

Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 55(12) (2024) 317-320 DOI: 10.22060/mej.2024.22681.7658

Design and Experimental Validation of an Extended State Observer for Estimating of Uncertainties and Unknown Road Input in a Quarter-car McPherson Suspension System

Zahra Ahangari Sisi, Mehdi Mirzaei, Sadra Rafatnia

Faculty of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

ABSTRACT: This paper deals with the design and experimental implementation of an extended state observer for a fabricated quarter-car suspension platform with a McPherson mechanism equipped with different sensors. The algorithm aims to estimate uncertainties and road input, leading to an accurate dynamic model for the vehicle suspension system. In the proposed method, the terms including uncertainties and unknown road input are added to the system equations as new state variables and then estimated along with other state variables using data of sprung mass and un-sprung mass displacements. A nonlinear Kalman filter with unknown input is also designed to be compared with the extended state observer. The comparison results using the experimental data under measurement errors indicate the high accuracy of the extended state observer in constructing a precise dynamic model for the system. Meanwhile, the extended state observer uses fewer sensors and its regulation is easier. Both observers are used within the structure of the active suspension system under an optimal nonlinear controller to provide the objectives of the suspension system. Co-simulation results of Adams/MATLAB show the better performance of the proposed controller using the extended state observer.

Review History:

Received: Sep. 14, 2023 Revised: Feb. 25, 2024 Accepted: Apr. 11, 2024 Available Online: Apr. 25, 2024

Keywords:

Vehicle Suspension System Unknown Road Input Extended State Observer Unknown Input Kalman Filter Optimal Nonlinear Control

1-Introduction

Active suspension systems (ASS) are designed to enhance ride comfort by isolating vibrations due to road irregularities while ensuring tire contact with the road to improve braking and steering capabilities [1]. Accurately estimating road irregularities and obtaining precise information about the suspension system are essential for the development of a dynamic model used to design model-based controllers. To achieve such a model of a vehicle suspension system in the presence of uncertainties and road irregularities, estimation algorithms based on sensor information can be utilized.

This paper aims to provide an extended state observer (ESO) to simultaneously estimate the road input and model uncertainties of vehicle suspension systems. The proposed method utilizes information about the sprung and un-sprung mass displacements to estimate model uncertainties and disturbances. Given that this information is unavailable via sensors in real-world environments, the necessary outputs of the observer are derived through the double integration of band-pass filtered accelerations. Practical tests for a fabricated suspension system with a MacPherson mechanism are used to verify the presented estimation algorithm in a real environment. For comparison with other common methods, the obtained results are contrasted with the unknown-input Kalman filter developed in references [2, 3]. The results

indicate the superior accuracy of the proposed method in estimating the states of the system, road inputs, and uncertainties. In the rest of the paper, an optimal nonlinear controller based on the provided observers is developed. This control method has previously been introduced by the authors in references [4, 5]. The primary objective of the proposed controller is to enhance ride comfort, ensure admissible working space, and maintain tire contact with the road. The efficacy of the controller is verified through ADAMS/ Matlab co-simulation studies. Furthermore, the results are compared with those obtained from the controller utilizing the unknown-input Kalman filter. The comparative analysis indicates that the ESO can effectively estimate the state of the system, road input, and uncertainties. Consequently, the resultant controller demonstrates a robust performance in reducing body acceleration despite the physical limitations of the active suspension system.

2- The Overview of the Estimation Algorithm

Figure 1 presents an overview of the proposed estimation method for a quarter-car structure. This method utilizes two Wilcoxon-777B accelerometers to capture vertical accelerations of the sprung and un-sprung masses at 100 Hz. Data is collected and processed using LabVIEW software via a data acquisition card. The estimation algorithm corrects

*Corresponding author's email: mirzaei@sut.ac.ir



Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.



Fig. 1. The overall structure of the proposed algorithm.

mismatches between the theoretical model and the actual platform using displacement data derived from the double integration of filtered accelerometer outputs.

3- State Space Model of Quarter Suspension System

The state space of the model of the system can be derived as

$$\begin{cases} \dot{x}_{1} = x_{2}, \\ \dot{x}_{2} = f_{1} + \frac{1}{m_{s}}u. \end{cases}$$
(1)

$$\begin{cases} \dot{x}_3 = x_4, \\ \dot{x}_4 = f_2 + d_1 x_r - \frac{1}{m_{us}} u, \end{cases}$$
(2)

where $x_{i(i=1,...,4)}$ are the states of the system including the displacements and velocities of sprung and un-sprung masses.

4- Extended State Observer

By utilizing Eqs. (1) and (2) and augmenting the terms of uncertainties and unknown inputs as additional state variables, the state space model is effectively expanded as

$$(i = 1, 2) \begin{cases} \dot{\xi}_i = \mathbf{A}\xi_i + \mathbf{E}H_i + \mathbf{B}_i u, \\ \hat{\mathbf{y}}_i = \mathbf{C}\xi_i, \end{cases}$$
(3)

where

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{E} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_{1} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m_{s}} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_{2} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{-1}{m_{us}} \\ 0 \end{bmatrix}$$
(4)
$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \hat{\xi}_{1} = \begin{bmatrix} x_{1} & x_{2} & F_{1} \end{bmatrix}^{T}$$

in which $F_1 = f_1$ and $F_2 = f_2 + d_1 x_r$. With these definitions, the observer state-space is obtained as

$$(i=1,2)\begin{cases} \dot{\mathbf{z}}_i = \mathbf{A}\mathbf{z}_i + \mathbf{B}_i u + \mathbf{L}_i(\hat{\mathbf{y}}_i - \mathbf{y}_i),\\ \mathbf{y}_i = \mathbf{C}\mathbf{z}_i, \end{cases}$$
(5)

where the observer gains are shown by $\mathbf{L}_1 = \begin{bmatrix} \beta_1 & \beta_2 & \beta_3 \end{bmatrix}^T$ and $\mathbf{L}_2 = \begin{bmatrix} \beta_4 & \beta_5 & \beta_6 \end{bmatrix}^T$.

5- Results and Discussion

The comparative results of the proposed observer with the unknown-input Kalman filter are presented in Fig. 2. As illustrated in this figure, the proposed method demonstrates superior performance in estimating the displacements and velocities of both sprung and unsprung masses.

6- Conclusions

In this article, an extended state observer algorithm has been designed for estimating uncertainties and unknown road inputs. The results indicate the efficiency of the proposed extended state observer in reducing estimation error in the presence of various sources of uncertainty and disturbances. Additionally, comparative results with an unknown-input Kalman filter demonstrate the high accuracy of the proposed observer in providing a reliable dynamic model for the



Fig. 2. The comparative results of the proposed method with unknown-input Kalman filter.

suspension system.

References

- [1] Z. Z Ahangari Sisi, M. Mirzaei, S. Rafatnia, B. Alizadeh, Design of a constrained nonlinear controller using firefly algorithm for active suspension system, Journal of Computational Methods in Engineering, 39(2) (2022) 23-44.
- [2] S.-W. Kang, J.-S. Kim, G.-W. Kim, Road roughness estimation based on discrete Kalman filter with unknown input, Vehicle System Dynamics, 57(10) (2019) 1530-1544.
- [3] J. Yang, S. Pan, H. Huang, An adaptive extended Kalman filter for structural damage identifications II: unknown inputs, Structural Control and Health Monitoring: The Official Journal of the International Association for Structural Control and Monitoring and of the European Association for the Control of Structures, 14(3) (2007) 497-521.
- [4] B. Abdi, M. Mirzaei, R. Mojed Gharamaleki, A new approach to optimal control of nonlinear vehicle suspension system with input constraint, Journal of vibration and control, 24(15) (2018) 3307-3320.
- [5] A.M. Khiavi, M. Mirzaei, S. Hajimohammadi, A new optimal control law for the semi-active suspension system considering the nonlinear magneto-rheological damper model, Journal of Vibration and Control, 20(14) (2014) 2221-2233.

HOW TO CITE THIS ARTICLE Z. Ahangari Sisi, M. Mirzaei, Sadra Rafatnia, Design and Experimental Validation of an Extended State Observer for Estimating of Uncertainties and Unknown Road Input in a Quarter-car McPherson Suspension System, Amirkabir J. Mech Eng., 55(12) (2024) 317-320.



DOI: 10.22060/mej.2024.22681.7658

This page intentionally left blank

نشريه مهندسي مكانيك اميركبير

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۵، شماره ۱۲، سال ۱۴۰۲، صفحات ۱۴۹۹ تا ۱۵۲۲ DOI: 10.22060/mej.2024.22681.7658



طراحی و اعتبار سنجی تجربی یک مشاهده گر حالت توسعه یافته برای تخمین عدم قطعیتها و ورودی ناشناخته جاده در سیستم تعلیق مک فرسون یک چهارم خودرو

زهرا آهنگری سیسی، مهدی میرزایی*، صدرا رفعت نیا[©]

مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران.

خلاصه: در این مقاله به طراحی و پیادهسازی عملی رویت گر حالت توسعه یافته بر روی دستگاه آزمایش سیستم تعلیق یک چهارم خودرو با مکانیزم مک فرسون در مقیاس واقعی و مجهز به حسگرهای متعدد پرداخته می شود. هدف این الگوریتم، تخمین عدم قطعیت های مدل و ورودی نامعلوم جاده است که منجر به تعیین یک مدل دینامیکی دقیق برای سیستم تعلیق می گردد. در این روش، جمله هایی که شامل عدم قطعیت های مدل و ورودی های نامعلوم جاده است، به عنوان متغیر های حالت جدید به سیستم اضافه شده و با استفاده از داده های مربوط به جابجاییهای جرم معلق و غیر معلق تخمین زده می شود. در ادامه به طراحی یک فیلتر کالمن غیر خطی با ورودی نامعلوم جهت مقایسه با رویت گر حالت توسعه یافته پرداخته می شود. دتایج آزمایشگاهی با داده های واقعی که توام با خطاهای اندازه گیری است، حاکی از دقت بالاتر رویت گر حالت توسعه یافته در ایجاد یک مدل دینامیکی قابل اعتماد برای سیستم می شد. ضمن اینکه ساختار این رویت گر در مقایسه با فیلتر کالمن با ورودی نامعلوم سادهتر بوده و تنظیم آن راحت تر است و از تعداد ضمن اینکه ساختار این رویت گر در مقایسه با فیلتر کالمن با ورودی نامعلوم سادهتر بوده و تنظیم آن راحت تر است و از خور جی های کم تری استه می کند. هر یک از رویت گرهای طراحی شده در ساختار یک سیستم کنترل تعلیق فعال با کنترل کننده بهینه غیر خطی استفاده می شود تا اهداف سیستم تعلیق را بر آورده نماید. نتایج شبیه سازی ها به صورت نرمافزار در حلقه در محیط متلب/ آدامز، عملکرد مناسب تر کنترل کننده با رویت گر حالت توسعه یافته را نشان می دهند.

تاریخچه داوری: دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۲۳ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۲/۰۶ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۲۳ ارائه آنلاین: ۱۴۰۳/۰۲/۰۶

کلمات کلیدی: سیستم تعلیق خودرو ورودی نامعلوم جاده رویت گر حالت توسعهیافته فیلتر کالمن با ورودی نامعلوم کنترل بهینه غیرخطی

۱ – مقدمه

سیستمهای تعلیق خودرو با هدف تامین راحتی سرنشینان از طریق جداسازی ارتعاشات ناشی از ناهمواریهای جاده و همچنین حفظ تماس تایر با جاده جهت ترمزگیری، شتاب گیری و یا فرمان پذیری بهتر توسعه یافتهاند [۱]. نیازها و تقاضاها از یک سو و فضای رقابتی بین تولید کنندگان خودرو از سوی دیگر باعث ظهور تکنولوژیهای مبتنی بر بهینهسازی و کنترل دینامیک خودرو در جهت افزایش ایمنی، قابلیت اعتماد و همچنین راحتی هرچه بیش تر سرنشینان خودرو شده است [۲, ۳]. در این راستا، تخمین دقیق ناهمواریهای جاده و در دسترس بودن اطلاعات دقیق از سیستم تعلیق که منجر به یک مدل دقیق از دینامیک سیستم میشود از چالشهای جدی برای طراحی سیستمهای تعلیق مدرن میباشد. رفتار غیرخطی فنر و دمپر در اجزا، و همچنین تغییرات پارامترهای سیستم مانند تغییر جرم معلق در شرایط اجزا، و همچنین تغییرات پارامترهای سیستم مانند تغییر جرم معلق در شرایط

برای سیستم تعلیق میباشد. ضمن اینکه اغتشاشات وارد به سیستم از طرف جاده نیز غیر قابل پیش بینی میباشند. با در نظر گرفتن چالشهای فوق، تخمین دقیقی از دینامیک سیستم در کنار ورودی جاده، میتواند در جهت بهبود عملکرد سیستم تعلیق بسیار موثر باشد [۴].

برای دستیابی به یک مدل قابل اعتماد از سیستم تعلیق خودرو در حضور عدمقطیتها و تخمین ورودی جاده، میتوان از الگوریتمهای تخمین بر اساس اطلاعات حسگرها استفاده کرد. به منظور دسترسی به دادههای ورودی جاده عموما دو روش مستقیم (مبتنی بر حسگر) و روش غیرمستقیم (مبتنی بر رویتگر) در مراجع ارائه شده است. در روش مستقیم، برای اندازهگیری ناهمواری جاده حسگرهایی به نام پروفایلوگراف^۲ در آزمایشگاه مرکزی جاده و پل فرانسه و همچنین جنرال موتورز توسعه یافتهاند، ولی این روشها هزینهبر میباشند و قابلیت اجرا بر روی خودروهای سواری با تولید انبوه را ندارند [۵, ۶]. مرسدس بنز در خودروهای کلاس E و کلاس S از دوربینهای استریو برای تصویربرداری سه بعدی جاده و اندازهگیری

^{*} نویسنده عهدهدار مکاتبات: mirzaei@sut.ac.ir

ناهمواری ها استفاده کرده است. شایان ذکر است که روش فوق به شدت به محل حسگرها وابسته میباشد و همچنین به پردازندههای بسیار قوی برای انجام محاسبات با حجم بالا نیاز دارد. برای غلبه بر مشکلات فوق، ایده روشهای غیرمستقیم معرفی شده است. در این روش تخمین ورودی جاده با استفاده از پردازش دادههای حسگرهای متداول مانند حسگرهای شتاب و جابجایی مطرح شده و نظر بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است [۷]. فیلتر کالمن به دلیل کارایی آن در ارائه راهحلهای بهینه، همگرایی سریع و سهولت استفاده از آن، روشی است که به طور گسترده در زمینه سیستم تعلیق خودرو مورد استفاده قرار گرفته است [۸]. کانگ و همکاران [۹] روش جدیدی به نام فیلتر کالمن گسسته با ورودی نامعلوم برای تخمین ناهمواری جاده همراه با تخمین متغیرهای حالت معرفی کردند. در این روش جابجایی تعلیق و همچنین شتابهای جرم معلق و غیرمعلق اندازه گیری می شوند و از مدل خطی سیستم تعلیق برای پیادهسازی الگوریتم استفاده می شود. در مرجع [١٠] با انتخاب شتاب جرم غیرمعلق، جابجایی جرم غیرمعلق، جابجایی تعلیق و سرعت تعلیق به عنوان خروجی و آموزش مدل معکوس سیستم تعلیق بر پایه شبکه عصبی-فازی تطبیقی به تخمین ورودی جاده پرداخته شده است. در مرجع [۱۱] بر اساس رویتگر مقاوم، به تخمین متغیرهای حالت پرداخته شده است تا اثر ورودی نامعلوم جاده در خطای تخمین متغیرهای حالت به حداقل ممکن برسد، سپس با استفاده از نتایج تخمین و رابطه استاتیکی بدست آمده از مدل سیستم، ورودی جاده تخمین زده شده است. در مرجع [۱۲] از الگوریتم فراپیچشی^۲ و با فرض جابجایی جرم معلق و سرعت جرم غیرمعلق به عنوان خروجی، ورودی نامعلوم جاده تخمین زده شده است. با بررسی منابع فوق، ترکیبهای مختلفی از حسگرها به عنوان خروجی استفاده شده است که در عمل دسترسی به این دادهها مقرون به صرفه نیست و یا در برخی موارد غیرممکن است. از سوی دیگر در تمامی روشهای فوق، هدف تخمین ورودی جاده بوده و عدمقطعیتهای مدل مورد بررسی قرار نمی گرفتند. البته در برخی مراجع، جهت دسترسی به یک مدل دقیق از سیستم تعلیق، به تخمین همزمان پارامترهای سیستم نیز پرداخته شده است. در این زمینه، بوادا و همکاران [۱۳] یک رویکرد فیلتر کالمن دوگانه برای تخمین جرم معلق و ورودی جاده با استفاده از اندازه گیری جابجایی سیستم تعلیق، شتاب جرم معلق و غیرمعلق پیشنهاد کردهاند. همچنین جردن و همکاران [۱۴] با استفاده از فیلتر کالمن به تخمین جرم معلق در سیستم یکچهارم خودرو پرداختند. اگرچه فیلتر کالمن پاسخ

Adaptive neuro fuzzy interface system (ANFIS)

مناسبی در تخمین ورودیهای جاده و پارامترهای سیستم ارائه میدهد، ولی عملکرد این روش کاملا وابسته به انتخاب خروجیهای مناسب و تنظیم دقیق پارامترهای تخمینزن است. در این روش به دلیل خطاهای موجود در شتابهای جرم معلق و غیرمعلق که عمدتا ناشی از بایاس حسگرهای اینرسی هستند، ماتریس کواریانس نویز اندازهگیری به گونهای انتخاب میشود که تمرکز تخمینزن بر روی استفاده از دادههای جابجایی جرم معلق و غیرمعلق باشد، زیرا استفاده مستقیم از دادههای شتاب در شرایط واقعی به دلیل وجود خطاهای اندازهگیری، الگوریتمهای تخمین را با مشکل مواجه میکند و باعث افزایش خطاهای تخمین ورودی جاده و سرعتهای جرم معلق و غیرمعلق میگردد.

استفاده از رویت گر حالت توسعه یافته برای تخمین عدمقطعیتهای مدل سیستم تعلیق یکی دیگر از روشهای ارائه شده در مراجع میباشد. در این روش عدمقطعیتهای مدل به عنوان یک متغیر حالت اضافی در نظر گرفته شده و متغیرهای حالت سیستم در کنار عدمقطعیتهای مدل تخمین زده می شوند. در مرجع [۱۵] از این روش در تخمین عدمقطعیتهای عملگر الکتروهیدرولیکی سیستم تعلیق خودرو استفاده شده است. در مرجع [۱۶] از رویت گر حالت توسعه یافته برای تخمین عدمقطعیتها در سیستم تعليق يک چهار خودرو استفاده شده است. در اين روش از جابجايي جرم معلق به عنوان خروجی سیستم استفاده شده و هدف، تخمین جرم معلق در دینامیک سیستم است. تخمین یکپارچه عدمقطعیتهای مدل در سیستم تعليق يکچهارم خودرو [١٧]، نصف خودرو [١٨, ١٩] و تمام خودرو [٢٠, ۲۱] از دیگر موارد استفاده از رویت گر حالت توسعه یافته هستند. در تمامی مراجع بالا، تخمين يكپارچه عدمقطعيتهاى مدل مورد بررسى قرار گرفته و به تخمین همزمان ورودی جاده پرداخته نشده است. حال آن که یکی از چالشهای موجود در بخش کنترل سیستم تعلیق، می توان به ورودی ناشی از ناهمواری جاده اشاره کرد که به عنوان اغتشاش و ورودی نامعلوم در نظرگرفته می شود. وجود ورودی نامعلوم از یک سو طراحی رویت گر را با مشکل مواجه میسازد و باعث افزایش خطای تخمین می شود و از سوی دیگر با توجه به اینکه کنترلکننده برای حذف اثرات نامطلوب ناشی از ناهمواری جاده و بهبود عملکرد سیستم تعلیق به مقدار آن در هر لحظه نیاز دارد، عملکرد کنترل کننده را نیز با مشکل مواجه میسازد. از این رو رویت گر طراحی شده می بایست بتواند دینامیک دقیق و ناهمواری جاده به عنوان ورودی نامعلوم را بصورت همزمان تخمین بزند.

در این پژوهش برای تخمین همزمان ورودی جاده و عدمقطعیتهای

² Super twisting

مدل سيستم تعليق خودرو، ابتدا از يک رويت گر حالت توسعه يافته استفاده می شود. رویت گر پیشنهادی از اطلاعات مربوط به جابجایی جرم معلق و غیرمعلق، جهت تخمین عدمقطعیتهای مدل و ورودی جاده استفاده می کند. از آنجایی که دسترسی به این اطلاعات با استفاده از حسگرها در محیط واقعی وجود ندارد، با دو بار انتگرال گیری از دادههای شتاب عبوری از یک فیلتر میان گذر با فرکانس قطع مناسب، خروجی های مورد نیاز رویت گر بدست می آید. در ادامه تحلیل و استخراج معادلات رویت گر و ارائه ضرایب وزنی رؤیت گر بررسی شده و پایداری ورودی-محدود، خروجی-محدود رویت گر در حضور عدمقطعیتهای مدل و ورودیهای جاده ارائه می شود. در نهایت با تخمین همزمان عدمقطعیتهای مدل و ورودیهای جاده، مدل اولیهی بهروز شدهای در هر لحظه بدست می آید و متغیرهای حالت سیستم محاسبه می شوند. جهت بررسی الگوریتم تخمین ارائه شده در محیط واقعی، از تستهای عملی برای سیستم تعلیق با مکانیزم مکفرسون استفاده می شود. در این راستا، پس از ساخت و حسگربندی یک مدل ازمایشگاهی از سیستم تعلیق یکچهارم خودرو در مقیاس واقعی، به پیادهسازی عملی رویت گر پرداخته می شود. شایان ذکر است که در این روش، تنها دادههای خروجی از شتابسنجهای جرم معلق و غیرمعلق استفاده می گردد و از دادههای حسگرهای جابجایی نصب شده بر روی سامانه آزمایشگاهی بدلیل عدم امکان استفاده از آنها در خودروی واقعی در حال حرکت، صرفا در جهت صحه گذاری دادهها و ارزیابی عملکرد رویت گر استفاده می شود. در این سامانه، در جهت ارزیابی عملکرد رویت گر پیشنهادی در طیف گستردهای از اغتشاشات خارجی، به تولید ورودیهای جاده مختلف با استفاده از یک جک الکتروهیدرولیکی پرداخته می شود. برای مقایسه روش پیشنهادی با سایر روشهای رایج، الگوریتم تخمین فیلتر کالمن مبتنی بر ورودی نامعلوم که در مرجع [۲۲] توسعه یافته، به کار گرفته می شود. در این الگوریتم از مدل خطی سيستم تعليق براى طراحى تخمين گر استفاده كردهاند. البته اين نكته لازم به ذکر است، که در این مقاله برای افزایش دقت روش مقایسهای، نسخه بهبوديافته اين الگوريتم با استفاده از فيلتر كالمن توسعهيافته براى مدل غيرخطى سيستم تعليق استفاده شده است.

هدف اصلی سیستم تعلیق جداسازی بدنه خودرو و سرنشینان از ناهمواریهای جاده است. از دیگر اهداف آن حفظ تماس تایر با جاده و نگه داشتن جابجایی تعلیق در محدوده عملکردی مناسب است. طراحی یک سیستم تعلیق مناسب جهت برآوردن اهداف متضاد سیستم تعلیق الزامی است. یک روش مناسب برای رسیدن به اهداف سیستم تعلیق در

دامنه وسیعی از فرکانسهای ورودی جاده، استفاده از سیستم تعلیق فعال است. در این نوع سیستم تعلیق با استفاده از اطلاعات حاصل از ارتعاش بدنه، استراتژی مناسب کنترلی اعمال میشود. روشهای کنترلی متفاوتی مانند کنترل کننده بازگشت به عقب [۲۳]، کنترل کننده مود لغزشی تطبیقی [۲۴]، کنترل کننده مود لغزشی فازی [۲۵] توسط پژوهشگران برای سیستم تعلیق فعال ارائه شده است. در این مقاله، بعد از تخمین عدمقطعیتها و ورودی نامعلوم جاده و دستیابی به مدل دینامیکی دقیقی از سیستم تعلیق یک چهارم خودرو، هر کدام از رویت گرها در ساختار یک سیستم تعلیق فعال با یک کنترل کننده غیرخطی بهینه جهت برآوردن اهداف سیستم تعلیق فعال با خواهد شد. کنترل کننده از مدل غیرخطی سیستم تعلیق یک چهارم خودرو که توسط هر یک از رویت گرها بروزرسانی شده است استفاده می کند. روش کنترلی مذکور بدون استفاده از رویت گر برای سیستم تعلیق فعال توسعه داده شده است [۴].

مقاله به شرح زیر سازماندهی شده است: پس از مقدمه، در بخش ۲، مروری بر ساختار کلی الگوریتم پیشنهادی انجام شده است. در بخش ۳، مدل دینامیکی سیستم تعلیق خودرو بررسی می شود. در بخش ۴ الگوریتم رویت گر حالت توسعهیافته برای تخمین عدمقطعیتها و اغتشاشات خارجی توضیح داده شده و در بخش ۵ الگوریتم فیلتر کالمن توسعهیافته مبتنی بر ورودی نامعلوم ارائه می شود. نتایج شبیه سازی و عملی در بخش ۶ ارائه شده و در نهایت، نتیجه گیری کلی در بخش ۷ ارائه می شود.

۲- ساختار کلی الگوریتم پیشنهادی

شکل ۱ نمای کلی الگوریتم رویت گر پیشنهادی در این مقاله را نشان میدهد. دستگاه آزمایش مورد استفاده، سیستم تعلیق یک چهارم خودرو براساس مکانیزم مک فرسون بوده و شامل ابعاد و المانهای تعلیق یک خودروی سمند است. شتاب سنجها بر روی جرم معلق و غیرمعلق نصب شدهاند تا شتابهای عمودی آنها را اندازه گیری کنند. از یک کارت داده شرکت نشنال اینسترومنت^۱ برای دریافت دادههای حسگرها استفاده می شود. شایان ذکر است، نرم افزار لبویو^۲ به عنوان نرمافزار رابط بین دستگاه آزمایش و رایانه در نظر گرفته شده است. الگوریتم رویت گر پیشنهادی عدمقطعیتها بین مدل اولیه و مدل واقعی و ورودی جاده را تخمین می زند. این نکته لازم به ذکر است که جابجایی جرم معلق و غیرمعلق به دلیل خطاهای موجود در حسگرهای شتاب، با دوبار انتگرال گیری از دادههای

¹ National Instrument

² LabView



شکل ۱. ساختار کلی الگوریتم پیشنهادی



شتاب فیلترشده توسط یک فیلتر میان گذر با فرکانس قطع مناسب به دست آمده و در الگوریتم پیشنهادی مورد استفاده قرار می گیرند. جزئیات بیشتر در مورد الگوریتم رویت گر در ادامه ارائه خواهد شد.

٣- مدل يکچهارم سيستم تعليق خودرو

مدل یکچهارم سیستم تعلیق فعال خودرو که در شکل ۲ نشان داده شده است با فنر و میراگر غیرخطی مدل می گردد. این سیستم از جرم معلق و جرم غیرمعلق و همچنین تایر که به شکل یک فنر خطی مدل می شود، تشکیل شده است. معادلات حاکم بر حرکت این سیستم با استفاده از قانون دوم نیوتون برای جرم معلق و غیرمعلق به شکل زیر استخراج می شوند:

$$m_{us}\ddot{x}_{us} = f_s + f_d - f_{st} + u, \qquad (1)$$
$$m_s\ddot{x}_s = -f_s - f_d - u,$$

که در آن $m_s = m_s$ و m_{us} به ترتیب جرم معلق و جرم غیرمعلق را نشان میدهند. جابجایی جرم معلق و غیرمعلق، به ترتیب با $x_s = x_s$ و نیروهای میراگر و فنر بین جرم معلق و غیرمعلق به ترتیب با $f_d = f_s$ نمایش داده میشوند. u نیروی عملگر بوده و f_{st} نیروی تایر مدل شده به شکل فنر را

نمایش میدهد. فنر و میراگر در حالت واقعی دارای رفتار غیرخطی هستند و به صورت توابع غیرخطی از جابجایی تعلیق، $\Delta x = x_s - x_{us}$ و سرعت نسبی بین جرم معلق و غیرمعلق، $\dot{x}_{us} = \dot{x}_s - \dot{x}_{us}$ به شکل زیر محاسبه میشوند [۴]:

$$\begin{aligned} f_s &= k_1 \Delta \mathbf{x} + k_2 (\Delta \mathbf{x})^2 + k_3 (\Delta \mathbf{x})^3, \\ f_d &= c_1 \Delta \dot{\mathbf{x}} + c_2 (\Delta \dot{\mathbf{x}})^2. \end{aligned} \tag{7}$$

میراگر $k_{i(i=1,r,r)}$ شاندهنده ثوابت فنر و $c_{i(i=1,r,r)}$ ثوابت میرایی میراگر هستند. نیروی تایر نیز به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$f_{st} = k_{us} (x_{us} - x_r). \tag{(7)}$$

در معادله (۳)، k_{us} ضریب فنریت تایر و x_r ورودی جاده در نظر گرفته شدهاند. با در نظر گرفتن هر یک از دو معادله حرکت در معادله (۱) به عنوان یک زیرسیستم، معادلات فضای حالت هر زیرسیستم به صورت زیر به دست می آیند:



شکل ۲. مدل یک چهارم سیستم تعلیق خودرو.

Fig. 2. The schematic of the quarter-car suspension system.

$$f_1 = -\frac{1}{m_s} [f_s + f_d],$$
 (Y)

$$f_2 = \frac{1}{m_{us}} [f_s + f_d - k_{us} x_3].$$
 (A)

مدل بیان شده توسط معادله (۴) و معادله (۵) حاوی منابع بسیاری از عدمقطعیتها از جمله اصطکاک، دینامیک مدلنشده، تغییرات پارامتری و ورودی جاده نامعلوم است. برای جبران این عدمقطعیتها، مدل توسط اطلاعات اندازهگیری شده از دستگاه آزمایش و توسط یک رویتگر حالت توسعهیافته بهروزرسانی می شود. در طراحی این رویتگر از جابجایی جرم معلق و غیرمعلق به عنوان خروجی قابل اندازه گیری سیستم استفاده می گردد.

۴- طراحی رویتگر حالت توسعه یافته

در این بخش، برای دستیابی به مدل دینامیکی دقیق سیستم تعلیق خودرو و تخمین عدمقطعیتهای مدل و ورودیهای نامعلوم، رویت گر حالت

$$\begin{cases} \dot{x}_{1} = x_{2}, \\ \dot{x}_{2} = f_{1} + \frac{1}{m_{s}}u. \end{cases}$$
(*)

$$\begin{cases} \dot{x}_{3} = x_{4}, \\ \dot{x}_{4} = f_{2} + d_{1}x_{r} - \frac{1}{m_{us}}u, \end{cases}$$
 (b)

که در آن
$$m_{us}$$
 / m_{us} و متغیرهای حالت زیرسیستمها به شکل
زیر در نظر گرفته میشوند:

$$[x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T = [x_s \ \dot{x}_s \ x_{us} \ \dot{x}_{us}]^T.$$
(\$

در معادله (۴) و معادله (۵)، توابع f_{1} و f_{2} مجموع تمام جملههای غیرخطی سیستم بوده و به شکل زیر تعریف می شوند:

توسعه یافته طراحی خواهد شد. با توجه به معادله (۴) و معادله (۵)، جملههایی که شامل عدمقطعیتها و ورودی های نامعلوم هستند، به عنوان متغیرهای حالت اضافی در نظر گرفته شده و متغیرهای حالت جدید به صورت زیر تعریف می شوند:

$$\boldsymbol{\xi}_{1} = \begin{bmatrix} x_{1} & x_{2} & F_{1} \end{bmatrix}^{T}, \ \boldsymbol{\xi}_{2} = \begin{bmatrix} x_{3} & x_{4} & F_{2} \end{bmatrix}^{T}$$
 (9)

که در آن $F_{\gamma} = f_{\gamma} + d_{\gamma}x_{r}$ و $F_{\gamma} = f_{\gamma} + d_{\gamma}x_{r}$ میباشد. بدین تر تیب مدل فضای حالت برای زیر سیستم های معادله (۱) با اضافه شدن متغیرهای حالت جدید به صورت زیر توسعه داده می شود:

$$(i = 1, 2) \begin{cases} \dot{\xi}_i = \mathbf{A}\xi_i + \mathbf{E}H_i + \mathbf{B}_i u, \\ \hat{y}_i = \mathbf{C}\xi_i, \end{cases}$$
(\.)

که در آن

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \ \mathbf{E} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \ \mathbf{B}_{1} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m_{s}} \\ 0 \end{bmatrix},$$
$$\mathbf{B}_{2} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{-1}{m_{us}} \\ 0 \end{bmatrix} \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$
(11)

و $\dot{F}_{i\,(i=1, au)}=\dot{F}_{i\,(i=1, au)}$ نرخ تغییر عدمقطعیتها بوده و توابع نامعلوم ولی محدودی هستند. بنابراین، دینامیک رویتگر برای هر زیرسیستم به صورت زیر نوشته میشود:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{z}}_i = \mathbf{A}\mathbf{z}_i + \mathbf{B}_i u + \mathbf{L}_i (\hat{\mathbf{y}}_i - \mathbf{y}_i), & (i = 1, 2) \\ \mathbf{y}_i = \mathbf{C}\mathbf{z}_i, \end{cases}$$
(17)

 $z_{\tau} = \begin{bmatrix} z_{\tau} & z_{\delta} & z_{\tau} \end{bmatrix}^{T}$ و $\begin{bmatrix} z_{\tau} & z_{\tau} & z_{\tau} \end{bmatrix}^{T}$ که $z_{\tau} = \begin{bmatrix} z_{\tau} & z_{\tau} & z_{\tau} \end{bmatrix}^{T}$ بردارهای حالت رویت گر هستند و ضرایب رویت گر طراحی شده به صورت

 $L_{\tau} = \begin{bmatrix} \beta_{\epsilon} & \beta_{a} & \beta_{\epsilon} \end{bmatrix}^{T} \quad e \quad L_{1} = \begin{bmatrix} \beta_{1} & \beta_{\tau} & \beta_{\tau} \end{bmatrix}^{T}$ it is it is a solution of the solution of

$$\begin{cases} \dot{\tilde{z}}_{1} = \tilde{z}_{2} - \beta_{1} \tilde{z}_{1}, \\ \dot{\tilde{z}}_{2} = \tilde{z}_{3} - \beta_{2} \tilde{z}_{1}, \\ \dot{\tilde{z}}_{3} = -H_{1} - \beta_{3} \tilde{z}_{1}, \end{cases}$$
(17)

$$\begin{cases} \dot{\tilde{z}}_{4} = \tilde{z}_{5} - \beta_{4} \tilde{z}_{4}, \\ \dot{\tilde{z}}_{5} = \tilde{z}_{6} - \beta_{5} \tilde{z}_{4}, \\ \dot{\tilde{z}}_{6} = -H_{2} - \beta_{6} \tilde{z}_{4}, \end{cases}$$
(14)

که $\tilde{z}_i = \tilde{x}_i - z_i$ دینامیک خطای تخمین را نشان میدهد. انتخاب مناسب ضرایب رویت گر، با فرض محدود بودن H_1 و میدهد. انتخاب مناسب ضرایب رویت گر، با فرض محدود رویت گر را تضمین H_{τ} میتواند پایداری ورودی-محدود، خروجی-محدود رویت گر را تضمین کند. در قضیه زیر، نحوه تنظیم پیشنهادی ضرایب رویت گر ارائه شده است. کند. در قضیه زیر، نحوه تنظیم پیشنهادی ضرایب رویت گر ارائه شده است. کند. در قضیه زیر، نحوه تنظیم پیشنهادی ضرایب رویت گر ارائه شده است. کند. در قضیه زیر، نحوه تنظیم پیشنهادی ضرایب رویت گر ارائه شده است. $\beta_{\tau} = \beta_{\tau} = \beta_{\tau} = \gamma$ انتخاب شوند و \mathfrak{F} یک پارامتر آزاد مثبت باشد، با فرض محدود بودن H_{τ} و π ، دینامیک خطای تخمین محدود خواهد بود.

 $\beta_{1} = \beta_{r} = \pi/\varepsilon$ ا**ثبات:** با انتخاب ضرایب به صورت $\beta_{r} = \beta_{r} = \pi/\varepsilon$ ، معادلات دینامیک خطای $\beta_{r} = \beta_{0} = \pi/\varepsilon^{r}$ معادلات دینامیک خطای مربوط به رویت گر برای هر زیر سیستم در معادله (۱۳) و معادله (۱۴) را می توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\dot{\tilde{\mathbf{z}}}_i = \mathbf{G}\tilde{\mathbf{z}}_i + \mathbf{E}H_i, \quad (i = 1, 2) \tag{10}$$

$$\mathbf{\tilde{z}}_{1} = \begin{bmatrix} \tilde{z}_{1} & \tilde{z}_{\tau} & \tilde{z}_{\tau} \end{bmatrix}^{T}$$
و $G = \begin{bmatrix} -\mathbf{\tilde{r}}/\varepsilon & \mathbf{\tilde{r}} & \mathbf{\tilde{r}} \\ -\mathbf{\tilde{r}}/\varepsilon^{2} & \mathbf{\tilde{r}} \\ -\mathbf{\tilde{r}}/\varepsilon^{3} & \mathbf{\tilde{r}} \end{bmatrix}$ که $\mathbf{\tilde{z}}_{1} = \begin{bmatrix} \tilde{z}_{1} & \tilde{z}_{2} & \tilde{z}_{2} \end{bmatrix}^{T}$

 $G \quad \text{if and constraints} \qquad \text{if and constraints} \qquad \text{if a constraints} \quad \text{if a const$

$$\tilde{\mathbf{z}}_{i} = e^{\mathbf{G}t}\tilde{\mathbf{z}}_{i}(0) + \int_{0}^{t} e^{\mathbf{G}(t-\vartheta)}\mathbf{E}H_{i}(\vartheta)d\vartheta, \qquad (\forall \vartheta)$$

که در آن پارامتر آزاد ع بر سرعت همگرایی پاسخهای رویتگر تاثیر میگذارد، به این معنی که انتخاب مقادیر کوچکتر برای ۰< ع، منجر به پاسخهای سریعتر خواهد شد. بنابراین، برای ۰< ع داریم:

$$\lim_{t \to \infty} \tilde{\mathbf{z}}_i(t) = \int_0^t e^{\mathbf{G}(t-\vartheta)} \mathbf{E} H_i(\vartheta) d\vartheta, \qquad (1Y)$$

معادله (۱۷) نشان می دهد که، برای هر ۰۰ ع با فرض محدود بودن *H_i (i=۱,۲)</sub>، خطای تخمین رویت گر محدود خواهد بود. شایان ذکر است که پایداری ورودی محدود-خروجی محدود در مقالات بسیاری برای رویت گر حالت توسعهیافته در نظر گرفته شده است [۲۶–۲۸].*

ملاحظه ۱: سرعت پاسخهای رویت گر حالت توسعه یافته به عنوان یک رویت گر بهره بالا، تحت تاثیر پارامتر آزاد ع است. هرچه مقادیر ع کوچک تر انتخاب شوند، پاسخهای رویت گر سریع تر خواهند شد. در عین حال، با کاهش مقدار پارامتر آزاد ع، حساسیت به نویز اندازه گیری و خطاهای مدل سازی در خطای تخمین افزایش می یابد. همچنین خطاهای عددی ممکن است به دلیل حل مجموعه ای از معادلات دیفرانسیل در هر زمان نمونه گیری رخ دهد.

ملاحظه ۲: با فرض ورودی پله ثابت برای ملاحظه ۲: با فرض ورودی پله ثابت برای $H_{i\ (i=1,7)}$ ، پاسخ حالت ماندگار معادله (۱۵) به صورت $\tilde{z}_{i}^{ss} = \left[\varepsilon^{r}H_{i} \quad r\varepsilon^{r}H_{i} \quad r\varepsilon H_{i} \right]^{T} (i = 1, r)$ ملاحظه می گردد خطای حالت ماندگار رویت گر حالت توسعه یافته تحت تاثیر پارامتر آزاد ع است. با انتخاب مقادیر کوچکتر ع، خطای تخمین به میزان قابل توجهی کاهش می یابد و رویت گر مملکرد مطلوبی خواهد داشت.

۵– الگوریتم فیلتر کالمن توسعه یافته مبتنی بر ورودی نامعلوم الگوریتم فیلتر کالمن توسعه یافته متداول، مستلزم آن است که ورودیهای سیستم و همچنین خروجیها معلوم باشند، که گاهی ممکن است در واقعیت چنین نباشد. وجود ورودیهای نامعلوم میتواند عملکرد فیلتر کالمن متداول را به شدت محدود کند، زیرا ممکن است خطای اندازه گیری و خطای ناشی از ورودی نامعلوم در عملکرد تخمین تاثیرات نامطلوبی داشته باشد. ضمن اینکه همیشه نمیتوان ورودیهای نامعلوم را به عنوان نویز تصادفی برای تطبیق با الگوریتم فیلتر کالمن متداول در نظر گرفت، زیرا ورودیهای نامعلوم میتوانند سیگنالهایی با نوع و اندازه متفاوت باشند و فرض اینکه این سیگنالها نویز تصادفی با میانگین صفر و یا ثابت هستند، همواره صحیح نیست. از سوی دیگر اطلاع از برخی از ورودیهای نامعلوم برای کنترل سیستم و اهداف بهینه سازی سیستمها ضروری است. در سیستم تعلیق نیز برای برآوردن اهداف کنترلی، تخمین ورودی نامعلوم جاده ضرورت دارد.

در رویکرد طراحی فیلتر کالمن با ورودی نامعلوم، ورودیهای نامعلوم به جای اغتشاش به عنوان بخشی از متغیرهای حالت در نظر گرفته می شوند. در نتیجه، رویکرد فیلتر کالمن توسعهیافته مبتنی بر ورودی نامعلوم می تواند مستقیماً از تابع هدف فیلتر کالمن توسعهیافته متداول (تابع هدف حداقل مربعات وزندار) استخراج شود. در این الگوریتم هیچ اطلاعات قبلی در مورد ورودیهای نامعلوم مورد نیاز نیست و فیلتر کالمن توسعهیافته مبتنی بر ورودی نامعلوم برای تخمین دینامیک مدل نشده و متغیرهای حالت سیستم در حضور ورودیهای نامعلوم عمل می کند.

برای توسعه یالگوریتم فیلتر کالمن توسعه یافته مبتنی بر ورودی نامعلوم، معادلات فضای حالت سیستم به صورت کلی زیر نوشته می شوند که هر یک از توابع متناظر با سیستم تعلیق در پیوست مقاله آورده شده است:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}^*) + \mathbf{w}, \\ \mathbf{y} = \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{u}^*) + \mathbf{v}, \end{cases}$$
(1A)

تابع غیرخطی سیستم و h تابع خروجی است. با گسستهسازی f معادله (۱۸) مدل فضای حالت زمان گسسته با بردار ورودی نامعلوم u^* به صورت زیر نوشته می شود:

$$\mathbf{h}_{k-1} = \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}, \mathbf{u}_{k}) + \mathbf{H}_{k|k-1}(\mathbf{x}_{k} - \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}) + \mathbf{D}_{k|k-1}^{*}(\mathbf{u}_{k}^{*} - \hat{\mathbf{u}}_{k-1|k-1}^{*}),$$
(YY)

که در آن

$$\mathbf{H}_{k|k-1} = \left[\frac{\partial \mathbf{h}_{k}}{\partial \mathbf{x}_{k}}\right] |_{\mathbf{x}_{k} = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}, \mathbf{u}_{k}^{*} = \hat{\mathbf{u}}_{k-1|k-1}^{*}}, \qquad (\Upsilon \mathfrak{r})$$

$$\mathbf{D}_{k|k-1}^{*} = \left[\frac{\partial \mathbf{h}_{k}}{\partial \mathbf{u}_{k}^{*}}\right] |_{\mathbf{x}_{k} = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}, \mathbf{u}_{k}^{*} = \hat{\mathbf{u}}_{k-1|k-1}^{*}}, \qquad (Y\Delta)$$

پس از حل یک مسئله بهینهسازی و برخی از عملیات جبر خطی، راه حل بازگشتی الگوریتم فیلتر کالمن با ورودی نامعلوم به صورت زیر به دست میآید:

مرحله اول: مرحله مقداردهی اولیه در
$$k = \cdot$$

$$\begin{split} \hat{\mathbf{x}}_{00} &= E[\mathbf{x}_{0}], \\ \hat{\mathbf{u}}_{0}^{*} &= E[\mathbf{u}_{0}^{*}], \\ \mathbf{P}_{0|0} &= E\left[\left(\mathbf{x}_{0} - \hat{\mathbf{x}}_{0|0}\right)\left(\mathbf{x}_{0} - \hat{\mathbf{x}}_{0|0}\right)^{T}\right], \\ \mathbf{S}_{0} &= E\left[\left(\mathbf{u}_{0}^{*} - \hat{\mathbf{u}}_{0}^{*}\right)\left(\mathbf{u}_{0}^{*} - \hat{\mathbf{u}}_{0}^{*}\right)^{T}\right], \end{split}$$
(79)

مقدار اولیه ورودی نامعلوم $\hat{x}_{.}$ تخمین اولیه x را نشان میدهد. $\hat{u}_{.}^{*}$ مقدار اولیه ورودی نامعلوم و . و . $P_{.}$ بهره اولیه تخمین متغیرهای حالت و $S_{.}$ بهره اولیه تخمین ورودی نامعلوم است.

مرحله دوم: مرحله پیش بینی

در این مرحله فرض بر این است که تمام اطلاعات سیستم تا نمونه k - 1 در دسترس هستند. در این صورت بر اساس مدل ریاضی سیستم و سیگنال های موجود تا زمان k - 1، یک تخمین اولیه از متغیرهای حالت در نمونه k محاسبه می شود.

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{k} = \mathbf{f}_{k-1}(\mathbf{x}_{k-1}, \mathbf{u}_{k-1}^{*}) + \mathbf{w}_{k-1}, \\ \mathbf{y}_{k} = \mathbf{h}_{k}(\mathbf{x}_{k}, \mathbf{u}_{k}^{*}) + \mathbf{v}_{k}, \end{cases}$$
(19)

که در آن x_{k} و x_{k-1} بردار متغیرهای حالت سیستم با ابعاد $1 \times n$ ، \mathbf{y}_{k} بردار ورودی نامعلوم $1 \times \mathbf{y}_{k}$ بردار خروجی های قابل اندازه گیری \mathbf{w}_{k-1}^{*} بردار ورودی نامعلوم $1 \times \mathbf{y}_{k}$ بردار خروجی های قابل اندازه گیری \mathbf{w}_{k-1} هستند. دینامیک مدل نشده، متغیرهای حالت و ورودی های نامعلوم با استفاده از اطلاعات خروجی های اندازه گیری شده ($\mathbf{y}_{1}, \mathbf{y}_{7}, \dots, \mathbf{y}_{k}$) با استفاده از اطلاعات خروجی های اندازه گیری شده (\mathbf{y}_{k} هستند، تخمین با استفاده از اطلاعات خروجی های اندازه گیری شده (\mathbf{y}_{k} هستند، تخمین که شامل مقدار حالت های \mathbf{x}_{k} و ورودی نامعلوم $\mathbf{w}_{k-1/k}$ هستند، تخمین زده می شوند. \mathbf{w}_{k} و \mathbf{w}_{k} نویز سفید گوسی با میانگین صفر و ماتریس های کوواریانس \mathbf{Q} و \mathbf{x} هستند. انتخاب \mathbf{Q} و \mathbf{x} مناسب در طراحی این الگوریتم بسیار مهم است[**ب**].

برای تخمین حالتها و ورودی نامعلوم، سیستم غیرخطی حول حال مالتهای تخمین زده شده توسط فیلتر کالمن خطی می شود. برای خطی سازی، معادلات حالت سیستم غیرخطی با استفاده از بسط سری تیلور حول $\hat{x}_{k-1|k-1}$ و $\hat{x}_{k-1} = \cdot$ سیستم داده می شوند:

$$\mathbf{f}_{k-1} = \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}, \mathbf{u}_{k-1}, \hat{\mathbf{u}}_{k-2|k-1}^{*}) + \mathbf{F}_{k-1|k-1}(\mathbf{x}_{k-1} - \hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}) + (\mathbf{v} \cdot) \\ \dots + \mathbf{B}_{k-1|k-1}^{*}(\mathbf{u}_{k-1}^{*} - \hat{\mathbf{u}}_{k-2|k-1}^{*}),$$

$$\mathbf{F}_{k-1|k-1} = \left[\frac{\partial \mathbf{f}_{k-1}}{\partial \mathbf{x}_{k-1}}\right]_{\mathbf{x}_{k-1}=\hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}, \mathbf{u}_{k-1}^*=\hat{\mathbf{u}}_{k-1|k-1}^*}, \quad (\Upsilon \mathsf{Y})$$

$$\mathbf{B}_{k-1|k-1}^{*} = \left[\frac{\partial \mathbf{f}_{k-1}}{\partial \mathbf{u}_{k-1}^{*}}\right] |_{\mathbf{x}_{k-1} = \hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}, \mathbf{u}_{k-1}^{*} = \hat{\mathbf{u}}_{k-1|k-1}^{*}}, \quad (YY)$$

معادله خروجی حول نقطه
ی $\hat{x}_{k|k-1}$ و $\mathbf{v}_{k}=\mathbf{v}_{k}$ به صورت زیر خطی می
شود:

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k} = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_{k} \Big[\mathbf{y}_{k} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}, \mathbf{u}_{k}) - \mathbf{D}_{k|k-1}^{*}(\hat{\mathbf{u}}_{k|k}^{*} - \hat{\mathbf{u}}_{k-1|k-1}^{*}) \Big], \quad (\Im)$$

$$\mathbf{P}_{k-1|k-1} = \left(\mathbf{I}_{\mathbf{n}} + \mathbf{K}_{k-1|k-1}\mathbf{D}^{*}\mathbf{S}_{k-1}\mathbf{D}_{k}^{*}\mathbf{R}_{k}^{-1}\mathbf{H}_{k-1|k-2}\right) \times \left(\mathbf{I}_{\mathbf{n}} - \mathbf{K}_{k-1}\mathbf{H}_{k-1|k-2}\right)^{T} \mathbf{P}_{k-1|k-2}.$$
(YY)

ماتریس $P_{k-1|k-1}$ در معادله (۲۸) با استفاده از معادله (۳۳) بهروزرسانی ماتریس K_{k-1} در معادله K-1 با قرار دادن K_{k-1} به جای K_{k-1} در معادله (۲۹) تا معادله (۳۰) به دست می آیند [۲۹].

 $k = \cdot$ در مرحله اول، الگوریتم فیلتر کالمن مبتنی بر ورودی نامعلوم از $k = \cdot$ مقدار مورد و با شرایط اولیه بیان شده در معادله (۲۶) که در آن [*] مقدار مورد انتظار از یک متغیر تصادفی را نشان میدهد، شروع میشود. در مرحله پیشبینی، $x_{k|k-1}$ و $x_{k|k-1}$ که به ترتیب تخمین حالت و کواریانس پیشبینی از مدل سیستم در گام K هستند، محاسبه میشوند. سپس بهره فیلتر کالمن K از رابطه (۲۹) و x_k بهره ورودی نامعلوم از معادله (۳۰) فیلتر کالمن میشوند. در نهایت، ورودی نامعلوم از معادله (۳۰) محاسبه میشوند. در نهایت، ورودی نامعلوم x_{k-1} ، تخمین حالت x_k و محاسبه میشوند. در نهایت، ورودی نامعلوم x_{k-1} ، تخمین حالت از بر ماتریس کوواریانس x_{k-1} در مرحله بهروزرسانی به دست میآیند. نتایج بهدستآمده در این مرحله به مرحله پیش بینی برای پیاده سازی الگوریتم بازگشتی فیلتر کالمن مبتنی بر ورودی نامعلوم بازگردانده میشوند.

برای پیادهسازی این الگوریتم، ورودی نامعلوم باید در معادله (۱۹) وجود داشته باشد، به عبارتی $\cdot \neq B^*$. این شرط می تواند انتخاب حسگر برای پیادهسازی الگوریتم را با محدودیت روبرو کند، زیرا در این حالت ممکن است خروجیهای قابل اندازه گیری حاوی اطلاعات ورودی نامعلوم باشند. از طرفی، اگر $= D^*$ باشد آنگاه در معادله (۳۱)، $= u_{k-k}^*$ خواهد بود و در واقع الگوریتم در تخمین ورودی نامعلوم ناتوان خواهد بود. شرط دوم آنست که تعداد خروجیهای قابل اندازه گیری بیشتر از تعداد ورودیهای نامعلوم باشند (m > q). اگر این شرط برقرار نباشد، سیستم مشاهده پذیر نبوده و الگوریتم نمی تواند ورودیهای نامعلوم را تخمین بزند.

۶- نتایج و بحث

نتایج این مقاله در دو بخش ارائه می شود. در بخش اول از مطالعات آزمایشگاهی برای ارزیابی عملکرد رویتگر حالت توسعهیافته پیشنهادی و مقایسه آن با فیلتر کالمن با ورودی نامعلوم استفاده می شود. در روش پیشنهادی، عدمقطعیت های مدل و اغتشاشات سیستم توسط رویت گر

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} = f\left(\hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}, \hat{\mathbf{u}}_{k-2|k-1}^*\right), \tag{YY}$$

$$\mathbf{P}_{k|k-1} = \mathbf{F}_{k-1|k-1} \mathbf{P}_{k-1|k-1} \mathbf{F}_{k-1|k-1}^T + \mathbf{Q}_{k-1}, \qquad (\Upsilon\Lambda)$$

معلوم در $\hat{u}_{k-1|k-1}^*$ و $\hat{u}_{k-1|k-1}^*$ تخمین حالتها و ورودی نامعلوم در $\hat{u}_{k-1|k-1}$ و $\hat{x}_{k-1|k-1}$ میستم $t = (k-1)\Delta t$ است. $b = (k-1)\Delta t$ را نشان $\hat{x}_{k|k-1}$ کوواریانس خطای تخمین مربوط به $\hat{x}_{k|k-1}$ را نشان میدهد.

مرحله سوم: محاسبه بهره

ماتریس بهره برای الگوریتم تخمین به صورت زیر محاسبه میشود [۲۹]:

$$\mathbf{K}_{k} = \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_{k|k-1}^{T} \times \left[R_{k} + \mathbf{H}_{k|k-1} \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_{k|k-1}^{T} \right]^{-1}.$$
 (rq)

مرحله چهارم: مرحله تخمین ورودی نامعلوم ب

 $\hat{u}_{k-1/k}^{*}$ در این مرحله ماتریس بهره S_k و ورودی نامعلوم $\hat{u}_{k-1/k}^{*}$ در $t = k \Delta t$ با استفاده از مرحله پیشبینی حالتها و اطلاعات اندازه گیری شده در لحظه حال و با استفاده از روابط زیر بهروزرسانی می شوند [۲۹]:

$$\mathbf{S}_{k} = \left[\mathbf{D}_{k|k-1}^{*T} \mathbf{R}_{k}^{-1} \times \left(\mathbf{I}_{p} - \mathbf{H}_{k|k-1}^{T} \mathbf{K}_{k}\right) \mathbf{D}_{k|k-1}^{*T}\right]^{-1}, \qquad (\mathcal{V} \cdot)$$

$$\hat{\mathbf{u}}_{k|k}^{*} = \mathbf{S}_{k} \mathbf{D}_{k-l|k-l}^{*T} \mathbf{R}_{k}^{-1} \times \left(\mathbf{I}_{p} - \mathbf{H}_{k|k-l}^{T} \mathbf{K}_{k} \right) \\ \times \left[\mathbf{y}_{k} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}(k \mid k - 1), \mathbf{u}_{k}) + \mathbf{D}_{k-l|k-l}^{*T} \hat{\mathbf{u}}_{k-l|k-l}^{*} \right].$$
(\mathcal{T})

مرحله پنجم: بەروزرسانى

در این مرحله تخمین حالتها و ورودی نامعلوم $\hat{x}_{k|k}$ و $\hat{u}_{k|k}^*$ در $\hat{u}_{k|k}$ و $\hat{u}_{k|k}$ این مرحله تخمین حالتها و اطلاعات اندازه گیری $t = k \Delta t$ شده در لحظه حال \mathcal{Y}_k و با استفاده از روابط زیر بهروزرسانی می شوند:



شكل ٣. ساختار أزمايشگاهی سيستم تعليق يک چهارم خودرو. Fig. 3. Experimental platform of a quarter suspension system.

تخمین زده میشوند. خروجیهای مورد نیاز برای تخمین، فقط جابجاییهای جرم معلق و غیرمعلق هستند. همچنین، پاسخهای تخمین زده شده با دادههای اندازه گیریشده توسط حسگرهای اضافی نصب شده بر روی دستگاه آزمایش مورد ارزیابی قرار می گیرند. در ادامه، نتایج این روش با الگوریتم فیلتر کالمن غیرخطی با ورودی نامعلوم، مقایسه میشوند . در بخش دوم نتایج کنترل به صورت نرمافزار در حلقه با استفاده از نرمافزارهای متلب¹ آدامز⁷ ارائه می شود. در این بخش مدل واقعی در نرمافزار آدامز طراحی شده و کنترل کننده با استفاده از حالتها و ورودی جاده تخمین زده شده برای سیستم تعلیق یک چهارم، نیروی فعال مورد نیاز را محاسبه می کند. در ارضا می گردند. در نهایت نتایج سیستم تعلیق غیرفعال و فعال مبتنی بر دو نوع رویت گر مقایسه خواهند شد.

۶– ۱– نتایج حاصل از دادههای آزمایشگاهی برای ارزیابی عملکرد رویت گرها دستگاه آزمایش ساخته شده، یک سیستم تعلیق با مکانیزم مکفرسون

میباشد، که در شکل ۳ نشان داده شده است. در این ساختار از یک سیستم الکتروهیدرولیکی برای تولید ورودی جاده استفاده میشود. دو شتابسنج ویلکوکسون^۳ برای اندازه گیری شتابهای عمودی جرم معلق و غیرمعلق با فرکانس ۱۰۰ هرتز تعبیه شده است. علاوه بر این، از سه حسگر اندازه گیری جابجایی اوپکون^۴ برای اندازه گیری جابجایی تعلیق و جابجایی جرم معلق و ورودی جاده با همان فرکانس استفاده شده است. توجه داشته باشید که دادههای خطکش اهمی نصب شده روی دستگاه آزمایش فقط برای اعتبارسنجی استفاده میشوند و در الگوریتم تخمین بدلیل عدم امکان استفاده در خودروی واقعی به کار گرفته نمیشوند. دادههای اندازه گیری شده از طریق کارت داده شرکت نشنال اینسترومنت به نرمافزار لبویو ارسال میشوند. در نتیجه، دادههای شتابسنج برای تخمین حالتها، عدمقطعیتها

نتایج تخمین رویت گر حالت توسعهیافته پیشنهادی برای سه مقدار \mathcal{F} در شکل \mathcal{F} نشان داده شده است. با بررسی شکل \mathcal{F} ، مقدار $\mathcal{F} = \cdot / \cdot \mathbf{1}$ بهترین عملکرد را در تخمین جابجاییها و سرعتهای جرم معلق و غیرمعلق ارائه

¹ MATLAB®

² Adams

³ Wilcoxon

⁴ Opkon



شکل ۴. مقایسهی نتایج روش پیشنهادی برای مقادیر مختلف در آزمایش ۱، الف) جابجایی جرم معلق، ب) خطای تخمین جابجایی جرم معلق ($e_{\gamma} = \tilde{z}_{\gamma}$) شکل ۴. مقایسهی نتایج روش پیشنهادی برای مقادیر مختلف در آزمایش ۱، الف) جابجایی جرم معلق، ب) خطای تخمین جابجایی جرم علق ($e_{\gamma} = \tilde{z}_{\gamma}$)، ث) جابجایی جرم غیر معلق، ج)خطای تخمین جابجایی جرم غیر معلق ($e_{\gamma} = \tilde{z}_{\gamma}$). پ) سرعت جرم غیر معلق ($e_{\gamma} = \tilde{z}_{\gamma}$). ث) جابجایی جرم غیر معلق ($e_{\gamma} = \tilde{z}_{\gamma}$). ث) جابجایی جرم غیر معلق ($e_{\gamma} = \tilde{z}_{\gamma}$).

Fig. 4. Comparative results for the proposed method for different values of in test-1, (a) Sprung mass displacement, (b) Estimation error of sprung mass displacement $e_1 = \tilde{z}_1$, (c) Unsprung mass displacement, (d) Estimation error of unsprung mass displacement $e_2 = \tilde{z}_2$, (e) Sprung mass velocity, (f) Estimation error of sprung mass velocity $e_3 = \tilde{z}_4$, (g) Unsprung mass velocity, (h) Estimation error of unsprung mass velocity $e_4 = \tilde{z}_5$.



شکل ۵. مقایسه سیگنالهای جابجایی، الف) جابجایی جرم معلق، ب) جابجایی جرم غیرمعلق.

Fig. 5. Comparison between different signals of displacements, (a) Sprung mass displacement, (b) Unsprung mass displacement.

میدهد. برای مقادیر بزرگتر ع سرعت پاسخدهی کاهش مییابد و برای مقادیر کوچکتر با وجود پاسخهای سریعتر، حساسیت به نویز اندازهگیری و در نتیجه خطاهای مدلسازی افزایش مییابد.

همانطور که ذکر شد، از دادههای جابجایی جرم معلق و غیرمعلق در رویت گر پیشنهادی استفاده می شود. از آنجایی که در محیط واقعی، دسترسی مستقیم به این دادهها امکان پذیر نمی باشد. بنابراین در این الگوریتم با دو بار انتگرال گیری از دادههای شتاب فیلتر شده توسط یک فیلتر میان گذر با فرکانس قطع ۰/۵ و ۲۰ هرتز ، دادههای جابجایی جرم معلق و غیرمعلق به دست می آیند. فیلتر بالاگذر با فرکانس قطع ۰/۵ هرتز برای حذف بایاس شتابسنجها و فرکانس پایین گذر با فرکانس قطع ۲۰ هرتز برای حذف نویز استفاده شدهاند [۹]. بنابراین از دادههای جابجایی ارائه شده توسط حسگرهای جابجایی صرفا برای ارزیابی الگوریتم پیشنهادی و صحه گذاری نتایج استفاده می شود. شکل ۵ مقایسه بین سیگنال های جابجایی جرم معلق و غیرمعلق مستخرج از انتگرال دوگانه خروجیهای شتاب فیلتر شده نسبت به خروجی حسگرهای جابجایی را نشان میدهد. ناپایداری سیگنالهای جابجایی بدون فیلتر کردن به دلیل خطاهای اندازه گیری شتاب سنجها کاملا مشهود است. با استفاده از یک فرکانس قطع مناسب برای فیلتر میان گذر، می توان سیگنال های قابل قبولی برای جابجایی ها برای استفاده در رویت گر به دست آورد.

در آزمایش ۱ که نتایج آن در بالا ملاحظه گردید، سیستم توسط ورودی

جاده سینوسی نشان داده شده در شکل ۶- الف تحریک شده است. خطای تخمین ورودی جاده که در شکل ۶-ب نشان داده شده است، دقت روش پیشنهادی در تخمین عدمقطعیتها و اغتشاشات سیستم را نشان میدهد. این نکته لازم به ذکر است که پارامترهای سیستم برای کاهش عدم تطابق بین مدل ریاضی تعلیق و سیستم واقعی قبلا شناسایی شدهاند. این نکته لازم به ذکر میباشد که از روشهای ارائه شده در مرجع [۳۰] برای شناسایی پارامترهای سیستم تعلیق استفاده شده است.

زمانی که عدمقطعیتهای سیستم توسط رویت گر حالت توسعهیافته تخمین زده میشوند، در واقع سیستم اولیه بهروزرسانی میشود. این نکته لازم به ذکر میباشد که در طراحی رویت گر، ابتدا یک مدل اولیه از سیستم در نظر گرفته میشود. اگرچه این مدل اولیه، برپایه دینامیک اصلی سیستم تعلیق نوشته شده و پارامترهای تعلیق به صورت غیرخطی بوده و شناسایی میشوند، اما این دینامیک دارای نامعینیهایی مانند مقدار جرم معلق و اغتشاشات ورودی از طرف جاده میباشد که در طول زمان در حال تغییر میباشند. این نامعینیها و اغتشاشات موجب فاصله گرفتن دینامیک اولیه از مدل واقعی میشود. برهمین اساس استفاده از این دینامیک اولیه در طراحی کنترل کننده موجب کاهش عملکرد کنترل کننده مبتنی بر مدل میشود. در روش رویت گر حالت توسعه یافته در هر لحظه این نامعینیها و اغتشاشات براساس خروجیهای مدل واقعی تخمین زده شده و به دینامیک اولیه وارد



شکل ۶. الف) ورودی جاده، ب) خطای تخمین ورودی جاده در أزمایش ۱.

Fig. 6. (a) Road input, (b) Road input estimation error in test-1.

بخشید. از سوی دیگر با توجه به اینکه دینامیک به روزرسانی شده نزدیک به مدل واقعی می گردد، با حل دینامیک به روزرسانی شده در هر لحظه می توان متغیرهای حالت سیستم را تخمین زد. تاثیر تخمین عدمقطعیتها در تخمین حالتهای سیستم در شکل ۷ نشان داده شده است. به وضوح مشاهده می شود که عملکرد مدل به روز شده در کاهش خطای تخمین بسیار بهتر از رویت گر بدون به روزرسانی مدل است. همچنین، مدل به روز شده علاوه بر تخمین عدمقطعیتها، ورودی های نامعلوم را هم تخمین میزند. در سیستم تعلیق ورودی جاده به عنوان ورودی نامعلوم است و کنترل کنندههای سیستم تعلیق فعال برای بهبود عملکرد خود به مقدار آن در هر لحظه نیاز دارند. بنابراین تخمین دقیق مقدار ورودی جاده برای بهبود عملکرد کنترل کنندهها ضروری است.

در آزمایش ۲ سیستم تعلیق با ورودی جاده شبه تصادفی مطابق شکل ۸-الف تحریک شده است. شکل ۸-ب نشان میدهد که زمانی که مدل اولیه بهروزرسانی شده و عدمقطعیتها تخمین زده میشوند، خطای تخمین ورودی جاده کمتر و تخمین دقیقتر است.

برای مقایسه عملکرد رویت گر حالت توسعهیافته پیشنهادی با سایر رویکردها، نتایج بهدست آمده با روش فیلتر کالمن با ورودی نامعلوم که در بخش ۵ توضیح داده شده است، مقایسه می شوند. روش مقایسه ای از شتاب و جابجایی جرمهای معلق و غیرمعلق به عنوان خروجی سیستم برای

تخمين ورودى جاده و ساير حالتها و عدمقطعيتهاى سيستم استفاده می کند. از آنجایی که جابجاییها را نمی توان به طور مستقیم اندازه گیری کرد، همانند الگوریتم پیشنهادی، با دو بار انتگرال گیری از سیگنالهای شتاب فیلتر شده با فرکانس قطع مناسب می توان به دادههای جابجایی واقعی دست یافت. هر دو رویکرد از مدل اولیه و شرایط اولیه یکسان استفاده می کنند. لازم به ذکر است که عملکرد الگوریتم فیلتر کالمن مبتنی بر ورودى نامعلوم ارتباط قابل توجهي با انتخاب مناسب ماتريس كوواريانس سیستم و نویزهای اندازه گیری دارد. در این ساختار، کوواریانس نویز فرآیند ^۲ ۲۰۰×([۱ ۱ ۱ ۱]) Q = diag در نظر گفته شده است. پارامترهای کوواریانس نویز اندازه گیری با آزمون و خطا تنظیم می شوند تا دقت الگوریتم فیلتر کالمن با ورودی نامعلوم را بهبود بخشد. در این راستا، به دلیل خطاهای اندازه گیری شتاب سنجها، تخمین گر باید بر روی اندازه گیری جابجایی تمرکز کند تا اثرات شتاب را کاهش دهد. بنابراین، مقادیر کوواریانس جابجایی در تخمین گر بسیار کوچکتر انتخاب می شوند، یعنی (R = diag ([۰/۰۱ ۱ ۰/۰۱]). در نتیجه با در نظر گرفتن مقادیر بالاتر برای کوواریانس شتاب، خطاهای تخمین سرعت که توسط فیلتر کالمن با ورودی نامعلوم بهدست آمده، افزایش می یابد. مطابق شکل ۹، روش پیشنهادی در کاهش خطای تخمین در مقايسه با فيلتر كالمن با ورودي نامعلوم كارآمدتر است.



شکل ۷. مقایسهی نتایج روش پیشنهادی با و بدون بهروزرسانی در آزمایش ۲، الف) جابجایی جرم معلق، ب) خطای تخمین جابجایی جرم معلق ($e_i = \tilde{z}_i$)، پ) سرعت جرم معلق، ت) خطای تخمین سرعت جرم معلق ($e_i = \tilde{z}_i$)، ث) جابجایی جرم غیر معلق، ج)خطای تخمین جابجایی جرم غیرمعلق ($e_i = \tilde{z}_i$)، چ) سرعت جرم غیرمعلق، ح) خطای تخمین سرعت جرم غیرمعلق ($e_i = \tilde{z}_i$).

Fig. 7. Comparative results for the proposed method in test-2 with and without model updating, (a) Sprung mass displacement, (b) Estimation error of sprung mass displacement $e_1 = \tilde{z}_1$, (c) Unsprung mass displacement, (d) Estimation error of unsprung mass displacement $e_2 = \tilde{z}_2$, (e) Sprung mass velocity, (f) Estimation error of sprung mass velocity $e_3 = \tilde{z}_4$, (g) Unsprung mass velocity, (h) Estimation error of unsprung mass velocity $e_4 = \tilde{z}_5$.



شکل ۸. الف) ورودی جاده، ب) خطای تخمین ورودی جاده در آزمایش ۲.





شکل ۹. مقایسهی نتایج خطای تخمین برای رویکرد پیشنهادی و فیلتر کالمن با ورودی نامعلوم در آزمایش ۲، الف) خطای تخمین جابجایی جرم معلق، ب) خطای تخمین سرعت جرم معلق، ج) خطای تخمین جابجایی جرم غیر معلق، د) خطای تخمین سرعت جرم غیرمعلق.

Fig. 9. Comparative results for the proposed method and nonlinear Kalman filter with unknown input in test-2, (a) Estimation error of sprung mass displacement, (b) Estimation error of unsprung mass displacement, (c) Estimation error of sprung mass velocity, (d) Estimation error of unsprung mass velocity.



شکل ۱۰. مقایسه ی خطای تخمین ورودی جاده در آزمایش ۲.

Fig. 10. Comparative results of the road input estimation error in test-2.

۶- ۲- نتایج ارزیابی سیستم کنترلی تعلیق فعال مبتنی بر رویت گر

در این بخش نتایج ارزیابی سیستم کنترل تعلیق فعال مبتنی بر هر کدام از رویت گرها به صورت شبیه سازی نرمافزار در حلقه در محیط متلب/ آدامز ارائه می شود. برای این منظور یک کنترل کننده بهینه غیرخطی مبتنی بر هر کدام از رویتگرها برای برقراری تعادل بین اهداف متضاد سیستم تعلیق طراحی می شود. در کنار مهم ترین هدف سیستم کنترلی که عبارت از كاهش شتاب بدنه و ایجاد راحتی سفر میباشد، جابجایی تعلیق و جابجایی تایر نیز باید در محدودهی مناسب تحت ورودیهای جاده نامعلوم قرار گیرد. در سیستم تعلیق فعال، این اهداف با استفاده از نیروی عملگر محدود برآورده می شوند. در روش کنترلی استفاده شده، ابتدا یک شاخص عملکرد شبه نقطهای به صورت ترکیب وزنداری از پاسخهای پیش بینی شدهی سیستم تعليق و سيگنال كنترلى تعريف مىشود. سپس با كمينه كردن اين معيار عملكرد، قانون كنترلى براى لحظه كنوني بدست ميآيد. كنترل كننده مذكور توسط نویسندگان در مراجع [۴, ۳۱, ۳۲] برای سیستم تعلیق فعال بدون استفاده از رویت گر و با فرض شرایط ایده آل طراحی شده است. در این مقاله، روش فوق مبتنی بر مدل تخمین زده شده توسط هر کدام از رویتگرها ییادهسازی می شود. در واقع هر کدام از رویت گرها، عدمقطعیتهای مدل و ورودی نامعلوم جاده را تخمین زده و در اختیار کنترل کننده قرار میدهند. جزئیات مربوط به طراحی کنترلکننده در مراجع [۴, ۳۱–۳۳] وجود دارند با این تفاوت که در این مقاله اطلاعات نامعلوم توسط رویتگرها تخمین زده

1 Adams/MATLAB®

شده و در کنترل کننده استفاده می گردد.

به منظور پیادهسازی سیستم کنترلی، ابتدا مدل یک چهارم خودرو با پارامترهای ارائه شده در جدول ۱ در نرمافزار آدامز طراحی می شود. سپس براساس شکل ۱۱ با ایجاد ارتباط این نرمافزار با محیط متلب، به شبیهسازی الگوریتمهای تخمین و کنترل پرداخته می شود. در این ساختار شتابهای جرم معلق و غیرمعلق از نرمافزار آدامز استخراج و به منظور بررسی عملکرد الگوریتمهای کنترلی در شرایط واقعی، فرکانس حسگرهای شتاب در ۱۰۰ هرتز تنظیم شدهاند. از سوی دیگر، خطاهای دادههای اندازه گیری شامل بایاس متغیر بین ۰/۰۳ تا ۰/۰۴ با خروجیهای شتاب ادغام شده و از نویز سفید گوسی با میانگین صفر و واریانس ۰/۰۱ جهت مدلسازی نویز حسگرهای شتاب استفاده شده است. در ادامه، با دو بار انتگرال گیری از شتابهای فیلتر شده، جابجاییهای جرم معلق و غیرمعلق به دست آمده و در رویت گرها استفاده می شوند. قانون کنترلی برمبنای مدل به روز شده به دست آمده و برای کامل کردن ساختار نرمافزار در حلقه به شبیهساز آدامز اعمال می شود. این نکته لازم به ذکر است که قید ورودی کنترلی که بیشترین مقدار نیروی کنترلی تولیدی توسط عملگر میباشد مقدار ۱۵۰۰ نیوتون در نظر گرفته میشود [۳۴]. در طراحی قانون کنترلی وزن بر روی متغیرهای حالت به گونهای تنظیم می شوند که جابجایی تعلیق در محدوده مجاز ۰/۰۸ و ۰/۰۸ قرار گیرد. همچنین به منظور جلوگیری از جدایش تایر مقدار جابجایی مجاز تایر ۰/۱۷ در نظر گرفته می شود [۳].

هدف اصلى از طراحى كنترل كننده سيستم تعليق، كاهش شتاب وارد



شکل ۱۱. ساختار نرمافزار در حلقه برای روش کنترلی پیشنهادی.

Fig. 11. The software in the loop structure for the proposed control method.

واحد	مقدار	پارامتر
كيلوگرم	۲۹.	جرم معلق
كيلوگرم	۵۹	جرم غيرمعلق
نيوتن بر متر	17898	ثابت فنر غيرخطى
نيوتن بر مترمربع	- Y ٣۶٩۶	ثابت فنر غيرخطى
نيوتن بر مترمكعب	311.4.4	ثابت فنر غيرخطى
نیوتن ثانیه بر متر	۱۰۰۰	ثابت ميراگر غيرخطي
نیوتن مجذور ثانیه بر مترمربع	۵۰۰	ثابت میراگر غیرخطی
نيوتن بر متر	19	ضريب فنر تاير

جدول ۱. پارامترهای شناسایی شده مدل طراحی. Table 1. Identified parameters of the design model.

کنترلی انجام می گیرد. به منظور ارزیابی کنترل کننده از یک ورودی جاده تصادفی که در شکل ۱۲ ارائه شده است، استفاده می شود. نتایج کنترل کننده براساس رویت گر حالت توسعه یافته در مقایسه با سیستم تعلیق غیرفعال در شکل ۱۳ نشان داده شده است. براساس نمودار ۱۳ – الف سیستم تعلیق فعال با کنترل کننده پیشنهادی عملکرد مطلوبی را در کاهش شتاب و افزایش راحتی

بر بدنه برای افزایش راحتی سرنشینان در حضور محدودیت نیروی کنترلی تولیدی میباشد. حفظ تماس تایر با جاده و جابجایی تعلیق محدود نیز از دیگر اهداف سیستم تعلیق به شمار میروند. در کنترل کننده پیشنهادی تنظیم ضرایب وزنی به صورت سعی و خطا با هدف کاهش شتاب وارد بر بدنه، حفظ تماس تایر با جاده، جابجایی تعلیق محدود و برقراری محدودیت نیروی



شکل ۱۲. ورودی جاده تصادفی.

Fig. 12. Random road input.



شکل ۱۳. مقایسهی نتایج پاسخهای سیستم تعلیق فعال مبتنی بر رویتگر حالت توسعهیافته با سیستم تعلیق غیرفعال، الف) شتاب جرم معلق، ب) جابجایی تعلیق، ج) جابجایی تایر، د) ورودی کنترلی.

Fig. 13. Comparative results of active suspension responses based on extended state observer with passive suspension system, (a) Sprung mass acceleration, (b) Suspension deflection, (c) tire deflection, (d) Control input.

در ادامه، عملکرد کنترل کننده در حضور هر یک از رویت گرهای طراحی شده مقایسه می گردد. براساس شکل ۱۴ کنترل کنندههای طراحی شده براساس هر دو رویت گر، عملکرد مناسبی در حفظ جابجایی تایر، جابجایی تعلیق و ورودی کنترلی در محدوده مناسب خود ارائه دادند. با مقایسه شکل ۱۴-الف کنترل کننده طراحی شده براساس روش رویت گر حالت توسعهیافته سرنشین از خود نشان داده است. در نمودارهای ۱۳–ب و ۱۳–ج جابجایی تایر و جابجایی تعلیق نشان داده شده است که در محدودهی مناسبی قرار دارند. در حالیکه در سیستم تعلیق غیرفعال جابجایی تعلیق و تایر از محدوده مجاز خود خارج شدهاند. همچنین براساس نمودار ۱۳–د ورودی کنترلی در محدوده عملکردی مناسب قرار گرفته است.



شکل ۱۴. مقایسهی نتایج پاسخهای سیستم تعلیق فعال مبتنی بر رویتگر حالت توسعهیافته و فیلتر کالمن با ورودی نامعلوم، الف) شتاب جرم معلق، ب) جابجایی تعلیق، ج) جابجایی تایر، د) ورودی کنترلی.

Fig. 14. Comparative results of active suspension responses based on extended state observer with nonlinear Kalman filter with unknown input, (a) Sprung mass acceleration, (b) Suspension deflection, (c) tire deflection, (d) Control input.

عملکرد بهتری در کاهش شتاب بدنه ارائه نموده است. از آنجایی که در الگوریتم فیلتر کالمن از دادههای شتاب به طور مستقیم استفاده می شود، در نتیجه خطای حسگرها مانند نویز و بایاس موجب ایجاد خطا در تخمین متغیرهای حالت و ورودی نامعلوم شده و عملکرد کنترل کننده را به نسبت دچار مشکل می نماید.

۷- نتیجه گیری کلی

در این مقاله، الگوریتم رویت گر حالت توسعهیافته برای تخمین عدمقطعیتها و ورودیهای نامعلوم از جمله ورودی جاده نامعلوم و بهروزرسانی مدل دینامیکی طراحی شده است. دستگاه آزمایش سیستم تعلیق با مکانیزم مکفرسون برای پیادهسازی عملی طراحی و ساخته شده است. دو شتاب سنج برای اندازه گیری شتاب عمودی جرم معلق و غیرمعلق

برروی دستگاه آزمایش نصب شدهاند. همچنین، حسگرهای جابجایی اضافی نیز برای صحهگذاری روش پیشنهادی استفاده شدهاند. الگوریتم ارائه شده با آزمایشهای مختلف تحت ورودیهای جادهی مختلف ارزیابی میشود. نتایج حاکی از کارایی رویت *گ*ر حالت توسعهیافته پیشنهادی در کاهش خطای تخمین در حضور منابع مختلف عدمقطعیت و اغتشاشات است. علاوه بر این، نتایج مقایسهای با فیلتر کالمن با ورودی نامعلوم نشان دهنده دقت بالای رویت *گ*ر پیشنهادی در ساخت یک مدل دینامیکی قابل اعتماد برای سیستم تعلیق است. رویت *گ*ر حالت توسعه یافته از دادههای شتابسنج که توام با بایاس میباشد، بطور مستقیم استفاده نمی کند و خطاهای اندازه گیری شتاب بر خلاف فیلتر کالمن مستقیما وارد تخمین نمی شود. ضمن اینکه ساختار این رویت *گ*ر در مقایسه با فیلتر کالمن با ورودی نامعلوم سادهتر بوده و تنظیم آن راحت راست. دستگاه آزمایش بسیار مشابه به نمونه واقعی آن و

در مقیاس صنعتی ساخته شده است. نحوه تعامل با خطاهای اندازه گیری در این مقاله برای تخمین دینامیک سیستم میتواند مبنای بسیاری از کارهای عملی و صنعتی دیگر باشد. در پایان نتایج، هر یک از رویت گرهای طراحی شده در ساختار یک سیستم تعلیق فعال با یک کنترل کننده بهینه غیرخطی قرار گرفت تا اهداف سیستم تعلیق را برآورده کرده و بدنه خودرو را از ناهمواریهای جاده جدا نماید. نتایج شبیه سازیها به صورت نرمافزار در حلقه در محیط متلب/آدامز، عملکرد مناسب تر کنترل کننده با رویت گر حالت توسعه یافته را نشان میدهند. به منظور پیشنهاد برای کارهای آینده میتوان به توسعه این رویت گرها برای مدل کامل خودرو که در آن اثرات شاسی، میله موج گیر و دوران خودرو وجود دارد، اشاره نمود.

NT/

٨- فهرست علائم

علائم انگلیسی

C_1	ضریب میرایی، IN/S
C_2	$ m N/s^2$ ضریب میرایی،
f_s	نیروی فنر N
f_d	نیروی میراگر N
f_{st}	نیروی تایر N
F_{I}	عدمقطعيت مدل
F_2	عدمقطعيت مدل
H_l	نرخ تغيير عدمقطعيت مدل
H_2	نرخ تغيير عدمقطعيت مدل
k_1	ضریب فنریت، N/m
k_2	$ m N/m^2$ ضريب فنريت،
<i>k</i> ₃	$\mathrm{N/m^3}$ ضريب فنريت،
kus	ضريب فنريت تاير، N/m
m_s	جرم معلق، kg
m_{us}	جرم غيرمعلق، kg
v	نويز ااندازه گيري
w	نويز فرآيند
X_r	ورودی جادہ، m

- m جابجایی جرم معلق، x_s
- m جابجایی جرم غیر معلق، x_{us}

علائم یونانی *∆t* ثابت زمانی، s شی جابجایی تعلیق، m زیرنویس k گام زمانی

منابع

- [1] Z. Z Ahangari Sisi, M. Mirzaei, S. Rafatnia, B. Alizadeh, Design of a constrained nonlinear controller using firefly algorithm for active suspension system, Journal of Computational Methods in Engineering, 39(2) (2022) 23-44. (in persion)
- [2] S. Aghasizade, M. Mirzaei, S. Rafatnia, Novel constrained control of active suspension system integrated with antilock braking system based on 14-degree of freedom vehicle model, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics, 232(4) (2018) 501-520.
- [3] S. Aghasizade, M. Mirzaei, S. Rafatnia, The effect of road quality on integrated control of active suspension and anti-lock braking systems, AUT Journal of Mechanical Engineering, 3(1) (2019) 123-135.
- [4] B. Abdi, M. Mirzaei, R. Mojed Gharamaleki, A new approach to optimal control of nonlinear vehicle suspension system with input constraint, Journal of vibration and control, 24(15) (2018) 3307-3320.
- [5] M. Doumiati, S. Erhart, J. Martinez, O. Sename, L. Dugard, Adaptive control scheme for road profile estimation: application to vehicle dynamics, IFAC Proceedings Volumes, 47(3) (2014) 8445-8450.
- [6] M. Doumiati, A. Victorino, A. Charara, D. Lechner, Estimation of road profile for vehicle dynamics motion: experimental validation, in: Proceedings of the 2011 American control conference, IEEE, 2011, pp. 5237-5242.
- [7] T.F. Nodeh, M. Mirzaei, M.J. Khosrowjerdi, Simultaneous output selection and observer design for

- [16] M. Du, D. Zhao, T. Ni, L. Ma, S. Du, Output feedback control for active suspension electro-hydraulic actuator systems with a novel sampled-data nonlinear extended state observer, IEEE Access, 8 (2020) 128741-128756.
- [17] H. Wang, G.I. Mustafa, Y. Tian, Model-free fractionalorder sliding mode control for an active vehicle suspension system, Advances in Engineering Software, 115 (2018) 452-461.
- [18] D.B. Waghmare, V.G. Asutkar, B.M. Patre, Extended disturbance observer based robust sliding mode control for active suspension system, International Journal of Dynamics and Control, 9(4) (2021) 1681-1694.
- [19] M. Du, D. Zhao, M. Yang, H. Chen, Nonlinear extended state observer-based output feedback stabilization control for uncertain nonlinear half-car active suspension systems, Nonlinear Dynamics, 100 (2020) 2483-2503.
- [20] H. Wang, Y. Lu, Y. Tian, N. Christov, Fuzzy sliding mode based active disturbance rejection control for active suspension system, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 234(2-3) (2020) 449-457.
- [21] H. Wang, L. Chang, Y. Tian, Extended state observer– based backstepping fast terminal sliding mode control for active suspension vibration, Journal of Vibration and Control, 27(19-20) (2021) 2303-2318.
- [22] G.-W. Kim, S.-W. Kang, J.-S. Kim, J.-S. Oh, Simultaneous estimation of state and unknown road roughness input for vehicle suspension control system based on discrete Kalman filter, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 234(6) (2020) 1610-1622.
- [23] H. Pang, X. Zhang, Z. Xu, Adaptive backsteppingbased tracking control design for nonlinear active suspension system with parameter uncertainties and safety constraints, ISA transactions, 88 (2019) 23-36.
- [24] Y.-J. Liu, H. Chen, Adaptive sliding mode control for uncertain active suspension systems with prescribed performance, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 51(10) (2020) 6414-6422.

vehicle suspension system with unknown road profile, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 70(5) (2021) 4203-4211.

- [8] F. Yu, J. Zhang, D. Crolla, A study of a Kalman filter active vehicle suspension system using correlation of front and rear wheel road inputs, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 214(5) (2000) 493-502.
- [9] S.-W. Kang, J.-S. Kim, G.-W. Kim, Road roughness estimation based on discrete Kalman filter with unknown input, Vehicle System Dynamics, 57(10) (2019) 1530-1544.
- [10] Y. Qin, M. Dong, F. Zhao, R. Langari, L. Gu, Road profile classification for vehicle semi-active suspension system based on adaptive neuro-fuzzy inference system, in: 2015 54th IEEE Conference on Decision and Control (CDC), IEEE, 2015, pp. 1533-1538.
- [11] M. Doumiati, J. Martinez, O. Sename, L. Dugard, D. Lechner, Road profile estimation using an adaptive Youla–Kučera parametric observer: Comparison to real profilers, Control Engineering Practice, 61 (2017) 270-278.
- [12] J.J. Rath, K.C. Veluvolu, M. Defoort, Estimation of road profile for suspension systems using adaptive supertwisting observer, in: 2014 European Control Conference (ECC), IEEE, 2014, pp. 1675-1680.
- [13] B.L. Boada, M.J.L. Boada, H. Zhang, Sensor fusion based on a dual Kalman filter for estimation of road irregularities and vehicle mass under static and dynamic conditions, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 24(3) (2019) 1075-1086.
- [14] J. Jordan, N. Hirsenkorn, F. Klanner, M. Kleinsteuber, Vehicle mass estimation based on vehicle vertical dynamics using a multi-model filter, in: 17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), IEEE, 2014, pp. 2041-2046.
- [15] G. Wang, M. Chadli, M.V. Basin, Practical terminal sliding mode control of nonlinear uncertain active suspension systems with adaptive disturbance observer, IEEE/ASME Transactions On Mechatronics, 26(2) (2020) 789-797.

- [30] M. M. S. Arani, M. Mirzaei, A. A. Alvanagh, S.A. Shaarbaf, Identification of nonlinear model for elements of test rig of quarter car suspension system, Modares Mechanical Engineeringl 15(11) (2015) 136-142.
- [31] A. Malekshahi, M. Mirzaei, S. Aghasizade, Non-linear predictive control of multi-input multi-output vehicle suspension system, Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, 34(1) (2015) 87-105.
- [32] A.M. Khiavi, M. Mirzaei, S. Hajimohammadi, A new optimal control law for the semi-active suspension system considering the nonlinear magneto-rheological damper model, Journal of Vibration and Control, 20(14) (2014) 2221-2233.
- [33] A. Malekshahi, M. Mirzaei, Designing a non-linear tracking controller for vehicle active suspension systems using an optimization process, International Journal of Automotive Technology, 13 (2012) 263-271.
- [34] H. Chen, P.-Y. Sun, K.-H. Guo, Constrained h-infinity control of active suspensions: an LMI approach, in: The 2002 International Conference on Control and Automation, 2002. ICCA. Final Program and Book of Abstracts., IEEE, 2002, pp. 157-157.

- [25] Y.Z. Arslan, A. Sezgin, N. Yagiz, Improving the ride comfort of vehicle passenger using fuzzy sliding mode controller, Journal of vibration and control, 21(9) (2015) 1667-1679.
- [26] B.-Z. Guo, Z.-l. Zhao, On the convergence of an extended state observer for nonlinear systems with uncertainty, Systems & Control Letters, 60(6) (2011) 420-430.
- [27] B. Qin, H. Yan, H. Zhang, Y. Wang, S.X. Yang, Enhanced reduced-order extended state observer for motion control of differential driven mobile robot, IEEE Transactions on Cybernetics, (2021).
- [28] J. Yao, Z. Jiao, D. Ma, Extended-state-observer-based output feedback nonlinear robust control of hydraulic systems with backstepping, IEEE Transactions on Industrial electronics, 61(11) (2014) 6285-6293.
- [29] J. Yang, S. Pan, H. Huang, An adaptive extended Kalman filter for structural damage identifications II: unknown inputs, Structural Control and Health Monitoring: The Official Journal of the International Association for Structural Control and Monitoring and of the European Association for the Control of Structures, 14(3) (2007) 497-521.

پيوست

در این بخش ماتریسهایی که در الگوریتم فیلترکالمن توسعهیافته با ورودی نامعلوم مورد استفاده قرار می گیرند برای سیستم تعلیق محاسبه می شوند. **f** تابع غیرخطی است که در سیستم تعلیق یک چهارم به صورت زیر تعریف می شود:

$$\mathbf{f} = \begin{bmatrix} x_2 & f_1 & x_4 & f_2 + d_1 x_r \end{bmatrix}^T.$$
(TY)

از معادله (۲۱)،
$$\mathbf{F}_{k-1|k-1}$$
 برای سیستم تعلیق به صورت زیر محاسبه می شود:
(۳۵)

$$\mathbf{F}_{k-1|k-1} = \frac{\partial \mathbf{f}_{k-1}}{\partial \mathbf{x}_{k-1}} = \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} \left(\Delta t \times \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{w}) + \mathbf{x}_{k-1} \right),$$

$$\mathbf{F}_{k-1|k-1} = \mathbf{I}_{k-1} + \Delta t \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{k-1} \\ \mathbf{F}_{k-1} \end{bmatrix} (i-1-4) \quad (i-1-4)$$

$$\mathbf{F}_{k-1|k-1} = \mathbf{I}_{ij} + \Delta t [F_{ij}], (i = 1, ...4), (j = 1, ...4),$$

$$F_{11} = 0, F_{12} = 1, F_{13} = 0, F_{14} = 0,$$
(^{YY})

$$F_{21} = -\frac{1}{m_s} \left[k_1 + 2k_2 \left(x_1 - x_3 \right) + 3k_3 \left(x_1 - x_3 \right)^2 \right],$$

а

$$\begin{split} F_{22} &= -\frac{1}{m_s} \Big[c_1 + 2c_2 \left(x_2 - x_4 \right) \Big], \\ F_{23} &= -\frac{1}{m_s} \Big[-k_1 - 2k_2 \left(x_1 - x_3 \right) - 3k_3 \left(x_1 - x_3 \right)^2 \Big], \\ F_{24} &= -\frac{1}{m_s} \Big[-c_1 - 2c_2 \left(x_2 - x_4 \right) \Big], \\ F_{31} &= 0, F_{32} = 0, F_{33} = 0, F_{34} = 1, \\ F_{41} &= \frac{1}{m_{us}} \Big[k_1 + 2k_2 \left(x_1 - x_3 \right) + 3k_3 \left(x_1 - x_3 \right)^2 \Big], \\ F_{42} &= \frac{1}{m_{us}} \Big[c_1 + 2c_2 \left(x_2 - x_4 \right) \Big], \\ F_{43} &= \frac{1}{m_{us}} \Big[-k_1 - 2k_2 \left(x_1 - x_3 \right) - 3k_3 \left(x_1 - x_3 \right)^2 - k_{us} \Big], \\ F_{43} &= \frac{1}{m_{us}} \Big[-c_1 - 2c_2 \left(x_2 - x_4 \right) \Big]. \\ \mathbf{B}_{k-1|k-1}^* &= \Delta t \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & d_1 \end{bmatrix}^T. \\ \mathbf{B}_{k-1|k-1}^* &= \Delta t \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & d_1 \end{bmatrix}^T. \\ \mathbf{B}_{k-1|k-1}^* &= \Delta t \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & d_1 \end{bmatrix}^T. \\ \mathbf{B}_{k+1|k-1} &= \Big[H_{ij} \Big], (i = 1, \dots 4), (j = 1, \dots 4), \\ \mathbf{M}_{k|k-1} &= \Big[H_{ij} \Big], (i = 1, \dots 4), (j = 1, \dots 4), \\ \mathbf{M}_{k+1} &= F_{21}, H_{22} = F_{22}, H_{23} = F_{22}, H_{24} = F_{24}, \end{split}$$

$$\begin{split} & H_{31} = 0, H_{32} = 0, H_{33} = 1, H_{34} = 0, \\ & H_{41} = F_{41}, H_{42} = F_{42}, H_{43} = F_{43}, H_{44} = F_{44}. \end{split}$$

$$\mathbf{D}_{k|k-1}^* = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & d_1 \end{bmatrix}^T.$$
⁽⁴⁷⁾

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم Z. Ahangari Sisi, M. Mirzaei, Sadra Rafatnia, Design and Experimental Validation of an Extended State Observer for Estimating of Uncertainties and Unknown Road Input in a Quarter-car McPherson Suspension System, Amirkabir J. Mech Eng., 55(12) (2024) 1499-1522.

DOI: 10.22060/mej.2024.22681.7658

