



کنترل لغزشی سیستم تعلیق فعال ۱/۴ خودرو با استفاده از روش جدید استخراج سطح لغزش بهینه

سید علی ظهیری پور^{۱*}، علی اکبر جلالی^۲

^۱ دانشجوی دکترا، دانشگاه علم و صنعت ایران

^۲ استاد، دانشگاه علم و صنعت ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۲/۲۰؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۴/۰۱/۱۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۶/۰۱

چکیده

در این مقاله، روش جدیدی برای استخراج سطح لغزش در مورد یک سیستم خطی و دارای عدم قطعیت‌های پارامتری با کران مشخص، ارائه شده است. در روش پیشنهادی، سیگنال کنترل متداول مد لغزشی مرتبه اول، به سیستم اعمال شده و سپس سطح لغزش به عنوان یک کنترل کننده مجازی با هدف حداقل سازی یک تابع هزینه استخراج می‌شود. مزیت اصلی روش پیشنهادی، امکان تنظیم فاصله مسیر حالت از سطح لغزش با استفاده از تنظیم مناسب یکی از پارامترهای طراحی است. به این ترتیب، نزدیک شدن به هدف غایی کنترل مد لغزشی که همانا ماندگاری مسیر حالت روی سطح لغزش است، بدون بالا بردن درجه کنترل مد لغزشی میسر خواهد شد، ضمن آن که میزان انرژی مصرفی نیز تحت کنترل در خواهد آمد. به منظور نمایش کارایی روش پیشنهادی، سیستم تعلیق فعال ۱/۴ خودرو انتخاب شده و از این روش در انتخاب سطح لغزش مربوط به زیرسیستم کنترل موقعیت، استفاده شده است.

کلمات کلیدی: سطح لغزش، عدم قطعیت‌های پارامتری، تابع هزینه، سیستم تعلیق فعال ۱/۴ خودرو

A New Method for Extracting an Optimal Sliding Surface and Its application to Control of a Quarter Car Active Suspension System

Seyyed Ali Zahiripour^{1,*}, Ali Akbar Jalali²

¹ Ph.D. Student, Elec. Eng., Iran Univ of Science and technology., Tehran, Iran

² Prof., Elec. Eng., Iran Univ of Science and technology., Tehran, Iran

Abstract

In this paper, a new method for extracting sliding surface has been presented about a linear system with parametric uncertainties with known bound. In the proposed method, common signal of first order sliding mode control has been applied to the system and then the sliding surface is extracted as a virtual controller with the aim of minimizing a cost function. The main advantage of the proposed method is the possibility of setting the distance of the state trajectory from the sliding surface setting one of the design parameters. Thus, It is possible to near the ultimate goal of sliding mode control, i.e. staying the state trajectory on the sliding surface, without increasing the degree of sliding mode control, while the amount of used energy will be controlled, too. In order to show the efficiency of the method, a quarter car active suspension system has been chosen and the proposed method in the selection of position subsystem sliding surface is used.

Keywords: sliding surface, parametric uncertainties, cost function, quarter car active suspension system

۱- مقدمه

استفاده از کنترل مد لغزشی به جهت استراتژی ساده، پاسخگویی در برابر انواع عدم قطعیت‌ها و همین‌طور قابلیت استفاده برای مدل‌های غیرخطی و مرتبه بالا، یکی از روش‌های مقاوم محبوب محققان است. یکی از مسائل چالشی در این روش، چگونگی انتخاب سطح لغزش است. پژوهشگران روش‌های مختلفی برای انتخاب سطح پیشنهاد کرده‌اند که می‌توان آن‌ها را به دو دسته کلی طبقه بندی کرد:

الف) طراح، در گام اول مستقیماً یک سطح را به عنوان سطح لغزش پیشنهاد می‌کند. [۱-۴]

ب) طراح، استراتژی مشخصی را پیشنهاد می‌کند که اجرای آن منجر به استخراج یک سطح لغزش می‌شود.

در دسته اول، سطوح پیشنهادی می‌توانند دارای پارامترهای کاملاً مشخص و یا یک یا چند پارامتر نامشخص باشند. همچنین سطوح می‌توانند به صورت یک دینامیک از خطای ردیابی و یا خطای تطابق انتخاب شوند. منظور از خطای تطابق، اختلاف خروجی سیستم و خروجی یک مدل مرجع است. *Jeen Lin* و همکاران [۵] در سال ۲۰۰۹، سطح لغزش خطی با پارامترهای مشخص را به صورت تابعی تناسبی-مشتقی از خطای ردیابی و *Yagiz Nurkan* با همکارانش [۶] در سال ۲۰۰۸، سطحی مشابه را برای کنترل سیستم تعلیق فعال خودرو پیشنهاد دادند. *Andika Aji Wijaya* به همراه همکارانش [۷] در سال ۲۰۱۰، سطحی لگاریتمی را به عنوان یک سطح غیرخطی با پارامترهای مشخص ارائه نمودند. *Yon-Ping Chen* و همکاران [۸] در سال ۲۰۱۰، سطح لغزش را به صورت یک ترکیب خطی از حالت‌ها، ولی با پارامترهای نامشخص پیشنهاد داده، شرطی کافی روی پارامترهای نامعلوم سطح را با هدف تحقق یک دینامیک پایدار روی سطح لغزش به دست آوردند. *F. Deepak* و همکاران [۹] در سال ۲۰۱۱، سطحی غیرخطی را با تعدادی پارامتر نامشخص ارائه کرده، ضمن یافتن این پارامترها، اثر آن‌ها را روی عملکرد سیستم حلقه‌بسته تحلیل کردند. *Ren Chuanbo* و همکارانش در سال ۲۰۱۰ [۱۰]، سطح لغزش را به صورت دینامیکی پایدار از خطای تطابق انتخاب کردند. مدل مرجع مورد استفاده این محققان، سیستم تعلیق کنترل شده با یک استراتژی بهینه بود. *Song Hui* با همکاران در سال ۲۰۱۰ [۱۱] نیز برای انتخاب سطح از خطای تطابق

استفاده کردند، ولی مدل مورد استفاده آن‌ها مدل قلاب آسمانی بود. *Babak Assadsangabi* و همکارانش [۱۲] در سال ۲۰۰۹ از پیوند دو مدل قلاب آسمانی و قلاب زمینی استفاده کرده و امکان برقراری مصالحه بهتر بین جابجایی جرم‌های معلق و غیرمعلق را فراهم آوردند. *S.A. Zahiripour* و همکارش [۱۳] در سال ۲۰۱۳، در جهت بهبود کنترل پیوندی مدل مینا پیشنهادی ارائه دادند.

در دسته دوم با توجه به امکان پیشنهاد استراتژی‌های متعدد، یک حوزه وسیع پیش روی محققان قرار دارد. تبدیل مسأله انتخاب سطح، به انواع مسائل بهینه‌سازی را می‌توان در این دسته جای داد؛ همچنین استفاده از یک استراتژی کنترلی جهت انتخاب سطح لغزش می‌تواند به عنوان یکی از ایده‌های مطرح در این دسته باشد. *B.-L. Zhang* و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۰۹ با استفاده از یک ماتریس تبدیل، معادلات فضای حالت سیستم تعلیق خودرو را به شکل جدیدی درآوردند. سپس با طراحی یک کنترل‌کننده مجازی برای زیرسیستم حاصل و اعمال کنترل‌کننده به دست آمده، سطح لغزشی را استخراج کردند. *E. Chavez-Conde* و همکارانش [۱۵] در سال ۲۰۰۹، از ایده روش کنترلی تناسبی-انتگرالی-تعمیم یافته جهت استخراج سطح لغزش برای سیستم تعلیق خودرو بهره جستند. *Xiang Jia* و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۰۷، با طراحی یک کنترل‌کننده بهینه برای سیستم تعلیق و اعمال آن به معادلات دینامیکی سیستم، سطح لغزشی تناسبی-انتگرالی استخراج کرده‌اند.

با توجه به وجود عدم قطعیت‌های مختلف در مدل‌های مورد استفاده، ماندگاری مسیر حالت روی سطح لغزش عملاً غیرممکن است و لذا محققان روش‌های متعددی را جهت نزدیک شدن به این هدف غایی پیشنهاد کرده‌اند. متداول‌ترین روش پیشنهادی، استفاده از کنترل مد لغزشی مرتبه بالاتر است [۱۷] که از معایب آن می‌توان، به افزایش حجم محاسبات و همین‌طور نیاز به اطلاعات مشتقات مرتبه بالاتر متغیر لغزشی، اشاره کرد. *Shigehiro Toyama* و همکارانش [۱۸] در سال ۲۰۰۸، نمونه‌ای از روش‌های مد لغزشی مرتبه دو را در مورد سیستم تعلیق خودرو به کار بردند. روش پیشنهادی این مقاله در دسته دوم قرار می‌گیرد و امکان نزدیک شدن به هدف غایی کنترل مد لغزشی را با تنظیم یکی از پارامترهای طراحی و بدون بالابردن درجه مد

اگر u_{eq} ، به صورت یک ترکیب خطی از متغیرهای حالت انتخاب شود، خواهیم داشت:

$$u_{eq} = Zx \quad (5)$$

لازم به یادآوری است که Z طوری انتخاب می‌شود که سیستم دینامیکی زیر در شرایط نامی، به صورت مجانبی پایدار باشد.

$$\dot{x} = (A + BZ)x$$

و رابطه (۴) به شکل زیر بازنویسی می‌شود:

$$\dot{x} = (A + BZ)x + B\rho \tanh(s) \quad (6)$$

با انتخاب:

$$\begin{aligned} A + BZ &= \hat{A} \\ B\rho &= \hat{B} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\tanh(s) = v$$

رابطه (۶) به صورت رابطه (۸) قابل بازنویسی است:

$$\dot{x} = \hat{A}x + \hat{B}v \quad (8)$$

برای سیستم دینامیکی اخیر، معیار عملکرد مربعی (۹) را انتخاب می‌کنیم و کنترل‌کننده مجازی v را طوری انتخاب می‌کنیم که این تابع هزینه در شرایط نامی حداقل شود. منظور از شرایط نامی، شرایطی است که در آن $A = A_n$ و $B = B_n$ مقادیر بدون نامعینی ماتریس‌های حالت و ورودی هستند. (در ادامه مقاله نیز اندیس n به منظور نمایش مقدار نامی انتخاب شده است)

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (x^T Q x + v^T R v) dt \quad (9)$$

که Q یک ماتریس مثبت معین و R یک اسکالر مثبت، انتخاب می‌شود.

$$v = -kx \quad (10)$$

$$k = R^{-1} \hat{B}_n^T P \quad (11)$$

که P ، پاسخ مثبت معین و متقارن معادله ریکاتی زیر است:

$$\hat{A}_n^T P + P \hat{A}_n + P \hat{B}_n R^{-1} \hat{B}_n^T P - Q = 0 \quad (12)$$

که در این رابطه، $\hat{B}_n = B_n \rho$ و $\hat{A}_n = A_n + B_n Z$

لغزشی، فراهم می‌سازد. یکی از مشکلات روش پیشنهادی، محدودیتی است که در انتخاب پارامترهای طراحی آن به وجود می‌آید. همچنین روش پیشنهادی، یک‌به‌یک بودن تابع سویچینگ را نیز به عنوان یک محدودیت تحمیل می‌کند و لذا همگرایی مجانبی، متغیر لغزشی را تضمین نمی‌کند، اما کوچک بودن خطای متغیر لغزشی تضمین می‌شود.

در این مقاله، پس از بیان روش استخراج سطح لغزش، وجود مد لغزشی در مورد این سطح به اثبات می‌رسد. در بخش بعد، سیستم تعلیق فعال ۱/۴ خودرو با دو درجه آزادی مدل شده، روش پیشنهادی در مورد آن به کار گرفته می‌شود. در قسمت بعد، نتایج حاصل از شبیه‌سازی و بهبود کیفیت عملکرد سیستم تعلیق، نمایش داده شده، در انتها نتیجه‌گیری از این مقاله، ارائه شده است.

۲- تکنیک انتخاب سطح لغزش و طراحی کنترل-کننده

معادله فضای حالت یک سیستم خطی تک‌ورودی و دارای نامعینی پارامتری با کران مشخص را به صورت (۱) در نظر بگیرید:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (1)$$

$$\|A\| < \varepsilon, \quad \|B\| < \delta \quad (2)$$

که در آن $x \in R^n$ و $u \in R$ و A و B به ترتیب، ماتریس‌های حالت و ورودی می‌باشند. منظور از $\|\cdot\|$ ، نرم اقلیدسی (نرم ۲) است.

یکی از ملزومات روش پیشنهادی، یک‌به‌یک بودن تابع سویچینگ است. بر این اساس، قانون کنترل مد لغزشی، به صورت (۳) انتخاب می‌شود:

$$u = u_{eq} + \rho \tanh(s) \quad (3)$$

در این رابطه، u_{eq} ، سیگنال کنترل معادل، ρ ، بهره سویچینگ و $\tanh(s)$ ، تابع سویچینگ است. با اعمال این کنترل‌کننده به سیستم (۱):

$$\dot{x} = Ax + Bu_{eq} + B\rho \tanh(s) \quad (4)$$

(۱۸)

$$\|x\| < \beta$$

با استفاده از ورودی کنترل (۱۹)، سطح لغزش (۱۳)، به صورت مقاوم، دسترس‌پذیر^۱ خواهد بود.

$$u = u_{eq} + \rho \operatorname{sign}(s) \quad (۱۹)$$

$$\rho > \alpha\beta\gamma \quad (۲۰)$$

که در آن γ نامساوی زیر را برآورده می‌کند:

$$\|\hat{A}\| = \|A + BZ\| < \gamma \quad (۲۱)$$

اثبات.

وجود γ : با توجه به مشخص بودن کران نامعینی‌های پارامتری سیستم، طبق رابطه (۲)، خواهیم داشت:

$$\|A + BZ\| \leq \|A\| + \|BZ\| < \gamma$$

برهان خلف- فرض کنید:

$$s\dot{s} \geq 0 \quad \exists s \neq 0$$

$$s \left(\frac{1+kx}{1-kx} \right) \left(-\frac{k\dot{x}}{(1+kx)^2} \right) \geq 0$$

$$-s(R^{-1}\rho B_n^T P) (\hat{A}x + B\rho \operatorname{sign}(s)) \geq 0$$

$$\rho B_n^T P B |s| \leq -s B_n^T P \hat{A}x \leq |s| |B_n^T P \hat{A}x| \quad (۲۲)$$

تذکر- اگر $x, y \in R^{n \times 1}$ ، آن‌گاه می‌توان ضرب داخلی x, y را به صورت (۲۳) تعریف کرد.

$$x \cdot y = x^T y \quad (۲۳)$$

تذکر- اگر x, y دو بردار در فضای V باشند، آن‌گاه:

$$|x \cdot y| \leq \|x\| \|y\| \quad (۲۴)$$

تذکر- اگر $x \in R^{n \times 1}$ و $A \in R^{m \times n}$ ، آن‌گاه:

$$\|A\|_p = \sup \frac{\|Ax\|_p}{\|x\|_p} \Rightarrow \|Ax\| \leq \|A\| \|x\| \quad (۲۵)$$

با توجه به تذکرها بالا و رابطه (۲۲):

$$\rho B_n^T P B \leq \|PB_n\| \|\hat{A}x\|$$

$$\rho B_n^T P B \leq \|PB_n\| \|\hat{A}\| \|x\| = \|PB_n\| \|\hat{A}\| \|x\|$$

$$\rho \leq \alpha\beta\gamma \quad (۲۶)$$

لازم به یادآوری است که شرط وجود و یکتایی جواب معادله فوق هرویتز بودن \hat{A}_n است که با توجه به توضیح ارائه شده در مورد انتخاب Z ، این شرط برقرار است. با استفاده از روابط (۷)، (۱۰) و (۱۱)، سطح لغزش بهینه (۱۳) به دست می‌آید.

$$\tanh(s) = -R^{-1} \hat{B}_n^T P x$$

$$\Rightarrow s = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1-R^{-1} \hat{B}_n^T P x}{1+R^{-1} \hat{B}_n^T P x} \right) \quad (۱۳)$$

تذکر- با دقت در رابطه سطح لغزش، محدودیتی در انتخاب R ، به چشم می‌خورد. با توجه به آن‌که متغیر لغزشی یک عدد حقیقی است، مقدار R باید به گونه‌ای انتخاب شود که آرگومان لگاریتم، بزرگتر از صفر باشد و در نتیجه:

$$\frac{1-R^{-1} \hat{B}_n^T P x}{1+R^{-1} \hat{B}_n^T P x} > 0 \Rightarrow R > |\hat{B}_n^T P x| \quad (۱۴)$$

برای محاسبه u_{eq} :

$$\dot{s} = 0$$

$$\left(\frac{1+kx}{1-kx} \right) \left(-\frac{k\dot{x}}{(1+kx)^2} \right) = 0 \quad (۱۵)$$

کافی است:

$$\dot{x} = 0 \Rightarrow Ax + Bu = 0 \quad (۱۶)$$

طبق رابطه (۵)، لازم است کنترل‌کننده به صورت یک فیدبک خطی از حالت‌ها انتخاب شود. کنترل‌کننده پیشنهادی، کنترل‌کننده‌ای است که مربعات خطا را در شرایط نامی حداقل می‌کند. پس:

$$u_{eq} = -B_n^{-1} A_n x = -(B_n^T B_n)^{-1} B_n^T A_n x \quad (۱۷)$$

منظور از \perp ، معکوس مجازی است.

تذکر- دقت در روابط (۷) و (۱۲)، نشان می‌دهد که P و \hat{B}_n وابسته به بهره سوییچینگ هستند؛ بنابراین ρ باید مستقل از \hat{B}_n و P طراحی شود.

قضیه: (امکان وجود مد لغزشی)

فرض کنید، الف) $B_n^T P B > 0$ و ب) مقادیر مثبت و مشخص α و β وجود دارند، به طوریکه:

$$\frac{\|PB_n\|}{B_n^T P B} < \alpha$$

^۱ Robustly reachable

سطح جاده (z_r) را نمایش می‌دهد. k_s ، ثابت نیروی فنر تعلیق، m_s ، جرم معلق، b_s ، ثابت میرایی کمک‌فنر، m_u ، جرم غیرمعلق و k_t ، ثابت فنری تاپر خودرو است.

تذکر- اغتشاشات ناشی از ناهمواری‌های سطح جاده را می‌توان معادل شرایط اولیه برای جابجایی تاپر خودرو در نظر گرفت [۲]. با این توضیح، دینامیک عمودی خودرو، با فرض ورود اغتشاش در لحظه صفر، به صورت رابطه (۲-۲۷) نیز قابل مدل‌سازی و تحلیل است:

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad x_u(0) = x_0 \quad (27-2)$$

۴- نمایش و تحلیل نتایج شبیه‌سازی

اگرچه روش مونت کارلو بهترین حالت صحنه گذاری روش است، ولی مطالعه مراجع نشان می‌دهد که برای مقایسه روش‌های پیشنهادی سعی می‌شود، نوع اغتشاش اعمالی ثابت در نظر گرفته شود و به این ترتیب، با ایجاد شرایط یکسان، مقایسه را انجام می‌دهند که معقول به نظر می‌رسد و ما هم از همین روش استفاده می‌کنیم.

مقادیر پارامترهای سیستم، هنگام برخورد خودرو با دست‌انداز، عبارتند از:

$$m_s = 400 \text{ (kg)} \quad m_u = 40 \text{ (kg)}$$

$$k_t = 200000 \left(\frac{N}{m}\right) \quad k_s = 18000 \left(\frac{N}{m}\right)$$

$$B_s = 1000 \left(\frac{Ns}{m}\right)$$

عدم قطعیت، جرم بدنه خودرو در نظر گرفته شده است که با توجه به تغییر تعداد سرنشینان، قابل تغییر است. بازه تغییرات جرم معلق، مشخص بوده و به صورت زیر است:

$$260 \text{ kg} < m_s < 460 \text{ kg} \quad \& \quad m_{sn} = 360 \text{ kg}$$

پارامترهای طراحی کنترل‌کننده، به صورت زیر انتخاب شده است:

$$\alpha = 10^3, \quad \beta = 5, \quad \gamma = 5000, \quad R = 10^9$$

$$Q = \text{diag}\{100, 1, 1, 1\}$$

$$u_{eq} = 18000(x_1 - x_3)$$

$$\rho = \alpha\beta\gamma = 25 * 10^6$$

بنابراین، اگر $\rho > \alpha\beta\gamma$ ، آن‌گاه، $SS < 0$ و به عبارت دیگر، با انتخاب $\rho > \alpha\beta\gamma$ ، سطح لغزش (۱۳)، به صورت مقاوم، دسترس‌پذیر خواهد بود.

تذکر- همان‌طور که قضیه بالا نشان می‌دهد، تضمین همگرایی مجانبی متغیر لغزشی با فرض استفاده از تابع علامت $\text{sign}(s)$ به عنوان تابع سویچینگ صورت گرفته است. حال آن‌که تابع سویچینگ در کنترل‌کننده پیشنهادی $\tanh(s)$ است؛ بنابراین، روش پیشنهادی پایداری مجانبی خطا را تضمین نمی‌کند و می‌توان نتیجه گرفت، خطای متغیر لغزشی در این حالت کران‌دار یکنواخت خواهد بود.

۳- مدل‌سازی سیستم تعلیق فعال ۱/۴ خودرو

شکل (۱)، مدل دینامیکی سیستم تعلیق فعال ۱/۴ خودرو با دو درجه آزادی را نشان می‌دهد. با استفاده از قانون نیوتن در مورد جرم‌های معلق و غیرمعلق خواهیم داشت [۱]:

$$m_s \ddot{z}_s = -k_s(z_s - z_u) - b_s(\dot{z}_s - \dot{z}_u) - F_a \quad (27)$$

$$m_u \ddot{z}_u = k_s(z_s - z_u) + b_s(\dot{z}_s - \dot{z}_u) - k_t z_r - F_a$$

با انتخاب متغیرهای حالت به صورت $x_2 = \dot{z}_s$ ، $x_1 = z_s$ ، $x_4 = \dot{z}_u$ و $x_3 = z_u$ صورت زیر خواهد بود:

$$\dot{x} = Ax + Bu + Dv \quad (27-1)$$

که در آن:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{k_s}{m_s} & -\frac{b_s}{m_s} & \frac{k_s}{m_s} & \frac{b_s}{m_s} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_s}{m_u} & \frac{b_s}{m_u} & -\frac{k_s+k_t}{m_u} & -\frac{b_s}{m_u} \end{bmatrix}$$

$$B = [0 \quad \frac{1}{m_s} \quad 0 \quad -\frac{1}{m_u}]^T$$

$$D = [0 \quad 0 \quad 0 \quad \frac{k_t}{m_u}]^T$$

که در این رابطه x_1 و x_3 ، به ترتیب جابجایی جرم معلق و غیرمعلق، u نیروی تولیدی عملگر (F_a) و v ، دامنه ناهمواری

لغزشی را به ازای دو مقدار مختلف R مقایسه کرده، درستی ادعای بالا را نشان می‌دهد.

در میان روش‌های مختلف پیشنهادی انتخاب سطح لغزش که در مقدمه مقاله توضیح داده شدند، روش سطح لغزش خطی [۱] که به اختصار LSPS (Linear specified parameter sliding surface) نامیده می‌شود، نسبت به سایر روش‌ها از نظر دامنه نوسانات بدنه خودرو و سرعت دفع اثر دست‌انداز نتایج بهتری به همراه داشت. در روش مرجع [۵]، سطح لغزش متداول به صورت زیر انتخاب شده است:

$$s = \dot{e} + \lambda e, \quad \lambda = 0.8$$

به همین دلیل، این روش برای مقایسه با روش پیشنهادی این مقاله مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۱۰)، جابجایی بدنه خودرو در دو حالت فعال و غیرفعال را با استفاده از روش LSPS نمایش می‌دهد. شکل (۱۱)، نیروی موردنیاز این روش که باید توسط یک عملگر تأمین شود را نشان می‌دهد. مقایسه شکل‌های (۳) و (۱۰) (و به صورت تجمیع شده در شکل (۱۲))، نشان می‌دهد که سرعت دفع اثر اغتشاش در هر دو روش برابر بوده، ولی دامنه نوسانات بدنه خودرو در روش LSPS نسبت به روش پیشنهادی این مقاله کمتر است (در حدود چند میلی‌متر) که مزیتی برای روش LSPS محسوب می‌شود؛ اما نکته مهمی که برتری روش پیشنهادی این مقاله را در قیاس با روش LSPS به اثبات می‌رساند، با مقایسه شکل‌های (۷) و (۱۱) (و به صورت تجمیع شده در شکل (۱۳))، مشخص می‌شود. مقایسه این شکل‌ها، نشان می‌دهد که انرژی مصرفی روش پیشنهادی، بسیار کمتر بوده، سیگنال کنترلی نرم دارد؛ در حالیکه خروجی عملگر روش LSPS به صورت مکرر به مرز اشباع می‌رسد که نه تنها در گذر زمان، موجب استهلاک آن می‌شود، بلکه میزان انرژی مصرفی را تا حد زیادی بالا می‌برد.

یکی از روش‌های کنترل لغزشی مرتبه بالا که توسط Shigehiro Toyama در سال ۲۰۰۸ ارائه شد [۱۸] نیز، برای مقایسه با روش پیشنهادی این مقاله، مورد بررسی قرار گرفته است. پارامترهای کنترل‌کننده بر گرفته از [۱۸] بوده، جهت مقایسه اغتشاش، مطابق شکل (۳) در نظر گرفته شده است. شکل (۱۴)، جابجایی بدنه خودرو در دو حالت را نمایش می‌دهد. شکل (۱۵)، نیروی موردنیاز این روش را نشان می‌دهد که باید توسط یک عملگر تأمین شود. مشاهده می‌شود که

تذکر - با توجه به محاسبات زیر، α ، β و γ طوری انتخاب شده‌اند که شرایط قضیه برآورده شود.

با توجه به مقادیر ماتریس‌های حالت (A) و ورودی (B) و همین‌طور، بردار Z داریم:

$$\|A + BZ\| < 5000 \Rightarrow \gamma = 5000$$

از طرفی:

$$\frac{\|PB_n\|}{B_n^T PB} < 10^3 \Rightarrow \alpha = 10^3, \quad \|x\| < 5 \Rightarrow \beta = 5$$

با فرض اشباع عملگر مورد استفاده طبق رابطه (۲۸):

$$|u_{\max}| = 2 \text{ (kN)} \quad (28)$$

ورودی کنترل (۲۹) که از قضیه استخراج می‌شود، به سیستم تعلق خودرو اعمال می‌شود:

$$u = 18000(x_1 - x_3) + 25 * 10^6 \tanh(s) \quad (29)$$

شکل (۲)، مدل زمانی دست‌انداز سطح جاده را نمایش می‌دهد. شکل (۳)، جابجایی بدنه خودرو را در برخورد با دست‌انداز در حالت‌های فعال و غیرفعال مقایسه کرده، کاهش میزان نوسانات بدنه را نشان می‌دهد. شکل (۴)، مسیر فاز مربوط به بدنه خودرو را در حالت فعال نشان می‌دهد (سرعت بر حسب موقعیت). شکل (۵)، جابجایی تایلر خودرو را در برخورد با دست‌انداز در حالت‌های فعال و غیرفعال پس از عبور از دست‌انداز، مقایسه کرده، نشان می‌دهد که در حالت فعال، تایلر خودرو در زمان کوتاه‌تری به سطح جاده چسبیده و لذا فرمان‌پذیری خودرو در این حالت را افزایش می‌دهد. شکل (۶)، مسیر فاز مربوط به تایلر خودرو را در حالت فعال نشان می‌دهد (سرعت بر حسب موقعیت). شکل (۷)، نیروی موردنیاز، جهت تحقق پاسخ شکل‌های (۳) و (۵) را نشان می‌دهد. شکل (۸)، نحوه تغییرات متغیر لغزشی و همگرایی آن را نشان می‌دهد.

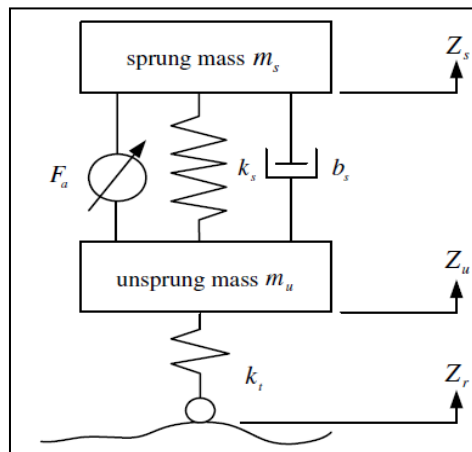
همان‌طور که قبلاً اشاره شد، از مزایای روش پیشنهادی امکان تنظیم فاصله مسیر حالت از سطح لغزش در طول فرایند کنترل و به عبارت دیگر، نزدیک شدن به هدف غایی، بدون افزایش درجه کنترل مد لغزشی است. دقت در رابطه (۹)، نشان می‌دهد که افزایش R ، موجب کاهش فاصله مسیر حالت از سطح لغزش خواهد شد. شکل (۹)، تغییرات متغیر

همچنین کاهش میزان انرژی مصرفی است. بالا بردن درجه مد لغزشی، علاوه بر آن که به اطلاعات مربوط به مشتقات مرتبه بالاتر متغیر لغزشی نیازمند است، نسبت به مد لغزشی مرتبه اول، قانون کنترل پیچیده‌تری نیز دارد. با توجه به رقابت شدید صنایع خودروسازی، جهت ارائه راحتی بیش‌تر به سرنشینان، به عنوان یکی از اهداف مهم سیستم‌های تعلیق خودرو، استراتژی پیشنهادی برای فعال‌سازی سیستم تعلیق خودرو به کار گرفته شد و بهبود کیفیت عملکرد سیستم تعلیق در هر دو بخش بدنه و چرخ خودرو نسبت به حالت غیرفعال و همچنین نسبت به یکی از روش‌های اخیر پیشنهادی، توسط محققان نمایش داده شد.

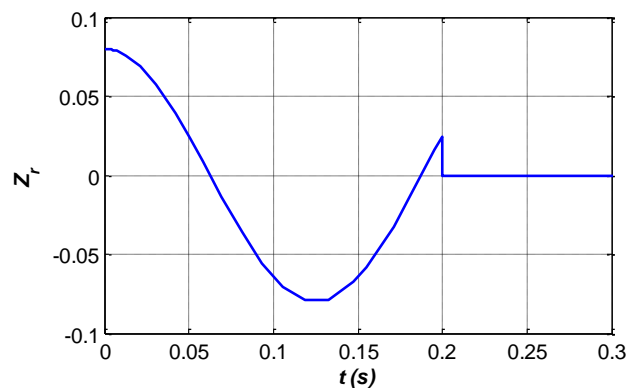
روش پیشنهادی این مقاله هم از جهت سرعت دفع اثر اغتشاش و هم از نظر میزان مصرف انرژی، عملکرد بهتری دارد. نکته مهم دیگری که باید به آن اشاره کرد، آن است که با توجه به حجم بالای محاسبات روش کنترل لغزشی مرتبه بالا، زمان پردازش آن توسط نرم‌افزار متلب حدود ۵۰۰ میلی-ثانیه است، در حالی که در مورد روش پیشنهادی، این زمان کمتر از ۲۰۰ میلی‌ثانیه است.

۵- نتیجه‌گیری

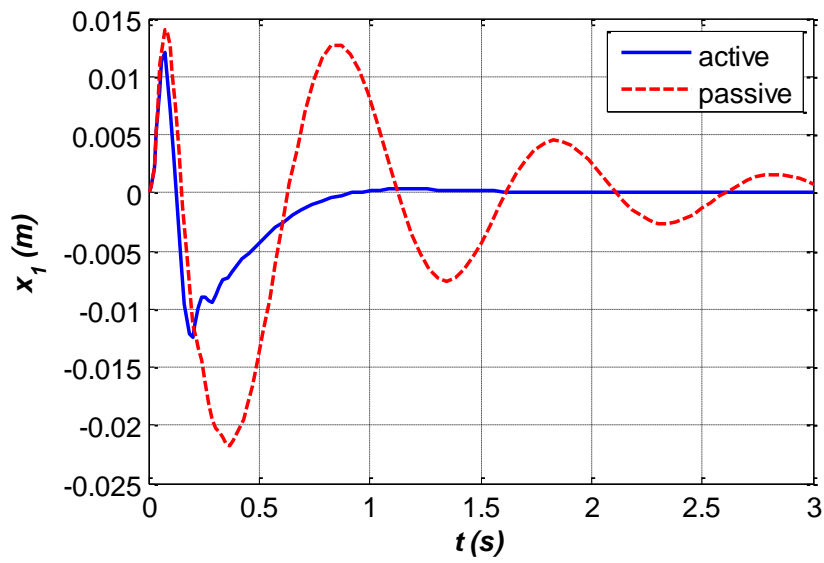
در این مقاله، روش جدیدی جهت استخراج سطح لغزش، در استراتژی کنترلی مد لغزشی ارائه شد. ایده اصلی این روش، تبدیل مسأله انتخاب سطح، به یک مسأله بهینه‌سازی است. مزیت اصلی روش پیشنهادی، نزدیک شدن به هدف غایی کنترل مد لغزشی بدون بالا بردن درجه‌ی مد لغزشی و



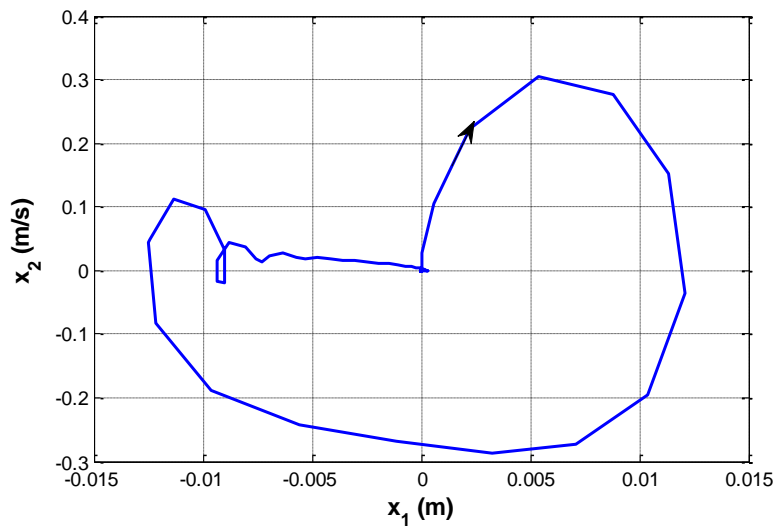
شکل (۱): مدل سیستم تعلیق فعال ۱/۴ خودرو با دو درجه آزادی



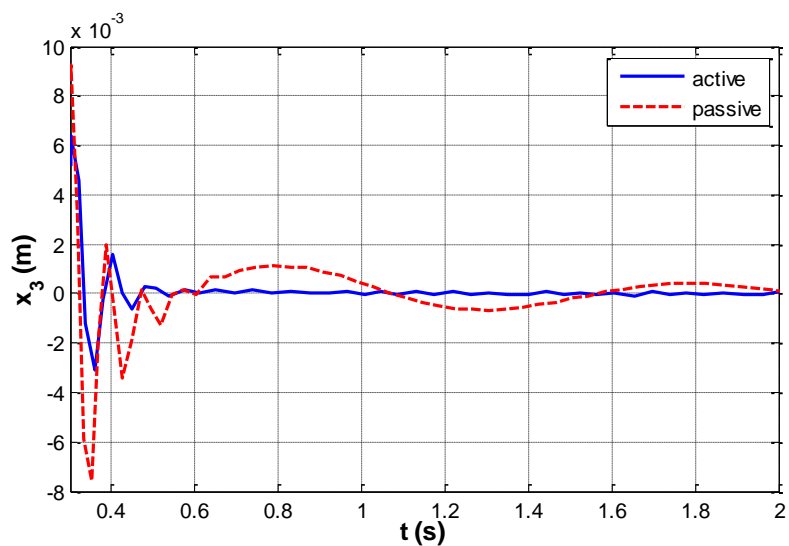
شکل (۲): مدل زمانی ناهمواری سطح جاده



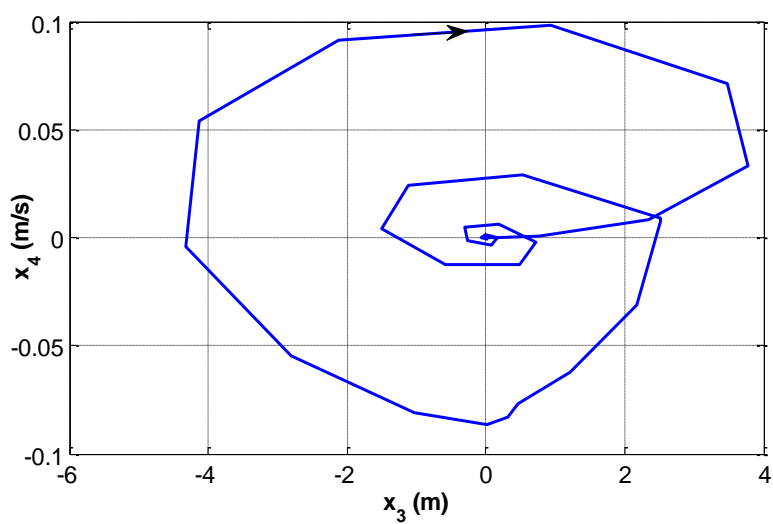
شکل (۳): مقایسه جابه‌جایی بدنه خودرو در حالت‌های فعال و غیرفعال



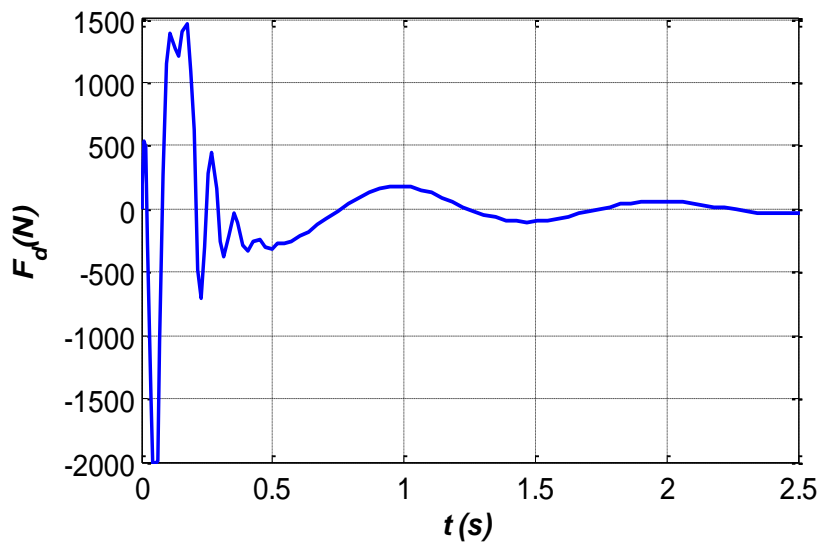
شکل (۴): مسیر فاز مربوط به بدنه خودرو در حالت فعال



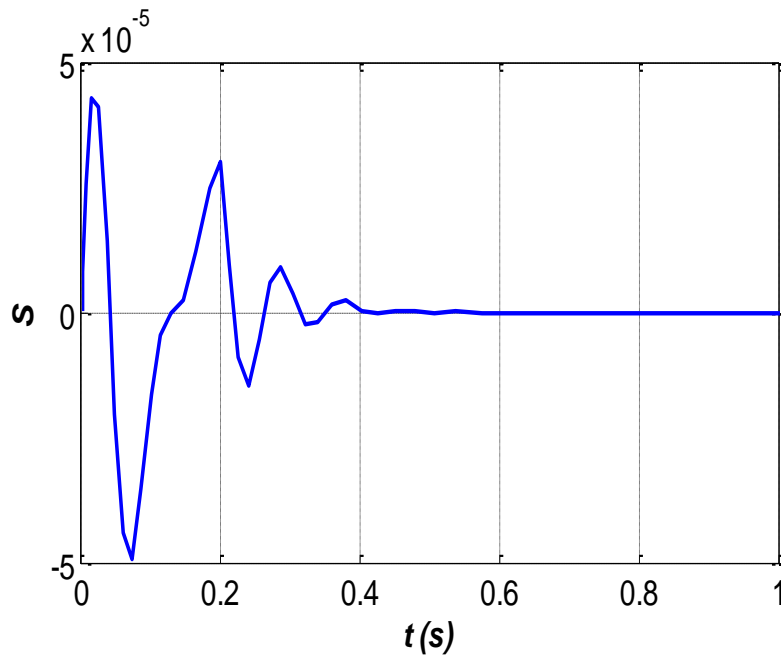
شکل (۵): مقایسه جابه‌جایی تایر خودرو در حالت‌های فعال و غیرفعال پس از عبور از دست‌انداز



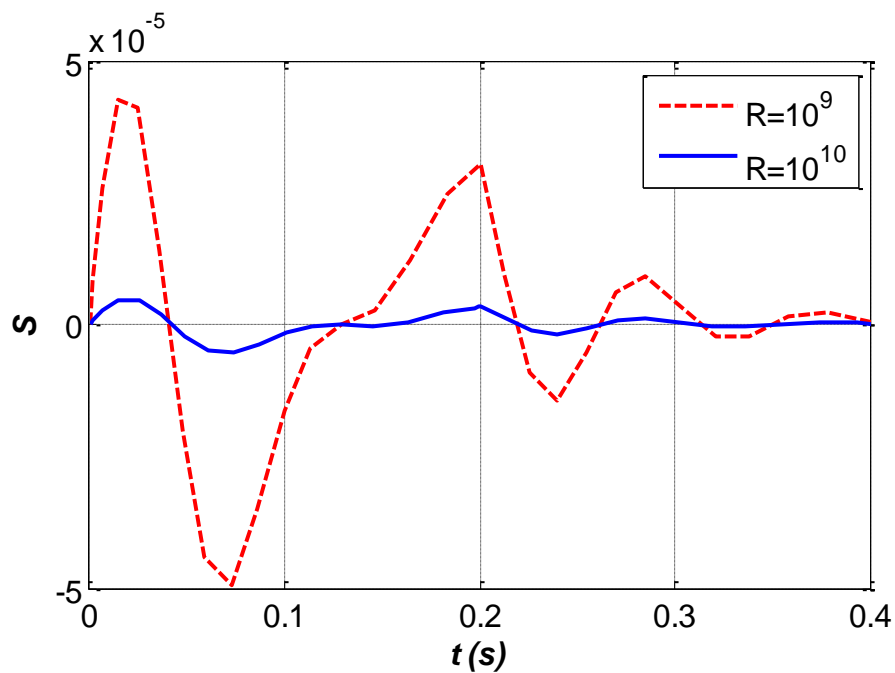
شکل (۶): مسیر فاز مربوط به تایر خودرو در حالت فعال



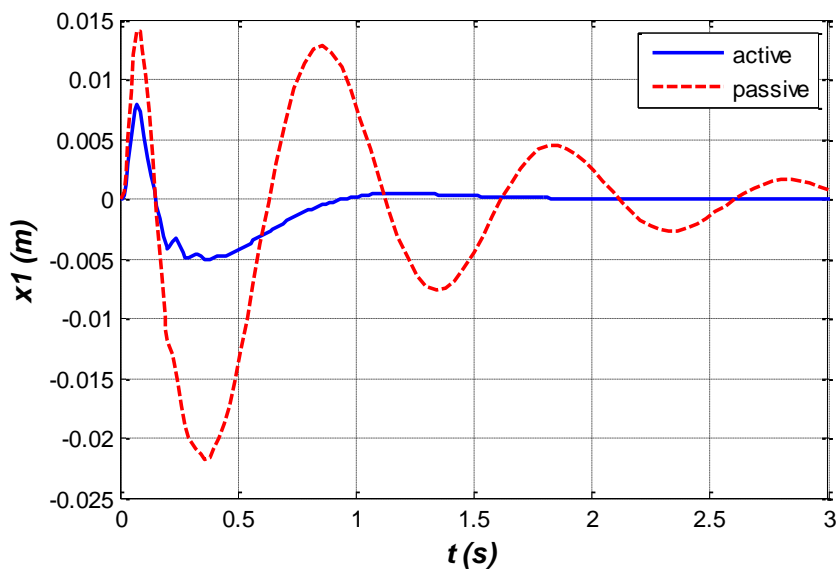
شکل (۷): نیروی خروجی موردنیاز عملگر



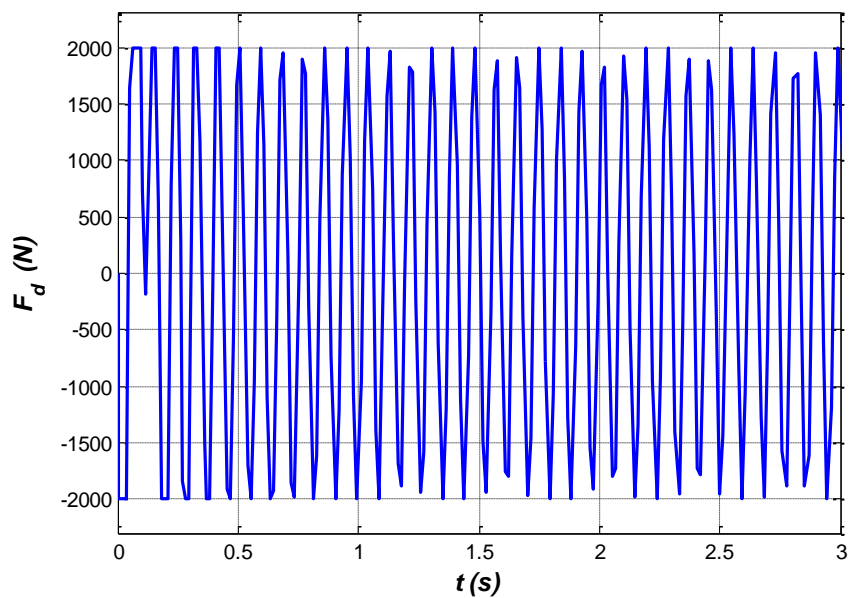
شکل (۸): منحنی تغییرات زمانی متغیر لغزشی



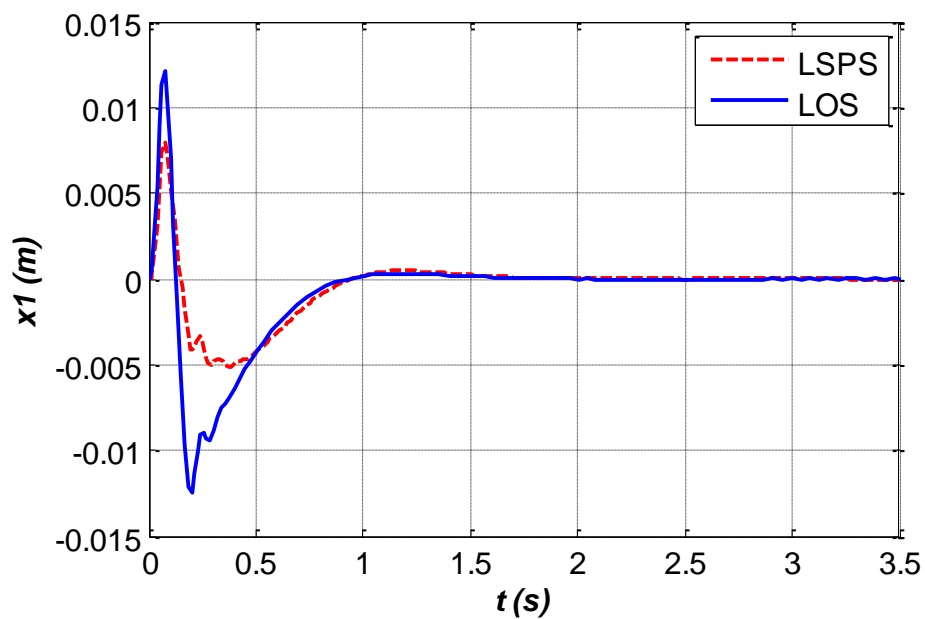
شکل (۹): مقایسه تغییرات متغیر لغزشی به ازای دو مقدار مختلف R



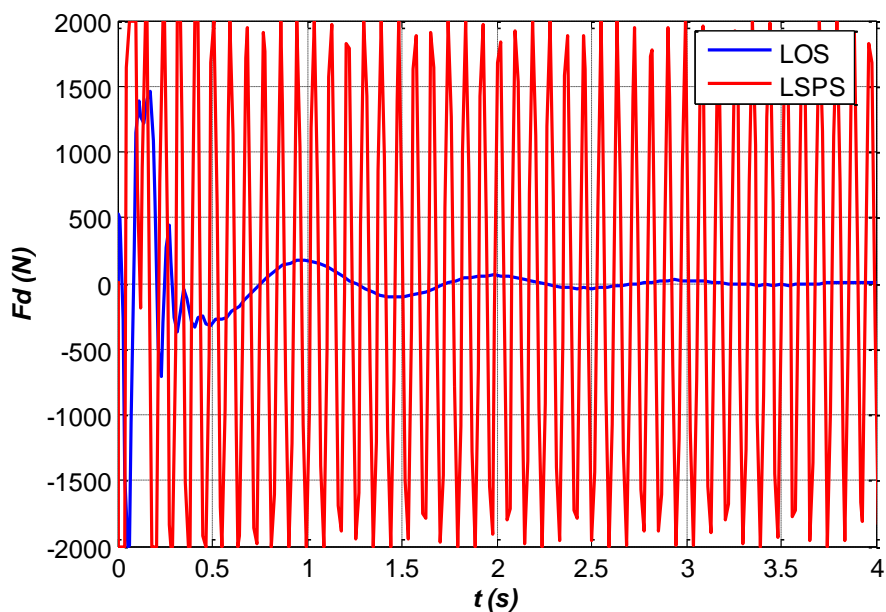
شکل (۱۰): جابه‌جایی بدنه خودرو با استفاده از روش LSFS



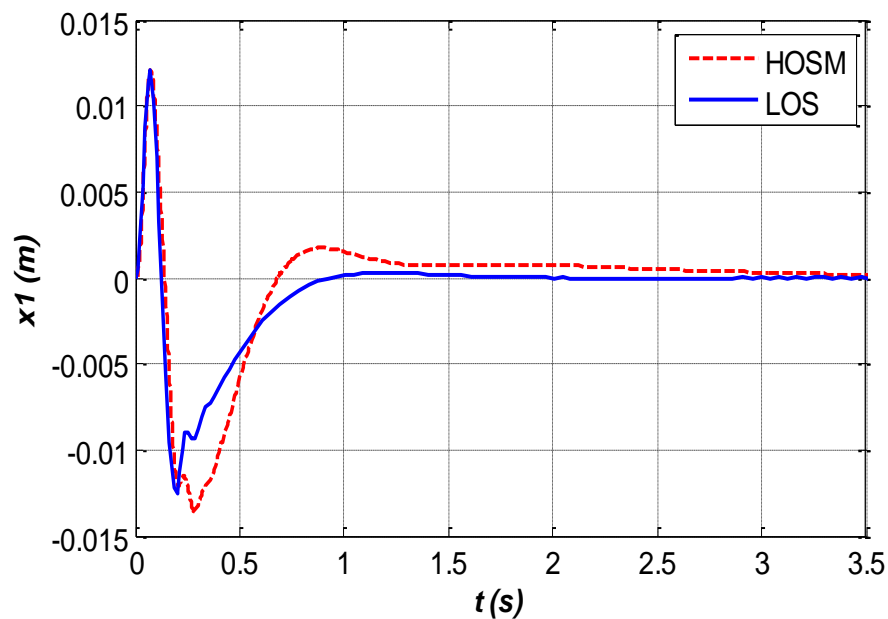
شکل (۱۱): نیروی خروجی عملگر مورد استفاده در روش LSPS



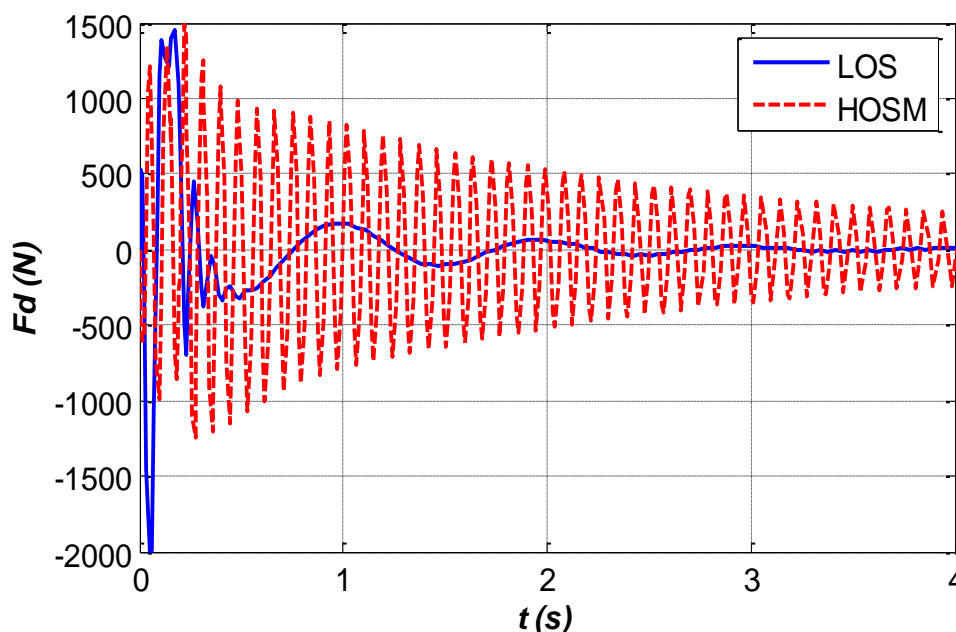
شکل (۱۲): تجميع شده شکل‌های (۳) و (۱۰)



شکل (۱۳): تجميع شده شکل‌های (۷) و (۱۱)



شکل (۱۴): مقایسه جابه‌جایی بدنه خودرو با استفاده از روش پیشنهادی و روش لغزشی مرتبه بالا



شکل (۱۵): مقایسه نیروی خروجی عملگر مورد استفاده در روش‌های پیشنهادی و HOSM

مراجع

- sliding mode controller for active suspension systems", *Mechatronics*, vol.19, pp.1178-1190, 2009
- [6] Nurkan Yagiz, Yuksel Hacioglu, and Yener Taskin, "Fuzzy Sliding-Mode Control of Active Suspensions", *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, vol.55, no.11, pp. 3883-3890, 2008
- [7] Andika Aji Wijaya, Wahyudi & R. Akmeliawati, Fadly Jashi Darsivan, "Natural Logarithm Sliding Mode Control (In-SMC) using EMRAN For Active Engine Mounting System", 11th Int. Conf. Control, Automation, Robotics and Vision Singapore, pp.1365-1369, 2011
- [8] YON-PING CHEN{ and JEANG-LIN CHANG, "A new method for constructing sliding surfaces of linear time-invariant systems", *International Journal of Systems Science*, vol.31, no.4, pp.417-420, 2010
- [9] F. Deepak¹ B. Bandyopadhyay² L. Fridman³, "Non-linear sliding surface:
- [1] Yugang Niu¹, Yonghui Liu, and Tinggang Jia, "Reliable control of stochastic systems via sliding mode technique". *Optimal control application and methods*, Vol.34, pp.712-727, 2012
- [2] Bei Chen, Yugang Niu, Yuanyuan Zou, Tinggang Jia. "Reliable Sliding-Mode Control for Markovian Jumping Systems Subject to Partial Actuator Degradation" *Circuits Syst Signal Process*, Vol.32, pp.601-614, 2013
- [3] Bei Chen, Yugang Niu¹, Yuanyuan Zou. "Adaptive sliding mode control for stochastic Markovian jumping systems with actuator degradation", *Automatica*, vol.49, pp.1748-1754, 2013
- [4] Boban Veselić, Branislava Draženović, Čedomir Milosavljević, "Sliding manifold design for linear systems with unmatched disturbances", *Journal of the Franklin Institute*, vol.351, pp.1920-1938, 2014
- [5] Jeon Lin a, Ruey-Jing Lian b,*, Chung-Neng Huang c, Wun-Tong Sie d, "Enhanced fuzzy

- [18] Shigehiro Toyama¹, Fujio Ikeda² and Yoshio Sorimachi³, "A Second-Order Sliding Mode Controller for Active Suspension Systems", International Conference on Control, Automation and Systems, pp.18-23, 2008
- towards high performance robust control, IET Control Theory Appl, pp.1-8, 2011
- [10] Ren Chuanbo, Wang Liang, Zhang Cuicui, Liu Lin, "Variable Structure Model Following Control for Dual-input Active Suspension", proceeding of IEEE, china, 2010
- [11] Song Hui, Qiu Wei, Wang Enrong, " The Sliding Model-following Control for Semi-active MR-Vehicle Suspension", proceeding of IEEE, 2010
- [12] Babak Assadsangabi^{1,3}, Mohammad Eghtesad^{1,4}, Farhang Daneshmand^{1,5} and Nader Vahdati², " Hybrid sliding mode control of semi-active suspension systems", Smart Mater. Struct, vol.18, pp.1-10, 2009
- [13] Zahiripour S, Jalali A. "Improving Hybrid Model Reference Sliding Mode Control of a Car Active Suspension System Using Optimum Turn of Sliding Surfaces and Fuzzy Logic", Aerospace Mechanics Journal. Vol. 9, pp.79-87, 2013
- [14] B.-L. Zhang, G.-Y. Tang, and F.-L. Cao, " Optimal Sliding Mode Control for Active Suspension Systems", Proceedings of the IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, Okayama, Japan, pp.351-356, 2009
- [15] E. Ch´avez-Conde†, F. Beltr´an-Carbajal‡, A. Blanco-Ortega§ and H. M´endez-Az´ua‡, " Sliding Mode and Generalized PI Control of Vehicle Active Suspensions" , 18th IEEE International Conference on Control Applications Part of IEEE Multi-conference on Systems and Control Saint Petersburg, pp.1726-1731, 2009
- [16] Xiang Jia,*, Wei Weia, Hongye Sub, " Comments on "A class of proportional-integral sliding mode control with application to active suspension system", Systems & Control Letters, vol.56, pp.253-254, 2007
- [17] Juan Diego S´anchez-Torres¹, Alexander G. Loukianov², Marcos I. Galicia³, Javier Ruiz⁴ and Jorge Rivera⁵, "ABS and Active Suspension Control via High Order Sliding Modes and Linear Geometric Methods for Disturbance Rejection", International Conference on Digital Object Identifier, pp.1-6, 2011