

Fault Diagnosis Based on Model and Dynamic Behavior of Vehicle Suspension System

M. Shahab, M. Moavenian*

Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University, Mashhad, Iran

ABSTRACT: This research, proposes a new effective and practical method, based on the model and dynamic behavior of vehicles for accurate and fast fault diagnoses of their suspension system. So far, a variety of complicated and impractical algorithms have been presented to identify the suspension system faults. In this method, there is no need to use special equipment and tests to diagnosis the fault, in the event of fault appearance, whenever the vehicle passes over obstacles with a necessary excitation threshold such as a speed bumper, the user is alerted, accordingly the position and size of the fault are determined. Designing a suitable structure and using neural-fuzzy networks to identify faults plays an important role in reducing the error of fault diagnosis. Reducing the number, type of sensors (using only the accelerometer sensor), not relying on high sample rates, low-cost and easy to use are other advantages of the proposed method. The fault diagnosis system performance and implementation ability is verified and confirmed by designing and conducting different experiments.

Review History:

Received: 20 Apr. 2018

Revised: 28 Jun. 2018

Accepted: 17 Jul. 2018

Available Online: 30 Jul. 2018

Keywords:

Fault detection and diagnosis

Vehicle suspension systems

Dynamic behavior

Neuro-fuzzy network

1- Introduction

The available published papers and researches in the field of vehicle fault detection can mainly be divided into two main branches: identification of faults in vehicles engine and other components (driveline, braking, steering and suspension). Suspension is a part of the chassis system which plays an important role in a vehicle's behavior and performance. Many intricate methods and algorithms based on analytical models, knowledge and data-based methods have so far been employed to identify and diagnose the suspension system's faults [1-5]. Although their accuracy is of an acceptable level in diagnosing faults, the complexity and obstacles existing in their practical implementation, requires using special and supplementary equipment and neglecting some parameters such as the effects of noise and disturbances, which lead to inefficiency and unpractical use of algorithms (false warnings and fault predictions). The effective and simple to use proposed method for fault diagnoses processes and analyses the signals received from acceleration sensors. The selection of appropriate and deterministic output signals, utilizing the least possible number of them to determine the parameters of a system with a relatively simple, accurate and cost-effective approach is considered as a major feature of this research.

2- Diagnosing Faults of the Suspension System

In the present research, the capability of neural networks in training and the ability of the fuzzy system in approximate reasoning, are utilized by employing the fuzzy-neural systems

with fuzzy clustering techniques in the suspension system fault diagnosis process. The overall diagnosis process is divided into two main stages of training and testing. At the test stage (Fig. 1), the characteristic signs of the residual faults are considered as inputs, whenever these attributes are matched with a class of faults, the system output will specify a number representing the corresponding fault [6]. In practical situations, several faults or defects can be considered for the suspension system. However, in this study, with regard to the existing limitations, only three cases including shock absorber, springs and tires faults are investigated, when faults are considered as reduction of the damping rate, suspension springs stiffness and the tires air pressure, respectively. In order to achieve optimal performance and increase reliability of the proposed method, effective factors are investigated and optimal conditions for using the diagnostic system are determined. Simulation of the suspension system full model is carried using Matlab software.

3- Experimental Study

In real conditions, some factors, such as noise and disturbances, can prevent proper and on time detection of defects, so it is necessary to design and carry out practical tests and confirm the feasibility of implementing a fault diagnosis system in real conditions and ensuring its correct functioning, proper practical experiments have been designed and carried out. Fig. 2 shows the defected parts (spring and shock absorber) of the front suspension system. The type of test scenario in Fig. 3 is showing commonly used speed bumper on the road surface. Fig. 4 shows the position of accelerometer sensor and Fig. 5 the signals sample collected from accelerometer sensors in a healthy and faulty mode when the wheel has passed over a speed

*Corresponding author's email: moaven@um.ac.ir

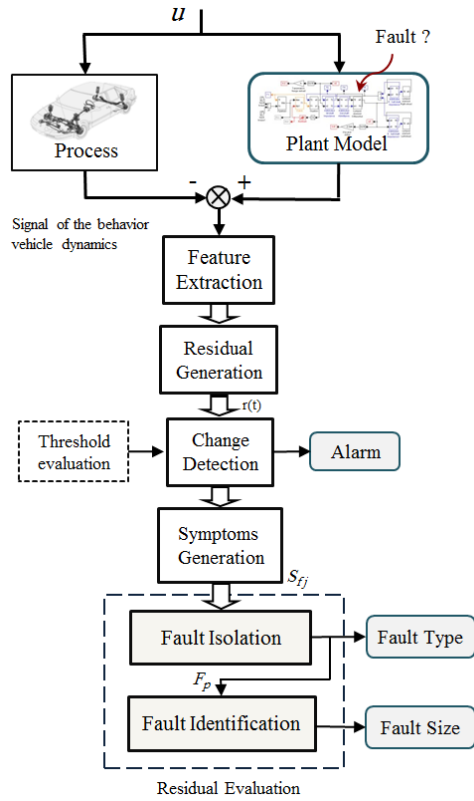


Fig. 1. Flow chart of the proposed FDD method



Fig. 2. Defected parts (spring and shock absorber) front wheel suspension



Fig. 3. Vehicle during test (Speed Bumper)



(a)



(b)

Fig. 4. Position of the accelerometers (a) on the body (b) close to the front wheel hub assembly

bumper. Table 1 shows the performance evaluation results of the proposed method for detecting the suspension system faults which are obtained from collected experimental data. As can be seen in the Table 1, despite error sources, including noise, disturbances, installation and measurement errors, low sample rates and other factors, the accuracy of the fault prediction by the proposed method is satisfactory. This proves capability of implementing the diagnosis system in practical situations.

4- Conclusions

Receiving fault alerts, plus obtaining information about the position and size of defects in case existence, when the car passes from an obstacle with a necessary excitation threshold (a speed bumper), provides an innovative and

Table 1. Performance evaluation of the diagnostic method

Faulty type	No. of sample	No. of Correct diagnosis	No. of Wrong diagnosis	No. of Undiagnosed	Accuracy of detection
$F_{3,1}$	30	25	1	4	83 %
$F_{3,2}$	30	26	0	4	86 %
$F_{1,1}$	30	24	3	3	80 %
$F_{1,2}$	30	24	2	4	80 %

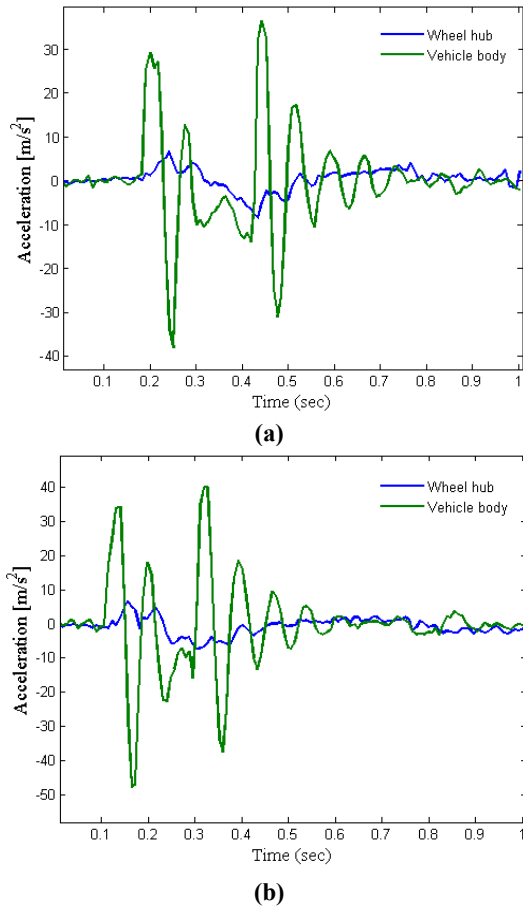
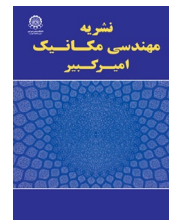


Fig. 5. The vertical acceleration signal of the wheel and vehicle body (front-right). a- healthy mode, b- faulty mode

effective solution to detect vehicle suspension system faults. Some more advantages of the proposed method are providing a new, simple and practical user friendly solution for the problem of fault detection. The proposed method has utilized the capabilities of fuzzy- neural network for an accurate and reliable diagnostic system while reducing the number and type of needed sensors and also benefitting from low cost.

References

- [1] D. Fischer, M. Borner, J. Schmitt, R. Isermann, Fault detection for lateral and vertical vehicle dynamics, *Control Engineering Practice*, 15 (2007).315-324.
- [2] Sh.Azadi, A.Soltani, Fault detection of vehicle suspension system using wavelet analysis, *Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, 47(4) (2009) 403-418.
- [3] S. Varrier, R. Morales-Menendez, J. Lozoya-Santos, e.a. D. Hernandez, Fault Detection in Automotive Semi-Active Suspension: Experimental Results, *SAE International*, 1 (2013) 1234.
- [4] G. Wang, S. Yin, Data-driven fault diagnosis for an automobile suspension system by using a clustering based method, *Journal of the Franklin Institute*, 351 (2014) 3231-3244.
- [5] R. Burdzik, Multidimensional identification of resonances analysis of strongly nonstationary signals, case study: Diagnostic and condition monitoring of vehicle's suspension system, *Applied Acoustics*, In Press, Corrected Proof, (2017).
- [6] M. Shahab, M. Moavenian, The disruptive effect of control units in fault detection of vehicle active suspension system with hydraulic actuator, *Modares Mechanical Engineering*, 17(4) (2017) 443-452 (In Persian).



تشخیص عیوب بر مبنای مدل و رفتار دینامیکی سیستم تعلیق خودرو

مهدی شهاب، مجید معاونیان*

دانشکده مهندسی، گروه مکانیک، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷/۰۱/۳۱
بازنگری: ۱۳۹۷/۰۴/۰۷
پذیرش: ۱۳۹۷/۰۴/۲۶
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷/۰۵/۰۸

کلمات کلیدی:

شناسایی و تشخیص عیب
سیستم تعلیق خودرو
رفتار دینامیکی
شبکه‌های عصبی فازی

خلاصه: در این پژوهش به منظور افزایش ایمنی و قابلیت اعتماد خودرو، روشی نو و کارآمد بر مبنای مدل و رفتار دینامیکی آن با قابلیت کاربرد عملی برای تشخیص دقیق و سریع عیوب سیستم تعلیق معرفی شده است. تاکنون روش‌های متنوعی برای شناسایی عیوب سیستم تعلیق ارائه شده است که اکثر آن‌ها شامل الگوریتم‌های پیچیده و فاقد کاربری مناسب در عمل می‌باشند. در روش پیشنهادی نیازی به استفاده از تجهیزات و آزمون‌های خاص جهت تشخیص عیوب نبوده و در صورت بروز عیب، در حین عبور خودرو از موانعی با دارا بودن آستانه تحریک لازم همانند سرعت‌گیرهای جاده، امکان اعلام هشدار به کاربر فراهم و موقعیت و اندازه آن تعیین می‌شود. طراحی ساختار مناسب و به کارگیری شبکه‌های عصبی فازی برای شناسایی عیوب نقش مهمی در کاهش خطای ردیابی آن‌ها نشان می‌دهند. کاهش تعداد و نوع حسگرهای مورد استفاده (فقط شتاب‌سنج) و عدم اتکا به نرخ داده‌برداری بالا از مزیت‌های دیگر روش پیشنهادی به شمار رفته، موجب استفاده آسان و کم‌هزینه می‌شوند. پس از بررسی میزان اثرگذاری شرایط و عوامل مختلف و انتخاب پارامترهای مناسب در فرایند تشخیص عیوب سیستم تعلیق، صحت‌گذاری عملکرد و قابلیت پیاده‌سازی سیستم عیب‌یاب با طرح و انجام آزمایشات بررسی و نتایج تأیید می‌شود.

۱- مقدمه

تاکنون الگوریتم‌ها و روش‌های پیچیده زیادی مبتنی بر مدل‌های تحلیلی و روش‌های مبتنی بر دانش و داده برای شناسایی و تشخیص عیوب سیستم تعلیق به کار گرفته شده‌اند. هرچند میزان دقت در تشخیص عیوب در روش‌های فوق از سطح قابل قبولی برخوردار می‌باشد، لیکن پیچیدگی و موانع موجود در پیاده‌سازی آن‌ها در عمل، لزوم استفاده از تجهیزات خاص و اضافی و نادیده انگاشتن‌ها برخی موارد همچون تأثیرات نویز و اغتشاشات، باعث ناکارآمدی و عدم استفاده کاربردی از این الگوریتم‌ها شده و موجبات اعلام هشدار و پیش‌بینی نادرست عیوب را فراهم می‌آورد. عموماً یکی از چالش‌های موجود در طراحی سیستم‌های عیب‌یاب، قابلیت به کارگیری از آن‌ها در شرایط عملی و توجیه‌پذیر بودن آن‌ها می‌باشد.

سیستم تعلیق بخشی از سیستم‌های شاسی است که در رفتار و عملکرد خودرو نقش بسیار مهمی را بر عهده دارد. از مهم‌ترین وظایف سیستم تعلیق در خودروها، می‌توان به مواردی همچون، ایجاد شرایط جداسازی بدنه خودرو از

ناهمواری‌های جاده‌ای به منظور راحتی سفر بیشتر، ایجاد شرایط تماس دائمی بین تایر و جاده به منظور عملکرد مناسب تایر در حرکت طولی و عرضی خودرو، ایجاد شرایط مناسب برای پایدار خودرو از طریق رفتار مناسب در هنگام حرکت غلت و کله زنی اشاره نمود. با توجه به نتایج موفقیت‌آمیز پیاده‌سازی صنعتی در حوزه تشخیص عیوب موتور، سیستم انتقال قدرت و ترمز، به نظر می‌رسد جایگاه طراحی سیستم‌های عیب‌یاب برای سایر اجزا خودرو از جمله سیستم‌های متعلق به شاسی (سیستم تعلیق)، از اهمیت ویژه برخوردار باشد.

با توجه به بررسی‌ها و تحقیقات انجام‌شده و گستردگی مطالب در این زمینه، مقالات و پژوهش‌های موجود را عمدتاً می‌توان به دو بخش اصلی که یکی مربوط به شناسایی عیوب موتور خودروها و دیگری مربوط به سایر اجزا خودرو (سیستم انتقال قدرت، ترمز، فرمان و تعلیق) می‌باشد، تقسیم نمود. بررسی‌های انجام‌شده در خصوص شناسایی عیوب سیستم تعلیق را نیز می‌توان به دو بخش عمده وسایل نقلیه جاده‌ای و ریلی تقسیم نمود که در این بخش خلاصه‌ای از تحقیقات انجام‌شده در زمینه سیستم تعلیق وسایل نقلیه جاده‌ای آورده شده است.

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: moaven@um.ac.ir



در خصوص شناسایی عیوب در بخش حس گرها و اجزا تشکیل دهنده سیستم‌های تعلیق خودروها، ایزرمن و همکاران [۱]، با معرفی سیستم‌های کنترل شاسی به صورت سراسری و بررسی تشخیص عیب بر مبنای مدل در زیرسیستم‌ها با استفاده از مدل یک‌چهارم خودرو در تغییرات ضریب میرایی و ارائه دو الگوریتم متفاوت تشخیص عیب برای سیستم تعلیق و مقایسه مزایای استفاده از آن‌ها به کمک اندازه‌گیری‌های واقعی، موجب افزایش قابلیت اطمینان، نگهداری و ایمنی خودرو شده‌اند. همچنین در پژوهشی دیگر [۲]، برای نظارت بر اجزا در سیستم‌های تعلیق و ترمز خودروها، استفاده از روش عیب‌یابی مبتنی بر مدل به طراحی یک عیب‌یاب اتومات با طبقه‌بندی مشخصه‌های^۱ تولیدشده، پیشنهاد نموده‌اند و نتایج را با اندازه‌گیری و آزمودن عملی خودرو تأیید نموده‌اند. فیشر^۲ و ایزرمن [۳] با روش ارائه‌شده مبتنی بر مدل جهت ردیابی و تعیین موقعیت عیوب، راهکار قابل اطمینانی را برای تشخیص ۱۳ عیب حس گر و خطاهای فرایند در سیستم تعلیق فعال خودرو از جمله میزان انحراف و عیوب بهره^۳، اصطکاک، نشستی و گرفتگی را فراهم می‌کند. توسعه و پیشرفت در سیستم‌های خودرو، افزایش یکپارچه‌سازی حس گرها، ریزپردازنده‌ها و محرک‌ها برای بهبود کارایی اجزاء خودرو را در پی داشته، در نتیجه نیاز به تشخیص عیب به‌طور چشمگیری افزایش یافته است [۴]. در تحقیقی دیگر برای طراحی ساختار متناسب و موقعیت بهینه حسگرها از نظر تعداد و مکان آن‌ها روشی پیشنهادشده که مقادیر داده‌های اندازه‌گیری شده مشابه، حاوی بیشترین اطلاعات مفید درباره شرایط و عملکرد خودرو باشد. اثربخشی شناسایی سیستم و طراحی بهینه موقعیت حس گرها، با استفاده از شبیه‌سازی داده‌های آزمون از مدل یک‌چهارم دو درجه آزادی بعلاوه مدل‌های کامل‌تر از خودرو شامل مدل‌های چهارچرخ با بدنه انعطاف‌پذیر، توسط متالیدیس و همکاران تأیید گردیده است [۵].

چپسن و سین [۶]، طراحی و پیاده‌سازی یک سیستم عیب‌یاب هوشمند برای سیستم تعلیق فعال وسایل نقلیه سنگین بررسی و در آن روشی برای مانیتورینگ کامل سیستم به‌وسیله تقسیم کردن آن به زیرسیستم‌های ساده‌تر و فاقد پیچیدگی برای تحلیل و توسعه پیشنهاد داده‌اند. هدف پژوهش تعریف روش عملی و قابل استفاده برای ردیابی عیوب با در نظر گرفتن پارامترهای غیرخطی در خودروهای واقعی می‌باشد. در مقاله‌ای دیگر، ایزرمن و همکاران [۷] پس از بررسی اصول مختلفی از سیستم‌های تعلیق با ضرایب فنریت و میرایی متغیر، مدل ریاضی از این سیستم‌ها را به‌دست‌آورده و نشان داده‌اند که چگونه پارامتر مجهول را می‌توان به‌طور تجربی از طریق روش تخمین

پارامتر با استفاده از سنجش شتاب بدنه، شتاب چرخ و میزان جابجایی تعلیق در ساختارهای مختلف به دست آورد. شمس‌الدین و همکاران [۸]، عیب‌یابی حس گرها با استفاده از روش مبتنی بر مدل برای یک نمونه سیستم غیرخطی تعلیق فعال خودرو را بررسی و در روش فوق از مدل سیستم و بانکی از داده‌های روی‌تگر برای تولید باقیمانده استفاده نمودند. در این تحقیق تنها خرابی کامل حس گرها در نظر گرفته‌شده و برای نشان دادن استراتژی پیشنهادی از شبیه‌سازی استفاده‌شده است. از آنجاکه روش‌های مبتنی بر مدل به توصیف ریاضی از سیستم تکیه می‌کنند، زمینه‌های بیشتری به‌منظور تشخیص عیب را شامل می‌شوند و از مزایای استفاده از آن‌ها، عدم نیاز به حس گرهای اضافی می‌باشد. کاشی و همکاران [۹] عیب‌یابی مبتنی بر مدل بر روی یک سیستم کنترل وسیله نقلیه اعمال‌شده است که بر توصیف ریاضی ساده از سیستم تکیه می‌کند و عملکرد مطلوبی در شناسایی عیوب در مقابل اغتشاشات و یا تأثیرات عدم قطعیت مدل سیستم را دارد. ایزرمن^۴ و همکاران [۱۰]، به‌منظور عیب‌یابی سیستم تعلیق خودرو، رفتار دینامیکی آن را به دو دسته عمودی^۵ و جانبی^۶ تقسیم می‌کنند و با استفاده از آن تشخیص عیب به دو روش، بر مبنای مدل فرایند و سیگنال بررسی می‌شود. ردیابی عیوب برای حس گرها و اجزا سیستم تعلیق بررسی‌شده و برای تولید مشخصه‌ها از روش‌های تخمین پارامتر و معادلات قیاسی استفاده‌شده است. با توجه به الگوهای متفاوت حاصل از تغییر و با استفاده از منطق فازی در عیب‌یابی، عیوب کوچک با دقت تفکیک و جداسازی خوبی ردیابی شده‌اند. ردیابی ۱۴ نوع عیب در بخش حس گرهای مربوط به زاویه فرمان، زاویه پیچش، شتاب جانبی و سرعت چرخ‌ها با بررسی رفتار دینامیک جانبی خودرو صورت می‌گیرد. ردیابی عیوب در سیستم تعلیق و حس گرهای مربوطه نیز مرتبط با بررسی دینامیک عمودی خودرو می‌باشد. آزادی و همکاران [۱۱]، تشخیص عیب در سیستم تعلیق خودرو را با استفاده از تبدیل موجک مورد بررسی قرار داده‌اند. در این مقاله بر پایه تبدیل موجک پیوسته، محتوای فرکانسی سیگنال‌ها با تعیین سهم توزیع انرژی کل سیگنال در یک مقیاس خاص با بکارگیری موجک مورلت آشکارشده است. تشخیص خرابی در کمک‌فنرها و نگه‌دارنده‌های لاستیکی آن‌ها که به ترتیب به صورت کاهش نیروی میرایی و لقی در اتصالات فرض شده، برای سیستم تعلیق از نوع غیرفعال مورد بررسی قرار گرفته است. در پژوهشی دیگر [۱۲]، روش عیب‌یابی پیشنهادی با استفاده از سیستم متفاوت پارامتر خطی^۷، به‌طور تجربی با سیستم‌های جاسازی‌شده اعتبارسنجی می‌شود و توان تشخیص عیوب حس گر

4 Isermann

5 Vertical

6 Lateral

7 Linear Parameter Varying systems

1 Symptoms

2 Fischer

3 Gain faults

آن‌ها به منظور عیب‌یابی پارامترهای سیستم با قابلیت اندازه‌گیری نسبتاً ساده که از لحاظ هزینه و دقت مقرون به صرفه باشند از ویژگی‌ها و مزیت‌های عمده تحقیق محسوب می‌شوند.

در حال حاضر روش‌های مبتنی بر مفاهیم محاسبات نرم به عنوان روش‌های قدرتمندی در طراحی سیستم‌های عیب‌یاب محسوب می‌شوند [۱۶-۱۹]. توانایی‌های شبکه‌های عصبی در آموزش سیستم و قابلیت‌های سیستم فازی در استدلال تقریبی، موجب به کارگیری سیستم‌های فازی-عصبی و تکنیک‌های خوشه سازی فازی، در شناسایی عیوب شده است. در این پژوهش پس از معرفی روش تشخیص عیوب، یک مدل کامل از سیستم تعلیق شبیه‌سازی شده و سپس عملکرد روش پیشنهادی برای تشخیص عیوب به همراه شرایط مناسب و پارامترهای تأثیرگذار بر روی آن بررسی می‌شود. در انتها نیز برای اعتبارسنجی و امکان‌پذیری پیاده‌سازی سیستم تشخیص عیب، آزمایشات عملی بر روی آن انجام می‌شود.

۲- روش تشخیص عیوب

شناسایی و تشخیص عیوب به وجود آمده در ماشین‌آلات و فرایندها، تأثیر زیادی در بهبود عملکرد و قابلیت اعتماد آن‌ها را دارند. این امر در سیستم‌هایی همچون خودرو که بروز عیوب حتی ناچیز، منجر به خسارات مالی و جانی غیرقابل جبران می‌شود، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این راستا و برای اطمینان از اعلام هشدار صحیح و به موقع و به حداقل رساندن احتمال خطای تشخیص عیوب خودرو ساختار و روش مناسب ارائه شده است. در این پژوهش برای استفاده از قابلیت شبکه‌های عصبی در آموزش^۴ و توانایی سیستم فازی در استدلال تقریبی، از سیستم‌های فازی-عصبی انفیس^۵ همراه با تکنیک‌های خوشه‌سازی فازی، در فرایند عیب‌یابی سیستم تعلیق استفاده می‌شود. روند کلی عیب‌یابی به دو مرحله اصلی آموزش و آزمون تقسیم می‌شود. مرحله آموزش در روش عیب‌یابی استفاده شده بر پایه مدل، شامل موارد زیر می‌باشد:

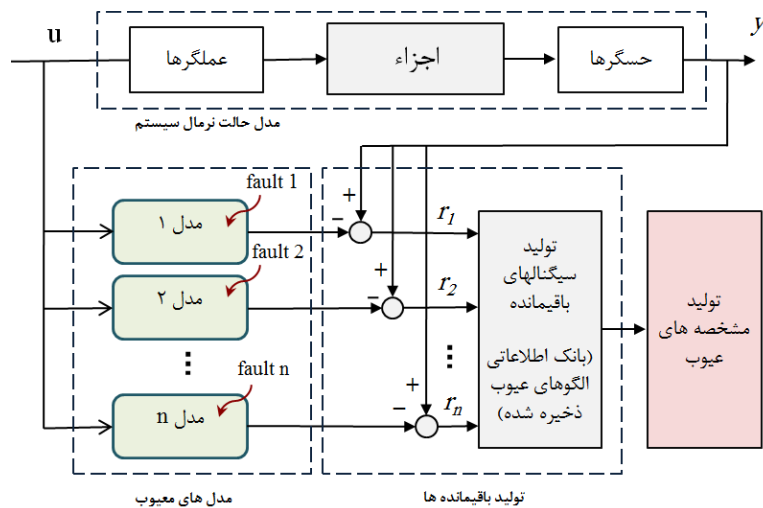
- مدل کردن وضعیت نرمال سیستم (در غیاب هرگونه عیب)
- مدل کردن وضعیت سیستم در حالت‌های معیوب
- تولید باقیمانده (استخراج تفاوت دو سیگنال وضعیت سالم و معیوب)
- استخراج مشخصه‌های مناسب از سیگنال‌های باقیمانده^۶ به دست آمده
- تولید بانک داده‌های عیوب با استفاده از مشخصه‌های سیگنال باقیمانده
- آموزش ساختار عصبی فازی برای تشخیص عیوب احتمالی بر اساس

و عملگرها را دارد. نتایج به دست آمده با شبیه‌سازی عددی، نشان از اثربخش بودن روش دارد. حفظ فشار مطلوب در لاستیک به فرمان‌پذیری خودرو، راحتی سرنشین و عملکرد بهتر ترمز و همچنین بهبود بهره‌وری سوخت و عمر تایر، کمک شایانی می‌کند. حامد و دیگران [۱۳]، با استفاده از نتایج آزمایشگاهی، تشخیص تأثیر باد تایر بر روی عملکرد سیستم تعلیق را با اندازه‌گیری شتاب عمودی بررسی نموده‌اند. در این آزمایش سیگنال‌های فشار تایر، ارتعاشات سیستم تعلیق و سرعت خودرو اندازه‌گیری شده و برای تجزیه و تحلیل سیگنال، از تبدیل فوریه بازمان کوتاه^۱ استفاده شده است. ونگ^۲ و همکاران [۱۴] یک روش مبتنی بر خوشه‌بندی برای تشخیص عیوب فنر و نظارت بر سیستم تعلیق خودرو توسط حسگرهای شتاب‌سنج ارائه دادند. متفاوت از بیشتر رویکردهای موجود، این روش به عنوان یک ابزار تشخیص عیوب و نظارت بر خط بدون داشتن اطلاعات مدل و یا ویژگی‌های عیوب شناخته شده، با استفاده از ویژگی داده‌محور خالص عمل می‌کند. علاوه بر این، روش پیشنهادی می‌تواند تغییرات ضرایب میرایی مختلف فنر را به عنوان یک عیب خاص به جای عیوب مختلف طبقه‌بندی کند. در نهایت اثربخشی روش پیشنهادی بر روی یک نمونه سیستم تعلیق مدل کامل خودرو نشان داده شده است. بوردزیک^۳ [۱۵] روش جدیدی را برای تجزیه و تحلیل چندبعدی سیگنال‌های متناوب ارائه داده و نتایج تحقیقات انجام شده بر روی خودروی شخصی واقعی اعمال شده است. این نتایج برای پردازش سیگنال جرم فنربندی شده و نشده سیستم تعلیق به طور جداگانه اعمال و خواص سیستم تعلیق و تأثیر عیوب کمک‌فنر در ایمنی و راحتی رانندگی بررسی شده است. نتایج به دست آمده، خواص جداسازی بسیار مناسب تخمینگرهای چندبعدی را برای انواع مختلف عیوب نشان می‌دهد.

با نظر به مقالات و پژوهش‌های صورت گرفته می‌توان گفت پیچیدگی و موانع موجود در پیاده‌سازی روش‌های ارائه شده در عمل و لزوم استفاده از تجهیزات خاص و غیره موجب ناکارآمدی و عدم استفاده کاربردی از این الگوریتم‌ها شده است. در این پژوهش، با توجه به نتایج بررسی‌های به عمل آمده، طراحی سیستم عیب‌یابی و وضعیت سنجی مجموعه تعلیق خودرو به صورتی که قابلیت نصب روی خودرو و کاربری لحظه‌ای را داشته باشد، انجام می‌شود. طراحی و به کارگیری یک سیستم عیب‌یاب ساده و توانمند با کاربری ساده و فاقد پیچیدگی‌های نصب بر اساس سیگنال‌های دریافت شده از حسگرها به لحاظ کاربردی مفید بوده و تحقیقات انجام شده را هدفمند می‌نماید. انتخاب سیگنال‌های خروجی مناسب و تعیین‌کننده و استفاده از تعداد حداقل ممکن

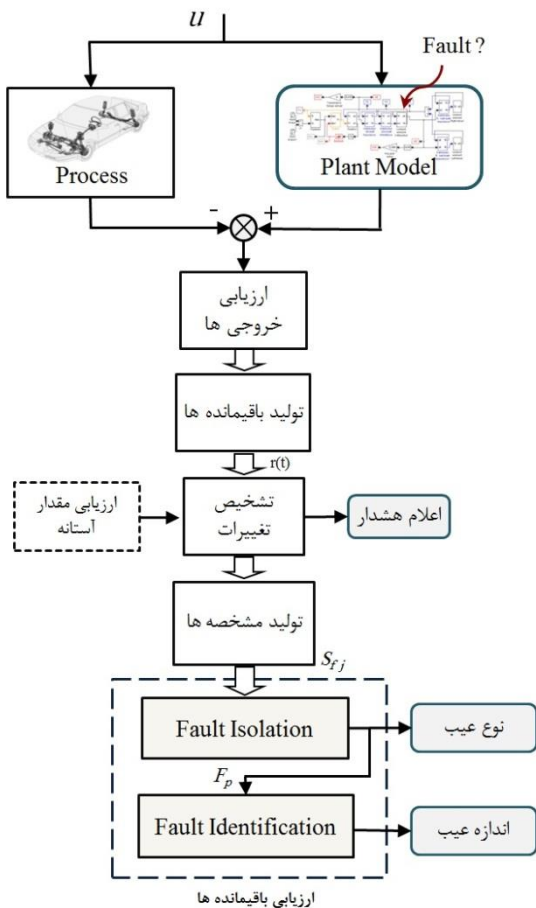
4 Training
5 ANFIS
6 Residual

1 Short-Time Fourier Transform (STFT)
2 Wang
3 Burdizik



شکل ۱: ساختار تولید پایگاه داده و ویژگی‌های هر عیب

Fig. 1. Database production structure and the symptoms of each fault



شکل ۲: نمودار جریان سیستم عیب‌یابی پیشنهاد شده

Fig. 2. Flow chart of the proposed diagnosis systems

مشخصه‌های منتخب

شکل ۱ ساختار تولید سیگنال باقیمانده در مرحله آموزش را با استفاده از مدل‌های ساخته‌شده برای حالت عیوب (۱ تا ...) که منجر به ذخیره‌سازی اطلاعات باقیمانده و ویژگی‌های هر عیب می‌گردد را نشان می‌دهد.

در مرحله آزمون، علائم مشخصه سیگنال‌های باقیمانده عیوب به‌عنوان ورودی محسوب شده و 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. با به‌کارگیری مناسب از مشخصه‌های مطلوب بانک داده‌های سیگنال‌های باقیمانده عیوب و روش توانمند طراحی‌شده، سیستم عیب‌یاب قادر است تا در صورت بروز عیوب احتمالی و تغییر در سیگنال‌های خروجی اندازه‌گیری شده سیستم، نوع و اندازه عیب را اعلام نماید. از موارد مهم و اساسی در نحوه عملکرد مطلوب سیستم‌های تشخیص عیب، دقت بالا و هشدار به‌موقع در مواقع بروز عیب می‌باشد. انتخاب بهینه شرایط و متغیرها موجب می‌شود تا الگوریتم پیشنهادی با ساختار طراحی‌شده و با استفاده از شبکه‌های عصبی-فازی باعث افزایش دقت در تشخیص عیوب با کاهش حجم پردازش اطلاعات شود. می‌توان گفت ساختار استفاده‌شده برای شناسایی و تشخیص عیوب در تحقیق حاضر، عملکرد مطلوبی را نسبت به سایر روش‌ها دارا می‌باشد (شکل ۲). در این ساختار نوع عیب در مواقعی از سوی سیستم اعلام می‌گردد که تطابق بین عیوب شناسایی‌شده وجود داشته باشد و احتمال هشدار اشتباه و فقدان آشکارسازی عیوب تقلیل یابد [۲۰]. برای محاسبه سیگنال‌های باقیمانده

Table 1. The symptom indexes extracted from residual signals

جدول ۱: مشخصه‌های استخراج شده سیگنال‌های باقیمانده

نماد	نوع مشخصه سیگنال	نماد	نوع مشخصه سیگنال
S_1	مقدار بیشینه	S_9	حد وسط
S_2	مقدار کمینه	S_{10}	میانگین سیگنال FFT
S_3	دامنه تغییرات	S_{11}	دامنه سیگنال FFT
S_4	مقدار میانگین	S_{12}	انحراف معیار سیگنال FFT
S_5	واریانس	S_{13}	S_1/Mean
S_6	انحراف معیار	S_{14}	S_2/Mean
S_7	چولگی	S_{15}	S_3/Mean
S_8	کشیدگی	S_{16}	S_6/Mean

تشخیص دقیق نوع عیب لازم است تا مشخصه‌های مختلفی از سیگنال‌های خروجی مورد ارزیابی قرار گیرند. ویژگی‌های استخراج شده از سیگنال‌های باقیمانده در فرایند شناسایی عیوب، در جدول ۱ آمده است. از آنجاکه وجود و عدم وجود عیب در سیستم مستقل از سطح عددی آن‌هاست، در تعدادی از مشخصه‌ها، مقادیر ویژگی بر مقدار میانگین تقسیم شده است. ورودی شبکه، ویژگی‌های استخراج شده از داده‌های باقیمانده بوده و خروجی سیستم، بیانگر وضعیت عیب می‌باشد. باید دقت نمود که انتخاب بردار ویژگی مناسب تأثیر بسزایی در میزان کارآمدی یک سیستم عیب‌یاب دارد.

۲-۲- معیار مناسب برای سنجش کارایی

برای تعیین میزان کارایی و دقت در فرایند تشخیص عیوب، از معیارهای متفاوتی می‌توان استفاده نمود. این معیارها را می‌توان هم برای مجموعه داده‌های آموزشی در مرحله یادگیری و هم برای مجموعه رکوردهای آزمایشی در مرحله آزمون استفاده نمود. برای معیار سنجش خطا می‌توان از همگرایی مقدار ریشه میانگین مربعات خطا^۱ استفاده نمود. این مقدار که همان خطای یادگیری است به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود [۱۲].

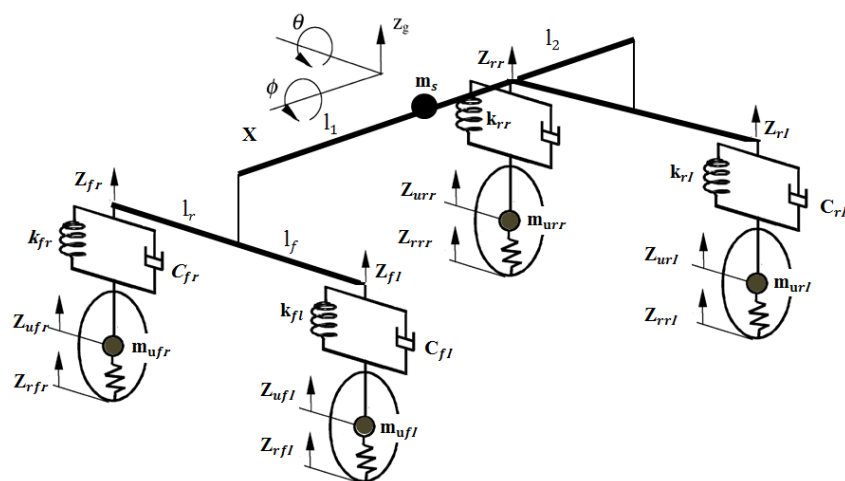
$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum E_n}{n}} \quad (1)$$

در رابطه بالا n تعداد کل تکرارها و E_n خطای تکرار n ام است. روند تغییرات این خطا برحسب تکرارهای الگوریتم یادگیری می‌بایست به حد مشخصی میل کند، به طوری که با افزایش تکرارها دیگر تغییری در میزان خطا ایجاد نشود. معیار همگرایی فوق هرچند به نوعی بیانگر مناسب بودن

ناشی از تفاضل سیگنال حالت نرمال و معیوب سیستم، سیگنال‌های حالت معیوب با اعمال ضرایب تصادفی در دامنه تعیین شده در مقادیر پارامترهای مدل مانند ضریب سختی فنر شبیه‌سازی شده و سپس با توجه به سیگنال باقیمانده مربوطه، تشخیص عیوب بررسی و پاسخ سیستم عیب‌یاب ثبت می‌گردد.

۲-۱- مشخصه‌های مناسب باقیمانده‌ها

به منظور استفاده از سیگنال‌های باقیمانده در فرایند عیب‌یابی لازم است تا تعدادی از مشخصه‌های سیگنال باقیمانده که بیان‌کننده رفتار آن‌ها می‌باشند استخراج شده و به عنوان ورودی مدل‌ها مورد استفاده قرار گیرند. از آنجاکه عیوب مختلف می‌توانند دارای الگوهای مشابه باشند، برای



شکل ۳: مدل کامل سیستم تعلیق خودرو

Fig. 3. Model of the full-vehicle suspension system.

1 Root mean squared error (RMSE)

خطی بدون میرایی مدل می‌شوند [۲۲].

معادلات دیفرانسیل حرکت با استفاده از قوانین حرکت نیوتن به شرح زیر است :

$$\begin{aligned} & -K_{fl}(z_{fl} - z_{ufl}) - K_{fr}(z_{fr} - z_{ufr}) \\ & -K_{rl}(z_{rl} - z_{url}) - K_{rr}(z_{rr} - z_{urr}) \\ & -C_{fl}(\dot{z}_{fl} - \dot{z}_{ufl}) - C_{fr}(\dot{z}_{fr} - \dot{z}_{ufr}) \\ & -C_{rl}(\dot{z}_{rl} - \dot{z}_{url}) - C_{rr}(\dot{z}_{rr} - \dot{z}_{urr}) \end{aligned} \quad (۳)$$

$$\begin{aligned} I_y \ddot{\theta} = & K_{fl}(z_{fl} - z_{ufl})l_1 + K_{fr}(z_{fr} - z_{ufr})l_1 \\ & -K_{rl}l_2(z_{rl} - z_{url}) - K_{rr}l_2(z_{rr} - z_{urr}) \\ & +C_{fl}l_1(\dot{z}_{fl} - \dot{z}_{ufl}) + C_{fr}l_1(\dot{z}_{fr} - \dot{z}_{ufr}) \\ & -C_{rl}l_2(\dot{z}_{rl} - \dot{z}_{url}) - C_{rr}l_2(\dot{z}_{rr} - \dot{z}_{urr}) \end{aligned} \quad (۴)$$

$$\begin{aligned} I_x \ddot{\phi} = & -K_{fl}(z_{fl} - z_{ufl})l_f + K_{fr}(z_{fr} - z_{ufr})l_r \\ & -K_{rl}l_f(z_{rl} - z_{url}) + K_{rr}l_r(z_{rr} - z_{urr}) \\ & -C_{fl}l_f(\dot{z}_{fl} - \dot{z}_{ufl}) + C_{fr}l_r(\dot{z}_{fr} - \dot{z}_{ufr}) \\ & -C_{rl}l_f(\dot{z}_{rl} - \dot{z}_{url}) + C_{rr}l_r(\dot{z}_{rr} - \dot{z}_{urr}) \end{aligned} \quad (۵)$$

$$\begin{aligned} m_{ufl}\ddot{z}_{ufl} = & K_{fl}(z_{fl} - z_{ufl}) + \\ & C_{fl}(\dot{z}_{fl} - \dot{z}_{ufl}) - K_{tfl}(z_{ufl} - z_{rfl}) \end{aligned} \quad (۶)$$

$$\begin{aligned} m_{ufr}\ddot{z}_{ufr} = & K_{fr}(z_{fr} - z_{ufr}) + C_{fr}(\dot{z}_{fr} - \dot{z}_{ufr}) \\ & -K_{tfr}(z_{ufr} - z_{rrr}) \end{aligned} \quad (۷)$$

$$\begin{aligned} m_{url}\ddot{z}_{url} = & K_{rl}(z_{rl} - z_{url}) + C_{rl}(\dot{z}_{rl} - \dot{z}_{url}) \\ & -K_{trl}(z_{url} - z_{rrl}) \end{aligned} \quad (۸)$$

Table 2. Nominal parameters of the full-vehicle suspension system

جدول ۲: مقادیر پارامترهای سیستم تعلیق مدل کامل خودرو [۲۳]

نشانگر عیب	متغیر	مقدار	تعریف
	M (kg)	۱۳۳۰ kg	جرم بدنه خودرو
	m_{fr}, m_{fl}	۴۷ kg	جرم فنربندی نشده جلو
	m_{rr}, m_{rl}	۴۷ kg	جرم فنربندی نشده عقب
$F_{1,1}, F_{1,2}$	C_{fr}, C_{fl}	۱۶۹۵ N/m/s	میرایی سیستم تعلیق جلو
$F_{2,1}, F_{2,2}$	C_{rr}, C_{rl}	۱۶۹۵ N/m/s	میرایی سیستم تعلیق عقب
$F_{3,1}, F_{3,2}$	K_{fr}, K_{fl}	۳۷۲۰۰ N/m	سختی فنر سیستم تعلیق جلو
$F_{4,1}, F_{4,2}$	K_{rr}, K_{rl}	۱۹۶۰۰ N/m	سختی فنر سیستم تعلیق عقب
$F_{5,1}, F_{5,2}$	K_{tfr}, K_{tfl}	2×10^5 N/m	سختی تایلر جلو
$F_{6,1}, F_{6,2}$	K_{trr}, K_{trl}	2×10^5 N/m	سختی تایلر عقب

ساختار برای پیش‌بینی درست عیوب می‌باشد ولی در خیلی از موارد عدم انطباق نتایج حاصل از تشخیص عیوب با معیار سنجش فوق وجود دارد. به بیان دیگر می‌توان گفت 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 قرار گرفته‌اند، به صورت رابطه (۲) تعریف شده است. در این رابطه n_{TP} تعداد موارد تشخیص صحیح، n_T تعداد کل آزمون‌ها و پی‌دی‌ار^۱ بیانگر دقت در تشخیص عیوب می‌باشد.

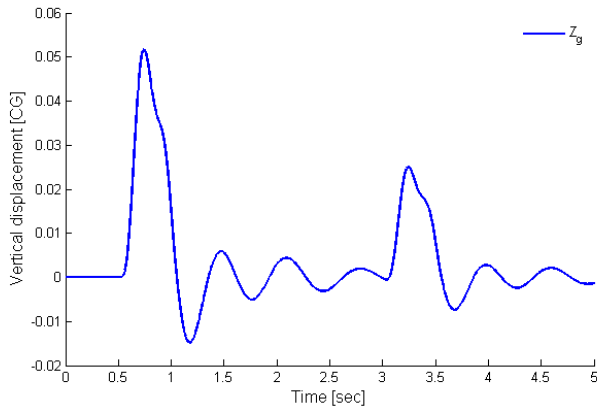
$$PDR (\%) = \frac{n_{TP}}{n_T} 100 (\%) \quad (۲)$$

به منظور مشخص کردن تفاوت بین عیوبی که به اشتباه شناسایی شده و موارد عدم تشخیص عیب، می‌توان از مقادیر حساسیت و پیش‌بینی مثبت استفاده نمود.

۳- شبیه‌سازی سیستم تعلیق خودرو

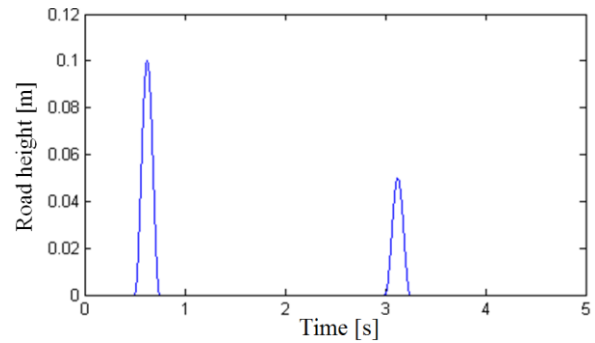
سیستم‌های تعلیق تأثیر مستقیمی بر روی میزان راحتی سرنشین‌ها، پایداری و فرمان‌پذیری خودرو دارند و عمدتاً به سه دسته فعال، غیرفعال و نیمه فعال تقسیم می‌شوند. در این پژوهش به علت تأثیر واحد کنترل بر اختلال در فرایند شناسایی عیوب [۲۰] و همچنین نوع خودرو استفاده شده در بخش آزمایشات عملی (خودرو با سیستم تعلیق غیرفعال)، از شبیه‌سازی مدل کامل سیستم تعلیق بهره گرفته شده است (شکل ۳). در سیستم تعلیق معمولاً خودرو به دو جرم فنربندی شده و فنربندی نشده تقسیم می‌شود. در این مدل معمولاً کل جرم بدنه خودرو را به عنوان جرم فنربندی شده در نظر می‌گیرند که در چهارگوشه خود به وسیله اجزای ارتباطی بر روی جرم فنربندی نشده قرار می‌گیرد. این مدل شامل هفت درجه آزادی می‌باشد، بدین ترتیب که سه درجه آزادی برای بدنه خودرو در نظر گرفته می‌شود، که این حرکات شامل نوسانات قائم^۲، حرکت کله زنی^۳ و غلتش حول محور طولی خودرو^۴ می‌باشد و چهار درجه آزادی دیگر مربوط به نوسانات در راستای عمود هر یک از چهار چرخ می‌باشد. برای ساده بودن، فرض می‌شود زاویه‌های غلتش و کله زنی کوچک است. تعلیق بین جرم فنربندی و غیر فنربندی به عنوان المان فنر خطی مدل‌سازی می‌شود، درحالی که لاستیک‌ها به صورت فنرهای ساده

- 1 Performance Diagnosis Rate (PDR)
- 2 Bounce
- 3 Pitch
- 4 Roll



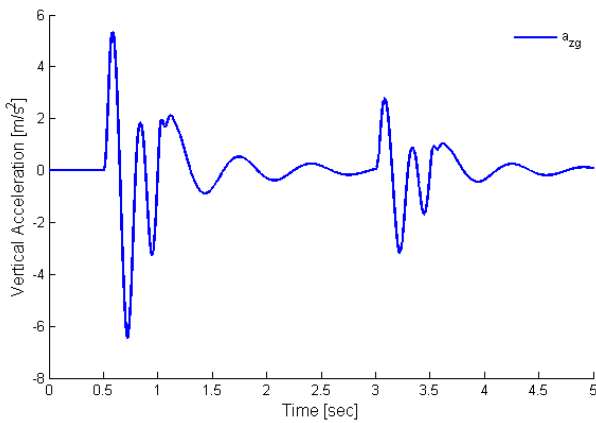
شکل ۵: سیگنال تغییر مکان عمودی مرکز جرم بدنه خودرو

Fig. 5. Vertical displacement signal of vehicle body mass center



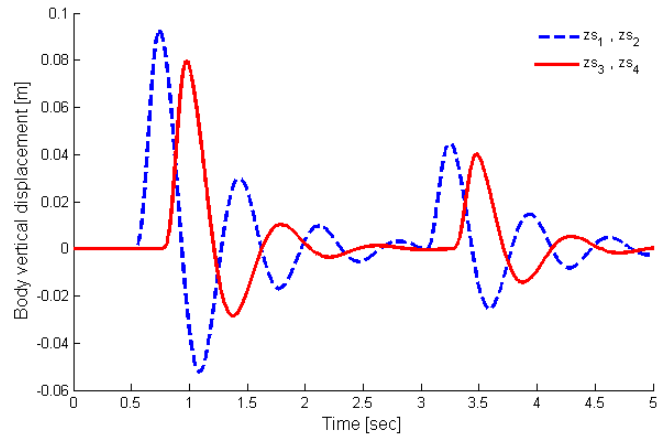
شکل ۴: سیگنال اغتشاش ورودی (پروفیل جاده)

Fig. 4. Input disturbance of a bump configuration



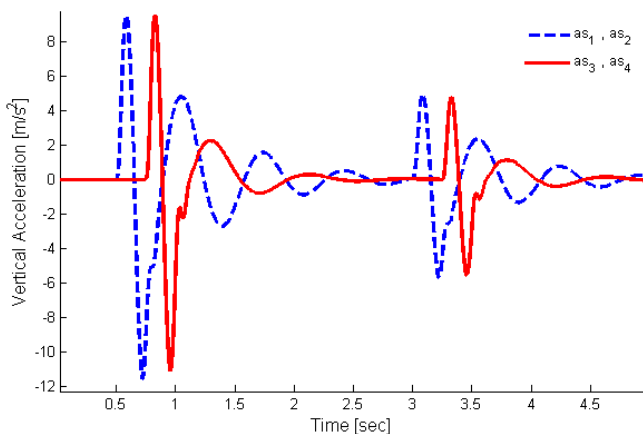
شکل ۷: سیگنال شتاب عمودی مرکز ثقل خودرو

Fig. 7. Vertical acceleration signal of the vehicle's center of gravity



شکل ۶: سیگنال تغییر مکان عمودی جرم فنربندی شده

Fig. 6. Vertical displacement signal of sprung mass



شکل ۸: سیگنال شتاب عمودی جرم فنربندی شده

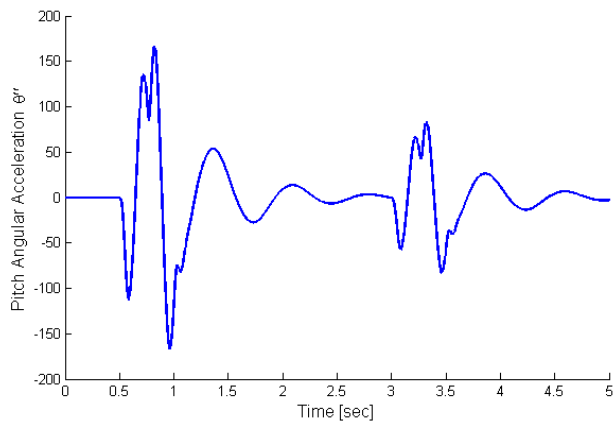
Fig. 8. Vertical acceleration signal of sprung mass

$$m_{urr}\ddot{z}_{urr} = K_{rr}(z_{rr} - z_{urr}) + C_{rr}(\dot{z}_{rr} - \dot{z}_{urr}) - K_{trr}(z_{urr} - z_{rrr}) \quad (9)$$

معادلات سینماتیکی متعلق به چهار نقطه گوشه‌ای بدنه خودرو :

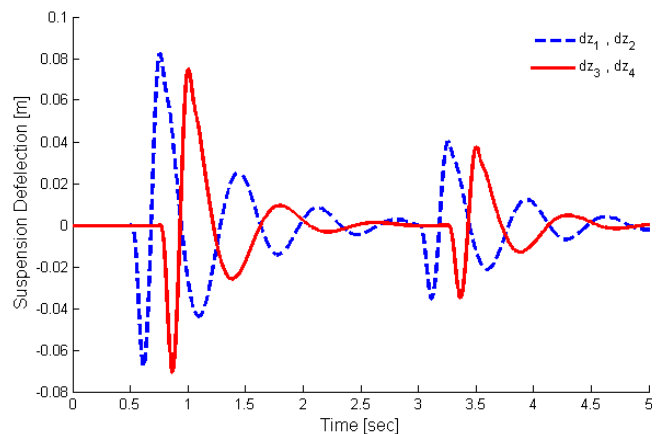
$$\begin{aligned} z_{fl} &= z - l_1\theta + l_f\varphi \\ z_{fr} &= z - l_1\theta - l_r\varphi \\ z_{rl} &= z + l_2\theta + l_f\varphi \\ z_{rr} &= z + l_2\theta - l_r\varphi \end{aligned} \quad (10)$$

با توجه به روابط به‌دست‌آمده، مدل نرم‌افزاری سیستم تعلیق کامل خودرو در نرم‌افزار متلب برای بررسی روش پیشنهادی تشخیص عیوب، شبیه‌سازی و استفاده می‌شود. مقادیر پارامترهای سیستم تعلیق مدل کامل خودرو، برای یک نمونه خودرو مشابه که در بخش آزمایشات عملی از آن



شکل ۱۰: سیگنال مربوط به شتاب زاویه‌ای بدنه خودرو

Fig. 10. Angular acceleration signal of vehicle body



شکل ۹: سیگنال جابجایی جرم فنربندی شده

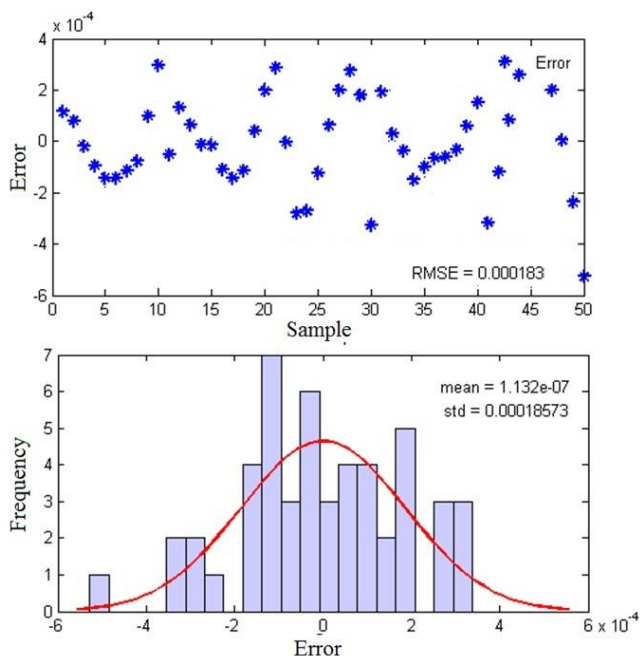
Fig. 9. Suspension deflection signal of sprung mass

فرض می‌شود خودرو با سرعت ثابت حرکت می‌کند، آنگاه جابجایی عمودی از طرف جاده به‌عنوان اغتشاش به آن وارد می‌شود. در شبیه‌سازی انجام‌شده، سیگنال اغتشاشی جاده برای برآمدگی‌های سطح با دامنه ۱۰ و ۵ سانتی‌متر به‌وسیله رابطه (۱۱) توصیف می‌شود و در شکل ۴ نشان داده‌شده است.

استفاده‌شده در جدول ۲ آورده شده است. ستون انتهایی جدول (نشانگر عیب) معرف عیب به وجود آمده در پارامتر مربوطه می‌باشد.

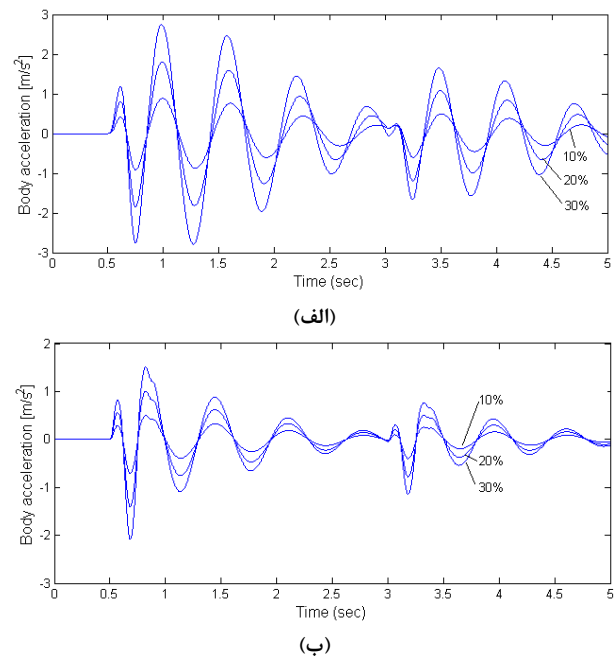
۳-۱- نتایج شبیه‌سازی سیستم تعلیق

برای مشاهده نحوه پاسخ سیستم در خروجی‌های مختلف به نوع ورودی،



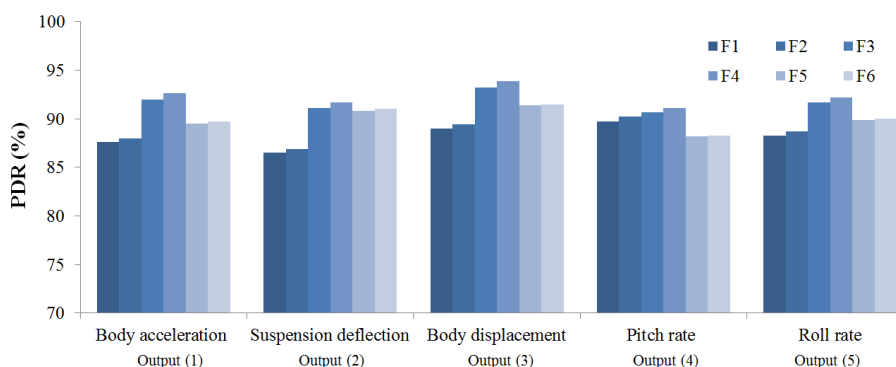
شکل ۱۲: میزان انطباق داده‌های آموزشی با مقادیر محاسبه‌شده متناظر در روش پیشنهادی تشخیص عیوب سیستم تعلیق

Fig. 12. Compliance rate of training data with corresponding calculated values in the proposed diagnosis method



شکل ۱۱: الگوی سیگنال باقیمانده برای خروجی شتاب بدنه (الف) پارامتر K_{fr} (ب) پارامتر C_{fr}

Fig. 11. Residual signals patterns of body acceleration. a-parameter K_{fr} , b-parameter C_{fr}



شکل ۱۳: تأثیر نوع خروجی در تشخیص عیوب

Fig. 13. Influence of the output type on fault diagnosis

کمک‌فنها، فنرها و تایرها که به ترتیب به‌صورت کاهش میزان میرایی، مقدار سختی فنرهای تعلیق و کاهش باد لاستیک‌ها در نظر گرفته می‌شوند، بررسی می‌شوند.

با توجه به کاربردی بودن روش عیب‌یابی ارائه‌شده که یکی از اهداف عمده پژوهش فوق به شمار می‌رود، لازم است تا بانک اطلاعاتی کاملی از داده‌های باقیمانده عیوب تشکیل گردد. در این قسمت بانک اطلاعاتی بر پایه سیگنال ورودی و خروجی شامل سیگنال‌های باقیمانده شتاب مربوط به وضعیت نرمال و معیوب سیستم محاسبه و ثبت می‌شود و پایگاه داده‌های معیوب را شکل می‌دهد. به‌عنوان نمونه سیگنال‌های باقیمانده مربوط به پارامترهای معیوب $F_{3,1}$ و $F_{1,1}$ (میرایی و ضریب فنریت تعلیق چرخ جلوراست) برای خروجی شتاب بدنه سیستم تعلیق در شکل ۱۱ آورده شده است. این الگوها برای درصدهای متفاوت تغییرات (۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد) پارامترهای مذکور در شکل رسم شده‌اند.

با توجه به تشکیل بانک اطلاعاتی حاوی سیگنال‌های شتاب باقیمانده و مشخصه‌های مطلوب استخراج‌شده آن‌ها که حالات معیوب را شامل می‌شود، ساختار عصبی فازی آموزش پیدا می‌کند. شکل ۱۲ نمودارهای مربوط به میزان انطباق داده‌های آموزش و همچنین میزان ریشه میانگین مربعات خطا برای تشخیص عیوب سیستم تعلیق با استفاده از مشخصه اول و هشتم در خروجی شتاب بدنه را نشان می‌دهد. میزان خطای به‌دست‌آمده در فرایند آموزش نشان می‌دهد، در این حالت سیستم تشخیص عیوب قادر به یادگیری بوده و امکان تشخیص و تفکیک بین عیوب را در مرحله آزمون دارا است و بیانگر امکان پیاده سازی روش و سناریو پیشنهادی در تشخیص عیوب سیستم تعلیق می‌باشد.

$$Z_r = \begin{cases} \frac{0.01}{2}(1 - \cos(8\pi t)) & 0.5 \leq t \leq 0.75 \\ \frac{0.05}{2}(1 - \cos(8\pi t)) & 3 \leq t \leq 3.25 \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases} \quad (11)$$

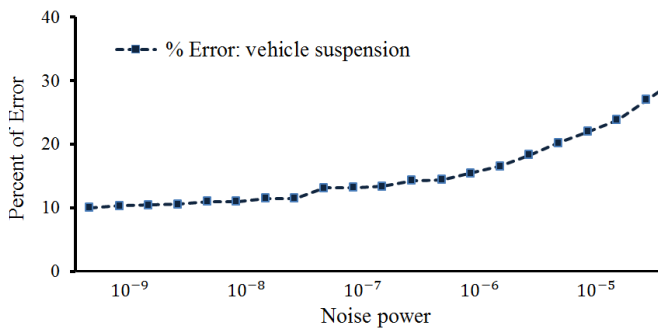
شکل‌های ۵ تا ۱۰ سیگنال‌های تغییر مکان عمودی، شتاب عمودی و شتاب زاویه‌ای مربوط به جرم فنربندی شده و نشده را برای مدل کامل سیستم تعلیق غیرفعال را نشان می‌دهند. نمودارهای فوق بیانگر حالات نرمال سیستم تعلیق می‌باشند و برای محاسبه سیگنال‌های باقیمانده که حاصل تفاضل سیگنال‌های حالت سالم و معیوب می‌باشند، لازم است تا آن‌ها برای حالات معیوب سیستم نیز شبیه‌سازی شوند.

۴- تشخیص عیوب سیستم تعلیق خودرو

در این بخش ابتدا عملکرد روش پیشنهادی در تشخیص عیوب سیستم تعلیق بررسی شده و سپس شرایط مناسب و بهینه برای تشخیص دقیق‌تر عیوب تعیین می‌شوند.

۴-۱- بررسی عملکرد سیستم عیب‌یاب

در شرایط عملی عیوب متعددی برای سیستم تعلیق می‌توان برشمرد لکن در این پژوهش با توجه به محدودیت‌های مدل شبیه‌سازی شده، لزوم شبیه‌سازی عیوب در بخش نتایج آزمایشگاهی و سایر موارد، تنها عیوب خاصی انتخاب شده‌اند که در صورت اثبات امکان‌پذیری روش پیشنهادی، برای تشخیص سایر عیوب سیستم نیز قابل استفاده می‌باشند. در بخش شبیه‌سازی نرم‌افزاری عیوب سیستم تعلیق، تنها سه مورد شامل عیوب



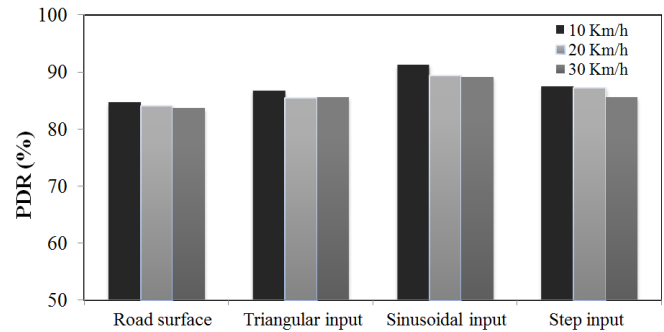
شکل ۱۵: تأثیر نوع سیگنال ورودی در دقت تشخیص عیوب سیستم

Fig. 15. Influences of the noise on the accuracy reduction of the vehicle suspension

خروجی‌های مدل به ترتیب شامل شتاب بدنه، جابجایی سیستم تعلیق، تغییر مکان بدنه، شتاب زاویه‌ای حول محور عرضی و شتاب زاویه‌ای حول محور طولی می‌باشد که می‌توانند در فرایند تشخیص عیوب سیستم استفاده شوند. برای هر عیب آزمون‌ها با مقادیر تصادفی تغییرات با استفاده از خروجی معین انجام و عدد پی‌دی‌ار (رابطه (۲)) با توجه به موارد عدم پیش‌بینی صحیح نسبت به کل تعداد نمونه‌های آماری محاسبه می‌شود.

همان‌طور که از نتایج نمودار مشاهده می‌شود، با توجه به انجام آزمون‌های متعدد در شرایط یکسان، استفاده از خروجی‌های متفاوت تفاوت چندانی بر روی دقت در تشخیص عیوب سیستم تعلیق با روش پیشنهادی وجود ندارند. به عبارتی دیگر می‌توان گفت از بین خروجی‌های فوق برای سیستم تعلیق خودرو، تفاوت زیادی بین استفاده از هر یک در فرایند عیب‌یابی وجود ندارد. با توجه به نتیجه فوق و همچنین سادگی اندازه‌گیری با استفاده از شتاب‌سنج‌ها نسبت به سایر متغیرها، تشخیص عیوب بر مبنای خروجی ثبت‌شده از شتاب‌سنج‌ها انجام می‌شود.

اساساً عیوب در شرایط محیطی خاص، ویژگی‌های خود را آشکارتر می‌سازند، یعنی به شکل واضح‌تری خود را نشان می‌دهند و مسلماً استفاده از این شرایط فرآیند عیب‌یابی را آسان‌تر می‌نماید [۲۴]. بر همین اساس تعیین



شکل ۱۴: تأثیر نوع سیگنال ورودی در دقت تشخیص عیوب سیستم

Fig. 14. Influence of the input signal type on the accuracy of fault detection

۴-۲- بررسی و انتخاب شرایط مناسب تشخیص دقیق‌تر عیوب

در راستای دستیابی به کارایی مطلوب و افزایش قابلیت اطمینان روش پیشنهادی برای تشخیص عیوب سیستم تعلیق، لازم است تا عوامل تأثیرگذار در این مورد تحت بررسی قرار گرفته و شرایط مطلوب برای استفاده از سیستم عیب‌یاب تعیین شوند. به کمک این نتایج دقت مطلوب در تشخیص عیوب قابل حصول بوده و زمینه برای پیاده‌سازی روش و سناریو فوق در تشخیص عیوب سیستم تعلیق که بر مبنای مدل و رفتار دینامیکی خودرو استوار است، فراهم می‌شود. برای این منظور با استفاده از مدل نرم‌افزاری به‌دست‌آمده برای سیستم تعلیق، آزمون‌های متعددی با شبیه‌سازی حالات معیوب انجام می‌شوند، به این صورت که برای هر آزمون در اندازه هر یک از پارامترهای مدل نرم‌افزاری (عیوب تعیین‌شده)، تغییراتی با مقادیر تصادفی در بازه تعیین‌شده اعمال و پاسخ سیستم تشخیص عیب نسبت به آن ثبت می‌گردد. به‌منظور کاهش خطای تخمین و افزایش قابلیت اعتماد به نتایج به‌دست‌آمده، آزمون‌های آماری در دفعات متعدد و با ثابت نگه‌داشتن سایر متغیرها برای هر مورد با استفاده از مدل شبیه‌سازی انجام می‌شوند.

در نمودار شکل ۱۳ تأثیر استفاده از نوع خروجی‌های مدل در فرایند تشخیص عیوب سیستم تعلیق در روش پیشنهادی نشان داده شده است.

Table 3. Performance evaluation of the vehicle suspension diagnostic system

جدول ۳: ارزیابی عملکرد سیستم عیب‌یاب تعلیق خودرو سیستم

سطوح اندازه‌گیری سرعت	مقادیر سرعت خودرو (km/h)	تعداد آزمایش‌ها	میانگین متوسط خطا (%)
۱	۲۰	۴۰	۲۷/۵
۳	۱۰، ۲۰، ۳۰	۴۰	۱۵
۵	۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰	۴۰	۱۲/۵



شکل ۱۷: خودرو در حین انجام آزمون (عبور از سرعت گیر)

Fig. 17. Vehicle during test (Speed Bumper)

باقیمانده در سیستم تعلیق با افزایش میزان نویز احتمال اعلام هشدار نادرست توسط سیستم تشخیص عیب رو به افزایش می‌رود. یکی از راه‌های کاهش سرعت در خیابان‌ها و جاده‌ها استفاده از سرعت‌گیرها^۱ است. عبور با سرعت زیاد از روی این موانع به سیستم تعلیق خودرو آسیب می‌زند و همین امر باعث می‌شود تا خودروها با سرعت پایین از روی آن عبور کنند. با توجه به مشخصات هندسی و شرایط نصب سرعت‌گیرها عمدتاً محدوده متوسط سرعت عبوری وسایل نقلیه از روی آن‌ها در بازه میانگین ۱۰ تا ۳۰ کیلومتر بر ساعت می‌باشد. با توجه به شرایط ذکرشده برای آزمون تشخیص عیوب احتمالی سیستم تعلیق که در طول مسیر حرکت خودرو در جاده انجام می‌شود، بایستی در محدوده سرعتی اشاره شده، الگوهای مربوط به سیگنال‌های باقیمانده عیوب در پایگاه داده‌ها موجود باشد. از آنجاکه افزایش داده‌های آموزشی و ثبت آن در پایگاه اطلاعاتی داده‌ها نیاز به صرف هزینه و زمان دارد و منجر به حجیم شدن شبکه‌ها و احتمال تداخل دسته‌ها می‌شود، بنابراین در این بخش تعداد مناسب سطوح اندازه‌گیری سرعت که داده‌ها بایستی در آن مقادیر ثبت و استفاده شوند (در این حالت دقت قابل قبول را به همراه دارند) انتخاب می‌شود. این بررسی‌ها در جدول شماره ۳ آمده است. بر طبق نتایج جدول، اندازه‌گیری ۳ سطح سرعت دقت قابل قبولی برای سیستم عیب‌یابی می‌تواند به همراه داشته باشد.



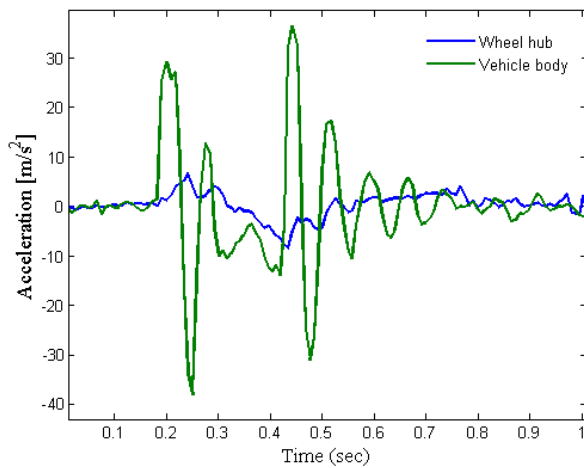
شکل ۱۶: استفاده از اجزای معیوب کمک‌فتر و فتر در سیستم تعلیق جلوی خودرو

Fig. 16. Defected parts (spring and shock absorber) front wheel suspension

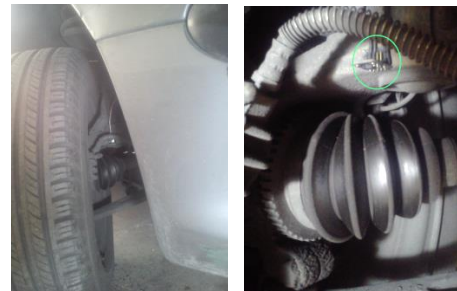
این شرایط من جمله اثر نوع تحریک سیستم (ورودی سیستم) در شناسایی عیوب در این قسمت بررسی می‌شود.

نمودارهای شکل ۱۴، مربوط به تاثیر نوع ورودی آزمون در روش ارائه شده برای تشخیص عیوب سیستم تعلیق می‌باشد. در این ارزیابی کلی، تمامی شرایط و متغیرها به غیر از نوع ورودی (از قبیل تعداد آزمایشات، نوع خروجی استفاده‌شده برای تشخیص عیوب، مقادیر پارامترهای مدل و سایر) برای هر مورد بدون تغییر فرض می‌شوند. نتایج به ترتیب برای ورودی جاده، ورودی مثلثی، سینوسی و ورودی پله با شرایط مشابه از جمله میانگین دامنه‌های یکسان ($0/1m$) در سرعت‌های متفاوت آمده است. شاخص دقت تخمین زده شده برای هر نمودار برابر میانگین دقت محاسبه شده برای کل عیوب تعیین شده با ضرایب مقادیر تصادفی در بازه آموزش داده شده (۵ الی ۳۵ درصد تغییرات) برای پارامترهای مدل می‌باشد. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان گفت به طور میانگین ورودی سینوسی نسبت به سایر ورودی‌ها منجر به تشخیص دقیق‌تر عیوب توسط الگوریتم عیب‌یابی می‌شود.

نویز و اغتشاشات از عوامل جداناپذیری است که در شرایط اندازه‌گیری عملی وجود دارد و می‌تواند تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی کارایی سیستم عیب‌یابی داشته باشد، به همین دلیل و با توجه به پیاده‌سازی روش در شرایط عملی (مقادیر اندازه‌گیری شده به وسیله حسگرها دارای نویز قابل ملاحظه‌ای می‌باشند)، لازم است تا تأثیرات آن بر روی عملکرد سیستم عیب‌یابی مورد ارزیابی قرار گیرد. در تحقیق حاضر، از شبیه‌سازی نویز سفید استفاده شده است. در نمودار شکل ۱۵ اثر اندازه نویز بر روی دقت سیستم عیب‌یابی آورده شده است. نتایج بیانگر آن است که با توجه به کم بودن مقادیر سیگنال‌های



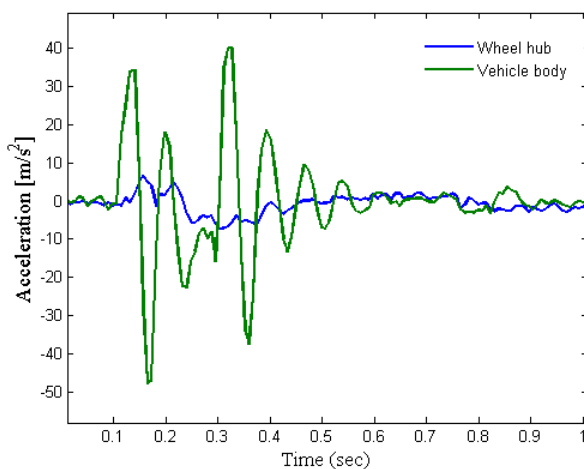
(الف)



(ب)

شکل ۱۸: موقعیت نصب شتاب سنج‌ها (الف) بر روی بدنه (ب) نزدیک به کاسه چرخ

Fig. 18. Position of the accelerometers (a) on the body (b) close to the front wheel hub assembly



(ب)

شکل ۱۹: سیگنال شتاب عمودی مربوط به چرخ و بدنه خودرو - قسمت چرخ جلو - راست (الف) حالت سالم (ب) حالت معیوب

Fig. 19. The vertical acceleration signal of the wheel and vehicle body (front-right). a- healthy mode, b- faulty mode

باقیمانده برای حالت‌های سالم و معیوب، سیستم آموزش می‌یابد. این بانک اطلاعاتی می‌تواند با استفاده از شبیه‌سازی عیوب در مقادیر مختلف و به کمک مدل شبیه‌سازی شده از سیستم تعلیق تولید شود که به علت در دسترس نبودن مقادیر پارامترهای خودرو مورد آزمون، این بانک اطلاعاتی با استفاده از الگوهای سیگنال‌های باقیمانده توسط حس‌گرهای نصب شده بر روی خودرو انجام می‌شود.

به علت محدودیت‌های ذکر شده، در این بخش تنها عیوب مربوط به فنر و کمک‌فنر قسمت جلوی سیستم تعلیق به کمک نصب و جایگذاری اجزاء معیوب بر روی خودرو مورد بررسی قرار می‌گیرد. عیوب کمک‌فنر با استفاده از دو کمک‌فنر معیوب با ضرایب میرایی کاهش‌یافته نسبت به حالت سالم و عیوب فنر با جایگزینی فنر حلقوی با ضریب سختی کمتر انجام

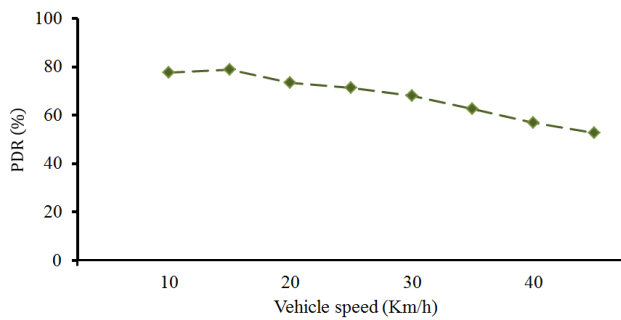
Table 4. Performance evaluation of the diagnostic method

جدول ۴: ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی تشخیص عیوب

نوع عیب	تعداد کل نقاط آزمون	تعداد تشخیص صحیح	تعداد تشخیص اشتباه	تعداد عدم تشخیص	دقت تشخیص عیوب
$F_{3,1}$	۳۰	۲۵	۱	۴	۸۳
$F_{3,2}$	۳۰	۲۶	۰	۴	۸۶
$F_{1,1}$	۳۰	۲۴	۳	۳	۸۰
$F_{1,2}$	۳۰	۲۴	۲	۴	۸۰

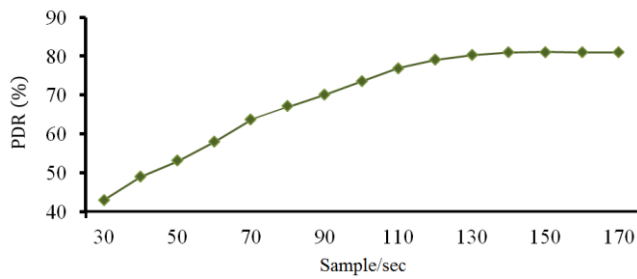
۵- انجام آزمایشات عملی

هرچند در بخش شبیه‌سازی، روش ارائه شده برای تشخیص عیوب سیستم تعلیق عملکرد مطلوبی را از خود نشان می‌دهد ولی از آنجاکه در شرایط واقعی وجود برخی عوامل مختلف از جمله نویز و اغتشاشات می‌تواند مانع تشخیص صحیح و به موقع عیوب شود، لازم است به منظور استفاده کاربردی و تأیید قابلیت اجرای سیستم عیب‌یاب در شرایط واقعی و اطمینان از صحت عملکرد آن، آزمایشات عملی مناسب، تدوین و انجام شوند. به همین منظور و با داشتن بانک اطلاعاتی مناسبی از الگوهای سیگنال‌های



شکل ۲۱: تأثیر سرعت عبور از مانع بر روی دقت تشخیص عیوب

Fig. 21. Influence of the speed crossing on the accuracy of diagnosis

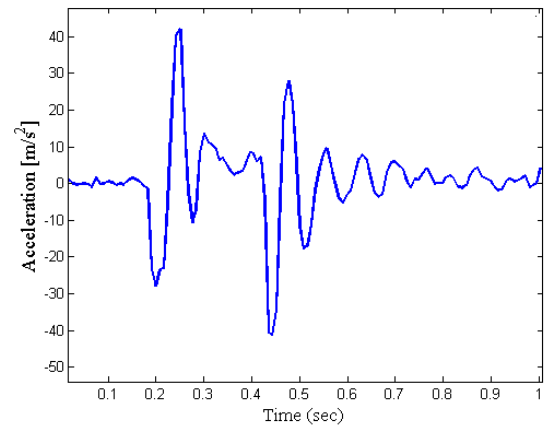


شکل ۲۲: تأثیر نرخ داده‌برداری بر روی دقت تشخیص عیوب سیستم

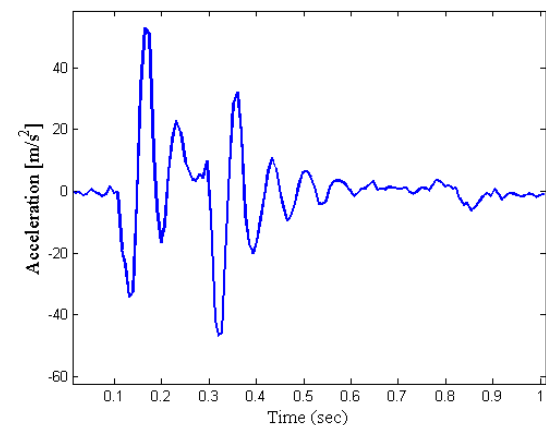
Fig. 22. Influence of the sample rate on the accuracy of diagnosis

لوله و غیره استفاده شده است. در این تست، مانع عبارت از یک سرعت‌گیر از جنس پلاستیک فشرده با حداکثر ارتفاع ۴/۵ سانتیمتر در قسمت میانی و عرض ۹۰ سانتیمتر می‌باشد که خودرو در سه سرعت مختلف ۱۰، ۲۰ و ۳۰ km/h آن را طی می‌کند و چهار چرخ خودرو به همراه زیرسیستم‌های جلو و عقب از روی مانع تعیین‌شده عبور می‌کند که در این حالت سیگنال‌های موردنظر به‌وسیله حس‌گرهای شتاب‌سنج ثبت و ذخیره می‌شوند. شکل ۱۷ خودرو را در حین انجام آزمون که عبور از سرعت‌گیر می‌باشد را نشان می‌دهد.

پایگاه داده‌های معیوب برای داده‌های عملی بر پایه ورودی سیگنال شتاب هر یک از چرخ‌های خودرو و خروجی شامل تفاضل دو سیگنال شتاب مربوط به تویی چرخ‌ها و نقاط متناظر آن‌ها بر روی بدنه خودرو در حین عبور از مانع با سرعت‌های مختلف (در بازه تعیین‌شده) برای سیگنال‌های مربوط



(الف)



(ب)

شکل ۲۰: سیگنال شتاب عمودی باقیمانده - قسمت چرخ جلو - راست (الف) حالت سالم (ب) حالت معیوب

Fig. 20. The residual vertical acceleration signal (front-right). a- healthy mode, b- faulty mode

می‌شود (شکل ۱۶). از آنجاکه اندازه‌گیری و تعیین پروفیل جاده با توجه به حرکت عادی خودرو در مسیر تاندازه‌ای نامشخص و غیرعملی است، به‌جای ورودی سیستم عیب‌یاب که عبارت از همان اغتشاش یا پروفیل سطح جاده است از شتاب خروجی هر یک از چرخ‌های خودرو که به‌آسانی با استفاده از شتاب‌سنج قابل‌اندازه‌گیری می‌باشد، برای اعلام هشدار و تشخیص عیوب استفاده می‌شود. لازم به ذکر است در صورت استفاده از پروفیل جاده به‌عنوان ورودی، عیوب مربوط به چرخ و لاستیک (مانند کاهش باد لاستیک) نیز قابل تشخیص می‌باشد.

در این بخش جهت برانگیزش سیستم و اندازه‌گیری داده‌های موردنیاز، با توجه به نتایج بررسی‌ها در بخش قبل که تفاوت چندانی بین استفاده از ورودی‌های متفاوت در فرایند تشخیص عیوب را نشان نمی‌دهد، از سرعت‌گیرهای متداول در سطح جاده‌ها بجای آزمون‌های خاص مانند پله،

لذا در سرعت‌های پایین عملکرد مطلوب‌تری از روش پیشنهادی در شناسایی عیوب انتظار می‌رود.

عدم اتکا به نرخ داده‌برداری بالا از مزیت‌های روش پیشنهادی به شمار می‌رود که پیاده‌سازی سیستم عیب‌یاب را ساده و توجیه‌پذیر می‌نماید. در شکل ۲۲ تأثیر نرخ داده‌برداری بر روی دقت تشخیص عیوب سیستم بررسی شده است. همان‌طور که از نتایج مشاهده می‌شود با افزایش نرخ داده‌برداری از مقدار تقریبی ۱۳۰ نمونه در ثانیه، میزان تغییرات پی‌دی‌ار تقریباً ثابت می‌ماند. در نتیجه می‌توان گفت روش ارائه‌شده با استفاده از رفتار دینامیکی و نرخ داده‌برداری پایین، قادر به تشخیص دقیق عیب می‌باشد.

۶- نتیجه‌گیری

شناسایی و تشخیص درست و به‌موقع عیوب به وجود آمده در ماشین‌آلات و فرایندها، تأثیر زیادی در بهبود عملکرد و قابلیت اعتماد از آن‌ها را دارند. این امر در سیستم‌هایی همچون خودرو که بروز عیوب حتی ناچیز، منجر به خسارات مالی و جانی غیرقابل جبران می‌شود، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در راستای انجام این مهم، در پژوهش فوق تشخیص عیوب در سیستم تعلیق خودرو مورد بررسی قرار گرفت. برای اطمینان از اعلام هشدار صحیح و به‌موقع و به حداقل رساندن احتمال خطا در تشخیص عیوب، ساختاری مناسب با بهره‌گیری از قابلیت‌های سیستم‌های فازی-عصبی انفیس برای سیستم عیب‌یاب طراحی و شرایط مناسب برای تشخیص دقیق‌تر عیوب با بررسی‌ها و آزمون‌های متعدد تعیین شد.

ارائه راه‌کاری نو و ساده با قابلیت کاربرد عملی، استفاده از رفتار دینامیکی بجای سیگنال‌های ارتعاشی که در سایر مقالات از آن استفاده شده، عدم نیاز به استفاده از تجهیزات و آزمون‌های خاص جهت تشخیص عیوب، کاهش تعداد و نوع حسگرها (استفاده از تنها حسگر شتاب سنج) و عدم اتکا به نرخ داده‌برداری بالا ازجمله مزیت‌های روش پیشنهادی به شمار می‌رود و موجب می‌شوند تا پیاده‌سازی سیستم عیب‌یاب از بعد اقتصادی مقرون‌به‌صرفه بوده و استفاده از آن توجیه‌پذیر باشد. اعلام هشدار و تعیین موقعیت و اندازه عیوب در حین عبور خودرو از موانعی با دارا بودن آستانه تحریک لازم همانند سرعت‌گیرهای جاده، راهکار ابتکاری و مؤثری را برای سیستم‌های عیب‌یاب ارائه می‌دهد.

در انتها نیز صحت‌گذاری عملکرد سیستم عیب‌یاب و قابلیت پیاده‌سازی آن با طرح و انجام آزمایشات و اخذ نتایج آزمایشگاهی تأیید می‌شود. هرچند در این پژوهش به علت محدودیت‌های موجود، تنها عیوب مربوط به فنر و

به وضعیت نرمال و معیوب سیستم محاسبه و ثبت می‌شود. سیگنال باقیمانده در این بخش عبارت است از اختلاف سیگنال شتاب بدنه و شتاب توبی هر یک از چرخ‌های خودرو. حس‌گرهای اندازه‌گیری شتاب عمودی شامل دو عدد برای هر چرخ می‌باشند که موقعیت نصب حس‌گرهای مذکور بر روی سگدست و نزدیک به کاسه چرخ می‌باشد و در شکل ۱۸ نشان داده شده است.

حس‌گرهای استفاده‌شده برای اندازه‌گیری شتاب از نوع ADXL۳۳۵، سه محوره بر پایه تکنولوژی سیستم‌های میکرو الکترومکانیک^۱ نیمه‌هادی با خروجی آنالوگ و حساسیت ۳۰۰ میلی ولت به ازای هر g می‌باشد و داده‌برداری با سرعت نمونه‌برداری حدود ۱۲۰ نمونه در ثانیه انجام می‌شود. برای ثبت و ذخیره‌سازی سیگنال از یک برنامه در محیط نرم‌افزار متلب استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که خودرو انتخاب‌شده برای نصب حس‌گرها و انجام آزمایشات مذکور، از نوع پژو ۲۰۶ تیپ ۲ می‌باشد.

برای نمونه سیگنال‌های اخذشده توسط حس‌گرهای شتاب‌سنج نصب‌شده بر روی سگدست (نزدیک به توبی چرخ) و بدنه خودرو در حالت سالم و معیوب (سختی فنر جلو) در حین عبور از روی سرعت‌گیر در شکل ۱۹ نشان داده شده است. سیگنال‌های باقیمانده نیز که ناشی از اختلاف بین سیگنال شتاب بدنه و توبی چرخ می‌باشند، برای حالت سالم و معیوب سیستم تعلیق در سرعت متوسط ۲۰ km/h در شکل ۲۰ آورده شده است.

جدول ۴ نتایج عملکرد روش پیشنهادی تشخیص عیوب سیستم تعلیق را برای داده‌های آزمایشی عملی نشان می‌دهد. در این جدول عیوب مشخص شده با نصب جزء معیوب بر روی خودرو و به تعداد دفعات متعدد در سرعت‌های متفاوت در بازه تعیین شده ۱۰ الی ۳۰ کیلومتر بر ساعت از روی مانع سرعت‌گیر عبور می‌کند و پاسخ سیستم تشخیص عیب که عبارتست از تشخیص درست، تشخیص اشتباه و عدم تشخیص ثبت می‌گردد. همان‌طور که از نتایج جدول مشاهده می‌شود، باوجود منابع بروز خطا ازجمله نویز و اغتشاشات، خطای نصب و اندازه‌گیری، نرخ داده‌برداری پایین و سایر عوامل، دقت پیش‌بینی عیوب توسط روش ارائه شده تا حد خوبی قابل‌قبول بوده و بر مبنای این نتایج، قابلیت اجرای سیستم عیب‌یاب در شرایط عملی اثبات می‌گردد.

نمودار شکل ۲۱ ارتباط بین سرعت عبور از مانع را بر روی میانگین دقت تشخیص عیوب سیستم تعلیق نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش سرعت منجر به کاهش دقت تشخیص عیوب می‌شود،

Application to Active Suspension, in: Proceedings of the 2006 American Control Conference Minneapolis, Minnesota, USA, 2006.

کمک‌فکر مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفتند، لیکن با اثبات کارایی روش ارائه شده، امکان تشخیص سایر عیوب نیز وجود دارد.

منابع

- [9] K. Kashi, D. Nissing, D. Kesselgruber, D. Siffker, Fault Diagnosis Of an Active Suspension Control System, in: IFAC Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes, Beijing, 2006.
- [10] D. Fischer, M. Borner, J. Schmitt, R. Isermann, Fault detection for lateral and vertical vehicle dynamics, Control Engineering Practice, 15 (2007) 315-324.
- [11] Sh.Azadi, A.Soltani, Fault detection of vehicle suspension system using wavelet analysis, Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, 47(4) (2009) 403-418.
- [12] S. Varrier, R. Morales-Menendez, J. Lozoya-Santos, e.a. D. Hernandez, Fault Detection in Automotive Semi-Active Suspension: Experimental Results, SAE International, 1 (2013) 1234.
- [13] M. Hamed, B.Tesfa1, M.Aliwan, G.Li, F.Gu1, A.D.Ball, The Influence of Vehicle Tyres Pressure on the Suspension System Response by Applying the Time-Frequency Approach, in: Proceedings of the 19th International Conference on Automation & Computing, Brunel University, London, UK, 2013.
- [14] G. Wang, S. Yin, Data-driven fault diagnosis for an automobile suspension system by using a clustering based method Journal of the Franklin Institute 351 (2014) 3231-3244.
- [15] R. Burdzik, Multidimensional identification of resonances analysis of strongly nonstationary signals, case study: Diagnostic and condition monitoring of vehicle's suspension system, Applied Acoustics, 144(15) (2019).
- [1] M. Borner, M. Zele, R. Isermann, Comparison Of Different Fault Detection Algorithms For Active Body Control Components: Automotive Suspension System, in: Proceedings of the American Control Conference, Arlington, 2001.
- [2] M. Borner, H. Straky, T. Weispfenning, R. Isermann, Model based fault detection of vehicle suspension and hydraulic brake systems, Mechatronics, 12 (2002) 999-1010.
- [3] D. Fischer, E. Kaus, R. Isermann, Fault detection for an active vehicle suspension, in: Proceedings of the American Control Conference, Colorado, 2003.
- [4] P. Pisu, A. Soliman, G. Rizzoni, Vehicle chassis monitoring system, Control Engineering Practice, 11 (2003) 345-354.
- [5] P.Metallidis, G. Verros, S. Natsiavas, C. Papadimitriou, Fault detection and optimal sensor location in vehicle suspensions, Journal of Vibration and control, 9(3-4) (2003) 337-359.
- [6] B.P. Jeppesen, D. Cebon, Analytical Redundancy Techniques for Fault Detection in an Active Heavy Vehicle Suspension, Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, 42(1-2) (2004) 75-88.
- [7] D. Fischer, R. Isermann, Mechatronic semi-active and active vehicle suspensions, Control Engineering Practice 12(11) (2004) 1353-1367.
- [8] A. Chamseddine, H. Noura, M. Ouladsine, Sensor Fault Detection, Identification and Fault Tolerant Control:

- control units in fault detection of vehicle active suspension system with hydraulic actuator, *Modares Mechanical Engineering*, 17(4) (2017) 443-452. (In Persian)
- [21] R.J. Hyndman, A.B. Koehler, Another look at measures of forecast accuracy, *International Journal of Forecasting*, 22 (2006) 679-688.
- [22] Z. Fang, W. Shu, D. Du, B. Xiang, Q. He, K. He, Semi-active Suspension of a Full-vehicle Model based on Double-loop Control, *Procedia Engineering* 16, pp. 428 – 437, (2011).
- [23] S.-B. Choi, H.-S. Lee, Y.-P. Park, H_{∞} Control Performance of a Full-Vehicle Suspension Featuring Magnetorheological Dampers, *Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, 38(5) (2002) 341-360.
- [24] K.F. Martin, M. Moavenian, A Comparison of Fault Detection Filters Using Multiple Inputs, Parallel Observers and Residual Processing, *IFAC Proceedings* 27(5) (1994) 527-531
- [16] F. Baghernezhad, K. Khorasani, Computationally intelligent strategies for robust fault detection, isolation, and identification of mobile robots, *Neurocomputing*, 171(1) (2016) 335-346.
- [17] A. Taheri-Garavand, M. Omid, H. Ahmadi, S.S. Mohtasebi, G.M. Carlomagno, Intelligent fault diagnosis of cooling radiator based on thermal image processing and artificial intelligence techniques, *Modares Mechanical Engineering*, 17(2) (2017) 240-250. (in Persian)
- [18] 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* 259(1) (2014) 304-320.
- [19] 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*, 15(5) (2015) 41-48. (In Persian)
- [20] M. Shahab, M. Moavenian, The disruptive effect of