

Design of Active Force Controller for Off-Road Seat Suspension equipped to MR Damper

M. Tahmasebi ^{a*}, M. Gohari ^b, M. Mobarakabadi ^b

^a Assistant Professor, Agricultural Engineering Research Department, Markazi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension, Organization (AREEO), Arak, Iran

^b Department of Solid Mechanics, Faculty of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, 3818146763, Iran

Original Article

Use your device to scan and read the article online



Citation: Tahmasebi M, Gohari M, Mobarakabadi M. Design of Active Force Controller for Off-Road Seat Suspension equipped to MR Damper. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2022;1(2):175-200.



<https://dx.doi.org/10.52547/masm.1.2.175>

KEYWORDS

Active Force control,
Magnetorheological Damper,
Smart Fluid,
Iterative Learning Algorithm,
Heavy Duty Off-Road Vehicle.

ABSTRACT

Transmitted vibration to driver body (whole-body vibration) in heavy-duty Off-road vehicles without primary suspension leads to health problems in long term. Commonly, secondary seat suspension is used to isolate vibration and remove health problems, especially in the spinal column. Passive seat suspension is widely employed for this purpose, but its efficiency is low. Active seat suspension and semi-active suspensions have better performance in blocking unwanted oscillation. Recently, semi-active magnetorheological dampers are focused on by researchers which can adjust their viscosity by electromagnetic flux. It is called smart fluid due to having controllable parameters such as damping ratio by electricity variations. Thus, suspension can dampen oscillation by low electricity current efficiently. The current paper introduces a novel active force control (AFC) equipped with an iterative learning estimator for seat suspension via MR damper. Results of simulations show that it can cancel vibration perfectly. The suspension was coupled to the human body vibration model, and the driver vibration results have been obtained. It is important to note that active force control can also be used to eliminate high-velocity disturbances. Since the vibrations that occur in the car have a high rate of change, the results indicated that active force control equipped with an iterative learning estimator system can be effective in reducing the transmission vibration to the driver so that the first and second vibration peaks was reduced by about 60%.

Extended Abstract

1. Introduction

Transmitted shock and vibration from heavy duty machineries produce serious health problems [1-3]. Commonly, suspension systems are used in vehicular primary suspension applications where there is a tradeoff between the two quantities of ride comfort and stability of vehicle. So, ride stability and perceived comfort level are two of the most imperative factors in a vehicle's subjective evaluation. In addition, the performance of passive suspensions is always limited by the compromise between ride and handling [4].

Seat suspensions as secondary suspensions generally are employed as vibration isolators in heavy duty off-road vehicles to attenuate harmful oscillation via damping characteristic of viscous dashpot. It means that the secondary suspensions enhance ride comfort by decreasing vibration transmission to the driver compartment [5]. The efficiency of these kinds of passive suspensions is relatively low and is not proper for wide range of vibration frequencies due to their resonant ranges. Indeed, previous researches were illustrated those passive suspensions compromise between controlling the dynamic peak at the resonance frequency and isolating at the higher frequencies. Larger damping ratios decrease the resonance peak though

* Corresponding author. Tel.: +98-918-3134392

E-mail address: tahmasebi.mona@gmail.com

DOI: <https://dx.doi.org/10.52547/masm.1.2.175>

Received: October 13, 2021; Received in revised form: November 21, 2021; Accepted: December 06, 2021

2022 Published by Arak University Press. All rights reserved.



they increase transmissibility at the higher frequencies [6-8]. Active seat suspensions have been also applied to reject unwanted vibrations, but they need external power source to do this function [9]. On the other hand, semi-active seat suspensions such as implemented by magneto-rheological (MR) damper has been used to face mentioned problems [10-13].

As in semi-active dampers, the magnitude of the damping force is adjustable; they can be utilized to control the suspension dynamics. The MR dampers provide useful solution for vibration problem in structures particularly seat suspensions. Force transmitted by this cubic nonlinear damper can be reduced while does not make resonant problem. Some features which are made it attractive for designers are: low power consumption, few numbers of components, and simplicity of the structure. In fact, they work as combination of mechanical components and electronic control units. For instance, an analytical and experimental evaluation of the performance of MR suspension for a heavy truck in comparison to passive suspension was reported [10]. Four controllable MR dampers were set up on a Volvo VN series heavy truck and tested in the transient and steady state driving conditions. The results have been described that MR dampers with skyhook control strategy can be more efficient than passive dampers. They stated that the usage of MR dampers can enhance driver comfort.

Since the damping force in semi-active suspensions is adjustable, a number of control methods have been employed for vehicle suspensions, i.e. on-off ground hook, continuous Ground hook, on-off skyhook, continuous Skyhook, hybrid Control, neural network and fuzzy logic damping control [14-18].

Besides the mentioned controllers, usage of some hybrid controllers such as fuzzy neural approach combined with H_∞ method and sliding mode control [19] and fuzzy neural network controller [20] were reported. Additionally, Do et al. developed a hybrid control scheme for a vehicle seat suspension equipped with MR dampers applying an adaptive fuzzy sliding mode controller [21]. The proposed control scheme was incorporated with a 4 DOF human body model. They expressed that the proposed seat suspension system can present very effective ride comfort performances by reducing vertical acceleration under regular bump, random signal, and sinusoidal excitations.

As stated before, it has been recognized that some hybrid control strategy included MR damper can improve control performance and robust stability in the occurrence of disturbances and uncertainties. Hence, since active force control (AFC) method property cause to increase the stability and robustness of the system, it is used in this work. In other words, it is the objective of current study to portray new robust control strategy of a semi-active suspension system equipped to a MR damper for attenuating the vibration of an off-road vehicle seat structure employing an AFC-based strategy with an iterative learning algorithm (ILA) to be known as AFCAIL. The proposed control scheme is incorporated with a 2 DOF human body model. In order to accomplish this purpose, a dynamical model of seat suspension has been established and combined with an MR seat damper. The performance of the proposed control scheme is evaluated by simulation effort. It is noted that in this study the ride comfort is assessed based on acceleration level (ISO 2631-1:2010, 2010) and driver seat pan displacement.

2. Methodology

At the first, dynamical model of an off-road vehicle seat suspension which is equipped to a MR damper has been developed. After that, a PID controller has been designed for semi-active seat suspension. Next, the PID controller has been integrated to AFC method. Lastly, utilizing of the ILA in mass estimation for the AFC approach and simulation results of that has been discussed.

2.1. Semi-Active Seat Suspension Dynamical Model

In most of off-road heavy-duty vehicles such as tractors, usually there is no primary suspension between tire and chassis and seat suspensions (active or passive) are used to isolate harmful vibration from driver body. The seat suspension equipped to the MR damper to produce variable damping ratios in the system is unveiled in Fig. 1. In this study, to simulate human body dynamic behavior, a two degree of freedom (2 DOF) model presented by Allen (1978) was coupled to 1 DOF seat suspension [13]. The model consists of four masses namely the tractor body mass, m_1 , the sprung mass, m_2 , main body mass, m_3 , and head mass, m_4 . The parallel spring and damper combination located between masses (k_1, c_1 ; k_2, c_2 ; k_3, c_3) represent the stiffness and damping of the vehicle suspension system and human body simulated by lumped model, respectively.

It is assumed that the system is only excited in the vertical direction due to the road roughness generates disturbance to the system which is revealed as vertical vibration in human body. The physical equations of the seat pan motion and human head displacement in vertical direction regards to Newton's second law will be as following:

$$F - c_1(\dot{Z}_2 - \dot{Z}_1) - k_1(Z_2 - Z_1) + k_2(Z_3 - Z_2) + c_2(\dot{Z}_3 - \dot{Z}_2) = m_2\ddot{Z}_2 \quad (1-a)$$

$$k_3(Z_4 - Z_3) + c_3(\dot{Z}_4 - \dot{Z}_3) - k_2(Z_3 - Z_2) - c_2(\dot{Z}_3 - \dot{Z}_2) = m_3\ddot{Z}_3 \quad (1-b)$$

$$-k_3(Z_4 - Z_3) - c_3(\dot{Z}_4 - \dot{Z}_3) = m_4\ddot{Z}_4 \quad (1-c)$$

where Z_1 is floor displacement which is coming from road roughness, Z_2 is the seat pan movement, Z_3 is main body displacement and Z_4 is driver head displacement. Spring and damper constants are called k_1 and c_2 , respectively. Also, the terms of $(Z_2 - Z_1)$ is the seat suspension deflection.

In addition, the force of the MR damper can be represented via Spencer model as bellow [14]:

$$F = c_1 \dot{y} + k_1(x - x_0) \tag{2-a}$$

$$\dot{z} = -\gamma / \dot{x} - \dot{y} / z / z / n^{-1} - \beta(\dot{x} - \dot{y}) / z / n + A(\dot{x} - \dot{y})$$

$$\dot{y} = \frac{1}{c_0 + c_1} [\alpha z + c_0 \dot{x} + k_0(x - y)] \tag{2-b}$$

where the parameter values of α and c_0 differ nonlinearly with electrical command voltages, they can be calculated by given equation [15]:

$$\alpha = 2.3363 v^2 - 3.4209 v + 5000 \tag{V}$$

$$c_0 = 0.1794 v^2 - 2.048 v + 2700 \tag{A}$$

The seat suspension and the human body lumped model parameters are listed in Table 1 and the MR damper constants are shown in Table 2.

Table 1. Mechanical properties of the lumped model

Example No.	m (kg)	K (N/m)	C (Ns/m)
1	3000	8000	130
2	20	63318	467
3	47.17	65100	479
4	6.4	-	-

Table 2. The MR damper parameters

$C_d = 50000 \text{ Ns/mm}$	$A = 5$	$\beta = 1.6 \text{ mm}^{-2}$
$k_d = k_0 = 1 \text{ Ns/mm}$	$\gamma = 1.6 \text{ mm}$	$n = 2$

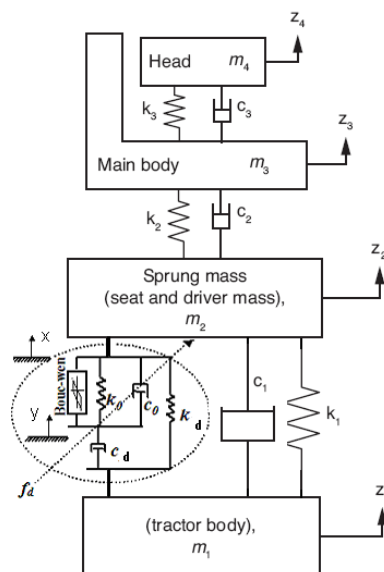


Figure 1. Semi-active seat suspension model via MR damper

2.2. Controller Design

For the former, a simulation study of a new proposed scheme used to control a seat suspension structure, namely, AFCAIL is demonstrated. The general proposed active force control (AFC-based system) basically comprises two feedback control loops, i.e., inner loop for the compensation of the disturbances employing the AFC method and an outer loop for the calculation of the desired force for the actuator. Then, an ILA is overtly applied to the AFC loop to calculate the estimated mass of the seat suspension and driver body.

2.2.1. PID Controller

The proportional-integral-derivative (PID) controller is uncomplicated and conventional to employ in control system. The recognized truth about PID controller is its efficiency which is usually acceptable for a system with minor disturbances and performing at low speed. Normally, at the first step, the PID control has been designed to utilize at the outer loop of a feedback control. Also, other control schemes can be added to the PID control such as AFC strategy to improve the performance of the seat suspension resulted ride comfort.

Consequently, the PID parameters were acquired by using the heuristic method to tune to deliver proper signal to the MR damper. The PID gains were $k_p = 6$, $k_d = 0.2$, and $k_i = 1$ by fine tuning.

2.2.2. Active Force Control Method

As mentioned PID controllers cannot face to high-speed disturbances, so the control loop equipped to the AFC technique provides more robustness and accuracy characteristics through its disturbance’s diminution capability [16]. Hewit and Burdess established a new two degree of freedom control scheme increasing robustness and stability of the system [17]. The actuated force (F'_a) and acceleration (a') are measured through AFC method. By multiplying estimated mass (M') to acceleration, the required force is reached. The differences of actuated force and required force provides compensate force (F') which is send to actuator to face to disturbances. Regards to above description, the estimated disturbance force, F' can be computed by as:

$$F' = F'_a - M'a' \tag{3}$$

The key point of the AFC technique is estimation of mass. Some intelligent methods were employed by researchers such as Fuzzy Logic Algorithm [18, 19], Artificial Neural Network [20, 21], and iterative Learning [22, 23]. Fig.2 represents a schematic of the Proportional-Integral-Derivative type (PID-type) of the ILA.

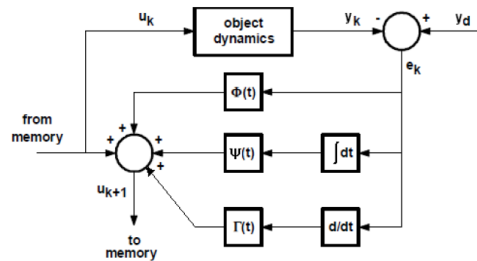


Fig. 2. Schematic diagram of the PID-type of the ILA

2.2.2.1. Implementation of Iterative Learning

As stated earlier, the vital point in AFC scheme is how to achieve the proper estimated mass. Previously, crude approximation and intelligent methods have been applied appropriately (Mailah, 1998). The intelligent techniques such as fuzzy logic, hybrid intelligent, iterative learning, and neural network have been employed for this purpose effectively. In this research, the implementation of ILA was studied for the calculation of the estimated mass parameter in the AFC loop to develop the performance of the seat suspension system equipped to MR damper through a simulation work

The basic concept of the ILA was commenced by Uchiyama (Moore, 1993) [24]. In that case, Arimoto et al. developed stability and robustness of the continuous-time systems by the ILA named betterment process [25].

The signal of the input u_k and the current output signal y_k are stored by memory in each iteration. The error of the system, $e_k = y_d - y_k$, is evaluated by the learning algorithm where y_d is the ideal output of the system. Then, algorithm calculates a new signal of input u_{k+1} regards to current error signal which is saved for next processing time step. The next input command is chosen whereas it causes to the performance error to be decreased on the next step. To reach better convergence and stability in output of algorithm, integrator and derivative elements were added to ILA named PID-ILA.

The learning control rule for PID type described in bellow equation:

$$u_{k+1}(t) = u_k(t) + K e_k(t)$$

where

u_{k+1} : The next step value of output

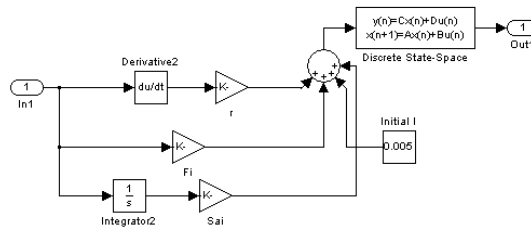
u_k : The current output value

e_k : The current positional error input, $e_k = y_d - y_k$

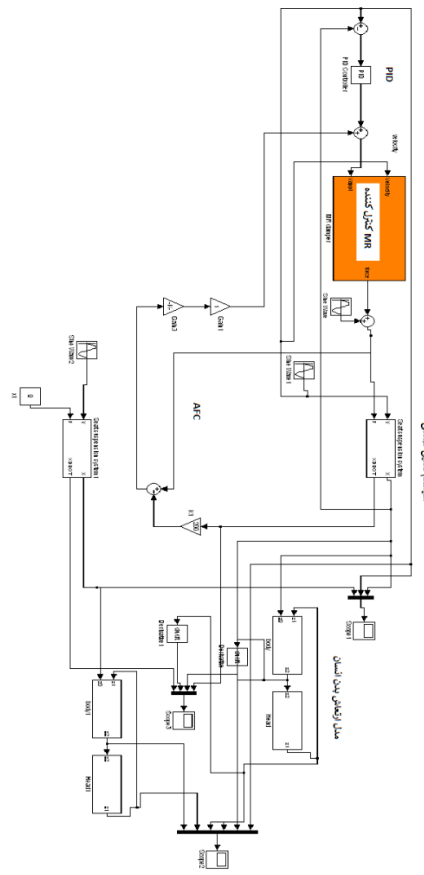
K : Design parameter representing the PID term, $K = \Phi + \psi \int dt + \Gamma d/dt$

where Φ is proportional learning coefficient, Γ and ψ are derivative and integral learning coefficients, respectively.

Fig. 3 shows the PID-type ILA was utilized and embedded into the AFC scheme and named AFCILA. The parameters of proposed ILA were obtained as $\Phi = \psi = \Gamma = 0.0001$ by heuristic method.



(a)



(b)

Fig. 3. (a) Applied PID-ILA in AFC, (b) simulated of the system

3. Results and Discussion

In this section, a comparison between passive suspension and all the control methods has been performed in time and frequency domains. Fig. 5 exemplifies the seat vertical displacement when input signal is sinusoidal and exposed to the mentioned disturbance. The amplitude base displacement is 0.1m and frequency is 1 Hz based on ISO 5007. As can be seen, the AFC scheme decreases the amplitude of displacement compared to base displacement as 50% while PID and passive suspension were not success to do this diminishment. Moreover, vertical acceleration of the driver head via AFC method is shown in time and frequency domains in Fig. 6 and Fig. 7, respectively. In time domain, the passive suspension depicts large variations and amplitude though the AFC scheme shows better reduction. Besides, in frequency domain, the first, second and third peaks of the acceleration amplitude reached by the AFC are very less than the response of PID controller and passive suspension.

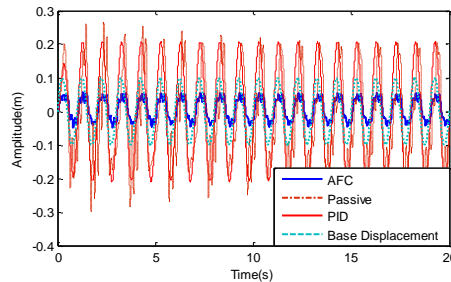


Fig. 5 The time response of all the control schemes to the Sinusoidal input with presence Sinusoidal disturbance

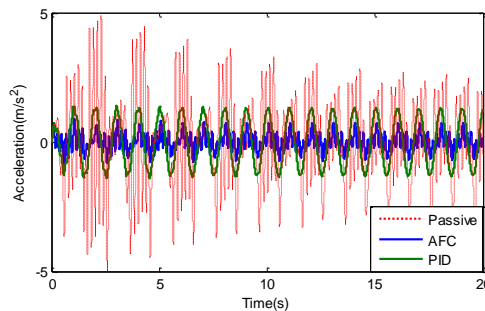


Fig.6 The driver head acceleration in time domain responded to Sinusoidal vibration

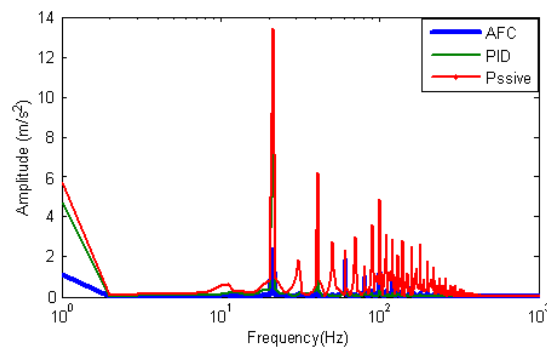


Fig.7 The driver head acceleration in frequency domain responded to Sinusoidal vibration

Furthermore, responses of the systems when exposed to swath vibration were obtain and shown in Fig. 8. Same as sine vibration, the displacement by the AFC method is smaller than the PID control and the passive suspension. Additionally, the head accelerations are demonstrated in time domain (Fig. 9) and frequency domain (Fig. 10), respectively. In both domains, the AFC illustrates better enhancement in the acceleration decrement.

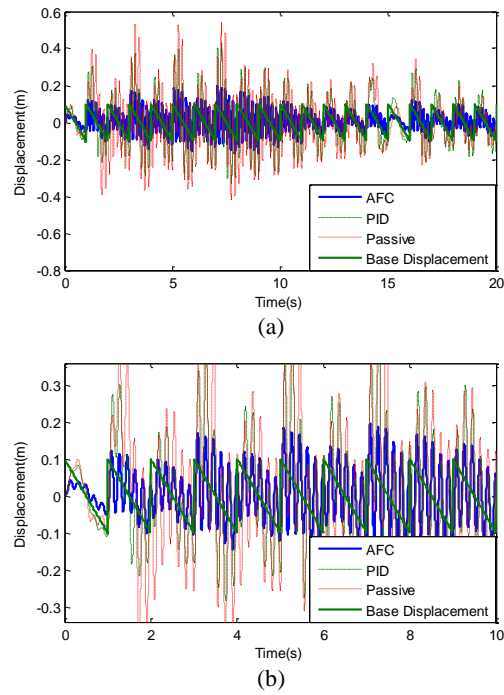


Fig.8 (a) Comparison between seat pan displacement obtained by the AFC technique, PID, and the passive suspension responded to Swath shape vibration, (b) closed up view of responses

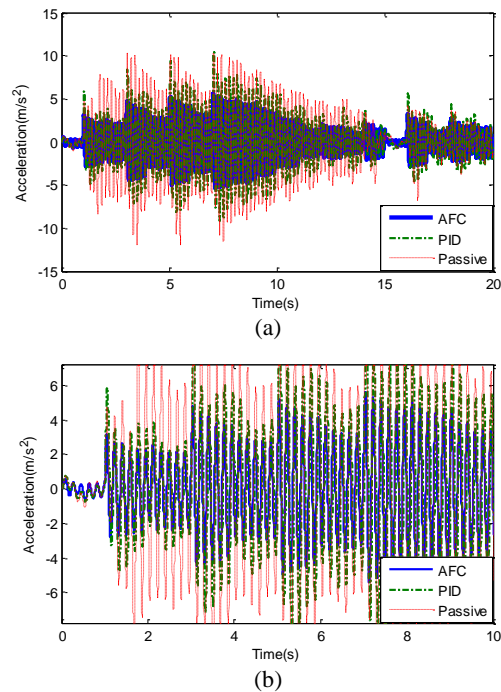


Fig.9 (a) The driver head acceleration reached by the AFC scheme, PID controller, and the passive suspension responded to Swath shape vibration in time domain, (b) closed up view of response

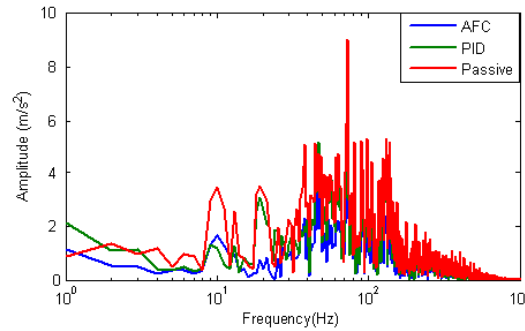


Fig.10 Comparison between reached head accelerations in frequency domain

In addition, the seat pan displacements were attained by both control schemes and the passive suspension when base vibration has the square shape (Fig. 11). The amplitude of the displacement obtained by AFC strategy is relatively smaller than the passive and PID. Also, reduction of the head acceleration by the AFC method demonstrates notable improvement in both time and frequency domains (Fig. 12 and Fig. 13).

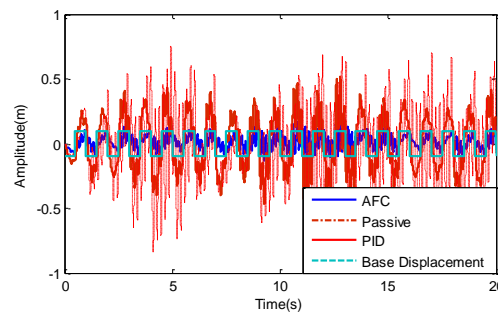


Fig.11 The seat pan displacement when exposed to the square vibration

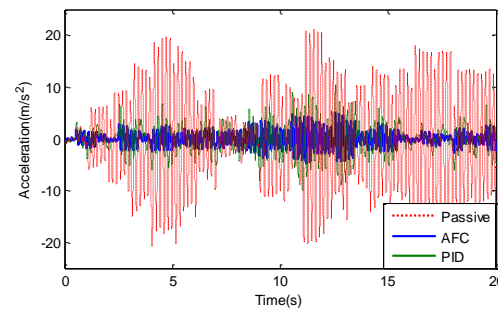


Fig.12 The head accelerations when input signal has the square shape in time domain

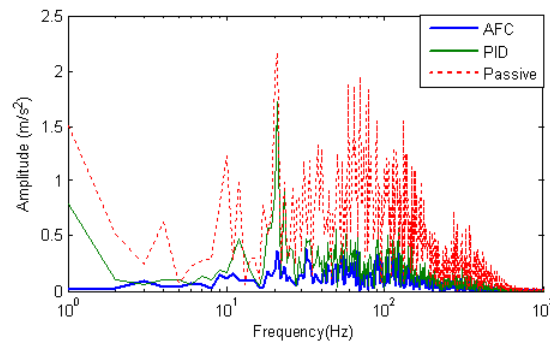


Fig.13 The head accelerations when input signal has square shape in frequency domain

Finally, the random white noise was used as a base vibration, and the seat pan displacement was archived and compared together for both control schemes and the passive suspension (Fig. 14). It is obvious that the seat suspension implemented to the AFC scheme is capable to attenuate the amplitude of displacement while the PID controller and the passive suspension are not able to cancel the random vibration successfully.

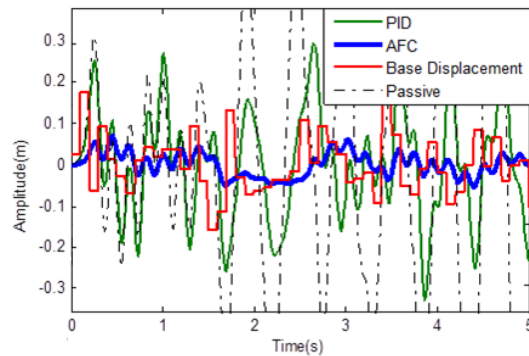


Fig.14 (a) the seat pan displacement responded to random white noise, (b) closed up view of the seat pan displacement

As can be observed in Fig. 15 and Fig. 16, the head acceleration via the AFC shows lower amplitude compared to PID and passive suspension in both time and frequency domains. In frequency domain, the first peak of the acceleration reduced notably while the second and third peaks differences to other techniques were not too much high.

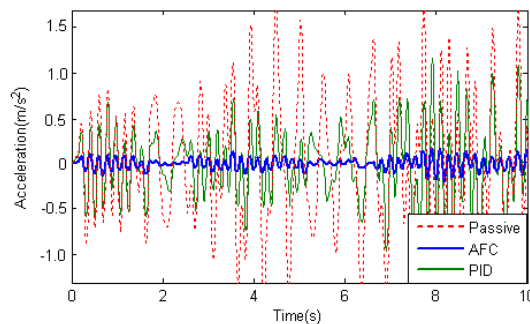


Fig.15 The head accelerations responded to random white noise vibration in time domain

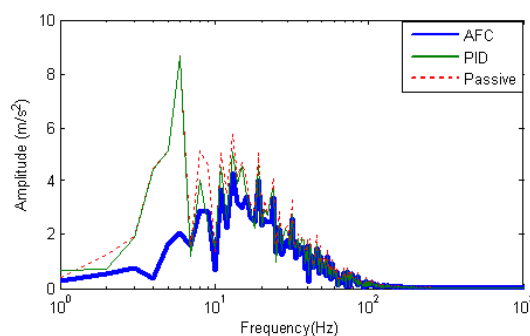


Fig.16 The head accelerations responded to random white noise vibration in frequency domain

4. Conclusions

A novel controller called the active force control has been employed for vibration control of seat suspension equipped by magnetorheological (MR) damper. The AFC method was integrated to iterative learning algorithm to calculate the estimated mass of the system named AFC-IL. The designed controllers were simulated for the vibration canceling of an off-road vehicle seat suspension system. The AFC technique achieved to be uncomplicated in terms of calculation and change it suitable for real time working conditions. Moreover, the AFC demonstrates high performance and produce robust and accurate response in the presence of various disturbances. The simulation results express that for known parameters and situations, the proposed AFC-IL method efficiency enhanced in comparison to the popular PID controller. The results

exemplify that the AFC-based scheme as an intelligent control technique has proper potential to eliminate the disturbances superiorly for the off-road vehicle seat suspension. Although complementary efforts should be accomplished to investigate the influences of other type of disturbances, parameters and uncertainties changes in real situations such as road trails. In continue a test rig will be developed to evaluate the AFC scheme performance in real conditions in terms of the vibration attenuating and optimized parameters.



طراحی کنترل گر فعال نیرو سیستم تعلیق صندلی راننده مجهز شده به میراگر هوشمند مگنتورئولوژیک

منا طهماسبی^{الف*}، محمد گهری^ب، محمد مبارک‌آبادی^پ

^{الف} استادیار پژوهشی، بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان مرکزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اراک، ایران، tahmasebi.mona@gmail.com
^ب استادیار، گروه طراحی جامدات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران
^پ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه طراحی جامدات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

چکیده	واژگان کلیدی
ارتعاشات انتقال یافته به بدن راننده در خودروهای غیر جاده‌ای سنگین که سیستم تعلیق اولیه ندارند باعث ایجاد مشکلات سلامتی در بلندمدت می‌گردد. معمولاً در این گونه از وسایل نقلیه سیستم تعلیق ثانویه در صندلی راننده تعبیه می‌شود تا بتواند جداسازی ارتعاشی و جذب آن را انجام دهد و باعث جلوگیری از مشکلات سلامتی بخصوص در ستون فقرات شود. سیستم تعلیق غیرفعال صندلی به‌طور گسترده برای این منظور استفاده می‌شود، اما کارایی آن‌ها پایین است. سیستم تعلیق صندلی فعال و سیستم تعلیق نیمه‌فعال عملکرد بهتری در جلوگیری از نوسانات ناخواسته دارند. یکی از میراگرهایی که اخیراً مورد توجه محققان قرار گرفته است میراگر نیمه‌فعال مجهز به سیال هوشمند مگنتورئولوژیک است که با ایجاد میدان مغناطیس گرانروی سیال تغییر می‌کند. بدین ترتیب سیستم تعلیق با استفاده کمی از جریان الکتریسیته می‌تواند با تغییر ضریب میرایی به‌صورت مؤثری انرژی ارتعاشی را مستهلک کند. در مقاله حاضر یک کنترل گر جدید هوشمند فعال نیرو مجهز به تخمین گر یادگیری تدریجی طراحی و شبیه‌سازی شده است. سیستم تعلیق به مدل ارتعاش بدن انسان کوپل شد و نتایج ارتعاش بدن راننده به دست آمد. نکته قابل توجه این است که کنترل فعال نیرو می‌تواند برای حذف اغتشاشات سرعت بالا نیز بکار رود. از آنجایی که ارتعاشات رخ داده در خودرو دارای سرعت تغییرات بالا هستند نتایج نشان داد که کنترل فعال نیرو مجهز به سامانه تخمین گر یادگیری تدریجی می‌تواند به‌طور مؤثری در کاهش ارتعاش انتقالی به راننده عمل کند به‌طوری که پیک‌های اول و دوم ارتعاش در حدود ۶۰ درصد کاهش داشتند.	کنترل گر فعال نیرو، میراگر مگنتورئولوژیک، سیال هوشمند، الگوریتم یادگیری تدریجی، خودروی سنگین غیرجاده‌ای.
	تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۲۱
	تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۸/۳۰
	تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۱۵

۱- مقدمه

رانندگی و مسافرت‌های بلندمدت در بدن انسان باعث ایجاد مشکلاتی می‌گردد که ناشی از انتقال ارتعاشات و شوک می‌باشد. در رانندگان خودروهای سنگین و غیرجاده‌ای این مشکلات مانند پیرچشمی، دیسک کمر، سوءهاضمه و بی‌نظمی ضربان قلب بیشتر رخ می‌دهد [۱-۳]. کارایی سیستم تعلیق در این خودروها به خاطر مصالحه بین کیفیت رانندگی و قدرت مانورپذیری محدود شده است [۴]. در حال حاضر سیستم‌های تعلیق ثانویه به‌عنوان ایزوله‌سازی ارتعاش در خودروهای سنگین استفاده می‌شوند تا با کمک میراگرها بتوانند ارتعاشات وارده بر راننده را مستهلک و جذب نمایند [۵]. کارایی این سیستم‌های تعلیق غیرفعال به نسبت کم بوده و نمی‌تواند محدوده وسیع فرکانس رزونانس اعضا بدن انسان را پوشش دهد. در حقیقت محققان قبلی این‌گونه توصیف کرده‌اند که در سیستم تعلیق غیرفعال مصالحه‌ای بین کنترل دینامیکی پیک‌های رزونانس و ایزوله کردن فرکانس‌های بالاتر ارتعاشی است. از طرف دیگر مقادیر بیشتر نسبت دمپینگ باعث کاهش پیک رزونانس می‌شود

اما انتقال‌پذیری ارتعاش را در فرکانس‌های بالاتر افزایش می‌دهد [۶-۸]. از این‌رو سیستم‌های تعلیق فعال صندلی راننده همانند دیگر سیستم‌های ارتعاشی برای رفع این نقیصه معرفی شدند که می‌توانند با منبع توان خارجی بر ارتعاشات مضر غلبه کنند. همچنین در سازه‌های تیر شکل نیز از سیستم کنترل ارتعاش با منبع خارجی استفاده شده است به طوری که با یک مدل اختلاف محدود جهت پیش‌بینی ارتعاش و کمک گرفتن از خروجی مدل، یک سیستم مناسب با استفاده از عملگر خارجی بر روی تیر مورد آزمایش استفاده شده و با تکنیک خودتنظیم در کنترل‌گر پاسخ ارتعاشی کمینه گردیده است [۹].

از طرفی دیگر سیستم‌های تعلیق صندلی نیمه‌فعال هم مانند مدل‌هایی که مجهز به سیال هوشمند مگنتورئولوژیک یا سیال الکتروئولوژیک هستند برای این منظور پایه‌گذاری شدند [۱۰-۱۳]. با کمک این میراگرهای نیمه‌فعال، دامنه نیروی میراگرکننده بر اساس دینامیک تعلیق در لحظه تنظیم می‌گردد. به‌طور مثال در سیستم تعلیق صندلی با میراگر مگنتورئولوژیک، از مدل ارتعاش آسمان قلاب استفاده شد و با استفاده از مدل بینگهام برای سیال، انتقال‌پذیری ارتعاش در دو حوزه زمان و فرکانس به راننده بررسی شد. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از تریبولوژی مدارهای سخت‌افزاری، کاهش ارتعاش انتقالی در مدل تمام‌مقیاس خودرو را تأیید کردند [۱۰]. در میراگرهای هوشمند مگنتورئولوژیک (میراگر MR) سیال دارای ذرات فرومغناطیس است که هنگام اعمال میدان مغناطیس خارجی گرانیوز آن تغییر می‌کند و به‌تبع ضریب میرایی یا استهلاک انرژی آن تغییر می‌کند. بدین شکل نیروی انتقال‌یافته در سیستم تعلیق صندلی راننده استفاده می‌شود بدون آن‌که مشکل تشدید ایجاد کند. خواصی مانند مصرف توان کم، تعداد اجزاء کمتر و سادگی ساختار در این دسته از میراگرها باعث شده است که تمایل در به‌کارگیری آن‌ها افزایش یابد. در حقیقت با ترکیب ساده اجزاء مکانیکی و برقی یک سیستم کنترل‌پذیر کارا ایجاد می‌گردد که در سیستم تعلیق صندلی راننده کامیون‌های سنگین آزموده شده است [۴]. همچنین از نظر ساختاری نیز تلاش‌هایی در زمینه بهینه‌سازی میراگر انجام پذیرفته است. به‌طور مثال، بهینه‌سازی میراگر MR با استفاده از نسبت پارامتری چگالی شار مغناطیسی عبوری سیال به چگالی شار مغناطیسی فلز استیل بدنه انجام پذیرفته است. این بهینه‌سازی مبنای تغییرات بعدی در کارکرد میراگر شده است [۱۱ و ۱۲].

انواع مختلف طرح‌های کنترل‌گر برای این سیستم‌های تعلیق مجهز به میراگر MR بکار گرفته شده‌اند مانند زمین قلاب قطع و وصلی، زمین قلاب پیوسته، آسمان قلاب پیوسته، هیبریدی، شبکه عصبی مصنوعی و منطق فازی [۱۴-۱۸]. کنترل مقاوم بر پایه لیاپانوف برای سیستم تعلیق صندلی با میراگر MR بکار رفت تا اغتشاشات داخلی و خارجی را کنترل کند. نتایج شبیه‌سازی این سیستم وقفه‌ای در مواجهه ارتعاش را آشکار کردند هرچند که کنترل ارتعاش، مناسب تشخیص داده شد [۱۳]. در خودروهای تجاری سنگین مانند کامیون نیز شبیه‌سازی تمام‌مقیاس ارتعاش خودرو با استفاده از مدل آسمان قلاب و انتقال ارتعاش به راننده بررسی شده است. نتایج این مطالعه مؤید کاهش ارتعاش انتقالی به بدن راننده خودرو بود [۱۴]. استفاده از شبکه عصبی در محاسبه توان مورد نیاز الکتریکی میراگر MR و رهگیری نیروی جبران‌سازی ارتعاش در میراگر MR نتایج چشمگیری در کاهش ارتعاش نشان دادند [۱۵]. ترکیب شبکه عصبی با منطق فازی و ایجاد مد لغزشی در کنترل سیستم تعلیق مجهز به MR، کمک شایانی در محاسبه عدم قطعیت‌های غیرخطی داشته است و اثر استفاده از آن در محاسبه نیروی جبران‌سازی و کاهش ارتعاش وارده بر بدن راننده به‌خوبی نمایان بود [۱۶]. همچنین، یکی از راه‌های بهبود عملکرد، پایش ولتاژ مصرفی در میراگر است که یک مدل غیرخطی ارائه می‌کند. با استفاده از این مدل و طراحی کنترل‌گر فازی برای آن، کاهش ارتعاش انتقالی انجام پذیرفت [۱۷]. در تحقیقی دیگر، سیستم کنترل تطبیقی فازی برای تعلیق خودرو مجهز به میراگر MR طراحی شده است که کاهش زمان پاسخ به محرک ورودی و افزایش دقت محاسبه نیروی میرایی را به همراه داشته است. در این تحقیق از هر دو روش شبیه‌سازی و تجربی برای مطالعه کارایی سیستم استفاده شده بود [۱۸].

علاوه بر کنترل‌گرهای ذکرشده، استفاده از سیستم‌های هیبریدی مانند نروفازی که با H^∞ ترکیب شده‌اند و یا با مد لغزشی آمیخته شده‌اند، گزارش شده‌اند [۱۹ و ۲۰]. در تحقیقی سه نوع کنترل فازی، مد لغزشی و یادگیری تدریجی برای ارزیابی سیستم تعلیق مجهز به میراگر MR بکار رفت. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که در این کاربرد، در دو حوزه زمان و فرکانس کنترل‌گر سوم عملکرد مناسب‌تری در سرکوب ارتعاش داشته است [۱۹]. در مطالعه دیگر، تأثیر ترکیب کنترل‌گر فازی-عصبی با مد لغزشی بررسی گردید. در این تحقیق، پایداری سیستم با این تدبیر افزایش ملموسی داشت که منشأ تحقیقات بعدی در

این زمینه است [۲۰].

همچنین در سیستم تعلیق صندلی خودرو غیرجاده‌ای از یک سیستم هیبریدی تطبیقی فازی با مد لغزشی برای کنترل میراگر MR استفاده شده است [۲۱]. این سیستم پیشنهاد شده از مدل دینامیکی ارتعاش بدن انسان ۴ درجه آزادی استفاده نموده است. ایشان کارایی این کنترل گر را برای سیستم تعلیق صندلی را با استفاده از شبیه‌سازی ارتعاشات عمودی ناشی از سرعت گیر، سیگنال تصادفی و تحریک سینوسی بررسی و درصد بهبود را گزارش نمودند.

همان‌طور که گفته شد استراتژی‌های کنترلی ترکیبی برای میراگرهای MR می‌تواند کارایی سیستم را افزایش دهد و پایداری را در زمان وجود اغتشاش و عدم قطعیت‌ها بهبود دهد. یکی از روش‌های کنترل تطبیقی، سیستم کنترل فعال نیرو (AFC) است که پایداری و مقاوم بودن در برابر اغتشاش را افزایش می‌دهد و می‌تواند در سرعت‌های بالای اغتشاش مانند ارتعاشات جاده‌ای خوب عمل کند. در این تحقیق نیز موضوع اصلی و نوآوری ایجاد شده، ارائه روش جدید کنترل AFC برای سیستم تعلیق نیمه‌فعال صندلی خودروی سنگین غیرجاده‌ای است که به میراگر MR مجهز شده است تا ارتعاشات مضر را مستهلک کند؛ بنابراین، در این طرح از کنترل گر AFC مجهز به روش یادگیری تدریجی ۲ و مدل دو درجه آزادی بدن انسان بهره برده شده است. برای رسیدن به این هدف، ابتدا یک مدل دینامیکی سیستم تعلیق صندلی خودرو مجهز به میراگر MR به همراه مدل ارتعاشی لمپ بدن انسان شبیه‌سازی می‌گردد. سپس، این کنترل گر جدید AFC با کمک شبیه‌سازی ارزیابی می‌گردد تا نتایج با استفاده از استانداردهای ارتعاش مانند ISO 2631-1 تحلیل گردد و در مرحله بعد ساخت و ارزیابی تجربی گردد.

۲- مواد و روش‌ها

ابتدا مدل دینامیکی سیستم تعلیق صندلی راننده خودروی غیرجاده‌ای که مجهز به میراگر MR شده است ارائه می‌گردد. سپس کنترل گر PID برای این سیستم تعلیق طراحی می‌گردد و کنترل گر AFC به آن افزوده می‌گردد تا با کمک الگوریتم IL تخمین جرم در AFC، کارایی آن آزموده شود.

۲-۱- مدل دینامیکی نیمه‌فعال سیستم تعلیق صندلی مجهز به میراگر MR

اغلب خودروهای سنگین غیرجاده‌ای مانند تراکتور، لودر و بولدوزر سیستم تعلیق اولیه نداشته و فقط چرخ عمل جذب ارتعاش اولیه را انجام می‌دهد اما سیستم تعلیق صندلی راننده به‌صورت فعال یا غیرفعال کار ایزوله ارتعاشی را انجام می‌دهد تا ارتعاش مضر انتقالی به راننده مستهلک شوند. در این تحقیق، سیستم تعلیق صندلی راننده به میراگر MR تجهیز شد تا ضریب استهلاک^۳ متغیری در آن بتوان ایجاد کرد. این مدل در شکل ۱ نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود از مدل دو درجه آزادی بدن انسان برای شبیه‌سازی پاسخ دینامیک بدن انسان در برابر ارتعاش عمودی انتقالی استفاده شده است [۲۲]. این مدل دینامیکی شامل چهار جرم می‌شود که به قرار زیر هستند:

m_1 : جرم خودرو غیرجاده‌ای

m_2 : جرم تعلیق شده

m_3 : جرم بدن راننده

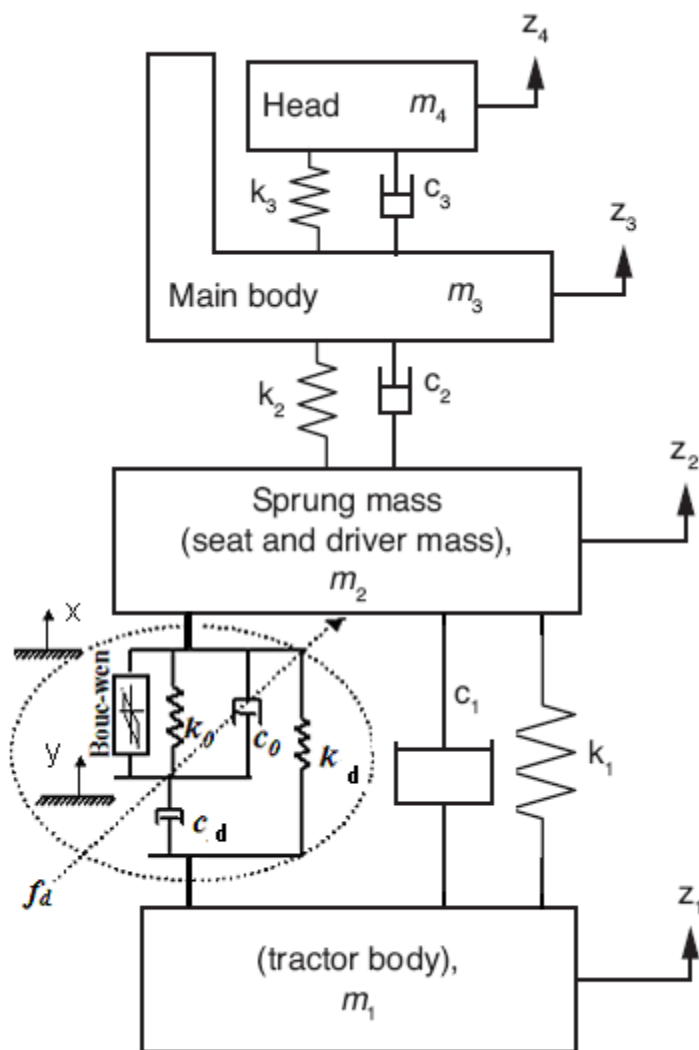
m_4 : جرم سر راننده

فنر و میراگرهای موازی $(k_1, c_1 ; k_2, c_2 ; k_3, c_3)$ به ترتیب سختی و ضریب استهلاک سیستم تعلیق صندلی خودرو و مدل لمپ بدن انسان را نشان می‌دهند. ضمناً در این مدل فرض بر این است که فقط سیگنال تحریک ارتعاش عمودی به بدن راننده

¹ Active Force Control

² Iterative Learning Algorithm

³ Damping Ratio



شکل ۱ سیستم تعلیق صندلی راننده خودرو مجهز به میراگر MR

۲-۳- روش کنترل AFC

همان‌طور که گفته شد برای غلبه بر اغتشاشات سرعت بالا و عدم قطعیت‌های درون سیستمی می‌توان از AFC استفاده کرد تا هم دقت سیستم افزایش یابد و هم پایداری و مقاومت آن به تغییرات وسیع بهبود یابد [۲۵]. با توجه به شکل ۲، در حقیقت AFC یک سیستم کنترل دو درجه آزادی است که نیروی اعمالی F_a^v و شتاب (a') اندازه‌گیری می‌شود تا با ضرب شتاب در جرم تخمینی (M') نیروی مورد نیاز^۸ به دست آید [۲۶]. اختلاف بین نیروی عملگر و نیروی مورد نیاز نیروی جبران‌ساز^۹ اغتشاش (F') را به دست می‌دهد تا با ارسال آن به عملگر بر اغتشاش موجود غلبه کند. بر اساس این توضیحات می‌توان گفت نیروی تخمینی F' از رابطه زیر در دسترس قرار می‌گیرد:

$$F' = F_a^v - M' a' \quad (۹)$$

نکته کلیدی استراتژی کنترلی AFC تخمین جرم می‌باشد که معمولاً از روش‌های هوشمند مانند منطق فازی [۲۷ و ۲۸] شبکه عصبی مصنوعی [۲۹ و ۳۰] و یادگیری تدریجی [۳۱ و ۳۲] استفاده می‌شود.

^۷ Actuated Force

^۸ Required Force

^۹ Compensate Force

پارامتر K طراحی PID از رابطه ذیل محاسبه می‌شود:

$$K = \Phi + \psi \int dt + \Gamma d/dt \quad (11)$$

که Φ ضریب یادگیری خطی و Γ و ψ به ترتیب ضرایب مشتق‌گیر و انتگرال‌گیر هستند. در سیستم کنترل AFC مجهز شده به IL، مقادیر فوق از طریق روش تخمینی و بررسی خروجی تا رسیدن به مقدار مطلوب این‌گونه به دست آمد:

$$\Phi = \psi = \Gamma = 0.0001 \quad (12)$$

۲-۵- شبیه‌سازی

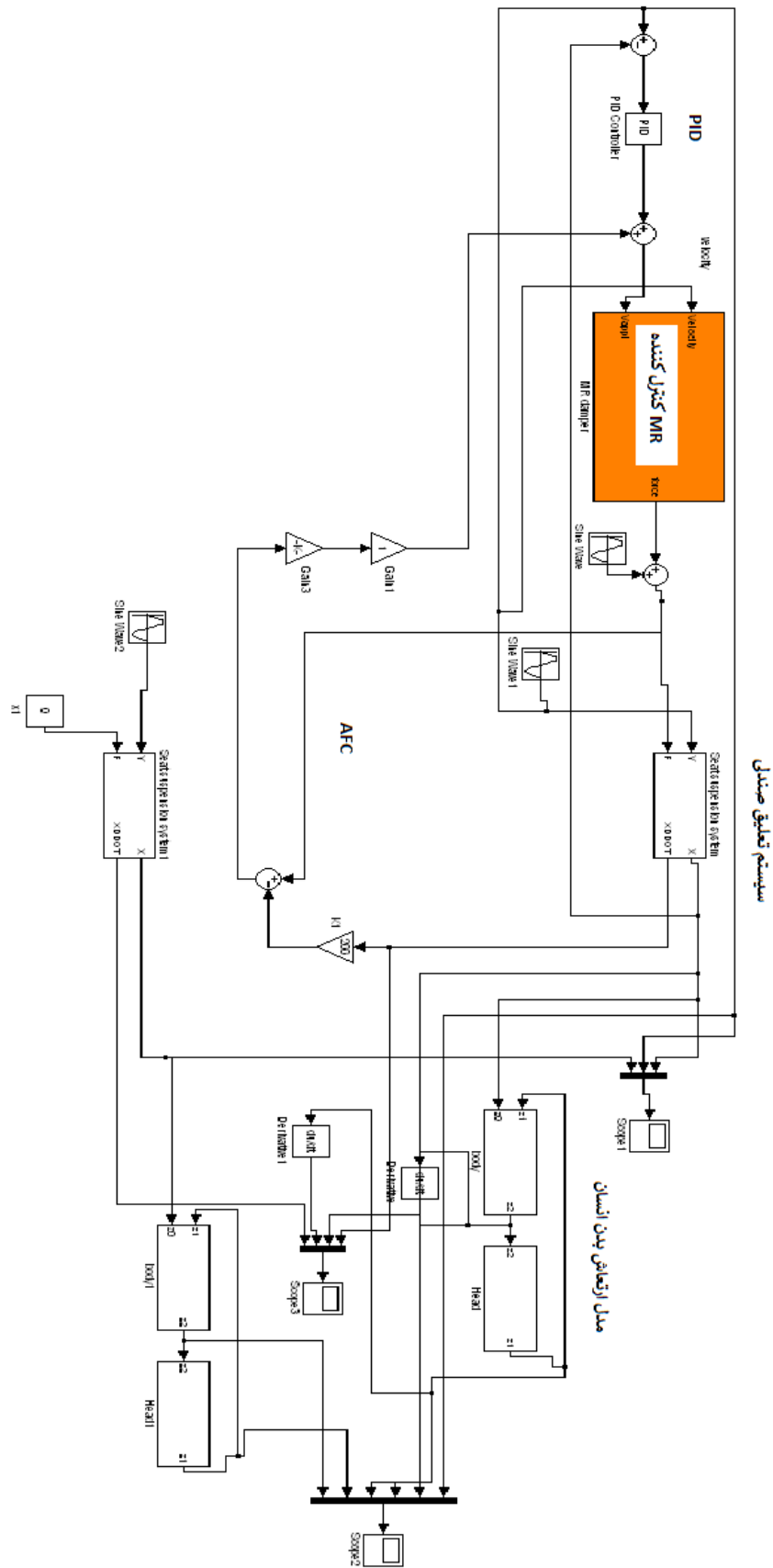
با استفاده از نرم‌افزار متلب سیمولینک سیستم تعلیق صندلی نیمه‌فعال مجهز به میراگر MR شبیه‌سازی شد که مقادیر بهینه سیستم تعلیق غیرفعال از مرجع [۳۵] انتخاب شده‌اند و برای ارزیابی عملکرد کنترل‌گرها تحت اغتشاشات ورودی شبیه‌ساز کننده ناهمواری جاده‌ای قرار گرفت [۳۳ و ۳۴]. شکل ۴ شبیه‌سازی در محیط سیمولینک متلب را نشان می‌دهد. در این شبیه‌سازی سیستم تعلیق غیرفعال صندلی که یک درجه آزادی است با میراگر MR ترکیب شده است و ارتعاش خروجی آن به مدل دو درجه آزادی لمپ که شبیه‌سازی کننده ارتعاش بدن انسان است وارد می‌گردد. بدین ترتیب شتاب و جابجایی سر راننده با این مدل قابل بررسی است. همچنین شکل ۵ دیاگرام IL بکار رفته را نمایش می‌دهد. این دیاگرام اجزای مشتق و انتگرال‌گیر به همراه المان تناسبی را نشان می‌دهند که در سیگنال خطا ضرب می‌گردند و همگرایی در پیش‌بینی ضریب را ایجاد می‌کنند.

۳- نتایج و بحث

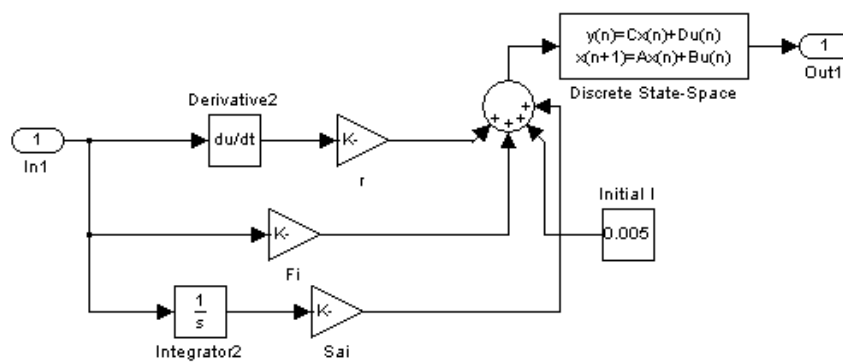
در این بخش نتایج خروجی ارتعاشات سیستم تعلیق صندلی خودرو غیرجاده‌ای با تمامی سیستم کنترل‌های نیمه‌فعال طرح‌شده در دو حوزه زمان و فرکانس مقایسه گردید. جابجایی عمودی صندلی هنگامی که ارتعاش سینوسی از کف خودرو وارد می‌گردد در شکل ۶ به تصویر کشیده شده است. براساس استاندارد ISO 5007 دامنه جابجایی عمودی ۰/۱ متر و فرکانس ۱ هرتز در نظر گرفته شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد AFC مجهز به میراگر MR جابجایی عمودی کفه صندلی را تا ۵۰ درصد جابجایی پایه صندلی کاهش داده است اما کنترل‌گر PID به این اندازه موفق نبوده است. علاوه بر این شتاب عمودی سر راننده در دو حوزه زمان و فرکانس در شکل‌های ۷ و ۸ نمایش داده شده است. در دامنه زمان سیستم تعلیق غیرفعال نوسانات زیاد با دامنه بزرگ نشان می‌دهد درحالی که AFC کاهش بسیار بهتری را نمایان کرده است. علاوه بر این، در حوزه فرکانس پیک اول، دوم و سوم در سیستم AFC بسیار کوچک‌تر از سیستم تعلیق غیرفعال و کنترل‌گر PID بودند.

در شکل ۹، پاسخ سیستم‌های ذکر شده به ارتعاش ورودی دندان اره‌ای آورده شده است. همانند موج ورودی سینوسی، پاسخ جابجایی عمودی کفه صندلی با کنترل‌گر AFC کوچک‌تر از PID و سیستم تعلیق غیرفعال است. همچنین ارتعاشات سر راننده در دامنه زمان (شکل ۱۰) و دامنه فرکانس (شکل ۱۱) کاهش بسیار بزرگ‌تری نسبت به هر دو سیستم تعلیق غیرفعال و کنترل‌گر PID نشان می‌دهد. جابجایی کفه صندلی در پاسخ به موج مربعی (شکل ۱۲) نیز مانند دو مورد قبلی با استراتژی کنترل‌گر AFC کاهش مشهودی داشت. همچنین ارتعاش سر راننده نیز در هر دو حوزه زمان (شکل ۱۳) و حوزه فرکانس (شکل ۱۴) با این تکنیک کاهش محسوس دارد.

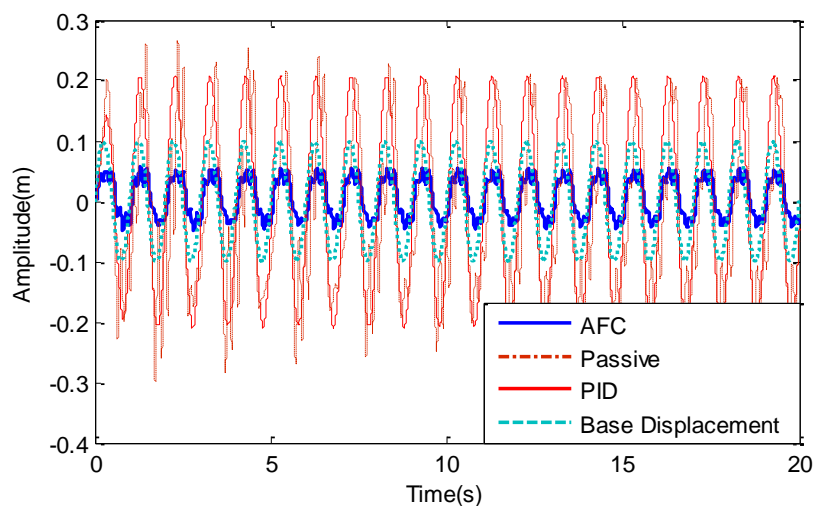
همچنین موج تصادفی نویز سفید به سیستم اعمال شد تا پاسخ ارتعاشی کفه صندلی و نوسانات سر راننده ملاحظه شود و مورد مقایسه قرار گیرد. همان‌طور که در شکل ۱۵ ملاحظه می‌شود، سیستم تعلیق غیرفعال و فعال با کنترل‌کننده PID نمی‌توانند نوسانات کفه صندلی را به خوبی AFC میرا کنند. در زمینه ارتعاشات سر نیز، شتاب سر راننده با AFC در مقایسه با دو مورد مذکور کاهش قابل توجهی دارد بخصوص در پیک‌های سه‌گانه اول (شکل‌های ۱۶ و ۱۷). همان‌طور که از شکل پیداست پیک اول و دوم با روش AFC به ترتیب ۷۵٪ و ۶۵٪ نسبت به روش‌های دیگر کاهش داشته است.



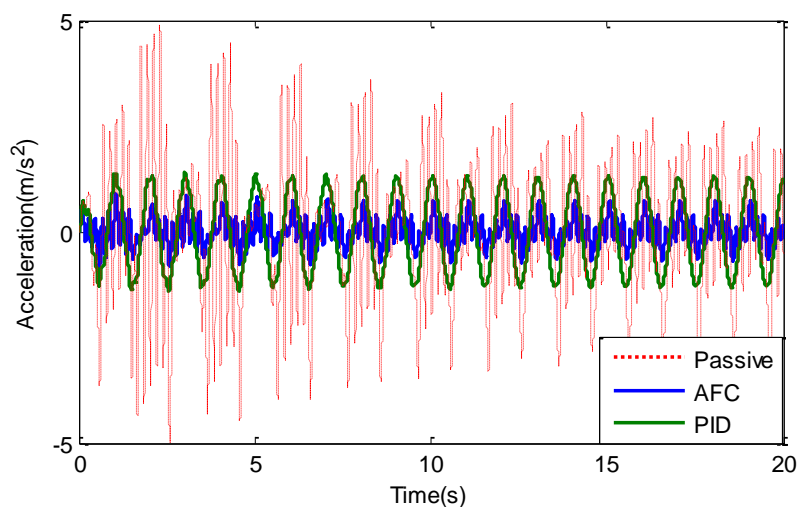
شکل ۴ شبیه‌سازی سیستم کنترل AFC بکار رفته در تعلیق صندلی راننده مجهز به میراگر MR در محیط متلب سیمولینک



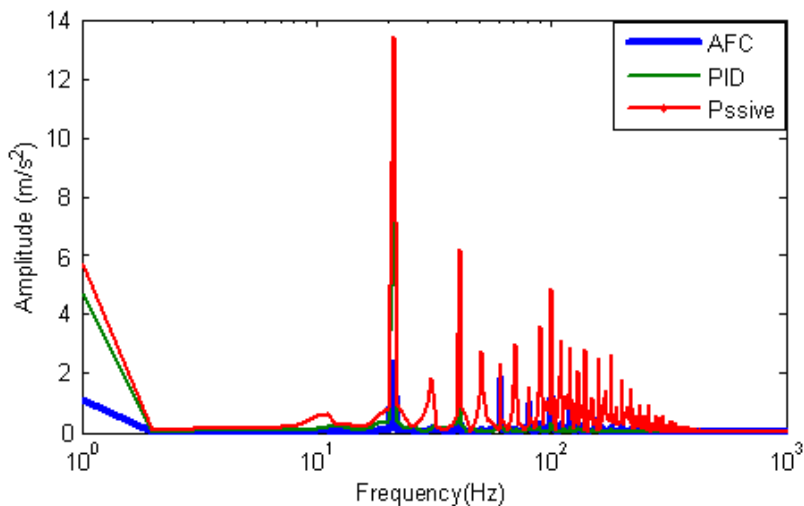
شکل ۵ الگوریتم یادگیری تدریجی بکار رفته در AFC



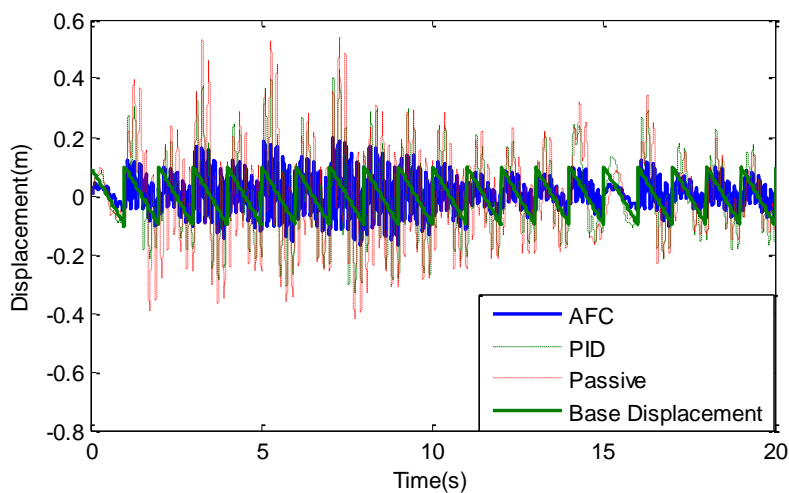
شکل ۶ جابجایی کفه صندلی در پاسخ سیستم به ارتعاش سینوسی وارده در سیستم‌های کنترل مختلف



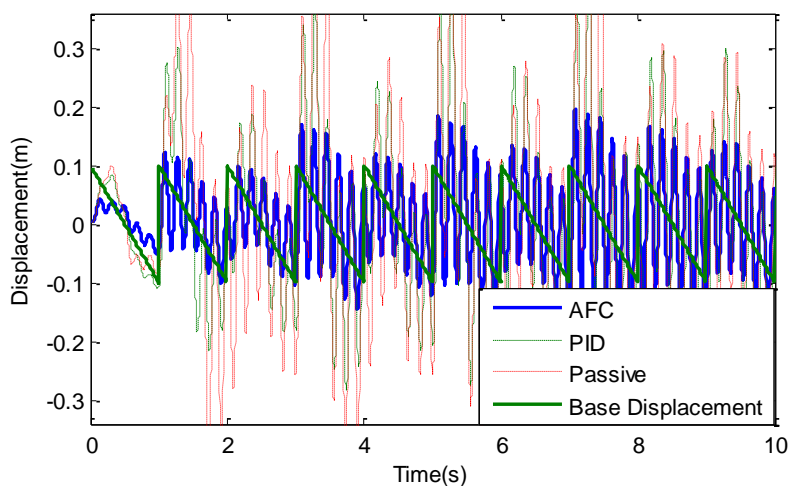
شکل ۷ شتاب سر راننده در پاسخ سیستم به ارتعاش سینوسی وارده در حوزه زمان



شکل ۸ شتاب سر راننده در پاسخ سیستم به ارتعاش سینوسی وارده در حوزه فرکانس

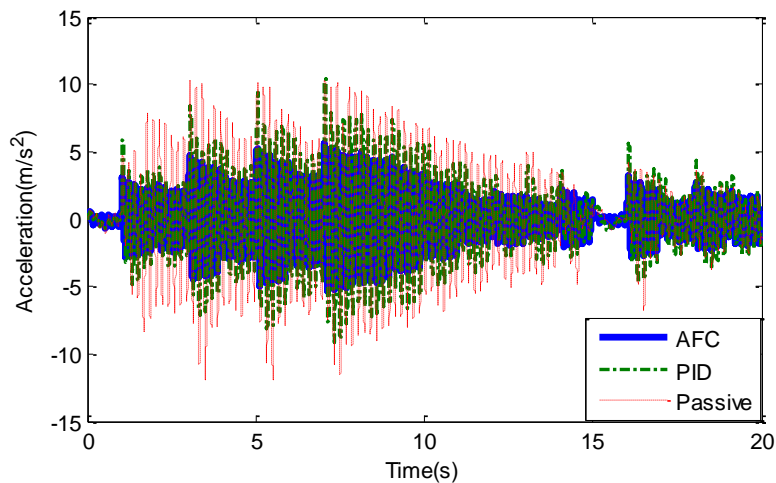


(الف)

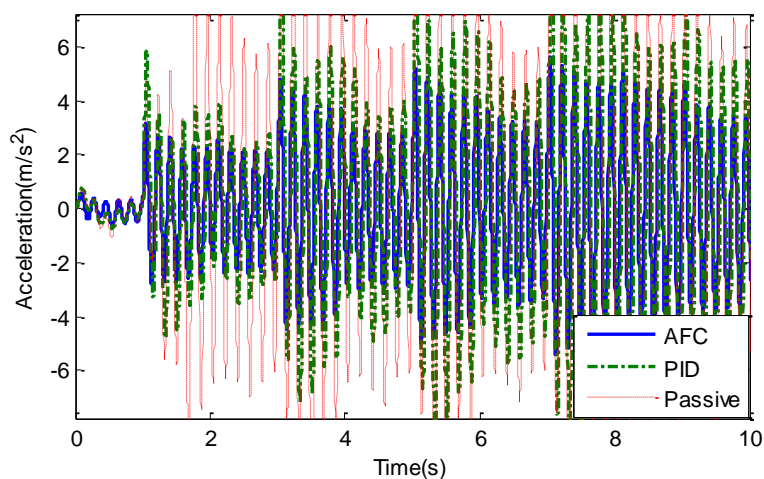


(ب)

شکل ۹ (الف) جابجایی کفه صندلی در پاسخ به نمودار دندان اره‌ای در حوزه زمان، (ب) پاسخ بزرگ‌نمایی شده

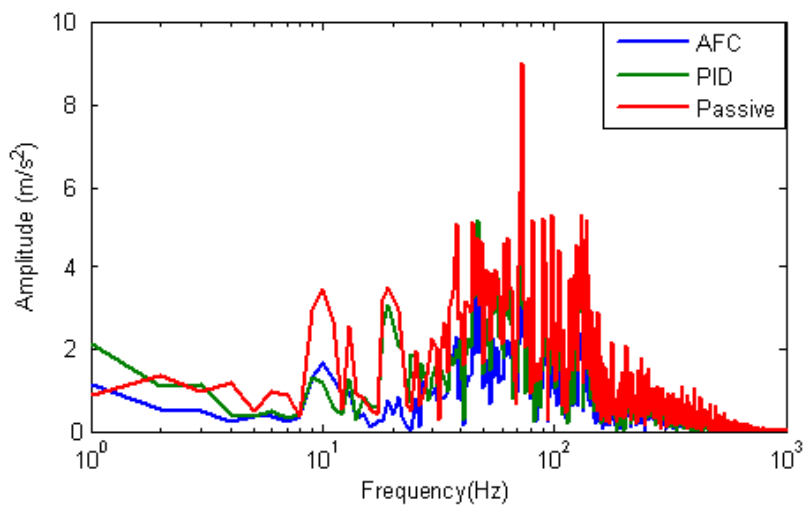


(الف)

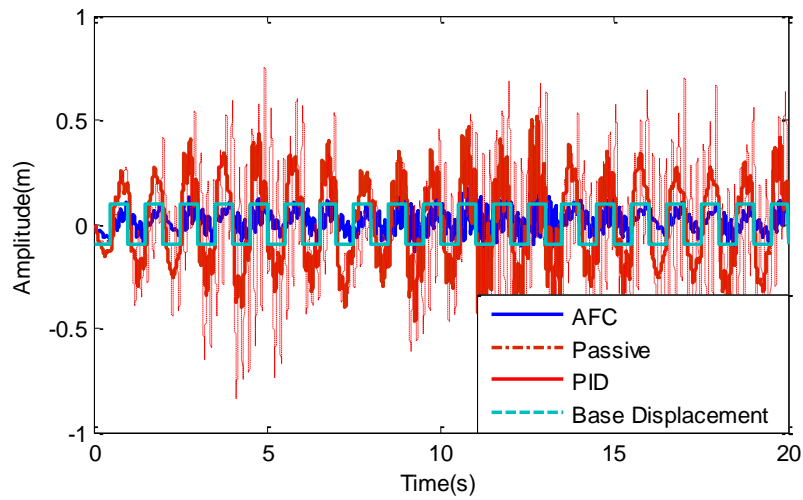


(ب)

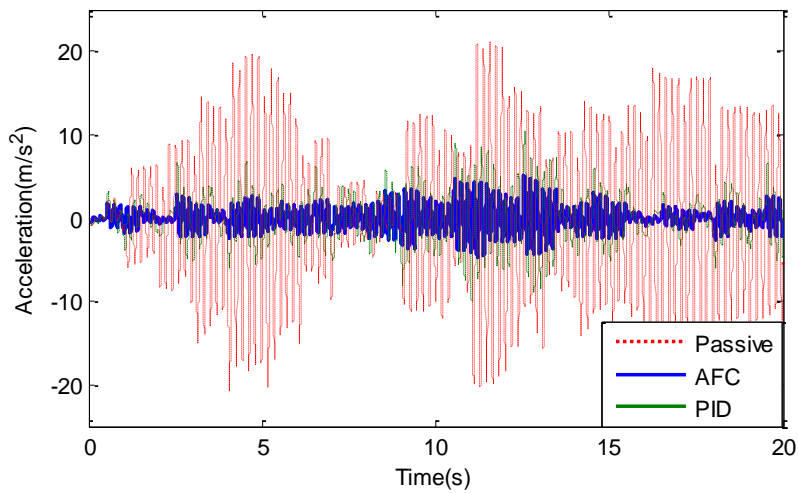
شکل ۱۰ الف) شتاب سر راننده در پاسخ به نمودار دندان اره‌ای در حوزه زمان، ب) پاسخ بزرگ‌نمایی شده



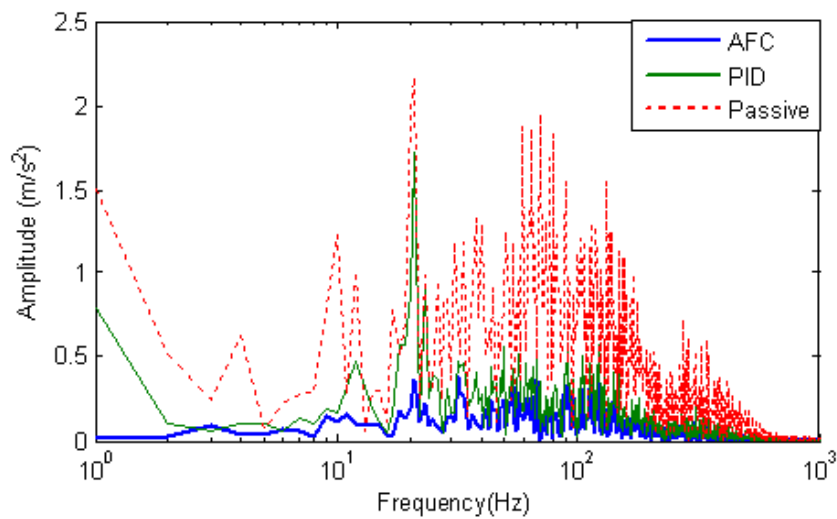
شکل ۱۱ شتاب سر راننده در پاسخ به نمودار دندان اره‌ای در حوزه فرکانس



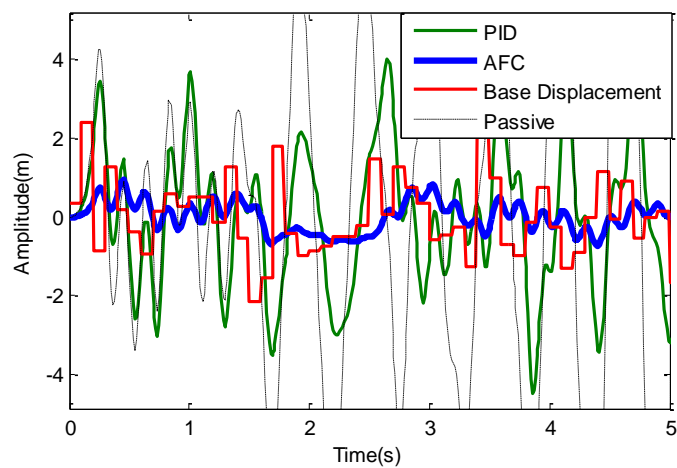
شکل ۱۲ جابجایی کفه صندلی در پاسخ به نمودار موج مربعی در حوزه زمان



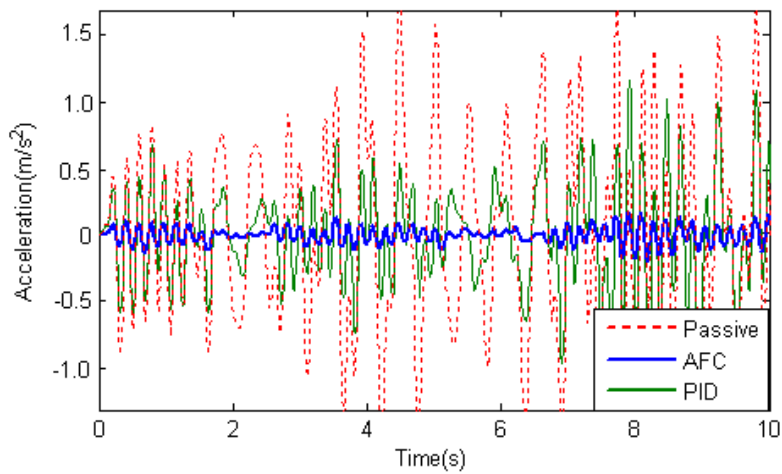
شکل ۱۳ شتاب سر راننده در پاسخ به نمودار موج مربعی در حوزه زمان



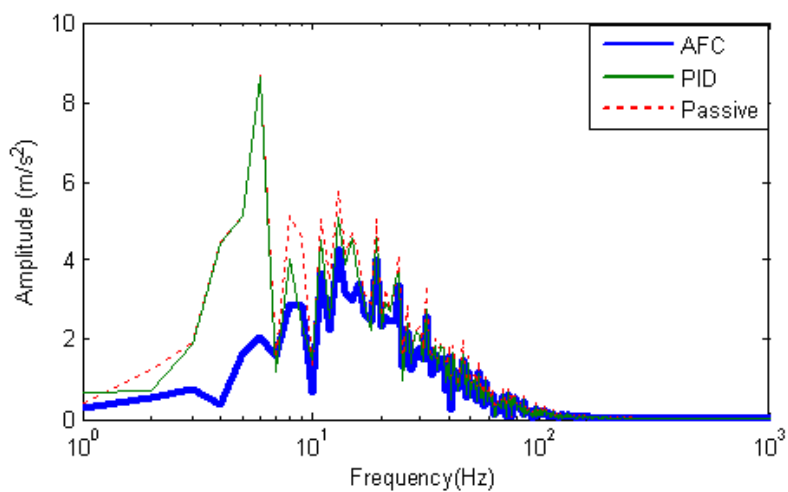
شکل ۱۴ شتاب سر راننده در پاسخ به نمودار موج مربعی در حوزه فرکانس



شکل ۱۵ جابجایی کفه‌صندلی در پاسخ به نمودار موج تصادفی نویز سفید



شکل ۱۶ شتاب سر راننده در پاسخ به ارتعاش وارده موج تصادفی نویز سفید در حوزه زمان



شکل ۱۷ پاسخ شتاب ارتعاشی سر راننده نسبت به ورودی موج تصادفی نویز سفید در حوزه فرکانس

مقایسه نتایج با دیگر کارهای انجام گرفته در این کاربرد نشان می‌دهد که سیستم تعلیق صندلی خودروی غیرجاده‌ای مجهز به میراگر MR با کمک AFC عملکرد سریع‌تری در حذف اغتشاش و ایجاد پایداری در پاسخ سیستم تعلیق صندلی دارد همانند مرجع [۳۶ و ۳۷] که در سیستم تعلیق اصلی خودرو AFC و روش یادگیری تدریجی را بکار برده و نتایج خوبی به دست آورده شده است. به‌علاوه، مطالعه در سیستم‌های ارتعاشی دیگر نظیر سازه ساختمانی و بوم سم‌پاش نیز اضافه شدن AFC به حلقه اصلی کنترل را در بهبود پاسخ ارتعاشی تأیید کرده‌اند [۳۸ و ۳۹].

۴- نتیجه‌گیری

کنترل‌گر جدید AFC برای سیستم تعلیق صندلی راننده که مجهز به میراکننده MR می‌باشد در این تحقیق مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. سیستم کنترل AFC با الگوریتم یادگیری تدریجی ترکیب شد تا بتواند به‌صورت بلادرنگ جرم تخمینی را حدس بزند و در اختیار سیستم کنترل قرار دهد. از آنجایی که استراتژی AFC در محاسبات ساده می‌باشد برای مقاصد بلادرنگ مناسب و می‌توان از آن استفاده نمود. نتایج بر پایه شبیه‌سازی در این مقاله نشان داد که AFC کاهش محسوسی در ارتعاشات سر راننده و نوسانات انتقالی به کفه صندلی خودرو دارد. این موارد زمانی به دست آمد که اغتشاشات مختلف مورد مطالعه قرار گرفت. از این‌رو AFC می‌تواند راحتی راننده را افزایش داده و ممکن است مشکلات ارتعاش انتقالی را در اعضا داخلی بدن راننده کم نماید. در مطالعات آینده باید به‌طور تجربی این موارد بر روی سیستم تعلیق خودروی سنگین غیرجاده‌ای بررسی شود تا در واقعیت کارایی و راندمان این سیستم تعلیق آزموده گردد.

۵- مراجع

- [1] Frymoyer J W, Pope M H, Costanza M C, Rosen J C, Goggin J E, Wilder DG. Epidemiologic studies of low-back pain. Spine. 1980;5:419-423.
- [2] Sandover J. Dynamic loading as a possible source of low-back disorders. Spine. 1983;8:652-658.
- [3] Wilder D G, Woodworth B B, Frymoyer JW, Pope MH. Vibration and the human spine, Spine. 1982;7:243-254.
- [4] Ahmadian M, Simon D E. An analytical and experimental evaluation of magneto-rheological suspensions for heavy trucks. Int J Veh Syst Dyn. 2003;37:38-49.
- [5] Ahmadian M. On the isolation properties of semiactive dampers. Journal of Vibration and Control. 1999;5(2):217-232.
- [6] Ahmadian, M. Semiactive control of multiple degree of freedom systems. in Proceedings of the Sixteenth Biennial Conference on Mechanical Vibration, ASME Design Technical Conference, Sacramento, CA. 1997.
- [7] Ahmadian M, Reichert B, Song X. Harmonic analysis of semiactive suspensions. Proceedings of the Sixteenth Biennial Conference on Mechanical Vibration, ASME Design Technical Conference, Sacramento, CA. 1997.
- [8] Inman D J. Engineering Vibration, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. 1996.
- [9] Tokhi M O, Hossain M A. Self-tuning active vibration control in flexible beam structures. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering. 1994;208(4):263-278.
- [10] Choi S B, Nam M H, Lee B K. Vibration Control of MR Seat Damper for Commercial Vehicles. Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 2000;11(12):936-944.
- [11] Carlson J D, Chrzan M J, Raleigh N C. Magnetorheological Fluid Damper. United States Patent No. 5277281. 1994.
- [12] Carlson J D, Weiss K D.. A Growing Attraction to Magnetic Fluids. Machine Design. 1994;61-66.
- [13] Park C, Jeon D. Semiactive vibration control of a smart seat with an MR fluid damper considering its time delay. Journal of intelligent material systems and structures. 2002;13(7-8):521-524.
- [14] Choi S B, Nam M H, Lee B K. Vibration control of a MR seat damper for commercial vehicles. Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 2000;11:936-944.

- [15] Wang D H, Liao W H. Modeling and control of magnetorheological fluid dampers using neural networks. *Smart Materials and Structures*. 2005;14:111–126.
- [16] Wang W Y, Chan M L, Hsu C C, Lee T T. H/sub/spl infin//tracking-based sliding mode control for uncertain nonlinear systems via an adaptive fuzzy-neural approach. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*. 2002;32(4):483-492.
- [17] Ali S F, Ramaswamy A. Hybrid structural control using magnetorheological dampers for base isolated structures. *Smart Materials and Structure*. 2009;18:055011.
- [18] Do X P, Kruti S, Choi S B. Design of a new adaptive fuzzy controller and its implementation for the damping force control of a magnetorheological damper. *Smart Materials and Structures*. 2014;23:065012.
- [19] Phu D X, Quoc N V, Park J H, Choi S B. (). Design of a novel adaptive fuzzy sliding mode controller and application for vibration control of magnetorheological mount. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2014;228(13):2285-2302.
- [20] Chang Y H, Chan W S. Adaptive dynamic surface control for uncertain nonlinear systems with interval type- 2 fuzzy neural networks. *IEEE Transactions on Cybernetics*. 2014;44(2):293–304.
- [21] Do K S, Do X P, Choi S M, Choi S B. An adaptive fuzzy sliding mode control of magneto-rheological seat suspension with human body model. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2016;27(7):925-934.
- [22] Allen G. A critical look at biodynamic modeling in relation to specifications for human tolerance of vibration and shock. In *Proceedings of AGRAD Conference*. 1978.
- [23] Spencer B F Jr., Dyke S J, Sain M K, Carlson J D. Phenomenological model for magnetorheological dampers. *Journal of Engineering Mechanics*. 1997;123:230–238.
- [24] Wu C, Lin Y C, Hsu D S. Performance test and mathematical model simulation of MR damper. In *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*. 2008;12-17.
- [25] Mailah M, Hewit J R, Meeran S. Active force control applied to a rigid robot arm. *Jurnal Mekanikal*. 1996;2(2):52–68.
- [26] Hewit J R, Burdess J S. Fast dynamic decoupled control for robotics using active force control. *Transactions on Mechanism and Machine Theory*. 1981;16(5):535–542.
- [27] Mailah M, Priyandoko G. Simulation of a suspension system with adaptive fuzzy active force control. *International Journal of Simulation Modelling*. 2007;6:25–36.
- [28] Jahanabadi H, Mailah M, Zain M M, Hooi H M. Active force with fuzzy logic control of a two-link arm driven by pneumatic artificial muscles. *Journal of Bionic Engineering*. 2011;8(4):474-484.
- [29] Tahmasebi M, Rahman R A, Mailah M, Gohari M. Roll movement control of a spray boom structure using active force control with artificial neural network strategy. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*. 2013;32(3):189–202.
- [30] Tahmasebi M, Gohari M, Rahman R A, Mailah M. Self-tuning PD controller of a sprayer boom structure using neural network. *4th International Graduate Conference on Engineering, Science and Humanities. Universiti Teknologi Malaysia, Johor Bahru, Malaysia*. 2013;16-17.
- [31] Tahmasebi M, Rahman R A, Mailah M, Gohari M. Sprayer boom active suspension using intelligent active force control. *Journal of World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2012;68:1277–1281.
- [32] Kwek L C, Wong E K, Loo C K, Rao M V C. Application of active force control and iterative learning in a 5-link biped robot. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*. 2003;37:143–162.
- [33] Gohari M, Abd Rahman R, Raja R I, Tahmasebi M. Bus seat suspension modification for pregnant women. In *2012 International Conference on Biomedical Engineering (ICoBE)*. 2012;404-407. IEEE.
- [34] Gohari M, Tahmasebi M. Active off-road seat suspension system using intelligent active force control. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*. 2015;34(4):475-489.
- [35] Gohari M, Tahmasebi M. Off-road vehicle seat suspension optimisation, Part II: Comparative study between meta-heuristic optimisation algorithms. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*. 2014;33(4):443-454.

- [36] Idres M S. Active Force Control on Active Suspension System (Doctoral dissertation, UMP). 2013.
- [37] Rosli R, Mailah M, Priyandoko G. Active suspension system for passenger vehicle using active force control with iterative learning algorithm. WSEAS Trans. Syst. Control. 2014;9:120-129.
- [38] Salim M A. Implementation of active force control to reduce vibration displacement in active mass damper during seismic activity. Journal of Instrument. 2011;2(1).
- [39] Tahmasebi M, Gohari M, Mailah M, Abd Rahman R. Vibration suppression of sprayer boom structure using active torque control and iterative learning. Part II: Experimental implementation. Journal of Vibration and Control. 2018;24(20):4740-4750.