مجله کنترل
ISSN 2008-8345
جلد ۱۰، شماره ۱، بهار ۱۳۹۵، صفحه ۱۰-۱

طراحی فیلتر غیرخطی تطبیقی اصلاح‌شده به‌منظور تخمین سرعت طولی وسیله نقلیه و آشکارسازی لغزش

ملیحه ملکی میقانی[۱]، بیژن معاونی[۲]، صیاد نصیری[۳]

[۱] فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی کنترل و علائم، گروه راه‌آهن برقی، دانشگاه علم و صنعت ایران، maleki.malihe@gmail.com

[۲] استادیار، دانشکدهٔ مهندسی راه‌آهن، گروه راه‌آهن برقی، دانشگاه علم و صنعت ایران، b_moaveni@iust.ac.ir

[۳] عضو هیئت علمی، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک خودرو، دانشگاه صنعتی شریف، nasiri@sharif.edu

(تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۴/۱۰/۰۳، تاریخ پذیرش مقاله ۱۳۹۵/۰۱/۰۷)

چکیده: این مقاله به طراحی فیلتر غیرخطی تطبیقی اصلاح‌شده‌ای به‌منظور تخمین سرعت طولی وسیله نقلیه می‌پردازد. فیلتر طراحی‌شده دارای ساختاری ساده و درعین‌حال دقت قابل قبولی است. ازآنجایی‌که به دست آوردن مدل دینامیکی وسیله نقلیه که نامعینی‌ها و اثرات اغتشاش را لحاظ نماید کار دشوار و در مواردی تقریباً غیرممکن می‌باشد و از طرفی اندازه‌گیری گشتاور ترمزی آن نیازمند نصب سنسورهای جدیدی است که موجب افزایش هزینه‌ها و همچنین مسائل مرتبط با تعمیر و نگهداری می‌گردد، ازاین‌رو استفاده از تخمینگرهای حالت در تخمین سرعت طولی ساده نبوده و با چالش‌های متعددی مواجه می‌باشد. در این مقاله، فیلتر غیرخطی تطبیقی اصلاح‌شده که برخلاف فیلترهای کلاسیک نیازمند مدل دینامیکی خودرو و اطلاع از مقدار ورودی گشتاور ترمزی نیست و همچنین نسبت به نسخه‌های پیشین از دقت و قابلیت اعتماد بیشتری نیز برخوردار است، بکار گرفته شده است. در فیلتر پیشنهادی این تحقیق که تحت عنوان "فیلتر غیرخطی تطبیقی اصلاح شده" ارائه شده، از اطلاعات در دسترسی از سیستم ترمز ضد قفل همانند وضعیت شیرهای برقی و دینامیک ترمز وسیله نقلیه به منظور افزایش دقت تخمین سرعت طولی استفاده شده است. در این مقاله پس از ارائه مبانی تئوری لازم، با استفاده از یک آزمون تجربی صحت عملکرد این فیلتر بررسی و تائید می‌گردد.

کلمات کلیدی: تخمین سرعت طولی وسیله نقلیه، آشکارسازی لغزش چرخ، فیلتر غیرخطی تطبیقی.

Designing a Modified Adaptive Nonlinear Filter for Vehicle Longitudinal Velocity Estimation and Slip Detection

Malihe Maleki Meighani, Bijan Moaveni, Sayyad Nasiri

Abstract: In this paper, a modified adaptive nonlinear filter (MANF) to estimate the vehicle longitudinal velocity of the vehicle has been presented which has acceptable accuracy and simple structure. Obtaining accurate model with minimum uncertainty is difficult and almost impossible, consequently, conventional model based filters can not be used simply in estimating the longituadinal velocity of the vehicle during the braking. On the other hand, the model based filters require the braking toque in velocity estimation where, measuring the braking torque requires specific sensors which will cause increasing the costs of repairing and maintenance. Consequently, in this paper a MANF has been introduced which didn't require the dynamic model of vehicle and the value of braking torque in estimation process. MANF has been evaluated by experimental data and its effectiveness has been approved.

Keywords: Longitudinal Velocity Velocity, Velocity Estimation, Wheel Slip Detection, Adaptive Nonlinear Filter.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1395.10.1.5.5]

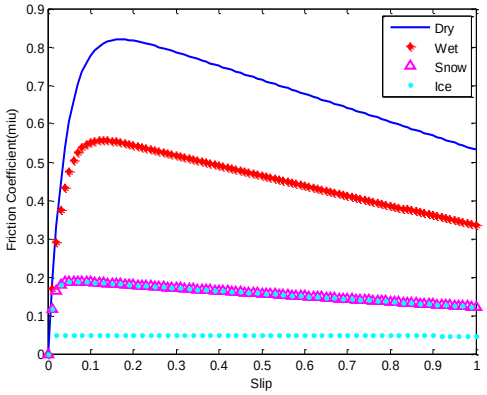
۱- مقدمه

اهمیت فرایند ترمزی به‌ویژه در شرایط لغزندگی جاده یا ریل بر کسی پوشیده نیست. در فرایند ترمزی، محاسبه دقیق مقدار لغزش وسیله نقلیه به‌منظور بهبود عملکرد سیستم‌های ترمز ضد لغزش از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است[۱]. در شرایط خشک بودن سطح و حرکت نرمال وسیله نقلیه، سرعت طولی وسیله نقلیه با سرعت خطی چرخ‌ها تقریباً برابر است. این در حالی است که در فرایند شتاب‌گیری یا ترمز گیری سرعت طولی وسیله نقلیه و سرعت خطی چرخ‌ها دیگر باهم برابر نیستند و تعیین دقیق سرعت طولی وسیله نقلیه یکی از مسائلی است که مدنظر مهندسین و محققین است[۲]. محاسبه و تعیین سرعت طولی وسیله نقلیه ازآن‌جهت ارزشمند است که در آشکارسازی لغزش کاربرد داشته و مورد نیاز بسیاری از سیستم‌های کنترل و ایمنی فعال وسیله نقلیه است. در فرایند ترمزی، لغزش به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\lambda = \frac{V_x - \mathrm{R}_\omega\,\omega}{V_x} \qquad (۱)$$

که V_x سرعت طولی وسیله نقلیه برحسب متر بر ثانیه، ω سرعت زاویه‌ای چرخ برحسب رادیان بر ثانیه و R_ω شعاع چرخ برحسب متر می‌باشد. نکته قابل توجهی که در سیستم‌های کنترل لغزش بسیار مورد توجه است این است که نیروی اصطکاک چه در وسایل نقلیه جاده‌ای و چه در وسایل نقلیه ریلی تابعی غیرخطی، به‌صورت شکل ۱، از مقدار لغزش چرخ می‌باشد. با توجه به این شکل مشخص است که حداکثر اصطکاک زمانی اتفاق می‌افتد که لغزش چرخ در محدوده ۰/۱ تا ۰/۲۵ باشد که البته این عدد برای وسایل نقلیه ریلی محدوده کوچک‌تری است. لذا هدف سیستم‌های کنترل لغزش، حفظ مقدار لغزش در این محدوده به‌منظور دست یافتن به حداکثر اصطکاک است[۳]. بر این اساس، سیستم‌های کنترل لغزش نیازمند اطلاعاتی درباره‌ی سرعت طولی وسیله نقلیه و سرعت زاویه‌ای چرخ می‌باشند که سرعت زاویه‌ای چرخ توسط سنسورهای کم‌هزینه‌ای همانند انکودرها قابل‌دستیابی است ولیکن سرعت طولی به دلیل هزینه بالا و مسائل ایمنی قابل‌اندازه‌گیری مستقیم نیست و در بیشتر تحقیقات به مسئله تخمین سرعت طولی پرداخته‌شده است[۴].

تخمین سرعت طولی تاکنون به‌روش‌های مختلفی صورت گرفته است که در[۴]-[۱۰] از فیلتر کالمن و ترکیبات آن استفاده‌شده است. در [۴] تخمین سرعت طولی و عرضی خودرو با استفاده از فیلتر کالمن موردتوجه قرارگرفته است و دلیل استفاده مکرر از این فیلتر را وجود نویزهای سنسورها و دینامیک غیرخطی وسیله نقلیه می‌داند.



شکل ۱: رابطه ضریب اصطکاک طولی با لغزش طولی در وسایل نقلیه جاده‌ای [۳]

در این تحقیق از فیلتر کالمن و فیلتر کالمن توسعه یافته استفاده‌شده است و مدل وسیله نقلیه را به‌صورت دوچرخ با هفت درجه آزادی در نظر گرفته است. عدم استفاده از گشتاور ترمزی به‌عنوان ورودی از نکات مثبت این پژوهش بود، هرچند که پیاده‌سازی عملی آن به‌سادگی ممکن نیست. در [۵] از فیلتر کالمن توسعه‌یافته برای تخمین سرعت طولی و نیروی اصطکاک استفاده‌شده است که از الگوی سیر تصادفی[1] برای مدل‌سازی نیروی اصطکاک استفاده‌شده است. در این روش، دقت تخمین در مواقعی که نیروی اصطکاک در طول رانندگی و ترمز گیری متغیر است، کاهش می‌یابد. در [۶] تخمین سرعت طولی وسیله نقلیه را به کمک فیلتر کالمن تطبیقی موردتوجه قرار داده‌اند. در [۷] نیز از فیلتر کالمن و قوانین فازی به‌منظور تخمین سرعت استفاده‌شده است. هم‌چنین مقاله [۸] به حل مسئله تخمین سرعت طولی وسیله نقلیه در حین فرایند ترمزی از طریق فیلتر کالمن و با فرض ورودی نامشخص پرداخته است.

هم‌زمان با استفاده از فیلترکالمن برای تخمین سرعت، تعدادی از پژوهشگران، سرعت طولی را از طریق رؤیتگرهای دیگری مانند رؤیتگرهای تناسبی-انتگرالی تخمین زدند. در [۱۱] نشان داده‌شده است که یک رؤیتگر تناسبی-انتگرالی می‌تواند حالت‌های سیستم را باوجود ورودی‌های نامعین تخمین بزند که به دلیل وجود ترم انتگرالی در حالت ماندگار دارای دقت بالایی می‌باشد. هم‌چنین [۱۲] به طراحی فیلتر کالمن تناسبی-انتگرالی برای سیستم‌های گسسته در زمان و با حضور ورودی نامشخص پرداخته است. این فیلتر متغیرهای حالت سیستم را در حضور اغتشاش تصادفی و غیر تصادفی و در حضور ورودی نامشخص تخمین می‌زند. در [۱۳] الگوریتم جدیدی بکار گرفته‌اند به این صورت که با اندازه‌گیری سرعت چرخشی هر چهارچرخ و شتاب طولی خودرو به تخمین سرعت طولی خودرو می‌پردازند. از مزایای این روش بار محاسباتی کم است که بکارگیری و پیاده‌سازی آن را در واحدهای کنترل الکترونیکی[2] مؤثر کرده و دارای خطای کمی می‌باشد ولی در

[1] Random Walk
[2] Electronic Control Unit (ECU)

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1395.10.1.5.5]

نامعینی‌ها و نویز مقاومتی ندارد. در کنار روش‌های پیشین از رؤیتگرهای غیرخطی نیز به‌منظور تخمین سرعت طولی وسیله نقلیه استفاده‌شده است[۱۴]-[۱۷]. [۱۴] به بررسی یک رؤیتگر غیرخطی با تضمین پایداری در ازای داشتن مقادیر شتاب و نرخ انحراف و سرعت زاویه‌ای چرخ و زاویه فرمان می‌پردازد. در [۱۵] به طراحی رؤیتگری غیرخطی بر اساس مدل تایر دوگوف و دینامیک خودرو پرداخته‌شده است. این رؤیتگر با اندازه‌گیری سرعت چرخ‌ها و شتاب خودرو در محورهای طولی و عرضی به تخمین سرعت طولی خودرو می‌پردازد. پایداری این رؤیتگر و مقاومت آن نسبت به اغتشاش و نامعینی پارامترها نیز مورد بررسی قرارگرفته است. همچنین در [۱۶]، یک رؤیتگر کاهش مرتبه یافته غیرخطی به‌منظور تخمین سرعت خودرو پیشنهاد شده است. در [۱۷] نیز به طراحی کنترل‌کننده‌ی مد لغزشی برای کنترل مستقل لغزش چهارچرخ خودرو پرداخته است. نوع جاده با کیفیت‌های خاص خود در شبیه‌سازی‌های این مقاله لحاظ گردیده است. در ادامه و به‌منظور تخمین سرعت طولی در [۱۸] یک فیلتر غیرخطی تطبیقی پیشنهادشده است که تنها با اندازه‌گیری سرعت زاویه‌ای چرخ و بدون نیاز به مدل سیستم و گشتاور ترمزی، به تخمین سرعت توسط یک رابطه بازگشتی غیرخطی می‌پردازد. این الگوریتم بر اساس اختلاف بین سرعت چرخ و سرعت خودرو تنظیم می‌شود و اختلاف بین این دو مقدار توسط بهره فیلتر جبران می‌شود ولیکن راهکاری برای تنظیم بهره ارائه نشده است. ازاین‌رو دقت کافی را برای تخمین سرعت طولی وسیله نقلیه دارا نیست. در [۱۹] بخش غیرخطی الگوریتم فوق تا حدودی تصحیح شده و بهره فیلتر بر اساس میزان اختلاف بین سرعت چرخ و خودرو تنظیم گردیده است و این امر سبب بالا رفتن دقت تخمین سرعت طولی شده است.

در مقاله پیش‌رو، با ارائه فرمولاسیون جدید برای فیلتر غیرخطی تطبیقی و همچنین بیان راهکارهایی، تلاش گشته است که سرعت طولی وسیله نقلیه با دقت قابل قبولی تخمین زده شود. ویژگی عمده فیلتر پیشنهادی که "فیلتر غیرخطی تطبیقی اصلاح شده" نام گذاری شده است، عدم نیاز به مدل دینامیکی وسیله نقلیه و ورودی گشتاور ترمزی است که همان‌گونه که در بالا نیز به آن اشاره شد، ویژگی ارزشمندی است که مهندسین و محققین حوزه آشکارسازی و کنترل لغزش را تحت تأثیر قرار داده است. ضمناً فیلتر پیشنهادی در این مقاله، نسبت به روش‌های پیشین خود دارای بخش غیرخطی ساده‌تر و خطای کمتری بین سرعت طولی واقعی و تخمینی می‌باشد. هم‌چنین تنظیم بهره فیلتر نیز به کمک روش گرادیان نزولی صورت می‌گیرد که با انتخاب تابع هدف مناسب، سعی در افزایش دقت تخمین شده است و علاوه بر آن از اطلاعات شیرهای برقی و دینامیک ترمزی وسیله نقلیه به منظور کاهش خطای تخمین استفاده شده است. صحت عملکرد این روش با انجام آزمونی تجربی بررسی و تائید شده است.

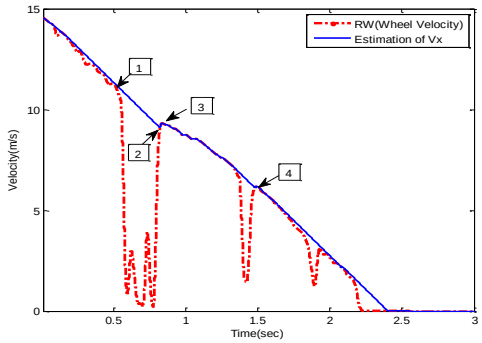
بخش دوم این مقاله، به بیان فیلتر غیرخطی تطبیقی معرفی شده در تحقیقات پیشین می‌پردازد. سپس در بخش سوم، الگوریتم فیلتر غیرخطی تطبیقی اصلاح شده و نحوه تولید داده‌های آزمون تجربی بیان می‌شود. بخش چهارم به بررسی نتایج حاصل از بکارگیری فیلتر غیرخطی تطبیقی اصلاح‌شده می‌پردازد و در بخش آخر نتیجه‌ای از مباحث ارائه شده بیان خواهد شد.

۲- مروری بر ادبیات تحقیق، فیلتر غیرخطی تطبیقی در تخمین سرعت طولی وسیله نقلیه

همان‌طور که در مقدمه این مقاله ذکر گردید، تخمینگرهای مختلفی برای تخمین سرعت طولی به کار گرفته‌شده‌اند که یکی از آن‌ها فیلتر غیرخطی تطبیقی بوده که در [۱۸] و [۱۹] مطرح گردیده است. از ویژگی‌های مهم این فیلتر، سادگی پیاده‌سازی و عدم استفاده از گشتاور ترمزی به‌عنوان ورودی بوده است و در مقابل از نقاط ضعف آن می‌توان به‌دقت پایین و پیچیدگی بخش غیرخطی اشاره نمود. معادلات اولیه این فیلتر به‌صورت زیر بوده است:

$$V_x(k+1) = V_x(k) + R_g\,(\mathrm{sgn}(V_x(k) - R_\omega\,\omega(k+1)) \qquad (۲)$$

در معادله (۲)، V_x سرعت طولی تخمینی، $R_\omega\,\omega$ سرعت خطی چرخ و R_g بهره فیلتر می‌باشد[۱۸]. در اینجا به‌منظور بیان فلسفه عملکردی این فیلتر از شکل ۲ بهره خواهیم گرفت. با شروع فرایند ترمز گیری و هم‌زمان با کاهش سرعت طولی وسیله نقلیه در نقطه ۱ از شکل ۲، سرعت طولی توسط رابطه (۲) تخمین زده می‌شود تا زمانی که به نقطه ۲ برسد. در این نقطه به دلیل اینکه با ادامه فرایند تخمین، سرعت طولی وسیله نقلیه از سرعت خطی چرخ‌ها کمتر می‌شود و این امر در فرایند ترمز گیری غیرممکن است، لذا در فاصله نقاط ۲ تا ۳ سرعت طولی وسیله نقلیه را برابر سرعت خطی چرخ تخمین می‌زنند. نقطه ۳ ماکزیمم مقدار سرعت خطی چرخ است. بعدازاین نقطه همانند نقطه ۱، روند تخمین سرعت طولی به همین منوال تا توقف وسیله پیش می‌رود. نکته قابل توجه‌ای که در این فرایند تأثیرگذار است تنظیم بهره R_g به کمک شیب خطوط وصل‌کننده نقاط ماکزیمم سرعت چرخ مانند نقاط ۱ و ۳ است، ولیکن همان‌گونه که در مقدمه نیز اشاره شد، در [۱۸] راهکاری که نحوه تنظیم بهره R_g را مشخص نماید ارائه نشده است.



شکل ۲: مقایسه سرعت طولی خودرو و سرعت خطی یک چرخ و ایده کلی طراحی فیلتر غیرخطی تطبیقی

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1395.10.1.5.5]

در [۱۹]، بر اساس تجربه نویسندگان، الگوریتم‌های ساده‌ای جهت اصلاح فیلتر غیرخطی تطبیقی ارائه شد. ازجمله پیشنهاداتی که در جهت تصحیح این فیلتر در [۱۹] بیان‌شده است، شامل نرم کردن بخش غیرخطی (تغییر تابع sgn) و تنظیم بهره به کمک خطای تخمین(اختلاف بین سرعت طولی تخمین زده‌شده و سرعت خطی چرخ‌ها) می‌باشد که این اصلاحات در معادلات (۳) و(۴) آورده شده‌اند.

$$V_x(k+1) = V_x(k) + \mathrm{R}_g(k).\tanh(V_x(k) - \mathrm{R}_\omega\,\omega(k+1)) \quad (۳)$$

$$\mathrm{R}_g(k+1) = \alpha.\mathrm{R}_g(k) \quad (۴)$$

همان‌گونه که در روابط مشاهده می‌شود بخش غیرخطی معادله (۳) به کمک تابع tanh بیان‌شده است که نسبت به تابع sgn غیرخطی‌گری کمتری دارد. هم‌چنین در معادله (۴) بهره R_g در هرلحظه بر اساس ضریبی از بهره قبلی خود ساخته می‌شود که این ضریب توسط خطای تخمین محاسبه می‌شود. در هر دوی این فیلترها به این نکته توجه شده است که تا زمانی که سرعت طولی تخمین زده شده خودرو از سرعت خطی چرخ‌ها بیشتر باشد به تخمین سرعت بپردازند و در غیر این صورت سرعت طولی تخمینی را برابر سرعت خطی چرخ‌ها در نظر بگیرند. ضمناً به‌منظور عملکرد بهتر این فیلتر در نسخه تصحیح شده [۱۹]، تلاش گشته است که از قیود فیزیکی حاکم بر فرایند ترمز گیری همانند محدودیت شتاب طولی به‌منظور افزایش دقت عملکرد فیلتر استفاده گردد.

۳- فیلتر غیرخطی تطبیقی اصلاح‌شده

در بخش پیشین، نقاط قوت و ضعف فیلتر غیرخطی تطبیقی و همچنین روند انجام تحقیقات در آن بیان گردید. در این بخش با هدف اصلاح عملکرد و افزایش دقت تخمین سرعت طولی، به تغییر معادلات و ارائه پیشنهادات لازم به‌منظور ارائه نسخه جدیدی از فیلتر غیرخطی تطبیقی خواهیم پرداخت. مسئله مهمی که قبل از شروع فرایند تخمین سرعت باید به آن توجه کرد تشخیص شرایط سطح جاده ازنظر خشک یا خیس بودن آن است. ازاین‌رو ابتدا به‌منظور شناسایی نوع جاده برای استفاده در بخش‌های بعدی تخمین سرعت، از الگوریتم بیان شده در [۲۰] استفاده می‌شود و سپس با مشخص شدن جنس جاده می‌توان مقادیر مناسب شتاب ترمزی حداکثر ($a_{x_\max}$) هر نوع جاده را مطابق شکل ۱ و رابطه (۵) به دست آورد و در فرایند تخمین سرعت طولی از آن استفاده کرد.

$$\dot{V}_x = \frac{-F_x}{M} \quad (۵)$$

رابطه فوق مطابق [۲۱] بیانگر تغییرات سرعت طولی وسیله نقلیه در حین فرایند ترمزی است. در اینجا F_x نیروی اصطکاک برحسب نیوتن و M جرم وسیله نقلیه می‌باشد. نیروی اصطکاک F_x نیز مطابق رابطه (۶) برابر حاصل‌ضرب ضریب اصطکاک در نیروی وزن است.

$$F_x = \mu * N = \mu * Mg \quad (۶)$$

در نتیجه تغییرات سرعت طولی وسیله نقلیه که معادل شتاب طولی آن می‌باشد، به کمک معادله (۷) قابل محاسبه است.

$$\dot{V}_x = \frac{-F_x}{M} = \frac{-\mu * Mg}{M} = -\mu g \quad (۷)$$

مطابق شکل ۱ ضریب اصطکاک μ وابسته به شرایط سطح است. ازاین‌رو در فرایند تخمین سرعت باید ابتدا شرایط جنس سطح مشخص گردد و سپس مقادیر شتاب ترمزی حداکثر و سایر پارامترها را وارد نمود. به‌عنوان‌مثال برای شرایط جاده‌ای آسفالت خشک، با توجه به شکل۱، حداکثر ضریب اصطکاک درحدود $\mu = .8$ است و همچنین در شرایط ریل خشک حداکثر ضریب اصطکاک $\mu = .33$ است. درنتیجه شتاب حداکثری خط($a_{x_\max}$) در شرایط آسفالت خشک مطابق معادله (۷) برابر ۸ متر بر مجذور ثانیه و در شرایط ریل خشک برابر ۳,۳ متر بر مجذور ثانیه می‌باشد. حال با مشخص شدن شرایط سطح توسط الگوریتم ارائه شده در [۲۰] و به دست آوردن پارامترهای مختص هر شرایط جاده‌ای یا ریلی، فرایند تخمین سرعت طولی وسیله نقلیه آغاز می‌گردد. معادله پیشنهادی تحقیق حاضر برای تخمینگر تطبیقی به‌صورت معادله خطی (۸) است. در لحظه شروع ترمزگیری $k = 0$ است و با گذشت زمان، مقادیر سرعت طولی در لحظات مختلف محاسبه می‌شود.

$$V_x(k+1) = -\mathrm{R}_g(k)V_x(k) + \mathrm{R}_\omega\,\omega(k+1) \quad (۸)$$

که در این رابطه V_x سرعت طولی وسیله نقلیه برحسب متر بر ثانیه و $\mathrm{R}_\omega\,\omega$ سرعت خطی چرخ برحسب متر بر ثانیه و R_g بهره تطبیقی فیلتر است. واضح است که نکته کلیدی در تخمین مقدار سرعت طولی وسیله، تنظیم مناسب مقدار بهره R_g است. در اینجا پیشنهاد ما تنظیم بهره R_g به کمک روش گرادیان نزولی است. پرواضح است که به‌منظور استفاده از روش گرادیان نزولی نیاز به انتخاب یک تابع هدف مناسب است که بهره تطبیقی می‌بایست در جهت حداقل نمودن این تابع تغییر نماید. با توجه به هدف مسئله، تابع هدف پیشنهادی معادله (۹) است که در آن V_{xr} سرعت طولی واقعی خودرو و V_x سرعت طولی تخمین زده‌شده است. در این رابطه $E = V_{xr} - V_x$ خطای بین سرعت طولی واقعی و سرعت طولی تخمینی را نشان می‌دهد.

$$J = .5E^2 = .5(V_{xr} - V_x)^2 \quad (۹)$$

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1395.10.1.5.5]

در روش گرادیان نزولی حرکت در خلاف جهت بردار گرادیان، موجب حرکت به سمت نقطه کمینه خواهد گشت. ازآنجایی‌که هدف این روش تنظیم بهره R_g است، مطابق رابطه (۱۰) مشتق تابع هدف نسبت به بهره R_g محاسبه شده و با جایگذاری آن در رابطه (۱۱)، تغییرات بهره R_g به‌گونه‌ای به دست می‌آید که حرکت در جهت رسیدن به حداقل مقدار تابع هدف را تضمین می‌کند. η ثابت کوچکی است که مشخص کننده دامنه گام حرکتی در تصحیح بهره R_g است.

$$\frac{\partial J}{\partial R_g} = E\frac{\partial}{\partial R_g}(V_{xr} + R_g(k)V_x(k) - R_\omega\omega(k+1)) = EV_x(k) \quad (۱۰)$$

$$\Delta R_g = -\eta\frac{\partial J}{\partial R_g} \quad (۱۱)$$

درنتیجه تغییرات بهره فیلتر مدنظر به‌صورت زیر به دست می‌آید:

$$\Delta R_g = -\eta\frac{\partial J}{\partial R_g} = -\eta * E * V_x(k) \quad (۱۲)$$

ولیکن ازآنجایی‌که مقدار واقعی سرعت طولی وسیله نقلیه (V_x) در اختیار نیست، لذا محاسبه هرلحظه E ممکن نیست. همچنین به دلیل اینکه η مقدار مثبت کوچکی است و همچنین هدف حداقل نمودن خطا و یا به‌عبارت‌دیگر کوچک نمودن مقدار E است، لذا ضریب $\eta\times E$ با ضریب کوچک α در (۱۳) جایگزین گشته است.

$$R_g(k+1) = R_g(k) - \alpha V_x(k) \quad (۱۳)$$

با توجه به رابطه (۱۳)، این‌گونه به نظر می‌رسد که دقت کافی در به‌روزرسانی بهره وجود ندارد و فیلتر ارائه‌شده در معادلات (۸) و (۱۳) به علت وابستگی به مقدار خطای بین سرعت طولی واقعی و تخمینی و عدم اطلاع از آن، از دقت لازم برخوردار نیست. لذا، در ادامه با بکارگیری اطلاعاتی معلوم از ویژگی‌های سیستم ترمز شامل وضعیت شیرهای برقی و دینامیک ترمزی، تلاش خواهد شد که دقت فیلتر غیرخطی تطبیقی اصلاح شده پیشنهادی در این تحقیق افزایش یابد. پیش از اینکه به روند تکمیل فیلتر پرداخته شود، مروری بر عملکرد سیستم‌های ترمز ضد قفل و نحوه تولید داده‌های تجربی مورد نیاز برای بررسی صحت عملکرد فیلتر خواهیم داشت.

۳-۱- بررسی ویژگی‌های عملکردی سیستم ترمز ضد قفل و به‌کارگیری آن در افزایش دقت فیلتر

در این بخش نحوه عملکرد سیستم ترمز ضد قفل و اجزای آن را معرفی کرده و سپس تلاش خواهد شد از اطلاعات آن سیستم به‌منظور بهبود تخمین سرعت طولی وسیله نقلیه استفاده شود. سیستم ترمز ضد لغزش در وسایل نقلیه مختلف (قطار، خودرو و ...) در بیان ساده یک مجموعه الکترومکانیکی است که در هنگام ترمز گیری با کنترل فشار (قطع و وصل کردن فشار) هیدرولیک یا نیوماتیک در کسری از ثانیه، ارتباط لنت را با دیسک یا کاسه چرخ برقرار و قطع می‌کند و تکرار سریع و مداوم این عمل باعث از میان رفتن حالت قفل‌کردن چرخ‌ها می‌شود. اهمیت این‌گونه ترمزها نیز بیشتر در سطوح لغزنده یا ترمز گیری‌های اضطراری در سرعت‌های بالا نمایان می‌شود. شیرهای برقی تغذیه و تخلیه در سیستم ترمز ضد لغزش، شیرهایی هستند که در مسیر ورودی و خروجی انتقال فشار ترمزی قرار دارند و فشار ترمزی را تنظیم می‌کنند.

به عبارتی باز بودن شیر برقی تغذیه[1] به معنای افزایش گشتاور ترمزی است درحالی‌که باز بودن شیر برقی تخلیه[2] به معنای کاهش گشتاور ترمزی می‌باشد. لازم به ذکر است که شیر برقی تغذیه در حالت عادی باز[3] است و شیر برقی تخلیه در حالت عادی بسته[4] است. وضعیت این شیرهای برقی در حالت کارکرد سیستم‌های ترمز ضد لغزش سه حالت است:

۱) حالت افزایش فشار: زمانی که شیر تغذیه باز (وضعیت نرمال) است و شیر تخلیه بسته (وضعیت نرمال) است گشتاور ترمزی و فشار پشت کالیپر افزایش می‌یابد که براثر آن سرعت چرخ‌ها در حین فرایند ترمز گیری کاهش می‌یابد. در این حالت، هر دو شیر در وضعیت نرمال خود هستند که در ادامه با صفر نشان داده می‌شود.

۲) حالت کاهش فشار: زمانی که شیر تغذیه بسته و شیر تخلیه باز است، گشتاور ترمزی و فشار پشت کالیپر کاهش می‌یابد که موجب افزایش سرعت چرخ و جلوگیری از وقوع لغزش می‌شود. در این حالت، وضعیت هر دو شیر در خلاف وضعیت نرمال خود است که در ادامه با یک نشان داده می‌شود.

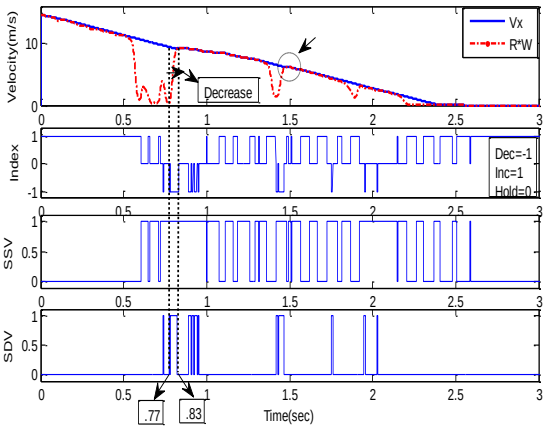
۳) حالت ثابت نگه‌داشتن فشار: زمانی که شیر تغذیه و تخلیه هر دو بسته است، فشار پشت کالیپر ثابت می‌ماند که موجب ثابت ماندن نرخ کاهش سرعت می‌شود. در این حالت شیر تغذیه در خلاف وضعیت عادی خود است و شیر تخلیه در وضعیت عادی خود قرار دارد. در این حالت، وضعیت شیر تغذیه با یک و وضعیت شیر تخلیه با صفر نشان داده می‌شود.

همان‌گونه که اشاره شد، عملکرد یک سیستم ترمز ضد لغزش به سه حالت افزایش فشار، تثبیت فشار و کاهش فشار قابل‌تقسیم است. نکته‌ای

[1] SSV
[2] SDV
[3] Normally open
[4] Normally closed

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1395.10.1.5.5]

که می‌تواند در تخمین دقیق‌تر سرعت طولی وسیله نقلیه موردتوجه قرار گیرد این است که در حالت‌هایی که سیستم ترمز در حالت کاهش فشار و به دنبال آن سرعت چرخ در حالت افزایشی قرار می‌گیرد، اگر زمان کافی از حالت کاهش فشار گذشته باشد، سرعت خطی چرخ به‌طور تقریبی با سرعت طولی وسیله نقلیه برابر خواهد بود(مطابق شکل ۳). تشخیص اینکه چه زمانی سرعت چرخ به مقدار قله خود رسیده است بر اساس وضعیت شیرهای برقی و مدت‌زمانی که شیرها در وضعیت کاهش فشار هستند ممکن می‌باشد. افزایش سرعت چرخ در حین فرایند ترمز گیری به کمک سیستم ضد لغزش رخ می‌دهد. در شکل ۳ برای بهتر نشان دادن وضعیت شیرهای برقی از متغیری به نام شاخص[1] استفاده شده است که چنانچه سیستم در وضعیت افزایش فشار باشد، شاخص عدد ۱+ را نشان می‌دهد. عدد صفر وضعیت تثبیت فشار و عدد ۱- وضعیت کاهش فشار را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده‌شده است با قرار گرفتن شیرها در وضعیت کاهشی (شاخص برابر ۱- باشد) و پس از گذشتن مدت زمانی (t_D) ناشی از دینامیک سیستم هیدرولیک شیر و چرخ، می‌توان رسیدن سرعت چرخ به نقطه قله خود را شاهد بود. با توجه به شکل ۳، زمان لازم برای رسیدن به نقطه قله سرعت چرخ برای خودروی آزمون در سطح خشک در حدود $t_D = 0.06 = 0.83 - 0.77$ ثانیه می‌باشد.



شکل ۳: نقاط قله سرعت خطی چرخ و برابری سرعت طولی خودرو با سرعت خطی چرخ‌ها در نقاط مشخص‌شده و ناحیه کاهش فشار پشت کالیپر(معادل شاخص۱-)و وضعیت شیرهای برقی ورودی و خروجی و زمان موردنیاز سیستم برای رسیدن به نقطه قله سرعت خطی چرخ

توجه شود که بر اساس آزمایشات انجام گرفته بر روی خودروی آزمون، زمان نشست مدل دینامیکی سیستم هیدرولیک و چرخ در حالت کاهش فشار پشت کالیپر در خودروی آزمون، در حدود ۰/۲۵ثانیه می‌باشد، که یک‌چهارم این زمان نشست (در حدود ۰/۰۶۲۵ ثانیه) به‌عنوان حداقل زمان مورد نیازسیستم برای نزدیک شدن سرعت خطی چرخ به سرعت طولی در نظر گرفته‌شده است که با زمان محاسبه شده از آزمون واقعی نشان داده شده در شکل ۳ (۰/۰۶ ثانیه = t_D) به‌طور تقریبی برابری می‌کند. بعدازاین فاصله زمانی و در شرایطی که شیرها در وضعیت کاهشی باشند($SSV = 1 \& \mathrm{SDV} = 1$) پیشنهاد می‌شود به‌منظور تخمین سرعت طولی وسیله نقلیه از روش میانگین‌گیری وزن‌دار شده به‌صورت رابطه (۱۴) استفاده شود و ازآنجایی‌که در این زمان، عملاً سرعت طولی واقعی با سرعت خطی چرخ برابر است، خطای E مطابق رابطه (۱۵) به‌طور دقیق محاسبه می‌شود و در اصلاح مقدار بهره R_g می‌تواند تأثیرگذار باشد. مطابق رابطه (۱۶) مشاهده می‌شود که بهره جدید R_g در فرایند تخمین جایگذاری می‌شود و می‌تواند سبب بهبود پاسخ گردد. در رابطه (۱۴)، مقدار β عددی بین صفر و یک انتخاب می‌شود که با توجه به اعتبار کم سرعت خطی چرخ این عدد نزدیک به یک(در این سیستم ۰/۸) گرفته می‌شود. هم‌چنین درصورتی‌که شیرها در حالت کاهشی نباشند تخمین سرعت طولی توسط معادله (۸) محاسبه می‌شود.

$$V_x(k+1) = \beta V_x(k) + (1-\beta)\,\mathrm{R}_\omega\,\omega(k+1) \qquad (۱۴)$$

$$\begin{aligned} E(k+1) &= V_{xr}(k+1) - V_x(k+1) \\ &= \mathrm{R}_\omega\,\omega(k+1) - V_x(k+1) \end{aligned} \qquad (۱۵)$$

$$\mathrm{R}_g(k+1) = \mathrm{R}_g(k) + E(k)\,V_x(k) \qquad (۱۶)$$

علاوه بر معادلات بالا که شیرهای برقی در حالت کاهشی هستند، معادله‌ی دیگری نیز در این وضعیت به‌منظور جلوگیری از افت شدید سرعت طولی تخمینی در نقاط نزدیک به قله سرعت خطی چرخ در نظر می‌گیریم. این معادله درواقع خطی به‌صورت حد پایین سرعت طولی مطابق معادله (۱۷) است بطوریکه اگر سرعت خطی چرخ، در زمانی که شیرهای برقی در حالت کاهشی هستند، بالاتر از خط رابطه (۱۷) باشد($(\mathrm{R}_\omega\,\omega)(k) > y(k)$)، تخمین سرعت بر اساس روابط (۱۴) تا (۱۶) انجام گیرد و اگر از این خط پایین‌تر باشد($(\mathrm{R}_\omega\,\omega)(k) < y(k)$) روابط فوق اجرا نشود و تخمین سرعت همچنان بر اساس روابط اصلی فیلتر(معادلات(۸) و(۱۳)) انجام گیرد. رابطه حد پایین سرعت، معادله خط گذرنده از لحظه شروع ترمز گیری با حداکثر شتاب منفی ($-a_{x_\max}$) است. همان‌طور که قبلاً مطرح گردید فرکانس نمونه‌برداری داده‌ها ۱۰ کیلوهرتز است. ازاین‌رو زمان نمونه‌برداری داده‌ها $T_s = 10^{-4}$ ثانیه می‌باشد. $(\mathrm{R}_\omega\,\omega)(0)$ برابر سرعت خطی چرخ در لحظه شروع ترمز گیری است.

$$y(k) = -a_{x_\max} T_s . k + (\mathrm{R}_\omega\,\omega)(0) + a_{x_\max} T_s \qquad (۱۷)$$

[1] Index

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1395.10.1.5.5]

همان‌گونه که پیش‌تر اشاره شد، استفاده از کلیه نکات مطرح‌شده، به‌منظور بهبود تخمین سرعت طولی خودرو و بالا رفتن دقت آن است. در ادامه ضمن بیان قیود فیزیکی حاکم بر فرایند تخمین سرعت طولی خودرو، الگوریتم کارکرد فیلتر غیرخطی تطبیقی اصلاح‌شده به‌طور خلاصه مطرح می‌گردد و سپس در بخش بعد نتایج حاصل از شبیه‌سازی و پیاده‌سازی فیلتر ارائه می‌شود.

از شروط حاکم بر مسئله تخمین سرعت طولی، مقدار افزایش بهره R_g می‌باشد، چراکه بهره R_g که شیب معادله (۸) در تخمین سرعت طولی می‌باشد همانند آنچه که در[۱۹] اشاره شده است تابع حد بالای شتاب طولی وسیله نقلیه مطابق رابطه (۱۸) می‌باشد.

$$0 < R_g < a_{x_\max} \qquad (۱۸)$$

از طرفی تغییرات سرعت طولی وسیله نقلیه که معادل شتاب وسیله نقلیه است، نباید از حدود شتاب قابل تحمل وسیله نقلیه فراتر رود و می‌بایست شتاب وسیله نقلیه مطابق رابطه (۱۹) در محدوده قابل پیاده‌سازی باشد.

$$a_{x_\min} < \frac{(V_x(k+1) - V_x(k))}{T_s} < a_{x_\max} \qquad (۱۹)$$

علاوه به قیود ذکرشده، توجه به این نکته ضروری است که در فرایند ترمزگیری سرعت طولی وسیله نقلیه نباید از سرعت خطی چرخ‌ها کمتر شود. ازاین‌رو درصورتی‌که سرعت طولی وسیله نقلیه از سرعت خطی چرخ کمتر شود، سرعت طولی وسیله نقلیه را برابر سرعت خطی چرخ می‌گیریم.

$$V_x(k+1) < R_\omega\,\omega(k+1) \rightarrow V_x(k+1) = R_\omega\,\omega(k) \qquad (۲۰)$$

در شروع فرایند ترمزگیری نیز $V_x(0) = (R_\omega\,\omega)(0)$می‌باشد. ازآنجایی‌که در آزمون تجربی، سرعت طولی توسط شمارنده پالس محاسبه می‌شود که دقت اندازه‌گیری سرعت‌های کم‌تر از ۵ کیلومتر بر ساعت را دارا نیست. به همین دلیل در پایان فرایند تخمین سرعت طولی به‌منظور پایان یافتن الگوریتم، شرط کمتر بودن سرعت طولی تخمینی از ۵ کیلومتر بر ساعت گذاشته‌شده است.

$$V_x(k+1) < 5\,km/h \rightarrow end \qquad (۲۱)$$

الگوریتم فیلتر غیرخطی تطبیقی اصلاح‌شده	
مرحله۰	شروع $k=0, I=0$
مرحله۱	دریافت سرعت خطی چرخ($(R_\omega\,\omega)(0)$) و بهره فیلتر غیرخطی تطبیقی اصلاح‌شده ($(R_g)(0)$)
مرحله ۲	آیا تاکنون تخمینی صورت گرفته است؟ ۲-۱) بلی: دریافت سرعت طولی تخمین زده‌شده‌ی خودرو و بهره فیلتر در مرحله پیشین ۲-۲) خیر: محاسبه سرعت طولی اولیه خودرو $V_x(0) = (R_\omega\,\omega)(0)$
مرحله ۳	تخمین سرعت طولی توسط روابط (۸) و محاسبه بهره جدید فیلتر با استفاده از (۱۳)
مرحله ۴	آیا شیرهای برقی در حالت کاهشی هستند؟ ۴-۱)خیر: به مرحله ۵ برود. ۴-۲) بلی: اگر مدت زمان قرار گرفتن در حالت کاهش فشار بزرگ‌تر از زمان t_D بوده و $(R_\omega\,\omega)(k) > y(k)$ می‌باشد؟ ۴-۲-۱) بلی: تصحیح تخمین با معادلات جایگزینی (۱۴) و(۱۵) و (۱۶) ۴-۲-۲) به مرحله ۵ برود
مرحله ۵	آیا بهره فیلتر غیرخطی تطبیقی $R_g(k)$ در محدوده خود مطابق معادله (۱۸) می‌باشد؟ ۵-۱) بلی: به مرحله ۶ برود. ۵-۲) خیر: تنظیم بهره R_g برابر با نزدیک‌ترین کران معادله (۱۸)
مرحله ۶	آیا تغییرات $V_x(k)$ در محدوده خود مطابق معادله (۱۹) می‌باشد؟ ۶-۱) بلی: به مرحله ۷ برود. ۶-۲) خیر: تنظیم تغییرات $V_x(k)$ برابر با نزدیک‌ترین کران معادله (۱۹)
مرحله ۷	آیا سرعت طولی تخمینی بزرگ‌تر از سرعت خطی چرخ می‌باشد؟ ۷-۱) بلی: به مرحله ۸ برود. ۷-۲) خیر: $V_x(k+1) = R_\omega\,\omega(k+1)$
مرحله ۸	آیا سرعت طولی تخمینی کمتر از ۵ کیلومتر بر ساعت می‌باشد؟ ۸-۱) بلی: پایان الگوریتم ۸-۲) خیر: $k = k+1$ و به مرحله ۲ برود.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1395.10.1.5.5]

۴- ارزیابی فیلتر بر اساس نتایج حاصل‌شده از آزمون تجربی و شبیه سازی

اگر چه روش ارائه‌شده در این مقاله محدودیتی به‌منظور محاسبه و تخمین سرعت طولی در انواع وسایل نقلیه (ریلی و جاده‌ای) ندارد و به کمک الگوریتم تشخیص شرایط سطح در [۲۰]، می‌توان روابط بیان‌شده در این مقاله را برای هر شرایط سطحی تعمیم داد ولیکن در این بخش نتایج آزمون‌های تجربی توسط خودروی آزمون در شرایط جاده‌ای آسفالت خشک، ارائه می‌گردد. آزمایش تجربی با شروع حرکت خودروی آزمون بر روی جاده آسفالت خشک (شکل ۴) آغاز می‌شود و پس از رسیدن خودرو به سرعت مناسب، ترمز گیری انجام می‌پذیرد. سرعت خطی چرخ‌ها توسط سنسورهای نصب شده بر روی چرخ خودرو محاسبه می‌گردد به این صورت که تعداد پالس‌های ارسالی از سنسور سرعت چرخ به سرعت خطی چرخ تبدیل می‌شود. فیلتر غیرخطی تطبیقی با دریافت این اطلاعات به تخمین سرعت طولی می‌پردازد. هم‌چنین سرعت طولی خودرو توسط چرخ پنجمی که در پشت خودرو (مشابه شکل ۴) جای می‌گیرد و فاقد سیستم ترمز است، محاسبه می‌شود و به‌منظور بررسی صحت نتایج حاصل‌شده از تخمین سرعت طولی، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مورد سرعت واقعی خودرو باید گفت که به دلیل استفاده از شمارنده پالس در محاسبه سرعت طولی توسط چرخ پنجم وجود خطا در نمایش آن دور از انتظار نیست. داده‌های مورد استفاده با فرکانس ۱۰ کیلوهرتز نمونه‌برداری شده‌اند. قابل‌ذکر است که مقدار اولیه سرعت طولی تخمین زده شده در ابتدای فرایند ترمزگیری برابر با سرعت خطی چرخ‌ها درنظرگرفته می‌شود (به دلیل کوچک بودن میزان لغزش). حداکثر شتاب مثبت و منفی خودرو مطابق مطالب مطرح‌شده در بخش قبل برای جاده آسفالت خشک، مثبت و منفی ۸ متر بر مجذور ثانیه در نظر گرفته شده است. دستگاه‌های اندازه‌گیری وضعیت شیرهای برقی ورودی و خروجی در شکل ۵ نشان داده‌شده‌اند.

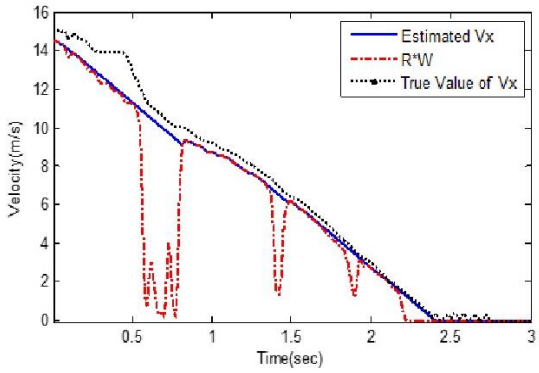


شکل ۴: خودروی آزمون به همراه چرخ پنجم

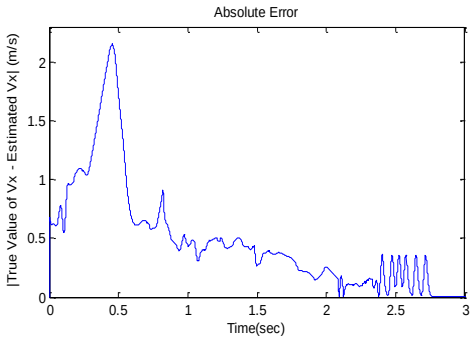


شکل ۵: دستگاه اندازه‌گیری وضعیت شیرهای برقی ورودی و خروجی و نمایشگر ثبت داده‌های سرعت طولی و خطی و سنسور سرعت چرخ

در این قسمت نتایج مربوط به تخمین سرعت طولی توسط فیلتر غیرخطی تطبیقی ارائه‌شده در تحقیقات پیشین و فیلتر غیرخطی تطبیقی اصلاح‌شده در این مقاله و قدر مطلق خطای مطلق بین سرعت طولی واقعی و تخمین زده‌شده آن‌ها در شبیه‌سازی‌ها نشان داده می‌شود و در انتها تحلیلی بر نتایج حاصل‌شده ارائه خواهد شد. در ابتدا نتایج تخمین سرعت طولی توسط فیلتر غیرخطی تطبیقی و قدرمطلق خطای تخمین به ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ ارائه می‌شود. از آنجایی‌که فیلتر ارائه شده در بخش مرور منابع فاقد اطلاعات شیرهای برقی و دیگر اطلاعات دینامیک ترمزی می‌باشد در شکل ۶ نتایج سرعت طولی واقعی و تخمینی و خطی به تنهایی آورده شده است.



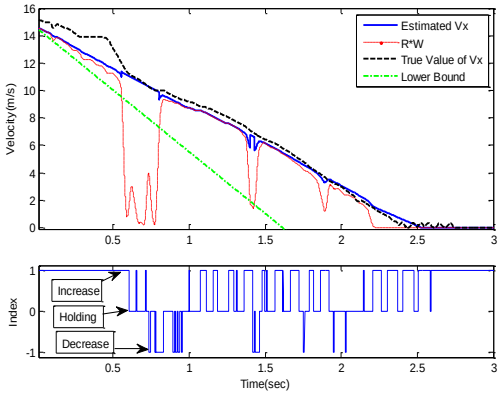
شکل ۶: تخمین سرعت طولی به کمک فیلتر غیرخطی تطبیقی



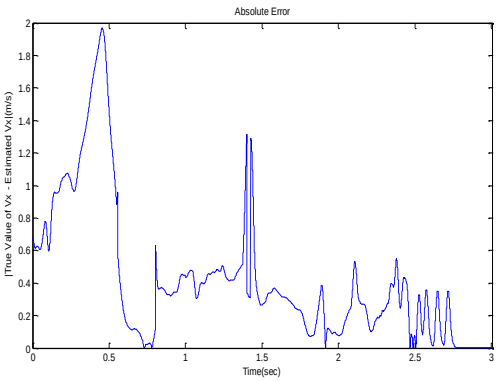
شکل ۷: قدر مطلق خطای بین سرعت طولی واقعی و تخمین زده شده توسط فیلتر غیرخطی تطبیقی

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1395.10.1.5.5]

در فیلتر ارائه‌شده با وجود عدم نیاز به مدل دینامیکی وسیله نقلیه، تخمین قابل قبولی از سرعت طولی وسیله نقلیه حاصل‌شده است. در ادامه نتایج حاصل از شبیه‌سازی فیلتر غیرخطی تطبیقی اصلاح‌شده به نمایش گذاشته می‌شود. شکل ۸ نتایج تخمین سرعت طولی وسیله نقلیه و شکل ۹ قدرمطلق خطای بین سرعت طولی تخمینی و واقعی را نشان می‌دهد. خط محدودکننده سرعت نیز در شکل ۸ برای جلوگیری از افت شدید سرعت طولی با رنگ سبز نشان داده شده است. این خط قیدی است که سرعت طولی تخمین زده شده می بایست همواره بالای آن قرار گیرد. این خط از واگرایی ناگهانی فرایند تخمین سرعت طولی جلوگیری می نماید. وضعیت شیرهای برقی در فرایند تخمین و بر اساس الگوریتم ارائه شده در بالا بکار گرفته شده اند و همانگونه که مشخص است، در مقایسه با شکل ۶، مقدار سرعت طولی تخمین زده شده به مقدار سرعت طولی واقعی نزدیکتر شده است. این امر در شکل ۹ که مقدار قدرمطلق خطا را نشان می دهد در مقایسه با شکل ۷ به وضوح دیده می شود.



شکل ۸: تخمین سرعت طولی توسط فیلتر غیرخطی تطبیقی اصلاح شده به همراه وضعیت شیرهای برقی ورودی و خروجی



شکل ۹: قدر مطلق خطا بین سرعت طولی واقعی و تخمین زده شده توسط فیلتر غیرخطی تطبیقی اصلاح شده

باوجود درنظر نگرفتن مدل دینامیکی وسیله نقلیه و ورودی گشتاور ترمزی، فیلترهای به نمایش گذاشته‌شده در بالا دارای دقت خوب و سرعت محاسبات بالایی می‌باشند. از سوی دیگر با بهره‌گیری از اطلاعات موجود از وضعیت شیرهای برقی و دینامیک ترمز، همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود میانگین مربعات خطای فیلتر غیرخطی تطبیقی اصلاح‌شده نسبت به فیلتر غیرخطی تطبیقی کمتر است که نشان‌دهنده‌ی دقت بهتر تخمین سرعت طولی توسط فیلتر ارائه‌شده در این پژوهش است. این فیلتر به دلیل دارا بودن اطلاعات شیرهای برقی و محدودیت-هایی همچون حد پایین سرعت طولی مطابق شکل ۸ بهبود قابل قیاسی نسبت به فیلترهای پیشین خود داشته است که در تخمین سرعت طولی وسیله نقلیه بسیار موثر است.

جدول ۱: میانگین مربعات خطای فیلترهای بررسی‌شده

نوع فیلتر	میانگین مربعات خطا
فیلتر غیرخطی تطبیقی (مرور منابع)	۰/۴۳۴۲
فیلتر غیرخطی تطبیقی اصلاح‌شده	۰/۳۵۳۶

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله فیلتر غیرخطی تطبیقی اصلاح‌شده به‌منظور تخمین سرعت طولی وسیله نقلیه مطرح گردید. بابیان روابط این فیلتر و سپس انجام آزمونی تجربی بر روی خودروی آزمون، الگوریتم پیشنهادی بکار گرفته شد و نتایج حاصل از تخمین سرعت طولی توسط فیلتر با سرعت طولی واقعی وسیله نقلیه، مقایسه و مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج پیاده سازی نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی می‌تواند تخمین مناسبی برای سرعت طولی داشته باشد. ویژگی عمده این فیلتر عدم استفاده از مدل وسیله نقلیه، حذف شدن خطاهای ناشی از نامعینی‌های دینامیک خودرو و عدم نیاز به اطلاعات ورودی گشتاور ترمزی وسیله نقلیه و نامعینی‌های حاصل از آن است. هم‌چنین سرعت محاسبات بالا و سادگی الگوریتم و روابط از نقاط مثبت آن است. البته فیلتر ارائه‌شده به اطلاعاتی از سیستم ترمز ضد لغزش در کنار الگوریتمی به‌منظور تشخیص شرایط سطح نیازمند است که از نقاط ضعف این دسته از فیلترها محسوب می گردد.

مراجع

[] T. Mei and H.Li, "Measurement of absolute vehicle speed with a simplified inverse model", Vehicular Technology, IEEE Transactions on, Vol. 59, pp. 1164-1171, 2010.

[2] H. Mirzaeinejad and M. Mirzaei," A novel method for non-linear control of wheel slip in anti-lock braking systems", Control Engineering Practice, Vol. 18, pp. 918-926, 2010.

[3] M. Khosravi," Estimating of linear speed and detecting slip by designing robust estimator", Msc.Thesis, Iran University of Science and Technology. Tehran, Iran, (in persian), 2013.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1395.10.1.5.5]

[4] J .C Alvarez, "Estimation of the longitudinal and lateral velocities of a vehicle using extended Kalman filters,"Msc thesis, Georgia Institute of Technology,2006.

[5] L. R. Ray," Nonlinear state and tire force estimation for advanced vehicle control", Control Systems Technology, IEEE Transactions on, Vol.3, pp. 117-124, 1995.

[6] L. Chu , Y. Shi, Y. Zhang, Y. Ou and M. Xu, " Vehicle velocity estimation based on Adaptive Kalman Filter", In Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering (CMCE),2010 International Conference on,IEEE, Vol. 3, pp. 492-495, 2010.

[7] K. Kobayashi, K. C. Cheok and K. Watanabe, "Estimation of absolute vehicle speed using fuzzy logic rule-based Kalman filter", American Control Conference, Proceedings of the 1995 ,IEEE,Vol. 5, pp. 3086-3090,1995.

[8] B. Moaveni, M. Khosravi Rogaye abad and S. Nasiri," Vehicle longitudinal velocity estimation during the braking process using unknown input kalman filter ",Vehicle System Dynamics, Vol.53, No.10, pp. 1373-1392, 1995.

[9] K.Watanabe, K. Kinase and K. Kobayashi," Absolute speed measurement of vehicles from noisy acceleration and erroneous wheel speed", Intelligent Vehicles Symposium Proceedings of the Intelligent Vehicles' 93 Symposium, pp. 271-276,1993.

[10] H. Guo, H. Chen, F. Xu, F. Wang and G. Lu ," Implementation of EKF for vehicle velocities estimation on FPGA", Industrial Electronics, IEEE Transactions on, Vol.60, No.9 ,pp. 3823-3835, 2013.

[11] D. Söffker, T. J. Yu and P. C. Müller," State estimation of dynamical systems with nonlinearities by using proportional-integral observer", International Journal of Systems Science, Vol.26, pp.1571-1582, 1995.

[۱۲] ب. معاونی وم. بویرزمان، "طراحی فیلتر کالمن تناسبی-انتگرالی با ورودی نامشخص"، مجله کنترل خواجه نصیر، دوره ۸، شماره ۲، صفحه ۱-۱۰، ۱۳۹۳.

[13] M. Tanelli, S.M. Savaresi and C. Cantoni," Longitudinal vehicle speed estimation for traction and braking control systems", Computer Aided Control System Design, IEEE International Conference on Control Applications, IEEE International Symposium on Intelligent Control, pp. 2790-2795,2006.

[14] L. Imsland, T.A. Johansen, T. I. Fossen, H.F. Grip, J. C. Kalkkuhl and A. Suissa, "Vehicle velocity estimation using nonlinear observers", Automatica, Vol. 42, No.12, pp. 2091-2103, 2006.

[15] L.H. Zhao, Z. Y. Liu and H. Chen," Design of a nonlinear observer for vehicle velocity estimation and experiments", Control Systems Technology, IEEE Transactions on, Vol.19,No.3, pp. 664-672,2011.

[16] H. Guo, H. Chen, D. Cao, W. Jin, " Design of a reduced-order non-linear observer for vehicle velocities estimation," IET Control Theory & Applications, Vol. 7, No.17, pp. 2056-2068, 2013.

[۱۷] س. خان کلانتری رکن آبادی، و. پاشازاده وم. تشنه لب ،" کنترل لغزش چرخ‌ها با استفاده از کنترل مد لغزشی در شبیه‌ساز دقیق "، مجله کنترل خواجه نصیر، دوره ۸، شماره ۲، صفحه ۲۱-۳۳، ۱۳۹۳.

[18] F. Jiang and Z. Gao," An adaptive nonlinear filter approach to the vehicle velocity estimation for ABS", In Control Applications, Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on IEEE, pp. 490-495,2000.

[۱۹] ب. معاونی ، م. خسروی ، ص. نصیری وم. امیری ،" تخمین سرعت طولی خودرو با استفاده از دو تخمینگر جدید و بدون نیاز به اندازه گیری گشتاور ترمزی ،" ماهنامه علمی پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۴، شماره ۵، صفحه ۱۸۳-۱۹۳، ۱۳۹۳.

[20] J.A. Cabrera, A. Ortiz, J. J. Castillo and A. Simón, " A fuzzy logic control for antilock braking system integrated in the IMMa tire test bench", Vehicular Technology, IEEE Transactions on,Vol. 54,No.6,pp. 1937-1949, 2005.

[۲۱] ص. نصیری ، ب. معاونی ، غ. پایگانه وم. عارفیان، "مدل‌سازی و تحلیل سیستم ترمز هیدرولیکی ضد قفل خودرو"، مجله کنترل خواجه نصیر، دوره ۶، شماره ۳، صفحه ۱۱-۲۶، ۱۳۹۱.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1395.10.1.5.5]