

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

زهرا آهنگری سیسی^۱، مهدی میرزایی^{*} صدرا رفعت نیا^۱

۱- مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران.

چکیده

در این مقاله به طراحی و پیاده سازی 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 متغیرهای حالت جدید به سیستم اضافه شده و با استفاده از داده های مربوط به جابجایی های جرم معلق و غیرمعلق تخمین زده می شوند. در ادامه به طراحی یک فیلتر کالمن غیرخطی با ورودی نامعلوم جهت مقایسه با رویت گر حالت توسعه یافته پرداخته می شود. نتایج 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 باشد. ضمن اینکه ساختار این رویت گر در مقایسه با فیلتر کالمن با ورودی نامعلوم ساده تر بوده و تنظیم آن راحت تر است و از تعداد خروجی های کمتری استفاده می کند. هر یک از رویت گرهای طراحی شده در ساختار یک سیستم کنترل تعلیق فعال با کنترل کننده بهینه غیرخطی استفاده می شود تا اهداف سیستم تعلیق را برآورده نماید. نتایج شبیه سازی ها به صورت نرم افزار در حلقه در محیط متلب/آدامز، عملکرد مناسب تر کنترل کننده با رویت گر حالت توسعه یافته را نشان می دهند.

کلمات کلیدی

سیستم تعلیق خودرو، ورودی نامعلوم جاده، رویت گر حالت توسعه یافته، فیلتر کالمن با ورودی نامعلوم، کنترل بهینه غیرخطی.

* mirzaei@sut.ac.ir

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، شتابگیری و یا فرمان‌پذیری بهتر توسعه یافته‌اند [۱]. نیازها و تقاضاها از یک سو و فضای رقابتی بین تولیدکنندگان خودرو از سوی دیگر باعث ظهور تکنولوژی‌های مبتنی بر بهینه‌سازی و کنترل دینامیک خودرو در جهت افزایش ایمنی، قابلیت اعتماد و همچنین راحتی هرچه بیشتر 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 حالت واقعی، اصطکاک در قسمت‌های مختلف سیستم، تعیین زاویای نصب اجزا، و همچنین تغییرات پارامترهای سیستم مانند تغییر جرم معلق در شرایط مختلف از عوامل مهم در عدم دقت مدل‌های ریاضی از پیش تعیین شده برای سیستم تعلیق می‌باشد. ضمن اینکه اغتشاشات وارد به سیستم از طرف جاده نیز غیر قابل پیش‌بینی 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 عدم قطعیت‌ها و تخمین ورودی جاده، می‌توان از الگوریتم‌های تخمین بر اساس اطلاعات حسگرها استفاده کرد. به منظور دسترسی به داده‌های ورودی جاده عموماً 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 پروفیلوگراف^۱ 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 ناهمواری‌ها 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 اندازه‌گیری می‌شوند و از مدل خطی سیستم تعلیق برای پیاده‌سازی الگوریتم استفاده می‌شود. در مرجع [۱۰] 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^۲ 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 فرایچه^۳ 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 عدم قطعیت‌های مدل مورد بررسی قرار نمی‌گرفتند. 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 اندازه‌گیری 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 مناسبی در تخمین ورودی‌های جاده و

¹ Profilograph

² Adaptive neuro fuzzy interface system (ANFIS)

³ Super twisting

پارامترهای سیستم ارائه می‌دهد، ولی عملکرد این روش کاملا وابسته به انتخاب خروجی‌های مناسب و تنظیم دقیق پارامترهای تخمین زن است. در این روش به دلیل خطاهای موجود در شتاب‌های جرم معلق و غیرمعلق که عمدتاً ناشی از بایاس حسگرهای اینرسی هستند، ماتریس کواریانس نوین اندازه‌گیری به گونه‌ای انتخاب می‌شود که تمرکز تخمین زن 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 رویت‌گر حالت توسعه‌یافته برای تخمین عدم قطعیت‌های مدل سیستم تعلیق یکی دیگر از روش‌های ارائه شده در مراجع می‌باشد. در این روش عدم قطعیت‌های مدل به عنوان یک متغیر حالت اضافی در نظر گرفته شده و متغیرهای حالت سیستم در کنار عدم قطعیت‌های مدل تخمین زده می‌شوند. در مرجع [۱۵] از این روش در تخمین عدم قطعیت‌های عملگر الکتروهایدرولیکی سیستم تعلیق خودرو استفاده شده است. در مرجع [۱۶] از رویت‌گر حالت توسعه‌یافته برای تخمین عدم قطعیت‌ها در سیستم تعلیق یک چهار خودرو استفاده شده است. در این روش از جابجایی جرم معلق به عنوان خروجی سیستم استفاده شده و هدف، تخمین جرم معلق در دینامیک سیستم است. تخمین یکپارچه عدم قطعیت‌های مدل در سیستم تعلیق یک چهارم خودرو [۱۷]، نصف خودرو [۱۸، ۱۹] و تمام خودرو [۲۰، ۲۱] از دیگر موارد استفاده از رویت‌گر حالت توسعه‌یافته هستند. در تمامی مراجع بالا، تخمین یکپارچه عدم قطعیت‌های مدل مورد بررسی قرار گرفته و به تخمین همزمان ورودی جاده پرداخته نشده است. حال آن که یکی از چالش‌های موجود در بخش کنترل سیستم تعلیق، می‌توان به ورودی ناشی از ناهمواری جاده اشاره کرد که به عنوان اغتشاش و ورودی نامعلوم در نظر گرفته می‌شود. وجود ورودی نامعلوم از یک سو طراحی رویت‌گر را با مشکل مواجه می‌سازد و باعث افزایش خطای تخمین می‌شود و از سوی دیگر با توجه به اینکه کنترل کننده 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 رویت‌گر طراحی شده می‌بایست بتواند دینامیک دقیق و ناهمواری جاده به عنوان ورودی نامعلوم را بصورت همزمان تخمین بزند.

در این پژوهش برای تخمین همزمان ورودی جاده و عدم قطعیت‌های مدل سیستم تعلیق خودرو، ابتدا از یک رویت‌گر حالت توسعه یافته استفاده می‌شود. رویت‌گر پیشنهادی از اطلاعات مربوط به جابجایی جرم معلق و غیرمعلق، جهت تخمین عدم قطعیت‌های مدل و ورودی جاده استفاده می‌کند. 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 میان‌گذر با فرکانس قطع مناسب، خروجی‌های مورد نیاز رویت‌گر بدست می‌آید. در ادامه تحلیل و استخراج معادلات رویت‌گر و ارائه ضرایب وزنی رؤیت‌گر بررسی شده و پایداری ورودی-محدود، خروجی-محدود رویت‌گر در حضور عدم قطعیت‌های مدل و ورودی‌های جاده ارائه می‌شود. در نهایت با تخمین همزمان عدم قطعیت‌های مدل و ورودی‌های جاده، مدل اولیه‌ی به‌روز شده‌ای در هر لحظه بدست می‌آید و متغیرهای حالت سیستم محاسبه می‌شوند. جهت بررسی الگوریتم تخمین ارائه شده در محیط واقعی، از تست‌های عملی برای سیستم تعلیق با مکانیزم مک‌فرسون استفاده می‌شود. در این راستا، پس از ساخت و حسگربندی یک مدل آزمایشگاهی از سیستم تعلیق یک چهارم خودرو در مقیاس واقعی، به پیاده‌سازی عملی رویت‌گر پرداخته می‌شود. شایان ذکر است که در این روش، تنها داده‌های خروجی از شتاب‌سنج‌های جرم معلق و غیرمعلق استفاده می‌گردد و از داده‌های حسگرهای جابجایی نصب شده بر روی سامانه آزمایشگاهی بدلیل عدم امکان استفاده از آن‌ها در خودروی واقعی در حال حرکت، صرفاً در جهت صحت‌گذاری داده‌ها و ارزیابی عملکرد رویت‌گر استفاده می‌شود. در این سامانه، در جهت ارزیابی عملکرد رویت‌گر پیشنهادی در طیف گسترده‌ای از اغتشاشات خارجی، به تولید ورودی‌های جاده مختلف با استفاده از یک جک الکتروهایدرولیکی پرداخته می‌شود. 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 می‌شود. در این الگوریتم از مدل خطی سیستم تعلیق برای طراحی تخمین‌گر استفاده کرده‌اند. البته این نکته لازم به ذکر است، که در این مقاله برای افزایش دقت روش مقایسه‌ای، نسخه بهبودیافته این الگوریتم با استفاده از فیلتر کالمن توسعه‌یافته برای مدل غیرخطی سیستم تعلیق استفاده شده است.

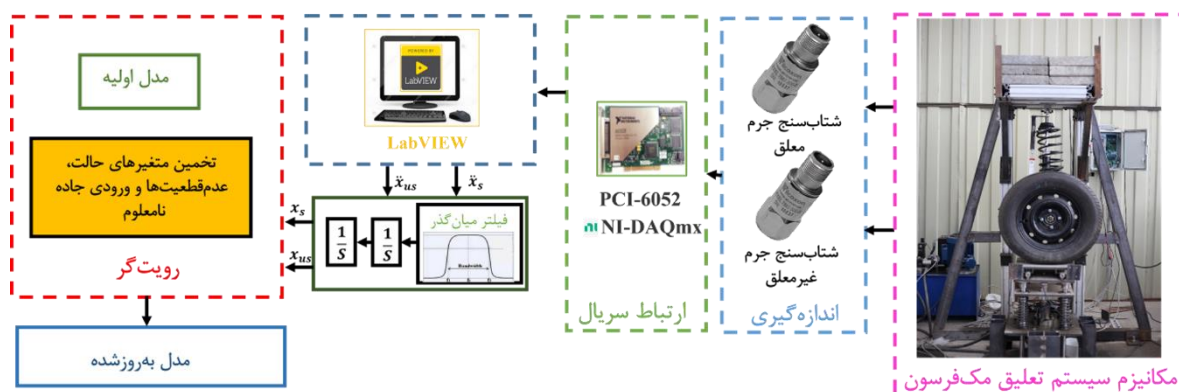
هدف اصلی سیستم تعلیق جداسازی بدنه خودرو و سرنشینان از ناهمواری‌های جاده است. از دیگر اهداف آن حفظ تماس تایر با جاده و نگه داشتن جابجایی تعلیق در محدوده عملکردی مناسب است. طراحی یک سیستم تعلیق مناسب جهت برآوردن اهداف متضاد سیستم تعلیق الزامی است. یک روش مناسب برای رسیدن به اهداف سیستم تعلیق در دامنه وسیعی 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 می شود. روش های 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 عدم قطعیت ها و ورودی نامعلوم جاده و دستیابی به مدل دینامیکی دقیقی از سیستم تعلیق یک چهارم خودرو، هر کدام از رویت گر ها در ساختار یک سیستم تعلیق فعال با یک کنترل کننده غیرخطی بهینه جهت برآوردن اهداف سیستم تعلیق بررسی خواهد شد. کنترل کننده از مدل غیرخطی سیستم تعلیق یک چهارم خودرو که توسط هر یک از رویت گر ها برورسانی 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 توسعه یافته برای تخمین عدم قطعیت ها و اغتشاشات خارجی توضیح داده شده و در بخش ۵ الگوریتم فیلتر کالمن توسعه یافته 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 می دهد. دستگاه آزمایش مورد استفاده، سیستم تعلیق یک چهارم خودرو براساس مکانیزم مک فرسون بوده و شامل ابعاد و المان های تعلیق یک خودروی سمند است. شتابسنج ها بر روی جرم معلق و غیرمعلق نصب شده اند تا شتاب های عمودی آن ها را اندازه گیری کنند. از یک کارت داده شرکت نشنال اینسترومنت^۱ برای دریافت داده های حسگرها استفاده می شود. شایان ذکر است، نرم افزار لیبویو^۲ به عنوان نرم افزار رابط بین دستگاه آزمایش و رایانه در نظر گرفته شده است. الگوریتم رویت گر پیشنهادی عدم قطعیت ها 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 دوبرار انتگرال گیری از داده های شتاب فیلتر شده 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.



شکل ۱ : ساختار کلی الگوریتم پیشنهادی

Fig.1. Overall structure of the proposed method

¹ National Instrument

² LabView

۳- مدل یک چهارم سیستم تعلیق خودرو

مدل یک چهارم 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:

$$\begin{aligned} m_{us} \ddot{x}_{us} &= f_s + f_d - f_{st} + u, \\ m_s \ddot{x}_s &= -f_s - f_d - u, \end{aligned} \quad (1)$$

که در آن m_{us} و m_s به ترتیب جرم معلق و جرم غیرمعلق را نشان می دهند. جابجایی جرم معلق و غیرمعلق، به ترتیب با x_{us} و x_s و نیروهای میراگر و فنر بین جرم معلق و غیرمعلق به ترتیب با f_s و f_d نمایش داده می شوند. u نیروی عملگر بوده و f_{st} نیروی تایر مدل شده به شکل فنر را نمایش می دهد. 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، $\Delta \dot{x} = \dot{x}_s - \dot{x}_{us}$ به شکل زیر محاسبه می شوند [۴]:

$$f_s = k_1 \Delta x + k_2 (\Delta x)^2 + k_3 (\Delta x)^3, \quad f_d = c_1 \Delta \dot{x} + c_2 (\Delta \dot{x})^2. \quad (2)$$

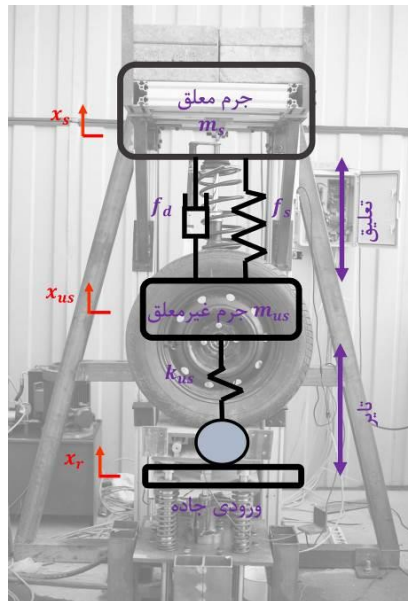
نشان دهنده ثوابت فنر و $c_{i(i=1,2)}$ ثوابت میرایی میراگر هستند. نیروی تایر نیز به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$f_{st} = k_{us} (x_{us} - x_r). \quad (3)$$

در معادله (۳)، k_{us} ضریب فنریت تایر و x_r ورودی جاده در نظر گرفته شده اند. 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:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = f_1 + \frac{1}{m_s} u. \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_3 = x_4, \\ \dot{x}_4 = f_2 + d_1 x_r - \frac{1}{m_{us}} u, \end{cases} \quad (5)$$



شکل ۲: مدل یک چهارم سیستم تعلیق خودرو.

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

که در آن $d_1 = k_{us} / m_{us}$ و متغیرهای حالت زیرسیستمها به شکل زیر در نظر گرفته می‌شوند:

$$[x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T = [x_s \ \dot{x}_s \ x_{us} \ \dot{x}_{us}]^T. \quad (6)$$

در معادله (۴) و معادله (۵)، توابع f_1 و f_2 مجموع تمام جمله‌های غیرخطی سیستم بوده و به شکل زیر تعریف می‌شوند:

$$f_1 = -\frac{1}{m_s} [f_s + f_d], \quad (7)$$

$$f_2 = \frac{1}{m_{us}} [f_s + f_d - k_{us} x_3]. \quad (8)$$

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

۴- طراحی رویت‌گر حالت توسعه‌یافته

در این بخش، برای دستیابی به مدل دینامیکی دقیق سیستم تعلیق خودرو و تخمین عدم قطعیت‌های مدل و ورودی‌های نامعلوم، رویت‌گر حالت توسعه‌یافته طراحی خواهد شد. با توجه به معادله (۴) و معادله (۵)، جمله‌هایی که شامل عدم قطعیتها و ورودی‌های نامعلوم هستند، به عنوان متغیرهای حالت اضافی در نظر گرفته شده و متغیرهای حالت جدید به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\xi_1 = [x_1 \ x_2 \ F_1]^T, \quad \xi_2 = [x_3 \ x_4 \ F_2]^T \quad (9)$$

که در آن $F_1 = f_1 + d_1 x_r$ و $F_2 = f_2 + d_2 x_r$ می‌باشد. بدین ترتیب مدل فضای حالت برای زیرسیستم‌های معادله (۱) با اضافه شدن متغیرهای حالت جدید به صورت زیر توسعه داده می‌شود:

$$(i=1,2) \begin{cases} \dot{\xi}_i = \mathbf{A}\xi_i + \mathbf{E}H_i + \mathbf{B}_i u, \\ \hat{\mathbf{y}}_i = \mathbf{C}\xi_i, \end{cases} \quad (10)$$

که در آن

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{E} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = [1 \ 0 \ 0], \quad (11)$$

و $H_{i(i=1,2)} = \dot{F}_{i(i=1,2)}$ نرخ تغییر عدم قطعیتها بوده و توابع نامعلوم ولی محدودی هستند. بنابراین، دینامیک رویت‌گر برای هر زیرسیستم به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{z}}_i = \mathbf{A}\mathbf{z}_i + \mathbf{B}_i u + \mathbf{L}_i (\hat{\mathbf{y}}_i - \mathbf{y}_i), \\ \mathbf{y}_i = \mathbf{C}\mathbf{z}_i, \end{cases} \quad (i=1,2) \quad (12)$$

که $\mathbf{z}_1 = [z_1 \ z_2 \ z_3]^T$ و $\mathbf{z}_2 = [z_4 \ z_5 \ z_6]^T$ بردارهای حالت رویت‌گر هستند و ضرایب رویت‌گر طراحی شده به صورت بردارهای $\mathbf{L}_1 = [\beta_1 \ \beta_2 \ \beta_3]^T$ و $\mathbf{L}_2 = [\beta_4 \ \beta_5 \ \beta_6]^T$ نشان داده می‌شوند. انتخاب مناسب این ضرایب منجر به تخمین مناسبی از دینامیک مدل نشده و عدم قطعیت‌های سیستم که در واقع متغیرهای حالت اضافه شده هستند، می‌شود. با کم کردن معادله (۱۰) از معادله (۱۲)، دینامیک خطای رویت‌گر طراحی شده برای هر زیرسیستم به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\begin{cases} \dot{\tilde{z}}_1 = \tilde{z}_2 - \beta_1 \tilde{z}_1, \\ \dot{\tilde{z}}_2 = \tilde{z}_3 - \beta_2 \tilde{z}_1, \\ \dot{\tilde{z}}_3 = -H_1 - \beta_3 \tilde{z}_1, \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} \dot{\tilde{z}}_4 = \tilde{z}_5 - \beta_4 \tilde{z}_4, \\ \dot{\tilde{z}}_5 = \tilde{z}_6 - \beta_5 \tilde{z}_4, \\ \dot{\tilde{z}}_6 = -H_2 - \beta_6 \tilde{z}_4, \end{cases} \quad (14)$$

که $\tilde{z}_i = \hat{x}_i - z_i$ ($i=1, \dots, 6$) دینامیک خطای تخمین را نشان می‌دهد. انتخاب مناسب ضرایب رویت‌گر، با فرض محدود بودن H_1 و H_2 می‌تواند پایداری ورودی-محدود، خروجی-محدود رویت‌گر را تضمین کند. در قضیه زیر، نحوه تنظیم پیشنهادی ضرایب رویت‌گر ارائه شده است.

قضیه: اگر ضرایب رویت‌گر به صورت $\beta_1 = \beta_4 = 3/\varepsilon$ ، $\beta_2 = \beta_5 = 3/\varepsilon^2$ و $\beta_3 = \beta_6 = 1/\varepsilon^3$ انتخاب شوند و ε یک پارامتر آزاد مثبت باشد، با فرض محدود بودن H_1 و H_2 ، دینامیک خطای تخمین محدود خواهد بود.

اثبات: با انتخاب ضرایب به صورت $\beta_1 = \beta_4 = 3/\varepsilon$ ، $\beta_2 = \beta_5 = 3/\varepsilon^2$ و $\beta_3 = \beta_6 = 1/\varepsilon^3$ ، معادلات دینامیک خطای مربوط به رویت‌گر برای هر زیر سیستم در معادله (۱۳) و معادله (۱۴) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\dot{\tilde{z}}_i = \mathbf{G}\tilde{z}_i + \mathbf{E}H_i, \quad (i=1, 2) \quad (15)$$

که $\mathbf{G} = \begin{bmatrix} -3/\varepsilon & 1 & 0 \\ -3/\varepsilon^2 & 0 & 1 \\ -1/\varepsilon^3 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ و $\tilde{\mathbf{z}}_1 = [\tilde{z}_1 \quad \tilde{z}_2 \quad \tilde{z}_3]^T$ و $\tilde{\mathbf{z}}_2 = [\tilde{z}_4 \quad \tilde{z}_5 \quad \tilde{z}_6]^T$ است. سه مقدار ویژه ماتریس \mathbf{G} از مساوی صفر

قرار دادن چند جمله‌ای مشخصه $\lambda = s^3 + \frac{3}{\varepsilon}s^2 + \frac{3}{\varepsilon^2}s + \frac{1}{\varepsilon^3} = \left(s + \frac{1}{\varepsilon}\right)^3$ یکسان و برابر با $-\frac{1}{\varepsilon}$ بدست می‌آیند. بنابراین، برای یک

مقدار مناسب و مثبت ε ، ماتریس \mathbf{G} هر ویتز بوده و دینامیک خطا به صورت ورودی-محدود و خروجی-محدود پایدار است. معادله (۱۵) یک معادله دیفرانسیل خطی مرتبه اول است که به صورت زیر حل می‌شود:

$$\tilde{\mathbf{z}}_i = e^{\mathbf{G}t} \tilde{\mathbf{z}}_i(0) + \int_0^t e^{\mathbf{G}(t-\vartheta)} \mathbf{E}H_i(\vartheta) d\vartheta, \quad (16)$$

که در آن پارامتر آزاد ε بر سرعت همگرایی پاسخ‌های رویت‌گر تاثیر می‌گذارد، به این معنی که انتخاب مقادیر کوچک‌تر برای $\varepsilon > 0$ ، منجر به پاسخ‌های سریع‌تر خواهد شد. بنابراین، برای $\varepsilon > 0$ داریم:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\mathbf{z}}_i(t) = \int_0^t e^{\mathbf{G}(t-\vartheta)} \mathbf{E}H_i(\vartheta) d\vartheta, \quad (17)$$

معادله (۱۷) نشان می‌دهد که، برای هر $\varepsilon > 0$ با فرض محدود بودن $H_{i(i=1,2)}$ ، خطای تخمین رویت‌گر محدود خواهد بود. شایان ذکر است که پایداری ورودی-محدود-خروجی محدود در مقالات بسیاری برای رویت‌گر حالت توسعه‌یافته در نظر گرفته شده است [۲۶-۲۸].

ملاحظه ۱: سرعت پاسخ‌های رویت‌گر حالت توسعه‌یافته به عنوان یک رویت‌گر بهره بالا، تحت تاثیر پارامتر آزاد ε است. هرچه مقادیر ε کوچک‌تر انتخاب شوند، پاسخ‌های رویت‌گر سریع‌تر خواهند شد. در عین حال، با کاهش مقدار پارامتر آزاد ε ، حساسیت به نویز اندازه‌گیری و خطاهای مدل‌سازی در خطای تخمین افزایش می‌یابد. همچنین خطاهای عددی ممکن است به دلیل حل مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیل در هر زمان نمونه‌گیری رخ دهد.

ملاحظه ۲: با فرض ورودی پله ثابت برای $H_{i(i=1,2)}$ ، پاسخ حالت ماندگار معادله (۱۵) به صورت $\tilde{\mathbf{z}}_i^{ss} = [\varepsilon^3 H_i \quad 3\varepsilon^2 H_i \quad 3\varepsilon H_i]^T$ ($i=1, 2$) محاسبه می‌شوند. ملاحظه می‌شود که خطای حالت ماندگار رویت‌گر حالت توسعه‌یافته تحت تاثیر پارامتر آزاد ε است. با انتخاب مقادیر کوچک‌تر ε ، خطای تخمین به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد و رویت‌گر عملکرد 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 اندازه‌گیری 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 بهینه‌سازی 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 می‌شوند. در نتیجه، رویکرد فیلتر کالمن توسعه یافته مبتنی بر ورودی نامعلوم می‌تواند مستقیماً از تابع هدف فیلتر کالمن توسعه یافته متداول (تابع هدف حداقل مربعات وزن دار) استخراج شود. در این الگوریتم هیچ اطلاعات قبلی در مورد ورودی‌های نامعلوم مورد نیاز نیست و فیلتر کالمن توسعه یافته مبتنی بر ورودی نامعلوم برای تخمین دینامیک مدل نشده و متغیرهای حالت سیستم در حضور ورودی‌های نامعلوم عمل می‌کند.

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

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}^*) + \mathbf{w}, \\ \mathbf{y} = \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{u}^*) + \mathbf{v}, \end{cases} \quad (18)$$

\mathbf{f} تابع غیرخطی سیستم و \mathbf{h} تابع خروجی است. با گسسته‌سازی معادله (18) مدل فضای حالت زمان گسسته با بردار ورودی نامعلوم \mathbf{u}^* به صورت زیر نوشته می‌شود:

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

که در آن \mathbf{x}_k و \mathbf{x}_{k-1} بردار متغیرهای حالت سیستم با ابعاد $n \times 1$ ، \mathbf{u}_{k-1}^* بردار ورودی نامعلوم $q \times 1$ ، \mathbf{y}_k بردار خروجی‌های قابل اندازه‌گیری $m \times 1$ هستند. دینامیک مدل نشده، متغیرهای حالت و ورودی‌های نامعلوم با استفاده از اطلاعات خروجی‌های اندازه‌گیری شده (y_1, y_2, \dots, y_k) که شامل مقدار حالت‌های $\mathbf{x}_{k|k}$ و ورودی نامعلوم $\mathbf{u}_{k-1|k}^*$ هستند، تخمین زده می‌شوند. \mathbf{w}_k و \mathbf{v}_k نویز سفید گوسی با میانگین صفر و ماتریس‌های کوواریانس \mathbf{Q} و \mathbf{R} هستند. انتخاب \mathbf{Q} و \mathbf{R} مناسب در طراحی این الگوریتم بسیار مهم است [9].

برای تخمین حالت‌ها و ورودی نامعلوم، سیستم غیرخطی حول حالت‌های تخمین زده شده توسط فیلتر کالمن خطی می‌شود. برای خطی‌سازی، معادلات حالت سیستم غیرخطی با استفاده از بسط سری تیلور حول $\hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}$ و $\mathbf{w}_{k-1} = \mathbf{0}$ ، بسط داده می‌شوند:

$$\mathbf{f}_{k-1} = \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}, \mathbf{u}_{k-1}, \hat{\mathbf{u}}_{k-2|k-1}^*) + \mathbf{F}_{k-1|k-1}(\mathbf{x}_{k-1} - \hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}) + \dots + \mathbf{B}_{k-1|k-1}^*(\mathbf{u}_{k-1}^* - \hat{\mathbf{u}}_{k-2|k-1}^*), \quad (20)$$

که در آن

$$\mathbf{F}_{k-1|k-1} = \left[\frac{\partial \mathbf{f}_{k-1}}{\partial \mathbf{x}_{k-1}} \right] \Big|_{\mathbf{x}_{k-1} = \hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}, \mathbf{u}_{k-1}^* = \hat{\mathbf{u}}_{k-1|k-1}^*}, \quad (21)$$

$$\mathbf{B}_{k-1|k-1}^* = \left[\frac{\partial \mathbf{f}_{k-1}}{\partial \mathbf{u}_{k-1}^*} \right] \Big|_{\mathbf{x}_{k-1} = \hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}, \mathbf{u}_{k-1}^* = \hat{\mathbf{u}}_{k-1|k-1}^*}, \quad (22)$$

معادله خروجی حول نقطه‌ی $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$ و $\mathbf{v}_k = \mathbf{0}$ به صورت زیر خطی می‌شود:

$$\mathbf{h}_{k-1} = \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}, \mathbf{u}_k) + \mathbf{H}_{k|k-1}(\mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}) + \mathbf{D}_{k|k-1}^*(\mathbf{u}_k^* - \hat{\mathbf{u}}_{k-1|k-1}^*), \quad (23)$$

که در آن

$$\mathbf{H}_{k|k-1} = \left[\frac{\partial \mathbf{h}_k}{\partial \mathbf{x}_k} \right] \Big|_{\mathbf{x}_k = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}, \mathbf{u}_k^* = \hat{\mathbf{u}}_{k-1|k-1}^*}, \quad (24)$$

$$\mathbf{D}_{k|k-1}^* = \left[\frac{\partial \mathbf{h}_k}{\partial \mathbf{u}_k^*} \right] \Big|_{\mathbf{x}_k = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}, \mathbf{u}_k^* = \hat{\mathbf{u}}_{k-1|k-1}^*}, \quad (25)$$

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 $k = 0$

$$\hat{\mathbf{x}}_{00} = E[\mathbf{x}_0], \quad (26)$$

$$\hat{\mathbf{u}}_0^* = E[\mathbf{u}_0^*],$$

$$\mathbf{P}_{00} = E[(\mathbf{x}_0 - \hat{\mathbf{x}}_{00})(\mathbf{x}_0 - \hat{\mathbf{x}}_{00})^T],$$

$$\mathbf{S}_0 = E[(\mathbf{u}_0^* - \hat{\mathbf{u}}_0^*)(\mathbf{u}_0^* - \hat{\mathbf{u}}_0^*)^T],$$

$\hat{\mathbf{x}}_{00}$ تخمین اولیه \mathbf{x} را نشان می‌دهد. $\hat{\mathbf{u}}_0^*$ مقدار اولیه ورودی نامعلوم و \mathbf{P}_{00} بهره تخمین متغیرهای حالت و \mathbf{S}_0 بهره اولیه تخمین ورودی نامعلوم است.

مرحله دوم: مرحله پیش‌بینی

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 سیگنال‌های موجود تا زمان $k-1$ ، یک تخمین اولیه از متغیرهای حالت در نمونه k محاسبه می‌شود.

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} = f(\hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}, \hat{\mathbf{u}}_{k-2|k-1}^*), \quad (27)$$

$$\mathbf{P}_{k|k-1} = \mathbf{F}_{k-1|k-1} \mathbf{P}_{k-1|k-1} \mathbf{F}_{k-1|k-1}^T + \mathbf{Q}_{k-1}, \quad (28)$$

$\hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}$ و $\hat{\mathbf{u}}_{k-2|k-1}^*$ تخمین حالت‌ها و ورودی نامعلوم در $t = (k-1)\Delta t$ هستند. ماتریس کوواریانس نویز مدل سیستم است. $\mathbf{P}_{k|k-1}$ کوواریانس خطای تخمین مربوط به $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$ را نشان می‌دهد.

مرحله سوم: محاسبه بهره

ماتریس بهره برای الگوریتم تخمین به صورت زیر محاسبه می‌شود [29]:

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_{k|k-1}^T \times [\mathbf{R}_k + \mathbf{H}_{k|k-1} \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_{k|k-1}^T]^{-1}. \quad (29)$$

مرحله چهارم: مرحله تخمین ورودی نامعلوم

در این مرحله ماتریس بهره \mathbf{S}_k و ورودی نامعلوم $\hat{\mathbf{u}}_{k-1|k}^*$ در $t = k\Delta t$ با استفاده از مرحله پیش‌بینی حالت‌ها و اطلاعات اندازه‌گیری شده در لحظه حال و با استفاده از روابط زیر به‌روزرسانی می‌شوند [29]:

$$\mathbf{S}_k = [\mathbf{D}_{k|k-1}^{*T} \mathbf{R}_k^{-1} \times (\mathbf{I}_p - \mathbf{H}_{k|k-1}^T \mathbf{K}_k) \mathbf{D}_{k|k-1}^{*T}]^{-1}, \quad (30)$$

$$\hat{\mathbf{u}}_{k|k}^* = \mathbf{S}_k \mathbf{D}_{k-1|k-1}^{*T} \mathbf{R}_k^{-1} \times (\mathbf{I}_p - \mathbf{H}_{k|k-1}^T \mathbf{K}_k) \times [\mathbf{y}_k - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}(k|k-1), \mathbf{u}_k) + \mathbf{D}_{k-1|k-1}^{*T} \hat{\mathbf{u}}_{k-1|k-1}^*]. \quad (31)$$

مرحله پنجم: به‌روزرسانی

در این مرحله تخمین حالت‌ها و ورودی نامعلوم $\hat{\mathbf{x}}_{k|k}$ و $\hat{\mathbf{u}}_{k|k}^*$ در $t = k\Delta t$ با استفاده از مرحله پیش‌بینی حالت‌ها و اطلاعات اندازه‌گیری شده در لحظه حال \mathbf{y}_k و با استفاده از روابط زیر به‌روزرسانی می‌شوند:

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k} = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k [\mathbf{y}_k - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}, \mathbf{u}_k) - \mathbf{D}_{k|k-1}^* (\hat{\mathbf{u}}_{k|k}^* - \hat{\mathbf{u}}_{k-1|k-1}^*)], \quad (32)$$

$$\mathbf{P}_{k-1|k-1} = (\mathbf{I}_n + \mathbf{K}_{k-1} \mathbf{D}_{k-1}^* \mathbf{S}_{k-1} \mathbf{D}_{k-1}^{*T} \mathbf{R}_{k-1|k-2}^{-1} \mathbf{H}_{k-1|k-2}) (\mathbf{I}_n - \mathbf{K}_{k-1} \mathbf{H}_{k-1|k-2})^T \mathbf{P}_{k-1|k-2}. \quad (33)$$

ماتریس $\mathbf{P}_{k-1|k-1}$ در معادله (۲۸) با استفاده از معادله (۳۳) به روزرسانی می‌شود. همچنین، $\mathbf{P}_{k-1|k-2}$ ، \mathbf{K}_{k-1} و \mathbf{S}_{k-1} با قرار دادن $k-1$ به جای k در معادله (۲۹) تا معادله (۳۰) به دست می‌آیند [۲۹].

در مرحله اول، الگوریتم فیلترکالمن مبتنی بر ورودی نامعلوم از $k=0$ و با شرایط اولیه بیان شده در معادله (۲۶) که در آن $E[*]$ مقدار مورد انتظار از یک متغیر تصادفی را نشان می‌دهد، شروع می‌شود. در مرحله پیش‌بینی، $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$ و $\mathbf{P}_{k|k-1}$ که به ترتیب تخمین حالت و کواریانس پیش‌بینی از مدل سیستم در گام k هستند، محاسبه می‌شوند. سپس بهره فیلتر کالمن \mathbf{K}_k از رابطه (۲۹) و \mathbf{S}_k بهره ورودی نامعلوم از معادله (۳۰) محاسبه می‌شوند. در نهایت، ورودی نامعلوم $\hat{\mathbf{u}}_{k-1|k}^*$ ، تخمین حالت $\hat{\mathbf{x}}_{k|k}$ و ماتریس کواریانس $\mathbf{P}_{k-1|k-1}$ در مرحله به‌روزرسانی به دست می‌آیند. نتایج به‌دست‌آمده در این مرحله به مرحله پیش‌بینی برای پیاده‌سازی 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 $\mathbf{B}^* \neq 0$. این شرط می‌تواند انتخاب حسگر برای پیاده‌سازی الگوریتم را با محدودیت روبرو کند، زیرا در این حالت ممکن است خروجی‌های قابل اندازه‌گیری حاوی اطلاعات ورودی نامعلوم باشند. از طرفی، اگر $\mathbf{D}^* = 0$ باشد آنگاه در معادله (۳۱)، $\hat{\mathbf{u}}_{k-1|k}^* = 0$ خواهد بود و در واقع الگوریتم در تخمین ورودی نامعلوم ناتوان خواهد بود. شرط دوم آنست که تعداد خروجی‌های قابل اندازه‌گیری بیشتر از تعداد ورودی‌های نامعلوم باشند ($m > q$). اگر این شرط برقرار نباشد، سیستم مشاهده‌پذیر نبوده و الگوریتم نمی‌تواند ورودی‌های نامعلوم را تخمین بزند.

۶- نتایج و بحث

نتایج این مقاله در دو بخش ارائه می‌شود. در بخش اول از مطالعات آزمایشگاهی برای ارزیابی عملکرد رویترگر حالت توسعه‌یافته پیشنهادی و مقایسه آن با فیلتر کالمن با ورودی نامعلوم استفاده می‌شود. در روش پیشنهادی، عدم قطعیت‌های مدل و اغتشاشات سیستم توسط رویترگر تخمین زده می‌شوند. خروجی‌های مورد نیاز برای تخمین، فقط جابجایی‌های جرم معلق و غیرمعلق هستند. همچنین، پاسخ‌های تخمین زده شده با داده‌های اندازه‌گیری شده توسط حسگرهای اضافی نصب شده بر روی دستگاه آزمایش مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. 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 متلب^۱ آدامز^۲ ارائه می‌شود. در این بخش مدل واقعی در نرم‌افزار آدامز طراحی شده و کنترل‌کننده با استفاده از حالت‌ها و ورودی جاده تخمین زده شده برای سیستم تعلیق یک‌چهارم، نیروی فعال مورد نیاز را محاسبه می‌کند. در کنترل‌کننده سیستم تعلیق فعال، قیود حالت و ورودی با تنظیم ضرایب وزنی ارضا می‌گردند. در نهایت نتایج سیستم تعلیق غیرفعال و فعال مبتنی بر دو نوع رویترگر مقایسه خواهند شد.

۶-۱- نتایج حاصل از داده‌های آزمایشگاهی برای ارزیابی عملکرد رویترگر

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 اندازه‌گیری شتاب‌های عمودی جرم معلق و غیرمعلق با فرکانس ۱۰۰ هرتز تعبیه شده است. علاوه بر این، از سه حسگر اندازه‌گیری جابجایی اوپکون^۴ برای اندازه‌گیری 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 دلیل عدم امکان استفاده در خودروی

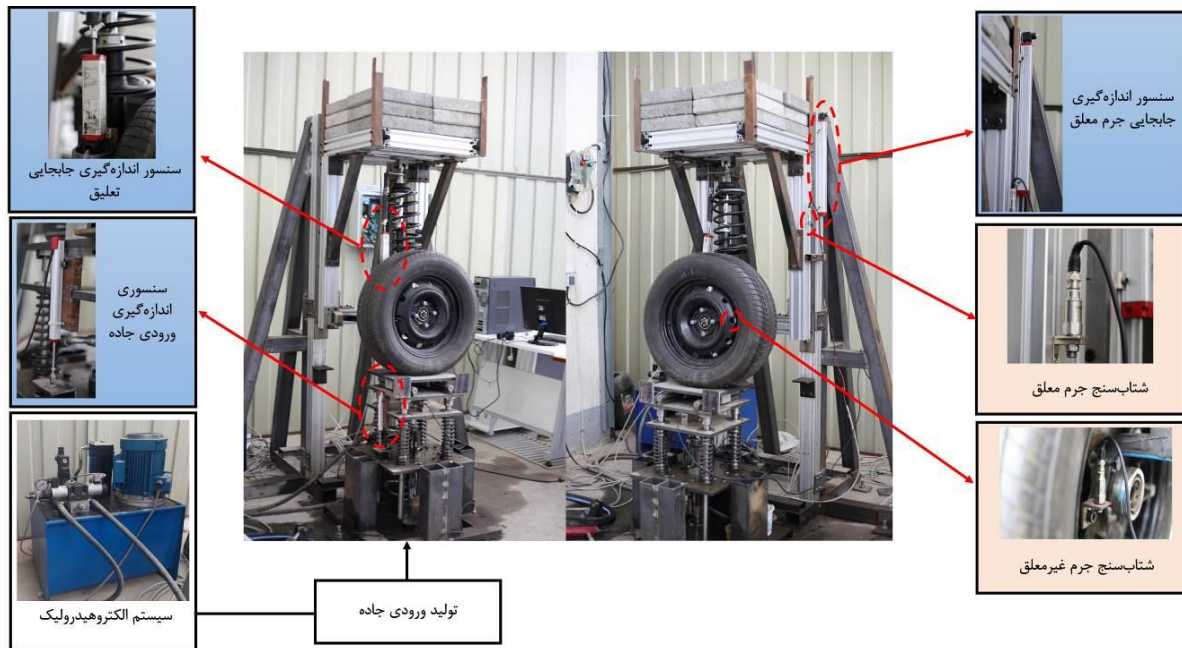
¹ MATLAB®

² Adams

³ Wilcoxon

⁴ Opkon

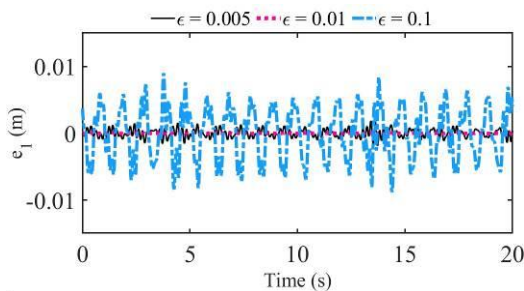
واقعی به کار گرفته نمی‌شوند. داده‌های اندازه‌گیری شده از طریق کارت داده شرکت نشنال اینسترومنت به نرم‌افزار لیبویو ارسال می‌شوند. در نتیجه، داده‌های شتاب‌سنج برای تخمین حالت‌ها، عدم قطعیت‌ها و ورودی جاده نامعلوم استفاده می‌شوند.



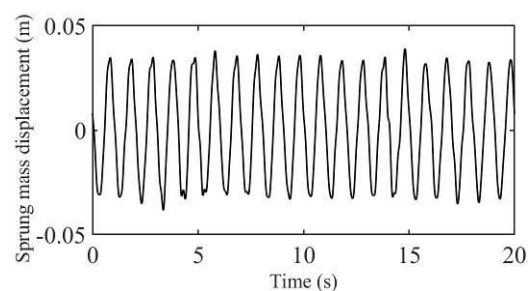
شکل ۳: ساختار آزمایشگاهی سیستم تعلیق یک چهارم خودرو.
 Fig.3. Experimental platform of a quarter suspension system.

نتایج تخمین رویت‌گر حالت توسعه‌یافته پیشنهادی برای سه مقدار ϵ در شکل ۴ نشان داده شده است. با بررسی شکل ۴، مقدار $\epsilon = 0.1$ بهترین عملکرد را در تخمین جابجایی‌ها و سرعت‌های جرم معلق و غیرمعلق ارائه می‌دهد. برای مقادیر بزرگ‌تر ϵ سرعت پاسخ‌دهی کاهش می‌یابد و برای مقادیر کوچک‌تر با وجود پاسخ‌های سریع‌تر، حساسیت به نویز اندازه‌گیری و در نتیجه خطاهای مدل‌سازی افزایش می‌یابد.

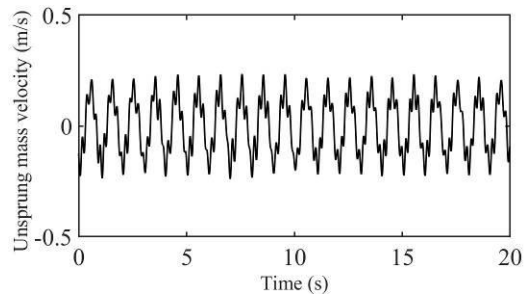
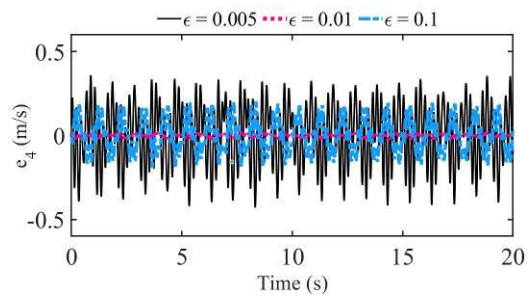
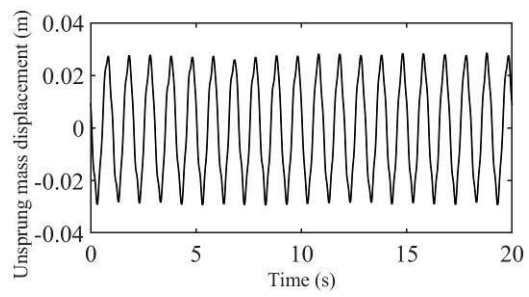
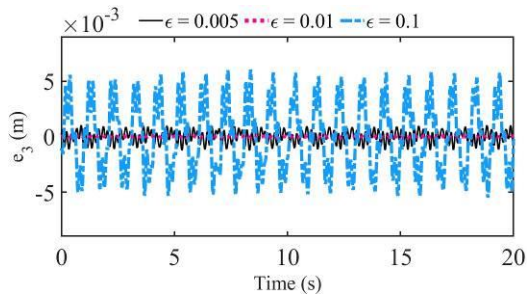
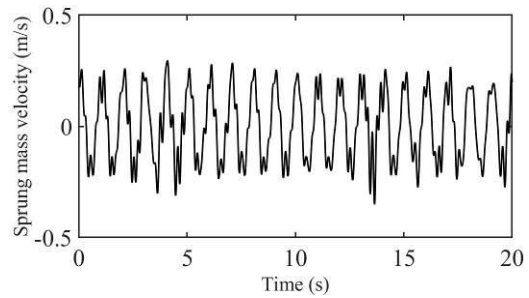
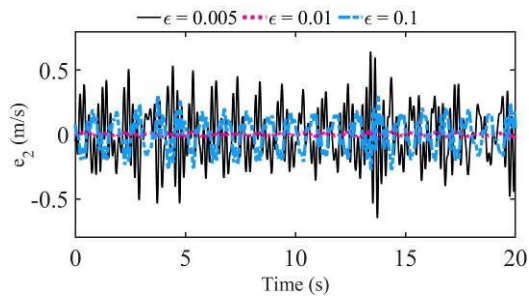
همانطور که ذکر شد، از داده‌های جابجایی جرم معلق و غیرمعلق در رویت‌گر پیشنهادی استفاده می‌شود. از آنجایی که در محیط واقعی، دسترسی مستقیم به این داده‌ها امکان‌پذیر نمی‌باشد. بنابراین در این الگوریتم با دو بار انتگرال‌گیری از داده‌های شتاب فیلتر شده توسط یک فیلتر میان‌گذر با فرکانس قطع 0.5 و 20 هرتز، داده‌های جابجایی جرم معلق و غیرمعلق به دست می‌آیند. فیلتر بالاگذر با فرکانس قطع 0.5 هرتز برای حذف بایاس شتاب‌سنج‌ها و فرکانس پایین‌گذر با فرکانس قطع 20 هرتز برای حذف نویز استفاده شده‌اند [۹]. بنابراین از داده‌های جابجایی ارائه شده توسط حسگرهای جابجایی صرفاً برای ارزیابی الگوریتم پیشنهادی و صحت‌گذاری نتایج استفاده می‌شود. شکل ۵ مقایسه بین سیگنال‌های 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 اندازه‌گیری شتاب‌سنج‌ها کاملاً مشهود است. با استفاده از یک فرکانس قطع مناسب برای فیلتر میان‌گذر، می‌توان سیگنال‌های قابل قبولی برای جابجایی‌ها برای استفاده در رویت‌گر به دست آورد.



ب

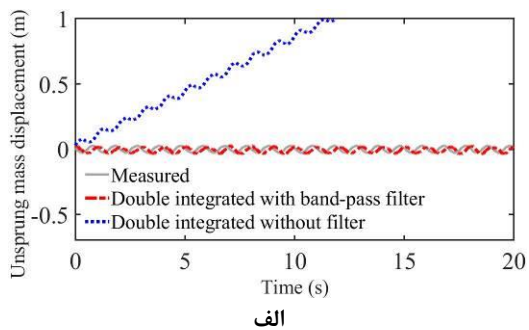
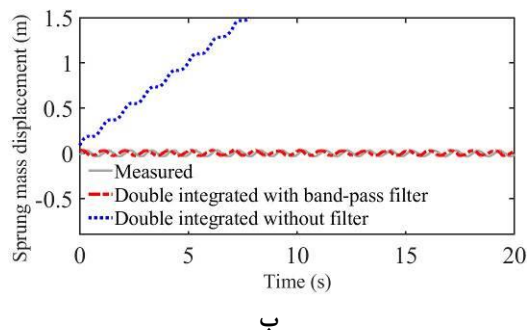


الف



شکل ۴: مقایسه‌ی نتایج روش پیشنهادی برای مقادیر مختلف \mathcal{E} در آزمایش ۱، الف) جابجایی جرم معلق، ب) خطای تخمین جابجایی جرم معلق ($e_1 = \tilde{z}_1$)، پ) سرعت جرم معلق، ت) خطای تخمین سرعت جرم معلق ($e_2 = \tilde{z}_2$)، ج) خطای تخمین جابجایی جرم غیرمعلق، ح) خطای تخمین سرعت جرم غیرمعلق ($e_3 = \tilde{z}_3$)، چ) سرعت جرم غیرمعلق، ح) خطای تخمین سرعت جرم غیرمعلق ($e_4 = \tilde{z}_4$).

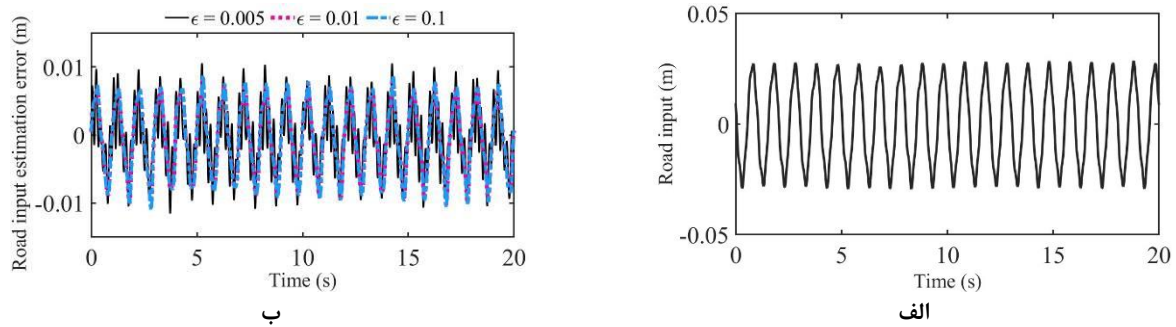
Fig.4. Comparative results for the proposed method for different values of \mathcal{E} in test-1, (a) Sprung mass displacement, (b) Estimation error of sprung mass displacement $e_1 = \tilde{z}_1$, (c) Unsprung mass displacement, (d) Estimation error of unsprung mass displacement $e_2 = \tilde{z}_2$, (e) Sprung mass velocity, (f) Estimation error of sprung mass velocity $e_3 = \tilde{z}_3$, (g) Unsprung mass velocity, (h) Estimation error of unsprung mass velocity $e_4 = \tilde{z}_4$.



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.

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 عدم قطعیت‌ها 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 قبلاً شناسایی شده‌اند. این نکته لازم به ذکر می‌باشد که از روش‌های ارائه شده در مرجع [۳۰] برای شناسایی پارامترهای سیستم تعلیق استفاده شده است.

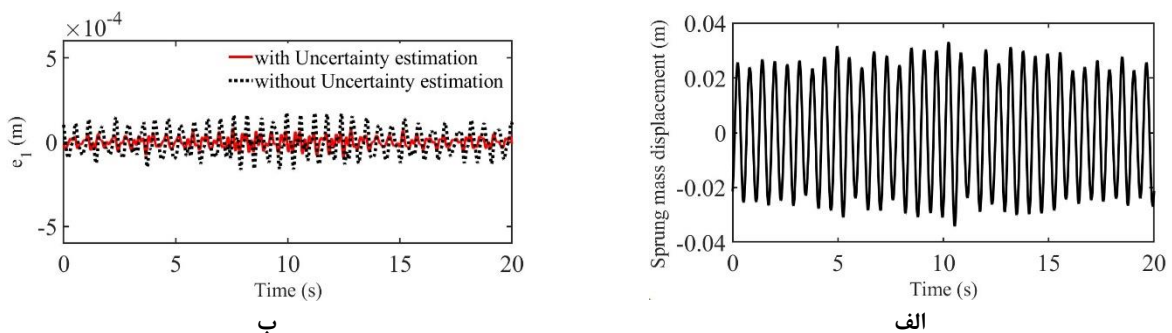


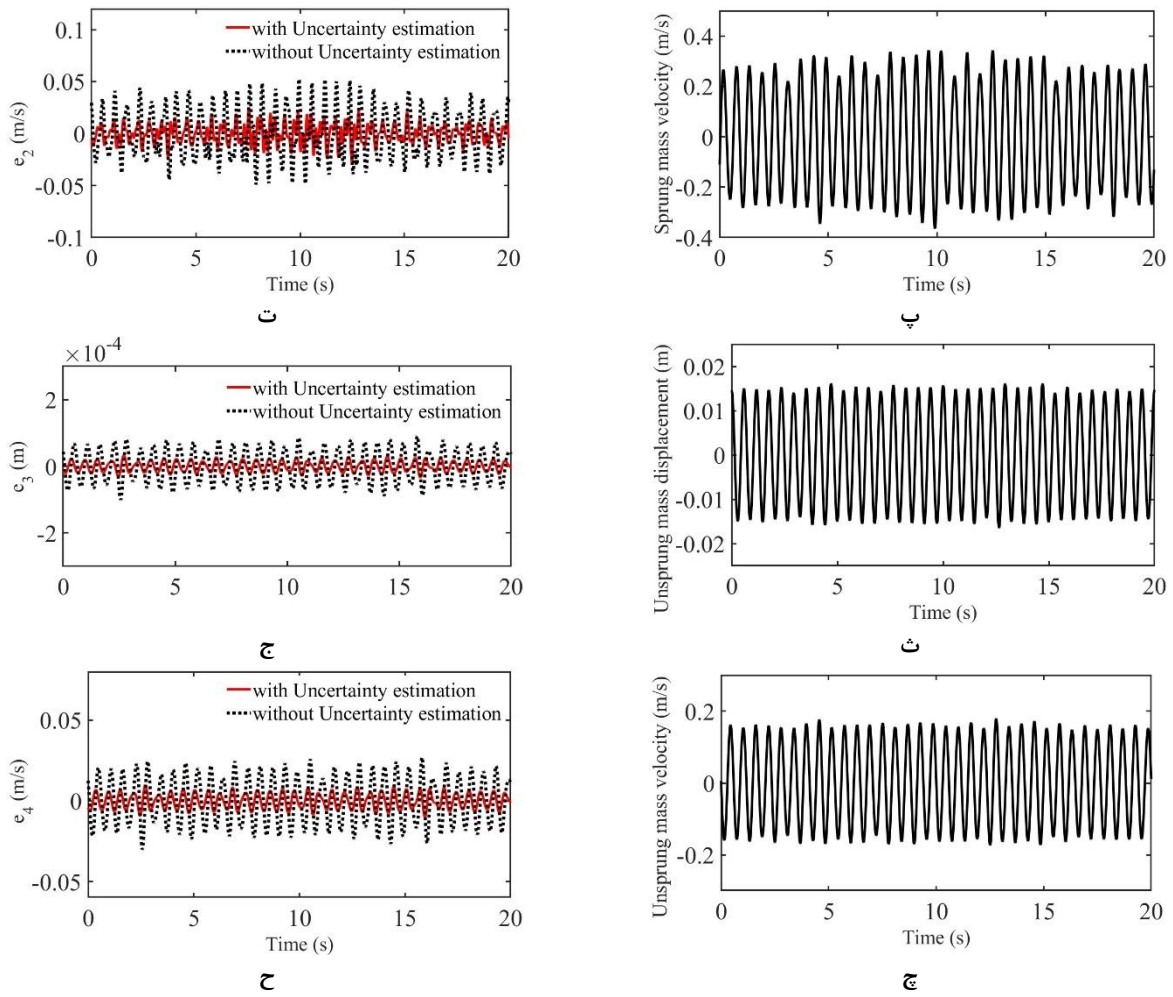
شکل ۶: الف) ورودی جاده، ب) خطای تخمین ورودی جاده در آزمایش ۱.

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

زمانی که عدم قطعیت‌های سیستم توسط رویت‌گر حالت توسعه‌یافته تخمین زده می‌شوند، در واقع سیستم اولیه به‌روزرسانی می‌شود. این نکته لازم به ذکر می‌باشد که در طراحی رویت‌گر، 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. بر همین اساس استفاده از این دینامیک اولیه در طراحی کنترل‌کننده موجب کاهش عملکرد کنترل‌کننده مبتنی بر مدل می‌شود. در روش رویت‌گر حالت توسعه‌یافته در هر لحظه این نامعینی‌ها و اغتشاشات براساس خروجی‌های مدل واقعی تخمین زده شده و به دینامیک اولیه وارد می‌شوند تا بتوان دینامیک را به‌روزرسانی نمود و عملکرد کنترل‌کننده را بهبود بخشید. از سوی دیگر با توجه به اینکه دینامیک به‌روزرسانی شده نزدیک به مدل واقعی می‌گردد، با حل دینامیک به‌روزرسانی شده در هر لحظه می‌توان متغیرهای حالت سیستم را تخمین زد. تاثیر تخمین عدم قطعیت‌ها در تخمین حالت‌های سیستم در شکل ۷ نشان داده شده است. به وضوح مشاهده می‌شود که عملکرد مدل به‌روز شده در کاهش خطای تخمین بسیار بهتر از رویت‌گر بدون به‌روزرسانی مدل است. همچنین، مدل به‌روز شده علاوه بر تخمین عدم قطعیت‌ها، ورودی‌های نامعلوم را هم تخمین می‌زند. در سیستم تعلیق ورودی جاده به عنوان ورودی نامعلوم است و کنترل‌کننده‌های سیستم تعلیق فعال برای بهبود عملکرد خود به مقدار آن در هر لحظه نیاز دارند. بنابراین تخمین دقیق مقدار ورودی جاده برای بهبود عملکرد کنترل‌کننده‌ها ضروری است.

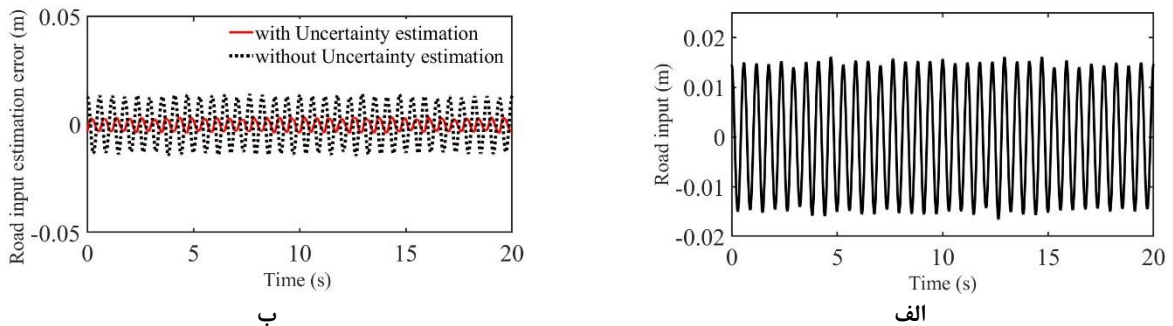
در آزمایش ۲ سیستم تعلیق با ورودی جاده شبه تصادفی مطابق شکل ۸-الف تحریک شده است. شکل ۸-ب نشان می‌دهد که زمانی که مدل اولیه به‌روزرسانی شده و عدم قطعیت‌ها تخمین زده می‌شوند، خطای تخمین ورودی جاده کم‌تر و تخمین دقیق‌تر است.





شکل ۷: مقایسه‌ی نتایج روش پیشنهادی با و بدون به‌روزرسانی در آزمایش ۲، الف) جابجایی جرم معلق، ب) خطای تخمین جابجایی جرم معلق ($e_1 = \tilde{z}_1$)، پ) سرعت جرم معلق، ت) خطای تخمین سرعت جرم معلق ($e_2 = \tilde{z}_2$)، ث) جابجایی جرم غیر معلق، ج) خطای تخمین جابجایی جرم غیر معلق ($e_3 = \tilde{z}_3$)، چ) سرعت جرم غیر معلق، ح) خطای تخمین سرعت جرم غیر معلق ($e_4 = \tilde{z}_4$).

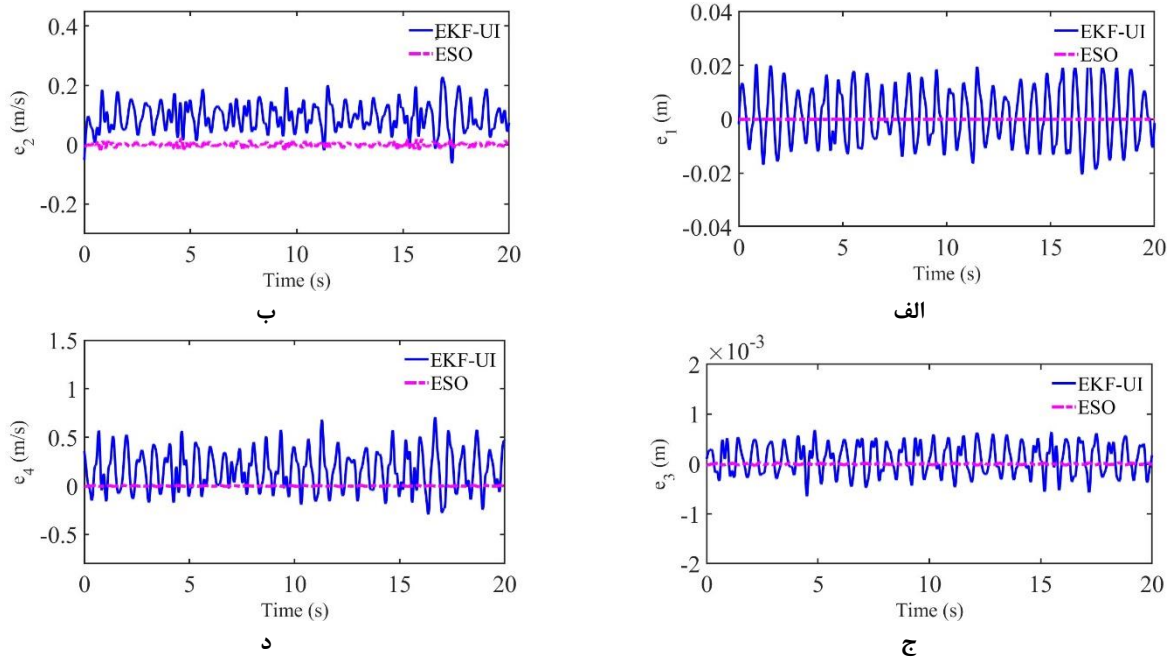
Fig.7. Comparative results for the proposed method in test-2 with and without model updating, (a) Sprung mass displacement, (b) Estimation error of sprung mass displacement $e_1 = \tilde{z}_1$, (c) Unsprung mass displacement, (d) Estimation error of unsprung mass displacement $e_2 = \tilde{z}_2$, (e) Sprung mass velocity, (f) Estimation error of sprung mass velocity $e_3 = \tilde{z}_3$, (g) Unsprung mass velocity, (h) Estimation error of unsprung mass velocity $e_4 = \tilde{z}_4$.



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

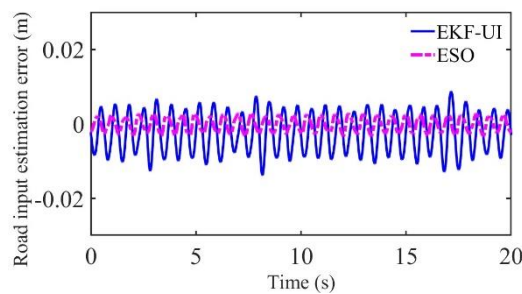
Fig.8. (a) Road input, (b) Road input estimation error in test-2.

برای مقایسه عملکرد روبت گر حالت توسعه یافته پیشنهادی با سایر رویکردها، نتایج به دست 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 جرم های معلق و غیرمعلق به عنوان خروجی سیستم برای تخمین ورودی جاده و سایر حالت ها و عدم قطعیت های سیستم استفاده می کند. از آنجایی که جابجایی ها را نمی توان به طور مستقیم اندازه گیری کرد، همانند الگوریتم پیشنهادی، با دو بار انتگرال گیری از سیگنال های شتاب فیلتر شده با فرکانس قطع مناسب می توان به داده های 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 ورودی نامعلوم ارتباط قابل توجهی با انتخاب مناسب ماتریس کوواریانس سیستم و نویزهای اندازه گیری دارد. در این ساختار، کوواریانس نویز فرآیند $Q = \text{diag}([1 \ 1 \ 1 \ 1]) \times 10^{-2}$ در نظر گرفته 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 سنج ها، تخمین گر باید بر روی اندازه گیری جابجایی تمرکز کند تا اثرات شتاب را کاهش دهد. بنابراین، مقادیر کوواریانس جابجایی در تخمین گر بسیار کوچک تر انتخاب می شوند، یعنی $R = \text{diag}([0.1 \ 1 \ 0.1 \ 1])$. در نتیجه با در نظر گرفتن مقادیر بالاتر برای کوواریانس شتاب، خطاهای تخمین سرعت که توسط فیلتر کالمن با ورودی نامعلوم به دست آمده، افزایش می یابد. مطابق شکل ۹، روش پیشنهادی در کاهش خطای تخمین در مقایسه با فیلتر کالمن با ورودی نامعلوم کارآمدتر است.



شکل ۹: مقایسه 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 غیر معلق.

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.



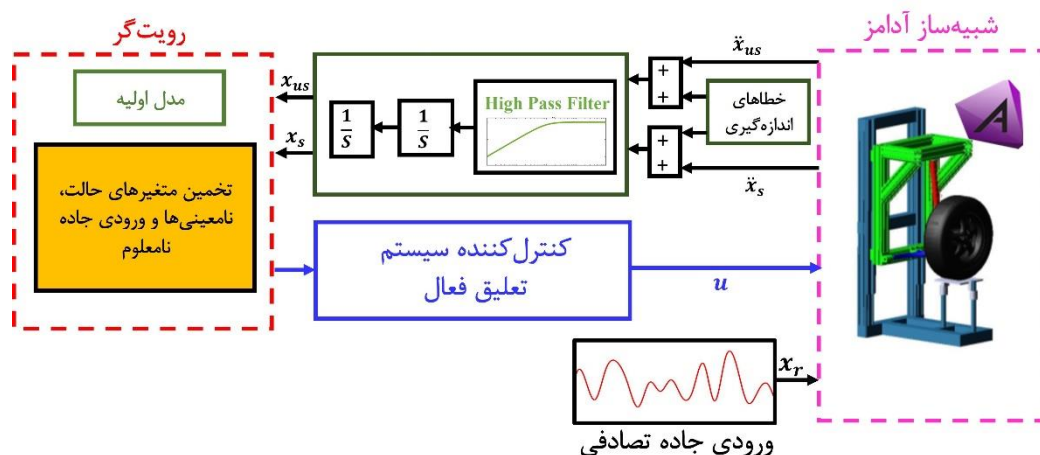
شکل ۱۰: مقایسه خطای تخمین ورودی جاده در آزمایش ۲.

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

۲-۶- 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 نرم افزار در حلقه در محیط متلب/آدامز^۱ ارائه می شود. برای این منظور یک کنترل کننده بهینه غیرخطی مبتنی بر هر کدام از رویت گرها برای برقراری تعادل بین اهداف متضاد سیستم تعلیق طراحی می شود. در کنار مهم ترین هدف سیستم کنترلی که عبارت از کاهش شتاب بدنه و ایجاد راحتی سفر می باشد، جابجایی تعلیق و جابجایی تایر نیز باید در محدوده مناسب تحت ورودی های 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 نقطه ای به صورت ترکیب وزن داری از پاسخ های پیش بینی شده ی سیستم تعلیق و سیگنال کنترلی تعریف می شود. سپس با کمینه کردن این معیار عملکرد، قانون کنترلی برای لحظه کنونی بدست می آید. کنترل کننده مذکور توسط نویسندگان در مراجع [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 رویت گرها پیاده سازی می شود. در واقع هر کدام از رویت گرها، عدم قطعیت های مدل و ورودی نامعلوم جاده را تخمین زده و در اختیار کنترل کننده قرار می دهند. جزئیات مربوط به طراحی کنترل کننده در مراجع [۳۱-۳۳] وجود دارند با این تفاوت که در این مقاله اطلاعات نامعلوم توسط رویت گرها تخمین زده شده و در کنترل کننده استفاده می گردد.

به منظور پیاده سازی سیستم کنترلی، ابتدا مدل یک چهارم خودرو با پارامترهای ارائه شده در جدول ۱ در نرم افزار آدامز طراحی می شود. سپس براساس شکل ۱۱ با ایجاد ارتباط این نرم افزار با محیط متلب، به شبیه سازی الگوریتم های تخمین و کنترل پرداخته می شود. در این ساختار شتاب های جرم معلق و غیرمعلق از نرم افزار آدامز استخراج و به منظور بررسی عملکرد الگوریتم های کنترلی در شرایط واقعی، فرکانس حسگرهای شتاب در ۱۰۰ هرتز تنظیم شده اند. از سوی دیگر، خطاهای داده های اندازه گیری شامل بایاس متغیر بین ۰/۰۳ تا ۰/۰۴ با خروجی های 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 شتاب های فیلتر شده، جابجایی های جرم معلق و غیرمعلق به دست آمده و در رویت گرها استفاده می شوند. قانون کنترلی بر مبنای مدل به روز شده به دست آمده و برای کامل کردن ساختار نرم افزار در حلقه به شبیه ساز آدامز اعمال می شود. این نکته لازم به ذکر است که قید ورودی کنترلی که بیش ترین مقدار نیروی کنترلی تولیدی توسط عملگر می باشد مقدار ۱۵۰۰ نیوتون در نظر گرفته می شود [۳۴]. در طراحی قانون کنترلی وزن بر روی متغیرهای حالت به گونه ای 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].



شکل ۱۱: ساختار نرم افزار در حلقه برای روش کنترلی پیشنهادی.

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

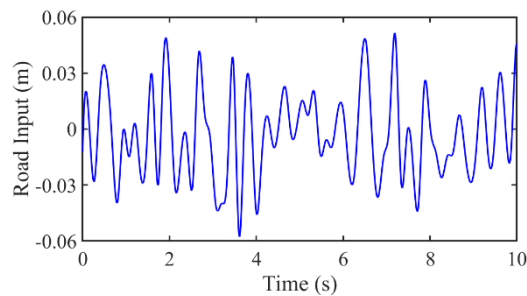
¹ Adams/MATLAB®

جدول ۱: پارامترهای شناسایی شده مدل طراحی.

Tab.1. Identified parameters of the design model.

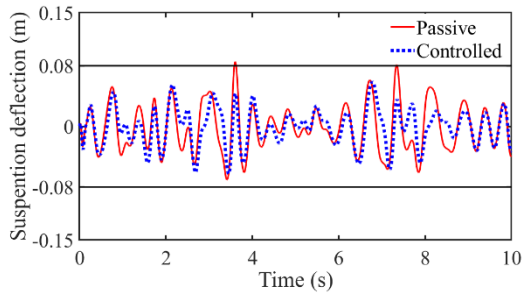
پارامتر	مقدار	واحد
جرم معلق	۲۹۰	کیلوگرم
جرم غیرمعلق	۵۹	کیلوگرم
ثابت فنر غیرخطی	۱۲۳۹۴	نیوتن بر متر
ثابت فنر غیرخطی	-۷۳۶۹۶	نیوتن بر مترمربع
ثابت فنر غیرخطی	۳۱۷۰۴۰۰	نیوتن بر مترمکعب
ثابت میراگر غیرخطی	۱۰۰۰	نیوتن ثانیه بر متر
ثابت میراگر غیرخطی	۵۰۰	نیوتن مجذور ثانیه بر مترمربع
ضریب فنر تایلر	۱۹۰۰۰۰	نیوتن بر متر

هدف اصلی از طراحی کنترل کننده سیستم تعلیق، کاهش شتاب وارد بر بدنه برای افزایش راحتی سرنشینان در حضور محدودیت نیروی کنترلی تولیدی می باشد. حفظ تماس تایر با جاده و جابجایی تعلیق محدود نیز از دیگر اهداف سیستم تعلیق به شمار می روند. 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 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 سرنشینان از خود نشان داده است. در نمودارهای ۱۳-ب و ۱۳-ج جابجایی تایر و جابجایی تعلیق نشان داده شده است که در محدوده مناسبی قرار دارند. در حالیکه در سیستم تعلیق غیرفعال جابجایی تعلیق و تایر از محدوده مجاز خود خارج شده اند. همچنین براساس نمودار ۱۳-د ورودی کنترلی در محدوده عملکردی مناسب قرار گرفته است.

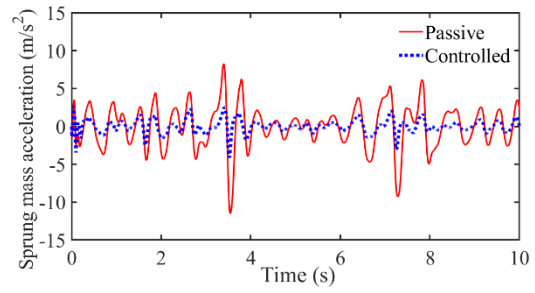


شکل ۱۲: ورودی جاده تصادفی.

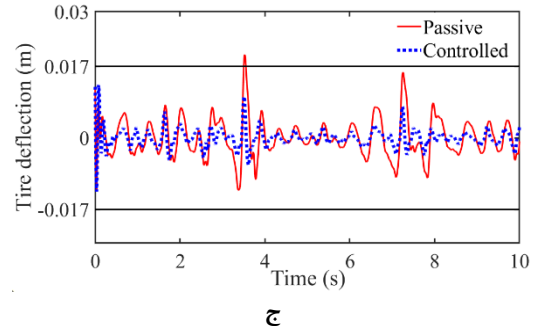
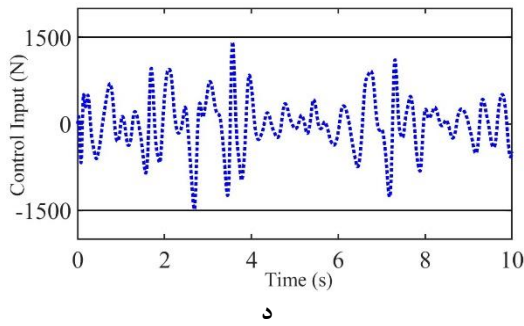
Fig.12. Random road input.



ب



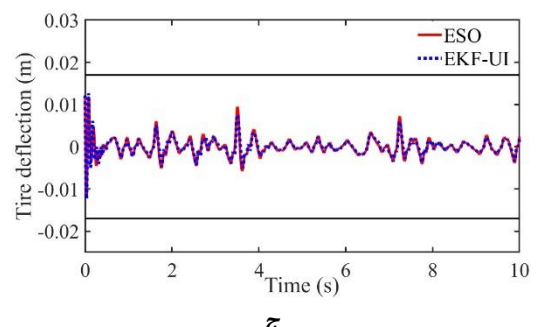
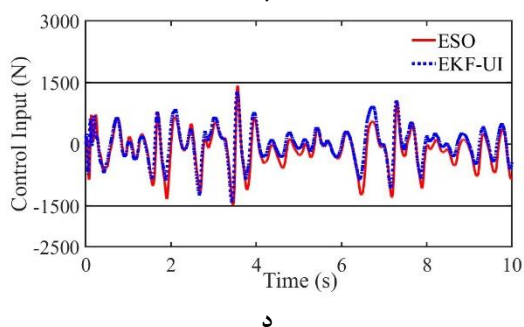
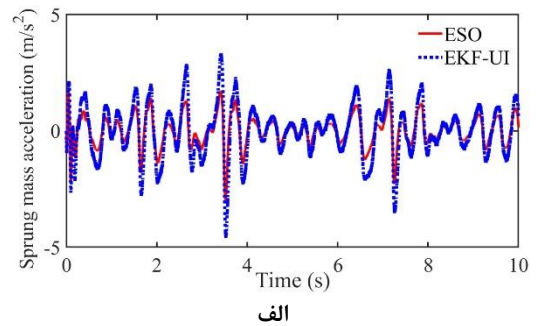
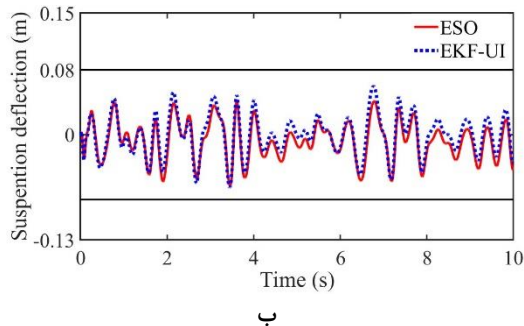
الف



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 کنترل‌کننده در حضور هر یک از رویت‌گرهای طراحی شده مقایسه می‌گردد. براساس شکل ۱۴ کنترل‌کننده‌های طراحی شده براساس هر دو رویت‌گر، عملکرد مناسبی در حفظ جابجایی تایر، جابجایی تعلیق و ورودی کنترلی در محدوده مناسب خود ارائه دادند. با مقایسه شکل ۱۴-الف کنترل‌کننده طراحی شده براساس روش رویت‌گر حالت توسعه‌یافته عملکرد بهتری در کاهش شتاب بدنه ارائه نموده است. از آنجایی که در الگوریتم فیلتر کالمن از داده‌های شتاب به طور مستقیم استفاده می‌شود، در نتیجه خطای حسگرها مانند نویز و بایاس موجب ایجاد خطا در تخمین متغیرهای حالت و ورودی نامعلوم شده و عملکرد کنترل‌کننده را به نسبت دچار مشکل می‌نماید.



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.

۷- نتیجه‌گیری کلی

در این مقاله، الگوریتم رویت‌گر حالت توسعه‌یافته برای تخمین عدم قطعیت‌ها 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 شتاب‌سنج برای اندازه‌گیری شتاب عمودی جرم معلق و غیرمعلق بر روی دستگاه آزمایش نصب شده‌اند. همچنین، حسگرهای جابجایی اضافی نیز برای صحنه‌گذاری روش پیشنهادی استفاده شده‌اند. الگوریتم ارائه شده با آزمایش‌های مختلف تحت ورودی‌های جاده‌ی مختلف ارزیابی می‌شود. نتایج حاکی از کارایی رویت‌گر حالت توسعه‌یافته پیشنهادی در کاهش خطای تخمین در حضور منابع مختلف عدم قطعیت و اغتشاشات است. علاوه بر این، نتایج مقایسه‌ای با فیلتر کالمن با ورودی نامعلوم نشان دهنده دقت بالای رویت‌گر پیشنهادی در ساخت یک مدل دینامیکی قابل اعتماد برای سیستم تعلیق است. رویت‌گر حالت توسعه یافته از داده‌های شتاب سنج که توام با بایاس می‌باشد، بطور مستقیم استفاده نمی‌کند و خطاهای اندازه‌گیری شتاب بر خلاف فیلتر کالمن مستقیماً وارد تخمین نمی‌شود. ضمن اینکه ساختار این رویت‌گر در مقایسه با فیلتر کالمن با ورودی نامعلوم ساده‌تر بوده و تنظیم آن راحت‌تر است. دستگاه آزمایش بسیار مشابه به نمونه واقعی آن و در مقیاس صنعتی ساخته شده است. نحوه تعامل با خطاهای اندازه‌گیری در این مقاله برای تخمین دینامیک سیستم می‌تواند مبنای بسیاری از کارهای عملی و صنعتی دیگر باشد. در پایان نتایج، هر یک از رویت‌گرهای طراحی شده در ساختار یک سیستم تعلیق فعال با یک کنترل‌کننده بهینه غیرخطی قرار گرفت تا اهداف سیستم تعلیق را برآورده کرده و بدنه خودرو را از ناهمواری‌های جاده جدا نماید. نتایج شبیه‌سازی‌ها به صورت نرم‌افزار در حلقه در محیط متلب/آدامز، عملکرد مناسب‌تر کنترل‌کننده با رویت‌گر حالت توسعه یافته را نشان می‌دهند. به منظور پیشنهاد برای کارهای آینده می‌توان به توسعه این رویت‌گرها برای مدل کامل خودرو که در آن اثرات شاسی، میله موج‌گیر و دوران خودرو وجود دارد، اشاره نمود.

۸- فهرست علائم

علائم انگلیسی

C_1	ضریب میرایی، N/s
C_2	ضریب میرایی، N/s ²
f_s	نیروی فنر N
f_d	نیروی میراگر N
f_{st}	نیروی تایلر N
F_1	عدم قطعیت مدل
F_2	عدم قطعیت مدل
H_1	نرخ تغییر عدم قطعیت مدل
H_2	نرخ تغییر عدم قطعیت مدل
k_1	ضریب فنریت، N/m
k_2	ضریب فنریت، N/m ²
k_3	ضریب فنریت، N/m ³
k_{us}	ضریب فنریت تایلر، N/m
m_s	جرم معلق، kg
m_{us}	جرم غیرمعلق، kg
v	نویز اندازه‌گیری
w	نویز فرآیند
x_r	ورودی جاده، m
x_s	جابجایی جرم معلق، m
x_{us}	جابجایی جرم غیر معلق، m

علائم یونانی

Δt	ثابت زمانی، s
Δx	جابجایی تعلیق، m

زیرنویس

k	گام زمانی
-----	-----------

- [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 persian)
- [2] S. Aghasizade, M. Mirzaei, S. Rafatnia, Novel constrained control of active suspension system integrated with anti-lock 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 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 super-twisting 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.
- [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 fractional-order 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 backstepping-based 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.
- [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.
- [30] M. M. S. Arani, M. Mirzaei, A. A. Alvanagh, S.A. Shaarba, Identification of nonlinear model for elements of test rig of quarter car suspension system, Modares Mechanical Engineering 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.

۱۰- پیوست

در این بخش ماتریس‌هایی که در الگوریتم فیلتر کالمن توسعه یافته با ورودی نامعلوم مورد استفاده قرار می‌گیرند برای سیستم تعلیق محاسبه می‌شوند. \mathbf{f} تابع غیر خطی است که در سیستم تعلیق یک چهارم به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mathbf{f} = [x_2 \quad f_1 \quad x_4 \quad f_2 + d_1 x_r]^T. \quad (34)$$

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

$$\mathbf{F}_{k-1|k-1} = \frac{\partial \mathbf{f}_{k-1}}{\partial \mathbf{x}_{k-1}} = \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} (\Delta t \times \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{w}) + \mathbf{x}_{k-1}), \quad (35)$$

$$\mathbf{F}_{k-1|k-1} = \mathbf{I}_{ij} + \Delta t. [F_{ij}], (i = 1, \dots, 4), (j = 1, \dots, 4), \quad (36)$$

که در آن

$$F_{11} = 0, F_{12} = 1, F_{13} = 0, F_{14} = 0, \quad (37)$$

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

$$F_{22} = -\frac{1}{m_s} \left[c_1 + 2c_2(x_2 - x_4) \right],$$

$$F_{23} = -\frac{1}{m_s} \left[-k_1 - 2k_2(x_1 - x_3) - 3k_3(x_1 - x_3)^2 \right],$$

$$F_{24} = -\frac{1}{m_s} \left[-c_1 - 2c_2(x_2 - x_4) \right],$$

$$F_{31} = 0, F_{32} = 0, F_{33} = 0, F_{34} = 1,$$

$$F_{41} = \frac{1}{m_{us}} \left[k_1 + 2k_2(x_1 - x_3) + 3k_3(x_1 - x_3)^2 \right],$$

$$F_{42} = \frac{1}{m_{us}} \left[c_1 + 2c_2(x_2 - x_4) \right],$$

$$F_{43} = \frac{1}{m_{us}} \left[-k_1 - 2k_2(x_1 - x_3) - 3k_3(x_1 - x_3)^2 - k_{us} \right],$$

$$F_{44} = \frac{1}{m_{us}} \left[-c_1 - 2c_2(x_2 - x_4) \right].$$

ماتریس $\mathbf{B}_{k-1|k-1}^*$ در معادله (۲۲) به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\mathbf{B}_{k-1|k-1}^* = \Delta t \cdot [0 \quad 0 \quad 0 \quad d_1]^T. \quad (38)$$

تابع خروجی \mathbf{h} به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mathbf{h} = [x_s \quad \ddot{x}_s \quad x_{us} \quad \ddot{x}_{us}]^T = [x_1 \quad \dot{x}_2 \quad x_3 \quad \dot{x}_4]^T. \quad (39)$$

برای محاسبه $\mathbf{H}_{k|k-1}$ در معادله (۲۴)، داریم:

$$\mathbf{H}_{k|k-1} = [H_{ij}], (i=1, \dots, 4), (j=1, \dots, 4), \quad (40)$$

که در آن

$$H_{11} = 1, H_{12} = 0, H_{13} = 0, H_{14} = 0, \quad (41)$$

$$H_{21} = F_{21}, H_{22} = F_{22}, H_{23} = F_{22}, H_{24} = F_{24},$$

$$H_{31} = 0, H_{32} = 0, H_{33} = 1, H_{34} = 0,$$

$$H_{41} = F_{41}, H_{42} = F_{42}, H_{43} = F_{43}, H_{44} = F_{44}.$$

در نهایت، ماتریس $\mathbf{D}_{k|k-1}^*$ در معادله (۲۵) به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\mathbf{D}_{k|k-1}^* = [0 \quad 0 \quad 0 \quad d_1]^T. \quad (42)$$

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 Sisi¹, Mehdi Mirzaei¹, Sadra Rafatnia¹

^a Ph.D. Candidate, Faculty of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

^b Professor of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

^c Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

ABSTRACT

This paper presents the design and experimental implementation of the extended state observer (ESO) for a fabricated quarter-car suspension platform with a McPherson mechanism equipped with different sensors. This algorithm aims to estimate uncertainties and road input, and determines 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 as new state variables. Then, using data of sprung mass and unsprung mass displacements, these uncertainties and unknown inputs are estimated along with other state variables of the system. A nonlinear Kalman filter with unknown input is also designed to be compared with the ESO. The comparison results using the experimental data with measurement errors indicate the high accuracy of the ESO in constructing a precise dynamic model for the system. Meanwhile, the ESO uses fewer sensors and its regulation is easier. Both observers are used within the structure of 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 ESO.

KEYWORDS

Vehicle suspension system, Unknown road input, Extended state observer, Unknown input Kalman filter, Optimal Nonlinear Control.

¹ mirzaei@sut.ac.ir