

## Integrated Longitudinal and Lateral Control for Path Tracking of Autonomous Vehicles Based on NMPC and MHE Under Network Delay and Uncertainty

Shahram Azadi\*<sup>ORCID</sup>, Seyed Shamir Shojaee

Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Article History

Received: January 01, 2026

Revised: February 28, 2026

Accepted: March 16, 2026

ePublished: May 16, 2026

### ABSTRACT

**Abstract:** Autonomous vehicles require a precise control system capable of handling nonlinear vehicle dynamics safely perform agile maneuvers, such as lane changes. However, in real-world operating conditions, factors such as sensor measurement noise, process noise, time delays, and data packet loss can compromise the stability of the control system. In this research, an integrated control framework based on Nonlinear Model Predictive Control (NMPC) and Moving Horizon Estimation (MHE) is proposed. In the proposed method, the MHE filters out noise effects and reconstructs the system states during periods of data loss and time delays by incorporating physical constraints and the dynamic model. Subsequently, the NMPC receives the corrected states and calculates optimal commands aimed at minimizing the tracking error and maintaining passenger comfort. Simulation results of a double lane change maneuver at a speed of 108 km/h demonstrate that in a critical scenario (comprising a 100 ms network delay, 20% data packet loss, sensor noise, and uncertainties arising from employing a twin-track model with the Pacejka tire formula in the simulation plant), the proposed approach exhibits superior performance compared to the Extended Kalman Filter (EKF) algorithm. This structure fully maintains the vehicle's stability while preventing undesirable oscillations in the steering angle and traction force. Recording a maximum lateral error of 0.1 m and a Root Mean Square Error (RMSE) of 0.044 m demonstrates the outstanding performance of this system in ensuring safety and stability.

**Keywords:** Autonomous Vehicle, Nonlinear Model Predictive Control (NMPC), Moving Horizon Estimation (MHE), Sensor Uncertainty, Path Tracking.

### How to cite this article

Azadi Sh, Shojaee S.Sh, Integrated Longitudinal and Lateral Control for Path Tracking of Autonomous Vehicles Based on NMPC and MHE Under Network Delay and Uncertainty. Modares Mechanical Engineering; 2026;26(07):583-597.

\*Corresponding author's email: [azadi@kntu.ac.ir](mailto:azadi@kntu.ac.ir)

\*Corresponding ORCID ID: 0000-0002-5817-9838



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



## کنترل یکپارچه طولی و عرضی برای ردیابی مسیر خودروی خودران مبتنی بر کنترل کننده پیش بین مدل غیرخطی و تخمین گر افق لغزان در شرایط تاخیر و عدم قطعیت شبکه

شهرام آزادی\*<sup>ib</sup>، سیدشامیر شجاعی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

### چکیده

خودروهای خودران به منظور انجام ایمن مانورهای سریع نظیر تغییر خط، نیازمند سیستم کنترلی دقیقی هستند که قادر به مدیریت دینامیک غیرخطی خودرو باشد. با این حال، در شرایط عملیاتی واقعی، عواملی نظیر نویز اندازه گیری سنسورها، نویز فرآیند، تاخیرهای زمانی و از دست رفتن داده ها می توانند پایداری سیستم کنترل را به مخاطره بیندازند. در این پژوهش، یک ساختار کنترلی یکپارچه مبتنی بر کنترل پیش بین مدل غیرخطی ( Nonlinear Model Predictive Control) و تخمین گر افق لغزان (Moving Horizon Estimation) ارائه شده است. در روش پیشنهادی، تخمین گر افق لغزان با در نظر گرفتن قیود فیزیکی و مدل دینامیکی، اثر نویز را فیلتر کرده و وضعیت های سیستم را در زمان های از دست رفتن داده و تاخیر در دریافت اطلاعات بازسازی می کند. سپس کنترل کننده پیش بین مدل غیرخطی با دریافت وضعیت های اصلاح شده، فرامین بهینه را با هدف کمینه سازی خطای ردیابی و حفظ راحتی سرنشین محاسبه می نماید. نتایج شبیه سازی مانور تغییر خط دوگانه در محدوده سرعت ۱۰۸ کیلومتر بر ساعت نشان می دهد که در یک سناریوی بحرانی (شامل ۱۰۰ میلی ثانیه تاخیر شبکه، ۲۰ درصد ریزش داده، نویز سنسورها و عدم قطعیت ناشی از استفاده از مدل چهارچرخ با تأیر پژا در شبیه ساز)، رویکرد پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم فیلتر کالمن توسعه یافته (EKF) عملکرد برتری دارد. این ساختار ضمن جلوگیری از نوسانات نامطلوب در زاویه فرمان و نیروی کشش، پایداری خودرو را کاملاً حفظ می کند. ثبت ماکزیمم خطای جانبی ۰.۱ متر و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برابر با ۰.۰۴۴ متر، نشان دهنده عملکرد مناسب این سیستم در تضمین ایمنی و پایداری است.

### اطلاعات مقاله

#### نوع مقاله

مقاله پژوهشی

#### تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۱

بازنگری: ۱۴۰۴/۱۲/۰۹

پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۲۵

ارائه آنلاین: ۱۴۰۵/۰۲/۲۶

**کلیدواژه ها:** خودروی خودران، کنترل پیش بین مدل غیرخطی، تخمین گر افق لغزان، عدم قطعیت سنسور، ردیابی مسیر.

### نحوه ارجاع به این مقاله

آزادی شهرام، شجاعی سیدشامیر، کنترل یکپارچه طولی و عرضی برای ردیابی مسیر خودروی خودران مبتنی بر کنترل کننده پیش بین مدل غیرخطی و تخمین گر افق لغزان در شرایط تاخیر و عدم قطعیت شبکه، مهندسی مکانیک مدرس، ۵۹۷-۵۸۳(۰۷):۲۶(۰۷). ۱۴۰۵.

\*پست الکترونیکی نویسنده عهده دار مکاتبات: [azadi@kntu.ac.ir](mailto:azadi@kntu.ac.ir)

\*شناسه ارکید نویسنده عهده دار مکاتبات: 0000-0002-5817-9838



## ۱- مقدمه

امروزه خودروهای خودران به عنوان نقطه‌ی عطفی در صنعت حمل و نقل مدرن شناخته می‌شوند و نویدبخش کاهش چشمگیر تصادفات جاده‌ای، بهبود جریان ترافیک و افزایش ایمنی سرنشینان هستند. سیستم کنترل حرکت بخشی مهم در عملکرد خودران آنها می‌باشد که وظیفه آن اجرای فرامین سطح بالا و نگهداری خودرو در مسیر مرجع می‌باشد. ردیابی مسیر در سرعت‌های پایین به خوبی توسعه یافته است، اما کنترل خودرو در سرعت‌های بالا و شرایط حد پایداری (نظیر مانور تعویض خط)، به واسطه رفتار غیرخطی دینامیک خودرو و عدم قطعیت‌های موجود در تماس تایر و جاده، همواره به عنوان یک چالش باز و جدی در حوزه کنترل خودروهای خودران شناخته می‌شود.

در پژوهش‌های اولیه تمرکز بر روش‌های هندسی مانند تعقیب خالص و روش استنلی بود، [۱،۲] این روش‌ها از لحاظ محاسباتی سبک بودند ولی دینامیک خودرو در این روش‌ها نادیده گرفته شده است و برای سرعت‌های بالا مناسب نبودند. برای جبران این کاستی روش‌های کنترل بهینه کلاسیک مانند روش رگولاتور خطی (LQR) و کنترل کننده شبه خطی (Quasi-Linear Control) به کار برده شدند. [۳] اگرچه این روش‌ها عملکرد قابل قبولی داشتند، اما در مواجهه با شرایط غیرخطی شدید و عدم قطعیت‌ها دچار چالش می‌شدند. در همین راستا، سازگار و همکاران [۴] نشان دادند که استفاده از روش‌های مقاوم نظیر کنترل مد لغزشی تطبیقی می‌تواند پایداری خودرو را در حضور عدم قطعیت‌ها بهبود بخشد، و در پژوهشی تکمیلی [۵] بر اهمیت لحاظ کردن قیود مرزهای پایداری در طراحی مسیر تأکید نمودند.

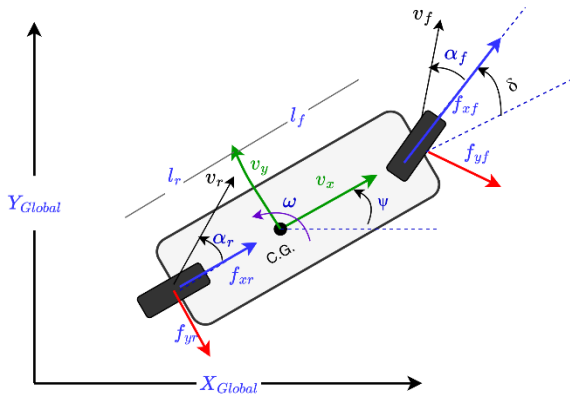
با این حال، به منظور غلبه بر این محدودیت‌های روش‌های کلاسیک و مدیریت صریح قیود فیزیکی، کنترل پیش بین مدل به رویکرد غالب تبدیل شده است. این روش کنترلی به دلیل توانایی در پیش بینی رفتار آینده سیستم و مدیریت قیود به گزینه‌ای مناسب تبدیل گردید. مطالعات فالکون و همکارانش [۶] نشان داد که کنترل پیش‌بین مدل خطی برای پایداری خودرو موثر است، اما پژوهش‌های بعدی [۷] نشان داد که کنترل پیش بین خطی در شرایط بحرانی و سرعت‌های بالا کارایی مناسبی ندارد. در مطالعات اخیر، تمرکز بر روی کنترل‌کننده پیش‌بین مدل غیرخطی (NMPC) و یکپارچه‌سازی سیستم‌ها معطوف شده است؛ چنانکه قماش و کاظمی [۸] ساختار کنترلی یکپارچه‌ای را برای خودروهای برقی توسعه دادند و فاضل و یزدان‌پناه [۹] کارایی کنترل پیش‌بین را در مدیریت پایداری و کشش خودرو بررسی نمودند.

با وجود این پیشرفت‌ها، عملکرد کنترل پیش بین مدل غیرخطی به شدت وابسته به دسترس دقیق و کامل به متغیرهای حالت می‌باشد که در بسیاری موارد در دسترس نمی‌باشند. در شرایط واقعی، متغیرهای حالت باید از داده‌های نویزی سنسورهای مانند

سامانه موقعیت‌یاب جهانی (GPS) و یا سنسور نرخ چرخش (Yaw Rate Sensor) و سنسور سرعت چرخ (WSS) استخراج شوند. فیلتر کالمن توسعه یافته (EKF) به عنوان یک روش استاندارد برای تخمین حالت در خودروهای خودران مورد استفاده قرار گرفته است. [۱۰] با این حال این روش با فرض گوسی بودن نویز کارآمد می‌باشد و نمی‌تواند قیود فیزیکی سیستم را در فرآیند تخمین لحاظ نماید و در مواردی غیر از نویز گوسی و یا داده‌های پرت تخمین واگرا شده و ناکارآمد می‌باشد.

برای رفع این مشکل، تخمین‌گر افق لغزان به عنوان جایگزینی مناسب جهت تخمین عدم قطعیت‌ها و مقاوم‌سازی سیستم معرفی گردیده است. بر خلاف روش فیلتر کالمن توسعه یافته روش تخمین‌گر افق لغزان مساله تخمین را به صورت یک بهینه سازی مقید در یک پنجره زمانی حل می‌کند و مقاومت بالاتری در برابر عدم قطعیت‌ها دارد.

با توجه به مزایای نظری اثبات‌شده برای تخمین‌گر افق لغزان، مطالعات متعددی با هدف پیاده‌سازی عملی و ارتقای کارایی آن صورت گرفته است. به عنوان نمونه، در یک مطالعه تجربی، ساختار یکپارچه‌ای از کنترل پیش‌بین مدل غیرخطی (NMPC) و تخمین‌گر افق لغزان (MHE) بر روی یک خودروی زمینی مفصل‌دار به صورت بلادرنگ پیاده‌سازی شد [۱۱]. نتایج این پژوهش نشان داد که اگرچه این رویکرد در مقایسه با روش‌های خطی‌سازی شده بار محاسباتی سنگین‌تری را تحمیل می‌کند، اما دقت ردیابی به مراتب بالاتری را ارائه می‌دهد. با این حال، تمرکز اصلی آن مقاله بر پیاده‌سازی در سرعت‌های پایین معطوف بوده و چالش‌های ناشی از عدم قطعیت‌های شبکه در آن لحاظ نشده است. در رویکردی متفاوت، برخی پژوهشگران برای غلبه بر عدم قطعیت‌ها، روش تخمین‌گر افق لغزان را با تکنیک‌های یادگیری ماشین ادغام نمودند [۱۲]. در این راستا، با افزودن یک لایه رگرسیون فرآیند گوسی (Gaussian Process) به ساختار تخمین‌گر افق لغزان، تلاش شد تا خطاهای مدل و دینامیک‌های مدل نشده به صورت برخط شناسایی شوند. هرچند این روش در سناریوهای مسابقه‌ای و کاهش زمان طی مسیر موفق عمل کرده است، اما وابستگی شدید فرآیند یادگیری به جریان داده‌های پیوسته و دقیق، سیستم را در برابر از دست رفتن داده (Packet Loss) آسیب‌پذیر می‌سازد. در ادامه، جهت کاهش بار محاسباتی روش‌های یادگیری، از نسخه فرآیند گوسی تطبیقی سریع (AISGP) در ترکیب با کنترل پیش‌بین مدل مبتنی بر خطای کانتر (MPCC) استفاده شد [۱۳]. اگرچه این روش سرعت محاسبات را بهبود بخشید، اما تابع هزینه آن عمدتاً بر دقت هندسی مسیر متمرکز بود و معیارهایی نظیر راحتی سرنشین در اولویت طراحی قرار نداشت؛ ضمن آنکه فرض دسترس بی‌وقفه به داده‌های سنسور در این روش نیز همچنان پابرجا بود. از سوی دیگر، در حوزه سیستم‌های دارای تأخیر، تحقیقاتی پیرامون جبران تأخیر مخابراتی در ردیابی مسیر پهنابان انجام شده است [۱۴] که لزوم



**شکل ۱** شماتیک مدل دینامیکی دوچرخ خودرو، نمایش نیروهای تایلر، زوایای لغزش و دستگاه‌های مختصات جهانی و محلی  
**Fig. 1** Schematic of the dynamic bicycle model, illustrating tire forces, slip angles, and global/local coordinate systems

دینامیک طولی خودرو، دینامیک عرضی خودرو و دینامیک چرخشی می‌باشد که به ترتیب در معادلات (۱)، (۲) و (۳) مشاهده می‌شود. [۱۵]

$$m(\dot{V}_x - V_y \Omega_z) = F_{xf} \cos \delta_f + F_{xr} - F_{yf} \sin \delta_f + F_{xf} \quad (1)$$

$$m(\dot{V}_y + V_x \Omega_z) = F_{yr} + F_{yf} \cos \delta_f + F_{xf} \sin \delta_f \quad (2)$$

$$I_z(\dot{\Omega}_z) = l_1 F_{yf} \cos \delta_f - l_2 F_{yr} + l_1 F_{xf} \sin \delta_f \quad (3)$$

در این معادله‌ها  $m$  جرم خودرو،  $(\dot{V}_x - V_y \Omega_z)$  شتاب طولی خودرو و  $(\dot{V}_y + V_x \Omega_z)$  شتاب عرضی خودرو در راستای مختصات متصل به بدنه خودرو می‌باشند، همچنین  $F_{xf}$  مولفه نیروی طولی تایلر جلو،  $F_{xr}$  مولفه نیروی طولی تایلر عقب،  $F_{yf}$  مولفه نیروی عرضی تایلر جلو،  $F_{yr}$  مولفه نیروی عرضی تایلر عقب،  $\delta_f$  زاویه فرمان چرخ جلو می‌باشد.  $l_f$  و  $l_r$  فاصله مرکز ثقل خودرو از محور عقب و محور جلو بوده و  $I_z$  ممان اینرسی حول محور قائم می‌باشد.

به منظور محاسبه سرعت در مختصات‌های جهانی در جهت  $X$  و  $Y$  به کمک سرعت طولی و عرضی خودرو می‌توان از روابط (۴) و (۵) استفاده نمود.

$$\dot{X} = V_x \cos(\psi) - V_y \sin(\psi) \quad (4)$$

$$\dot{Y} = V_x \sin(\psi) + V_y \cos(\psi) \quad (5)$$

که در آن  $\dot{X}$  و  $\dot{Y}$  سرعت طولی و عرضی در مختصات جهانی بوده و  $V_x$  و  $V_y$  سرعت طولی و عرضی در راستای مختصات چسبیده به بدنه خودرو می‌باشد.  $\psi$  زاویه خودرو می‌باشد.

مولفه نیروی طولی در تایلرهای جلو و عقب شامل نیروی رانش یا ترمز (Traction Force) و نیروی مقاومت غلتشی می‌باشد

$$F_{xf} = F_{tr/br} - R_{xf} \quad (6)$$

$$F_{xr} = -R_{xr} \quad (7)$$

نیروی رانش یا ترمز (کشش)، نیروی فعالی هست که توسط پیشراننده یا سیستم ترمز به چرخ‌ها اعمال می‌شود و که در حالت اول مقدار آن مثبت است و در حالت دوم مقدار آن منفی است، نیروی مقاومت غلتشی نیز یک نیروی بازدارنده است که همیشه در خلاف جهت حرکت خودرو به تایلرها وارد می‌شود، این نیرو ناشی

توجه به قیود شبکه را برجسته می‌سازد. با بررسی دقیق پیشینه پژوهش، مشاهده می‌شود که علی‌رغم توسعه روش‌های مبتنی بر یادگیری و یا جبران‌سازهای کلاسیک، فقدان یک چارچوب یکپارچه که بتواند به طور همزمان بر چالش‌های ناشی از خطای شبکه، راحتی سرنشین و محدودیت‌های محاسباتی غلبه کند، محسوس است. بر این اساس، نوآوری‌های اصلی این پژوهش را می‌توان در سه محور زیر خلاصه نمود:

**مقاومت در برابر اختلالات شبکه:** برخلاف روش‌های مبتنی بر یادگیری که در صورت بروز پدیده از دست رفتن داده (Packet Loss) دچار اختلال در فرآیند آموزش و عملکرد تخمین‌گر می‌شوند، ساختار پیشنهادی تخمین‌گر افق لغزان در این پژوهش مبتنی بر دینامیک داخلی سیستم طراحی شده است. این ویژگی سبب می‌شود که حتی در صورت بروز اختلالات شبکه نظیر از دست رفتن داده‌ها و یا وجود تأخیر، سیستم قادر به بازسازی وضعیت خودرو و حفظ عملکرد ایمن باشد.

**تضمین راحتی سرنشین در مانورهای سریع:** در حالی که تمرکز اکثر پژوهش‌های اخیر صرفاً بر دقت ردیابی مسیر است [۱۳]، در این پژوهش با توسعه تابع هزینه کنترل پیش‌بین مدل غیرخطی، ساختاری سه‌جزئی طراحی شده است. این ساختار علاوه بر کمینه‌سازی خطای ردیابی، نرخ تغییرات ورودی زاویه فرمان و نیروی کشش ( $\Delta u$ ) و نرخ تغییرات شتاب ( $\Delta a$ ) را به صورت همزمان جریمه می‌کند. این رویکرد با حذف نوسانات فرکانس بالا در سیگنال کنترلی، راحتی سفر را به‌ویژه در مانورهای سریع تضمین می‌نماید.

**کنترل مقاوم یکپارچه با بازدهی محاسباتی بالا:** در رویکرد پیشنهادی، به جای استفاده از روش‌های یادگیری عمیق که معمولاً بار محاسباتی بالایی دارند، با تنظیم دقیق ماتریس‌های کواریانس در ساختار یکپارچه کنترل پیش‌بین مدل و تخمین‌گر افق لغزان، سطحی مطلوب از ایمنی و عملکرد مقاوم حاصل شده است.

## ۲-مدل‌سازی

در این پژوهش به منظور طراحی کنترل‌کننده و تخمین‌گر وضعیت، از مدل دینامیکی غیرخطی استفاده می‌گردد. همچنین اثرات ناشی از بستر مخابراتی شامل تأخیر زمانی و از دست رفتن داده‌ها و نویز سنسورها به صورت ریاضی مدل شده است.

### ۲-۱- دینامیک خودرو

برای توصیف رفتار خودرو در صفحه افقی، از مدل معروف دوچرخ (bicycle model) استفاده شده است. در این مدل دینامیک، چرخش حول محور طولی (roll) و چرخش حول محور عرضی (pitch) ناچیز بوده و دو چرخ هم محور به صورت یک چرخ معادل در مرکز محور در نظر گرفته شده است.

معادلات دینامیک حاکم در دستگاه مختصات متصل به بدنه (body Frame) و دستگاه مختصات جهانی (Global Frame) شامل

در محیط شبیه‌سازی استفاده شده است. برخلاف مدل دوچرخه که به عنوان مدل در کنترل پیش‌بین مدل غیرخطی و تخمین‌گر افق لغزان استفاده گردید (معادلات ۱ تا ۳)، مدل چهارچرخ دارای عرض محور (Track width) بوده و اثرات کوپلینگ بین چرخ‌های چپ و راست را لحاظ می‌کند. با فرض دیفرانسیل جلو بودن خودرو، معادلات حرکت انتقالی و دورانی شاسی در این مدل به صورت

روابط (۱۴)، (۱۵) و (۱۶) می‌باشند. [۱۶]

$$m(\dot{V}_x - V_y\Omega) = (F_{x,fl} + F_{x,fr}) \cos \delta - (F_{y,fl} + F_{y,fr}) \sin \delta + F_{x,rl} + F_{x,rr} \quad (14)$$

$$m(\dot{V}_y + V_x\Omega) = (F_{x,fl} + F_{x,fr}) \sin \delta + (F_{y,fl} + F_{y,fr}) \cos \delta + F_{y,rl} + F_{y,rr} \quad (15)$$

$$I_z\dot{\Omega} = l_f((F_{y,fl} + F_{y,fr}) \cos \delta + (F_{x,fl} + F_{x,fr}) \sin \delta) - l_r(F_{y,rl} + F_{y,rr}) + \frac{w}{2}((F_{x,fr} - F_{x,fl}) \cos \delta + (F_{y,fl} - F_{y,fr}) \sin \delta + F_{x,rr} - F_{x,rl}) \quad (16)$$

در معادلات فوق، زیرنویس‌های  $fl, fr, rl, rr$  به ترتیب بیانگر چرخ‌های جلو چپ، جلو راست، عقب چپ و عقب راست می‌باشند و  $w$  فاصله عرضی بین چرخ‌ها (Track Width) است.

### ۲-۱-۲-۲ مدل تایر غیرخطی پژکا (Pacejka Magic Formula) و انتقال بار:

در حالی که کنترل‌کننده پیش‌بین به منظور حفظ سرعت محاسبات بلادرنگ، از یک تقریب درجه دوم (رابطه ۱۱) برای محاسبه نیروهای جانبی تایر استفاده می‌کند، در مدل شبیه‌ساز (Plant) برای تولید نیروهای جانبی تایر از فرمول جادویی پژکا استفاده شده است. این مدل، رفتار اشباع تایر در سرعت‌ها و زوایای لغزش بالا را با دقت بسیار بالایی توصیف می‌کند. [۱۷]

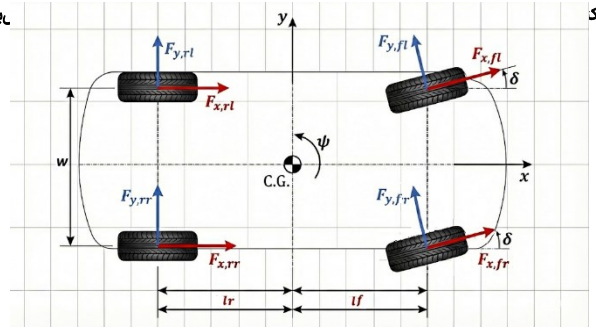
$$F_{y,i} = D_i \sin(C_i \arctan(B_i \alpha_i - E_i(B_i \alpha_i - \arctan(B_i \alpha_i)))) \quad (17)$$

که در آن  $\alpha_i$  زاویه لغزش هر چرخ است. نکته حائز اهمیت آن است که ضرایب سفتی  $(B, C, D, E)$  در این فرمول، تابعی پیوسته از نیروی عمودی وارد بر همان چرخ  $(F_{z,i})$  هستند. در مدل چهارچرخ استفاده شده، نیروی عمودی هر چرخ ثابت نبوده و در حین انجام مانور تغییر خط با سرعت بالا، تحت تاثیر انتقال بار طولی (ناشی از شتاب‌گیری) و انتقال بار عرضی (ناشی از نیروی گریز از مرکز) به شدت نوسان می‌کند. غلبه بر این دینامیک‌های مدل‌نشده (Unmodeled Dynamics)، چالش اصلی سیستم کنترل یکپارچه در این پژوهش می‌باشد. نیروهای عمودی وارد بر هر چرخ  $(F_{z,i})$  با در نظر گرفتن انتقال بار طولی (ناشی از شتاب‌گیری/ترمزگیری) و انتقال بار عرضی (ناشی از پیچیدن) به صورت معادلات زیر در شبیه‌ساز واقعی (Plant) محاسبه شده‌اند.

$$F_{z,fl} = m \left( \frac{gl_r}{2L} - \frac{a_x h}{2L} - \frac{a_y hl_r}{wL} \right) \quad (18)$$

$$F_{z,fr} = m \left( \frac{gl_r}{2L} - \frac{a_x h}{2L} + \frac{a_y hl_r}{wL} \right) \quad (19)$$

$$F_{z,rl} = m \left( \frac{gl_f}{2L} + \frac{a_x h}{2L} - \frac{a_y hl_f}{wL} \right) \quad (20)$$



شکل ۲ شماتیک مدل چهارچرخ خودرو، نمایش نیروهای تایر، زوایای فرمان و دستگاه مختصات

Fig. 2 Schematic of the Four-Wheel (Twin-Track) Vehicle Model, displaying Tire Forces, Steering Angles, and Coordinate System.

از تغییر شکل تایر و اصطکاک آن با سطح جاده است. این نیرو معمولاً به صورت ضربی از نیروی عمودی وزن تعریف می‌شود.

$$R_x = C_r \cdot F_z \quad (8)$$

که در آن  $C_r$  ضریب مقاومت غلتشی و  $F_z$  نیروی عمودی وارد بر آن چرخ می‌باشد.

### ۲-۱-۲-۲ مدل تایر

از آنجا که مانور خودرو در این پژوهش در سرعت بالا انجام می‌شود، محاسبه دقیق نیروهای تایر حائز اهمیت است. زوایای لغزش جانبی تایرها  $(\alpha_f, \alpha_r)$  برای چرخ‌های جلو و عقب مطابق رابطه (۹) و (۱۰) محاسبه می‌شوند.

$$\alpha_f = \delta - \tan^{-1} \left( \frac{v_y + l_f \omega}{v_x} \right) \quad (9)$$

$$\alpha_r = -\tan^{-1} \left( \frac{v_y - l_r \omega}{v_x} \right) \quad (10)$$

### ۲-۱-۲-۲ محاسبه نیروی جانبی تایر

رفتار سختی جانبی تایر  $(C_\alpha)$  تابعی غیرخطی از نیروی عمودی  $(F_z)$  است. این رفتار ناشی از تغییر طول ناحیه تماس و توزیع فشار تایر می‌باشد. در این پژوهش، جهت پرهیز از پیچیدگی‌های محاسباتی مدل مجیک فرمولا و حفظ قابلیت مشتق‌گیری در کنترل‌کننده پیش‌بین مدل غیرخطی، از یک مدل تقریب درجه دوم به صورت رابطه (۱۱) استفاده شده است. [۱۵]

$$C_\alpha = c_1 F_z - c_2 F_z^2 \quad (11)$$

که در آن ضرایب  $c_1$  و  $c_2$  با برازش داده‌های تجربی تایر بر روی مدل اصلی استخراج شده‌اند. همچنین نیروهای عمودی وارد بر محورهای جلو  $(F_{z,f})$  و عقب  $(F_{z,r})$  با در نظر گرفتن اثر انتقال بار دینامیکی ناشی از شتاب طولی، مطابق روابط زیر محاسبه می‌شوند.

$$F_{z,f} = \frac{mgl_f}{l_f + l_r} - \frac{mh_{cg}a_x}{l_f + l_r} \quad (12)$$

$$F_{z,r} = \frac{mgl_f}{l_f + l_r} + \frac{mh_{cg}a_x}{l_f + l_r} \quad (13)$$

### ۲-۲-۲ مدل دینامیکی چهارچرخ (Twin-Track) به عنوان سیستم واقعی (Plant Simulator)

به منظور ارزیابی واقع‌گرایانه عملکرد سیستم کنترل پیشنهادی و اثبات مقاومت آن در برابر عدم تطابق مدل (Plant-Model Mismatch)، از یک مدل دینامیکی کامل چهارچرخ (Twin-track) به جای مدل ساده‌شده‌ی دوچرخه، به عنوان جایگزین فیزیک خودرو

### ۳- استراتژی کنترلی پیشنهادی

در این پژوهش، یک معماری کنترلی دو لایه مبتنی بر تخمین‌گر افق لغزان و کنترل پیش‌بین مدل غیرخطی استفاده شده است. در لایه اول تخمین‌گر افق لغزان با دریافت داده‌های نویزی و ناقص از سنسورها که شامل تاخیر نیز می‌باشند، متغیرهای حالت خودرو را بازسازی می‌کند و در لایه دوم کنترل پیش‌بین مدل غیرخطی با استفاده از متغیرهای حالت پالایش و بازسازی شده، فرامین بهینه میزان زاویه فرمان و نیروی کشش را با در نظر گرفتن قیود فیزیکی سیستم برای تعقیب مسیر مرجع محاسبه شده بدست می‌آورد. لازم به ذکر است که مسیر مرجع نیز با کمک روش چند جمله‌ای بدست می‌آید. شکل ۳ شماتیک استراتژی کنترلی پیشنهادی را نمایش می‌دهد.

#### ۳-۱- طراحی تخمین‌گر افق لغزان

بر خلاف فیلتر کالمن که بر اساس اطلاعات لحظه قبل کار می‌کند، روش پنجره لغزان مساله تخمین حالت را به یک مساله بهینه‌سازی دینامیکی مقید تبدیل می‌کند. در هر گام زمانی  $k$ ، هدف یافتن دنباله‌ای از وضعیت‌ها در یک پنجره لغزان به طول  $N$  می‌باشد که بهترین تطابق را با مدل دینامیکی و داده‌های اندازه‌گیری شده داشته باشد. شکل ۴ دیاگرام طراحی تخمین‌گر افق لغزان را نشان می‌دهد.

#### ۳-۱-۱- بردار متغیرهای تصمیم

بردار متغیرهای تصمیم در بهینه‌سازی شامل وضعیت اولیه پنجره  $(\hat{x}_{k-N})$  و دنباله نویزهای فرآیند  $(w)$  و نویزهای اندازه‌گیری  $(v)$  در طول پنجره می‌باشد.

#### ۳-۱-۲- تابع هزینه

تابع هزینه  $J_{MHE}$  از سه بخش اصلی تشکیل شده است:

$$F_{z,rr} = m \left( \frac{gl_f}{2L} + \frac{a_x h}{2L} + \frac{a_y h l_f}{wL} \right) \quad (21)$$

در اینجا  $L = l_f + l_r$  فاصله بین دو محور،  $h$  ارتفاع مرکز ثقل،  $w$  فاصله عرضی چرخ‌ها، و  $a_x$  و  $a_y$  شتاب‌های طولی و عرضی خودرو هستند.

#### ۳-۲- مدلسازی کانال ارتباطی و سنسور

خودروهای خودران داده‌های سنسورها را از طریق شبکه داخلی دریافت می‌کنند. در این پژوهش سه عامل مخرب شبکه مدلسازی شده است:

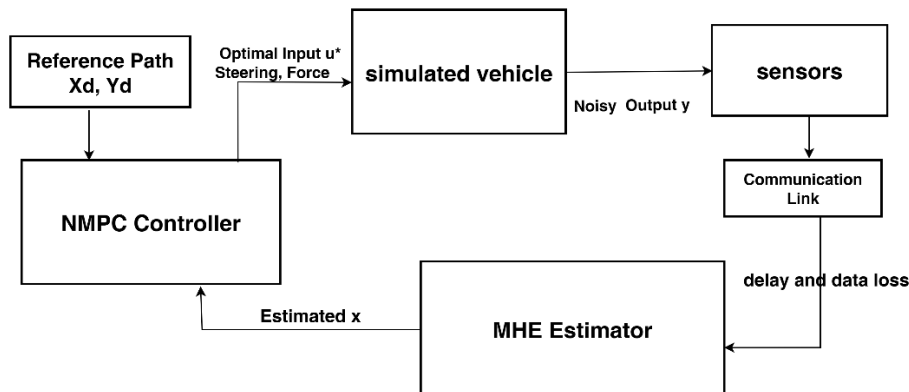
**مدلسازی نویز و عدم قطعیت در حسگرها:** خروجی اندازه‌گیری شده توسط حسگرها  $(y_k)$  شامل موقعیت مکانی حاصل از سامانه موقعیت‌یاب جهانی (GPS) و سنسور نرخ چرخش (Yaw Rate Sensor) و سنسور سرعت چرخ (WSS) می‌باشد که با نویز سفید گوسی  $(v)$  همراه هستند. علاوه بر این، اندازه‌گیری سرعت طولی توسط سنسور سرعت چرخ (WSS) نیز دارای خطا و نویز است. این عدم قطعیت‌ها در اندازه‌گیری سرعت، ناشی از پدیده‌های فیزیکی نظیر لغزش طولی تایر، تغییرات شعاع مؤثر چرخ در اثر توزیع بار دینامیکی و همچنین ارتعاشات ناشی از ناهمواری‌های سطح جاده می‌باشند.

$$y_k = Cx_k + v_k \quad (22)$$

**پدیده از دست رفتن داده (packet loss):** برای مدلسازی قطعی شبکه، از یک متغیر تصادفی برنولی  $\gamma_k \in \{0,1\}$  استفاده شده است که اگر  $\gamma_k = 1$  باشد، داده دریافت شده است و اگر  $\gamma_k = 0$  باشد، داده از دست رفته است، احتمال وقوع پدیده از دست رفتن بسته با پارامتر  $\lambda$  مشخص می‌شود.

$$y_{received,k} = \gamma_k \cdot y_k + (1 - \gamma_k) \cdot y_{last} \quad (23)$$

**تاخیر زمانی:** تاخیر زمانی ناشی از سنسورها و مخابره داده  $(\tau_k)$ ، باعث می‌شود که سیگنال کنترلی بر اساس اطلاعات منسوخ (Outdated) و مربوط به گذشته محاسبه شود؛ در نتیجه، فرمان اعمال شده به خودرو با وضعیت لحظه‌ای و واقعی سیستم هماهنگی نداشته و می‌تواند منجر به ناپایداری گردد.



شکل ۳ بلوک دیاگرام ساختار کنترلی پیشنهادی؛ ادغام یکپارچه کنترل‌کننده پیش‌بین مدل غیرخطی و تخمین‌گر افق لغزان جهت جبران نویز اندازه‌گیری و اختلالات شبکه

Fig. 3 Block diagram of the proposed control architecture; integrated Nonlinear Model Predictive Control (NMPC) and Moving Horizon Estimation (MHE) to compensate for measurement noise and network disturbances

۳-۱-۳- قیود مساله

در مسأله‌ی تخمین‌گر افق لغزان، قیود نقش کلیدی در تضمین سازگاری تخمین با مدل سیستم و داده‌های اندازه‌گیری دارند. قیود دینامیکی به صورت

$$x_{j+1} = f_d(x_j, u_j) + w_j \quad (۲۵)$$

تعریف می‌شوند و بیانگر آن هستند که حالت‌های تخمین‌زده شده  $x_j$  باید از مدل دینامیکی سیستم  $f_d$  تبعیت کنند، در حالی که عدم قطعیت‌ها و نویز فرآیند با  $w_j$  لحاظ می‌شوند. از سوی دیگر، قیود اندازه‌گیری به صورت

$$y_j = h(x_j) + v_j \quad (۲۶)$$

مدل‌سازی می‌شوند و ارتباط بین حالت‌های تخمین‌زده شده و داده‌های سنسور را با در نظر گرفتن نویز اندازه‌گیری  $v_j$  برقرار می‌سازند، این قیود موجب می‌شوند که مسأله‌ی مینیمم‌سازی در تخمین‌گر افق لغزان نه تنها خطا را کاهش دهد، بلکه تخمین‌های به‌دست‌آمده با قوانین فیزیکی سیستم و اندازه‌گیری‌های واقعی نیز سازگار باقی بمانند.

۳-۱-۴- استراتژی برخورد با خطای شبکه

در شرایطی که داده‌های سنسور دچار تاخیر و یا از دست رفتن داده (packet Loss) می‌شوند، ماتریس وزن دهی  $R$  به صورت تطبیقی تغییر می‌کند. اگر در لحظه  $z$  داده‌ای دریافت نشود، اعتماد به مدل اندازه‌گیری باید صفر شود، این کار با میل دادن مولفه‌های  $R$  به بینهایت انجام می‌شود.

$$R_k = \begin{cases} R_{nom} & \text{if } \gamma_k = 1 \\ 10^6 \cdot I & \text{if } \gamma_k = 0 \end{cases} \quad (۲۷)$$

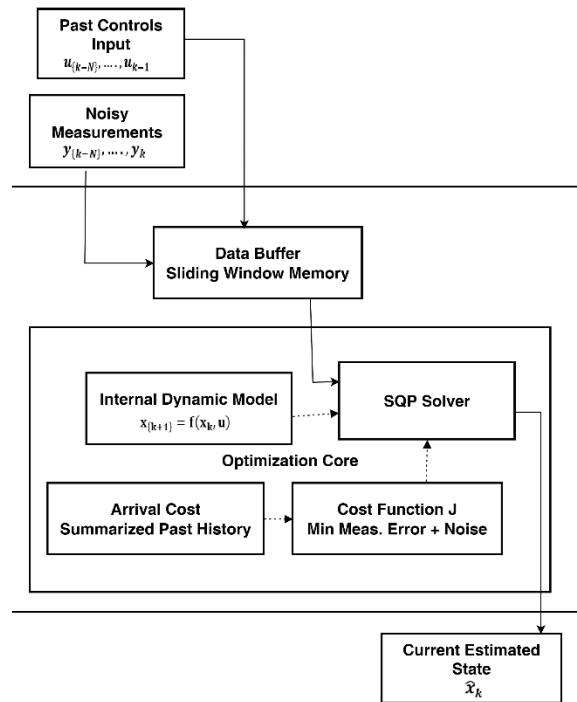
که در آن  $R_k$  ماتریس کواریانس نویز اندازه‌گیری در گام زمانی  $k$  می‌باشد و  $R_{nom}$  ماتریس کواریانس نامی (Nominal) سنسورها می‌باشد. همچنین  $\gamma_k$  متغیر باینری می‌باشد که وضعیت داده را در هر لحظه نشان می‌دهد.  $\gamma_k = 1$  یعنی دریافت موفق،  $\gamma_k = 0$  یعنی از دست رفتن داده (به منظور صفر کردن وزن ترم سنسور در تابع هزینه تخمین‌گر افق لغزان، از ضرب یک عدد بسیار بزرگ  $(10^6 \cdot I)$  در ماتریس واحد استفاده شده که به معنای بینهایت بودن عدم قطعیت است.

۳-۲- طراحی کنترل کننده پیش‌بین غیرخطی

مسئله کنترل پیش‌بین مدل غیرخطی، به صورت کمینه‌سازی یک تابع هزینه غیرخطی  $J$  در طول افق پیش‌بین  $N_p$  تعریف می‌شود. هدف اصلی کنترل کننده، محاسبه دنباله‌ای از ورودی‌های کنترلی بهینه  $u = [\delta, F_x]^T$  در هر گام نمونه برداری است، به گونه‌ای که خودرو مسیر مرجع را تعقیب کرده و همزمان قیود فیزیکی و راحتی سرنشین را ارضا نماید. این مسئله به صورت یک مسئله بهینه‌سازی مقید در افق محدود (Finite Horizon) تعریف می‌شود.

۳-۲-۱- روابط ریاضی و تابع هزینه

مسئله بهینه‌سازی در هر لحظه  $t$  با افق پیش‌بین  $N_p$  مطابق با فرمول بندی استاندارد و اثبات شده [۱۹] به صورت زیر بیان می‌گردد:



شکل ۴ بلوک دیگرام تخمین‌گر افق لغزان با مدل دینامیک داخلی، تابع هزینه و حلگر

Fig. 4 Block diagram of Moving Horizon Estimator (MHE) with Internal Dynamic Model, Cost Function and Solver

**هزینه ورود:** اطلاعات مربوط به داده‌های قدیمی‌تر از پنجره لغزان را در خود خلاصه می‌کند تا از افزایش حجم محاسبات جلوگیری شود.

**هزینه مدل:** انحراف تخمین از دینامیک فیزیکی خودرو را جریمه می‌کند.

**هزینه سنسور:** اختلاف خروجی تخمینی و داده سنسور را جریمه می‌کند.

بر اساس فرمول بندی استاندارد و اثبات شده تخمین‌گر افق لغزان برای سیستم های زمان-گسسته غیرخطی [۱۸]، فرمول کلی تابع هزینه به شکل رابطه (۲۴) می‌باشد.

$$J_{MHE} = \|\hat{x}_{k-N} - \bar{x}_{k-N}\|_P^2 + \sum_{j=k-N}^k (\|w_j\|_{Q_{mhe}}^2 + \|v_j\|_{R_{mhe}}^2) \quad (۲۴)$$

که در آن  $\hat{x}_{k-N}$  وضعیت تخمین زده شده در ابتدای پنجره (متغیر بهینه‌سازی) و  $\bar{x}_{k-N}$  تخمین پیشین می‌باشد که از حل مسأله در گام زمانی قبل به دست آمده است.  $P$  ماتریس وزن دهی هزینه ورود (معکوس کواریانس خطای تخمین در لحظه  $(k-N)$  و  $Q_{mhe}$  و  $R_{mhe}$  به ترتیب ماتریس کواریانس نویز فرآیند (نشان دهنده عدم قطعیت مدل) و ماتریس کواریانس نویز اندازه‌گیری (نشان دهنده عدم قطعیت سنسور) می‌باشد.

### ۳-۲-۲- قیود حاکم بر کنترل پیش‌بین مدل غیرخطی

مساله بهینه‌سازی فوق باید در هر گام زمانی با رعایت مجموعه‌ای از قیود سخت حل شود تا عملکرد ایمن حرکت تضمین شود. این قیود شامل مجموعه‌ای از قیدهای دینامیکی و قیدهای اشباع عملگرها می‌باشند.

**قید دینامیک خودرو:** این رابطه نشان‌دهنده مدل گسسته‌سازی شده‌ی خودرو (مدل دوچرخ غیرخطی) است. این قید تضمین می‌کند که مسیر پیش‌بینی شده توسط کنترلر، با فیزیک حرکت خودرو و محدودیت‌های دینامیکی آن سازگار است.

$$x_{k+i+1} = f_d(x_{k+i}, u_{k+i}) \quad (۳۳)$$

**قید ورودی فرمان:** این قید محدودیت‌های هندسی سیستم فرمان را اعمال می‌کند تا از دستورات غیرواقعی جلوگیری شود.

$$\delta_{min} \leq \delta_{k+i} \leq \delta_{max} \quad (۳۴)$$

**قید ورودی نیروی کشش ( $F_x$ ):** این قید محدودیت‌های سیستم پیش‌ران و ترمز را مدل‌سازی می‌کند.  $F_{xmax}$  نشان‌دهنده حداکثر نیروی پیش‌ران در محل تماس تایر و جاده بوده ( $F_{xmin}$  که مقداری منفی است) نشان‌دهنده حداکثر نیروی ترمزگیری در محل تماس تایر و جاده می‌باشد. رعایت این قید از اشباع شدن عملگرها و لغزش چرخ‌ها جلوگیری می‌کند.

$$F_{xmin} \leq F_x \leq F_{xmax} \quad (۳۵)$$

شکل ۵ بلوک دیاگرام کنترل کننده پیش‌بین مدل غیرخطی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است، تابع هزینه ( $J$ ) به صورت چندهدفه طراحی شده است تا علاوه بر کمینه‌سازی خطای ردیابی، با جریمه کردن تغییرات ناگهانی شتاب، نرمی حرکت و راحتی سرنشین را تضمین کند. مدل پیش‌بین مورد استفاده، همان معادلات دینامیکی دوچرخ غیرخطی است که رفتار خودرو را در طول افق پیش‌بینی شبیه‌سازی می‌کند تا در نهایت ورودی‌های کنترلی بهینه ( $u^*$ ) شامل زاویه فرمان و نیروی کشش استخراج گردند.

### ۳-۳- فیلتر کالمن توسعه‌یافته (EKF)

به منظور ارزیابی دقیق‌تر و نشان دادن برتری تخمین‌گر افق لغزان در شرایط نامطلوب شبکه، از فیلتر کالمن توسعه‌یافته (EKF) به عنوان یک ساختار تخمین‌گر رقیب و استاندارد صنعتی استفاده شده است. برخلاف تخمین‌گر افق لغزان که دارای حافظه مبتنی بر پنجره لغزان است، فیلتر کالمن توسعه یافته ماهیتی بدون حافظه دارد، بدین معنا که برای تخمین حالت در هر لحظه، تنها به اطلاعات گام قبلی وابسته است.

معادلات فیلتر کالمن توسعه یافته در دو مرحله پیش‌بینی و بروزرسانی اجرا می‌شوند. [۲۰] در حضور پدیده از دست رفتن داده، استراتژی تنظیم ماتریس کوواریانس نوین اندازه‌گیری ( $R_k$ ) دقیقاً مشابه رابطه (۲۷) برای فیلتر کالمن توسعه یافته نیز لحاظ می‌گردد تا مقایسه عادلانه باشد.

$$J_{NMPC} = \|e_{NP}\|_p^2 + \sum_{i=0}^{N_p-1} (\|e_{k+i}\|_Q^2 + \|\Delta u_{k+i}\|_R^2 + \|\Delta a_{k+i}\|_R^2) \quad (۲۸)$$

این تابع هزینه پیشنهادی ( $J_{NMPC}$ ) از مجموع وزن‌دار چهار بخش اصلی تشکیل شده است که هر یک جنبه‌ای از عملکرد سیستم را کنترل می‌کنند:

$$J = J_{tracking} + J_{actuator} + J_{comfort} + J_{terminal} \quad (۲۹)$$

**ترم‌های خطای تعقیب ( $J_{tracking}$ ):** این عبارت شامل مجموع مربعات خطای موقعیت طولی و عرضی است. هدف این بخش، کمینه‌سازی انحراف خودرو از مسیر مرجع در طول افق پیش‌بینی است. ماتریس وزن‌دهی  $Q$  اولویت نسبی بین خطای عرضی (که در مانور تعویض خط حیاتی‌تر است) و خطای طولی را تعیین می‌کند:

$$J_{tracking} = w_x(X_k - X_{ref,k})^2 + w_y(Y_k - Y_{ref,k})^2 \quad (۳۰)$$

**ترم نرخ تغییرات ورودی ( $\Delta u$ ):** این ترم مستقیماً بر روی تغییرات ورودی‌های کنترلی ( $\Delta u$ ) اعمال می‌شود. هدف از این بخش، حفاظت از عملگرهای مکانیکی و جلوگیری از فرامین فرکانس بالا است که می‌تواند به سیستم فرمان یا پیش‌ران آسیب برساند.

**نرخ تغییرات فرمان ( $\Delta \delta$ ):** جریمه بر این ترم، از نوسانات سریع فرمان جلوگیری کرده و استهلاک سیستم فرمان را کاهش می‌دهد.

**نرخ تغییرات نیروی کشش ( $\Delta F_x$ ):** این ترم مانع از تغییرات ناگهانی گشتاور موتور و نیروی ترمز می‌شود تا از شوک به سیستم انتقال قدرت جلوگیری گردد.

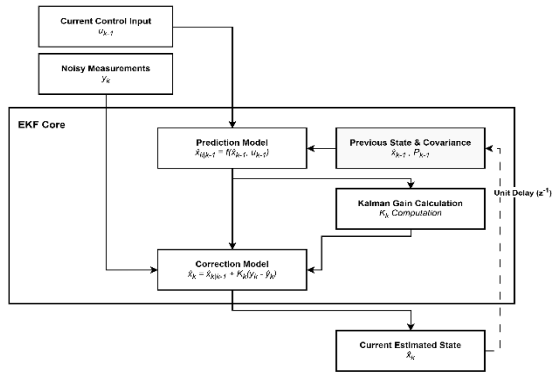
$$J_{actuator} = w_{\Delta \delta} (\Delta \delta_k)^2 + w_{\Delta F} (\Delta F_{x,k})^2 \quad (۳۱)$$

**نرخ تغییرات شتاب ( $\Delta a$ ):** این بخش نوآورانه‌ترین قسمت تابع هزینه در این پژوهش است که مستقیماً راحتی سرنشین و پایداری دینامیکی را در دستگاه مختصات محلی متصل به خودرو هدف قرار می‌دهد. در اینجا، تغییرات بردار شتاب ( $\Delta a$ ) جریمه می‌شود.

**تغییرات شتاب طولی ( $\Delta a_x$ ):** تغییرات ناگهانی در شتاب طولی (تکان‌های جلو و عقب) را محدود می‌کند. این عامل مستقیماً بر احساس لگد زدن خودرو هنگام شتاب‌گیری یا ترمزگیری تأثیر دارد. **تغییرات شتاب عرضی ( $\Delta a_y$ ):** تغییرات ناگهانی در شتاب جانبی را محدود می‌کند. کنترل این پارامتر در مانور تعویض خط بسیار حیاتی است، زیرا تغییرات سریع شتاب جانبی عامل اصلی ایجاد حالت تهوع و ناراحتی در سرنشینان و همچنین ناپایداری عرضی خودرو است.

$$J_{comfort} = w_{\Delta a,x} (\Delta a_{x,k})^2 + w_{\Delta a,y} (\Delta a_{y,k})^2 \quad (۳۲)$$

**هزینه ترمینال:** به منظور تضمین پایداری حلقه بسته، خطای وضعیت سیستم در انتهای افق پیش‌بین  $k = N_p$  با وزن  $P$  جریمه می‌شود تا همگرایی حالت‌های سیستم به صفر در پایان افق تضمین گردد.



شکل ۶ بلوک دیاگرام فیلتر کالمن توسعه یافته (EKF)، شامل ساختار دو مرحله ای پیش بینی و بروزرسانی

**Fig. 6** Block diagram of the Extended Kalman Filter (EKF) structure, including the two-step prediction and correction stages.

در شرایطی که داده‌ها به صورت متوالی قطع شوند ( $\gamma_k = 0$ )، ماتریس  $R_k$  به سمت بی‌نهایت میل کرده و بهره کالمن ( $K_k$ ) صفر می‌شود. در این حالت فیلتر کالمن توسعه یافته عملاً مرحله بروزرسانی را از دست داده و تخمین حالت صرفاً بر اساس مدل حلقه‌باز (مرحله پیش‌بینی) جلو می‌رود که در یک سیستم به شدت غیرخطی با سرعت بالا، به سرعت منجر به واگرایی و انباشت خطا می‌گردد.

#### ۴- شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

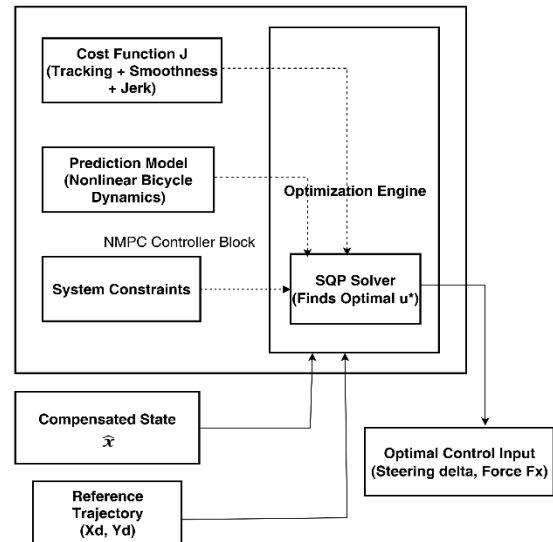
به منظور ارزیابی کارایی استراتژی کنترلی پیشنهادی، شبیه‌سازی‌های گسترده‌ای در محیط نرم‌افزار متلب (MATLAB) انجام شده است. در این بخش، ابتدا پارامترهای مدل و سناریوی آزمون معرفی شده و سپس عملکرد سیستم در حضور عدم قطعیت‌ها بررسی می‌گردد.

##### ۴-۱- پارامترهای سیستم و تعریف سناریوهای آزمون

خودروی مورد مطالعه با مشخصات دینامیکی یک سدان استاندارد مدل‌سازی شده است که پارامترهای فیزیکی آن در جدول ۱ ارائه شده‌اند. الگوریتم‌های کنترلی و تخمین‌گر با گام زمانی ثابت  $T_s = 0.02s$  اجرا می‌شوند.

**تعریف مسیر مرجع:** سناریوی انتخاب شده، مانور تغییر خط دوگانه (Double Lane Change) است که یکی از چالش‌برانگیزترین مانورها برای پایداری خودرو محسوب می‌شود. برای تولید یک مسیر هموار و پیوسته که از نظر سینماتیکی قابل تعقیب باشد، از یک چندجمله‌ای درجه پنج (Quintic Polynomial) استفاده شده است. **مدل‌سازی اغتشاشات و عدم قطعیت‌ها:** به منظور شبیه‌سازی شرایط واقعی عملکرد خودرو در بستر شبکه (Network Control System)، چهار دسته عدم قطعیت به شرح زیر به سیستم اعمال شده است:

**نویز سنسور:** به منظور شبیه‌سازی خطای ذاتی سنسورهای سامانه موقعیت‌یاب جهانی (GPS)، سنسور نرخ چرخش (Yaw Rate)



شکل ۵ بلوک دیاگرام اجزای داخلی کنترل کننده پیش‌بین مدل غیرخطی، نمایش تابع هزینه چندگانه، قیود سیستم و موتور بهینه‌سازی

**Fig. 5** Diagram of NMPC controller internal components, illustrating multi-objective cost function, system constraints, and optimization engine

**مرحله پیش‌بینی:** در این مرحله وضعیت سیستم در لحظه  $k$  با داشتن اطلاعات تا لحظه  $k-1$  بدست می‌آید.

$$\hat{x}_{k|k-1} = f(\hat{x}_{k-1|k-1}, u_{k-1}) \quad (36)$$

$$P_{k|k-1} = F_{k-1} P_{k-1|k-1} F_{k-1}^T + Q \quad (37)$$

(

که در آن  $F_{k-1}$  ژاکوبین مدل دینامیکی نسبت به متغیرهای حالت و ماتریس کواریانس خطای تخمین می‌باشد.

**مرحله بروزرسانی:** با محاسبه ژاکوبین مدل اندازه‌گیری ( $H_k$ ) و ماتریس بهره کالمن ( $K_k$ )، حالت‌ها و ماتریس کواریانس خطای تخمین ( $P_k$ ) به روز می‌شوند:

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T (H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k)^{-1} \quad (38)$$

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k (y_k - h(\hat{x}_{k|k-1})) \quad (39)$$

$$P_{k|k} = (I - K_k H_k) P_{k|k-1} \quad (40)$$

جدول ۱ مقادیر عددی پارامترهای مدل خودرو

Parameter	Symbol	Value	Unit
Mass	M	867	Kg
Moment of Inertia about the Vertical Axis	$I_z$	1130	$kg \cdot m^2$
Distance from Center of Gravity to Front Axle	$l_f$	0.94	m
Distance from Center of Gravity to Rear Axle	$l_r$	1.41	m
Vehicle Track Width	w	1.4	m
Prediction Horizon	$N_p$	100	Step time
Control Horizon	$N_c$	20	Step time
Estimation Horizon	$N_{mhe}$	20	Step time
Linear tire stiffness coefficient	$C_1$	11.46	$\frac{1}{rad}$
Tire stiffness curvature coefficient	$C_2$	5.73e-4	$\frac{1}{(N \cdot rad)}$

**تأخیر زمانی:** یک تأخیر زمانی معادل ۰.۱ ثانیه (۱۰۰ میلی‌ثانیه) در مسیر فیدبک و دریافت داده‌های حسگرها لحاظ شده است. این تأخیر به منظور مدل‌سازی تأخیرهای ناشی از انتقال داده در شبکه و زمان پردازش اندازه‌گیری‌ها در نظر گرفته شده است.

**از دست رفتن داده‌ها:** نرخ ریزش داده ۲۰ درصد در مسیر فیدبک سنسورها به تخمین‌گر اعمال شده است که عدم قطعیت‌های شبکه مخابراتی را شبیه‌سازی می‌کند.

فرآیند بهینه‌سازی غیرخطی با استفاده از الگوریتم برنامه‌ریزی درجه دوم متوالی (SQP) انجام شده است. دلیل انتخاب الگوریتم برنامه‌ریزی درجه دوم متوالی نسبت به روش‌هایی نظیر نقطه درونی (Interior-Point)، کارایی بالاتر آن در مسائل شروع گرم (Warm-Start) است، بدین معنا که الگوریتم برنامه‌ریزی درجه دوم متوالی با بهره‌گیری از جواب بهینه گام زمانی قبل به عنوان حدس اولیه، با تعداد تکرار کمتر و سرعت همگرایی بالاتر، قیود غیرخطی سیستم را ارضا می‌کند.

#### ۴-۲-۱- تنظیم کنترلر و تخمین‌گر

دستیابی به عملکرد مطلوب، نیازمند تنظیم دقیق ماتریس‌های وزن‌دهی در تابع هزینه بوده است:

**در سطح کنترل پیش بین مدل:** استراتژی تراز کردن مقیاس‌ها (Scaling Alignment) به کار گرفته شده است. با توجه به تفاوت مرتبه بزرگی بین نیروی طولی (نیوتن) و زاویه فرمان (رادیان)، وزن‌ها بگونه‌ای نرمال‌سازی شدند که اولویت حل‌گر بر حفظ پایداری و سپس راحتی سرنشین (با اعمال جریمه بر نرخ تغییرات شتاب) متمرکز باشد.

**در سطح تخمین‌گر افق لغزان:** ماتریس‌های کوواریانس نویز فرآیند (Q) و نویز اندازه‌گیری (R) بر اساس اعتماد نسبی تنظیم شده‌اند. با توجه به وجود ریزش داده ۲۰ درصدی، وزن اعتماد به مدل دینامیکی افزایش یافته تا تخمین‌گر در لحظات از دست رفتن داده، بتواند وضعیت خودرو را به درستی پیش‌بینی کند.

**در سطح فیلتر کالمن توسعه‌یافته:** به منظور ایجاد یک معیار مقایسه عادلانه، ماتریس‌های کوواریانس در فیلتر کالمن توسعه یافته نیز با مقادیر و منطقی کاملاً مشابه با تخمین‌گر افق لغزان تنظیم گردیده‌اند.

#### ۴-۲-۲- سناریوی اول: ارزیابی عملکرد در حضور نویز حسگرها و عدم تطابق مدل (بدون نقص شبکه)

هدف از این سناریو، بررسی عملکرد پایه و ایزوله شده ساختارهای کنترلی در برابر چالش‌های فیزیکی و عدم قطعیت‌های میدانی است. بدین منظور، مدل پیچیده چهارچرخ (Twin-Track) مجهز به تایرهای غیرخطی پژکا به عنوان سیستم واقعی (Plant Simulator) در نظر گرفته شده است تا عدم تطابق مدل (Plant-Model Mismatch) به چالش کشیده شود. سیگنال‌های دریافتی از سامانه موقعیت‌یاب جهانی (GPS)، سنسور نرخ چرخش (Yaw Rate) (Sensor) و سنسور سرعت چرخ (WSS) به نویز سفید گوسی آلوده

(Sensor) و سنسور سرعت چرخ (WSS)، نویز سفید گوسی با انحراف معیار ۰.۰۵ متر به داده‌های موقعیت (x, y) و انحراف معیار ۰.۰۱ رادیان بر ثانیه به داده‌های نرخ چرخش ( $\dot{\psi}$ ) و انحراف معیار ۰.۰۲ متر بر ثانیه به داده‌های سرعت طولی اضافه شده است.

**از دست رفتن داده (Packet Loss):** پدیده از دست رفتن داده‌ها در کانال مخابراتی با استفاده از توزیع برنولی با احتمال وقوع  $p=0.2$  (۲۰ درصد) مدل‌سازی شده است. در لحظات وقوع قطعی، کنترل‌کننده هیچ داده جدیدی دریافت نمی‌کند و بر تخمین مدل داخلی تکیه دارد.

**تأخیر زمانی:** جهت مدل‌سازی تأخیرهای ناشی از انتقال داده در شبکه و زمان پردازش اندازه‌گیری‌ها، یک تأخیر خالص معادل ۰/۱ ثانیه در اعمال سیگنال‌های کنترلی لحاظ شده است.

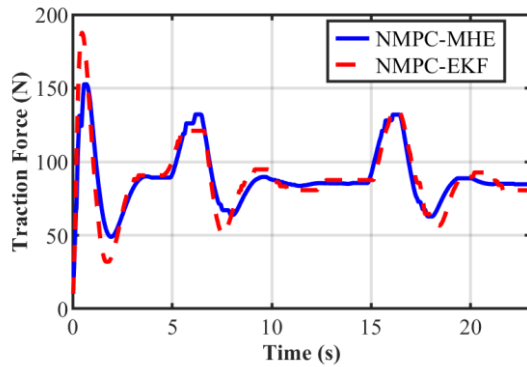
**دینامیک مدل نشده:** به منظور ارزیابی مقاومت ساختار کنترلی در برابر دینامیک‌های مدل نشده (Plant-Model Mismatch) در تمامی شبیه‌سازی از مدل پیچیده چهارچرخ (Twin-Track) مجهز به تایرهای غیرخطی پژکا به عنوان سیستم واقعی (Plant) استفاده شده است. همچنین سرعت طولی مبنا  $V_x = 30$  متر بر ثانیه (۱۰۸ کیلومتر بر ساعت) تنظیم گردیده است. انتخاب این سرعت بالا عامدانه بوده تا تایرها در مانور تغییر خط شدید، وارد ناحیه به شدت غیرخطی و اشباع خود شوند. ترکیب این شرایط حدی فیزیکی با چالش‌های شبکه، سختگیرانه‌ترین سناریو برای ارزیابی پایداری سیستم فراهم می‌کند.

#### ۴-۲-۳- پیاده‌سازی و ارزیابی عملکرد کنترلر

در این بخش، عملکرد ساختار یکپارچه پیشنهادی پیش بین مدل غیرخطی و تخمین‌گر افق لغزان در مقایسه با ساختار رایج صنعتی مبتنی بر فیلتر کالمن توسعه‌یافته و کنترلر پیش بین مدل غیرخطی در سناریوی تعویض خط دوگانه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. هدف از این شبیه‌سازی، نه تنها سنجش دقت تعقیب مسیر، بلکه ارزیابی مقاومت سیستم در حضور ترکیبی از اغتشاشات واقعی مخابراتی، نویز اندازه‌گیری و عدم قطعیت‌های مدل‌سازی (Plant-Model Mismatch) است. جهت ارزیابی دقیق، دو سناریوی شبیه‌سازی متفاوت طراحی شده است. هدف از تفکیک این سناریوها، تمایز قائل شدن میان اثرات ناشی از عدم قطعیت‌های فیزیکی و اندازه‌گیری و نقص در بستر انتقال داده (شبکه) می‌باشد. در تمامی آزمون‌ها، خودرو مانور تعویض خط دوگانه (Double Lane Change) را بر روی مسیری با اصطکاک استاندارد طی می‌کند. به منظور شبیه‌سازی شرایط واقعی، چالش‌های زیر در حلقه کنترلی اعمال شده است:

**سرعت خودرو:** سرعت اولیه خودرو ۳۰ متر بر ثانیه (۱۰۸ کیلومتر بر ساعت) در نظر گرفته شده است تا تایرهای مدل سیستم واقعی (Plant) وارد ناحیه غیرخطی شوند.

**نرخ نمونه برداری:** سیستم با گام زمانی  $T_s = 0.02$  ثانیه گسسته‌سازی شده است.

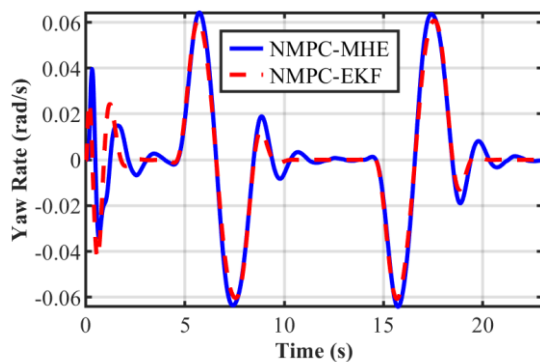


**شکل ۸** مقایسه سیگنال کنترلی نیروی کشش طولی اعمال شده به خودرو در طول مانور تغییر خط دوگانه در سناریوی اول  
**Fig. 8** Comparison of the longitudinal traction force control signal applied to the vehicle during the double lane change maneuver in Scenario 1

سازی، سیگنال های کنترلی هموارتری تولید کرده و خطای ردیابی کمتری نسبت به ساختار مبتنی بر فیلتر کالمن از خود نشان می‌دهد. شکل ۹ و ۱۰ مقایسه نرخ چرخش خودرو و زاویه یاو خودرو در طول مانور تغییر خط دوگانه برای کنترلر بر پایه تخمین‌گر افق لغزان و فیلتر کالمن توسعه یافته را نشان می‌دهد.

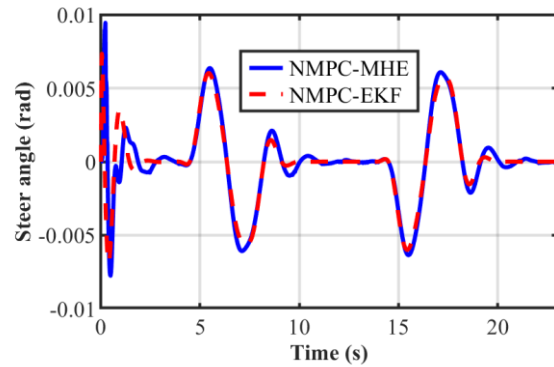
#### ۴-۲-۳- سناریوی دوم: ارزیابی عملکرد در شرایط واقعی و بحرانی (نقص شبکه توام با نویز و عدم قطعیت مدل)

این سناریو بیانگر چالش برانگیزترین و نزدیک ترین حالت به شرایط محیطی و شبکه ای واقعی است. در این آزمون، علاوه بر عدم تطابق مدل (استفاده از مدل چهارچرخ غیرخطی) و نویز حسگرها که در سناریوی اول بررسی شد، اختلالات شبکه شامل تاخیر در دریافت اطلاعات و از دست رفتن داده‌ها نیز به حلقه کنترلی اضافه شده اند. به طور مشخص، تاخیر زمانی معادل ۱۰۰ میلی ثانیه و قطعی تصادفی داده‌ها با نرخ ۲۰ درصد به اطلاعات دریافتی از سنسورها اعمال گردیده است. ترکیب عدم قطعیت شبکه با شرایط حدی فیزیکی (سرعت ۳۰ متر بر ثانیه و اشباع



**شکل ۱۰** مقایسه نرخ چرخش خودرو در طول مانور تغییر خط دوگانه در سناریوی اول

**Fig. 10** Comparison of the vehicle yaw rate during the double lane change maneuver in Scenario 1

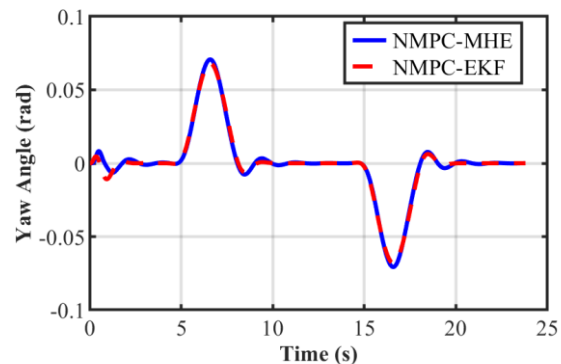


**شکل ۷** مقایسه سیگنال کنترلی زاویه فرمان در طول مانور تعویض خط دوگانه در سناریوی اول (در حضور نویز حسگرها و عدم تطابق مدل)  
**Fig. 7** Comparison of the steering angle control signal during the double lane change maneuver in Scenario 1 (in the presence of sensor noise and plant-model mismatch)

شده‌اند. در این سناریو فرض بر این است که بستر ارتباطی شبکه کاملاً ایده آل بوده و هیچ گونه تاخیر زمانی یا از دست رفتن داده وجود ندارد.

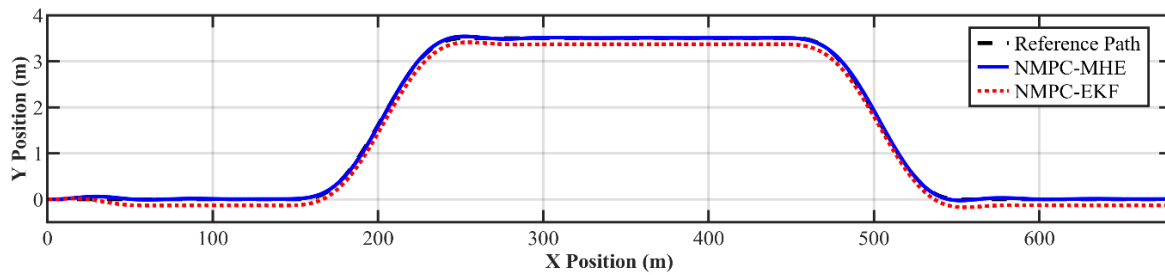
طراحی این سناریو ثابت می‌کند که فیلتر کالمن توسعه یافته (EKF) به عنوان معیار مقایسه، به درستی طراحی و تنظیم شده است و در غیاب تاخیر و از دست رفتن داده شبکه، توانایی مدیریت دینامیک به شدت غیرخطی خودرو در سرعت ۳۰ متر بر ثانیه (۱۰۸ کیلومتر بر ساعت) را دارد.

شکل ۷ و شکل ۸ سیگنال های کنترلی زاویه فرمان و نیروی کشش را در طول مانور تعویض خط دوگانه نشان می‌دهند. همچنین عملکرد تعقیب مسیر خودرو در مانور تغییر خط برای هر دو کنترلر در شکل ۱۱ قابل مشاهده است. نتایج نشان می‌دهد که در شرایط شبکه ایده آل، هر دو ساختار یکپارچه NMPC-MHE و NMPC-EKF قادرند بر نویز حسگرها و عدم تطابق مدل غلبه کرده و مانور را با پایداری کامل به پایان برسانند. با این وجود، روش مبتنی بر تخمین‌گر افق لغزان به دلیل استفاده از یک پنجره زمانی از داده های گذشته و در نظر گرفتن صریح قیود فیزیکی در فرآیند بهینه



**شکل ۹** مقایسه زاویه یاو خودرو در طول مانور تغییر خط دوگانه در سناریوی اول

**Fig. 9** Comparison of the vehicle yaw angle during the double lane change maneuver in Scenario 1



شکل ۱۱ عملکرد تعقیب مسیر خودرو در طول مانور تعویض خط دوگانه در سناریوی اول (در حضور نویز حسگرها و عدم تطابق مدل)  
 Fig. 11 Path tracking performance of the vehicle during the double lane change maneuver in Scenario 1 (in the presence of sensor noise and plant-model mismatch)

مربوط به روش مبتنی بر فیلتر کالمن توسعه یافته نوسانات شدید و فرکانس بالایی را نشان می دهد که به معنای از دست رفتن چسبندگی تایرها و خطر اسپین شدن (Spin-out) خودرو است. اما کنترلر مبتنی بر تخمین گر افق لغزان موفق شده است علیرغم قطعی داده ها و تاخیر شبکه، نرخ چرخش را به شکلی کاملاً هموار و ایمن کنترل کند. عدم وجود نوسانات شدید در این نمودار، تاییدکننده مقاومت (Robustness) بالای سیستم پیشنهادی در حفظ پایداری جانبی خودرو است.

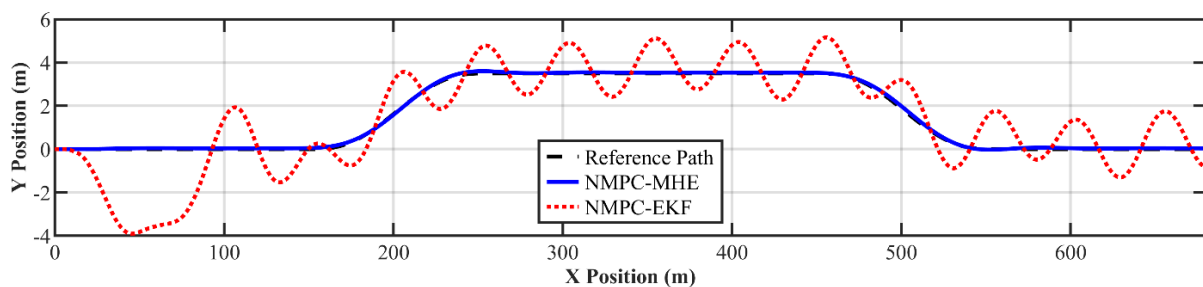
همان طور که در شکل ۱۳ (ب) مشاهده می شود، سیگنال کنترلی زاویه فرمان در ساختار مبتنی بر فیلتر کالمن توسعه یافته دچار نوسانات شدید شده و به طور مداوم با سقف و کف قیود فیزیکی تعریف شده (مثبت و منفی ۵ درجه) برخورد می کند. انتخاب این بازه ی محدود برای قید زاویه فرمان، یک انتخاب کاملاً فیزیکی و مبتنی بر شرایط ایمنی در سرعت بالا (۳۰ متر بر ثانیه یا ۱۰۸ کیلومتر بر ساعت) است. بر اساس مدل غیرخطی تایر پژو، در چنین سرعت های بالایی اعمال زاویه فرمانی بزرگتر از ۵ درجه، تایرها را به سرعت وارد ناحیه اشباع غیرخطی کرده و منجر به از دست رفتن کامل چسبندگی جانبی و پدیده اسپین شدن (Spin-out) خودرو می گردد. شایان ذکر است که ناپایداری و واگرایی مشاهده شده در روش فیلتر کالمن توسعه یافته، ناشی از محدود بودن قید زاویه فرمان نیست، بلکه ریشه در خطای انباشته ی تخمین حالت در لحظات قطعی داده ها دارد. بررسی های تکمیلی نشان می دهد که حتی با بازتر در نظر گرفتن قیود فرمان (به عنوان مثال  $\pm 15$  درجه)، ساختار فیلتر کالمن توسعه یافته همچنان دچار واگرایی ریاضی می گردد، با این تفاوت که در آن حالت، خودرو بسیار سریع تر دچار ناپایداری

تایرها)، عدم تطابق مدل، بستری فوق العاده سخت گیرانه برای ارزیابی پایداری سیستم فراهم می کند.

حضور همزمان نویز، تاخیر و ریزش داده، چالشی اساسی برای الگوریتم های تخمین حالت ایجاد می کند. نتایج شبیه سازی این سناریو به وضوح تفاوت ساختاری و برتری روش تخمین افق لغزان را نسبت به فیلتر کالمن توسعه یافته نشان می دهد. همان طور که در شکل ۱۲ مشاهده می شود، فیلتر کالمن توسعه یافته به دلیل ماهیت بدون حافظه خود، در لحظات قطعی متوالی داده ها توانایی اصلاح خطای تخمین را از دست می دهد. در این شرایط، تخمین فیلتر کالمن توسعه یافته از وضعیت خودرو تنها بر اساس مدل پیش بین حلقه باز انجام می شود که این امر در ترکیب با دینامیک به شدت غیرخطی خودرو، منجر به تولید سیگنال های کنترلی نامعتبر توسط کنترلر پیش بین مدل غیرخطی شده و در نهایت خودرو به طور کامل از مسیر مرجع منحرف و ناپایدار می گردد.

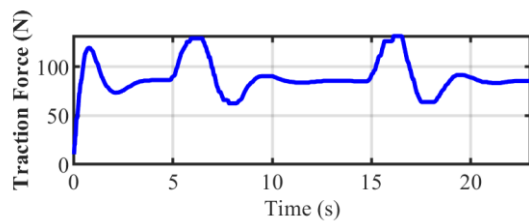
در نقطه مقابل، ساختار یکپارچه کنترل پیش بین مدل غیرخطی و تخمین گر افق لغزان توانسته است پایداری سیستم و دقت ردیابی را به طور کامل حفظ نماید. در زمان وقوع قطعی ارتباط (Packet Loss)، تخمین گر افق لغزان با بهره گیری از حافظه لغزان خود و استفاده از اطلاعات ثبت شده در افق گذشته، شکاف های اطلاعاتی را با دقت بالایی جبران می کند. تنظیمات ماتریس کوواریانس R باعث می شود تا حل گر بهینه سازی در لحظات کوری سنسور، اتکای خود را به درستی تنظیم نماید.

برای تحلیل دقیق تر پایداری جانبی، تغییرات نرخ چرخش (Yaw Rate) خودرو برای هر دو کنترلر در شکل ۱۶ رسم شده است. نمودار

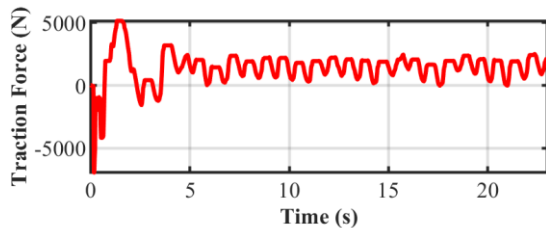


شکل ۱۲ مقایسه عملکرد ردیابی مسیر در سناریوی دوم (در حضور تاخیر زمانی و قطعی داده شبکه): پایداری و دقت روش MHE در برابر انحراف شدید و ناپایداری روش EKF از مسیر مرجع

Fig. 12 Comparison of path tracking performance in Scenario 2 (in the presence of time delay and network data loss): stability and accuracy of the MHE method versus severe deviation and instability of the EKF method from the reference path



(الف)



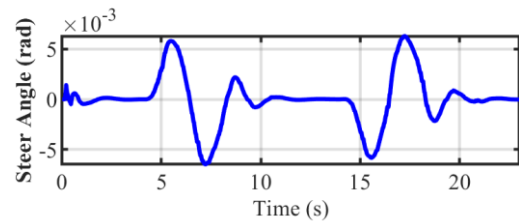
(ب)

**شکل ۱۴** مقایسه سیگنال کنترلی نیروی کشش در سناریوی دوم (در حضور تاخیر زمانی و قطعی داده شبکه): (الف) عملکرد پایدار کنترلر NMPC-MHE، (ب) واگرایی و نوسانات شدید در کنترلر NMPC-EKF

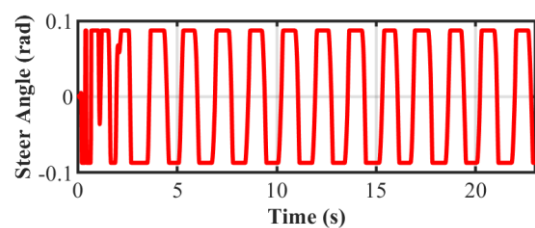
**Fig. 14** Comparison of the traction force control signal in Scenario 2 (in the presence of time delay and network data loss): (a) Stable performance of the NMPC-MHE controller, (b) Divergence and severe chattering in the NMPC-EKF controller

با ورود به سناریوی دوم و اعمال تاخیر زمانی ۱۰۰ میلی ثانیه ای توام با ریزش ۲۰ درصدی بسته های داده، تفاوت پایداری (Robustness) دو سیستم به شکلی چشمگیر نمایان می شود. همان طور که در جدول ۲ مشاهده می گردد، عملکرد فیلتر کالمن توسعه یافته در تقابل با این عدم قطعیت های شبکه ای کاملاً دچار فروپاشی شده است، به طوری که خطای جذر میانگین مربعات آن به ۱.۳ متر جهش کرده و ماکزیمم خطای جانبی به مقدار بحرانی ۳.۹ متر رسیده است. با توجه به ابعاد عرضی جاده و سرعت بالای مانور (۳۰ متر بر ثانیه)، خطای جانبی ۳.۹ متری در شرایط فیزیکی به معنای انحراف کامل خودرو از مسیر مرجع، خروج از جاده و وقوع واژگونی یا ناپایداری مطلق است.

در نقطه مقابل، ساختار کنترل پیش بین غیرخطی مبتنی بر تخمین گرافق لغزان توانسته است با وجود این اختلالات شدید مخابراتی، پایداری خود را به طور کامل حفظ نموده و افزایش خطای بسیار ناچیزی را نسبت به حالت ایده آل تجربه کند. در این شرایط بسیار سخت، ماکزیمم خطای جانبی روش پیشنهادی تنها ۰.۱ متر و خطای RMSE آن ۰.۰۴۴ متر ثبت شده است که همچنان در محدوده ای کاملاً ایمن و استاندارد برای رانندگی خودکار قرار دارد. حفظ این خطاهای میلی متری در برابر خطاهای چند متری و واگرایی روش رقیب، برتری مطلق و پایداری تضمین شده الگوریتم پیشنهادی را در مواجهه با چالش های سیستم های کنترل تحت شبکه به اثبات می رساند.



(الف)



(ب)

**شکل ۱۳** مقایسه سیگنال کنترلی زاویه فرمان در سناریوی دوم (در حضور تاخیر زمانی و قطعی داده شبکه): (الف) عملکرد پایدار کنترلر NMPC-MHE، (ب) واگرایی و نوسانات شدید در کنترلر NMPC-EKF

**Fig. 13** Comparison of the steering angle control signal in Scenario 2 (in the presence of time delay and network data loss): (a) Stable performance of the NMPC-MHE controller, (b) Divergence and severe chattering in the NMPC-EKF controller

فیزیکی و واژگونی خواهد شد. در مقابل، الگوریتم یکپارچه کنترل پیش بین مدل غیرخطی و تخمین گرافق لغزان توانسته است بدون درگیری با قیود اشباع، مانور را با سیگنالی کاملاً هموار در محدوده مجاز و ایمن فیزیکی به پایان برساند.

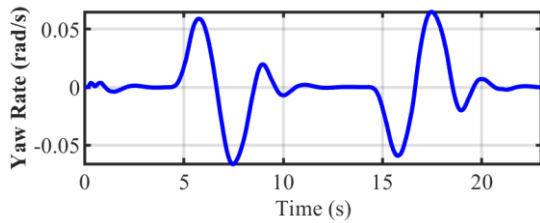
#### ۴-۲-۴- ارزیابی کمی و مقایسه عملکرد سیستم

به منظور ارزیابی دقیق تر و مقایسه عددی عملکرد دو ساختار کنترلی، مقادیر خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) و ماکزیمم خطای موقعیت جانبی خودرو برای هر دو سناریو استخراج شده و در جدول ۲ ارائه گردیده است. نتایج کمی به دست آمده، تحلیل های کیفی پیشین را کاملاً تایید می کند. در سناریوی اول (شرایط ایده آل شبکه ارتباطی)، اگرچه هر دو روش مبتنی بر MHE و EKF توانسته اند مانور را با موفقیت به پایان برسانند، اما دقت ساختار یکپارچه کنترل پیش بین مدل غیرخطی و تخمین گرافق لغزان به وضوح بالاتر است. بر اساس داده های جدول، استفاده از تخمین گرافق لغزان توانسته است خطای RMSE را از ۰.۱۲۸ متر (در روش EKF) به ۰.۰۱۸ متر و ماکزیمم خطای انحراف را از ۰.۱۷ متر (در روش EKF) به ۰.۰۶ متر کاهش دهد. این اختلاف دقت، نشان دهنده تاثیر مثبت لحاظ کردن قیود فیزیکی و استفاده از یک پنجره زمانی برای بهینه سازی در الگوریتم تخمین گرافق لغزان است.

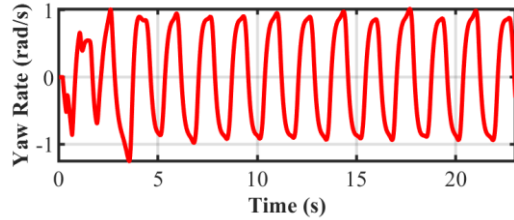
**جدول ۲** مقایسه کمی عملکرد تعقیب مسیر در سناریوهای شبیه سازی اول و دوم

**Table 2.** Quantitative comparison of path tracking performance in simulation scenarios 1 and 2

	Scenario 1 (NMPC-MHE)	Scenario 1 (NMPC-EKF)	Scenario 2 (NMPC-MHE)	Scenario 2 (NMPC-EKF)
<b>Lateral Error RMSE (m)</b>	۰٫۰۱۸	۰٫۱۲۸	۰٫۰۴۴	۱٫۳
<b>Max Error (m)</b>	۰٫۰۶	۰٫۱۷	۰٫۱	۳٫۹



(الف)



(ب)

**شکل ۱۶** مقایسه نرخ چرخش خودرو در سناریوی دوم (در حضور تاخیر زمانی و قطعی داده شبکه): (الف) عملکرد پایدار کنترلر NMPC-MHE، (ب) واگرایی و از دست رفتن پایداری جانبی در کنترلر NMPC-EKF

**Fig. 16** Comparison of the vehicle yaw rate in Scenario 2 (in the presence of time delay and network data loss): (a) Stable performance of the NMPC-MHE controller, (b) Divergence and loss of lateral stability in the NMPC-EKF controller.

ناپایداری مطلق شد، استراتژی کنترل پیش‌بین مدل غیرخطی و تخمین‌گر افق لغزان توانست مانور را با خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) تنها ۰/۰۴۴ متر و ماکزیمم خطای جانبی ۰/۱ متر به پایان برساند. این دقت بالا، تضمین‌کننده ایمنی و جلوگیری از فراجش‌های خطرناک در شرایط عملیاتی واقعی است.

**کارایی محاسباتی:** پیاده‌سازی این چارچوب با استفاده از الگوریتم برنامه ریزی درجه دوم متوالی و انتخاب بهینه افق‌های پیش‌بین و تخمین، تعادل بسیار مطلوبی میان حجم محاسبات و دقت کنترل ایجاد کرد که پیاده‌سازی بلادرنگ (Real-time) آن را توجیه پذیر می‌سازد.

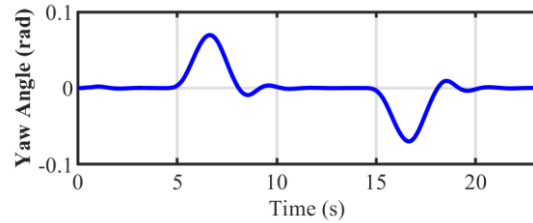
به طور خلاصه، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که چارچوب پیشنهادی کنترل پیش‌بین مدل غیرخطی و تخمین‌گر افق لغزان، راهکاری کاملاً قابل اطمینان و مقاوم برای کنترل وسایل نقلیه خودران در حضور اختلالات شدید مخابراتی است. برای تحقیقات آتی، پیاده‌سازی این الگوریتم بر روی بستر سخت‌افزار در حلقه (HIL) و بررسی عملکرد آن در سناریوی پویای اجتناب از برخورد با موانع متحرک پیشنهاد می‌گردد.

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

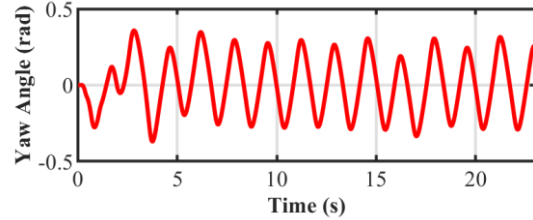
**تعارض منافع:** در این مقاله هیچ تعارض منافعی برای اظهار وجود ندارد.

## منابع

[1] S. Thrun et al., "Stanley: The robot that won the DARPA Grand Challenge," J. Field Robot., vol. 23, no. 9, pp. 661–692, 2006, DOI: 10.1002/rob.20147.



(الف)



(ب)

**شکل ۱۵** مقایسه زاویه یاء خودرو در سناریوی دوم (در حضور تاخیر زمانی و قطعی داده شبکه): (الف) عملکرد پایدار کنترلر NMPC-MHE، (ب) واگرایی و نوسانات شدید در کنترلر NMPC-EKF

**Fig. 15** Comparison of the vehicle yaw angle in Scenario 2 (in the presence of time delay and network data loss): (a) Stable performance of the NMPC-MHE controller, (b) Divergence and severe oscillations in the NMPC-EKF controller

## ۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک ساختار کنترلی یکپارچه و مقاوم مبتنی بر ادغام کنترل‌کننده پیش‌بین مدل غیرخطی و تخمین‌گر افق لغزان برای هدایت خودکار خودرو در شرایط عدم قطعیت توسعه داده شد. تمرکز اصلی این مطالعه بر حفظ پایداری جانبی در سرعت‌های بالا (۱۰۸ کیلومتر بر ساعت) در حضور عدم قطعیت مدل و غلبه بر چالش‌های سیستم‌های کنترل تحت شبکه از جمله نویز حسگرها، تاخیرهای زمانی و پدیده از دست رفتن داده (Packet Loss) قرار گرفت.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های گسترده در مانور استاندارد تغییر خط دوگانه، کارایی برتر روش پیشنهادی را در مقایسه با رویکرد سنتی مبتنی بر فیلتر کالمن توسعه یافته اثبات نمود. یافته‌های کلیدی این پژوهش عبارتند از:

**پایداری سیگنال‌های کنترلی و حذف نوسانات:** نتایج نشان داد که با اعمال تاخیر زمانی ۱۰۰ میلی‌ثانیه و ریزش ۲۰ درصدی داده‌ها، روش فیلتر کالمن توسعه یافته دچار واگرایی و نوسانات شدید در زاویه فرمان و نیروی کشش می‌گردد. در مقابل، ساختار یکپارچه تخمین‌گر افق لغزان با تکیه بر حافظه افق لغزان خود توانست این عدم قطعیت‌ها را خنثی کرده و سیگنال‌های کنترلی کاملاً هموار و در محدوده مجاز (بدون درگیری با قیود اشباع) تولید نماید که این امر موجب کاهش چشمگیر تنش‌های مکانیکی بر عملگرها می‌شود.

**پایداری جانبی و دقت ردیابی:** ارزیابی‌های کمی ثابت کرد که لایه تخمین پیشنهادی از مقاومت مناسب برخوردار است. در شرایط بحرانی شبکه، در حالی که روش فیلتر کالمن توسعه یافته با ثبت خطای ماکزیمم ۳/۹ متری منجر به خروج کامل خودرو از جاده و

- [15] R. Rajamani, *Vehicle dynamics and control*. in Mechanical engineering series. New York: Springer Science + Business Media, 2005.
- [16] R. N. Jazar, *Vehicle Dynamics*. Cham: Springer International Publishing, 2017. DOI: [10.1007/978-3-319-53441-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-53441-1).
- [17] H. B. Pacejka, *Tire and Vehicle Dynamics*, 3rd ed. Oxford, UK: Elsevier, 2012. DOI: [10.1016/C2010-0-66481-2](https://doi.org/10.1016/C2010-0-66481-2).
- [18] A. Alessandri, M. Baglietto, and G. Battistelli, "Moving-horizon state estimation for nonlinear discrete-time systems: New stability results and approximation schemes," *Automatica*, vol. 44, no. 7, pp. 1753-1765, Jul. 2008. DOI: [10.1016/j.automatica.2007.11.020](https://doi.org/10.1016/j.automatica.2007.11.020).
- [19] L. Grüne and J. Pannek, *Nonlinear Model Predictive Control*. in Communications and Control Engineering. Cham: Springer International Publishing, 2017. DOI: [10.1007/978-3-319-46024-6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-46024-6).
- [20] D. Simon, *Optimal State Estimation: Kalman, H-Infinity and Nonlinear Approaches*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2006. DOI: [10.1002/0470045345](https://doi.org/10.1002/0470045345).
- [2] D. S. Lal, A. Vivek, and G. Selvaraj, "Lateral control of an autonomous vehicle based on Pure Pursuit algorithm," in 2017 International Conference on Technological Advancements in Power and Energy (TAP Energy), Dec. 2017, pp. 1-8. DOI: [10.1109/TAPENERGY.2017.8397361](https://doi.org/10.1109/TAPENERGY.2017.8397361).
- [3] K. M. Junaid and S. Wang, "Autonomous Vehicle Following-Performance Comparison and Proposition of a Quasi-Linear Controller," *Inf. Technol. Control*, vol. 36, no. 4, Dec. 2007, Accessed: Dec. 19, 2025. [Online]. Available: <https://itc.ktu.lt/index.php/ITC/article/view/11891>
- [4] H. Sazgar, Sh. Azadi, and R. Kazemi, "Trajectory planning and integrated control with the Nonlinear Bicycle Model for high-speed autonomous lane change," *Modares Mechanical Engineering Journal*, vol. 18, no. 2, pp. 103-114, Mar. 2018. (in persian)
- [5] H. Sazgar and A. K. Khalaji, "Motion Planning in Critical Lane Change Maneuvers Considering the Stability Margins of the Vehicle," *Modares Mechanical Engineering Journal*, vol. 24, no. 4, pp. 225-238, Aug. 2024. (in persian)
- [6] P. Falcone, F. Borrelli, J. Asgari, H. E. Tseng, and D. Hrovat, "Predictive Active Steering Control for Autonomous Vehicle Systems," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 15, no. 3, pp. 566-580, May 2007, DOI: [10.1109/TCST.2007.894653](https://doi.org/10.1109/TCST.2007.894653).
- [7] J. P. Allamaa, P. Listov, H. V. der Auweraer, C. Jones, and T. D. Son, "Real-time Nonlinear MPC Strategy with Full Vehicle Validation for Autonomous Driving," May 27, 2022, arXiv: [arXiv:2110.03349](https://arxiv.org/abs/2110.03349). DOI: [10.48550/arXiv.2110.03349](https://doi.org/10.48550/arXiv.2110.03349).
- [8] M. A. Ghomashi and R. Kazemi, "Motion Path Following Coordinated Control for In-Wheel Motor Electric Vehicle via Implementation Robust Control and Optimal Control," *Journal of Modeling in Engineering*, vol. 23, no. 80, pp. 131-145, Mar. 2025, DOI: [10.22075/jme.2024.31752.2531](https://doi.org/10.22075/jme.2024.31752.2531). (in persian)
- [9] M. Fazel and M. Yazdanpanah, "Using Integrated Predictive Model Control in the Simulation of Stability and Traction Control of an Electric Vehicle," *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, vol. 57, no. 5, pp. 611-632, Jul. 2025, DOI: [10.22060/mej.2025.24465.7872](https://doi.org/10.22060/mej.2025.24465.7872). (in persian)
- [10] T. Kim, T.-H. Park, T. Kim, and T.-H. Park, "Extended Kalman Filter (EKF) Design for Vehicle Position Tracking Using Reliability Function of Radar and Lidar," *Sensors*, vol. 20, no. 15, July 2020, DOI: [10.3390/s20154126](https://doi.org/10.3390/s20154126).
- [11] E. Kayacan, W. Saeys, H. Ramon, C. Belta, and J. M. Peschel, "Experimental Validation of Linear and Nonlinear MPC on an Articulated Unmanned Ground Vehicle," *IEEEASME Trans. Mechatron.*, vol. 23, no. 5, pp. 2023-2030, Oct. 2018, DOI: [10.1109/TMECH.2018.2854877](https://doi.org/10.1109/TMECH.2018.2854877).
- [12] Y. Kebbati, A. Rauh, N. Ait-Oufroukh, D. Ichalal, and V. Vigneron, "Learning-based model predictive control with moving horizon state estimation for autonomous racing," *Int. J. Control*, vol. 98, no. 7, pp. 1542-1552, July 2025, DOI: [10.1080/00207179.2024.2409305](https://doi.org/10.1080/00207179.2024.2409305).
- [13] S. Niu, R. Zhang, B. Ren, B. Gao, Y. Ge, and L. Xiong, "Integrated AISGP Model for Real-Time Autonomous Vehicle State Estimation and Path Tracking Control," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, pp. 1-15, 2025, DOI: [10.1109/TVT.2025.3606541](https://doi.org/10.1109/TVT.2025.3606541).
- [14] A. E. S. Morando et al., "Optimizing Unmanned Air-Ground Vehicle Maneuvers Using Nonlinear Model Predictive Control and Moving Horizon Estimation," *Automation*, vol. 5, no. 3, pp. 324-342, July 2024, DOI: [10.3390/automation5030020](https://doi.org/10.3390/automation5030020).