ماهنامه علمى يژوهشى



مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

كنترل مقاوم سيستم ترمز ضدقفل خودرو با استفاده از مدلغزشي ترمينال سريع بهينه

حميدر ضيا مقدم¹، حامد محللي^{2*}

1- دانشجوى كارشناسى ارشد، مهندسى برق، دانشگاه آزاد اسلامى واحد قزوين، قزوين 2- دانشیار، مهندسی برق، دانشگاه گیلان، رشت * رشت، صندوق پستى 3756-41635 mojallali@guilan.ac.ir «41635

چکیدہ	اطلاعات مقاله
مسیستم ترمز ضدقفل یکی از عوامل مهم ایجاد امنیت در طراحی خودروها میباشد. کنترل فشار ترمزی و ردیابی لغزش مطلوب در طول	مقاله پژوهشی کامل
برمزگیریهای شدید باعث حفظ امنیت در خودروها مرشود. به دلیل وجود عدم قطعیت در بارامترها و عوامل غیرخطی شدید، طراحی کنترل کننده	دريافت: 26 دى 1395
	پذيرش: 26 اسقند 1395
مقاوم برای این سیستم مناسب میاسد. در این مقاله از اتواع خسرل خنده مدعرسی بهمنطور دستیابی به نعرس مطلوب خودرو و توقف آن	ا ارائه در سایت: 03 اردیبهشت 1396
استفاده خواهد شد. سطح لغزشی و جادبه ترمینالی در کلیه کنترلکنندههای طراحی شده مورد تحلیل و بررسی قرار خواهد گرفت. همچنین یک	كليد واژگان:
ساختار جدید با جاذبه ترمینالی بالا برای کنترل کننده مدلغزشی ترمینال سریع ارائه شده است. روش پیشنهادی خطای ردیابی را تا حد بسیار	كنترل كننده مدلغزشي
مطلوبی کاهش داده است. در این مقاله عملکرد این کنترل کننده با کنترل کننده مدلغزشی ترمینال معمولی و مدلغزشی ترمینال سریع مقایسه شده	كنترل كننده مدلغزشي ترمينال
است. همچنین کلیه پارامترهای طراحی به منظور کاهش میزان خطا با استفاده از الگوریتم بهینهسازی ازدحام ذرات بهدست خواهد آمد. این روش	كنترل كننده مدلغزشي ترمينال سريع
برای حل مسائل بهینهسازی پیچیده برمبنای تابع هزینه مشخص، بسیار مناسب میباشد. نتایج شبیهسازی با استفاده از نرمافزار متلب، عملکرد	سیستم ترمز ضدقفل
بهتر کنترل کننده پیشنهادی نسبت به کنترل کننده مدلغزشی ترمینال معمولی و سریع را ارئه خواهد داد.	

Robust control of anti-lock braking system using optimized fast terminal sliding mode controller

Hamidreza Moghaddam¹, Hamed Mojallali^{2*}

1- Department of Electrical, Biomedical and Mechatronics Engineering, Islamic Azad University, Qazvin Branch, Qazvin, Iran

2- Electrical Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

* P.O.B. 41635-3756, Rasht, Iran, mojallali@guilan.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper Received 15 January 2017 Accepted 16 March 2017 Available Online 23 April 2017

Keywords: Sliding mode controller Terminal sliding mode controller Fast terminal sliding mode controller Anti-lock braking system

ABSTRACT

The anti-lock braking system is one of the main factors to provide safety in designing vehicles. The brake pressure control and desired slip tracking through severe braking ensure safety in vehicles. Because of uncertainty in parameters and sever nonlinear factors, robust controller designing is suitable for this system. In this paper, various types of sliding mode controller have been used to achieve a vehicle desired slip and its stop. Sliding surface and terminal attractions will be analyzed in all of the designed controllers. Also, a new structure with high terminal attraction has been used for the fast terminal sliding mode controller (FTSMC). The proposed method has reduced tracking error as well. In this paper, the performance of this controller is compared with normal terminal sliding mode controller and fast terminal sliding mode. Moreover, all design parameters are determined to decrease error ratio using particle swarm optimization (PSO) algorithm. This method is suitable for solving complex optimized solution based on certain cost function. Simulation results using MATLAB software, present better performance of the suggested controller in comparison with normal and fast terminal sliding mode controller.

1- مقدمه

و نگهداشتن لغزش طولی خودرو در یک محدوده مطلوب در حین ترمزگیریهای شدید میباشد. اگرچه در سالهای گذشته تلاش بسیاری برای طراحی ایده آل این سیستم انجام گرفته است ولی هنوز هم این سیستم در حال بهبود و بررسی میباشد. در سیستم ترمز ضدقفل یکی از اساسیترین بخشها، بخش الكترونيكي آن مي باشد كه امروزه با توجه به پيشرفتهايي كه در ساخت ترمزهای الکتریکی حاصل شده است، تمام سیستمهای ترمز ضدقفل از كنترلكننده الكترونيكي استفاده مىكنند. بهعلت وجود عوامل

امروزه خودروها یکی از ضروریترین وسایل نقلیه محسوب میشوند. برای صنایع خودروسازی یکی از مهمترین مسائل، بهبود ایمنی و قابلیت اطمینان در خودروها میباشد. همچنین افزایش ایمنی در رانندگی یک چالش اصلی در طراحی خودروها محسوب میشود. سیستمهای امنیتی متفاوتی در خودرها وجود دارند که یکی از مهمترین آنها سیستم ترمز ضدقفل میباشد. هدف اصلی در طراحی سیستم ترمز ضدقفل، جلوگیری از قفل شدن چرخها

Please cite this article using: برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید: H. R. Moghaddam, H. Mojallali, Robust control of anti-lock braking system using optimized fast terminal sliding mode controller, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. U 4, pp. 290-298, 2017 (in Persian)

غیرخطی شدید در این سیستم و همچنین عدم قطعیت در پارامترهایی از قبیل جرم و ضریب اصطکاک بین سطح جاده و چرخ خودرو نیاز به طراحی یک کنترل کننده مقاوم برای این سیستم میباشد. در این زمینه کارهای متنوعی تا کنون انجام گرفته است. در مرجع [1] کنترل کننده مدلغزشی مرتبه کسری برای سیستم ترمز ضدقفل طراحی شده است. در این مقاله نشان داده شده است که این کنترل کننده از مقاومت خوبی در مقابل عدم قطعیت در پارامترها برخوردار است. نتایج حاصل از طراحی کنترل کننده نیز با کنترل کننده های نوع P و PI مقایسه شده است. در مرجع [2] طراحی کنترل کننده مدلغزشی معمولی برای تنظیم لغزش خودرو در چرخ جلو و عقب خودرو موفقیت آمیز بوده است. همچنین در این مقاله کنترل کننده طراحی شده برای شرایط مختلف جادهای (آسفالت خشک، مرطوب، برفی و...) مورد بررسی قرار گرفته است. در مرجع [3] یک مدل مرجع بهینه برای لغزش مطلوب خودرو درنظر گرفته شده است. همچنین با استفاده از یک الگوريتم كنترل غيرخطى، مدل مرجع براى يك چرخ خودرو به خوبى رديابى شده است. نتایج حاصل از طراحی در شرایط مختلف جادهای مورد بررسی قرار گرفته شده و عملکرد کنترلکننده موردنظر با کنترلکننده مدلغزشی معمولی مقایسه شده است. در مرجع [4] کنترل کننده غیرخطی برای هر چهار چرخ خودرو درنظر گرفته شده است که از مقاومت خوبی در مقابل عدم قطعیت در پارامترها برخوردار است. نتایج حاصل از شبیه سازی عملکرد کنترل کننده با پارامترهای مختلف طراحی را نشان داده است. در مرجع [5] برای تخمین اصطکاک بین چرخ خودرو و سطح جاده از رویتگر مدلغزشی معمولی استفاده شده است. همچنین مقاومت کنترل کننده در شرایط مختلف جادهای از آسفالت خشک تا برفی مورد بررسی قرار گرفته است. در مرجع [6] ترکیبی از کنترلکننده مدلغزشی معمولی و PID مورد استفاده قرار گرفته شده است که در مقابل عدم قطعیت در پارامترها بسیار مقاوم بوده است. نتایج حاصل از شبیه سازی عملکرد بهتر طراحی نسبت به کنترل کننده مدلغزشی معمولی را نشان داده است. در مرجع [7] برای مقاومت بیشتر در مقابل عدم قطعیت در پارامترها از روش پسخورد انتگرالی استفاده شده است. همچنین نتایج حاصل از این طراحی نسبت به کنترل کننده مدلغزشی معمولی مورد مقایسه قرار گرفته است. در مرجع [8] در سیستم ترمز ضدقفل از رویتگر فازی برای تخمین سرعت خودرو استفاده شده است و با توجه به آن طراحي كنترل كننده صورت گرفته است.

در این مقاله بهمنظور جلوگیری از لغزش خودرو و مقابله با عدم قطعیت در پارامترها، انواع کنترل کننده مدلغزشی برای سیستم طراحی شده است. همچنین یک ساختار جدید برای کنترل کننده مدلغزشی ترمینال سریع با قابلیت جاذبه ترمینالی بالا ارائه گردیده است. مقدار بهینه پارامترهای طراحی در این مقاله با استفاده از الگوریتم بهینهسازی ازدحام ذرات بهدست آورده شده است.

در این مقاله در بخش دوم مدل سیستم ارائه گردیده است. سپس در بخش سوم انواع کنترلکنندههای مدلغزشی طراحی شده است. در همین بخش ساختار جدید برای کنترلکننده مدلغزشی ترمینال سریع ارائه شده است و پارامترهای طراحی از طریق الگوریتم بهینهسازی ازدحام ذرات بدست آورده شدهاند. در بخش چهارم شبیهسازیهای مربوطه ارائه شده است. بخش پنجم و ششم نیز شامل نتیجه گیری و مراجع می باشد.

2- مدلسازی سیستم

1-2- توصيف مدل يک چهارم خودرو

🕧 مېندسې مکانيک مدرس، تير 1396، دوره 17، شماره 4

برای مدلسازی نیروهای وارد بر چرخ خودرو با توجه به رفتار غیرخطی در حین ترمزگیری از مدل یکچهارم خودرو استفاده خواهد شد [9]. این مدل که در برگیرنده رفتار غیرخطی نیروهای چرخ در حین ترمزگیریهای شدید میباشد برای طراحی کنترل کننده مناسب بوده و از ساختار دو درجه آزادی برخوردار است. سرعت طولی خودرو و سرعت زاویهای چرخ خودرو، درجات آزادی این مدل را تشکیل میدهند. "شکل 1" مدل یکچهارم خودرو را به همراه نیروهای وارد بر چرخ خودرو نمایش میدهد.

حميدرضا مقدم و حامد مجللى

براساس این مدل، معادلات حالت سیستم به صورت روابط (1) و(2) استخراج خواهند شد:

$$\dot{V} = -\frac{F_x}{m_t} \tag{1}$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{I} \left(RF_x - T_b \right) \tag{2}$$

که در روابط فوق، R شعاع چرخ، I ممان اینرسی چرخ، ω سرعت زاویه ای چرخ، V سرعت طولی خودو، T_b گشتاور ترمزی، F_x نیروی طولی چرخ و m_t می جرم یک چهارم خودرو طبق رابطه (3) می باشد:

$$n_t = \frac{1}{4}m_{vs} + m_w \tag{3}$$

که در آن m_{vs} جرم فنربندی خودرو و m_w جرم چرخ خودرو میباشد. بار قائم متشکل از دو عامل استاتیکی مربوط به توزیع جرم خودرو و عامل دینامیکی مربوط به انتقال بار در حین ترمزگیری است. بنابراین بار قائم در این مدل عبارت است از:

$$F_{z} = m_{t}g - F_{l}$$
(4)

$$F_{z} = m_{t}g - F_{l}$$
(4)

$$F_{l} \text{ isometry in the state of a s$$

با مشتق گیری نسبت به زمان از رابطه (5) و با استفاده از روابط (1) و (2) داریم:

$$\dot{\lambda} = -\frac{1}{V} \left[\frac{F_X}{m_t} (1 - \lambda) + \frac{R^2 F_X}{J} \right] + \left(\frac{R}{VJ} \right) T_b \tag{6}$$

به در طر ترکی شرعت طوی توکرو و کرش طوی چرم بختون متغیرهای حالت و با استفاده از روابط (1) و (6)، معادلات حالت سیستم بهصورت رابطه (7) محاسبه می شوند:

در معادلات فوق گشتاور ترمزی T_b نشاندهنده ورودی کنترلی سیستم میباشد که از قانون کنترلی بهدست خواهد آمد. در واقع ورودی کنترلی باید طوری اعمال گردد که لغزش طولی چرخ، رفتار مدل مرجع را دنبال کند تا ضمن جلوگیری از قفل شدن چرخها، مقدار بیشینه نیروی ترمزی نیز به چرخها اعمال گردد. در این مقاله بهمنظور درنظر گرفتن خواص اشباع چرخ از مدل چرخ داگوف استفاده شده است [54].

$$F_x = \frac{C_i \lambda}{1 - \lambda} f(S) \tag{8}$$

$$f(S) = \begin{cases} S(2-S) & S < 1\\ 1 & S > 1 \end{cases}$$

$$\mu F_z (1 - \varepsilon_r V \sqrt{\lambda^2 + \tan^2 \alpha})(1 - \lambda)$$
(9)

$$S = \frac{1}{2\sqrt{C_i^2 \lambda^2 + C_\alpha^2 \tan^2 \alpha}}$$
(10)

که در آن، C_i سختی طولی تایر، C_{lpha} سختی سرپیچ تایر، μ ضریب اصطکاک جاده، α زاویه لغزش و c_r فاکتور کاهش چسبندگی جاده می اشد.



Fig. 1 The quarter car model

شکل 1 مدل یکچهارم خودرو

2-2- مدل مرجع لغزش

برای بهدست آوردن مدل مرجع برای لغزش مطلوب نیازمند محاسبه ضریب اصطکاک برحسب ضریب لغزش جاده میباشیم:

$$\mu(\lambda) = C_1 \left(1 - e^{-C_2 \lambda}\right) - C_3 \lambda \tag{11}$$

$$(11)$$

$$(11)$$

$$(11)$$

$$(11)$$

$$(11)$$

$$(11)$$

$$(11)$$

$$(11)$$

$$(11)$$

در "شکل 2" مشخص است که بیشترین ضریب اصطکاک در بازهای اتفاق میافتد که لغزش بین 0.1 و 0.2 قرار داشته باشد. پس مدل مرجع برای لغزش مطلوب را بهصورت رابطه (12) درنظر می گیریم:

 $\lambda_d = 0.15 - 0.15e^{-20t}$ (12) که در "شکل 3" نشان داده شده است. در رابطه (12) تابع نمایی که

بهعنوان لغزش مطلوب چرخ خودرو درنظر گرفته شده است از لحاظ اندازه در



Fig. 2 Coefficient of friction, Dry (solid line), Wet (dashed line), Snow (dotted line)

شکل 2 ضریب اصطکاک، خشک (خط توپر)، مرطوب (خط چین)، برف (نقطه چین)



شکل 3 ضریب لغزش مطلوب

محدودهای قرار دارد که اگر لغزش چرخ خودرو در این محدوده قرار بگیرد بیشترین ضریب اصطکاک بین سطح جاده و چرخ خودرو فراهم میشود. مشخص است که هرچه مقدار ضریب اصطکاک افزایش پیداکند، به همان اندازه لغزش کاهش پیدا خواهد کرد.

3- طراحی کنترل کننده 3-1- طراحی کنترل کننده مدلغزشی معمولی

بهعلت وجود عدم قطعیت در پارامترها و همچنین عوامل غیرخطی شدید در مدل سیستم از کنترلکننده مدلغزشی معمولی بهمنظور دستیابی به لغزش مطلوب و توقف خودرو در زمان محدود استفاده خواهد شد. برای طراحی این کنترلکننده با درنظر گرفتن خطای ردیابی بهصورت رابطه (13)، یک سطح لغنش خط بهصورت بابطه (14) درنظر می گیریم [21،12].

$$e = \lambda - \lambda_d \tag{13}$$

$$s(x,t) = \left(\frac{dt}{dt} + \beta\right) \quad e \tag{14}$$

که eta یک ثابت مثبت میباشد. برای سیستم مرتبه اول n = 1 درنظر گرفته میشود. با سادهسازی و بازنویسی رابطه (7):

$$\dot{\lambda} = h(\lambda) + \left(\frac{R}{VJ}\right)T_b$$

$$h(\lambda) = -\frac{1}{V}\left(\frac{F_x}{m_t}(1-\lambda) + \frac{R^2F_x}{J}\right)$$
(15)

عدم قطعیت در جرم و ضریب اصطکاک وجود دارد که این دو پارامتر در تابع (h(λ قرار دارند. با محاسبه مشتق اول سطح لغزشی نسبت به زمان و مساوی صفر قرار دادن آن به یک قانون کنترل معادل می سیم:

$$\hat{T}_b = \frac{VJ}{R} \left(\dot{\lambda}_d - \hat{h}(\lambda) \right) \tag{16}$$

که (ĥ(λ) تخمینی از تابع (h(λ میباشد که در آن عدم قطعیت در پارامترها لحاظ میشود. حال قانون کنترل اصلی را با اضافه کردن یک قانون کلیدزنی به کنترل معادل محاسبه میکنیم:

$$T_b = \hat{T}_b - k \text{sgn}(s)$$
 (17)
که k بهره کنترل کننده میباشد و با استفاده از پایداری لیاپانوف حاصل

ی شود: ی شود:

$$\frac{1}{2} \frac{a}{dt} s^2 \leq -\eta |s| \Rightarrow s\dot{s} \leq -\eta |s|$$
(18)
 $\lambda = \eta |s|$

$$\lambda = \eta |s|$$

$$\lambda = \eta |s$$

جایگذاری رابطه (17) در آن داریم: م

$$s[h(\lambda) + \frac{\pi}{VJ}(\hat{T}_b - k \operatorname{sgn}(s)) - \dot{x}_d] \le -\eta |s|$$
(19)
که با استفاده از رابطه (16) و سادهسازی داریم:

$$s[h(\lambda) - \hat{h}(\lambda) - (\frac{R}{VJ})ksgn(s)] \le -\eta|s|$$
⁽²⁰⁾

که در آن بیشترین میزان عدم قطعیت به صورت رابطه (21) بیان می شود:

$$|h(\lambda) - \hat{h}(\lambda)| \le H$$
(21)
در آخریوره کنترل کننده نیز به صورت رابطه (22) بیان می شود:

$$k = \frac{VJ}{R}(H+\eta) \tag{22}$$

3-2- طراحي كنترل كننده مدلغزشي ترمينال

در طراحی کنترل کننده مدلغزشی ترمینال از یک سطح لغزشی غیرخطی بهمنظور همگرایی سیستم به نقاط تعادل در زمان محدودتر و با سرعت بیشتر استفاده میشود [14]. سطح لغزشی غیرخطی در این کنترل کننده بصورت رابطه (23) درنظر گرفته میشود [16،15]:

$$s(x,t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{n-1} e^{\frac{p}{q}}$$
(23)

p < q < 2p و p اعداد صحیح فرد مثبت میباشند بهطوری که p < q < 2p میباشند (18،17]. با قرار دادن n = 1 در رابطه (23) و درنظر گرفتن خطا به صورت $n = \lambda - \lambda_a$ به صورت $\lambda - \lambda_a$ ، سطح لغزشی و مشتق آن بهصورت روابط (24) و (25) بیان میشوند:

$$= \left(\lambda - \lambda_d\right)^{\frac{p}{q}} \tag{24}$$

$$\dot{s} = \frac{p}{q} (\dot{\lambda} - \dot{\lambda}_d) (\lambda - \lambda_d)^{(\frac{p}{q} - 1)}$$
(25)

S

که با مساوی صفر قرار دادن رابطه (25) کنترل معادل بهصورت رابطه (16) حاصل میشود که با اضافه کردن قانون کلیدزنی به آن، قانون کنترل اصلی همانند رابطه (17) بیان میشود. با استفاده از پایداری لیاپانوف و سطح لغزشی غیرخطی معرفی شده و با سادهسازی روابط، داریم:

$$s\left(\frac{p}{q}(\dot{\lambda} - \dot{\lambda}_{d})(\lambda - \lambda_{d})^{\left(\frac{p}{q}-1\right)}\right) \leq -\eta|s|$$

$$s(h(\lambda) + \left(\frac{R}{VJ}\right)T_{b} - \dot{\lambda}_{d}) \leq -\eta\left(\frac{1}{\frac{p}{q}(\lambda - \lambda_{d})^{\left(\frac{p}{q}-1\right)}}\right)|s|$$
(26)

با قرار دادن قانون کنترلی طبق رابطه (17) در منادله (26) نتایج رابطه (27) حاصل می شود:

$$s(h(\lambda) + \left(\frac{R}{VJ}\right) [\hat{T}_b - k \operatorname{sgn}(s)] - \dot{\lambda}_d) \leq -\eta \left(\frac{1}{\frac{p}{q}(\lambda - \lambda_d)^{\left(\frac{p}{q}-1\right)}}\right) |s|$$
$$s(h(\lambda) - \hat{h}(\lambda) - k \left(\frac{R}{VJ}\right) \operatorname{sgn}(s)) \leq -\eta \left(\frac{1}{\frac{p}{q}(\lambda - \lambda_d)^{\left(\frac{p}{q}-1\right)}}\right) |s|$$
$$(27)$$

با درنظر گرفتن بیشترین میزان عدم قطعیت بهصورت رابطه (21). بهره کنترل کننده بهصورت رابطه (28) طراحی شده است:

$$k = \frac{VJ}{R} \left[F + \eta \left(\frac{1}{\frac{p}{q} \left(\lambda - \lambda_d\right)^{\left(\frac{p}{q} - 1\right)}}\right)\right]$$
(28)

3-3- طراحي كنترل كننده مدلغزشي ترمينال سريع

مشکل اصلی در کنترل کننده مدلغزشی ترمینال، سرعت پایین همگرایی در نقاط دورتر از مبدا میباشد. جاذبه ترمینالی باعث افزایش سرعت همگرایی در محدوده نزدیکتر به مبدا میشود. برای حل این مشکل و افزایش سرعت همگرایی در نقاط دورتر از مبدا، کنترل کننده مدلغزشی ترمینال سریع پیشنهاد شده است. در این کنترل کننده یک سطح لغزشی خطی با سطح لغزشی غیرخطی ترکیب شده و مشکل همگرایی در نقاط دورتر از مبدا را حل کرده است. سطح لغزشی مطابق رابطه (29) درنظر گرفته شده است [9]:

$$(x,t) = e + e^{\frac{p}{q}}$$
(29)

مشتق سطح لغرسی به صورت رابطه (30) بیان می سود:

$$r = (\dot{\lambda} - \dot{\lambda}_d)(1 + \frac{p}{q}(\lambda - \lambda_d)^{\left(\frac{p}{q} - 1\right)})$$
(30)

قانون کنترل اصلی همانند رابطه (17) بیان میشود. با استفاده از پایداری لیاپانوف که در رابطه (18) بیان شده است، رابطه (31) حاصل شده است:

$$s(h(\lambda) - \hat{h}(\lambda) - k\left(\frac{R}{VJ}\right) \operatorname{sgn}(s)) \le -\eta(\frac{1}{1 + \frac{p}{q}(\lambda - \lambda_d)^{\left(\frac{p}{q} - 1\right)}})|s|$$
(31)

بهره كنترل كننده نيز بهصورت رابطه (32) محاسبه شده است:

$$k = \frac{VJ}{R} \left[F + \eta \left(\frac{1}{1 + \frac{p}{q} \left(\lambda - \lambda_d\right)^{\left(\frac{p}{q} - 1\right)}}\right)\right]$$
(32)

🕧 مېندسې مکانيک مدرس، تير 1396، دوره 17، شماره 4

در این قسمت به معرفی تابعی پرداخته میشود که دارای جاذبه ترمینالی منحصر به فردی در نزدیکی نقاط تعادل میباشد.

$$f(\lambda) = -w(0.5 - \frac{1}{\left(1 + e^{-a(\lambda - \lambda_d)^{\left(\frac{p}{q}\right)}}\right)}$$
(33)

در این تابع چهار پارامتر w, a, p, q برای تنظیم جاذبه ترمینالی درنظر \mathcal{P}_{0} گرفته شده است. هر کدام از این ضرایب تاثیر منحصر به فردی در جاذبه ترمینالی از خود نشان میدهند. در ادامه به تاثیر این پارامترها در جاذبه ترمینالی پرداخته میشود. در "شکل 4" جاذبه ترمینالی این تابع به ازای مقادیر مختلف q و p مورد بررسی قرار داده شده است. مشخص است که نسبت این دو پارامتر هرچه به یک نزدیکتر باشد جاذبه ترمینالی بهتر است. در "شکل 5" تاثیر پارامتر a در جاذبه ترمینالی مورد بررسی قرار داده شده است. مشخص است که برای مقادیر کوچک این پارامتر، شیب منحنی بسیار آهسته میباشد. برای مقادیر بزرگتر از 4 گرچه شیب نمودار تند میباشد و جاذبه ترمینالی بیشتر میشود ولی افزایش مقدار شیب ناچیز میباشد. برای مقادیر خیلی بزرگ نیز این تابع همانند تابع علامت برخورد می کند که



Fig. 4 The terminal attraction versus amounts of ratio of (p/q), 0.75 (dashed line), 0.8 (dotted line), 0.99 (solid line)

شکل 4 جاذبه ترمینالی برحسب مقادیر نرخ (p/q)، 0.75 (خط چین)، 0.8

(نقطهچين)، 0.99 (خط توپر)



 Fig. 5 The terminal attraction versus amounts of ratio of a, 0.5 (dotted line 0.5), 1.5 (dashed line), 2.5 (solid line), 4 (dash-dotted line)

 2.5, (idashed line), 2.5 (idashed line), 1.5 (idashed line)

 2.5, (idashed line), 2.5 (idashed line), 2.5 (idashed line)

 2.5, (idashed line), 2.5 (idashed line), 2.5 (idashed line)

 2.5, (idashed line)
 </t

مناسب نیست و باعث ایجاد نوسان در خروجی می شود. مقدار پارامتر w نیز اندازه تابع را تغییر می دهد. در "شکل 6" تاثیر پارامتر w در اندازه تابع مشخص شده است. در "شکل 8" نیز وجود جاذبه ترمینالی در این تابع به ازای 9.9=(p/q)=0 و 10=w نشان داده شده است. در "شکل 8" مسیر حالت مدلغزشی ترمینال سریع و ترمینال معمولی در صفحه فاز نشان داده شده است.

با توجه به توصیفاتی که در این بخش ارائه گردیده شد، سطح لغزشی برای کنترل کننده مدلغزشی ترمینال سریع با ساختار جدید بهصورت رابطه (34) درنظر گرفته شده است.

$$s = (\lambda - \lambda_d) - w(0.5 - \frac{1}{\left(1 + e^{-a(\lambda - \lambda_d)^{\left(\frac{p}{q}\right)}}\right)})$$
(34)

پایداری طرح کنترلی موردنظر با استفاده از پایداری لیاپانوف مورد بررسی قرار گرفته است. اگر معادلات حالت سیستم به صورت رابطه (35) بیان شده باشد، اثبات پایداری به شرح زیر می باشد.

$$h = h(\lambda) + \left(\frac{R}{VJ}\right)T_b$$
(35)

برای بهدست آوردن کنترل معادل، مشتق سطح لغزشی بهصورت رابطه (36) درنظر گرفته شده است.



Fig. 6 The terminal attraction versus amounts of ratio of *w*, 0.5 (dotted line), 2 (dashed line), 3(solid line), 4 (dash-dotted line)

شکل 6 جاذبه ترمینالی بر حسب مقدار نرخ *w*. 0.5 (نقطهچین)، 1.5 (خط چین)، 2.5 (خط چین)، 2.5 (خط چین)، 2.5 (خط توپر)، 4 (نقطه خط چین)



شکل 7 جاذبه ترمینالی



Fig.8 State trajectory of the TSMC (solid line) and proposed FTSMC (dashed line) in phase plane

شکل 8 مسیر حالت مدلغزشی ترمینال(خط توپر) و ترمینال سریع پیشنهادی (خط چین) در صفحه فاز

$$\dot{s} = (\dot{\lambda} - \dot{\lambda}_d) \left(1 + \frac{wa\left(\frac{p}{q}\right)(\lambda - \lambda_d)^{\left(\frac{p}{q} - 1\right)}e^{-a(\lambda - \lambda_d)^{\left(\frac{p}{q}\right)}}}{\left(1 + e^{-a(\lambda - \lambda_d)^{\left(\frac{p}{q}\right)}}\right)^2} \right)$$
(36)

با صفر قرار دادن مشتق سطح لغزشی موردنظر، کنترل معادل بهصورت رابطه (37) حاصل شده است.

$$\hat{T}_b = \frac{VJ}{R} \left(\dot{\lambda}_d - \hat{h}(\lambda) \right) \tag{37}$$

برای بهدست أوردن گشتاور کنترل اصلی یک قانون کلیدزنی به رابطه (37) اضافه خواهد شد.

(38) $T_b = \hat{T}_b - k \text{sgn}(s)$ که k بهره کنترل کننده میباشد و با استفاده از پایداری لیاپانوف حاصل k فواهد شد. سطح لغزشی در پایداری لیاپانوف بهصورت رابطه (39) درنظر

 $\frac{1}{2}\frac{d}{dt}s^2 \le -\eta|s| \quad \Rightarrow \quad s\dot{s} \le -\eta|s|$ (39)

این شرط کاهش [s] را در صورتی که حالات روی سطح لغزشی نباشند را تضمین می کند. ما بهدنبال طراحی یک کنترل کننده میباشیم که شرط لغزشی (39) را برآورده نماید. در این صورت حالات در زمان محدود به سطح لغزشی خواهند رسید، بر روی آن باقی خواهند ماند و خطای ردیابی به صفر همگرا خواهد شد. با توجه به شرط لغزشی (39) و روابط (35) و (38)، رابطه (40) حاصل شده است.

$$\left(h(\lambda) + \left(\frac{R}{VJ}\right)T_b - \dot{\lambda}_d\right) \leq \frac{-\eta \operatorname{sgn}(s)}{\left(1 + \frac{wa(\frac{p}{q})(\lambda - \lambda_d)^{\left(\frac{p}{q}-1\right)}e^{-a(\lambda - \lambda_d)^{\left(\frac{p}{q}\right)}}}{\left(1 + e^{-a(\lambda - \lambda_d)^{\left(\frac{p}{q}\right)}}\right)^2}\right)}$$
(40)

با جایگذاری رابطه (38) در رابطه فوق، رابطه (41) حاصل شده است.

$$\begin{pmatrix} h(\lambda) - \hat{h}(\lambda) \end{pmatrix} - k \begin{pmatrix} \frac{K}{VJ} \end{pmatrix} \operatorname{sgn}(s) \\
\leq \frac{-\eta \operatorname{sgn}(s)}{\left(1 + \frac{wa \left(\frac{p}{q}\right) (\lambda - \lambda_d)^{\left(\frac{p}{q} - 1\right)} e^{-a(\lambda - \lambda_d)^{\left(\frac{p}{q}\right)}}}{\left(1 + e^{-a(\lambda - \lambda_d)^{\left(\frac{p}{q}\right)}}\right)^2}\right)} \tag{41}$$

www.S294.ir

مهندسی مکانیک مدرس، تیر 1396، دورہ 17، شمارہ 4

در رابطه فوق تابع $h(\lambda)$ دقيقا معلوم نمىباشد ولى تخمين أن بهصورت و بیشترین میزان عدم قطعیت در پارامترها توسط تابع H مشخص $\hat{h}(\lambda)$ شده است. با درنظر گرفتن بیشترین میزان عدم قطعیت بهصورت رابطه (42)، بهره كنترل كننده بهصورت رابطه (43) بيان شده است. $|I(1) = \hat{I}(1)|_{\mathcal{A}}$

$$|h(\lambda) - h(\lambda)| \le H$$

$$k = \frac{VJ}{R} (H + \frac{\eta}{\left(1 + \frac{wa(\underline{p})(\lambda - \lambda_d)(\underline{q} - 1)e^{-a(\lambda - \lambda_d)}(\underline{p})}{\left(1 + e^{-a(\lambda - \lambda_d)(\underline{q})}\right)^2}\right)}$$
(42)

3-5- قاعده كليدزني هموار

قاعده کنترل لغزشی در طول سطح لغزش (s(t) گسستگی دارد. از آنجایی که پیادهسازی کلیدزنی نمی تواند کامل باشد و در سیستمهای کنترل دیجیتال می باید از سیگنالها نمونه برداری کنیم، این امر باعث ایجاد نوسان در فاز رسيدن به سطح لغزشي مي باشد. اين نوسان به دليل اين كه مي تواند ديناميك فرکانس بالایی ایجاد نماید، مطلوب نمی باشد. یک راه جلوگیری از نوسان ایجاد یک لایه مرزی نازک در همسایگی سطح لغزشی توسط تابع اشباع بهصورت رابطه (44) میباشد، بهطوری که کنترل بهطور پیوسته در میان این لابه مرزي تغيب نمايد [20]:

$$\operatorname{sat}\left(\frac{s}{\varphi}\right) = \begin{cases} -1 & , & \frac{s}{\varphi} \leq -1 \\ \frac{s}{\varphi} & , & -1 < \frac{s}{\varphi} \leq 1 \\ 1 & , & \frac{s}{\varphi} > 1 \\ 1 & , & \frac{s}{\varphi} > 1 \end{cases}$$
(44)

که arphi نشان دهنده ضخامت لایه مرزی میباشد. یعنی اگر 1 < |s/arphi|باشد، آنگاه sat(s/arphi) = sgn(s) بوده و برقراری شرط لغزشی (18) در خارج از لایه مرزی تضمین خواهد شد.

6-3- بهينهسازي پارامترها

در این مقاله بمنظور انتخاب بهینهترین پارامترها برای طراحی کنترل کنندهها از الگوریتم بهینهسازی ازدحام ذرات استفاده شده است. الگوریتم بهینهسازی ازدحام ذرات یک روش بهینهسازی فرا ابتکاری برمبنای هوش اجتماعی است. این روش برای حل مسائل بهینهسازی پیچیده بر مبنای تابع هزینه مشخص بسیار مناسب است. در الگوریتم ازدحام ذرات، تعدادی از موجودات وجود دارند که آنها را ذره مینامیم و در فضای جستجو پخش شدهاند. هر ذره مقدار تابع هدف را در موقعیتی از فضا که در آن قرار گرفته است، محاسبه می کند. سپس با استفاده از ترکیب اطلاعات محل فعلیاش و بهترین محلی که قبلا در آن بوده است و همچنین اطلاعات یک یا چند ذره از بهترین ذرات موجود در جمع، جهتی را برای حرکت خود انتخاب میکند. پس از انجام حركت جمعى، يك مرحله از الگوريتم به پايان مىرسد. اين مراحل چندين بار تكرار مىشوند تا آن كه بهينهترين پاسخ بدست آيد. معادلات توصيف كننده رفتار ذرات در این الگوریتم به صورت روابط (45) و (46) بیان شده است[21].

$$V_i(t+1) = WV_i(t) + r_1c_1(P_i(t) - X_i(t)) + (45)$$

$$r_2c_2(g(t) - X_i(t))$$

$$X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t+1)$$
 (46)
که در روابط فوق V_i سرعت ذره، W ضریب اینرسی، r_1 و r_2 اعدادی
نصادفی با توزیع یکنواخت، c_1 ضریب یادگیری شخصی، c_2 ضریب یادگیری

جمعی، P_i بهترین خاطره شخصی، g بهترین خاطره جمعی و X_i موقعیت P_i

ذره میباشد. در این مقاله تابع هزینه را که به دنبال کمینه کردن آن می باشیم، انتگرال اندازه خطای ردیابی لغزش مطلوب درنظر گرفته ایم.

$$IAE = \int_{0}^{\infty} |e(t)| dt \tag{47}$$

پارامترهای بهینهسازی شده برای طراحی انواع کنترلکنندهها، با درنظر گرفتن اندازه جمعیت معادل 10، تعداد 500 تکرار و برای 40 بار اجرای برنامه در جدول 1 ارائه شده است. پارامتر η بیان کننده سرعت رسیدن به سطح لغزشی میباشد، بنابراین در کلیه کنترل کننده ها به یک اندازه تاثیر -گذار است. پس مقدار این پارامتر برای کلیه کنترلکنندههای طراحی شده 0.9 درنظر گرفته شده است. دو پارامتر a و w نیز فقط در کنترل کننده مدلغزشي ترمينال سريع پيشنهادي وجود دارند كه آنها نيز توسط الگوريتم بهینهسازی ازدحام ذرات به بهترین شکل بهدست آمدهاند. محدوده انتخابی پارامترها بهگونهای است که $a \leq 20$ ، 0.5 < p/q < 1 و $1 \leq a \leq 20$ ، 1 ≤ *w* ≤ 20 مىباشد.

4- شبيەسازى

برای اعتبارسنجی عملکرد کنترلکننده طراحی شده بر روی سیستم ترمز ضدقفل، با استفاده از نرمافزار متلب شبیهسازیهای مربوطه انجام داده شده است. برای این منظور، 10 درصد عدم قطعیت برای جرم یکچهارم خودرو و همچنین 10 درصد عدم قطعیت برای ضریب اصطکاک بین سطح جاده و چرخ خودرو درنظر گرفته شده است. این میزان عدم قطعیت در اصطکاک بین سطح جاده و چرخ خودرو ناشی از شرایط مختلف جادهای (آسفالت خشک، آسفالت مرطوب، آسفالت یخ زده و …) میباشد. سرعت خودرو نیز 72km/h یا 20m/s درنظر گرفته شده است. نتایج شبیهسازی بهصورت شکلهای مختلف ارائه خواهد شد. همچنین برای شفافسازی برخی از نتایج یهسازی به صورت جدول های مختلف ارائه شده است. مقادیر پارامترهای استفاده شده در شبیه سازی به صورت جدول 2 در نظر گرفته شده است [73].

در ابتدا نتایج حاصل از طراحی کنترل کننده مدلغزشی ترمینال سریع با ساختار جدید ارائه شده است. در "شکل 9" سرعت طولی خودرو و سرعت دورانی چرخ خودرو نشان داده شده است. مشخص است که این دو پارامتر در یک محدوده قرار گرفتهاند و با آهنگ ثابت و همواری به یکدیگر نزدیک شده-اند. اگر در لحظهای که سرعت دورانی چرخ خودرو صفر می شود، سرعت طولی خودرو ادامه پیدا کند و صفر نشود، خودرو سر خورده و دچار لغزش می شود. در "شکل 10" ردیابی لغزش مطلوب ارائه شده است. در این شکل مشخص است که ردیابی لغزش مطلوب به صورت قابل قبولی صورت گرفته است. این عمل باعث می شود که بیشترین ضریب اصطکاک بین سطح جاده و چرخ خودرو ایجاد شود که این امر برای حفظ خودرو در مقابل لغزش بسیار مطلوب میباشد. "شکل 11" خطای ردیابی مقدار مطلوب لغزش را نشان میدهد که این میزان خطا بسیار مطلوب میباشد و با گذشت زمان بسیار کوچک شده است. این میزان خطا نشان از عملکرد مطلوب کنترل کننده پیشنهادی دارد. در "شکل 12" نیز گشتاور ترمزی نشان داده شده است. این

جدول 1 پارامترهای بهینه

كنترل كننده	p/q	а	w
مدلغزشي ترمينال معمولي	0.85	-	-
مدلغزشي ترمينال سريع	0.87	-	-
مدلغزشي ترمينال سريع جديد	0.99	8	20

حميدرضا مقدم و حامد مجللى

10 0.5 1.5 2.5 Time(sec)



Fig. 12 Braking pressure

شکل 12 فشار ترمز

دو کنترل کننده دیگر بسیار کمتر و مناسبتر میباشد. در "شکل 15" نیز گشتاور ترمزی با یکدیگر مقایسه شده است. بهدلیل انتخاب سطح لغزشی متفاوت در کنترل کننده ها، عملکرد کنترل کننده ها با یکدیگر متفاوت شده است. سطح لغزشی در کنترل کننده مدلغزشی ترمینال به گونهای است که در



Fig. 13 Wheel slip tracking, Desired (solid line), TSMC (dashed line), FTSMC (dash-dotted line), newFTSMC (dotted line)

شكل 13 رديابى لغزش چرخ، لغزش مطلوب (خط توپر)، TSMC (خط چين)، FTSMC (نقطه خط چین)، newFTSMC (نقطه چین)

جدول 2 پارامترهای شبیهسازی

Table 2 Parameters for simulation		
واحد	مقدار	پارامتر
m	0.326	شعاع چرخ <i>R</i>
kgm ²	1.7	ممان اینرسی چرخ <i>J</i>
kg	40	m_w جرم چرخ
kg	415	$rac{1}{4}m_{vs}$ يکچهارم جرم فنربندي
m	0.5	h_{cg} ارتفاع از مرکز گرانش خودرو
m	2.5	فاصله محور عقب تا جلو <i>ا</i>
N/rad	50000	c_i سختی طولی چرخ
N/(unit slip)	30000	c_lpha سختی سر پیچ چرخ
Ν	6000	F_z بار قائم
	0.015	فاکتور کاهش چسبندگی <i>.</i> ۶
	0	lpha زاویه لغزش $lpha$



Fig. 9 Wheel and vehicle speed, V (solid line), Rw (dashed line) شکل 9 سرعت خودرو و چرخ، V (خط توپر)، Rw (خط چین)



Fig. 10 Wheel slip tracking, Desired (solid line), Wheel slip(dotted line)

شكل 10 رديابى لغزش چرخ، لغزش مطلوب(خط توپر)، لغزش چرخ (خط چين)

گشتاور بسیار هموار و مناسب میباشد. در این شکل اثر نامطلوب پدیده نوسان بسيار كم وناچيز ميباشد.

در این قسمت نتایج حاصل از طراحیهای مختلف با یکدیگر مقایسه شده است. در "شكل 13" رديابي لغزش مطلوب مقايسه شده است. "شكل 14" خطای ردیابی لغزش مطلوب را در کنترل کننده های مختلف نشان داده است. در این شکل میزان خطای ردیابی در کنترل کننده پیشنهادی نسبت به

www.S296.ir





Fig. 14 Wheel slip tracking error, TSMC (dotted line), FTSMC (solid line), newFTSMC (dashed line)

شکل 14 خطای ردیابی لغزش چرخ، TSMC (نقطه چین)، FTSMC (خط توپر)، newFTSMC (خط چین)

1.2

نزدیکی نقطه تعادل سرعت همگرایی بالا میباشد ولی در نقاط دور از مبدا این گونه نیست. در مدلغزشی ترمینال سریع سطح لغزشی هم در نقاط نزدیک به مبدا و هم در نقاط دورتر از مبدا دارای سرعت همگرایی بالایی میباشد. در کنترل کننده پیشنهادی نیز با توجه به جاذبه ترمینالی ایجاد شده، سرعت همگرایی در نقاط نزدیک به مبدا بسیار بالا میباشد. در این سه شکل نشان داده شده است که طراحی کنترل کننده با ساختار جدید عملکرد بهتری را از خود برای کنترل این سیستم نشان داده است.

در جدول 3 به مقایسه پارامتر انتگرال اندازه خطای سه کنترلکننده مدلغزشی ترمینال، مدلغزشی ترمینال سریع و مدلغزشی ترمینال سریع پیشنهادی پرداخته شده است.

در این قسمت نتایج حاصل از شبیه سازی با مقالات دیگری که در این سطح انجام شدهاند مقایسه شده است. برای این منظور خطای ردیابی در مقالات مختلف در شرایط یکسان به تصویر کشیده شده است. در "شکل 16" خطای ردیابی در مرجع [4] نشان داده شده است. برای این که مقایسه در شرایط یکسان انجام شود کلیه پارامترها و عدم قطعیتها در سیستم یکسان درنظر گرفته شده است. در این شکل با گذشت زمان مقدار خطا برای هر دو کنترل کننده طراحی شده رو به افزایش میباشد. ولی در کنترل کننده پیشنهادی طراحی شده در این مقاله با گذشت زمان میزان خطا به مقدار صفر نزدیکتر شده است. "شکل 17" خطای ردیابی در کنترل کننده مدانخرشی ترمینال سریع که در این مقاله طراحی شده است را نشان میدهد.

5- نتیجه گیری

در این مقاله به طراحی و بررسی کامل انواع کنترل کنندههای مدلغزشی برای سیستم ترمز ضدقفل پرداخته شد. همچنین یک ساختار جدید با قابلیت جاذبه ترمینالی بالا برای کنترل کننده مدلغزشی ترمینال سریع ارائه گردید. در این مقاله بهمنظور دستیابی به کمترین میزان اندازه خطا، کلیه پارامترهای طراحی با استفاده از الگوریتم بهینهسازی ازدحام ذرات بهدست آورده شد.

جدول 3 مقايسه سه كنترل كننده

Table 3 Comparison of three controllers						
newFTSMC	FTSMC	TSMC	پارامتر			
0.00019	0.00063	0.00065	انتگرال اندازه خطا			



Fig. 15 Braking pressure, TSMC (solid line), FTSMC (dashed line), newFTSMC (dotted line)

شکل 15 فشار ترمزی، TSMC (خط توپر)، FTSMC (خط چین)، TSMC (نط چین)، newFTSMC (نقطه چین)



(and the), shang hode (added hie) (adde



Fig. 17 error in newFTSMC

شکل 17 خطا در مدلغزشی ترمینال سریع جدید

نتایج حاصل از شبیهسازی و مقایسه، عملکرد بهتر کنترلکننده مدلغزشی ترمینال سریع با ساختار جدید را نسبت به انواع مرسوم دیگر بیان نمود.

6- مراجع

 Y. Tang, X. Zhang, D. Zhang, G. Zhao, X. Guan, Fractional order sliding mode controller design for antilock bracking system, *Neurocomputing*, Vol. 111, No. 1, pp. 122-130, 2013.

حميدرضا مقدم و حامد مجللى

كنترل مقاوم سيستم ترمز ضدقفل خودرو با استفاده از مدلغزشى ترمينال سريع بهينه

181-195, 2012.

- [12] M. Wu, M. Shih, Simulated and experimental study of hydraulic anti-lock braking system using sliding-mode pwm control, *Mechatronics*, Vol. 13, No. 4, pp. 331-351, 2003.
- [13] E. Kayancan, Y. Ozin, O. Kaynak, A grey system modeling approach for sliding mode control of antilock braking systems, *The IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 56, No. 8, pp. 3244-3252, 2009.
- [14] S. Hasanpour, A. Baghramian, H. Mojallali, Fast terminal sliding mode controller design with a new structure for DC-DC buck converter, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 3, pp. 112-120, 2016. (in Persian (فارسی)
- [15] Z. Zhu, Y. Yan, Space-based line-of-sight tracking control of GEO target using nonsingular terminal sliding mode, *Advance in Space Research*, Vol. 54, No. 6, 1064-1076, 2014.
 [16] J. Yang, S. Li, J. Su, X. Yu, Continuous nonsingular terminal sliding mode
- [16] J. Yang, S. Li, J. Su, X. Yu, Continuous nonsingular terminal sliding mode control for systems with mismatched disturbances, *Automatica*, Vol. 49, No. 7, pp. 2287-2291, 2013.
- [17] Y. Feng, X. Yu, F. Han. On nonsingular terminal sliding-mode control of nonlinear systems, *Automatica*, Vol. 49, No. 6, pp. 1715-1722, 2013.
- [18] S. Mondal, C. Mahanta, Adaptive second order terminal sliding mode controller for robotic manipulators, *Journal of the Franklin Institute*, Vol. 351, No. 4, pp. 2356-1377, 2014.
- [19] H.Komurcugil, Fast terminal sliding mode control for single-phase UPS invertes, *The IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Gdansk, Poland, pp.277-282, 2011.
- [20] L. Wang, A Course In Fuzzy Systems and Control, 1st Edition, pp. 308-309, (Translated by M.Teshneh lab, N.Saffarpour, D.Afyouni), Khaje Nasireddin Toosi University Press, 2012.
- [21] J.Kennedy, R.Eberhart, Particle swarm optimization, *The IEEE International Conference on Neural Networks*, Washington-DC, USA, Vol. 4, pp. 1942-1948, 1995.

- [2] A. Harifi, A. Aghagolzadeh, G. Alizadeh, M. Sadeghi, Designing a sliding mode controller for slip control of anti-lock brake systems, *Transportation Research Part C*, Vol. 16, No. 6, pp. 731-741, 2008.
- [3] M. Mirzaei, H. Mirzaeinejad, Optimal design of a non-linear controller for anti-lock braking system, *Transportation Research Part C*, Vol. 24, No. 1, pp. 19-35, 2012.
- [4] H. Mirzaeinejad, M. Mirzaei, Optimization of nonlinear control strategy for anti-lock braking system with improvement of vehicle directional stability on slip-µ roads, *Transportation Research Part C*, Vol. 46, No. 1, pp. 1-15, 2014.
- [5] N.Patra, K.Datta, Observer based road_tire friction estimation for slip control of braking system, *International Conference on Modelling, Optimisation and Computing*, TamilNadu, India, pp. 1566-1574, 2012.
- [6] N. Patra, K. Datta, Sliding mode controller for wheel-slip control of anti-lock braking system, the IEEE International Conference on Advanced Communication Control and Computing Technologies, pp. 385-391, 2012.
- [7] H. Mirzaeinejad, M.Mirzaei, A novel method for non-linear control of wheel slip in anti-lock braking systems, *Control Engineering Practice*, Vol. 18, No. 8, pp. 918-926, 2010.
- [8] H. Du, W. Li, Y. Zhang, Tracking control of wheel slip ratio with velocity estimation for vehicle anti-lock braking system, the IEEE 27 th Chinese Control and Decision Conference, Qingdao, China, pp. 1900-1905, 2015.
- [9] M. Mirzaei, H. Mirzaeinejad, S. Vahidi, D. Heidarien, M. J. Khosrowjerdi, Nonlinear control and estimation of tire longitudinal slip for using in antilock braking system, *Journal of Control*, Vol. 5, No. 4, pp. 31-42, 2012. (in Persian فارسی)
- [10] E. J. Park, D. Stoikov, L. Falcao da Luz, A. Suleman, A performance evaluation of an automotive magnetorheological brake design with a sliding mode controller, *Mechatronics*, Vol. 16, No. 7, pp. 405-416, 2006.
- [11] R. Bhandri, S. Patil, R. K. Singh, Surface prediction and control algorithms for anti-lock brake system, *Transportation Research Part C*, Vol. 21, No. 1,