

طراحی کنترل کننده PID برای سیستم تعلیق فعال خودرو مدل یک چهارم

عقیل شاولی پور¹

¹ استادیار گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه ولایت، ایرانشهر، a.shavalipour@velayat.ac.ir

چکیده

حداقل رساندن شتاب عمودی که به مسافر منتقل می شود است، که به طور مستقیم راحتی راه را فراهم می کند. [1] در حال حاضر سیستم های تعلیق خودرو به سه دسته اصلی تقسیم بندی می گردند، سیستم های تعلیق غیر فعال، نیمه فعال و فعال. به طور کلی، سیستم تعلیق سنتی شامل فنرها و دمپر ها و دیگر اجزای مکانیکی به عنوان تعلیق غیرفعال خوانده می شود، اما اگر سیستم تعلیق با استفاده از اجزای کنترلی و با استفاده از الگوریتم های کنترلی از خارج از سیستم تعلیق کنترل شود، به عنوان تعلیق نیمه فعال یا فعال شناخته می شود. سیستم تعلیق غیرفعال یک سیستم حلقه باز است که فقط برای رسیدن به شرایط خاص طراحی شده است. مشخصات سیستم تعلیق غیرفعال یکبار تنظیم می شود و در ادامه کار و در شرایط جاده این مشخصات نمی تواند تغییر کند. مشکل در سیستم تعلیق غیر فعال وقتی نمایان می شود که اگر میرایی سیستم خیلی زیاد باشد بسیاری از اثرات ناهمواری جاده را به درون خودرو منتقل می کند و اگر میرایی سیستم تعلیق کم باشد پایداری سیستم در پیچ های جاده کاهش یافته و خودرو به یک سمت کشیده می شود. بنابراین، عملکرد سیستم غیر فعال به میزان زیادی به شکل ناهمواری های جاده بستگی دارد. برای رفع این مشکل در سیستم تعلیق خودرو در کنار اجزای مکانیکی از یک عملکرد نیمه فعال و فعال در کنار الگوریتم های کنترلی استفاده گردی تا بهترین حالت سیستم تعلیق را با توجه به نوع جاده ایجاد نماید. بنابراین یک سیستم تعلیق فعال که در شکل 1 نشان داده شده است برای بهبود عملکرد سیستم تعلیق استفاده می شود. [2-5]

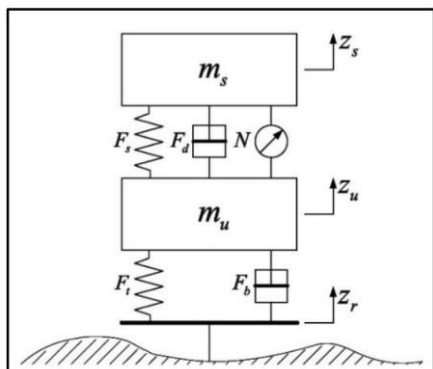
اهداف این مطالعه به دست آوردن یک مدل ریاضی برای سیستم های تعلیق غیرفعال و فعال برای مدل یک چهارم خودرو و همچنین تعریف یک سیستم کنترل فعال با استفاده از الگوریتم PID برای مدل یک چهارم خودرو که در معرض تحریک جاده با استفاده از چند مدل مختلف پروفایل جاده می باشد. سیستم های تعلیق رایج در خودروها تنها از اجزای غیرفعال شامل فنر و دمپر با ضریب میرایی ثابت استفاده می کنند که قابل تغییر برای شرایط مختلف جاده نیست. سیستم های تعلیق خودرو معمولاً بر اساس توانایی آنها در ارائه هندلینگ خوب جاده و بهبود راحتی سرنشینان رتبه بندی می شوند. سیستم های تعلیق غیرفعال فقط یک سازش ثابت بین این دو معیار متضاد گفته شده را ارائه می دهند در حالیکه، سیستم تعلیق فعال توانایی کاهش نیروی مورد نیاز تعلیق در مقایسه با طراحی سنتی را به عنوان مصالحه ای بین هندلینگ و راحتی با کنترل مستقیم محرک ها ارائه می دهد. در این مطالعه، سیستم تعلیق فعال بر اساس کنترل PID برای مدل یک چهارم خودرو ارائه شده است. مقایسه بین سیستم تعلیق غیرفعال و فعال با استفاده از پروفیل های جاده انجام می شود. عملکرد کنترلر با کنترل کننده PID و سیستم تعلیق غیرفعال مقایسه می شود. عملکرد این کنترلر با انجام شبیه سازی های کامپیوتری با استفاده از جعبه ابزار SIMULINK مشخص می شود.

واژه های کلیدی

سیستم تعلیق فعال، کنترلر PID، مدل یک چهارم

مقدمه

سیستم تعلیق خودرو یک مکانیسم است که بدنه ی ماشین را به صورت جسمی از چرخ های ماشین جدا می کند. هدف از سیستم تعلیق این است که راحتی سواری، کنترل جاده و ثبات وسایل نقلیه را بهبود بخشد. تعلیق شامل سیستم فنر، کمک فنر و اتصالات است که وسیله نقلیه را به چرخ های آن متصل می کند. به عبارت دیگر، سیستم تعلیق یک مکانیسم است که بدنه ماشین را به طور فیزیکی از چرخ خودرو جدا می کند. عملکرد اصلی سیستم تعلیق وسیله نقلیه به



شکل 1: سیستم تعلیق فعال

$$\dot{Z}_3 = Z_4 \quad (5)$$

$$\dot{Z}_2 = \frac{1}{M_{us}} [k_s(Z_1 - Z_3) + C_a(Z_2 - Z_4) + K_t(Z_3 - Z_r)] \quad (6)$$

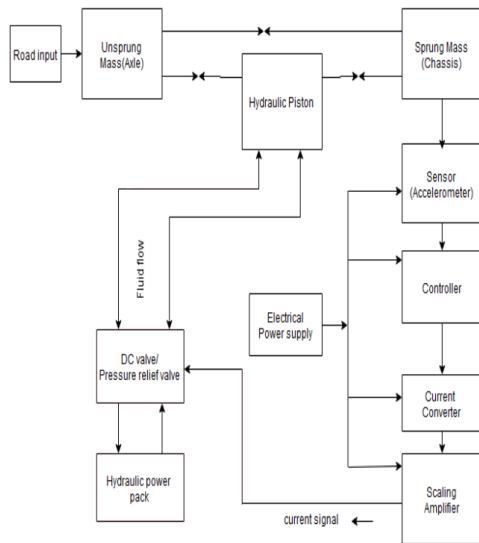
که در این معادلات

$$Z_1 = Z_s, Z_2 = \dot{Z}_s, Z_3 = Z_{us}, Z_4 = \dot{Z}_{us}$$

مدلسازی سیستم:

نمودار بلوکی سیستم کنترل استفاده شده برای توسعه سیستم تعلیق فعال در شکل 2 نشان داده شده است. به منظور توسعه سیستم تعلیق فعال، از اجزای هیدرولیکی زیر استفاده می شود. [15]

- منبع هیدرولیکی تحت فشار
- دریچه تخلیه فشار برای کنترل فشار مایع هیدرولیک
- دریچه کنترل جهت
- سیلندر هیدرولیک (فعال کننده) برای تبدیل فشار هیدرولیکی به نیرویی که بین جرم گیرنده و جرم غیرقابل انتقال منتقل می شود.



شکل 2 - بلوک دیاگرام سیستم کنترل

شکل 3 نشانگر عملگر هیدرولیکی است که در بین جرم پرشده و جرم غیر قابل جابجایی، از جمله یک شیر و یک سیلندر قرار دارد، جایی که U_h نیروی محرک تولید شده توسط پیستون هیدرولیکی است و $x_{act} = (x_1 - x_3)$ جابجایی محرک است. U_h (برابر با U_a) به صورت دینامیکی، به منظور بهبود راحتی سواری در هنگام استفاده از متغیر جاده و بار متغیر است [15].

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (7)$$

تا به امروز، الگوریتم های کنترلی فراوانی جهت بهبود عملکرد خودرو در برآورده کردن نیاز راحتی سرنشین و همچنین پایداری و هندلینگ توسط محققان این حوزه پیشنهاد گردیده است. راهکارهای کنترلی در این حوزه شامل استفاده از کنترل فیدبک حالت بهینه LQR [6]، کنترل تطبیقی لغزشی [7]، کنترل مقاوم H^∞ [8]، کنترل مد لغزشی [9]، منطق فازی [10]، کنترل پیش بین [11] و استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی [12] بوده است. عملکرد سیستم تعلیق فعال را می توان از طریق روش های کنترل بهبود بخشید. با این حال، این روش ها نیازمند مکانیسم های اصلاح شده یا جدول تصمیم گیری برای یک عملکرد خاص از کنترلر و نیز دارای مشکلات خاصی در کاربرد عملی هستند.

در این مطالعه، ابتدا مدل سازی ریاضی سیستم های تعلیق غیرفعال و فعال برای مدل ربع خودرو که در معرض سه نوع تحریک مختلف از طرف جاده قرار دارد انجام می شود سپس عملکرد این سیستم تعلیق با استفاده از کنترل کننده PID مورد بررسی قرار می گیرد. مقایسه بین سیستم تعلیق غیرفعال و فعال با در نظر گرفتن پروفیل های جاده انجام می شود. عملکرد کنترلر با کنترل کننده PID و سیستم تعلیق غیرفعال با انجام شبیه سازی های کامپیوتری از طریق جعبه ابزار MATLAB و SIMULINK مورد مقایسه قرار می گیرد.

مدلسازی ریاضی سیستم تعلیق فعال:

سیستم های تعلیق فعال، عملگرهای هیدرولیکی را به اجزای غیر فعال سیستم تعلیق اضافه می کنند که در شکل 1 نشان داده شده است. مزیت چنین سیستمی این است که حتی اگر عملکرد هیدرولیک فعال یا سیستم کنترل شکست بخورد، اجزای غیرفعال به کار می روند. معادلات حرکت سیستم تعلیق به صورت زیر نوشته می شوند:

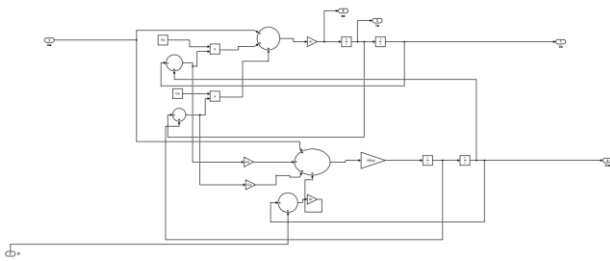
$$M_s \ddot{z}_s + k_s(z_s - z_{us}) + C_a(\dot{z}_s - \dot{z}_{us}) - u_a = 0 \quad (1)$$

$$M_{us} \ddot{z}_{us} + k_s(z_{us} - z_s) + C_a(\dot{z}_{us} - \dot{z}_s) + K_t(\dot{z}_{us} - \dot{z}_r) + u_a = 0 \quad (2)$$

که در این معادلات U_a نیروی کنترلی از عملگر هیدرولیک است. می توان اشاره کرد که اگر نیروی کنترل $U_a = 0$ باشد، معادلات (1)، (2) تبدیل به معادله ی سیستم تعلیق غیر فعال می شود [13، 14]. با در نظر گرفتن U_a به عنوان ورودی کنترل، معادلات فضای حالت مربوط به معادلات (1، 2) به صورت زیر تبدیل می شوند:

$$\dot{Z}_1 = Z_2 \quad (3)$$

$$\dot{Z}_2 = -\frac{1}{M_s} [k_s(Z_1 - Z_3) + C_a(Z_2 - Z_4)] \quad (4)$$



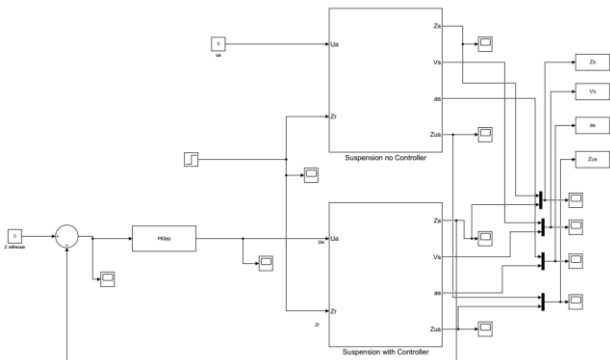
شکل 4- شبیه سازی سیستم تعلیق غیرفعال

طراحی کنترلر:

در طراحی کنترل حالت فیدبک، بیشترین کاربرد را کنترلر PID دارد. واژه PID مخفف عبارت Proportional-Integral-Derivative می باشد که نشان دهنده سه عامل در سیگنال خطا برای تولید یک سیگنال کنترل است. اگر $u(t)$ سیگنال کنترل باشد که به سیستم فرستاده می شود، $y(t)$ خروجی واقعی و $r(t)$ خروجی مورد نظر است و خطای ردیابی برابر عبارت $e(t) = r(t) - y(t)$ می شود و کنترل کننده PID دارای فرم زیر است:

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int e(t) dt + k_d \frac{d}{dt} e(t)$$

دینامیک حلقه دلخواه را می توان با تنظیم سه پارامتر KI، KP و KD، اغلب با تطبیق و بدون دانش خاصی از یک مدل سیستم بدست آورد. پایداری را می توان تنها با استفاده از اصطلاح متناسب به دست آورد. عبارت انتگرال اجازه رد یک اختلال گام را می دهد. عبارت مشتق شده، موجب کاهش یا شکل دادن پاسخ می شود. کنترل کننده های PID دارای سطح پیشرفته ای از سیستم های کنترل هستند، اما در چند مورد پیچیده تر، تقریباً در سیستم های MIMO، نمی توان آنها را استفاده کرد. شکل 5 مدل Simulink سیستم تعلیق فعال با استفاده از کنترل کننده PID را نشان می دهد.



شکل 5 - مدل سیمولینک سیستم تعلیق فعال با استفاده از کنترلر PID

$$\dot{x}_2 = \frac{k_s}{M_s} x_1 + \frac{c_a}{M_s} x_2 + \frac{k_s}{M_s} x_3 + \frac{c_a}{M_s} x_4 + \frac{A_1}{M_s} x_5 \quad (8)$$

$$\dot{x}_3 = x_4 \quad (9)$$

$$\dot{x}_4 = \frac{k_s}{M_{us}} x_1 + \frac{c_a}{M_{us}} x_2 + \frac{k_s + k_t}{M_{us}} x_3 + \frac{c_a}{M_{us}} x_4 + \frac{A_1}{M_s} x_5 \quad (10)$$

$$\dot{x}_4 = \beta x_5 + A(x_2 - x_4) + x_6 \omega_3 \quad (11)$$

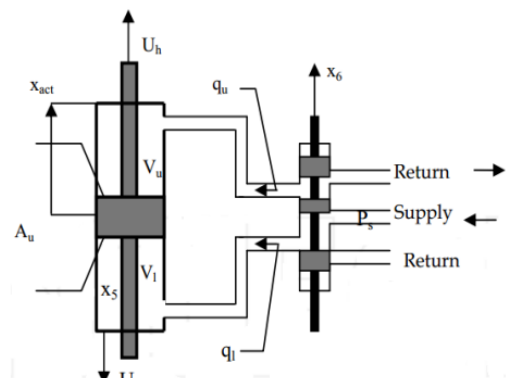
$$\dot{x}_6 = \frac{x_6}{\tau} U_c \quad (12)$$

$$\omega_3 = \text{sgn}[P_s - \text{sgn}(x_6)x_5] \sqrt{|P_s - \text{sgn}(x_6)x_5|}$$

در نتیجه معادلات 7، 8، 9، 10 و 11 مدل فیدبک حالت سیستم تعلیق فعال شامل هیدرولیک دینامیکی می شوند. [15] برای اطمینان از اینکه طراحی کنترل کننده، هدف مطلوب ما را به دست می آورد، سیستم تعلیق فعال و غیرفعال با حلقه باز با مقادیر زیر شبیه سازی می شود:

جدول 1 - مقدار پارامترهای سیستم تعلیق

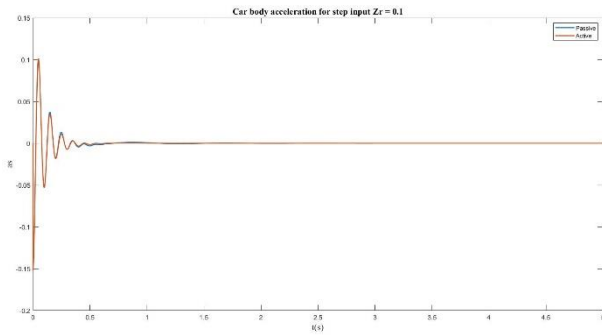
M_b	250 kg
M_{us}	50 kg
K_a	16812 N/m
C_a	1000 N.sec/m
K_t	190000 N/m
β	1 sec ⁻¹



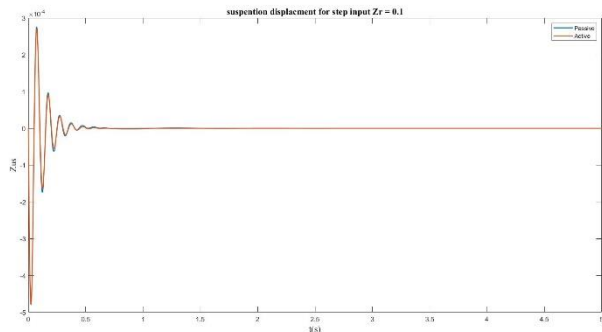
شکل 3- شیر و سیلندر هیدرولیک

شبیه سازی سیستم تعلیق غیرفعال در سیمولینک:

شکل 4، مدل شبیه سازی شده سیستم تعلیق غیر فعال را در سیمولینک متلب به صورت زیر نشان می دهد:

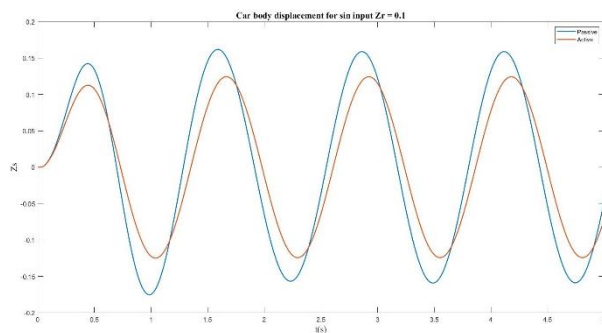


شکل (6-ج) شتاب بدنه خودرو برای ورودی پله $Zr = 0.1$



شکل (6-د) جابجایی سیستم تعلیق خودرو برای ورودی پله $Zr = 0.1$

در شکل 6 نشان می دهد که مقدار پیک و زمان نشست توسط سیستم تعلیق فعال در مقایسه با سیستم غیر فعال برای تمام پارامترهای شتاب جرم معلق (راحتی مسافر)، انحراف سیستم تعلیق (دست انداز جاده) و انحراف تایر است. در تمامی شکل ها بهبود سیستم فعال نسبت به سیستم غیر فعال قابل مشاهده است.

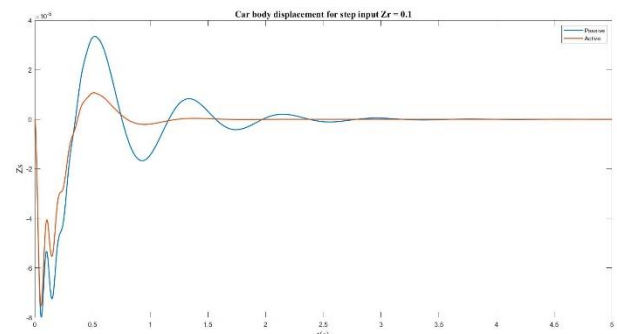


شکل (7-الف) جابجایی بدنه خودرو برای ورودی سینوسی $Zr = 0.1$

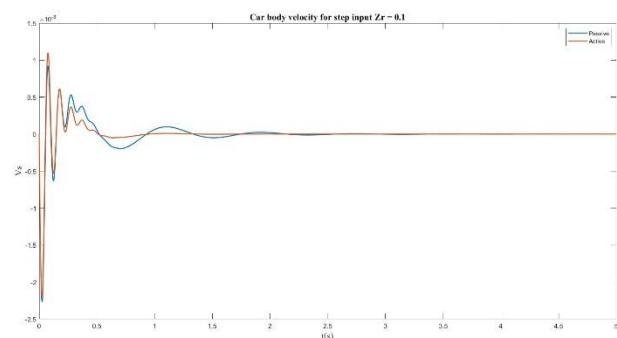
نتایج شبیه سازی و بحث:

در این مطالعه، شبیه سازی بر اساس مدل ریاضی برای یک چهارم خودرو با استفاده از نرم افزار MATLAB / SIMULINK انجام شده است. عملکرد سیستم تعلیق در شرایط کیفیت سواری و هدایت ماشین مشاهده خواهد شد، جایی که اختلال در جاده به عنوان ورودی برای سیستم فرض شده است. پارامترهایی که مشاهده می شود، حرکت تعلیق، حرکت چرخ، شتاب بدنه خودرو و جابه جایی برای یک چهارم مدل خودرو است.

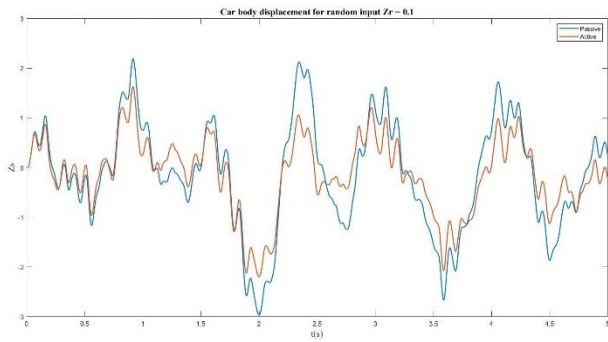
هدف به دست آوردن مقدار دامنه کوچک برای سیستم تعلیق، انحراف چرخ و شتاب بدنه خودرو است. حالت پایدار برای هر قسمت نیز باید سریع باشد. حرکت تعلیق، حرکت چرخ، شتاب خودرو و جابه جایی ماشین برای یک چهارم ماشین به دست آمده است که در شکل زیر نشان داده شده است [6: 6] برای سه ورودی متفاوت یعنی؛ ورودی پله $Zr=0.1$ ، ورودی سینوسی (جاده پر دست انداز) و ورودی جاده تصادفی.



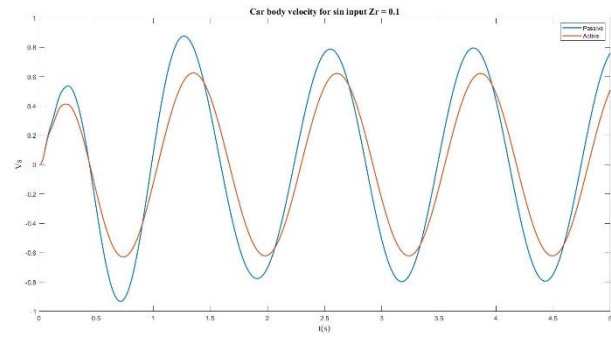
شکل (6-الف) جابجایی بدنه خودرو برای ورودی پله ای $Zr = 0.1$



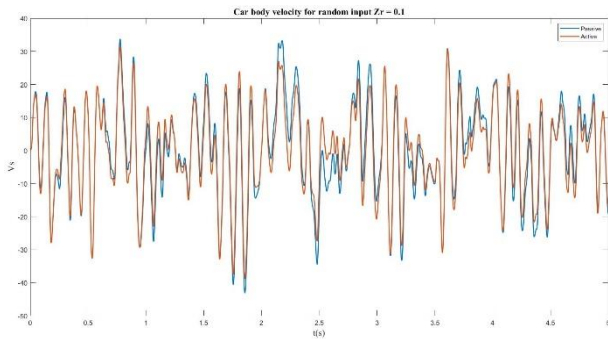
شکل (6-ب) سرعت بدنه خودرو برای ورودی پله $Zr = 0.1$



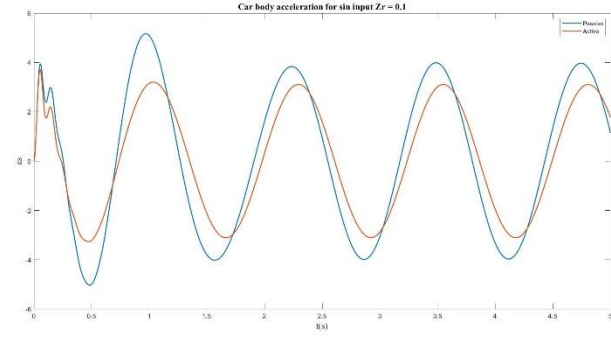
شکل (8-الف) جابجایی بدنه خودرو برای ورودی تصادفی $Z_r = 0.1$



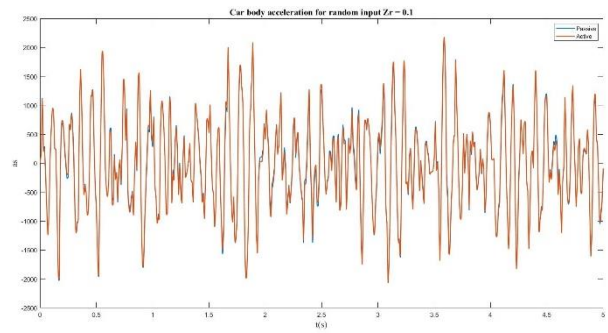
شکل (7-ب) سرعت بدنه خودرو برای ورودی سینوسی $Z_r = 0.1$



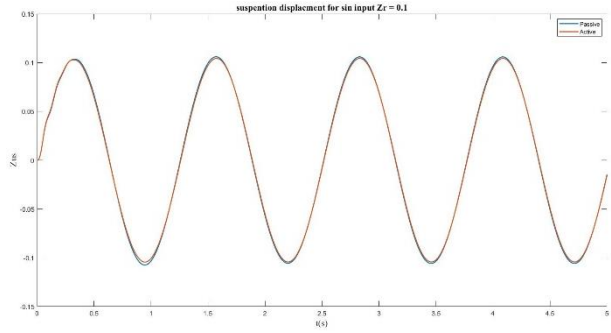
شکل (8-ب) سرعت بدنه خودرو برای ورودی تصادفی $Z_r = 0.1$



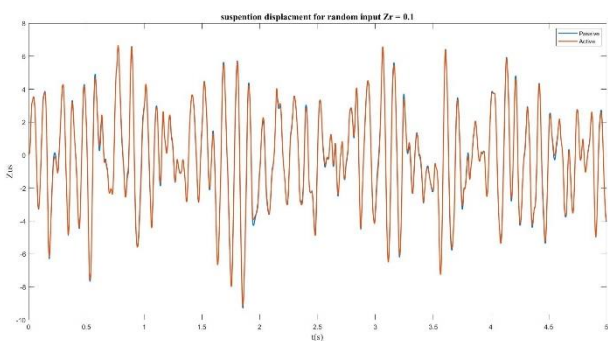
شکل (7-ج) شتاب بدنه خودرو برای ورودی سینوسی $Z_r = 0.1$



شکل (8-ج) شتاب بدنه خودرو برای ورودی تصادفی $Z_r = 0.1$



شکل (7-د) جابجایی سیستم تعلیق خودرو برای ورودی سینوسی $Z_r = 0.1$



شکل (8-د) جابجایی سیستم تعلیق خودرو برای ورودی تصادفی $Z_r = 0.1$

در شکل 7، مقدار پیک و زمان نشست توسط سیستم فعال در مقایسه با سیستم غیر فعال برای تمام پارامترهای شتاب جرم معلق (راحتی مسافر)، انحراف تعلیق (دست انداز جاده) و انحراف تایر برای ورودی جاده بصورت سینوسی نشان داده شده است. در تمامی شکل ها بهبود سیستم فعال نسبت به سیستم غیر فعال قابل مشاهده است.



- Series: Materials Science and Engineering, 2020, vol. 810, no. 1: IOP Publishing, p. 012021 .
- [4] E. Dishant, P. Singh, and M. Sharma, "Suspension systems: A review," *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 4, no. 4, pp. 148-160, 2017.
- [5] A. A. Aly and F. A. Salem, "Vehicle suspension systems control: a review," *International journal of control, automation and systems*, vol. 2, no. 2, pp. 46-54, 2013.
- [6] V. K. Maurya and N. S. Bhangal, "Optimal control of vehicle active suspension system," *Journal of Automation and Control Engineering*, vol. 6, no. 1, 2018.
- [7] Y.-J. Liu and H. Chen, "Adaptive sliding mode control for uncertain active suspension systems with prescribed performance," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2020.
- [8] H. D. Choi, C. K. Ahn, M. T. Lim, and M. K. Song, "Dynamic output-feedback H_∞ control for active half-vehicle suspension systems with time-varying input delay," *International Journal of Control, Automation and Systems*, vol. 14, no. 1, pp. 59-68, 2016.
- [9] V. S. Deshpande, B. Mohan, P. Shendge, and S. Phadke, "Disturbance observer based sliding mode control of active suspension systems," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 333, no. 11, pp. 2281-2296, 2014.
- [10] H. F. Elbab, E. Allam, M. A. Hady, and S. Abouel-Seoud, "Performance of active suspension with fuzzy control," *SAE Technical Paper*, 0148-7191, 2009 .
- [11] W. Oraby, M. Aly, S. El-Demerdash, and A. Selim, "Influence of active suspension preview control on the vehicle lateral dynamics," *SAE Technical Paper*, 0148-7191, 2007 .
- [12] F. Zhao, S. S. Ge, F. Tu, Y. Qin, and M. Dong, "Adaptive neural network control for active suspension system with actuator saturation," *IET control theory & applications*, vol. 10, no. 14, pp. 1696-1705, 2016.
- [13] V. H. Quan, N. H. Truong, and N. T. Duc, "Modeling and controlling a quarter-vehicle active suspension model," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 2061, no. 1: IOP Publishing, p. 012138 .
- [14] L. Robert and L. Kent, "Modeling and Simulation of Dynamic System," ed: Prentice-Hall, 1997.
- [15] M. S. Kumar, "Development of active suspension system for automobiles using PID controller," 2008.

در شکل 8 نشان داده شده است که مقادیر اورشوت و زمان نشست برای ورودی جاده بصورت تصادفی توسط سیستم فعال در مقایسه با سیستم غیر فعال برای تمام پارامترهای شتاب جرم معلق (راحتی مسافر)، انحراف تعلیق (دست انداز جاده) و انحراف تایر کاهش یافته است.

نتیجه گیری:

در این مطالعه، یک سیستم تعلیق فعال برای خودروی سواری با طراحی یک کنترلر طراحی شده است که عملکرد سیستم را با توجه به اهداف طراحی نسبت به سیستم تعلیق غیرفعال بهبود می بخشد. مدل سازی ریاضی با استفاده از یک مدل آزمایشی دو درجه آزادی، مدل یک چهارم خودرو برای سیستم تعلیق غیرفعال و فعال با در نظر گرفتن حرکت بصورت جهشی برای ارزیابی عملکرد تعلیق با توجه به اهداف متنوع و متناقض طراحی شده است. در این سیستم رویکرد کنترلی PID برای سیستم فعال مورد بررسی قرار گرفته است. میزان جابجایی سیستم تعلیق در مواجهه با ناهمواری های مختلف جاده در سیستم تعلیق فعال بصورت قابل ملاحظه ای نسبت به سیستم غیر فعال کاهش یافته است. با استفاده از یک سیستم فعال در سیستم تعلیق، ممکن است به تراضی بهتر بین پارامترهای تعلیق نسبت به سیستم غیر فعال دست یابیم. در این مطالعه پتانسیل سیستم فعال در بهبود راحتی سواری و هدایت ناهمواری های جاده با استفاده از طراحی کنترل کننده PID مورد بررسی قرار گرفته است. که با توجه به طراحی انجام شده اهداف این پروژه به دست آمده است. مدل دینامیکی برای سیستم های تعلیق خودرو در حالت خطی فرموله شده است و تنها یک نوع از کنترل کننده برای تست عملکرد سیستم که PID است استفاده می شود.

مراجع و منابع

- [1] A. F. M. Riduan, N. Tamaldin, A. Sudrajat, and F. Ahmad, "Review on active suspension system," in *SHS Web of Conferences*, 2018, vol. 49: EDP Sciences, p. 02008 .
- [2] A. K. Patra, B. Rout, D. K. Subudhi, S. Pani, N. Nahak, and A. Nanda, "Vehicle Suspension System Based on PID Controller with JAYA Optimization Technique," in *2021 International Conference in Advances in Power, Signal, and Information Technology (APSIT)*, 2021: IEEE, pp. 1-6 .
- [3] R. Katarne and S. Sharma, "Active hybrid suspension system: A review," in *IOP Conference*