



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

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

مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران.

تاریخچه داوری:

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

کلمات کلیدی:

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

خلاصه: در این مقاله به طراحی و پیاده‌سازی عملی رویت گر حالت توسعه یافته بر روی دستگاه آزمایش سیستم تعلیق یک چهارم خودرو با مکانیزم مک فرسون در مقیاس واقعی و مجهز به حسگرهای متعدد پرداخته می‌شود. هدف این الگوریتم، تخمین عدم قطعیت‌های مدل و ورودی نامعلوم جاده است که منجر به تعیین یک مدل دینامیکی دقیق برای سیستم تعلیق می‌گردد. در این روش، جمله‌هایی که شامل عدم قطعیت‌های مدل و ورودی‌های نامعلوم جاده است، به عنوان متغیرهای حالت جدید به سیستم اضافه شده و با استفاده از داده‌های مربوط به جابجایی‌های جرم معلق و غیرمعلق تخمین زده می‌شوند. در ادامه به طراحی یک فیلتر کالمن غیرخطی با ورودی نامعلوم جهت مقایسه با رویت گر حالت توسعه یافته پرداخته می‌شود. نتایج آزمایشگاهی با داده‌های واقعی که توأم با خطاهای اندازه‌گیری است، حاکی از دقت بالاتر رویت گر حالت توسعه یافته در ایجاد یک مدل دینامیکی قابل اعتماد برای سیستم می‌باشد. ضمن اینکه ساختار این رویت گر در مقایسه با فیلتر کالمن با ورودی نامعلوم ساده‌تر بوده و تنظیم آن راحت‌تر است و از تعداد خروجی‌های کم‌تری استفاده می‌کند. هر یک از رویت‌گرهای طراحی شده در ساختار یک سیستم کنترل تعلیق فعال با کنترل کننده بهینه غیرخطی استفاده می‌شود تا اهداف سیستم تعلیق را برآورده نماید. نتایج شبیه‌سازی‌ها به صورت نرم‌افزار در حلقه در محیط متلب/آدامز، عملکرد مناسب‌تر کنترل کننده با رویت گر حالت توسعه یافته را نشان می‌دهند.

۱- مقدمه

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

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 زاوای نصب اجزاء و همچنین تغییرات پارامترهای سیستم مانند تغییر جرم معلق در شرایط مختلف از عوامل مهم در عدم دقت مدل‌های ریاضی از پیش تعیین شده

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mirzaei@sut.ac.ir

1 Profilograph

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.



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

استفاده از روی‌گر 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 روی‌گر 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 یک‌چهارم خودرو [۱۷]، نصف خودرو [۱۸، ۱۹] و تمام خودرو [۲۰، ۲۱] از دیگر موارد استفاده از روی‌گر 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 آن‌که 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 روی‌گر را با مشکل مواجه می‌سازد و باعث افزایش خطای تخمین می‌شود و از سوی دیگر با توجه به اینکه کنترل‌کننده برای حذف اثرات نامطلوب ناشی از ناهمواری جاده و بهبود عملکرد سیستم تعلیق به مقدار آن در هر لحظه نیاز دارد، عملکرد کنترل‌کننده را نیز با مشکل مواجه می‌سازد. از این رو روی‌گر 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

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^۱ به تخمین ورودی جاده پرداخته شده است. در مرجع [۱۱] بر اساس روی‌گر 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 فرایپچی^۲ و با فرض جابجایی جرم معلق و سرعت جرم غیرمعلق به عنوان خروجی، ورودی نامعلوم جاده تخمین زده شده است. با بررسی منابع فوق، ترکیب‌های مختلفی از حسگرها به عنوان خروجی استفاده شده است که در عمل دسترسی به این داده‌ها مقرون به صرفه نیست و یا در برخی موارد غیرممکن است. از سوی دیگر در تمامی روش‌های فوق، هدف تخمین ورودی جاده بوده و 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

1 Adaptive neuro fuzzy interface system (ANFIS)
2 Super twisting

دامنه وسیعی از فرکانس‌های ورودی جاده، استفاده از سیستم تعلیق فعال است. در این نوع سیستم تعلیق با استفاده از اطلاعات حاصل از ارتعاش بدنه، استراتژی مناسب کنترلی اعمال می‌شود. روش‌های کنترلی متفاوتی مانند کنترل کننده بازگشت به عقب [۲۳]، کنترل کننده مود لغزشی تطبیقی [۲۴]، کنترل کننده مود لغزشی فازی [۲۵] توسط پژوهشگران برای سیستم تعلیق فعال ارائه شده است. در این مقاله، بعد از تخمین عدم قطعیت‌ها و ورودی نامعلوم جاده و دستیابی به مدل دینامیکی دقیقی از سیستم تعلیق یک‌چهارم خودرو، هر کدام از رویت‌گرها 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 یک‌چهارم خودرو که توسط هر یک از رویت‌گرها برورسانی شده است استفاده می‌کند. روش کنترلی مذکور بدون استفاده از رویت‌گر 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 می‌شود. در بخش ۴ الگوریتم رویت‌گر حالت توسعه یافته برای تخمین عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات خارجی توضیح داده شده و در بخش ۵ الگوریتم فیلتر کالمن توسعه یافته مبتنی بر ورودی نامعلوم ارائه می‌شود. نتایج شبیه‌سازی و عملی در بخش ۶ ارائه شده و در نهایت، نتیجه‌گیری کلی در بخش ۷ ارائه می‌شود.

۲- ساختار کلی الگوریتم پیشنهادی

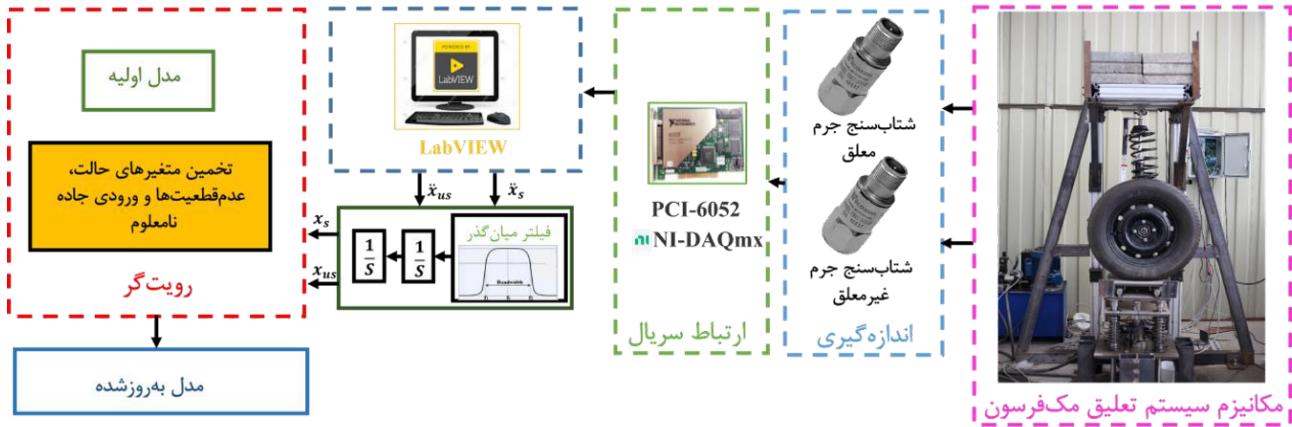
شکل ۱ نمای کلی الگوریتم رویت‌گر پیشنهادی در این مقاله را نشان می‌دهد. دستگاه آزمایش مورد استفاده، سیستم تعلیق یک‌چهارم خودرو براساس مکانیزم مک‌فرسون بوده و شامل ابعاد و المان‌های تعلیق یک خودروی سمند است. شتاب‌سنج‌ها بر روی جرم معلق و غیرمعلق نصب شده‌اند تا شتاب‌های عمودی آن‌ها را اندازه‌گیری کنند. از یک کارت داده شرکت نشنال اینسترومنت^۱ برای دریافت داده‌های حسگرها استفاده می‌شود. شایان ذکر است، نرم افزار لب‌ویو^۲ به عنوان نرم‌افزار رابط بین دستگاه آزمایش و رایانه در نظر گرفته شده است. الگوریتم رویت‌گر پیشنهادی عدم قطعیت‌ها بین مدل اولیه و مدل واقعی و ورودی جاده را تخمین می‌زند. این نکته لازم به ذکر است که جابجایی جرم معلق و غیرمعلق به دلیل خطاهای موجود در حسگرهای شتاب، با دوبار انتگرال‌گیری از داده‌های

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 انتگرال‌گیری 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 رویت‌گر 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 اولیه 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 یک‌چهارم 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 الکتروهیدرولیکی 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 توسعه یافته 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 تیر 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

1 National Instrument

2 LabView



شکل ۱. ساختار کلی الگوریتم پیشنهادی

Fig. 1. Overall structure of the proposed method

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

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

نشان‌دهنده ثوابت فنر و k_i ($i=1,2,3$) ثوابت میرایی میراگر هستند. نیروی تاپر نیز به صورت زیر قابل محاسبه است:

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

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

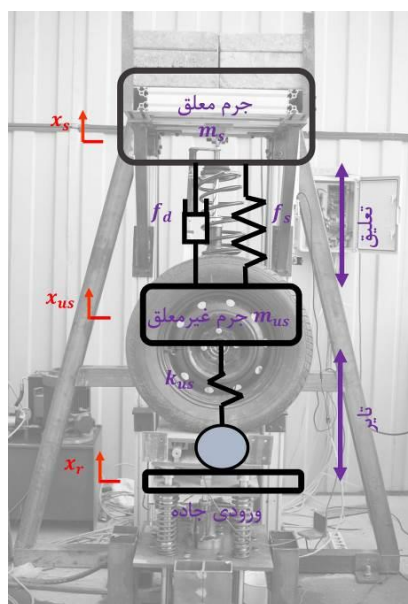
شتاب فیلترشده توسط یک فیلتر میان‌گذر با فرکانس قطع مناسب به دست آمده و در الگوریتم پیشنهادی مورد استفاده قرار می‌گیرند. جزئیات بیشتر در مورد الگوریتم رویت‌گر در ادامه ارائه خواهد شد.

۳- مدل یک‌چهارم سیستم تعلیق خودرو

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

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

که در آن m_{us} و m_s به ترتیب جرم معلق و جرم غیرمعلق را نشان می‌دهند. 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 می‌شوند. u نیروی عملگر بوده و f_{st} نیروی تاپر مدل شده به شکل فنر را



شکل ۲. مدل یک چهارم سیستم تعلیق خودرو.

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

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

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

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

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

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 رویه‌گر حالت توسعه یافته به روزرسانی می‌شود. در طراحی این رویه‌گر از جابجایی جرم معلق و غیرمعلق به عنوان خروجی قابل اندازه‌گیری سیستم استفاده می‌گردد.

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

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

۴- طراحی رویه‌گر حالت توسعه یافته

در این بخش، برای دستیابی به مدل دینامیکی دقیق سیستم تعلیق خودرو و تخمین عدم قطعیت‌های مدل و ورودی‌های نامعلوم، رویه‌گر حالت

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

بردارهای $L_r = [\beta_r \ \beta_\delta \ \beta_\epsilon]^T$ و $L_1 = [\beta_1 \ \beta_r \ \beta_\epsilon]^T$ 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_r 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 $\beta_1 = \beta_r = 3/\epsilon$ ، $\beta_r = \beta_\delta = 3/\epsilon^2$ و $\beta_\epsilon = 1/\epsilon^3$ انتخاب شوند و ϵ یک پارامتر آزاد مثبت باشد، با فرض محدود بودن H_r و H_1 ، دینامیک خطای تخمین محدود خواهد بود.

اثبات: با انتخاب ضرایب به صورت $\beta_1 = \beta_r = 3/\epsilon$ ، $\beta_r = \beta_\delta = 3/\epsilon^2$ و $\beta_\epsilon = 1/\epsilon^3$ ، معادلات دینامیک خطای مربوط به رویت‌گر برای هر زیرسیستم 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 $\tilde{\mathbf{z}}_1 = [\tilde{z}_1 \ \tilde{z}_2 \ \tilde{z}_3]^T$ و $\mathbf{G} = \begin{bmatrix} -3/\epsilon & 1 & 0 \\ -3/\epsilon^2 & 0 & 1 \\ -1/\epsilon^3 & 0 & 0 \end{bmatrix}$

است. سه مقدار ویژه ماتریس

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 $F_r = f_r + d_r x_r$ و $F_1 = f_1$ می‌باشد. بدین ترتیب مدل فضای حالت برای زیرسیستم‌های معادله (۱) با اضافه شدن متغیرهای حالت جدید به صورت زیر توسعه داده می‌شود:

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

که در آن

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

$$\mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ m_{us} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = [1 \ 0 \ 0],$$

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:

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

که $\mathbf{z}_r = [z_r \ z_\delta \ z_\epsilon]^T$ و $\mathbf{z}_1 = [z_1 \ z_2 \ z_3]^T$ بردارهای حالت رویت‌گر هستند و ضرایب رویت‌گر طراحی شده به صورت

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:

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

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

از مساوی صفر قراردادن چندجمله‌ای مشخصه G $-\frac{1}{\varepsilon}$ بدست می‌آیند. بنابراین، برای یک مقدار مناسب و مثبت ε ، ماتریس G هرویتز 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:

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

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:

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

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 توسعه یافته در نظر گرفته شده است [۲۶-۲۸].

ملاحظه ۱: سرعت پاسخ‌های رویت‌گر حالت توسعه یافته 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 $\tilde{\mathbf{z}}_i^{ss} = [\varepsilon^\top H_i \quad 3\varepsilon^\top H_i \quad 3\varepsilon H_i]^\top$ ($i=1,2$) محاسبه می‌شوند. ملاحظه می‌گردد خطای حالت ماندگار رویت‌گر حالت توسعه یافته 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.

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

که در آن

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

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

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 $k = 0$

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_{00} &= E[\mathbf{x}_0], \\ \hat{\mathbf{u}}_0^* &= E[\mathbf{u}_0^*], \\ \mathbf{P}_{0|0} &= E[(\mathbf{x}_0 - \hat{\mathbf{x}}_{0|0})(\mathbf{x}_0 - \hat{\mathbf{x}}_{0|0})^T], \\ \mathbf{S}_0 &= E[(\mathbf{u}_0^* - \hat{\mathbf{u}}_0^*)(\mathbf{u}_0^* - \hat{\mathbf{u}}_0^*)^T], \end{aligned} \quad (26)$$

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

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

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 Q و R هستند. انتخاب Q و R مناسب در طراحی این الگوریتم بسیار مهم است [۹].

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 $\mathbf{w}_{k-1} = 0$ بسط داده می‌شوند:

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

که در آن

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

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

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

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

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

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

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

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].

$\hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}$ 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 \mathbf{Q}_{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 [۲۹]:

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

در مرحله اول، الگوریتم فیلتر کالمن 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 کوواریانس 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 کوواریانس $\mathbf{P}_{k-1|k-1}$ 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.

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 [۲۹]:

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

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

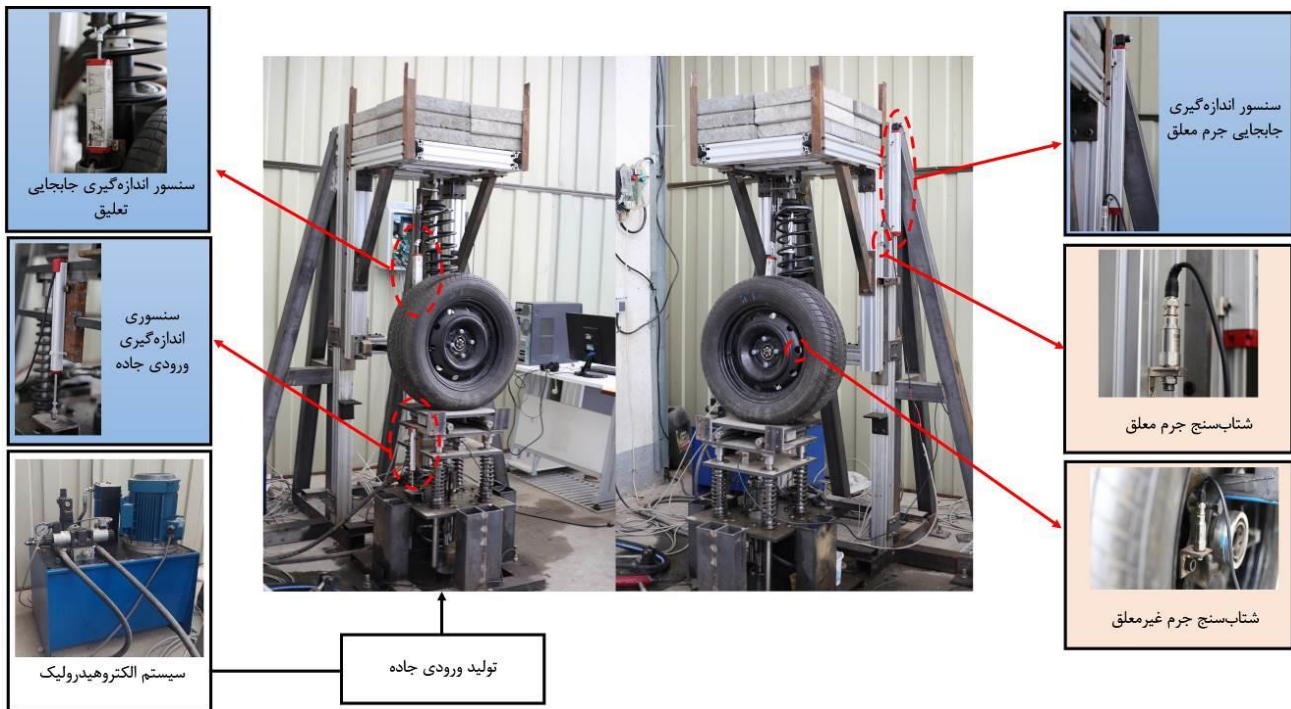
مرحله پنجم: به‌روزرسانی

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:

برای پیاده‌سازی این الگوریتم، ورودی نامعلوم باید در معادله (۱۹) وجود داشته باشد، به عبارتی $B^* \neq 0$. 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 $D^* = 0$ 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 رویتگر حالت توسعه‌یافته پیشنهادی و مقایسه آن با فیلتر کالمن با ورودی نامعلوم استفاده می‌شود. در روش پیشنهادی، عدم قطعیت‌های مدل و اغتشاشات سیستم توسط رویتگر



شکل ۳. ساختار آزمایشگاهی سیستم تعلیق یک چهارم خودرو.

Fig. 3. Experimental platform of a quarter suspension system.

می باشد، که در شکل ۳ نشان داده شده است. در این ساختار از یک سیستم الکترو هیدرولیکی برای تولید ورودی جاده استفاده می شود. دو شتاب سنج ویلکوکسون^۳ برای اندازه گیری شتابهای عمودی جرم معلق و غیرمعلق با فرکانس ۱۰۰ هرتز تعبیه شده است. علاوه بر این، از سه حسگر اندازه گیری جابجایی اوپکون^۴ برای اندازه گیری جابجایی تعلیق و جابجایی جرم معلق و ورودی جاده با همان فرکانس استفاده شده است. توجه داشته باشید که داده های خطکش اهمی نصب شده روی دستگاه آزمایش فقط برای اعتبارسنجی استفاده می شوند و در الگوریتم تخمین بدلیل عدم امکان استفاده در خودروی واقعی به کار گرفته نمی شوند. داده های اندازه گیری شده از طریق کارت داده شرکت نشنال اینسترومنت به نرم افزار لیبویو ارسال می شوند. در نتیجه، داده های شتاب سنج برای تخمین حالتها، عدم قطعیتها و ورودی جاده نامعلوم استفاده می شوند.

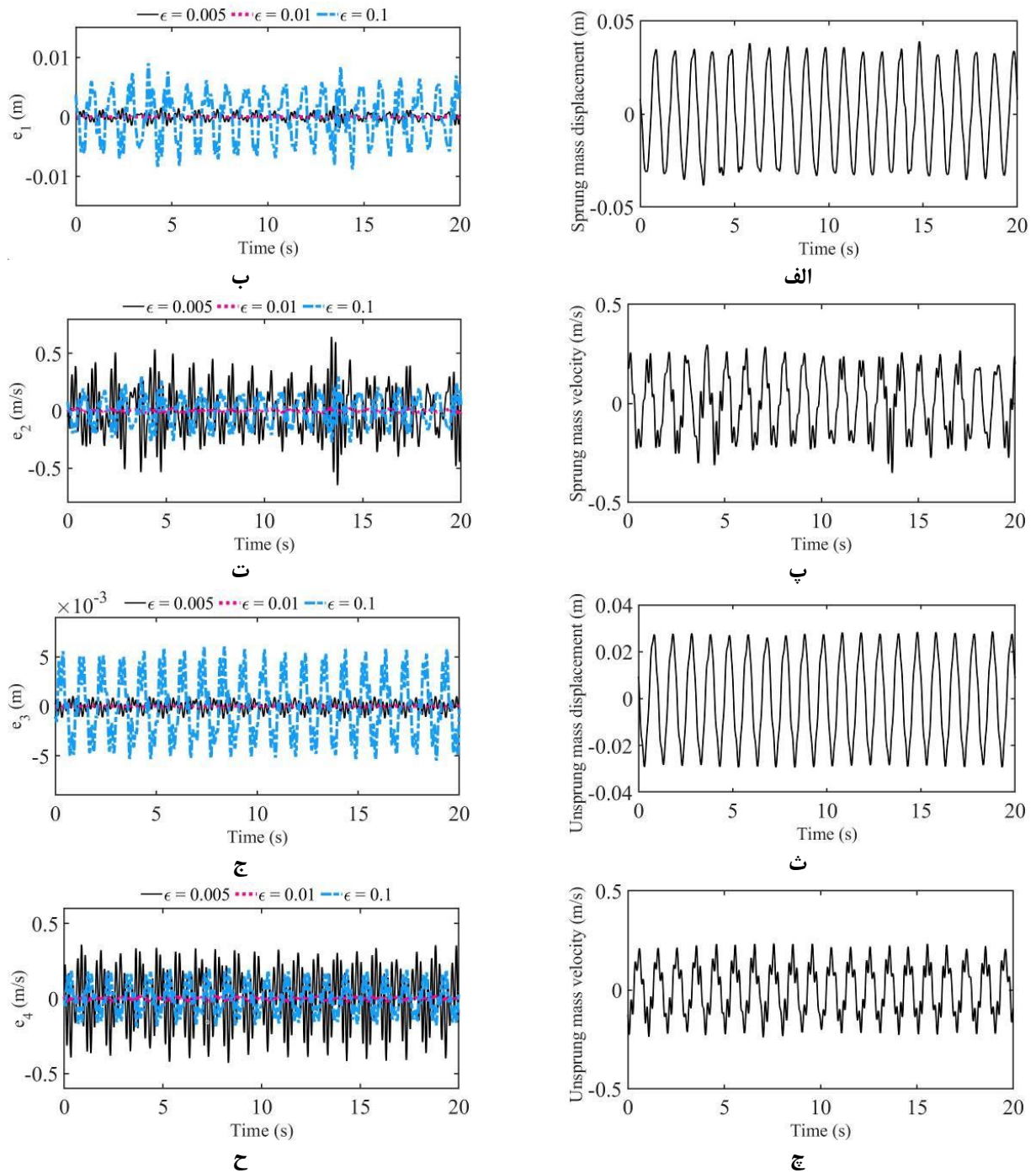
نتایج تخمین رویت گر حالت توسعه یافته پیشنهادی برای سه مقدار ε در شکل ۴ نشان داده شده است. با بررسی شکل ۴، مقدار $\varepsilon = 0.1$ بهترین عملکرد را در تخمین جابجاییها و سرعتهای جرم معلق و غیرمعلق ارائه

تخمین زده می شوند. خروجی های مورد نیاز برای تخمین، فقط جابجایی های جرم معلق و غیرمعلق هستند. همچنین، پاسخ های تخمین زده شده با داده های اندازه گیری شده توسط حسگرهای اضافی نصب شده بر روی دستگاه آزمایش مورد ارزیابی قرار می گیرند. در ادامه، نتایج این روش با الگوریتم فیلتر کالمن غیرخطی با ورودی نامعلوم، مقایسه می شوند. در بخش دوم نتایج کنترل به صورت نرم افزار در حلقه با استفاده از نرم افزارهای متلب^۱/آدامز^۲ ارائه می شود. در این بخش مدل واقعی در نرم افزار آدامز طراحی شده و کنترل کننده با استفاده از حالتها و ورودی جاده تخمین زده شده برای سیستم تعلیق یک چهارم، نیروی فعال مورد نیاز را محاسبه می کند. در کنترل کننده سیستم تعلیق فعال، قیود حالت و ورودی با تنظیم ضرایب وزنی ارضا می گردند. در نهایت نتایج سیستم تعلیق غیرفعال و فعال مبتنی بر دو نوع رویت گر مقایسه خواهند شد.

۶-۱ نتایج حاصل از داده های آزمایشگاهی برای ارزیابی عملکرد رویت گرها دستگاه آزمایش ساخته شده، یک سیستم تعلیق با مکانیزم مک فرسون

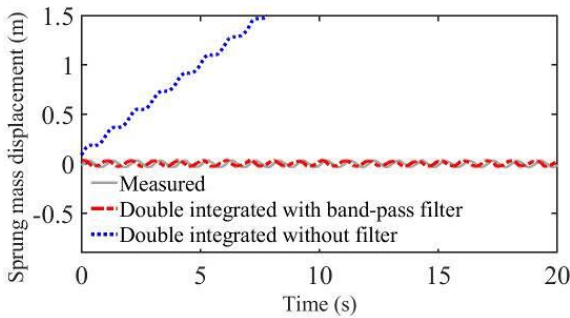
3 Wilcoxon
4 Opkon

1 MATLAB®
2 Adams

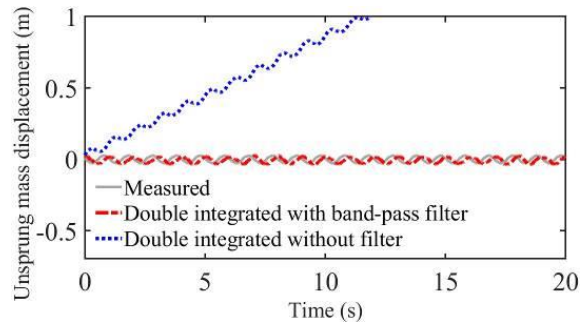


شکل ۴. مقایسه‌ی نتایج روش پیشنهادی برای مقادیر مختلف در آزمایش ۱، (الف) جابجایی جرم معلق، (ب) خطای تخمین جابجایی جرم معلق ($e_1 = \tilde{z}_1$)، (پ) سرعت جرم معلق، (ت) خطای تخمین سرعت جرم معلق ($e_2 = \tilde{z}_2$)، (ث) جابجایی جرم غیر معلق، (ج) خطای تخمین جابجایی جرم غیر معلق ($e_3 = \tilde{z}_3$)،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

Fig. 4. Comparative results for the proposed method for different values of ϵ 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 $e_4 = \tilde{z}_4$.



ب



الف

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.

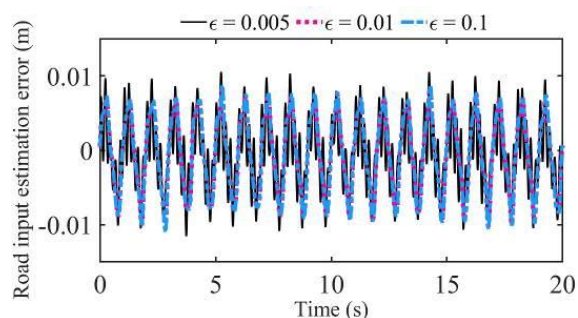
جاده سینوسی نشان داده شده در شکل ۶- الف تحریک شده است. خطای تخمین ورودی جاده که در شکل ۶- ب نشان داده شده است، دقت روش پیشنهادی در تخمین عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات سیستم را نشان می‌دهد. این نکته لازم به ذکر است که پارامترهای سیستم برای کاهش عدم تطابق بین مدل ریاضی تعلیق و سیستم واقعی قبلاً شناسایی شده‌اند.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

زمانی که عدم قطعیت‌های سیستم توسط رویه‌گر حالت توسعه یافته تخمین زده می‌شوند، در واقع سیستم اولیه به روزرسانی می‌شود. این نکته لازم به ذکر می‌باشد که در طراحی رویه‌گر، 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 کنترل کننده موجب کاهش عملکرد کنترل کننده مبتنی بر مدل می‌شود. در روش رویه‌گر حالت توسعه یافته در هر لحظه این نامعینی‌ها و اغتشاشات بر اساس خروجی‌های مدل واقعی تخمین زده شده و به دینامیک اولیه وارد می‌شوند تا بتوان دینامیک را به روزرسانی نمود و عملکرد کنترل کننده را بهبود

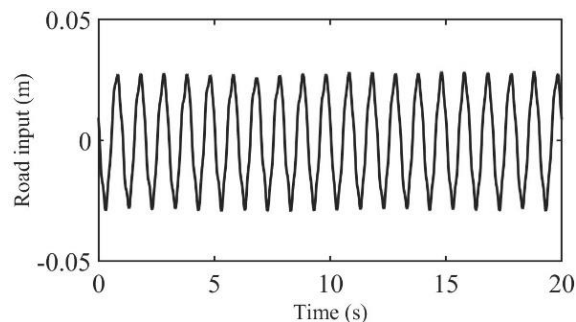
می‌دهد. برای مقادیر بزرگ‌تر ε سرعت پاسخ‌دهی کاهش می‌یابد و برای مقادیر کوچک‌تر با وجود پاسخ‌های سریع‌تر، حساسیت به نویز اندازه‌گیری و در نتیجه خطاهای مدل‌سازی افزایش می‌یابد.

همانطور که ذکر شد، از داده‌های جابجایی جرم معلق و غیرمعلق در رویه‌گر 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 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 رویه‌گر به دست آورد.

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



ب



الف

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

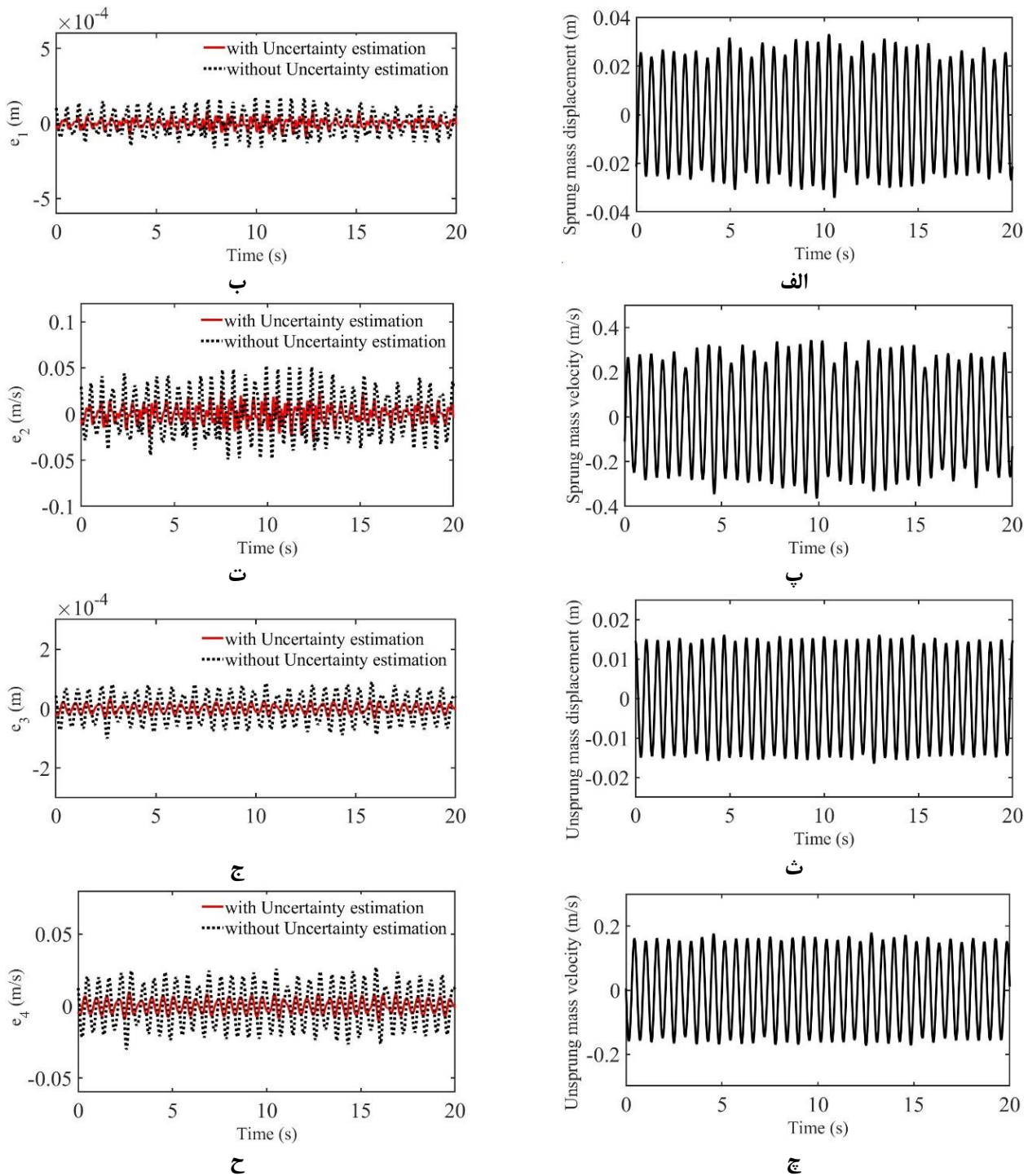
Fig. 6. (a) Road input, (b) Road input estimation error in test-1.

تخمین ورودی جاده و سایر حالت‌ها و عدم قطعیت‌های سیستم استفاده می‌کند. از آنجایی که جابجایی‌ها را نمی‌توان به طور مستقیم اندازه‌گیری کرد، همانند الگوریتم پیشنهادی، با دو بار انتگرال‌گیری از سیگنال‌های شتاب فیلتر شده با فرکانس قطع مناسب می‌توان به داده‌های جابجایی واقعی دست یافت. هر دو رویکرد از مدل اولیه و شرایط اولیه یکسان استفاده می‌کنند. لازم به ذکر است که عملکرد الگوریتم فیلتر کالمن مبتنی بر ورودی نامعلوم ارتباط قابل توجهی با انتخاب مناسب ماتریس کوواریانس سیستم و نویزهای اندازه‌گیری 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 اندازه‌گیری با آزمون و خطا تنظیم می‌شوند تا دقت الگوریتم فیلتر کالمن با ورودی نامعلوم را بهبود بخشد. در این راستا، به دلیل خطاهای اندازه‌گیری شتاب‌سنج‌ها، تخمین‌گر باید بر روی اندازه‌گیری جابجایی تمرکز کند تا اثرات شتاب را کاهش دهد. بنابراین، مقادیر کوواریانس جابجایی در تخمین‌گر بسیار کوچک‌تر انتخاب می‌شوند، 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 می‌یابد. مطابق شکل ۹، روش پیشنهادی در کاهش خطای تخمین در مقایسه با فیلتر کالمن با ورودی نامعلوم کارآمدتر است.

بخشید. از سوی دیگر با توجه به اینکه دینامیک به روزرسانی شده نزدیک به مدل واقعی می‌گردد، با حل دینامیک به روزرسانی 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 به روز شده در کاهش خطای تخمین بسیار بهتر از رویکرد بدون به روزرسانی مدل است. همچنین، مدل به روز 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.

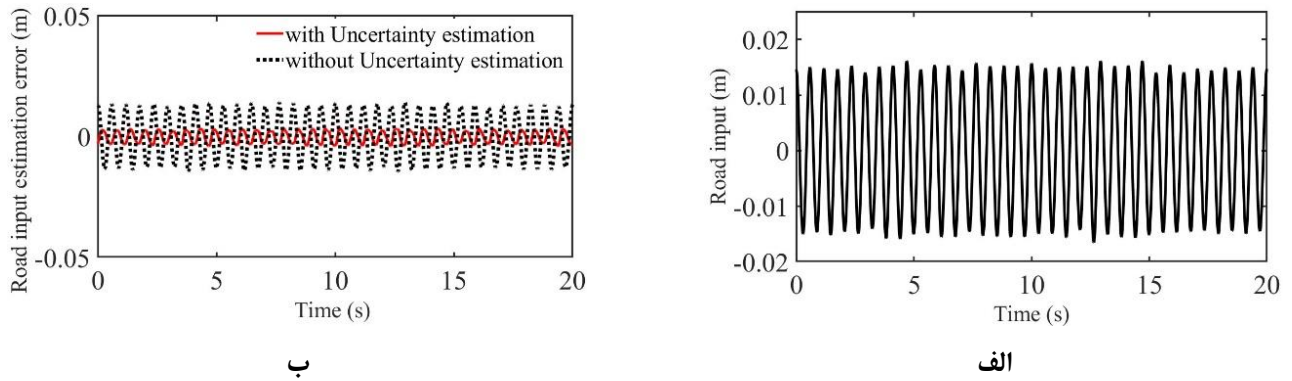
در آزمایش ۲ سیستم تعلیق با ورودی جاده شبه تصادفی مطابق شکل ۸-الف تحریک شده است. شکل ۸-ب نشان می‌دهد که زمانی که مدل اولیه به روزرسانی شده و عدم قطعیت‌ها تخمین زده می‌شوند، خطای تخمین ورودی جاده کم‌تر و تخمین دقیق‌تر است.

برای مقایسه عملکرد رویکرد حالت توسعه‌یافته پیشنهادی با سایر رویکردها، نتایج به دست آمده با روش فیلتر کالمن با ورودی نامعلوم که در بخش ۵ توضیح داده شده است، مقایسه می‌شوند. روش مقایسه‌ای از شتاب و جابجایی جرم‌های معلق و غیرمعلق به عنوان خروجی سیستم برای



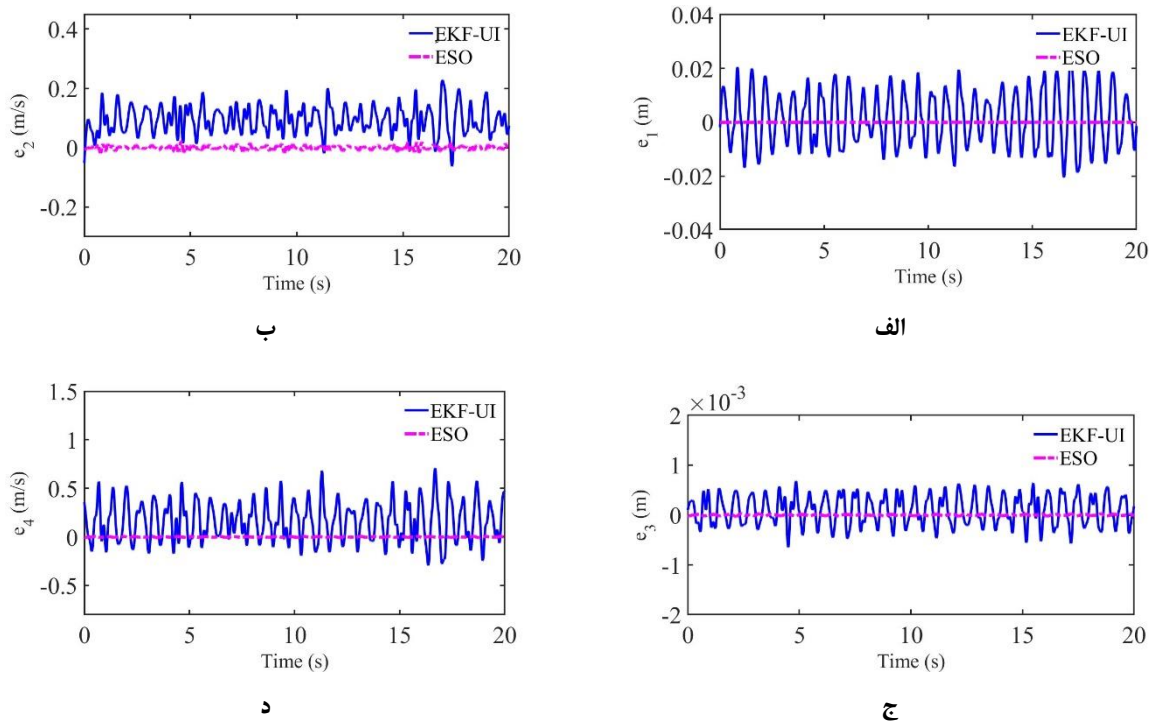
شکل ۷. مقایسه‌ی نتایج روش پیشنهادی با و بدون به‌روزرسانی در آزمایش ۲، (الف) جابجایی جرم معلق، (ب) خطای تخمین جابجایی جرم معلق ($e_1 = \tilde{z}_1$)، (پ) سرعت جرم معلق، (ت) خطای تخمین سرعت جرم معلق ($e_2 = \tilde{z}_2$)، (ث) جابجایی جرم غیر معلق، (ج) خطای تخمین جابجایی جرم غیر معلق ($e_3 = \tilde{z}_3$)، (چ) سرعت جرم غیر معلق، (ح) خطای تخمین سرعت جرم غیر معلق ($e_4 = \tilde{z}_4$)، (د) خطای تخمین سرعت جرم غیر معلق ($e_5 = \tilde{z}_5$).

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 $e_4 = \tilde{z}_4$.



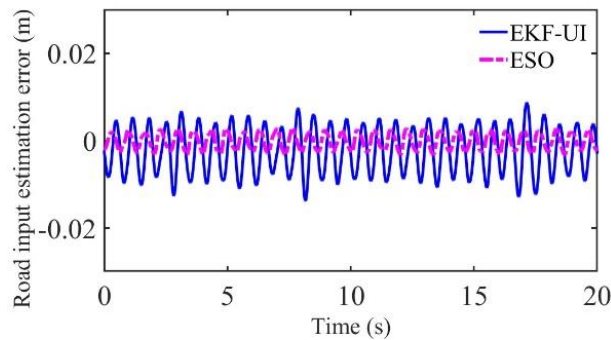
شکل ۸. الف) ورودی جاده، ب) خطای تخمین ورودی جاده در آزمایش ۲.

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



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

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

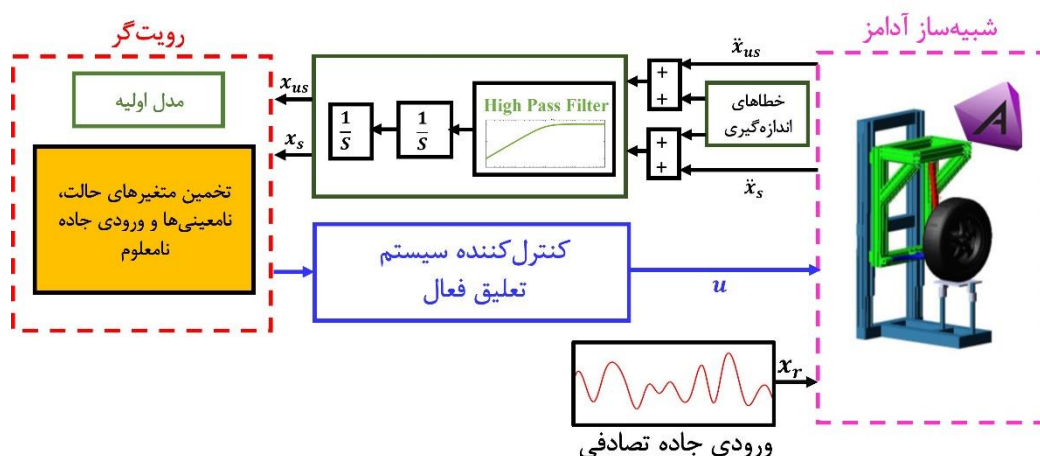
شده و در کنترل کننده استفاده می‌گردد.

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

هدف اصلی از طراحی کنترل کننده سیستم تعلیق، کاهش شتاب وارد

۶-۲ نتایج ارزیابی سیستم کنترلی تعلیق فعال مبتنی بر رویت‌گر

در این بخش نتایج ارزیابی سیستم کنترل تعلیق فعال مبتنی بر هر کدام از رویت‌گرها به صورت شبیه‌سازی نرم‌افزار در حلقه در محیط متلب/آدامز ارائه می‌شود. برای این منظور یک کنترل کننده بهینه غیرخطی مبتنی بر هر کدام از رویت‌گرها برای برقراری تعادل بین اهداف متضاد سیستم تعلیق طراحی می‌شود. در کنار مهم‌ترین هدف سیستم کنترلی که عبارت از کاهش شتاب بدنه و ایجاد راحتی سفر می‌باشد، جابجایی تعلیق و جابجایی تایر نیز باید در محدوده‌ی مناسب تحت ورودی‌های جاده نامعلوم قرار گیرد. در سیستم تعلیق فعال، این اهداف با استفاده از نیروی عملگر محدود برآورده می‌شوند. در روش کنترلی استفاده شده، ابتدا یک شاخص عملکرد شبه نقطه‌ای به صورت ترکیب وزن‌داری از پاسخ‌های پیش‌بینی شده‌ی سیستم تعلیق و سیگنال کنترلی تعریف می‌شود. سپس با کمینه کردن این معیار عملکرد، قانون کنترلی برای لحظه کنونی بدست می‌آید. کنترل کننده مذکور توسط نویسندگان در مراجع [۴، ۳۱، ۳۲] برای سیستم تعلیق فعال بدون استفاده از رویت‌گر و با فرض شرایط ایده‌آل طراحی شده است. در این مقاله، روش فوق مبتنی بر مدل تخمین زده شده توسط هر کدام از رویت‌گرها پیاده‌سازی می‌شود. در واقع هر کدام از رویت‌گرها، عدم قطعیت‌های مدل و ورودی نامعلوم جاده را تخمین زده و در اختیار کنترل کننده قرار می‌دهند. جزئیات مربوط به طراحی کنترل کننده در مراجع [۴، ۳۱-۳۳] وجود دارند با این تفاوت که در این مقاله اطلاعات نامعلوم توسط رویت‌گرها تخمین زده



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

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

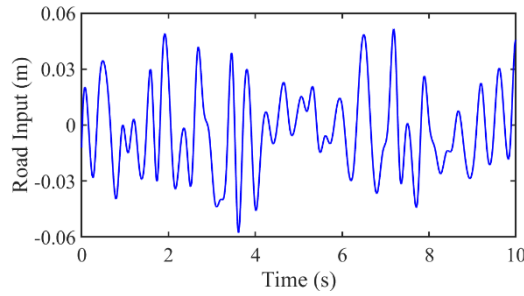
جدول ۱. پارامترهای شناسایی شده مدل طراحی.

Table 1. Identified parameters of the design model.

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

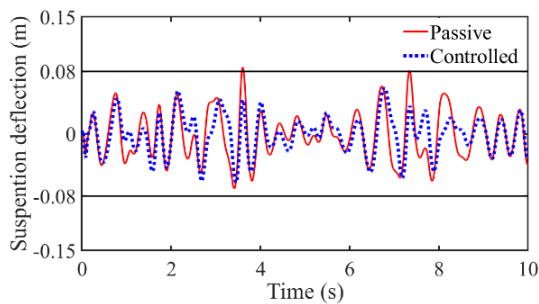
کنترلی انجام می‌گیرد. به منظور ارزیابی کنترل کننده از یک ورودی جاده تصادفی که در شکل ۱۲ ارائه شده است، استفاده می‌شود. نتایج کنترل کننده براساس رویت گر حالت توسعه یافته در مقایسه با سیستم تعلیق غیرفعال در شکل ۱۳ نشان داده شده است. براساس نمودار ۱۳-الف سیستم تعلیق فعال با کنترل کننده پیشنهادی عملکرد مطلوبی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

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

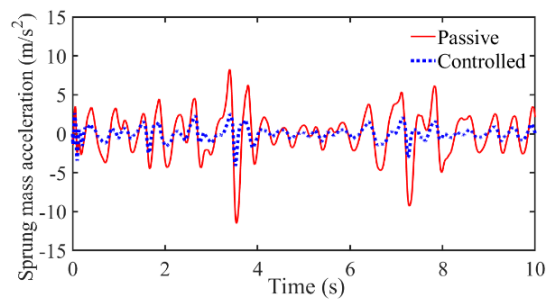


شکل ۱۲. ورودی جاده تصادفی.

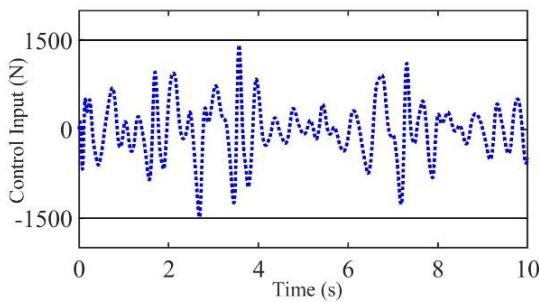
Fig. 12. Random road input.



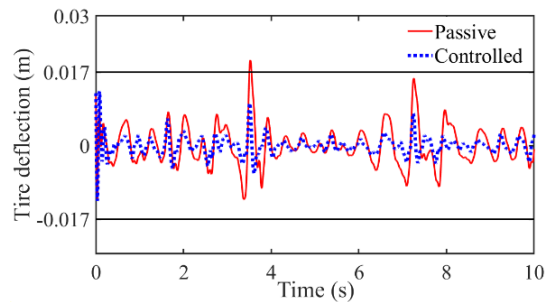
ب



الف



د



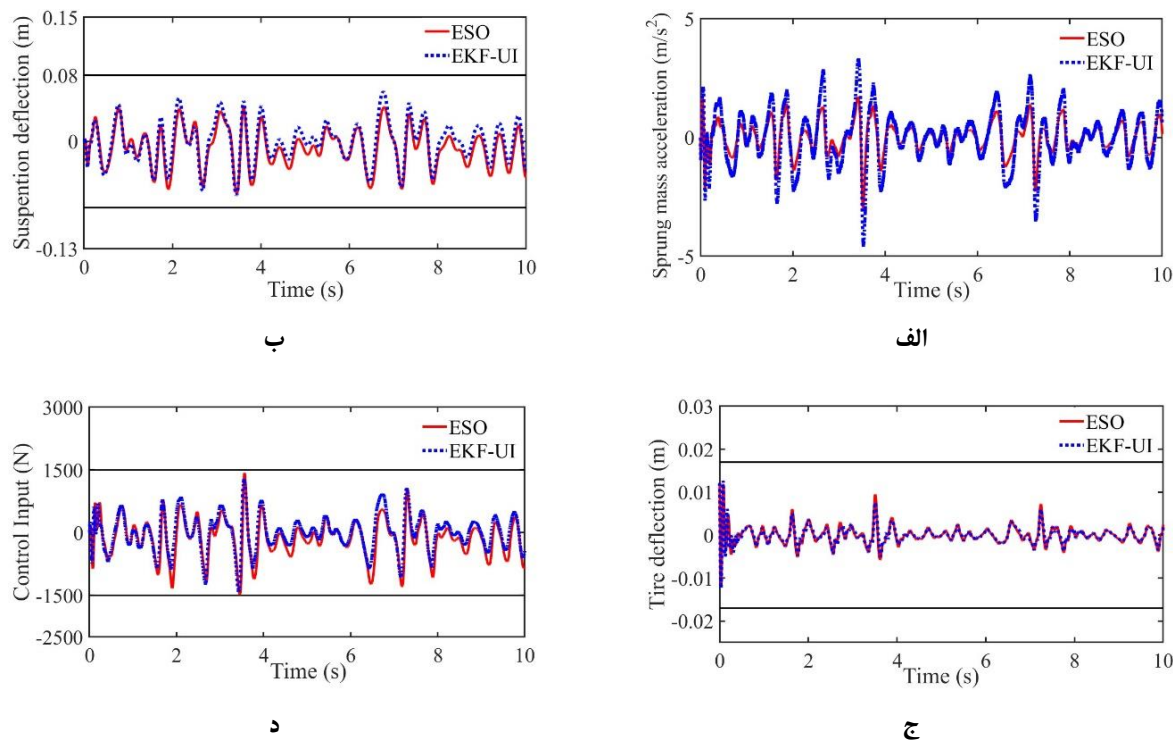
ج

شکل ۱۳. مقایسه‌ی نتایج پاسخ‌های سیستم تعلیق فعال مبتنی بر روی‌نگر 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

سرنشین از خود نشان داده است. در نمودارهای ۱۳-ب و ۱۳-ج جابجایی تایر و جابجایی تعلیق نشان داده شده است که در محدوده‌ی مناسبی قرار دارند. در حالیکه در سیستم تعلیق غیرفعال جابجایی تعلیق و تایر از محدوده مجاز خود خارج شده‌اند. همچنین براساس نمودار ۱۳-د ورودی کنترلی در محدوده عملکردی مناسب قرار گرفته است.



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

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

بر روی دستگاه آزمایش نصب شده‌اند. همچنین، حسگرهای جابجایی اضافی نیز برای صحه‌گذاری روش پیشنهادی استفاده شده‌اند. الگوریتم ارائه شده با آزمایش‌های مختلف تحت ورودی‌های جاده‌ی مختلف ارزیابی می‌شود. نتایج حاکی از کارایی 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 شتاب‌سنج که توأم 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

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.

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

علائم یونانی

Δt	ثابت زمانی، S
Δx	جابجایی تعلیق، m

زیرنویس

k	گام زمانی
-----	-----------

منابع

- [1] Z. Z Ahangari Sisi, M. Mirzaei, S. Rafatnia, B. Alizadeh, Design of a constrained nonlinear controller using firefly algorithm for active suspension system, Journal of Computational Methods in Engineering, 39(2) (2022) 23-44. (in persion)
- [2] S. Aghasizade, M. Mirzaei, S. Rafatnia, Novel constrained control of active suspension system integrated with 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

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 تایر 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 تایر، 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

- [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.
- 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. Kleinstueber, Vehicle mass estimation based on vehicle vertical dynamics using a multi-model filter, in: *17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, IEEE, 2014, pp. 2041-2046.
- [15] G. Wang, M. Chadli, M.V. Basin, Practical terminal sliding mode control of nonlinear uncertain active suspension systems with adaptive disturbance observer, *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*, 26(2) (2020) 789-797.

- [30] M. M. S. Arani, M. Mirzaei, A. A. Alvanagh, S.A. Shaarabaf, 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.
- [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.

پیوست

در این بخش ماتریس‌هایی که در الگوریتم فیلترکالمن توسعه یافته با ورودی نامعلوم مورد استفاده قرار می‌گیرند برای سیستم تعلیق محاسبه می‌شوند. \mathbf{f} تابع غیرخطی 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:

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

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

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

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

$$\begin{aligned}
 F_{22} &= -\frac{1}{m_s} [c_1 + 2c_2(x_2 - x_4)], \\
 F_{23} &= -\frac{1}{m_s} [-k_1 - 2k_2(x_1 - x_3) - 3k_3(x_1 - x_3)^2], \\
 F_{24} &= -\frac{1}{m_s} [-c_1 - 2c_2(x_2 - x_4)], \\
 F_{31} &= 0, F_{32} = 0, F_{33} = 0, F_{34} = 1, \\
 F_{41} &= \frac{1}{m_{us}} [k_1 + 2k_2(x_1 - x_3) + 3k_3(x_1 - x_3)^2], \\
 F_{42} &= \frac{1}{m_{us}} [c_1 + 2c_2(x_2 - x_4)], \\
 F_{43} &= \frac{1}{m_{us}} [-k_1 - 2k_2(x_1 - x_3) - 3k_3(x_1 - x_3)^2 - k_{us}], \\
 F_{44} &= \frac{1}{m_{us}} [-c_1 - 2c_2(x_2 - x_4)].
 \end{aligned}$$

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:

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

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

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

DOI: [10.22060/mej.2024.22681.7658](https://doi.org/10.22060/mej.2024.22681.7658)

