مجله مهندسی مکانیک مدرس، تیر 1396، دوره 17، شماره 4، ص‌ص 443-452

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

تأثیر واحد کنترل بر اختلال در فرایند تشخیص عیوب سیستم تعلیق فعال خودرو با عملگر هیدرولیکی

مهدی شهاب[1]، مجید معاونیان[2*]

1- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

* مشهد، صندوق پستی 4897491779، moaven@um.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 10 دی 1395

پذیرش: 27 اسفند 1395

ارائه در سایت: 09 اردیبهشت 1396

کلید واژگان:

شناسایی و تشخیص عیب

سیستم تعلیق فعال

واحد کنترل

شبکه‌های عصبی- فازی تطبیقی

چکیده

گرچه طراحی سیستم‌های شناسایی و تشخیص عیب (FDDS) سبب پیشرفت راهبردهای کنترلی می‌شوند، ولی با چالش دخالت کنترل‌کننده در فرایند شناسایی عیب روبه‌رو است. در این پژوهش در راستای افزایش کارایی و دقت سیستم‌های عیب‌یاب در فرایند شناسایی عیوب، به بررسی تأثیر و تعیین میزان اختلال حضور واحد کنترل‌کننده بر پارامترهای مؤثر در فرایند شناسایی عیوب می‌پردازد. برای دست یافتن به این مهم روش توانمندی در شناسایی الگوی عیب ماشین‌آلات و تجهیزات مبتنی‌بر مدل و رفتار دینامیکی با استفاده از محاسبات نرم ارائه و بر سیستم تعلیق خودرو مورد آزمون قرار داده است. سیستم تعلیق از قسمت‌های تأثیرگذار در ایمنی و قابلیت اطمینان خودرو است. برای تحقیق میزان اختلال ایجادشده توسط واحد کنترل از شبیه‌سازی سیستم تعلیق غیرفعال و فعال (با عملگر هیدرولیک) به همراه واحد کنترل استفاده شده است. نتایج آزمون‌ها (با مقادیر تصادفی) تحت شرایط متفاوت نشان می‌دهد وجود واحد کنترل، بسته به میزان دقت، فرایند شناسایی عیوب را سخت‌تر و مقاومت سیستم عیب‌یاب را در برابر نویز و اغتشاشات به‌مراتب کاهش می‌دهد. با توجه به نحوه تأثیرگذاری واحد کنترل در فرایند تشخیص عیوب، استفاده از راه‌کارهای مناسب پیشنهادشده در این پژوهش، نقش مهمی در محدود کردن اثرات نامطلوب کاهش دقت دارد. آزمون‌های یادشده و بررسی فرآیند تعیین میزان اثر واحد کنترل‌کننده در شناسایی عیوب توسط برنامه عیب‌یاب که با استفاده از نرم‌افزار متلب کدنویسی و تهیه شد، انجام گردیدند. این برنامه ابزاری مفید در تسریع و تسهیل اجرای مراحل مختلف پژوهش و آزمون‌هاست.

The disruptive effect of control units in fault detection of vehicle active suspension system with hydraulic actuator

Mahdi Shahab, Majid Moavenian*

Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University, Mashhad, Iran.
* P.O.B. 48974-91779 Mashhad, Iran, moaven@um.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 30 December 2016
Accepted 17 March 2017
Available Online 29 April 2017

Keywords:
Fault detection and diagnosis
Active suspension systems
Control unit
Neuro-fuzzy network

ABSTRACT

Design of fault detection and diagnosis systems (FDDS), although extending the control strategies, are challenged by controller interferences in fault diagnosis. In this study, in order to improve performance and accuracy of FDDS in the fault detection process, influential parameters and the level of corresponding interferences are investigated. For this purpose, a powerful method in fault pattern recognition of industrial plants based on dynamic behavior and dynamic model using soft computing is designed and tested on simulated suspension system of a vehicle. The suspension system is one of the parts that most affects reliability and safety of the vehicle. For investigating the level of interference caused by the control unit, the simulations of both passive and active (equipped with hydraulic actuator) suspension systems are utilized in association with the control unit. The results of tests under variable circumstances (using random values) demonstrate that the presence of control unit restricts the FDDS process and reduces the robustness of the system against disturbances and noise. Considering the way in which the control unit affects the process, application of suggested solutions in this research have a considerable impact on limiting the adverse effects. Fault detection program which is provided by Matlab software is a useful tool to investigate and define the effect of control units and can be considered as a useful device to facilitate the research and precipitate conduction of tests in different stages.

1- مقدمه

امروزه تقاضا برای امنیت و آسایش خاطر و اعتماد بیشتر به‌وسیله مورداستفاده، بسیار زیاد و از ضروریاتی است که طراح هر سیستمی باید آن را جزء اساسی‌ترین پارامترهای موردنظر خود قرار دهد و این امر با تشخیص به‌موقع هرگونه عیب میسر نخواهد شد. از اوایل دهه 1970 مسئله ردیابی و تشخیص عیب در فرآیندهای صنعتی موردتوجه واقع‌شده و تاکنون تعداد

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Shahab, M. Moavenian, The disruptive effect of control units in fault detection of vehicle active suspension system with hydraulic actuator, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 4, pp. 443-452, 2017 (in Persian)

زیادی از روش‌های مبتنی‌بر مدل‌های تحلیلی و روش‌های مبتنی‌بر دانش و داده استفاده شده‌اند. در این میان عدم قطعیت‌های ناشی از مدل‌سازی که به‌واسطه خطی‌سازی، نادیده انگاشتن‌ها، تغییرات پارامترهای فرآیند، نویز و اغتشاشات، سبب ناکارآمدی سیستم عیب‌یاب شده و موجبات اعلام هشدارهای نادرست درباره وجود عیب را فراهم می‌آورد. عموماً در طراحی سیستم‌های عیب‌یابی با یک چالش روبه‌رو هستیم و آن نیاز به حساسیت بالای سیستم در برابر عیب و همچنین مقاومت بالای آن در برابر عدم قطعیت‌های سیستم است. به همین دلیل لازم است تا تأثیرات عوامل مختلف چون وجود واحدهای کنترل بر شناسایی عیوب مورد بررسی قرار گیرد.

در حال حاضر روش‌های مبتنی‌بر مفاهیم محاسبات نرم به‌عنوان روش‌های قدرتمندی در طراحی سیستم‌های عیب‌یاب محسوب می‌شوند [1-4]. توانایی‌های شبکه‌های عصبی در آموزش سیستم و قابلیت‌های سیستم فازی در استدلال تقریبی موجب به‌کارگیری سیستم‌های فازی- عصبی و تکنیک‌های خوشه‌سازی فازی در شناسایی عیوب شده است. ورودی به این سیستم ویژگی‌های استخراج شده از داده‌های باقی‌مانده بوده و خروجی سیستم موقعیت و اندازه عیوب است.

پیشرفت فناوری موجب استفاده از واحدهای کنترل در بیشتر سیستم‌های صنعتی شده است. واحدهای کنترل‌کننده با دخالت در رفتار سیستم موجب می‌شوند تا نتایج مطلوب تحقق یابند. هنگامی‌که یک یا چند خروجی سیستم از مقدار مطلوب فاصله می‌گیرند، واحد کنترل سیستم را با اعمال تدابیر کنترلی در اجزاء و ورودی‌ها ناچار به رسیدن به مقدار مطلوب می‌کند، در نتیجه خروجی‌های سیستم در سیستم‌های دارای واحد کنترل‌کننده همیشه متأثر از واحد کنترل است.

یکی از موارد مهم در عیب‌یابی سیستم‌های مجهز به کنترل‌کننده ضرورت اطلاع از تأثیر واحد کنترل‌کننده بسته به نوع و میزان اختلال آن در شناسایی عیوب احتمالی است. بیشتر مقالات و پژوهش‌های موجود در این حوزه مربوط به سیستم‌های مقاوم یا کنترل تحمل‌پذیر عیب[1] (FTC) با استفاده از ساختار کنترلی مناسب اختصاص دارند [5-7] که برخی از پژوهش‌ها در این حوزه با اولویت عیب‌یابی سیستم‌های FTC را بررسی کرده‌اند [8]. سیستم‌های FTC موجب بهبود کارایی دستگاه‌ها و فرآیندهای صنعتی و افزایش امنیت و قابلیت اطمینان در سیستم‌های کنترل می‌شوند. مقاوم بودن در برابر عیوب نشان از قابلیت یک سیستم دارد تا ثبات و عملکرد آن در برابر بروز عیب‌های ناشناخته حفظ شود. یک سیستم FTC، سیستم کنترل را در شرایط عملکردی مطلوب نگه‌داشته و موجب حفظ پایداری آن در هنگام وقوع عیب در اجزای مختلف سیستم کنترل می‌شود [9]. بسته به نوع فرآیند تحت کنترل، روش و استراتژی FTC مناسب به دسته‌های فعال و غیرفعال تقسیم می‌شود. استراتژی‌های غیرفعال با افزونگی‌های سخت‌افزاری یا روش‌های طراحی مقاوم برای جبران عیوب پیش‌بینی‌شده همراه است در حالی که در روش‌های فعال با استفاده از یک‌رویه تشخیص و محل‌یابی عیب با پیکره‌بندی دوباره کنترل‌کننده،اثر عیوب جبران می‌شوند [11,10]. تعامل سیستم‌های کنترلی و بروز عیب غالباً در حوزه کنترل‌کننده‌های تحمل‌پذیر عیب که بر پایه اطلاعات به‌دست‌آمده از تخمین آنی عیب طراحی می‌شوند و می‌توانند پایداری را در هنگام بروز عیب‌ها تضمین کنند مطرح شده‌اند. بررسی پژوهش‌های انجام شده در این حوزه مشخص می‌سازد هدف اصلی اغلب پژوهش‌های بالا طراحی سیستم مقاوم به عیب یا مقابله با تداخل نویز یا اغتشاشات جزیی با عیوب ناشی از سنسور بوده است [13,12]. این پژوهش به بررسی تأثیر میزان اثر کنترل‌کننده‌ها بر دقت شناسایی عیوب پرداخته است.

در راستای انجام این مهم و با توجه به اهمیت سیستم‌های تعلیق و انواع آن‌ها در دسته‌های غیرفعال (بدون واحد کنترل) و فعال (با واحد کنترل)، این سیستم‌ها جهت بررسی تأثیر واحد کنترل بر شناسایی عیوب انتخاب شده‌اند. در سیستم‌های تعلیق فعال برای کنترل دقیق میزان ارتعاشات خودرو از عملگر هیدرولیکی یا نیوماتیکی استفاده می‌شود که به‌موازات فنر و دمپر قرار داده می‌شوند و استراتژی مناسب کنترل با استفاده از اطلاعات حاصل از ارتعاشات بدنه اعمال می‌شود [14]. در این مقاله عیب‌یابی سیستم تعلیق فعال خودرو با مدل یک‌چهارم و با در نظر گرفتن اثرات غیرخطی عملگر هیدرولیکی و اختلال در کنترل‌کننده مورد تحقیق قرارگرفته است.

2- سیستم تشخیص وضعیت

در دهه‌های گذشته شبکه‌های عصبی مصنوعی به‌طور گسترده برای شناسایی و جداسازی آسیب در سیستم‌های پیچیده به کار گرفته شده است. جهت اطمینان از اعلام هشدار صحیح و به‌موقع و به حداقل رساندن احتمال خطا در شناسایی عیوب و برای استفاده از قابلیت‌های شبکه‌های عصبی در آموزش و توانایی‌های سیستم فازی در استدلال تقریبی از سیستم‌های فازی- عصبی انفیس[2] و تکنیک‌های خوشه‌سازی فازی در فرایند شناسایی عیوب استفاده می‌شود. علائم مشخصه سیگنال‌های باقی‌مانده عیوب به‌عنوان ورودی این سیستم‌های تصمیم‌گیری محسوب می‌شوند. در صورت تعلق این مشخصه‌ها به یک کلاس از عیوب، خروجی سیستم عددی که نمایانگر عیب مربوطه است را مشخص خواهد کرد. تعداد ورودی‌های سیستم تصمیم‌گیر با توجه به تعداد ویژگی‌های استخراج‌شده از سیگنال‌ها و تعداد خروجی‌های مدل مشخص می‌شوند. روش عیب‌یابی بر پایه مدل دربرگیرنده موارد زیر است:

- مدل کردن وضعیت نرمال سیستم (در غیاب هرگونه عیب)
- مدل کردن وضعیت سیستم در حالات معیوب
- تولید باقی‌مانده (استخراج تفاوت دو سیگنال وضعیت سالم و معیوب)
- استخراج مشخصه‌های تعیین‌شده از سیگنال‌های باقی‌مانده به‌دست‌آمده
- تولید بانک داده‌های عیوب با استفاده از مشخصه‌های سیگنال باقی‌مانده

شکل 1 تولید سیگنال باقی‌مانده را نشان می‌دهد.

در مرحله بعد ساختار مناسب با توجه به بانک داده‌های به‌دست‌آمده برای عیوب بر مبنای شبکه‌های عصبی فازی آموزش پیدا می‌کند. در این حالت سیستم عیب‌یاب قادر است تا در صورت مشاهده اختلاف قابل توجه، نوع و اندازه عیب را اعلام کند. از موارد مهم و اساسی در نحوه عملکرد مطلوب سیستم‌های تشخیص عیب، دقت بالا و هشدار به‌موقع در مواقع بروز عیب است. به همین منظور روشی کارآمد با استفاده از شبکه‌های عصبی- فازی و طرح ساختار و الگوریتمی که بتواند سبب افزایش دقت در تشخیص عیوب با کاهش حجم پردازش اطلاعات شود، استفاده شده است. ساختار ارائه‌شده برای شناسایی و تشخیص عیوب در این تحقیق عملکرد مطلوبی را نسبت به سایر روش‌های ارائه شده دارا و برای بررسی تأثیر واحد کنترل در شناسایی عیوب مناسب است (شکل 2). در این ساختار نوع عیب در مواقعی از سوی سیستم اعلام می‌شود که تطابق بین عیوب شناسایی شده وجود

[1] Fault Tolerant Control system

[2] ANFIS

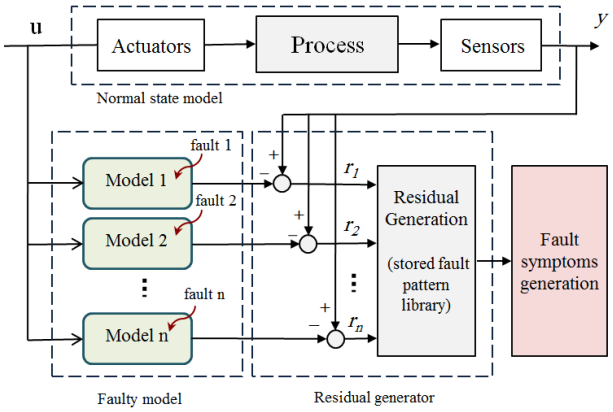

Fig. 1 Residual signal generation scheme based on the differences between faulty and healthy signals

شکل 1 تولید سیگنال باقی‌مانده ناشی از تفاوت دو سیگنال وضعیت سالم و معیوب

داشته باشد و احتمال هشدار اشتباه و فقدان آشکارسازی عیوب تقلیل یابد.

2-1- مشخصه‌های سیگنال‌های باقی‌مانده

یک سیگنال باقی‌مانده را نمی‌توان با یک عدد و مقدار کمی خاص تعریف کرد، از این‌رو تعدادی از مشخصه‌های سیگنال باقی‌مانده که بیان‌کننده رفتار آن‌ها است استخراج شده و به عنوان ورودی مدل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. از آن‌جا که عیوب مختلف می‌توانند آثار مشابهی بر یک سیگنال مشخص به‌جای گذارند، برای تشخیص دقیق نوع عیب لازم است تا مشخصه‌های مختلفی از سیگنال‌های خروجی مورد ارزیابی قرار گیرند. ویژگی‌های استخراج شده از سیگنال‌های باقی‌مانده که در فرایند شناسایی می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند، در جدول 1 آمده است. از آن‌جا که وجود و عدم وجود عیب در سیستم مستقل از سطح عددی آن‌هاست در تعدادی از مشخصه‌های مقادیر کمیت بر میانگین تقسیم شده است. در این صورت ورودی شبکه ویژگی‌های استخراج شده از داده‌های باقی‌مانده بوده و خروجی سیستم بیانگر وضعیت عیب است. انتخاب بردار ویژگی مناسب تأثیر بسزایی در میزان کارآمدی یک سیستم عیب‌یاب دارد [15].

2-2- معیار کارایی سیستم عیب‌یاب

همگرایی مقدار ریشه میانگین مربعات خطا[1] را می‌توان برای معیار سنجش خطا در شناسایی عیوب به‌کار برد. این مقدار که همان خطای یادگیری است به‌صورت رابطه (1) تعریف می‌شود.

$$\mathrm{RSME} = \sqrt{\frac{\sum E_n}{n}} \tag{1}$$

جدول 1 مشخصه‌های سیگنال‌های باقی‌مانده

Table 1 The symptom indexes extracted from any residual signals

نوع مشخصه سیگنال	نماد	نوع مشخصه سیگنال	نماد
Norm	S_9	Max	S_1
Mean of signal FFT	S_{10}	Min	S_2
Range of signal FFT	S_{11}	Range of changes	S_3
Std of signal FFT	S_{12}	Mean	S_4
S_1/Mean	S_{13}	Variance	S_5
S_2/Mean	S_{14}	Standard deviation	S_6
S_3/Mean	S_{15}	Skewness	S_7
S_6/Mean	S_{16}	Kurtosis	S_8

[1] Root mean squared error (RSME)

در رابطه بالا n تعداد کل تکرارها و E_n خطای تکرار nام است. روند تغییرات این خطا برحسب تکرارهای الگوریتم یادگیری باید به حد مشخصی میل کند، به طوری‌که با افزایش تکرارها دیگر تغییری در میزان خطا ایجاد نشود. معیار همگرایی بالا هرچند به‌نوعی بیانگر مناسب بودن ساختار برای پیش‌بینی درست عیوب است، ولی در خیلی از موارد عدم انطباق نتایج حاصل از شناسایی عیوب با معیار سنجش بالا وجود دارد. شرط همگرایی فوق شرط لازم، ولی کافی برای پیش‌بینی دقیق عیوب سیستم نیست. در این پژوهش معیار دقت سیستم در ردیابی عیوب با توجه به تعداد نمونه‌های آماری که مورد آزمایش قرارگرفته‌اند، به صورت رابطه (2) تعریف شده است. در رابطه یادشده n_c تعداد موارد تشخیص صحیح، n_t تعداد کل آزمون‌ها و p بیانگر دقت در شناسایی عیوب است.

$$P = \frac{100 \times n_c}{n_t} \tag{2}$$

برای مشخص کردن تفاوت بین عیوب شناسایی شده به اشتباه و یا عدم‌تشخیص می‌توان از مقادیر حساسیت و پیش‌بینی مثبت استفاده کرد [16].

3- شبیه‌سازی سیستم تعلیق خودرو

سیستم‌های تعلیق را می‌توان عمدتاً به سه دسته فعال، غیرفعال و نیمه فعال تقسیم کرد. سیستم تعلیق غیرفعال از فنر و دمپر تشکیل شده است و با وجود عملکرد مناسب به دلیل داشتن خواص ثابت نمی‌توان از کنترل فیدبک برای آن استفاده کرد. سختی تعلیق و میزان میراکنندگی در سیستم تعلیق فعال قابل تغییر بوده و حرکات بدنه در بازه گسترده‌تری از فرکانس‌ها مدام تحت کنترل است. این سیستم قادر است پیش از رسیدن به ناهمواری‌ها تنظیمات لازم را انجام دهد و چرخ‌ها را همیشه در تماس با سطح جاده نگه دارد که همین امر متضمن حرکتی نرم و آرام است. انواع سیستم تعلیق فعال از جهت نوع عملگر استفاده شده عبارت از هیدرولیکی، هیدرو نیوماتیک، بادی و الکترومغناطیسی که در این تحقیق نوع عملگر هیدرولیک شبیه‌سازی‌شده است.

در سیستم تعلیق معمولاً خودرو به دو جرم فنربندی شده و فنربندی نشده تقسیم می‌شود. در شکل 3 مدل‌های موردن ظر برای سیستم تعلیق غیرفعال و فعال آورده شده‌اند که میزان جابه‌جایی بدنه و چرخ خودرو در راستای قائم به ترتیب توسط مختصات Z_s و Z_u است. در سیستم تعلیق فعال بین جرم فنربندی شده و فنربندی نشده یک عملگر هیدرولیکی که نیروی F را با توجه به دستور کنترلی وارد می‌کند در نظر گرفته می‌شود.

متغیرهای m_s و m_u به ترتیب یک‌چهارم جرم فنربندی شده و جرم فنربندی نشده، K_s و K_u ضریب سفتی سیستم تعلیق و تایرها و C_s و C_u ضریب میرایی سیستم تعلیق و تایرهاست. برای سیستم تعلیق غیرفعال روابط (4,3) برای تعادل نیروها برقرار است و برای جرم فنربندی شده و فنربندی نشده داریم.

$$m_s\ddot{z}_s = -k_s(z_s - z_u) - c_s(\dot{z}_s - \dot{z}_u) \tag{3}$$

$$m_u\ddot{z}_u = k_s(z_s - z_u) + k_u(z_r - z_u) + c_s(\dot{z}_s - \dot{z}_u) + c_u(\dot{z}_r - \dot{z}_u) \tag{4}$$

در مدل‌های یادشده از ضریب اصطکاک لاستیک صرف نظر شده است.

برای مدل سیستم تعلیق یک‌چهارم خودرو با عملگر هیدرولیکی با توجه به شکل (3) روابط (6,5) برای تعادل نیروها برقرار است.

$$m_s\ddot{z}_s = -k_s(z_s - z_u) - c_s(\dot{z}_s - \dot{z}_u) + F_A - F_f \tag{5}$$

$$m_u\ddot{z}_u = k_s(z_s - z_u) - k_u(z_u - z_r) + c_s(\dot{z}_s - \dot{z}_u) - F_A + F_f \tag{6}$$

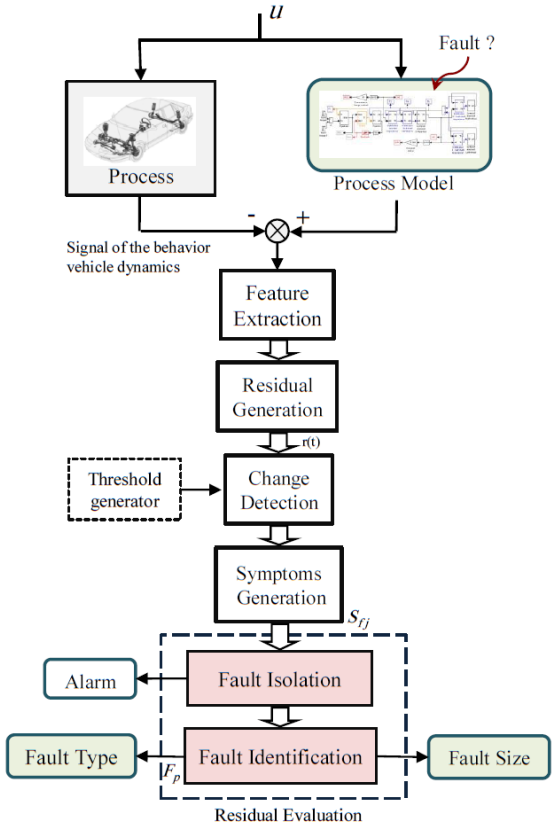

Fig. 2 General schematic of proposed FDD structure

شکل 2 شماتیک روش عیب‌یابی استفاده شده

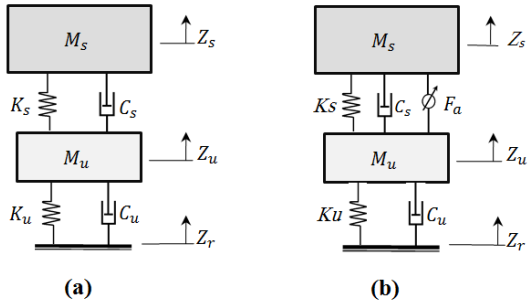

Fig. 3 A quarter car model a- passive suspension b- active suspension

شکل 3 مدل یک‌چهارم خودرو با دو درجه آزادی الف- تعلیق غیرفعال ب- تعلیق فعال

در آن F_A، نیروی عملگر هیدرولیکی و F_f، نیروی اصطکاکی عملگر است. مجموعه کامل محرک هیدرولیکی شامل پنج قسمت مهم که عبارت از شیر سوزنی هیدرولیکی برقی[1]، پیستون- سیلندر، پمپ هیدرولیکی، مخزن آب و سیستم لوله‌کشی که در شکل 4 مشخص است.

برای درایو پمپ هیدرولیکی از طریق یک موتور AC، همچنین جهت کنترل موقعیت شیر سوزنی نیاز به منبع تغذیه است. وظیفه پمپ هیدرولیکی حفظ فشار منبع (تولیدی) در سطح بهینه (حدود $20684\ \mathrm{kN/m^2}$) است. موقعیت شیر سوزنی میزان سیال ورودی یا خروجی به پیستون- سیلندر را کنترل می‌کند. براساس شکل 5 با تغییر موقعیت شیر سوزنی می‌توان اختلاف فشاری در دو طرف v_1 و v_2 ایجاد کرد. این اختلاف فشار در سطح A_p ایجاد نیروی محرکه (F_a) لازم را خواهد کرد؛ بنابراین می‌توان گفت که تغییر نیرو

[1] electro hydraulic powered spool valve

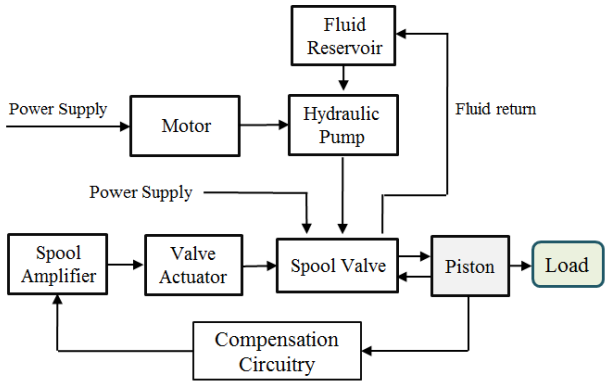

Fig. 4 Diagram of a hydraulic actuator for the active suspension system

شکل 4 دیاگرام مجموعه محرک هیدرولیکی سیستم تعلیق فعال

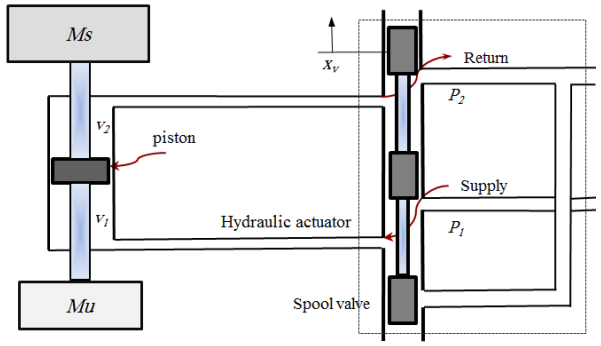

Fig. 5 Physical schematic and variables for the hydraulic actuator

شکل 5 نمودار فیزیکی و متغیرهای محرک هیدرولیکی

متناسب با تغییر موقعیت شیر سوزنی از مرکزش است.

موقعیت شیر سوزنی به‌وسیله یک شیر تیغه‌ای با یک جریان الکتریکی ورودی مستقیم (u) کنترل می‌شود. دینامیک شیر سرو[2] شامل شیر تیغه‌ای و سوزنی و دارای سه قطب ناشی از زیرسیستم‌های هیدرولیکی، مکانیکی و الکتریکی است، اما قطب غالب مربوط به زیرسیستم هیدرولیکی آن بوده و در نتیجه با یک سیستم درجه‌یک مدل می‌شود که ثابت زمانی این سیستم از طریق آزمایش به صورت رابطه (7) تعیین می‌شود.

$$\dot{x}_v = \frac{1}{\tau}(-x_v + u) \tag{7}$$

در رابطه بالا x_v موقعیت شیر، τ ثابت زمانی سیستم و u جریان الکتریکی ورودی به شیر است. رابطه غیرخطی موجود در عملگر هیدرولیکی عبارت از رابطه (8) است.

$$\frac{\dot{F}_A}{A_p} = \alpha C_d \omega x_v \sqrt{\frac{1}{\rho}}\sqrt{P_s - \mathrm{sgn}(x_v)P_L} - \alpha C_{tm} P_L - \alpha A_p(\dot{Z}_s - \dot{Z}_u) \tag{8}$$

در رابطه بالا $C_d = 0.7$، $C_{tm} = 15e-12$ و با فرض $\gamma = \alpha C_d \omega \sqrt{\frac{1}{\rho}}$ و $\beta = \alpha C_{tm}$ به صورت رابطه (9) داریم.

$$\frac{\dot{F}_A}{A_p} = \gamma x_v \sqrt{P_s - \mathrm{sgn}(x_v)P_L} - \beta P_L - \alpha A_p(\dot{Z}_s - \dot{Z}_u) \tag{9}$$

مقادیر عملی سایر پارامترها در جدول 2 آمده است. اگر محرک هیدرولیکی را به عنوان یک سیستم در نظر بگیریم، ورودی این سیستم u و خروجی آن F_a خواهد بود.

[2] servo valve

جدول 2 مقادیر پارامترهای مدل یک‌چهارم سیستم تعلیق خودرو

Table 2 Nominal parameters of quarter suspension system

پارامتر	توصیف	واحد	مقدار
M_s	جرم فنربندی	[kg]	290
M_u	جرم فنربندی‌نشده	[kg]	59
K_s	سختی سیستم تعلیق	[N/m]	16812
K_t	سختی تایر	[N/m]	190000
C_s	میرایی سیستم تعلیق	[Ns/m]	1000
C_t	میرایی تایر	[Ns/m]	5000
A_p	سطح مقطع پیستون	[m^2]	$3.35 \cdot 10^{-4}$
P_s	فشار منبع	[kN/m^2]	10342500
α	ضریب هیدرولیک	[N/m^5]	$4.515 \cdot 10^{13}$
β	مدول بالک موثر سیال	[N/m^2]	1
γ	ضریب هیدرولیک	[N/m$^{5/2}$kg$^{1/2}$]	$1.545 \cdot 10^{9}$
ω	ضخامت شیر ماسوره‌ای	[m]	0.008
ρ	وزن مخصوص مایع هیدرولیک	[kg/m^2]	3500
τ	ثابت زمانی شیر ماسوره‌ای	[sec]	0.001
C_d	ضریب تخلیه	–	0.253
C_{tm}	ضریب نشتی	–	$2.21 \cdot 10^{-14}$
P_L	فشار ناشی از بار	[kN/m^2]	_
x_v	جابه‌جایی سیلندر	[m]	_
F_a	نیروی عملگر	[N]	_

3-1- کنترل‌کننده سیستم تعلیق فعال

در سیستم تعلیق پارامترهای بسیاری مانند جابه‌جایی بدنه، شتاب وارد به بدنه، اغتشاشات داخلی ناشی از نیروی ترمز، نیروی وارد بر محورها و غیره برای بهینه شدن و بهبود عملکرد سیستم وجود دارند. هیچ سیستم تعلیقی نمی‌تواند به طور هم‌زمان پارامترهای یادشده را بهینه سازد، بلکه باید بین پارامترها به شکل بهینه‌ای مصالحه برقرار کند. از بین این پارامترها شتاب وارد به بدنه (شتاب اعمالی به سرنشینان) و جابه‌جایی سیستم تعلیق از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا شتاب مستقیم بر آسایش سرنشینان و جابه‌جایی سیستم تعلیق در عمر و سلامت سیستم و همچنین راحتی سرنشین مؤثر است.

راه‌کارهای مختلفی برای طراحی کنترل این سیستم پیشنهاد شده‌اند از جمله می‌توان به کنترل مد لغزشی [18,17]، کنترل فازی [19-21]، کنترل عصبی [23,22]، کنترل H_∞ [25,24]، کنترل تطبیقی مرجعی [26]، کنترل مقاوم تطبیقی [27]، تنظیم‌کننده مربعی خطی (LQR) [29,28]، اشاره کرد. ساختار کنترل را باید به‌گونه‌ای در نظر گرفت که دینامیک غیرخطی سیستم که از ماهیت فیزیکی محرک هیدرولیکی ناشی می‌شود، کاهش یابد. بدین منظور از دو حلقه فیدبک استفاده می‌شود. همان طور که در شکل 6 مشخص است، از حلقه فیدبک داخلی به‌منظور خطی‌سازی رفتار غیرخطی محرک هیدرولیکی (ردیابی نیروی عملگر) و از حلقه فیدبک خارجی برای کنترل سیستم تعلیق جهت کاهش شتاب عمودی بدنه استفاده می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که علی‌رغم رفتار غیرخطی عملگر با به‌کارگیری این روش به مصالحه مطلوبی بین راحتی سفر و حرکت اجزا سیستم تعلیق می‌توان دست‌یافت.

3-1-1- حلقه فیدبک داخلی

ساده‌ترین مدلی که می‌توان برای عملگر هیدرولیکی جایگزین کرد یک مدل

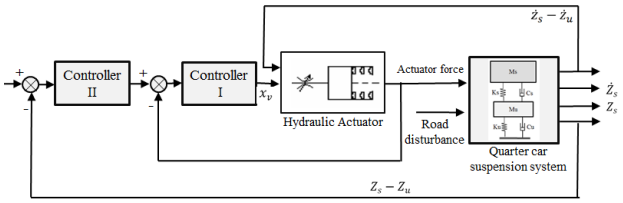

Fig. 6 The controller structure of an active suspension system

شکل 6 ساختار کنترلی سیستم تعلیق فعال خودرو

مرتبه دو است. بهره‌گیری از روش‌های شناسایی سیستم و شیوه کمینه کردن خطای پیش‌بینی بر ورودی- خروجی‌های استخراج‌شده از شبیه‌سازی سیستم کامل غیرخطی، تابع تبدیل مرتبه دوم (10) را برای عملگر هیدرولیک با ورودی جریان سرو و خروجی نیرو نتیجه می‌دهد.

$$\frac{F_{act}}{\text{servo} - \text{valve input}} = \frac{38.05 \times 10^6 (s + 18.24)}{(s^2 + 31.68\, s + 722)} \tag{10}$$

پهنای باند این تابع تبدیل حدود 50 rad/sec و بهره dc معادل dB 119 است. کوچک بودن محدوده تغییرات سیگنال جریان سرو از نکاتی است که باید در طراحی کنترل‌کننده تناسبی موردتوجه قرار گیرد و برای جلوگیری از اشباع عملگر، بهره کنترل‌کننده باید کوچک اختیار شود. از سوی دیگر برای رسیدن به عملکرد مطلوب در ساختار فیدبک موازی، پهنای باند حلقه داخلی لازم است که بزرگ‌تر از حلقه خارجی باشد. با استفاده از یک کنترل‌کننده تناسبی با بهره 0.0001 تابع تبدیل مداربسته حلقه داخلی به‌صورت رابطه (11) تبدیل می‌شود.

$$\frac{F_{act}}{F_{des}} = \frac{3805\ (s + 18.24)}{(s + 3818)(\ s + 18.36)} \tag{11}$$

با توجه به پهنای باند مورد نیاز برای سیستم تعلیق فعال، کنترل‌کننده بالا می‌تواند نیازهای طراحی حلقه داخلی را ارضا کند [30].

3-1-2- حلقه فیدبک خارجی

با توجه به اهداف تعیین‌شده برای کنترل‌کننده، راحتی و آسایش سرنشینان با کم کردن شتاب عمودی وارد به بدنه و افزایش عمر سیستم تعلیق با پرهیز از عبور از حد مجاز حرکتی سیستم تعلیق قابل دستیابی است. برای حلقه فیدبک خارجی کنترل‌کننده‌های مختلفی را می‌توان استفاده کرد.

در طراحی کنترل‌کننده فازی سوگنو، شتاب و سرعت بدنه خودرو به صورت متغیر ورودی و نیروی کنترلی به صورت خروجی کنترل‌کننده در نظر گرفته می‌شود. باید در مواردی از جمله تعداد ورودی‌ها، اندازه بازه تعریف، تعداد و شکل توابع فازی تصمیم گرفته شود. اندازه بازه تعریف متغیرها به رنج مورد انتظار از ورودی‌ها بستگی دارد (معمولاً سطح اشباع). تعداد و شکل مجموعه‌های فازی مصالحه‌ای بین دقت سیگنال کنترل و پیچیدگی محاسبات است. با انتخاب محدوده مناسب برای هر متغیر ورودی، 5 تابع تعلق مثلثی به ترتیب حالت‌های بزرگ منفی، *NB*، کوچک منفی، *NS*، تقریباً صفر، *ZE*، کوچک مثبت، *PS*، و بزرگ مثبت، *PB* نسبت داده می‌شود (شکل 7).

قوانین فازی جدول 3 تمام موقعیت‌های ممکن را پوشش داده و با استفاده از قوانین ارائه‌شده نیروی عملگر خروجی کنترل‌گر فازی محاسبه می‌گردد.

در شکل 8 مدل بلوک دیاگرام سیستم تعلیق شبیه‌سازی‌شده به همراه کنترل‌کننده فازی و عملگر هیدرولیک نشان داده‌شده است.

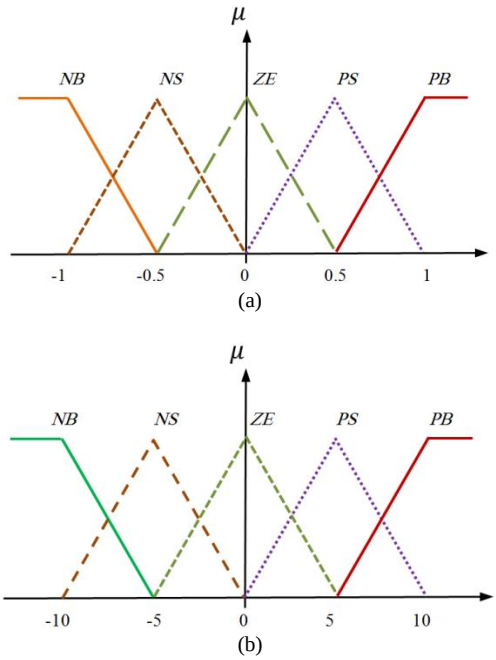

Fig. 7 Triangular membership functions of a fuzzy control a- body velocity b- body acceleration

شکل 7 توابع عضویت مثلثی کنترل فازی مربوط به الف- سرعت بدنه، ب- شتاب بدنه

جدول 3 قوانین اگر- آن‌گاه کنترل‌گر فازی

Table 3 If-then rules of fuzzy controller

	$\ddot{Z}_S$					
	NB	*NS*	*ZE*	*PS*	*PB*	
NB	*NB*	*NB*	*NS*	*ZE*	*NB*	
NB	*NB*	*NS*	*ZE*	*PS*	*NS*	
NB	*NS*	*ZE*	*PS*	*PB*	*ZE*	V_S
NS	*ZE*	*PS*	*PB*	*PB*	*PS*	
ZE	*PS*	*PB*	*PB*	*PB*	*PB*	

3-2- نتایج شبیه‌سازی سیستم تعلیق

برای شبیه‌سازی نوع تحریک ورودی فرض می‌شود خودرو با سرعت ثابت حرکت می‌کند، آن‌گاه جابه‌جایی عمودی از طرف جاده به‌عنوان اغتشاش به آن وارد می‌شود. در شبیه‌سازی انجام‌شده، سیگنال اغتشاشی جاده به شکل مرسوم آن در نظر گرفته‌شده است و برای برآمدگی‌های سطح جاده با دامنه 10 و 5 سانتی‌متر اغتشاش جاده به‌وسیله رابطه (12) توصیف می‌شود و در شکل 9 نمایش داده شده است.

$$Z_r = \begin{cases} \frac{0.01}{2}(1-\cos(8\pi t)) & 0.5 \le t \le 0.75 \\ \frac{0.05}{2}(1-\cos(8\pi t)) & 3 \le t \le 3.25 \\ 0 & \text{در غیر صورت‌این} \end{cases} \quad (12)$$

شبیه‌سازی برای دوره زمانی 5 ثانیه صورت گرفته است. در شکل‌های 10 و 11 به ترتیب سیگنال شتاب بدنه، جابه‌جایی و تغییر مکان بدنه سیستم تعلیق فعال و غیرفعال با کنترل‌کننده‌های یادشده نشان داده شده است.

همان طور که از نتایج مشاهده می‌شود، با توجه به کاهش شتاب عمودی سرنشینان و تغییر مکان بدنه در سیستم تعلیق فعال، کیفیت راحتی سفر و پایداری خودرو بهبود یافته است. نمودارهای بالا بیانگر حالات نرمال سیستم تعلیق است و برای محاسبه سیگنال‌های باقی‌مانده حالات معیوب سیستم با تغییر در پارامترها شبیه‌سازی می‌شوند.

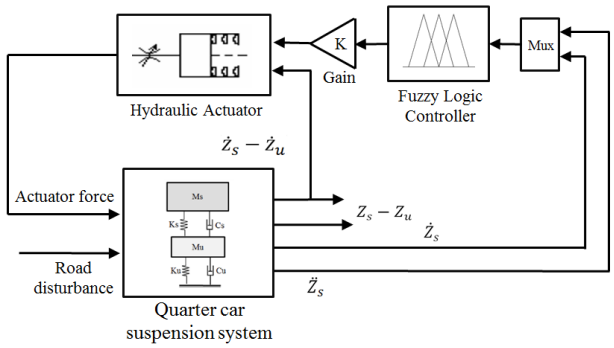

Fig. 8 Block diagram of suspension system with hydraulic actuator and fuzzy controller

شکل 8 بلوک دیاگرام سیستم تعلیق به همراه عملگر هیدرولیک و کنترل‌گر فازی

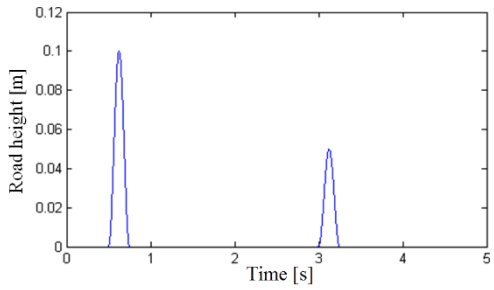

Fig. 9 Input disturbance of a bump configuration

شکل 9 سیگنال اغتشاشی جاده

4- تأثیر واحد کنترل در شناسایی عیوب

جهت بررسی تأثیر حضور واحد کنترل بر عملکرد سیستم عیب‌یاب، شناسایی عیوب تحت شرایط مشابه و برای پارامترهای یکسان سیستم تعلیق غیرفعال و فعال با کنترل فازی و PID انجام شده است. بدین منظور برای عیوب مشترک سیستم تعلیق فعال و غیرفعال سیگنال‌های باقی‌مانده که حاصل تفاضل سیگنال‌های مربوط به وضعیت نرمال و معیوب سیستم است محاسبه شده و با توجه به نوع خروجی و مشخصه‌های انتخاب شده، پایگاه داده‌های معیوب شکل می‌گیرد. از آن‌جا که مبنای شناسایی عیوب سیستم، سیگنال‌های باقی‌مانده است، کارایی سیستم عیب‌یاب وابستگی زیادی به ساختار این سیگنال‌ها دارد. تأثیر نوع واحد کنترل در الگوی سیگنال‌های باقی‌مانده برای عیوب سیستم تعلیق مشهود و هر یک دارای ساختاری متفاوت است. برای نمونه سیگنال‌های باقی‌مانده برای پارامتر K_s مربوط به‌شتاب بدنه برای سیستم تعلیق غیرفعال و با کنترل‌کننده فازی و PID در شکل 12 آورده شده است.

نمودارهای مربوط به میزان انطباق داده‌های آموزش و همچنین میزان خطای RMSE برای شناسایی عیوب سیستم تعلیق غیرفعال و سیستم تعلیق فعال با کنترل PID و کنترل فازی با استفاده از مشخصه اول و هشتم در خروجی شتاب بدنه در شکل‌های 13-15 آورده شده است.

با توجه به نتایج داده‌های آموزش شناسایی عیوب به ترتیب در سیستم تعلیق غیرفعال، فعال با کنترل PID و کنترل فازی با خطای کمتری همراه است. در نمودارهای شکل 16 چیدمان مربوط به خوشه‌بندی مشخصه‌های سیگنال‌های باقی‌مانده عیب برای سه نوع سیستم تعلیق غیرفعال، فعال با کنترل PID و فعال با کنترل فازی ترسیم شده است. بازه تغییرات عیوب از 5% تا 50% و با دامنه افزایش 5% است. همان‌طور که از نتایج مشاهده می‌شود نحوه آرایش مشخصه‌ها نشان از افزایش خطا در شناسایی عیوب

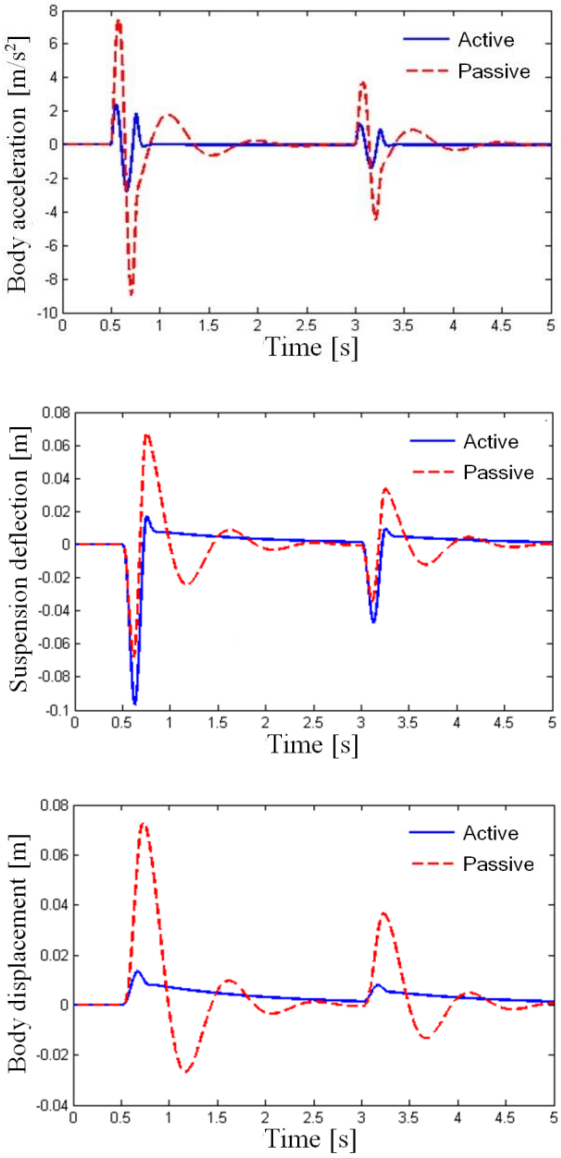

Fig. 10 Body acceleration, suspension deflection and displacement of active and passive suspension (PID controller)

شکل 10 سیگنال شتاب بدنه، جابه‌جایی و تغییر مکان بدنه سیستم تعلیق فعال و غیرفعال (کنترل‌کننده PID)

سیستم تعلیق فعال را دارد. جهت کاهش احتمال وجود خطا نتایج آزمون‌های متعدد که در شرایط متفاوت و با مقادیر تصادفی در بازه معین انجام شده برای سه نوع سیستم تعلیق در نمودار شکل 17 آورده شده است.

نتایج آزمون‌ها بیانگر آن است که نوع واحد کنترل‌کننده تأثیر مستقیمی بر میزان دقت و کارایی سیستم عیب‌یاب در روند شناسایی و تشخیص عیوب خواهد داشت و به‌طور میانگین (با توجه به ماهیت توابع فازی) شناسایی عیوب در واحدهای با کنترل‌کننده PID با دقت بیشتری نسبت به کنترل‌کننده‌های فازی همراه است هرچند در نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی در این مرحله تفاوت زیادی بین سیستم‌های دارای واحد کنترل و بدون آن مشاهده نمی‌شود. در شکل 18 تأثیر واحد کنترل بر تخمین میزان اندازه عیوب توسط سیستم عیب‌یاب آورده شده است.

با دقت در نمودارهای باقی‌مانده مربوط به شتاب بدنه مشخص می‌شود مقادیر متوسط باقی‌مانده‌ها در واحدهای با کنترل‌کننده PID حدود 4 برابر و با کنترل فازی حدود 2 برابر کوچک‌تر از سیستم تعلیق غیرفعال است. اندازه یادشده بسته به میزان افزایش دقت واحد کنترل کاهش می‌یابد. در خصوص نتایج نمودارهای به‌دست‌آمده می‌توان گفت هرچند تغییر الگو در سیگنال‌های باقی‌مانده موجب بروز تغییرات در روند شناسایی عیوب سیستم‌های دارای واحد کنترل، شده است، اما نکته مهم و قابل‌توجه این است که کاهش اندازه مقادیر باقی‌مانده‌ها سیستم عیب‌یاب را نسبت به نویز و اغتشاشات بسیار حساس کرده و موجب افت چشمگیر کارایی آن در عمل می‌شود. این امر موجب می‌شود از حسگرها و تجهیزات حساس‌تر که هزینه به مراتب بیشتری دارند، برای جبران بخشی از آثار نامطلوب کاهش کارایی در شناسایی عیوب استفاده شود. به همین منظور در این بخش تأثیرات نویز و اغتشاشات که از عوامل جداناپذیری است که در شرایط اندازه‌گیری عملی وجود دارد، بر عملکرد سیستم عیب‌یاب بررسی شده است. در این تحقیق از شبیه‌سازی نویز سفید استفاده شده است. شکل 19 سیگنال باقی‌مانده مربوط به خروجی

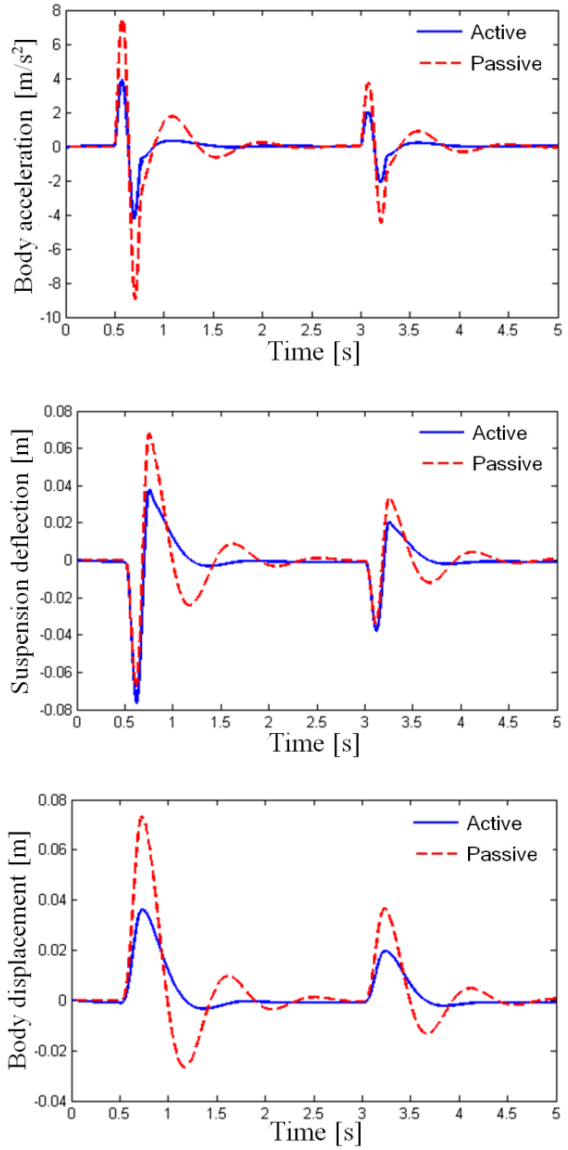

Fig. 11 Body acceleration, suspension deflection and displacement of active and passive suspension (fuzzy controller)

شکل 11 سیگنال شتاب بدنه، جابه‌جایی و تغییر مکان بدنه سیستم تعلیق فعال و غیرفعال (کنترل‌کننده فازی)

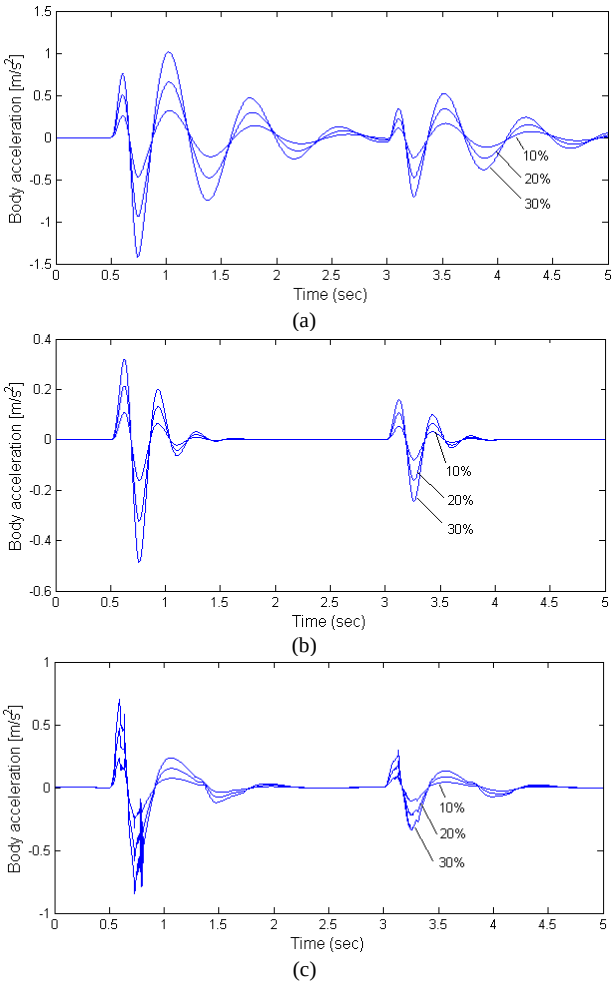

Fig. 12 Residual signals patterns of body acceleration for the parameter K_S a- passive b- active with PID controller c- with fuzzy controller

شکل 12 سیگنال باقی‌مانده شتاب بدنه سیستم تعلیق برای پارامتر K_S، الف- تعلیق غیرفعال، ب- تعلیق فعال با کنترل‌کننده PID، ج- تعلیق فعال با کنترل‌کننده فازی

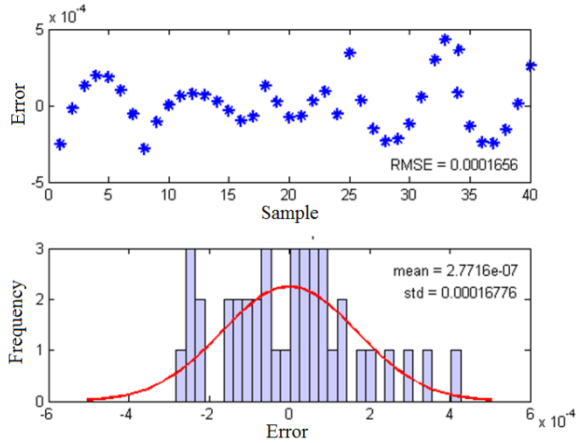

Fig. 13 The training data compliances with the calculated values in the FDD process (passive suspension system)

شکل 13 میزان انطباق داده‌های آموزشی با مقادیر محاسبه‌شده متناظر در شناسایی عیوب سیستم تعلیق غیرفعال

شتاب بدنه را در حضور نویز سفید نشان می‌دهد.

در نمودار شکل 20 مقایسه‌ای بین سیستم دارای کنترل و بدون آن برحسب اندازه نویز آورده شده است. نتایج بیانگر آن است که با توجه به کم بودن مقادیر سیگنال‌های باقی‌مانده در سیستم تعلیق فعال با افزایش میزان نویز احتمال اعلام هشدار نادرست توسط سیستم تشخیص عیب روبه افزایش می‌رود. این در حالی است که عملکرد سیستم تعلیق غیرفعال نسبت به نویز

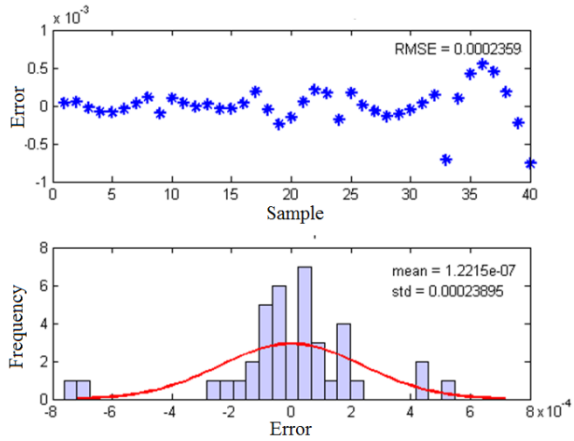

Fig. 14 The training data compliances with the calculated values in the FDD process (active suspension system with PID controller)

شکل 14 میزان انطباق داده‌های آموزشی با مقادیر محاسبه‌شده متناظر در شناسایی عیوب (تعلیق فعال با کنترل PID)

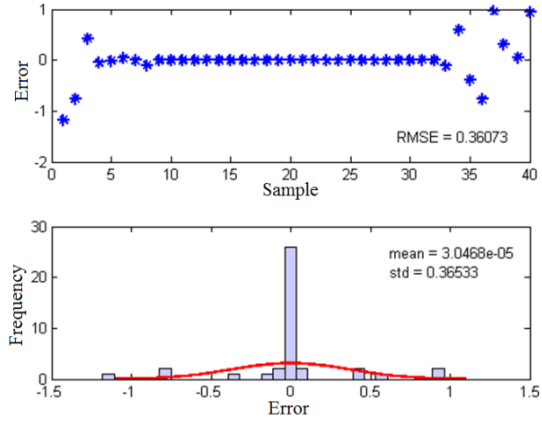

Fig. 15 The training data compliances with the calculated values in the FDD process (active suspension system with fuzzy controller)

شکل 15 میزان انطباق داده‌های آموزشی با مقادیر محاسبه‌شده متناظر در شناسایی عیوب (تعلیق فعال با کنترل فازی)

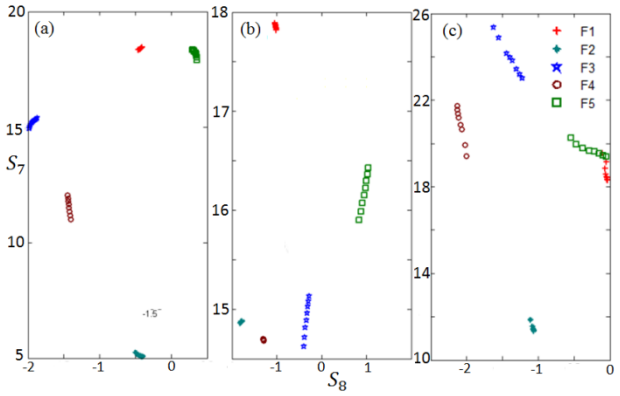

Fig. 16 Clustering features of S7 and S8 in the FDD process a- passive b- active with PID controller c- active with fuzzy controller

شکل 16 خوشه‌سازی مشخصه‌های S_7 و S_8 در فرایند شناسایی عیوب سیستم تعلیق، الف- تعلیق غیرفعال، ب- تعلیق فعال با کنترل PID، ج- تعلیق فعال با کنترل فازی

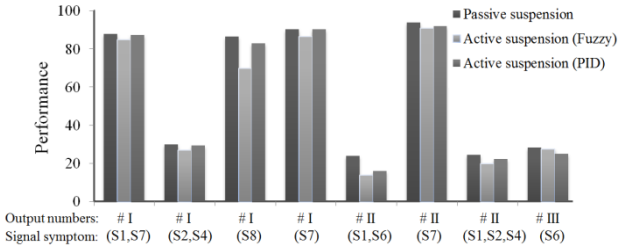

Fig. 17 Influence of the control unit in fault detection process

شکل 17 تأثیر وجود واحد کنترل در شناسایی عیوب سیستم

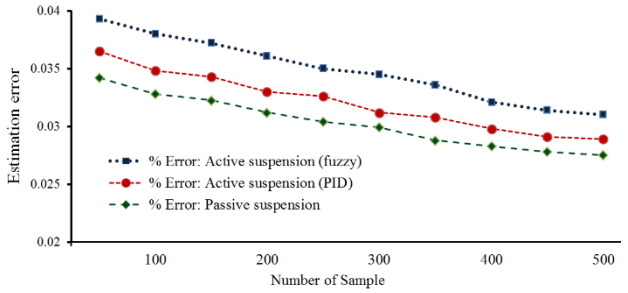

Fig. 18 Influence of different control units on the fault size estimation

شکل 18 تأثیر واحد کنترل در تخمین اندازه عیوب برحسب تعداد نمونه آزمایش

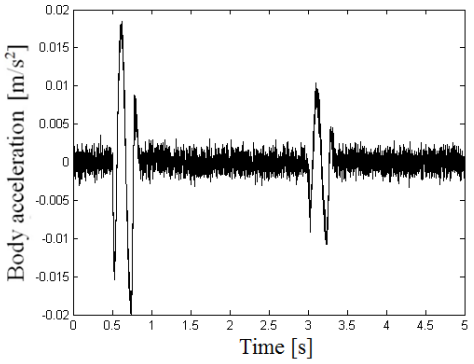

Fig. 19 Residual signal of the body acceleration under turbulence and noise

شکل 19 سیگنال باقی‌مانده مربوط به خروجی شتاب بدنه تحت تأثیر اغتشاشات و نویز

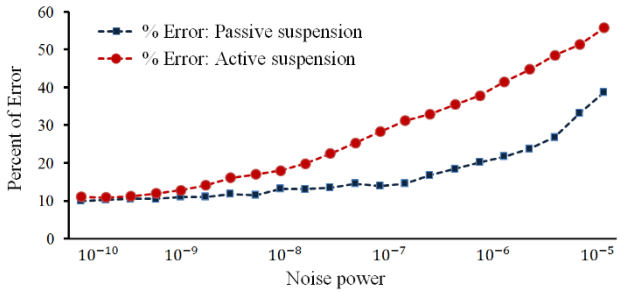

Fig. 20 Accuracy reduction of systems with control unit due to presence of noise

شکل 20 کاهش دقت در سیستم‌های دارای واحد کنترل‌کننده براثر وجود نویز

مقاوم‌تر بوده و با مقادیر به‌مراتب بزرگ‌تری از نویز و اغتشاشات در مقایسه با سیستم تعلیق فعال حساسیت نشان می‌دهد.

با توجه به این نکته که نوع ورودی سیستم به منظور شناسایی عیوب می‌تواند نقش قابل ملاحظه‌ای در کارایی سیستم عیب‌یاب ایفا کند، در راستای افزایش دقت در این بخش تأثیر ورودی‌های سیستم بر کارایی آن بررسی شده است. در نمودار شکل 21 به ترتیب تأثیر ورودی‌های جاده ورودی مثلثی، سینوسی و ورودی پله با میانگین دامنه‌های یکسان آمده است. در یک برآورد کلی شامل تمام شرایط در شناسایی عیوب سیستم، ورودی سینوسی نسبت به سایر ورودی‌ها منجر به پاسخ بهتر سیستم عیب‌یاب و شناسایی دقیق‌تر عیوب می‌شود، همچنین تأثیر نویز در سیستم موجب می‌شود تا فرایند شناسایی در سیستم‌های تعلیق فعال که دارای کنترل‌کننده است، نسبت به تعلیق غیرفعال با خطای بیشتری همراه شود.

5- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

اهمیت شناسایی عیب به سبب این‌که با شناسایی درست و به موقع آن می‌توان از کاهش بازده فرآیند و تولید یا حتی ازکارافتادگی یک سیستم جلوگیری کرد به‌خوبی مشخص و پذیرفته شده است. وجود برخی عوامل مختلف از جمله تأثیر واحدهای کنترل بر رفتار سیستم‌ها می‌تواند مانع تشخیص صحیح و به موقع عیوب توسط دستگاه‌های عیب‌یاب شود. واحدهای کنترل با دخالت در رفتار سیستم موجب عملکرد مطلوب آن می‌شوند، در نتیجه خروجی‌های سیستم در سیستم‌های دارای واحد کنترل همیشه متأثر از واحد کنترل است. یکی از موارد مهم در عیب‌یابی سیستم‌های مجهز به کنترل‌کننده ضرورت اطلاع از میزان اختلال و تأثیر واحد کنترل‌کننده در شناسایی عیوب احتمالی است. طراحی سیستم عیب‌یاب به نحوی‌که واحد کنترل کمترین اثر را در شناسایی عیب داشته باشد، می‌تواند در بهبود عملکرد کلی سیستم مؤثر و راهکار نوینی را در بحث معیارهای طراحی کنترل‌گر ارائه دهد.

در راستای انجام این مهم مدل‌های مناسب برای سیستم تعلیق فعال و غیرفعال شبیه‌سازی و شناسایی عیوب در آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج آزمون‌های متعدد مشخص می‌شود شناسایی نوع عیوب و اندازه آن به ترتیب در سیستم تعلیق غیرفعال، فعال با کنترل PID و کنترل فازی با خطای کمتری همراه است. همچنین مقادیر متوسط باقی‌مانده‌ها در سیستم‌های دارای واحد کنترل بسته به میزان دقت آن کوچک‌تر از سیستم‌های بدون واحد کنترل است. این کاهش اندازه مقادیر سیستم عیب‌یاب را نسبت به نویز و اغتشاشات بسیار حساس کرده و موجب می‌شود در سیستم تعلیق فعال با افزایش میزان نویز احتمال اعلام هشدار نادرست توسط سیستم تشخیص عیب به‌شدت روبه افزایش رود. این در حالی است که عملکرد سیستم تعلیق غیرفعال نسبت به نویز مقاوم‌تر بوده و با مقادیر به‌مراتب بزرگ‌تری از نویز و اغتشاشات در مقایسه با سیستم تعلیق فعال

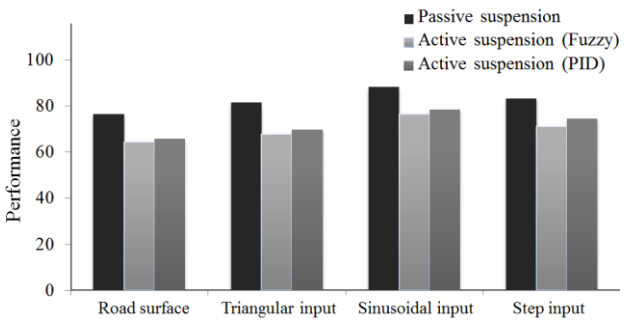

Fig. 21 Influence of the input signal in fault detection process (on the presence of noise)

شکل 21 تأثیر نوع سیگنال ورودی در دقت شناسایی عیوب سیستم (در حضور نویز)

حساسیت نشان دهد. بکارگیری ورودی‌های مناسب برای تحریک سیستم از جمله عوامل تأثیرگذار در عیب‌یابی سیستم محسوب می‌شود. برای جبران بخشی از تأثیرات نامطلوب کاهش کارایی در شناسایی عیوب استفاده از حسگرها و تجهیزات حساس‌تر که هزینه به مراتب بیشتری دارند، در دستگاه‌های مجهز به واحد کنترل ضروری به نظر می‌رسد.

6- مراجع

[1] F. Baghernezhad, K. Khorasani, Computationally intelligent strategies for robust fault detection, isolation, and identification of mobile robots, *Neurocomputing*, Vol. 171, No. 1, pp. 335-346, 2016.

[2] A. Taheri-Garavand, M. Omid, H. Ahmadi, S. S. Mohtasebi, G. M. Carlomagno, Intelligent fault diagnosis of cooling radiator based onthermal image processing and artificial intelligence techniques, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 2, pp. 240-250, 2017. (in persian فارسی)

[3] F. Serdio, E. Lughofer, K. Pichler, T. Buchegger, H. Efendic, Residual-based fault detection using soft computing techniques for condition monitoring at rolling mills, *Information Sciences* Vol. 259, No. 1, pp. 304-320, 2014.

[4] H. Ziaiefar, M. Amiryan, M. Ghodsi, F. Honarvar, Y. Hojjat, Ultrasonic damage classification in pipes and plates using wavelet transform and SVM, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 5, pp. 41-48, 2015 (in persian فارسی).

[5] S. Aouaouda, M. Chadli, M. Boukhnifer, H. R. Karimi, Robust fault tolerant tracking controller design for vehicle dynamics: A descriptor approach, *Mechatronics*, Vol. 30, No. 1, pp. 316-326, 2015.

[6] D. Bustan, N. Pariz, S. K. H. Sani, Robust fault-tolerant tracking control design for space craft under control input saturation, *ISA Transactions*, Vol. 53, No. 4, pp. 1073-1080, 2014.

[7] A.-M. Zou, K. Kumar, Adaptive fuzzy fault-tolerant attitude control of space-craft, *Control Engineering Practice*, Vol. 19, No. 1, pp. 10-21, 2011.

[8] H. Niemann, Fault tolerant control based on active fault diagnosis, *American Control Conference*, Portland, OR, USA, June 8-10, 2005.

[9] Y. Zhang, J. Jiang, Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control system, *Annual Reviews in Control*, Vol. 32, No. 2, pp. 229-252, 2008.

[10] J. Jiang, X. Yu, Fault tolerant control systems: A comparitive study between active and passive approaches, *Annual Reviews in Control*, Vol. 36, No. 1, pp. 60-72, 2012.

[11] A. Mirzaee, K. Salahshoor, Fault diagnosis and accommodation of nonlinear systems based on multiple model adaptive unscented kalman filter and switched MPC and H-infinity loop shaping controller, *Process Control*, Vol. 22, No. 3, pp. 626-634, 2012.

[12] H. Khebbache, M. Tadjine, S. Labiod, Adaptive sensor-fault tolerant control for a class of MIMO uncertain nonlinear systems: Adaptive nonlinear filter-based dynamic surface control, *the Franklin Institute*, Vol. 353, No. 6, pp. 1313-1338, 2016.

[13] F. Shi, R. Patton, An active fault tolerant control approach to an offshore wind turbine model, *Renewable Energy*, Vol. 75, pp. 788-798, 2015.

[14] D. Fischer, R. Isermann, Mechatronic semi-active and active vehicle suspensions, *Control Engineering Practice* Vol. 12, No. 11, pp. 1353-1367, 2004.

[15] M. Pazhoohiyani, M. Moavenian, M. E. M. Heravi, Identification of broken needle in single jersey circular knitting machine using neural network on yarn fluctuations signals, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 16, pp. 339-348, 2015 (in persian فارسی).

[16] S. A. H. Sabzevari, M. Moavenian, Sound localization in plates using low cost acoustical sensors, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 6, pp. 190-196, 2015 (in persian فارسی).

[17] Y. M. Sam, J. H. S. Osman, Sliding mode control of a hydraulically actuated active suspension *Jurnal Teknologi*, Vol. 44, pp. 37-48, 2006.

[18] A. Karami-Mollaee, Design of dynamic sliding mode controller for active suspension system, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 2, pp. 51-58, 2016 (in persian فارسی).

[19] H. Li, H. Liu, H. Gao, P. Shi, Reliable fuzzy control for active suspension systems with actuator delay and fault, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol. 20, No. 2, pp. 342-357, 2012.

[20] J. Lin, R.-J. Lian, Intelligent control of active suspension systems, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 58, No. 2, pp. 618-628, 2011.

[21] O. Demir, I. Keskin, S. Cetin, Modeling and control of a nonlinear half-vehicle suspension system: A hybrid fuzzy logic approach, *Nonlinear Dynamics*, Vol. 67, No. 3, pp. 2139-2151, 2012.

[22] G. Priyandoko, M. Mailah, H. Jamaluddin, Vehicle active suspension system using skyhook adaptive neuro active force control, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 23, No. 3, pp. 855-868, 2009.

[23] J. O. Pedro, O. A. .Dahunsi, Neural network based feedback linearization control of a servo-hydraulic vehicle suspension system, *Applied Mathematics and Computer Science*, Vol. 21, No. 1, pp. 137-147, 2011.

[24] H. Gao, J. Lam, C. Wang, Multi-objective control of vehicle active suspension systems via load-dependent controllers, *Sound and Vibration*, Vol. 290, No. 3-5, pp. 654-67, 2006.

[25] H. Li, X. Jing, H. R. Karimi, Output-feedback-based H∞ control for vehicle suspension systems with control delay, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 61, No. 1, pp. 436-446, 2014.

[26] M. Sunwoo, K. C. Cheok, N. Huang, Model reference adaptive control for vehicle active suspension systems, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 38, pp. 217-222, 1991.

[27] M. Baghaeian, A. A. Akbari, Improvement of vehicle stability by H-Infinity adaptive fuzzy controller: A new VGS model, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 9, pp. 37-46, 2016. (in persian فارسی)

[28] Z. Liu, C. Luo, D. Hu, Active suspension control design using a combination of LQR and backstepping, *Control Conference*, CCC 2006. Chinese, 7-11 Aug. 2006, pp. 123-125.

[29] Y. M. Sam, M. R. H. A. Ghani, N. Ahmad, LQR controller for active car suspension, *2000 TENCON Proceedings*, 24-27 Sept. 2000, pp. 441-444.

[30] H. R. Taghirad, A. Shariati, Robust control of a quarter active suspension system with hydraulic actuator, *Proceedings of The 11th Iranian Conference on Electrical Engineering*, Shiraz-Iran, May 2003. (in persian فارسی).