agile Eye on the Vehicle Ceiling

استیو میلر^۴ یکی از مدیران تولید سیم‌اسکیپ استفاده شده است. پارامترهای هندسی در نظر گرفته شده برای مکانیزم چشم چابک در جدول ۲ نمایش داده شده است.

۲-۳- استفاده از ربات چشم چابک دو درجه آزادی جهت پایدارسازی مکانیکی

در این مسئله دستگاه‌های مختصات $\{W\}$ ، $\{B\}$ و $\{E\}$ به ترتیب به زمین، به پایه ربات (سقف خودرو) و به کارگیر متصل می‌باشند. بردار \hat{n} بر

۲-۲- قرار دادن ربات چشم چابک بر روی خودرو

ربات چشم چابک در نرم افزار سالیدورکس^۱ طراحی شده است. در جدول ۱ پارامترهای اینرسی در نظر گرفته شده برای این ربات نشان داده شده است. در مرحله بعد ربات چشم چابک به محیط سیم‌اسکیپ^۲ نرم افزار متلب^۳ انتقال داده شده و مطابق شکل ۲ بر روی خودرو قرار داده شده است. در این پژوهش از مدل شبیه‌سازی شده کامل خودرو [۱۵]، طراحی شده توسط

- 1 SolidWorks
- 2 Simscape
- 3 Matlab

4 Steve Miller

جدول ۲. پارامترهای هندسی مکانیزم چشم چابک

Table 2. Engineering Parameters of the Agile Eye Mechanism

\hat{w}_{20}	\hat{w}_{10}	\hat{u}_2	\hat{u}_1	α_e	α_a	α_3	α_2	α_1	پارامتر
\hat{k}	$-\hat{j}$	\hat{j}	\hat{i}	90°	90°	90°	90°	90°	مقدار

$$\theta_2^* = \tan^{-1} \left(-\frac{B n_x^* n_z^*}{B n_y^{*2} + B n_z^{*2}} \right) \quad (11)$$

۲-۴ مدل سازی جاذب ارتعاشی

هدف استفاده از جاذب ارتعاش، کنترل ارتعاشات ناخواسته است به طوری که آن اثرات نامطلوب، در محدوده قابل قبول نگه داشته می شود. همانطور که در بخش قبل اشاره شد جاذب ارتعاشی با فنر و میراگر مدل می شود.

در شکل ۳ یک مدل جاذب ارتعاشی ساده به صورت شماتیک نشان داده شده است. معادلات مربوط به این جاذب ارتعاشی در معادله (۱۲) نشان داده شده است.

$$\left| \frac{y}{x} \right| = T = \left\{ \frac{1 + \left[2 \left(\frac{f}{f_n} \right) \left(\frac{c}{c_c} \right) \right]^2}{\left[1 - \left(\frac{f}{f_n} \right)^2 \right]^2 + \left[2 \left(\frac{f}{f_n} \right) \left(\frac{c}{c_c} \right) \right]^2} \right\}^{1/2} \quad (12)$$

در معادله (۱۲) نماد x معرف مقدار جابه جایی ارتعاشی، y جابه جایی سیستم و T بیانگر قابلیت انتقال^۱ می باشد. نمادهای k و c نیز نشان دهنده ضریب فنریت و میرایی جاذب هستند.

کلیه اجسام در اثر ضربه، سر و صدا و یا ارتعاش می لرزند. هنگامی که

صفحه کارگیر عمود بوده و جهت گیری آن را نشان می دهد. در اینجا هدف ثابت نگه داشتن بردار \hat{n} در جهت مطلوب نسبت به دستگاه مختصات زمین می باشد. این هدف به صورت معادله (۸) و معادله (۹) نمایش داده می شود.

$${}^W \hat{n}^* = \left[{}^W \hat{n}_x^* \quad {}^W \hat{n}_y^* \quad {}^W \hat{n}_z^* \right] = cte \quad (8)$$

$${}^W \omega_{E/W}^* = 0 \quad (9)$$

در معادلات (۸) و (۹)، ${}^W \hat{n}^*$ و ${}^W \omega_{E/W}^*$ سرعت زاویه ای و جهت گیری مطلوب کارگیر در دستگاه مختصات $\{W\}$ می باشند. روابطی که در بخش های قبل نوشته شده اند نسبت به دستگاه مختصات متصل به پایه می باشند. بنابراین جهت استفاده از روابط سینماتیکی برای پایدارسازی، روابط باید تبدیلی به صورت تبدیلی از دستگاه زمین به دستگاه مختصات متصل به پایه بازنویسی شوند.

با توجه به محاسبات انجام شده در پژوهش [۸]، زوایای مطلوب محرک ها بر اساس جهت گیری مدنظر کارگیر در دستگاه مختصات متصل به پایه به صورت زیر نوشته می شوند:

$$\theta_1^* = \tan^{-1} \left(-\frac{B n_y^*}{B n_z^*} \right) \quad (10)$$

1 Transmissibility

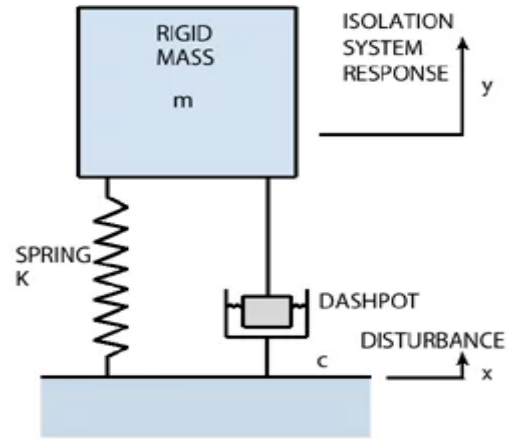
ارتعاشی استفاده شده است. که با استفاده از بلوک متلب بین سقف خودرو و کف مکانیزم چشم چابک قرار داده شده است.

۲-۵- مدل سازی جاده

مهندسی عمران پستی بلندی‌های جاده را با استفاده از ابزار اندازه‌گیری کرده و آن‌ها را تبدیل به داده در فایل اکسل^۱ می‌کنند. در این پروژه این داده‌ها، از مرجع [۱۶] برداشته شده است. در این پژوهش دو نوع جاده تپه ماهوری و کوهستانی مورد استفاده قرار گرفته است. در شکل ۴ و شکل ۵ زاویه محور طولی، عرضی، عمودی و سرعت خودرو در این دو جاده نشان داده شده است.

در بخش بالایی شکل ۴ در سه نمودار، زاویه محور طولی، عرضی و عمودی خودرو در مدت زمان مورد بررسی حرکت خودرو بر روی جاده تپه ماهوری نشان داده شده است. سرعت خودرو در جاده تپه ماهوری مطابق نمودار زیرین شکل ۴، در جهت محور طولی تا ثانیه نهم افزایشی بوده و پس از دو ثانیه حرکت با سرعت ثابت، کاهشی می‌گردد. در این جاده تغییرات سرعت در جهت عرضی، روند افزایشی و کاهشی را تکرار می‌کند. در ثانیه هشتم تا دهم سرعت در هر دو جهت تغییر می‌کند و همچنین تغییر زاویه شدیدی در محور طولی مشاهده می‌گردد. فاصله خط از محور صفر مشهود است. لازم به ذکر است این نمودارها بیانگر تغییر زوایای سه محور اصلی و تغییر سرعت وارده به صفحه زیرین مکانیزم می‌باشد و مکانیزم در مقابل این ارتعاشات کنترل خواهد شد.

در بخش بالایی شکل ۵ در سه نمودار، زاویه محور طولی، عرضی و عمودی خودرو در مدت زمان مورد بررسی حرکت خودرو بر روی جاده کوهستانی نشان داده شده است. جاده کوهستانی پستی بلندی‌های بسیار و تغییرات سینوسی در بازه‌های زمانی کم را نشان می‌دهد. تغییرات نوسانات وارده به سیستم از جاده‌ی تپه ماهوری بیشتر است. تغییرات زاویه محور عمودی در بین ثانیه هجدهم تا بیست و سوم نشان دهنده وجود یک مانع بزرگ بر سر راه و نیاز به تغییر مسیر حرکت و در نهایت، بازگشت مجدد به مسیر قبلی می‌باشد. سرعت خودرو در راستای محور طولی و عرضی در نمودار زیرین شکل ۵ با دو رنگ متفاوت نشان داده شده است. لازم به ذکر است این نمودارها بیانگر تغییر زوایای سه محور اصلی و تغییر سرعت وارده به صفحه زیرین مکانیزم می‌باشد و مکانیزم در مقابل این ارتعاشات کنترل خواهد شد.



شکل ۳. مدل ساده جاذب ارتعاشی فنر-میراگر

Fig. 3. The simple spring-damper vibration absorber model

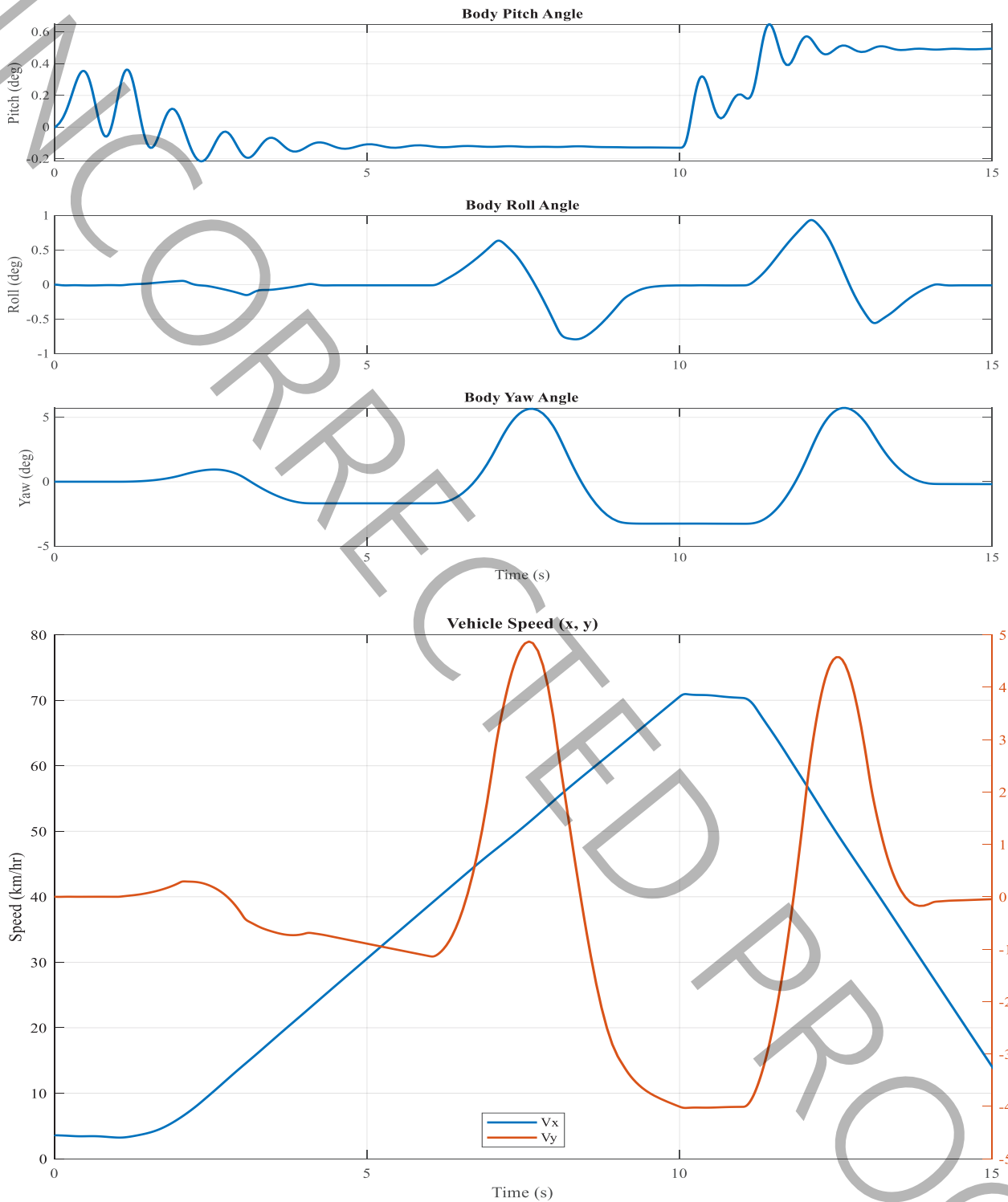
تحریک حذف شود، جسم نوسانات سینوسی دوره‌ای یا ارتعاش آزاد را در فرکانسی تجربه می‌کنند که فرکانس طبیعی نامیده شده و با نماد f_n نشان داده می‌شود. فرکانس طبیعی یک سیستم ساده با میرایی کم مانند شکل ۳ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$f_n = 3.13 \left(\frac{k}{mg} \right)^{1/2} \quad (13)$$

میرایی بحرانی مقدار میرایی است که در میرایی سیستم هنگام برهم خوردن تعادل نوسان نمی‌کند. رابطه میرایی بحرانی با جرم و فرکانس بحرانی به صورت زیر می‌باشد:

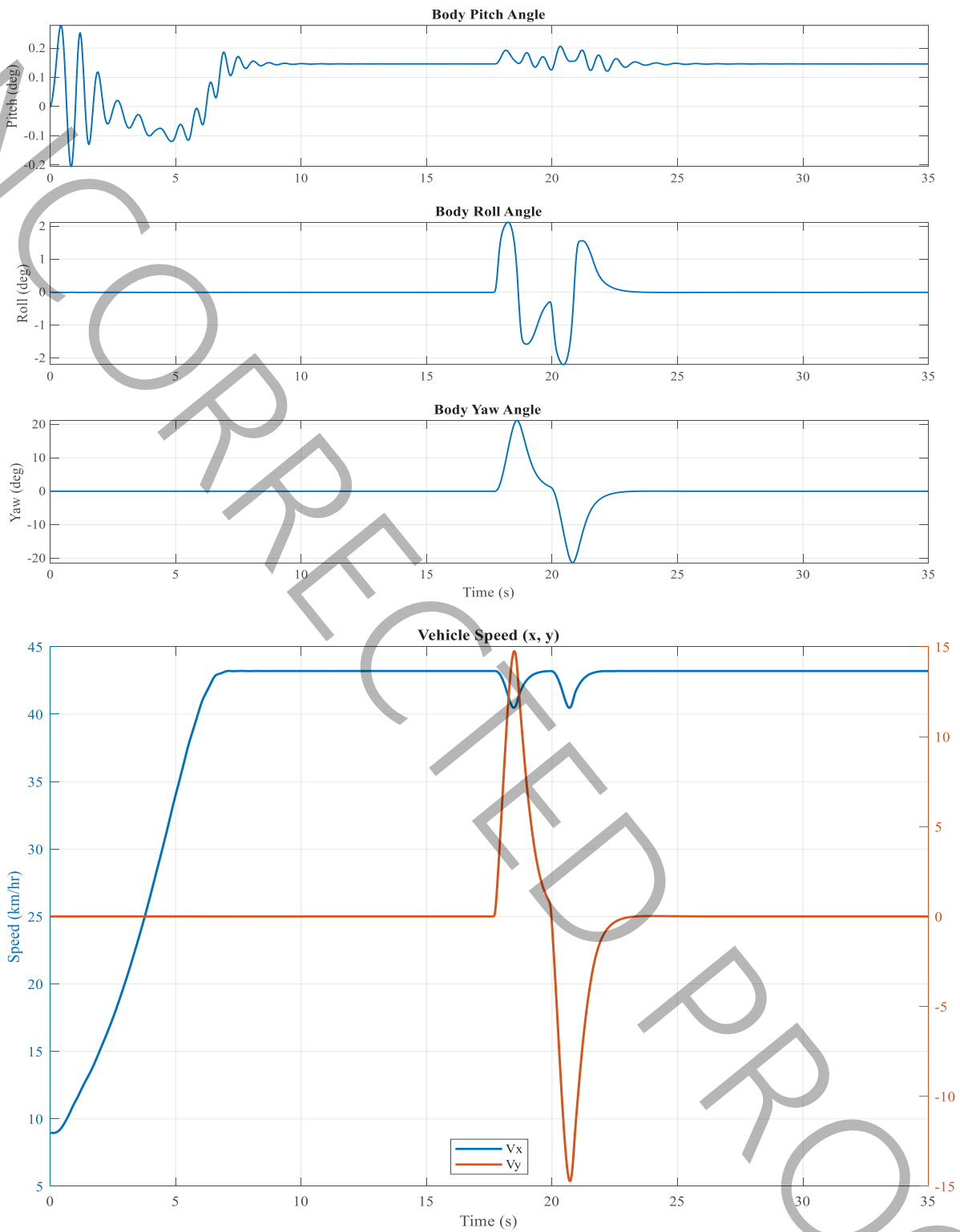
$$c_c = 78.96 (mf_n^2) \quad (14)$$

در این پژوهش برای کاهش ارتعاشات وارده از طرف خودرو به مکانیزم از جاذب ارتعاشی بین این دو جسم استفاده شده است. سه جفت فنر-میراگر پیشی در سه جهت اصلی دستگاه مختصات برای مدل‌سازی، جاذب



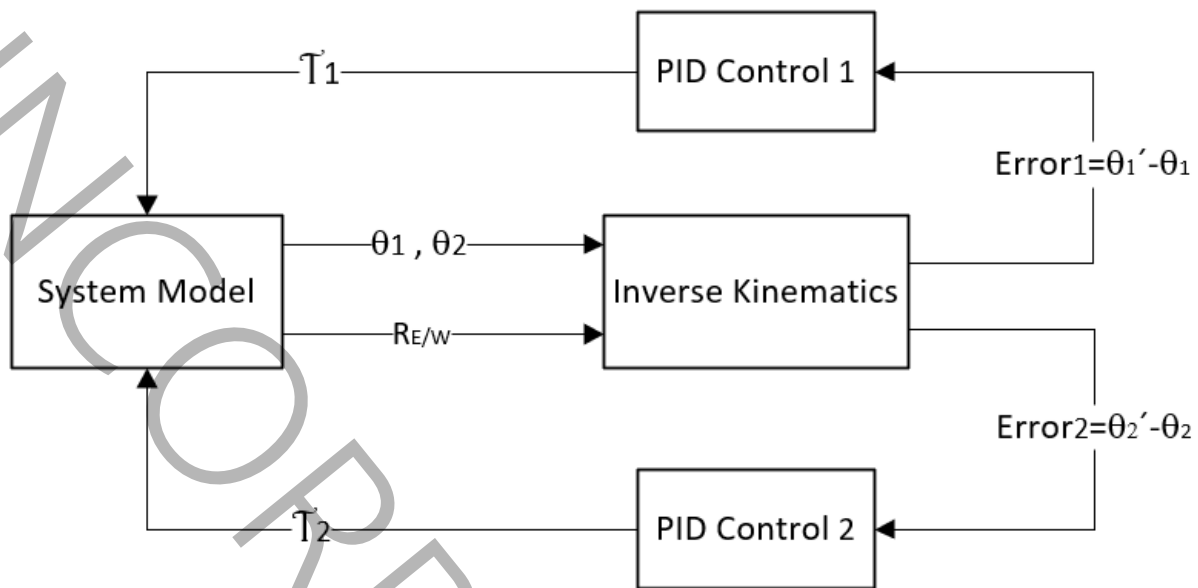
شکل ۴. زاویه محور طولی، عرضی، عمودی و سرعت خودرو در جاده تپه ماهوری

Fig. 4. Body's Roll, Pitch, Yaw angle and speed of the car for hilly road



شکل ۵. زاویه محور طولی، عرضی، عمودی و سرعت خودرو در جاده کوهستانی

Fig. 5. Body's Roll, Pitch, Yaw angle and speed of the car for mountainous road



شکل ۶. ساختار کنترلی استفاده شده جهت پایدارسازی چشم چابک

Fig. 6. Control Structure Used for Stabilizing the Agile Eye

۳- کنترل ربات چشم چابک جهت پایدارسازی مکانیکی

به بردار یکه جهت $[0/350/610/70]^T$ تبدیل می‌شوند.

$$\begin{pmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \theta \cos \varphi \\ \cos \theta \cos \varphi \\ \sin \varphi \end{pmatrix} \quad (15)$$

هدف این پژوهش ثابت نگه داشتن کارگیر ربات چشم چابک در جهت‌گیری مطلوب، هنگامی که بر روی خودروی در حال حرکت بوده و ارتعاشات به صفحه زیرین آن وارد می‌شود، می‌باشد. مکانیزم چشم چابک دو درجه آزادی دارد و با دو موتور می‌توان آن را کنترل نمود، جایگاه موتورها در شکل ۱ مشخص شده است. زاویه موتور اول با θ_1 و زاویه موتور دوم با θ_2 نشان داده شده‌اند.

در این پژوهش ضرایب کنترلی یک بار با استفاده از روش سعی و خطا و یک بار با استفاده از روش زیگلر-نیکولز تنظیم شده‌اند. سپس بین خودرو و چشم چابک، جاذب ارتعاشی قرار داده شده و نتایج حالات مختلف مقایسه شده است.

با قراردادن مقادیر زاویه سمت $\theta = 30^\circ$ و فراز $\varphi = 45^\circ$ در معادله (۱۵) مقادیر $[0/350/610/70]^T$ برای بردار یکه جهت مطلوب کارگیر بدست می‌آید.

ساختار کنترلی به کار رفته برای ربات چشم چابک در شکل ۶ نشان داده شده است. مدل سیستم شامل چشم چابک و خودرو می‌باشد، که خروجی‌های آن مقادیر زوایای موتور اول و دوم در هر لحظه، و همچنین جهت‌گیری کارگیر نسبت به دستگاه مختصات مرجع می‌باشد. این خروجی‌ها وارد بخش سینماتیک معکوس می‌شود. در این بخش با استفاده از معادلات (۱۰) و (۱۱) که بیانگر زوایای مطلوب موتورها برای رسیدن به جهت‌گیری دلخواه می‌باشند، در هر مرحله باتوجه به برداریکه جهت مطلوب کارگیر،

۳-۱- جهت‌گیری مطلوب ربات چشم چابک

همانطور که گفته شد، هدف این پژوهش جهت‌گیری کارگیر چشم چابک در زاویه سمت $\theta = 30^\circ$ و فراز $\varphi = 45^\circ$ می‌باشد. با توجه به محاسبات انجام شده بردار یکه جهت کارگیر مبنای محاسبات قرار گرفته است. با استفاده از معادله‌ای که در پژوهش [۱۷] آورده شده است، زاویه سمت و فراز مورد نظر

نمایش داده شده است:

نمادهای به کار رفته در نتایج کنترلی عبارت‌اند از: $error_1$ تفاضل زاویه مطلوب موتور اول و زاویه حقیقی آن، $error_2$ تفاضل زاویه مطلوب موتور دوم و زاویه حقیقی آن، u_1 سیگنال کنترلی کنترلر اول، u_2 سیگنال کنترلی کنترلر دوم و Π بردار یکجهت‌گیری مطلوب کارگیر. در این پژوهش با استفاده از زوایای موتور راستای کارگیر کنترل شده است. شکل ۷ نشان دهنده مقدار خطای زاویه موتور اول و دوم یعنی تفاوت مقدار مطلوب از مقدار واقعی می‌باشد. شکل ۸ گشتاور کنترلی موتور اول و دوم را نشان می‌دهد.

۳-۴- بهینه‌سازی چشم چابک

در این پژوهش برای کاهش ارتعاشات وارده از طرف خودرو به مکانیزم از جاذب ارتعاشی بین این دو جسم استفاده شده است. سه جفت فنر-میراگر پیچشی در سه جهت اصلی دستگاه مختصات برای مدل‌سازی، جاذب ارتعاشی استفاده شده است. که با استفاده از بلوک متلب بین سقف خودرو و کف مکانیزم چشم چابک قرار گرفته است.

برای تنظیم ضرایب فنر-میراگر این جاذب از روش بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. در ادامه پارامترها و تابع هدف مشخص می‌شود.

هدف بهینه‌سازی ثابت ماندن کارگیر ربات در جهت‌گیری مطلوب می‌باشد. که در واقع همان کمینه کردن خطای زاویه موتورها است. بنابراین تابع هدف خطای زاویه دو موتور یعنی $error_1$ و $error_2$ می‌باشد. در نتیجه بهینه‌سازی دو هدفه است. پارامترهای بهینه‌سازی در این پژوهش، ضرایب فنر-میراگر جاذب ارتعاشی با نمادهای k_1, c_1, k_2, c_2, k_3 و c_3 می‌باشند.

با توجه به تابع هدف و پارامترهای بهینه‌سازی، کد الگوریتم ژنتیک برای این پروژه نوشته شده و بعد از اجرا نتایج زیر برای پارامترهای بهینه‌سازی بدست آمده است.

شکل ۹ نمودار پرتو را برای دو تابع هدف بهینه‌سازی که خطای زاویه موتورها می‌باشند، نشان می‌دهد. در نمودار پرتو نقاط نشان داده شده در واقع همان محدوده‌ی بهینه می‌باشند که با نقاط نمایش داده می‌شوند. در این نمودار نقاطی که به محورها نزدیک هستند، مناسب نیستند زیرا فقط نمایانگر حالت بهینه یک هدف هستند. نقاطی که در فواصل تقریباً مساوی از هر دو محور بوده، تقریباً مرکز نمودار مناسب بوده و بیانگر بهینه شدن سیستم در

زاویه مطلوب هر کدام از موتورها محاسبه و به کنترلر تناسبی-انتگرالی-مشتقی داده می‌شود. در نهایت گشتاور مورد نیاز هر موتور توسط کنترلر مشخص و به عنوان ورودی به موتورها اعمال می‌گردد.

۳-۲- تنظیم ضرایب کنترلی به روش سعی و خطا

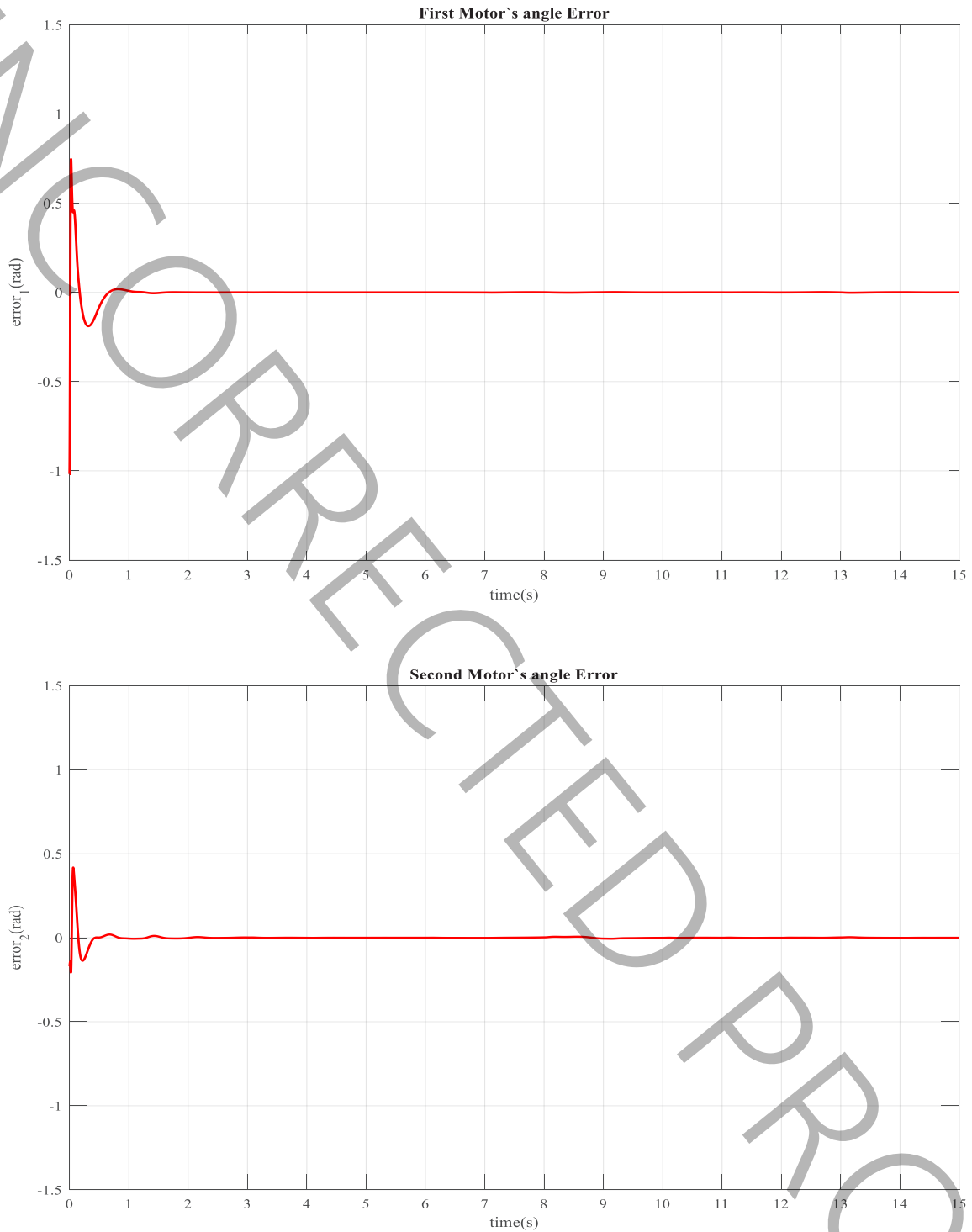
با توجه به اینکه دو موتور مکانیزم کنترلر مجزا دارند در ابتدا برای هر موتور به صورت مجزا ضرایب تناسبی K_p را تا رسیدن سیستم به مرز نوسان برده در حالتی که K_I و K_D صفر هستند. سپس نصف مقدار K_p را انتخاب کرده و سپس از مقادیر کوچک برای K_I شروع کرده تا خطای حالت پایدار را کاهش بیابد این عمل را برای هر دو موتور به صورت جداگانه تکرار شده سپس برای K_D مقدار ناچیزی انتخاب و مانند مراحل قبل ضریبی معقول تعیین کرده تا سرعت مناسب را بدهد. و پس از طی این مراحل همزمان ضرایب کنترلر برای هر دو موتور تغییر داده می‌شود این تغییر به صورت بالا و پایین بردن ضرایب برای رسیدن به پاسخ مناسب می‌باشد. پس از طی چندین مرحله سعی و خطا، ضرایب کنترلی برای کنترلر اول به صورت: $P=0.56, I=0.37, D=0.02$ و برای کنترلر دوم به صورت: $P=2, D=0.23, I=9.43$ می‌باشد. در ادامه نتایج کنترل مکانیزم برای دو پروفیل جاده نمایش داده می‌شود.

۳-۳- تنظیم ضرایب کنترلی به روش زیگلر-نیکولز

با استفاده از روش زیگلر-نیکولز، پس از نوسانی کردن سیستم مقادیر $K_u = 4/58$ و $T_u = 0/5$ بدست می‌آید که با جایگذاری در معادله (۱۶) برای کنترلر اول ضرایب کنترلی به صورت: $P=2/74, I=18/3, D=0/28$ بدست می‌آیند. برای کنترلر دوم مقادیر $K_u = 8/628$ و $T_u = 0/333$ پس از نوسانی شدن سیستم بدست می‌آیند. با جایگذاری این مقادیر در معادله (۱۶) برای کنترلر دوم نیز، به صورت: $P=5/17, D=0/35, I=52$ بدست می‌آیند.

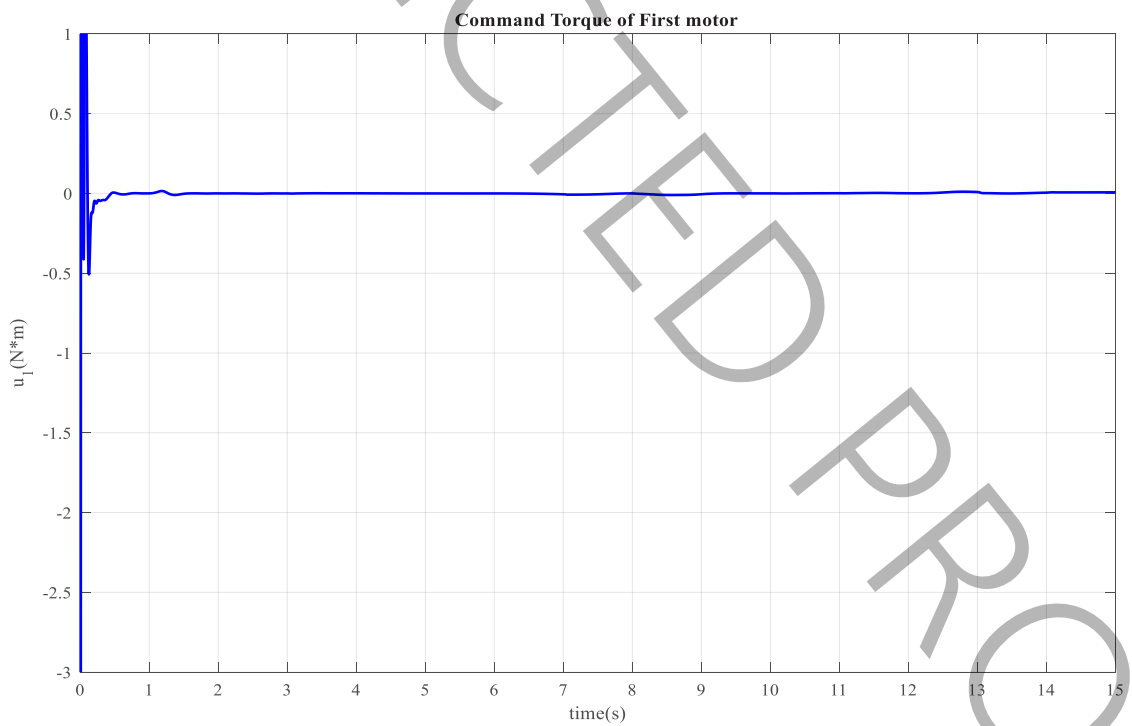
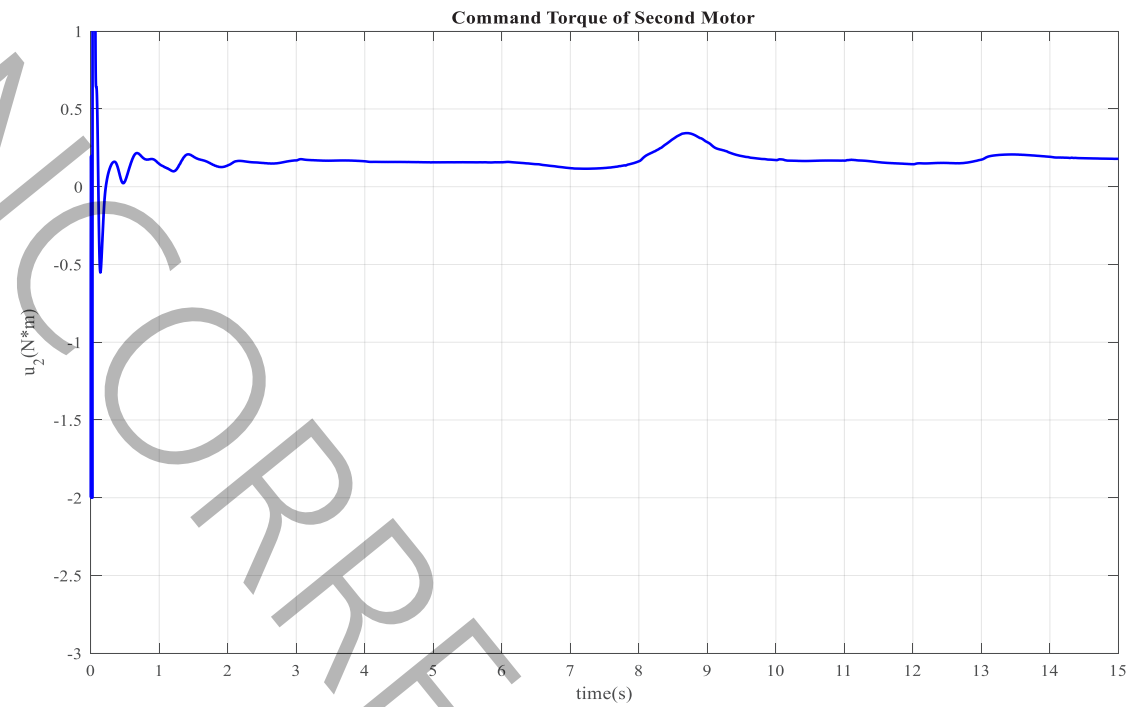
$$\begin{aligned} K_p &= 0.6K_u, \\ K_I &= 1.2 \frac{K_u}{T_u}, \\ K_D &= 0.075K_u T_u \end{aligned} \quad (16)$$

نمودارهای کنترلی با استفاده از روش زیگلر-نیکولز در شکل‌های زیر



شکل ۷. خطای زاویه موتور اول و دوم در جاده تپه ماهوری با روش زیگلر نیکولز

Fig. 7. First and Second Motor Angle Errors on a hilly road Using the Ziegler-Nichols Method



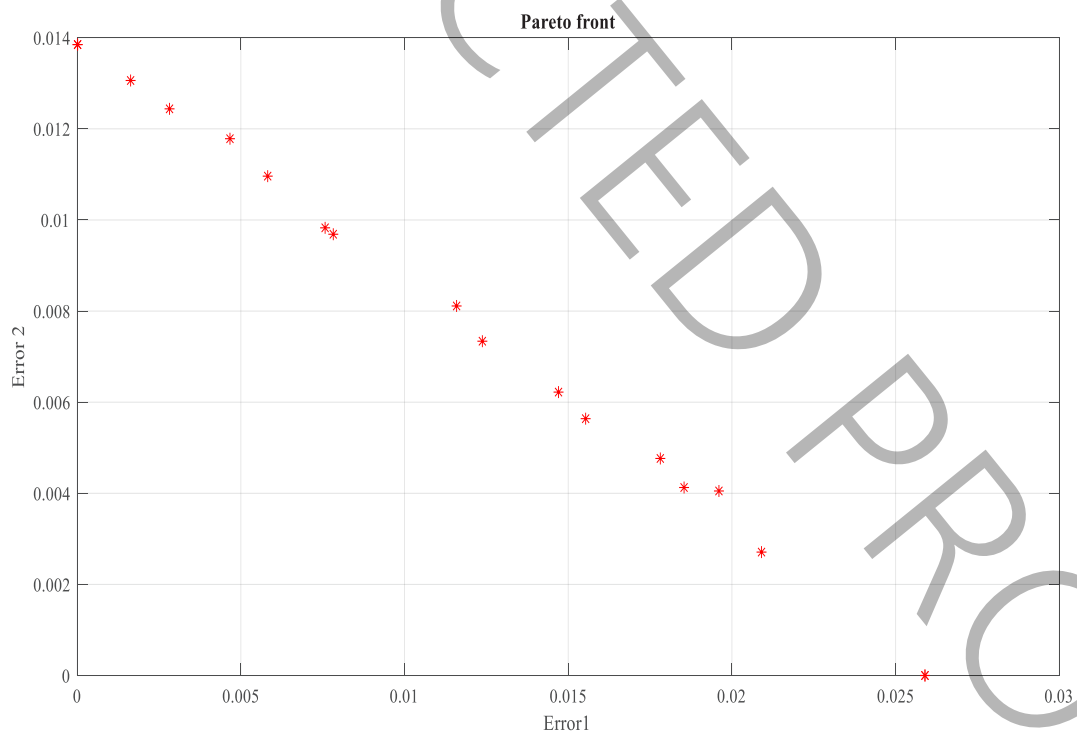
شکل ۸. گشتاور کنترلی موتور اول و دوم در جاده تپه ماهوری با روش زیگلر-نیکولز

Fig. 8. First and Second Motor Torque control on a hilly road Using the Ziegler-Nichols Method

جدول ۳. پارامترهای تنظیم شده بهینه‌سازی

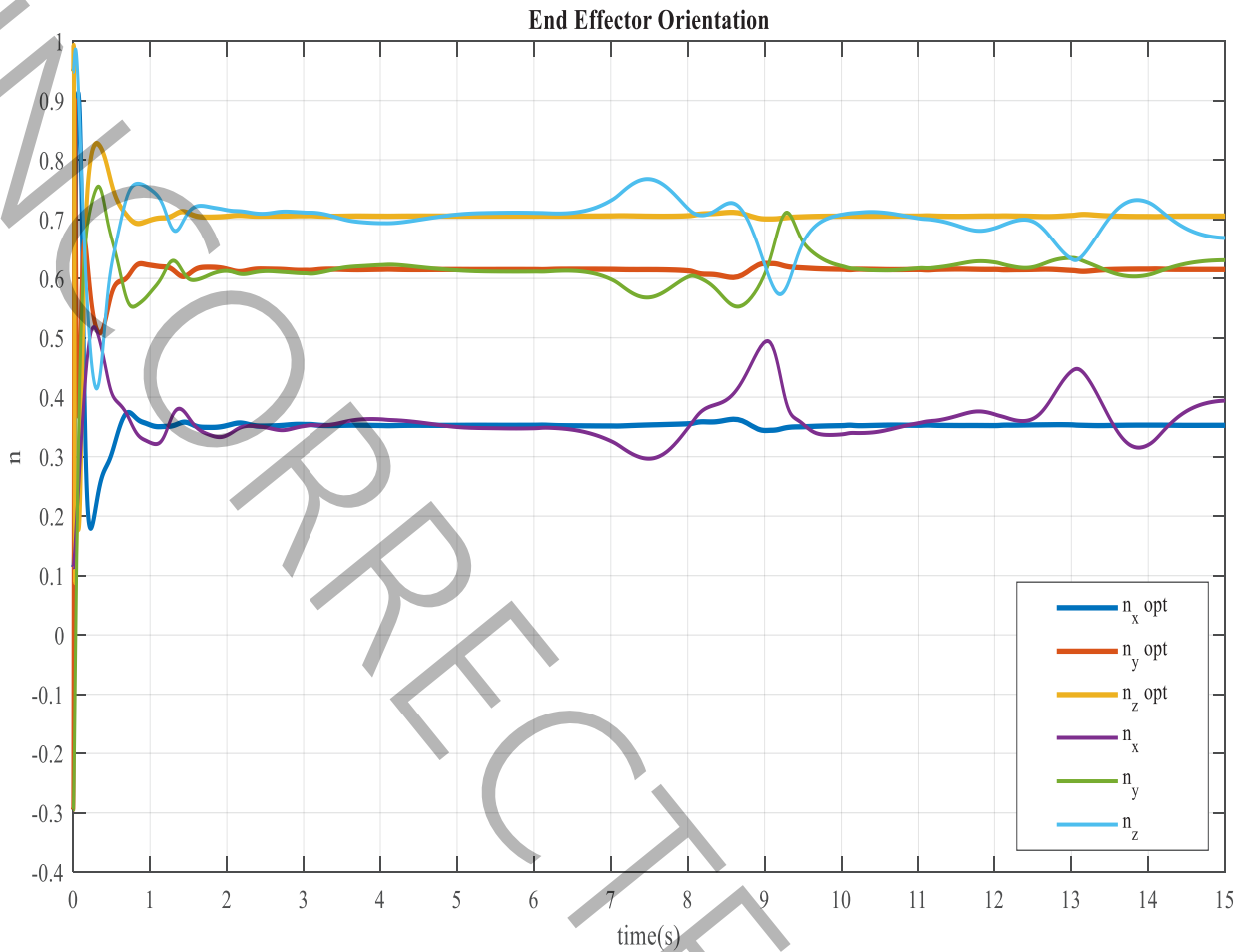
Table 3. Optimized Tuning Parameters

مقدار	نماد	پارامتر بهینه سازی
۱/۱۰۹۸	$k_1 (N * m / deg)$	ضریب فنریت در جهت X
۰/۴۸۹۷	$c_1 (N * m * s / deg)$	ضریب میرایی در جهت X
۰/۷۲۴۹	$k_2 (N * m / deg)$	ضریب فنریت در جهت Y
۰/۸۰۴۸	$c_2 (N * m * s / deg)$	ضریب میرایی در جهت Y
۱/۲۷۶۳	$k_3 (N * m / deg)$	ضریب فنریت در جهت Z
۰/۳۷۷۸	$c_3 (N * m * s / deg)$	ضریب میرایی در جهت Z



شکل ۹. نمودار پرتو الگوریتم ژنتیک

Fig. 9. Genetic Algorithm Pareto Diagram



شکل ۱۰. مقایسه جهت‌گیری کارگیر با تنظیم ضرایب کنترلر تناسبی-انتگرالی-مشتقی به روش سعی وخطا و زیگلر-نیکولز در جاده تپه ماهوری

Fig. 10. Comparison of the steering performance of a mechanism's end-effector using PID tuning with both trial and error and Ziegler-Nichols methods on a hilly road

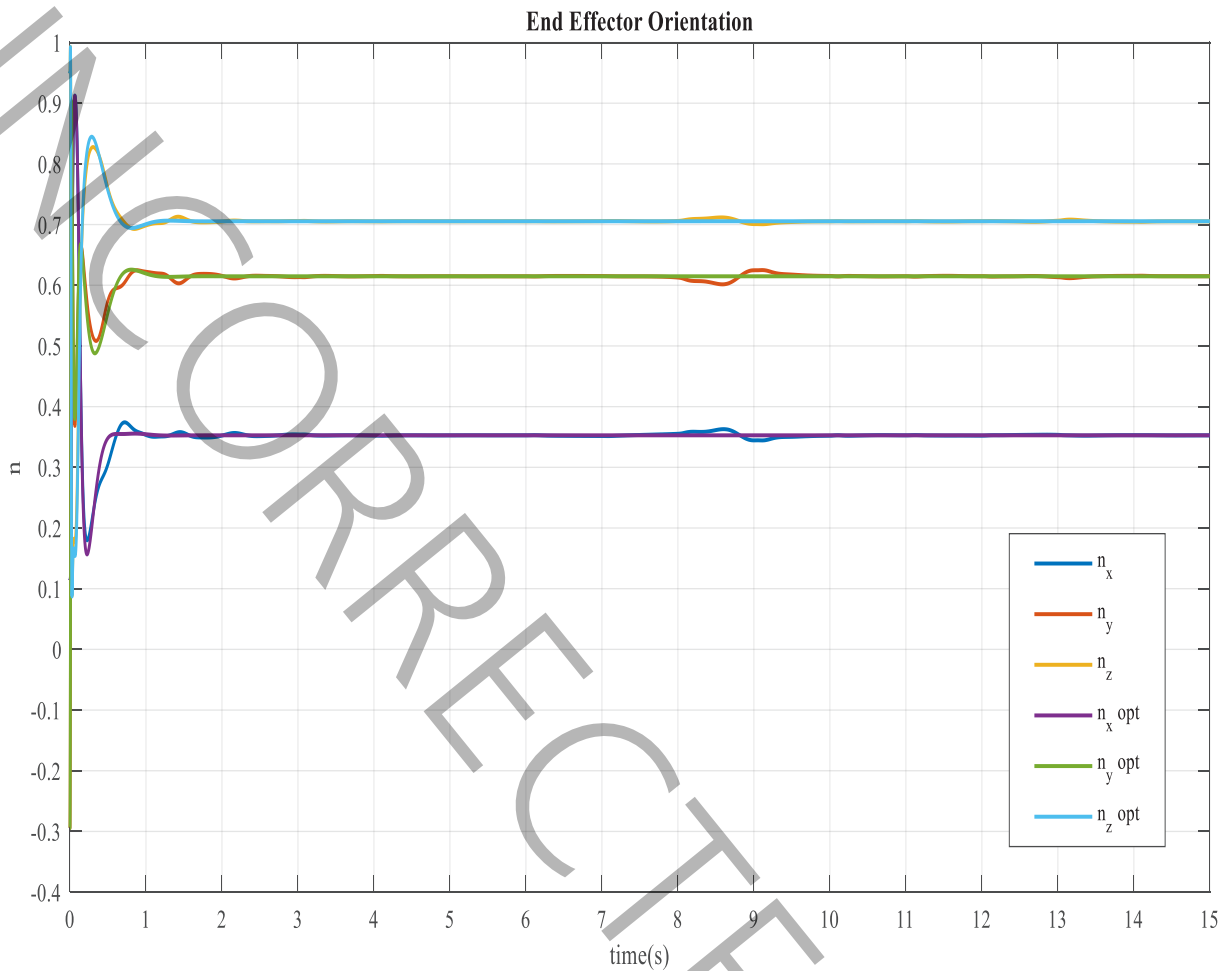
به پایه مکانیزم در شکل ۴ و رنگ‌های دیگر مربوط به تغییر زاویه محورها در حالت تنظیم ضرایب با روش زیگلر-نیکولز می‌باشد. از تغییر مقادیر دو نمودار می‌توان نتیجه گرفت که کنترلر زیگلر-نیکولز در نقاط بحرانی نیز به خوبی جهت‌گیری را دنبال کرده و پاسخ سیستم بهبود یافته است.

در شکل ۱۱ جهت‌گیری کارگیر در شرایط حرکت خودرو در جاده تپه ماهوری، در حالت تنظیم ضرایب کنترلی با روش زیگلر-نیکولز در حالت عادی و با حضور جاذب مقایسه شده است. خطوط زرد، قرمز و آبی تیره نشان‌دهنده تغییر زوایای محور طولی، عرضی و عمودی کارگیر ربات با کنترلر تنظیم شده به روش زیگلر-نیکولز، با توجه به ارتعاشات وارده به پایه

جهت برآورده شدن هر دو هدف می‌باشد.

۴- نتایج و بحث

در شکل ۱۰ جهت‌گیری کارگیر ربات در شرایط حرکت خودرو در جاده تپه ماهوری در دو حالت استفاده از کنترلر تناسبی-انتگرالی-مشتقی با تنظیم ضرایب به روش سعی وخطا و کنترلر تناسبی-انتگرالی-مشتقی با تنظیم ضرایب به روش زیگلر-نیکولز مقایسه شده است. خطوط زرد، قرمز و آبی تیره نشان‌دهنده تغییر زوایای محور طولی، عرضی و عمودی کارگیر ربات با کنترلر تنظیم شده به روش زیگلر-نیکولز، با توجه به ارتعاشات وارده



شکل ۱۱. مقایسه جهت‌گیری کارگیر با کنترلر تناسبی-انتگرالی-مشتقی به روش زیگلر نیکولز بدون جاذب و با وجود جاذب ارتعاشی در جاده تپه ماهوری

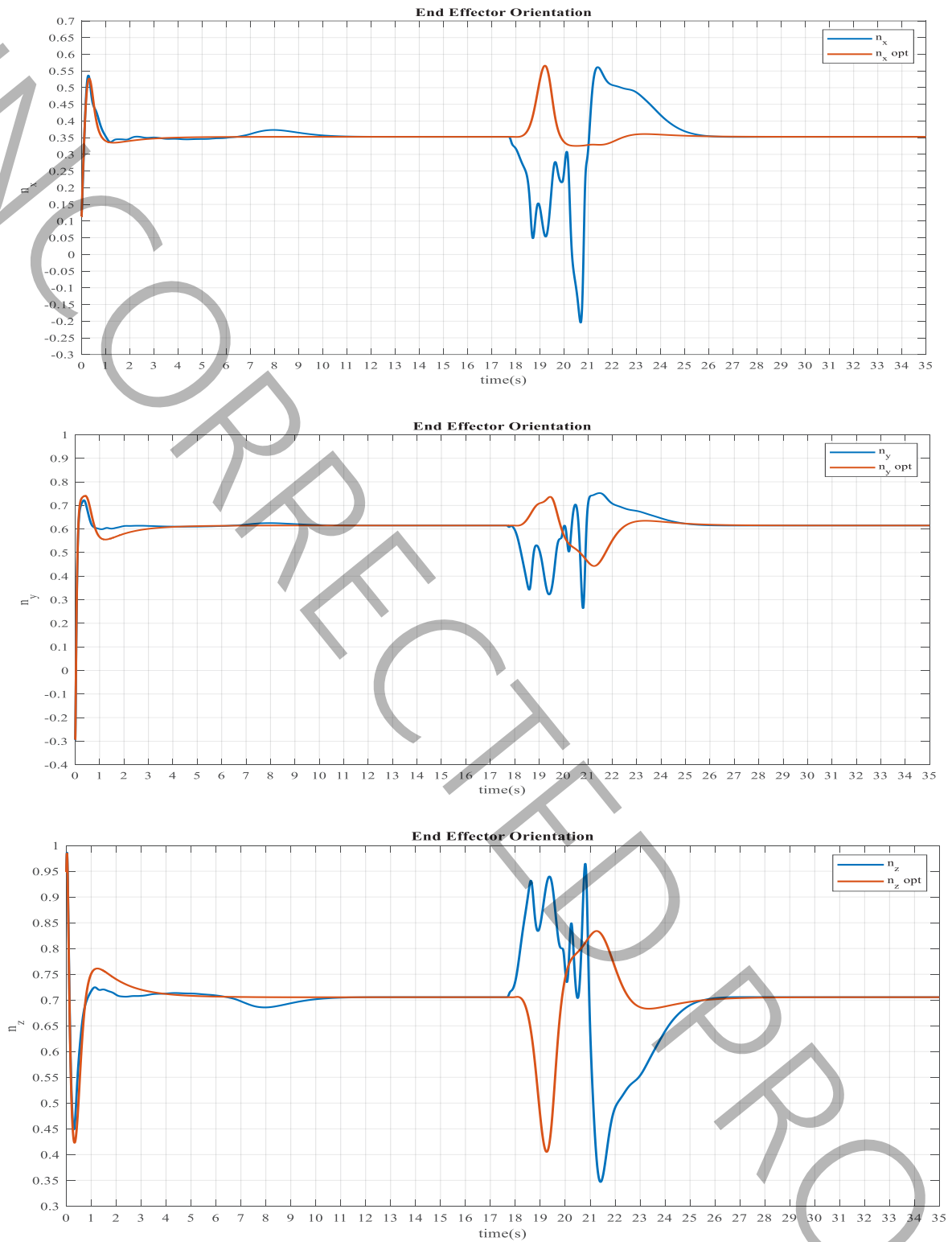
Fig. 11. Comparison of the steering performance of a mechanism's end-effector without a damper and with a vibration damper on a hilly road

جاذب ارتعاشی می‌باشد. خطوط آبی تیره نشان دهنده تغییر زوایای محور طولی، عرضی و عمودی کارگیر ربات با کنترلر تنظیم شده به روش سعی و خطا، با توجه به ارتعاشات وارده به پایه مکانیزم در شکل ۵ و رنگ قرمز مربوط به تغییر زوایه محورها در حالت تنظیم ضرایب با روش سعی و خطا و استفاده از جاذب ارتعاشی می‌باشد.

از بررسی نمودار شکل می‌توان دریافت که پاسخ سیستم در دو راستای x و z بیشتر از راستای y بهبود یافته است. این مسئله همانگونه که پیش از این اشاره شد به دلیل دو تغییر مسیر در حرکت خودرو در سرعت نسبتاً بالا

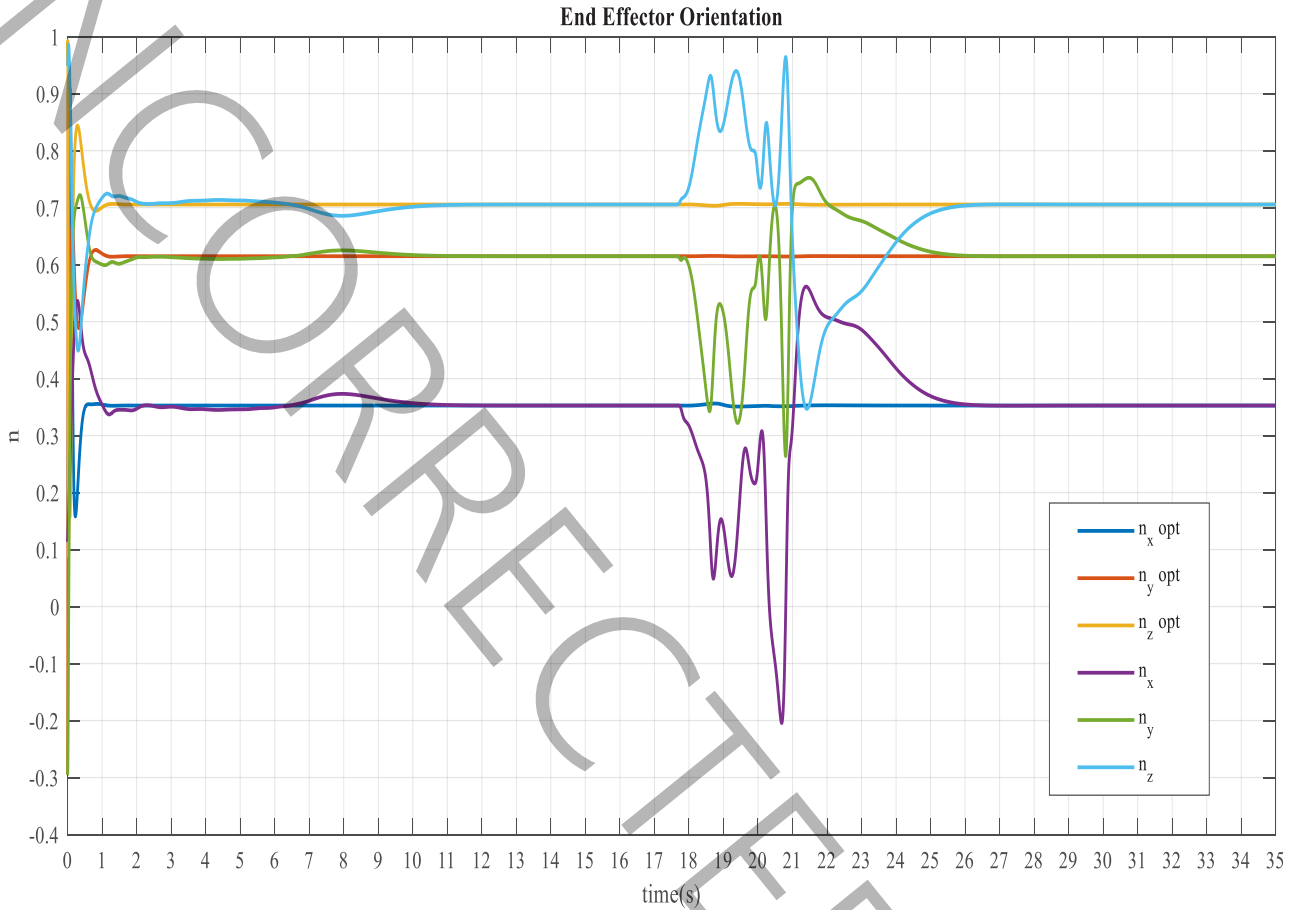
مکانیزم در شکل ۴ و رنگ‌های دیگر مربوط به تغییر زوایه محورها در حالت تنظیم ضرایب با روش زیگلر-نیکولز و استفاده از جاذب ارتعاشی می‌باشد. همانطور از شکل مشخص است حضور جاذب باعث شده در محدوده بحرانی این جاده که بین هشت تا ده ثانیه است، کارگیر ربات ثابت مانده و نسبت به حالت بدون جاذب بهبود بیابد.

در شکل ۱۲ نمودار جهت‌گیری کارگیر ربات در شرایط حرکت خودرو در جاده کوهستانی در حالت اضافه شدن جاذب و بهینه‌سازی و در حالت سیستم فاقد جاذب مقایسه شده است که نشانگر بهبود کنترل سیستم در حالت وجود



شکل ۱۲. مقایسه جهت‌گیری کارگیر مکانیزم بدون جاذب و با وجود جاذب ارتعاشی در جاده کوهستانی

Fig. 12. Comparison of the steering performance of a mechanism's end-effector without a damper and with a vibration damper on a mountainous road



شکل ۱۳. مقایسه جهت‌گیری کارگیر با کنترلر تناسبی-انتهگرای-مشتقی و کنترلر زیگلر-نیکولز در حضور ارتعاشی در جاده کوهستانی

Fig. 13. Comparison of steering performance of a mechanism's end-effector with PID control and Ziegler-Nichols control in the presence of a vibration damper on a mountainous road

طولی، عرضی و عمودی کارگیر ربات با کنترلر تنظیم شده به روش زیگلر - نیکولز، با توجه به ارتعاشات وارده به پایه مکانیزم در شکل ۵ با حضور جاذب ارتعاشی و رنگ‌های دیگر مربوط به تغییر زاویه محورها در حالت تنظیم ضرایب با روش زیگلر - نیکولز بدون استفاده از جاذب ارتعاشی می‌باشد.

در جدول ۴ مقدار موثر خطا برای انواع شرایط در نظر گرفته شده در این پژوهش نشان داده شده است.

بین ثانیه هجده و بیست و سه در راستای λ می‌باشد.

در شکل ۱۳ برآیند فعالیت‌های انجام شده در این پژوهش قابل مشاهده می‌باشد. جهت‌گیری کارگیر ربات در حالت استفاده از کنترلر تنظیم شده با سعی و خطا و کنترلر تنظیم شده با روش زیگلر-نیکولز در حضور جاذب ارتعاشی در جاده کوهستانی مقایسه شده است. خطا در حالت دوم نسبت به حالت اول به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش پیدا کرده است. خطوط زرد، قرمز و آبی تیره نشان دهنده تغییر زوایای محور

جدول ۴. مقایسه مقدار موثر خطا در تمام حالات سیستم

Table 4. Comparison of the Root Mean Square Error (RMSE) in all system conditions

$RMSEn_3$	$RMSEn_2$	$RMSEn_1$	نوع جاده+روش کنترلی+بهینه‌سازی
۰/۱۳۷۱	۰/۱۸۸۱	۰/۱۶۰۰	جاده تپه ماهوری+کنترلر تناسبی-انتگرالی- مشتقی با روش سعی وخطا
۰/۰۷۹۲	۰/۰۹۲۴	۰/۰۹۸۱	جاده تپه ماهوری+کنترلر تناسبی-انتگرالی- مشتقی با روش زیگلر-نیکولز
۰/۰۵۸۳	۰/۰۷۱۹	۰/۰۵۲۶	جاده تپه ماهوری+کنترلر تناسبی-انتگرالی- مشتقی با روش سعی وخطا+جاذب ارتعاشی
۰/۰۲۷۰	۰/۰۴۵۱	۰/۰۴۱۷	جاده تپه ماهوری+کنترلر تناسبی-انتگرالی- مشتقی با روش زیگلر-نیکولز+جاذب ارتعاشی
۰/۲۸۵۰	۰/۲۶۰۱	۰/۱۸۷۰	جاده کوهستانی+کنترلر تناسبی-انتگرالی- مشتقی با روش سعی وخطا
۰/۱۷۹۳	۰/۲۱۸۴	۰/۱۴۹۲	جاده کوهستانی+کنترلر تناسبی-انتگرالی- مشتقی با روش زیگلر-نیکولز
۰/۰۴۹۰	۰/۰۸۳۳	۰/۰۷۶۱	جاده کوهستانی+کنترلر تناسبی-انتگرالی- مشتقی با روش سعی وخطا+جاذب ارتعاشی
۰/۰۳۲۸	۰/۰۴۷۹	۰/۰۳۱۹	جاده کوهستانی+کنترلر تناسبی-انتگرالی- مشتقی با روش زیگلر-نیکولز+جاذب ارتعاشی

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱- نتیجه گیری

در این پژوهش هدف پایدارسازی سیستم و ردیابی هدف می‌باشد. برای این هدف مکانیزم چشم چابک به دلیل مزیت‌هایش انتخاب شده است. خودرو در زیر مکانیزم قرار گرفته و ارتعاشات از این طریق وارد سیستم می‌شوند در مرحله اول برای کاهش ارتعاشات انواع سیستم تعلیق خودرو بررسی و مناسب‌ترین سیستم تعلیق انتخاب شده است. در ادامه کنترل و بهینه‌سازی سیستم صورت گرفته است. نتایج کلی حاصل از این پژوهش در موارد زیر خلاصه می‌شود:

۱- ضرایب کنترلی با استفاده از روش زیگلر نیکولز تنظیم شدند. کارگیر به خوبی در جهت‌گیری مناسب تثبیت شده و خطای ردیابی هدف کاهش پیدا کرد. اما ضرایب تنظیم شده با این روش نسبت به ضرایب کنترلی که با سعی و خطا تنظیم شده بود، مقدار بزرگتری داشتند. در نتیجه روش زیگلر-نیکولز پاسخ قابل قبولی را برای سیستم رقم زد اما این روش معایبی نیز دارد. برای مثال اینکه سیستم به مرز نوسان برسد ممکن است برای سیستم خطرناک بوده و به آن آسیب بزند. به علاوه در برخی از سیستم‌ها نوسانی کردن سیستم امکان‌پذیر نمی‌باشد. این روش برای سیستم‌هایی با پایداری مشروط کاربرد داشته و فراگیر نمی‌باشد. ضرایب بدست آمده از این روش بهینه نبوده و نیاز است مجدداً حول همان مقادیر با استفاده از سعی و خطا ضرایب مناسب بدست بیایند.

۲- ضرایب جاذب ارتعاشی با استفاده از الگوریتم ژنتیک برای ثابت نگه داشتن کارگیر در جهت‌گیری مطلوب بهینه‌سازی شدند. سیستم با حضور جاذب ارتعاشی نتایج مناسبی در تثبیت جهت‌گیری کارگیر ثبت کرد.

۳- خطای ردیابی هدف در حالت استفاده از جاذب ارتعاشی در مقایسه با عدم حضور جاذب کاهش پیدا کرد. و همچنین گشتاور کنترلی مورد نیاز کاهش پیدا کرد در نتیجه سیستم با نیروی کمتری کنترل شد.

۵-۲- پیشنهادات

۱- جایگزینی مدل سه درجه آزادی چشم چابک به جای مکانیزم دو درجه آزادی و مقایسه عملکرد دو مکانیزم.

۲- تنظیم ضرایب کنترلر تناسبی-انتگرالی-مشتقی با رویکرد آنلاین مانند تنظیم ضرایب با منطق فازی زیرا در برخی جاده‌ها کنترلر فقط در نقاط بحرانی پاسخ مناسبی نداشت و در بقیه زمان‌ها به خوبی هدف را دنبال می‌کرد. بنابراین کنترلی که ضرایب آن با توجه به شرایط تغییر کند، برای این سیستم می‌تواند مناسب باشد.

۳- ارزیابی عملکرد سیستم برای جاده‌های دیگر به خصوص جاده‌هایی با پیچ‌وخم‌های شدید و مقایسه کارایی مدل در این نوع جاده‌ها.

۴- کنترل مکانیزم با وجود مشکلات سیستم تعلیق زیرا در این پژوهش بهترین سیستم تعلیق موجود مورد بررسی قرار گرفته است.

- IEEE, 2018, pp. 232-238.
- [9] S.A. Rad, M.G. Tamizi, M. Azmoun, M. Tale Masouleh, A. Kalhor, Experimental study on robust adaptive control with insufficient excitation of a 3-DOF spherical parallel robot for stabilization purposes, *Mechanism and Machine Theory*, 153 (2020).
- [10] M. Heydarzadeh, N. Karbasizadeh, M. Tale Masouleh, A. Kalhor, Experimental kinematic identification and position control of a 3-DOF decoupled parallel robot, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 233(5) (2019) 1841-1855.
- [11] A. Alamdar, S. Hanifeh, F. Farahmand, A. Mirbagheri, A modified agile-eye mechanism for robotic manipulation of wristed laparoscopic instruments A modified agile-eye mechanism for robotic manipulation of wristed laparoscopic instruments, in, *TechRxiv*, 2021.
- [12] J.F. Gosselin, Two degree-of-freedom spherical orienting device, U.S. Patent, (1999) 6-6.
- [13] H. Kang, H. Lin, L. Wu, H. Chen, Y. Wu, Neural-optimal tuning of a controller for a parallel robot, *Mechatronics*, 74(1) (2024) 110314.
- [14] B. Danaei, A. Arian, M. Tale masouleh, A. Kalhor, Dynamic modeling and base inertial parameters determination of a 2-DOF spherical parallel mechanism, *Multibody System Dynamics*, 41(4) (2017) 367-390.
- [15] S. Miller, Simscape Vehicle Templates, in, *MathWorks*, 2020. [Online]. Available: <https://github.com/mathworks/Simscape-Vehicle-Templates>
- [16] Road Estimator – Easiest software for cross-section and quantity calculation. [Online]. Available: <https://infycons.com/road-estimator-easiest-software-for-cross-section-and-quantity-calculation/>
- [17] T.P.Z. DeCastro, S. K., A Note on the Measurement of Azimuth, Elevation and Polarization Angle in Antenna Radiation Pattern, *International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT)*, 5(2) (2016) 77-82.
- [1] E.R.J. Bozorgi, I. Yahyapour, A. Karimi, M.T. Masouleh, M. Yazdani, Design, development, dynamic analysis and control of a 2-DOF spherical parallel mechanism, in: 2014 2nd RSI/ISM International Conference on Robotics and Mechatronics, ICRoM 2014, 2014, pp. 445-450.
- [2] G. Wu, S. Caro, S. Bai, J. Kepler, Dynamic modeling and design optimization of a 3-DOF spherical parallel manipulator, *Robotics and Autonomous Systems*, 62(10) (2014) 1377-1386.
- [3] X. Kong, Analysis of Parallel Manipulators Based on the Instability, *Robotica*, 18(1) (2000) 63-70.
- [4] A. Arian, A. Kalhor, An Experimental Study on Blinking Detection via EEG Signals for Human-Robot Interaction Purposes Based on a Spherical 2-DOF Parallel Robot, 48(1) (2016) 55-63.
- [5] M. Arredondo-Soto, E. Cuan-Urquizo, A. Gómez-Espinosa, A. Roman-Flores, P.D.U. Coronado, M. Jimenez-Martinez, The compliant version of the 3-RRR spherical parallel mechanism known as “Agile-Eye”: Kinetostatic analysis and parasitic displacement evaluation, *Mechanism and Machine Theory*, 180 (2023).
- [6] A. Alamdar, S. Hanifeh, A. Mirbagheri, F. Farahmand, S. Hanifeh, A modified agile-eye mechanism for robotic manipulation of wristed laparoscopic instruments, in: 2023 International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering (ICMRE 2023), 2023.
- [7] M. Daneshmand, M.T. Masouleh, G. Anbarjafari, Kinematic sensitivity analysis of a 3-DoF decoupled translational parallel mechanism with uncertainties in the passive joints, in: 2015 12th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence, URAI 2015, 2015, pp. 85-90.
- [8] B. Danaei, M.R. Alipour, A. Arian, M.T. Masouleh, A. Kalhor, Control of a two degree-of-freedom parallel robot as a stabilization platform, in: 5th RSI International Conference on Robotics and Mechatronics, IcRoM 2017,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Mirchi, M. Sadedel, Optimization and Control of Agile Eye Mechanism to Stabilize Car Vibrations and Target Tracking, Amirkabir J. Mech Eng., 56(6) (2024) 885-908.

DOI: [10.22060/mej.2024.23309.7741](https://doi.org/10.22060/mej.2024.23309.7741)



UNCORRECTED PROOF