



پنجمین کنفرانس ملی مهندسی برق
و سیستم های هوشمند ایران

پنجمین کنفرانس ملی مهندسی برق و سیستم های هوشمند ایران - دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد - ۸ و ۹ اسفند ۱۳۹۷

طراحی کنترل کننده مود لغزشی مرتبه بالا بر مبنای رویتگر اغتشاش برای سیستم تعلیق فعال خودرو

سید محمد وطن خواه^۱، محمد رضا یوسفی نجف آبادی^{۲*}، خوشنام شجاعی ارانی

۱- دانشجوی دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، ۲- دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، ۳- دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

۱- m.vatankhahh@gmail.com - ۲ MR.yousefi81@yahoo.com - ۳ khoshnam.shojaee@gmail.com

چکیده: در این مقاله، یک طرح جدید به منظور کاهش جابجایی جرم فنری با استفاده از کنترل کننده مد لغزشی مرتبه بالا پیشنهاد شده است. رویتگر اغتشاش در طرح پیشنهادی اثر عدم قطعیت در پارامترهای سیستم، مشخصه‌ی غیرخطی میرایی و فنر، تغییرات بار و اغتشاش نامعلوم مسیر را تخمین می‌زند. کنترل کننده مذکور تنها به اطلاعات متغیرهای حالت جرم فنری نیاز دارد و از اینرو نیاز به حسگرهای جداگانه برای سنجش متغیرهای حالت جرم تعلیق برطرف خواهد شد. به منظور تعیین پارامترهای کنترلی از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات استفاده شده است. کارایی روش پیشنهادی با استفاده از شبیه‌سازی اثبات شده است و نتایج با سیستم تعلیق غیرفعال مقایسه شد. **کلید واژه:** تعلیق فعال، کنترل مود لغزشی مرتبه بالا، رویتگر اغتشاش، بهینه‌سازی گروه ذرات.

با رهیافت‌های دیگر در [۱۴، ۱۳، ۱۷] گزارش شده است. سیستم با استفاده از حسگرهای اسکن کننده‌ی سطح جاده در [۱۵] و با استفاده از خودروهای پیشرو در غالب حسگرهای اسکن کننده در [۱۶] پیشنهاد شده است. برخی از محققان سعی کرده‌اند تا به طور غیرمستقیم اطلاعات عدم قطعیت‌ها و اغتشاش جاده را به دست آورند که به این ترتیب نیاز به حسگرهای خاص از بین می‌رود. در [۱۷] یک تکنیک برای تقریب عدم قطعیت و اغتشاش مسیر با یک کنترل کننده مود لغزشی تطبیقی مورد استفاده قرار گرفته است. در [۱۸] یک کنترل کننده تاخیر لختی برای سیستم تعلیق فعال پیشنهاد شده است که اغتشاش مسیر را تخمین می‌زند. نیاز به اطلاعات متغیرهای حالت جرم تعلیق، ایراد این طرح محسوب می‌شود. در این پژوهش یک سیستم تعلیق فعال با استفاده از کنترل کننده مود لغزشی مرتبه بالا به همراه رویتر اغتشاش پیشنهاد شده است. اغتشاش جاده حتی در یک مسیر کوتاه نیز می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای تغییر کند و به این ترتیب تعیین حدود عدم قطعیت را با دشواری مواجه می‌کند. به منظور حل این مشکل، روشی برای تخمین اثر عدم قطعیت و اغتشاش مسیر در این مقاله پیشنهاد شده است. نقاط برجسته‌ی این پژوهش را در ادامه فهرست شده است. در طرح پیشنهادی اثر عواملی از قبیل اغتشاش نامعلوم مسیر، مشخصه‌ی غیرخطی و عدم قطعیت در سیستم تعلیق با استفاده از رویتر تخمین زده می‌شود؛ کنترل کننده پیشنهادی به متغیرهای حالت جرم غیرفردی نیازی ندارد و در نتیجه قابلیت اطمینان سیستم بهبود و هزینه‌ی سخت‌افزار سیستم کاهش می‌یابد؛ برخلاف کنترل مود لغزشی استاندارد، نیازی به تعیین حدود اغتشاش و عدم قطعیت نیست؛ پارامترهای کنترل کننده با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات تعیین می‌شود.

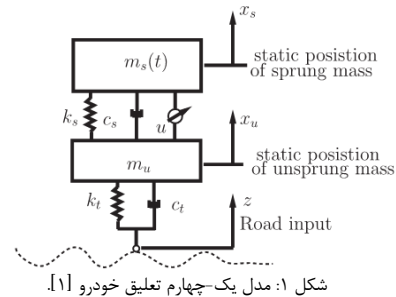
۲- مدل سازی

مدل یک-چهارم خودروی در شکل ۱ را در نظر بگیرید [۱].

۱- مقدمه

طراحی سیستم تعلیق فعال یک کار چالش برانگیز است زیرا راحتی سواری بایستی با وجود عدم قطعیت‌های مدل و ورودی اغتشاشی مسیر بهبود یابد و در عین حال پایداری و چسبندگی به مسیر نیز با توجه به محدودیت‌های فضای حرکتی اجزای تعلیق نیز حفظ شود [۱]. در طی سه دهه‌ی گذشته، استراتژی‌های کنترلی بسیار متنوعی از قبیل کنترل مود لغزشی [۱]، کنترل بهینه [۲]، کنترل تطبیقی [۳]، کنترل کننده پیش‌بین مدل [۴]، کنترل کننده H_∞ [۵] و کنترل LQR^2 [۶] بر روی سیستم‌های تعلیق فعال پیاده‌سازی شده است. در [۷] بر مبنای مدل دینامیکی سیستم تعلیق نیمه‌فعال پنوماتیکی با دو درجه آزادی، یک کنترل کننده با استفاده از ترکیب رهیافت برگشت به عقب و مود لغزشی طراحی شد. در کار مذکور، عواملی از قبیل شتاب جرم بدنه، جابجایی دینامیکی تعلیق و بار دینامیکی تایر مورد مطالعه قرار گرفت. در [۸] یک کنترل کننده برگشت به عقب برای سیستم تعلیق فعال کامل خودرو با ۷ درجه آزادی پیشنهاد شد که در آن از پیش‌بین اسمیت به منظور جبران زمان تاخیر محرک استفاده شده است. در [۹] یک کنترل کننده مقاوم تطبیقی برای پایدارسازی وضعیت خودرو پیشنهاد شد که علاوه بر عواملی از قبیل عدم قطعیت پارامتری، اغتشاش خارجی و قیود عملکردی، مساله‌ی اشباع محرک نیز در آن لحاظ شده است. در حالت کلی، یافتن مدل دقیقی از سیستم تعلیق کار دشواری است. برای این دلیل، محققان روش‌های متعددی را بر مبنای استراتژی‌های بدون اتکا بر مدل از قبیل کنترل فازی [۱۰]، کنترل فازی با الگوریتم‌های ژنتیک [۱۱] و شبکه‌ی عصبی [۱۲] پیشنهاد شده است. کنترل مود لغزشی یک روش طراحی کنترل بر مبنای مدل است ولی با این حال می‌تواند پایداری سیستم را با در دست داشتن اطلاعات کران بالای عدم قطعیت تضمین کند. کاربرد کنترل کننده مود لغزشی و ترکیب آن

جرم فنری $m_s(t)$ از مجموع جرم‌های بدنه‌ی خودرو، سرنشینان و اجزای داخلی تشکیل یافته است. این جرم توسط سیستم تعلیق شامل فنر با سختی k_s و میراساز با ضریب c_s نگه داشته می‌شود. فنر توسط یک ضریب سختی خطی k_{1s} و یک ضریب سختی غیرخطی k_{2s} و میراساز توسط یک ضریب میرایی خطی c_1 و یک ضریب میرایی غیرخطی c_2 مدل می‌شود. جرم چرخ، تایر، ترمز و جرم رابط تعلیق به جرم غیرفنری m_u شناخته می‌شود. تایر توسط ترکیبی از فنر و میراساز خطی به ترتیب با ضرایب k_t و c_t مدل شده است. در یک سیستم تعلیق فعال، علاوه بر اجزای غیرفعال مذکور، یک محرک بین جرم فنری و جرم غیرفنری قرار می‌گیرد. این محرک یک نیروی کنترلی u تولید می‌کند که وظیفه‌ی حذف نوسانات را بر عهده دارد.



اغتشاش عمودی مسیر که روی جرم غیرفنری اثر می‌گذارد با z و جابجایی عمودی جرم فنری و جرم غیرفنری با توجه به موقعیت ایستای متناظر به ترتیب با x_s و x_u مشخص می‌شود. معادلات دینامیک سیستم تعلیق در غالب معادلات فضای حالت بیان می‌شود. فرض می‌کنیم که متغیرهای حالت $x = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T$ به قرار زیر تعریف شود:

$$x_1 = x_s, \quad x_2 = \dot{x}_s, \quad x_3 = x_u, \quad x_4 = \dot{x}_u \quad (1)$$

معادلات حرکت مدل یک-چهارم خودروی در شکل ۱ را می‌توان در غالب معادلات فضای حالت توصیف کرد:

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (2)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{m_s(t)}(-f_s - f_d + u) \quad (3)$$

$$\dot{x}_3 = x_4 \quad (4)$$

$$\dot{x}_4 = \frac{1}{m_u}(f_s + f_d - f_t - u) \quad (5)$$

$$f_s = k_{1s}(x_1 - x_3) + k_{2s}(x_1 - x_3)^3 \quad (6)$$

$$f_d = c_1(x_2 - x_4) + c_2(x_2 - x_4)^2 \quad (7)$$

$$f_{ts} = k_t(x_3 - z) \quad (8)$$

$$f_{td} = c_t(x_4 - \dot{z}) \quad (9)$$

$$f_t = \begin{cases} f_{ts} + f_{td} & \text{if } (x_3 - z) < \frac{(m_s(t) + m_u)g}{k_t} \\ 0 & \text{if } (x_3 - z) \geq \frac{(m_s(t) + m_u)g}{k_t} \end{cases} \quad (10)$$

g در رابطه‌ی (۱۰) نماد شتاب گرانش است. هدف کنترلی در این پژوهش، کاهش نوسانات جرم فنری به منظور راحتی سواری با استفاده از سنجش متغیرهای موقعیت و سرعت جرم فنری است

۳- کنترل مود لغزشی مرتبه بالا

در کنترل مود لغزشی، یک سطح لغزش مناسب با دینامیک مطلوب انتخاب می‌شود و سیگنال کنترلی طوری اختیار می‌شود تا دینامیک سیستم روی سطح لغزش حفظ شود.

۳-۱- سطح لغزش

سطح لغزش را طبق رابطه‌ی زیر تعیین می‌کنیم [۱]:

$$\sigma = Sx_1 + x_2 \quad (11)$$

که در آن S ثابتی است که توسط کاربر تعیین می‌شود. با مشتق‌گیری از رابطه‌ی (۱۱) و استفاده از (۲) و (۳) می‌توان به دینامیک سطح لغزش رسید:

$$\dot{\sigma} = Sx_2 + \frac{1}{m_s(t)}(-f_s - f_d + u) \quad (12)$$

$$\dot{\sigma} = Sx_2 + f(x, t) + G_m(\Delta G(t) - 1)u + G_m u \quad (13)$$

که در آن داریم:

$$f(x, t) = -\frac{1}{m_s(t)}(f_s + f_d) \quad (14)$$

$$\frac{1}{m_s(t)} = G(t) = G_m \Delta G(t) \quad (15)$$

که در آن G_m مقدار نامی ثابت و $\Delta G(t)$ عدم قطعیت ضربی پارامتر $G(t)$ است. حدود $\Delta G(t)$ نامعلوم فرض شده‌اند. رابطه‌ی (۱۳) را در غالب زیر بازنویسی می‌کنیم:

$$\dot{\sigma} = Sx_2 + e(x, t) + G_m u \quad (16)$$

(۲۷)

که در آن $p(\sigma)$ یک تابع خطی یا غیرخطی از متغیر سطح لغزش σ است. در اینجا تابع $\hat{d}(t)$ بایستی طوری برورسانی شود تا خطای تخمین \bar{e} به صفر همگرا شود. با مشتق گیری از رابطه‌ی (۲۷) به دینامیک تخمین عدم قطعیت می‌رسیم:

$$\dot{\hat{e}} = \dot{\hat{d}}(t) + \frac{\partial p}{\partial \sigma} \dot{\sigma} \quad (28)$$

دینامیک سطح لغزش را از رابطه‌ی (۲۴) در رابطه‌ی فوق جایگذاری می‌کنیم:

$$\dot{\hat{e}} = \dot{\hat{d}}(t) + \frac{\partial p}{\partial \sigma} (-v + e + G_m u_n) \quad (29)$$

بنابراین دینامیک $\hat{d}(t)$ طبق رابطه‌ی زیر پیشنهاد می‌شود:

$$\dot{\hat{d}}(t) = -\frac{\partial p}{\partial \sigma} (-v + \hat{e} + G_m u_n) \quad (30)$$

۳-۴- پایداری

با توجه به رابطه‌ی (۳۰) می‌توان دینامیک تخمین عدم قطعیت \hat{e} را بازنویسی کرد:

$$\dot{\hat{e}} = \frac{\partial p}{\partial \sigma} \bar{e} \quad (31)$$

دو طرف رابطه‌ی (۳۱) را از \dot{e} تفریق می‌کنیم تا دینامیک خطای تخمین را به دست آوریم:

$$\dot{\bar{e}} = -\frac{\partial p}{\partial \sigma} \bar{e} + \dot{e} \quad (32)$$

رابطه‌ی (۳۲) نشان می‌دهد که برای پایداری خطای تخمین \bar{e} ، تابع $p(\sigma)$ بایستی طوری اختیار شود تا $\partial p / \partial \sigma$ همواره یک تابع با مقدار مثبت باشد. برای اینکه خطای تخمین کراندار باشد، فرض زیر بایستی برقرار باشد:

$$\left| \frac{de}{dt} \right| < \mu \quad (33)$$

که در آن μ یک ثابت مثبت است. رابطه‌های (۲۱) تا (۲۳) را در دینامیک سطح لغزش در رابطه‌ی (۲۵) جایگذاری می‌کنیم:

$$\dot{\sigma} = K_1 \sigma + K_2 \int_0^t \sigma dt + F(\sigma) + \bar{e} \quad (34)$$

رابطه‌ی فوق نشان می‌دهد که مثبت اختیار کردن

که در آن $e(x, t)$ عدم قطعیت یکپارچه است که طبق رابطه‌ی زیر تعریف می‌شود:

$$e(x, t) = f(x, t) + G_m (\Delta G(t) - 1) u \quad (17)$$

۲-۳- سیگنال کنترل

سیگنال کنترلی به دو بخش u_{eq} و u_n تقسیم می‌شود. بخش u_{eq} برای جبران جملات معلوم و u_n برای جبران عدم قطعیت یکپارچه e در دینامیک مدل در نظر گرفته شده است. در این بخش فرض می‌کنیم که تخمین عدم قطعیت یکپارچه e ، که با \hat{e} مشخص می‌شود، در دسترس باشد.

$$u = u_{eq} + u_n \quad (18)$$

$$u_{eq} = -\frac{1}{G_m} (Sx_2 + v) \quad (19)$$

$$u_n = -\frac{1}{G_m} \hat{e} \quad (20)$$

v در سیگنال کنترلی با توجه به کنترل مود لغزشی مرتبه بالا و تابعی از سطح لغزش، طبق روابط زیر اختیار می‌شود:

$$v = K_1 \phi_1(\sigma) + K_2 \int_0^t \phi_2(\sigma) dt \quad (21)$$

$$\phi_1(\sigma) = \sigma + K_3 |\sigma|^{0.5} \text{sign}(\sigma) \quad (22)$$

$$\phi_2(\sigma) = \sigma + 0.5 K_4^2 \text{sign}(\sigma) + 1.5 K_4 |\sigma|^{0.5} \text{sign}(\sigma) \quad (23)$$

با جایگذاری رابطه‌های (۱۸) و (۱۹) در (۱۶) می‌توان دینامیک سطح لغزش را به قرار زیر بازنویسی کرد:

$$\dot{\sigma} = -v + e + G_m u_n \quad (24)$$

با جایگذاری رابطه‌ی (۲۰) در (۲۴) مجدداً دینامیک سطح لغزش را بازنویسی می‌کنیم:

$$\dot{\sigma} = -v + \bar{e} \quad (25)$$

که در آن داریم:

$$\bar{e} = e - \hat{e} \quad (26)$$

\bar{e} خطای تخمین عدم قطعیت یکپارچه است. اگر تخمین عدم قطعیت \hat{e} طوری باشد که خطای تخمین آن \bar{e} همگرا یا کراندار باشد، طبق رابطه‌ی (۲۵) متغیر لغزشی σ نیز به بازه‌ی حول صفر محدود خواهد شد.

۳-۳- رویکرد اغتشاش

فرض می‌کنیم که تخمین عدم قطعیت یکپارچه e با رابطه‌ی زیر توصیف شود [۱]:

$$\dot{\hat{e}} = \hat{d}(t) + p(\sigma) \quad ()$$

شکل ۲: پروفایل اغتشاش مسیر.

پاسخ سیستم به اغتشاش مسیر با سیستم تعلیق غیرفعال در شکل ۳ و با سیستم تعلیق فعال با پارامترهای نامی در شکل ۴ نشان داده شده است. شکل ۳ (الف) نشان می‌دهد که در سیستم تعلیق غیرفعال، دامنه‌ی نوسانات جرم فنری حتی ممکن است از دامنه‌ی اغتشاشات مسیر هم فراتر رود که به شدت راحتی سواری را تحت تأثیر قرار می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی با سیستم تعلیق فعال نامی و غیرنامی نشان می‌دهد که کنترل کننده پیشنهادی اثر اغتشاش مسیر و عدم قطعیت‌های پارامتری را تقریباً به طور کامل حذف می‌کند.

جدول ۱: پارامترهای سیستم تعلیق [۱].

پارامتر	مقدار	واحد
m_{sm}	290	kg
$m_s(t)$	290 ± 60	kg
G_m	0.00356	kg^{-1}
ΔG	0.9	kg^{-1}
m_u	59	kg
k_{1s}	14500	Nm^{-1}
k_{2s}	160000	Nm^{-1}
c_1	1385.4	$Nm^{-1}s$
c_2	524.28	$Nm^{-1}s^2$
c_t	170	$Nm^{-1}s$
k_t	190000	Nm^{-1}
Rattle space	0.12	m

پارامترهای K_1 و K_2 شرط لازم پایداری سطح لغزش است.

۴- نتایج شبیه‌سازی

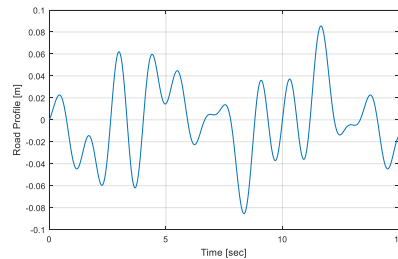
کارایی کنترل کننده پیشنهادی با استفاده از شبیه‌سازی مدل تعلیق در شکل ۱ برای پروفایل مسیر نشان داده شده در شکل ۲ مورد بررسی و با عملکرد سیستم تعلیق غیرفعال مورد مقایسه قرار گرفته است. شرایط اولیه برای سیستم در $x_0 = [0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ لحاظ شده است. برای مشاهده‌ی پارامترهای سیستم تعلیق به جدول ۱ مراجعه کنید. پارامترهای کنترلی در ادامه آورده شده است:

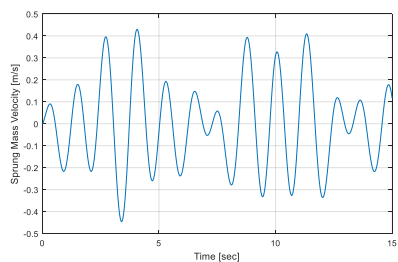
$$S = 0.5, \partial p / \partial \sigma = 1, C_1 = C_2 = 2, W = 0.9 \quad (35)$$

همچنین بعد از اجرای الگوریتم بهینه‌سازی با تعداد ذرات ۳۰ و بیشینه تکرار ۲۰ مرتبه برای سیستم با پارامترهای نامی سیستم تعلیق، پارامترهای کنترلی K_1, K_2, K_3, K_4 به قرار زیر به دست آمد:

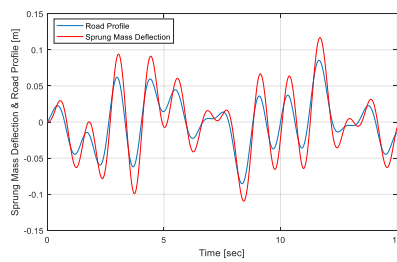
$$K_1 = 1.8898, K_2 = 2.0193 \quad (36)$$

$$K_3 = 3.6694, K_4 = 4.1035$$

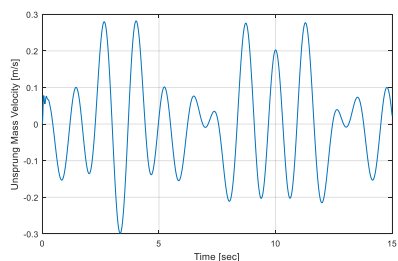




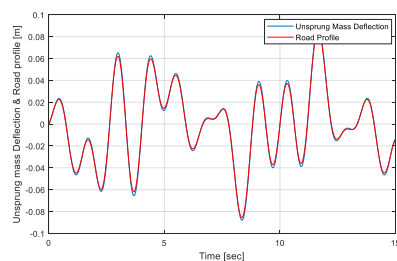
(ب)



(الف)

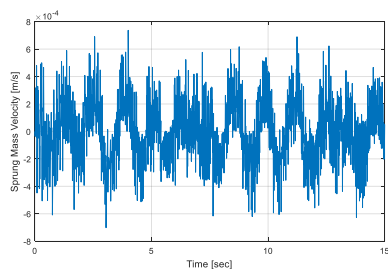


(د)

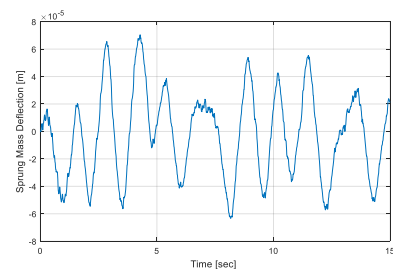


(ج)

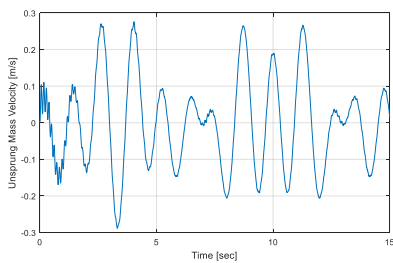
شکل ۳: پاسخ سیستم تعلیق غیرفعال به اغتشاشات مسیر: (الف) انحراف جرم فنری و اغتشاش مسیر، (ب) سرعت جرم فنری، (ج) انحراف جرم غیرفنری و اغتشاش مسیر، (د) سرعت جرم غیرفنری.



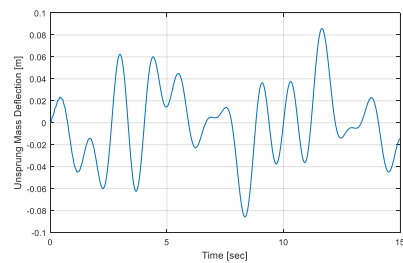
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۴: پاسخ سیستم تعلیق فعال نامی به اغتشاشات مسیر: (الف) انحراف جرم فنری، (ب) سرعت جرم فنری، (ج) انحراف جرم غیرفنری، (د) سرعت جرم غیرفنری.

راحتی سواری در حالت تعلیق نامی و با پارامترهای تغییر یافته بر حسب جابجایی جرم فنری بهبود می‌یابد.

نتایج شبیه‌سازی برای پروفایل اغتشاش مسیر نشان می‌دهد که با یک سری از پارامترهای کنترلی، مشخصه‌ی

- control for ride comfort." IEEE, In 2013 International Conference on Control, Automation, Robotics and Embedded Systems (CARE), pp. 1-6, 2013.
- [11] Zhang, Jing Jun, and Zhi Qiang Xu. "Studying of Fuzzy Logic Control for Semi-Active Suspension Based on Improved Genetic Algorithm." *Trans Tech Publ, In Advanced Materials Research*, vol. 143, pp. 929-932, 2011.
- [12] Wang, Wei-Yen, Yi-Hsing Chien, Ming-Chang Chen, and Tsu-Tian Lee. "Control of uncertain active suspension system with anti-lock braking system using fuzzy neural controllers." IEEE, In *Systems, Man and Cybernetics*, 2009. SMC 2009. IEEE International Conference on, pp. 3371-3376, 2009.
- [13] Zhang, Niao-Na, Yan-Yang Li, Hao-Lin Li, and Chang-Zhe Zhou. "Design of air suspension system based on neural sliding mode control." IEEE, In *Wavelet Active Media Technology and Information Processing (ICCWAMTIP)*, 2016 13th International Computer Conference on, pp. 391-394, 2016.
- [14] Wen, Shiping, Michael ZQ Chen, Zhigang Zeng, Xinghuo Yu, and Tingwen Huang. "Fuzzy control for uncertain vehicle active suspension systems via dynamic sliding-mode approach." IEEE, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, Vol. 47, No. 1, PP. 24-32, 2017.
- [15]] Ryu, Seongpil, Youngjin Park, and Moonsuk Suh. "Ride quality analysis of a tracked vehicle suspension with a preview control." Elsevier, *Journal of Terramechanics*, Vol. 48, No. 6 PP. 409-417, 2011.
- [16] Rahman, Mustafizur, and Geoff Rideout. "Using the lead vehicle as preview sensor in convoy vehicle active suspension control." Taylor & Francis, *Vehicle system dynamics*, Vol. 50, No. 12, PP. 1923-1948, 2012.
- [17] Chen, Hung-Yi, and Shiuh-Jer Huang. "Functional approximation-based adaptive sliding control with fuzzy compensation for an active suspension system." Sage Publications Sage UK: London, England, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, Vol. 219, No. 11, PP. 1271-1280, 2005.
- [18] Deshpande, Vaijayanti S., Pramod D. Shendge, and Shrivijay B. Phadke. "Active suspension systems for vehicles based on a sliding-mode controller in combination with inertial delay control." Sage Publications Sage UK: London, England, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, Vol. 227, No. 5, PP. 675-690, 2013.

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

یک طرح کنترل مود لغزشی بر مبنای روباتگر اغتشاش برای سیستم تعلیق فعال طراحی شد و شرایط پایداری مورد بررسی قرار گرفت. طرح پیشنهادی در تخمین عدم قطعیت‌ها و ورودی اغتشاشی مسیر با دقت بالایی عمل می‌کند. نتایج شبیه‌سازی برای پروفایل اغتشاش مسیر نشان می‌دهد که با یک سری از پارامترهای کنترلی، مشخصه‌ی راحتی سواری در حالت تعلیق نامی و با پارامترهای تغییر یافته بر حسب میزان جابجایی جرم فنری بهبود می‌یابد. در کار انجام شده، دینامیک محرک لحاظ نشد؛ بنابراین یک پیشنهاد برای کار آتی می‌تواند روی بررسی اثر دینامیک و همچنین تأخیر محرک‌های مختلف از قبیل پنوماتیکی یا هیدرولیکی روی پاسخ سیستم و روش‌های کاهش اثر نامطلوب آن‌ها متمرکز شود.

مراجع

- [1] V.S.Deshpande, B.Mohan, P.D.Shendge and S.B.Phadke, "Disturbance observer based sliding mode control of active suspension systems", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 333, No.11, PP. 2281–2296, 2014 .
- [2] Yin, Jun, Xinbo Chen, Jianqin Li, and Shaoming Qian. "Performance evaluation of an active and energy regenerative suspension using optimal control." IEEE, pp. 8057-8060, 2015.
- [3] Sun, Weichao, Huijun Gao, and Bin Yao. "Adaptive Robust Vibration Control of Full-Car Active Suspensions With Electrohydraulic Actuators." *IEEE Trans. Contr. Sys. Techn*, Vol. 21, No. 6, PP. 2417-2422, 2013.
- [4] Xu, Li, H. Eric Tseng, and Davor Hrovat. "Hybrid model predictive control of active suspension with travel limits and nonlinear tire contact force." IEEE, In *American Control Conference (ACC)*, pp. 2415-2420, 2016.
- [5] Rizvi, Syed M. Hur, Muhammad Abid, Abdul Qayyum Khan, Shaban Ghias Satti, and Jibrán Latif. "H ∞ control of 8 degrees of freedom vehicle active suspension system." Elsevier, *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, Vol. 30, No. 2, PP. 161-169, 2018.
- [6] Wei, Xinjiang, Junsheng Li, and Xiaohua Liu. "LQR control scheme for active vehicle suspension systems based on modal decomposition." IEEE, In *Control and Decision Conference (CCDC)*, pp. 3296-3301, 2013.
- [7] Wang, Jun-Ying, and Li-Ying Sun. "Design of semi-active air suspension system based on backstepping sliding mode control." IEEE, In *Chinese Automation Congress (CAC)*, pp. 4378-4382, 2017.
- [8] Wang, Yanyang, Yinong Li, and Ling Zheng. "Backstepping and Smith predictor integrated control on MR vehicle suspension system." IEEE, In *Electrical and Control Engineering (ICECE)*, pp. 92-97, 2011.
- [9] Sun, Weichao, Huijun Gao, and Okyay Kaynak. "Vibration isolation for active suspensions with performance constraints and actuator saturation." IEEE, *ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 20, No. 2, PP. 675-68, 2015.
- [10] Rao, Tinnavelli Ramamohan, and Punjala Anusha. "Active suspension system of a 3 DOF quarter car using fuzzy logic