



شناسایی مدل غیرخطی برای عناصر دستگاه آزمایش یک چهارم سیستم تعلیق خودرو

محمد مهدی سلمانی آرانی¹، مهدی میرزایی^{2*}، احمد اکبری الوانق³، سجاد آقاسی زاده شعرباف⁴

1- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

3- استادیار، مهندسی برق، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

4- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

* تبریز، صندوق پستی 51335-1996، mirzaei@sut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 15 مرداد 1394

پذیرش: 05 مهر 1394

ارائه در سایت: 25 مهر 1394

کلید واژگان:

سیستم تعلیق خودرو

دستگاه آزمایش یک چهارم

مدل غیرخطی

شناسایی سیستم

چکیده

در این مقاله به شناسایی مدل غیرخطی برای عناصر دستگاه جدید آزمایش ساخته شده برای سیستم تعلیق یک چهارم خودروی سمند با مکانیزم مکفرسون پرداخته شده است. ورودی‌های این دستگاه شامل جابجایی (ناهمواری) جاده و شتاب آن می‌باشد و خروجی‌های آن شامل شتاب جرم معلق، شتاب جرم غیرمعلق، جابجایی تعلیق و فشردگی تایر هستند که توسط سنسورها ثبت می‌شوند. دستگاه آزمایش سیستم تعلیق دارای مکانیزم مکفرسون با فنر و میراگر غیرخطی بوده و از نظر شناسایی یک مدل چند ورودی-چند خروجی محسوب می‌شود. برای یافتن ضرایب فنریت و میرایی تایر و سیستم تعلیق از روش تکراری حداقل مربعات غیرخطی به عنوان یک روش شناسایی جعبه خاکستری استفاده شده است. در این روش مدل ریاضی یک چهارم غیرخطی برای دستگاه آزمایش در نظر گرفته شده و پارامترهای آن با استفاده از داده‌های دستگاه آزمایش شناسایی می‌شود. برای شناسایی پارامترهای مدل، از روش غیرخطی تکراری لونیبرگ-مارکارد استفاده شده است. خروجی مدل غیرخطی شناسایی شده با خروجی دستگاه آزمایش مقایسه و صحت مدل شناسایی شده مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان از عملکرد خوب مدل پیشنهادی برای بیان رفتار فنر و میراگر دستگاه آزمایش یک چهارم سیستم تعلیق خودرو با مکانیزم مکفرسون دارد.

Identification of a nonlinear model for elements of a test rig of quarter car suspension system

Mohammad Mehdi Salmani Arani¹, Mehdi Mirzaei^{1*}, Ahmad Akbari Alvanagh², SajjadAghasizade Shaarbaf¹

1- Department of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

2- Department of Electrical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

* P.O.B. 51335-1996 Tabriz, Iran, mirzaei@sut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 06 August 2015
Accepted 27 September 2015
Available Online 17 October 2015

Keywords:
Vehicle suspension system
a quarter car test rig
nonlinear model
system identification

ABSTRACT

In this paper, a novel test rig for a quarter car suspension system of Samand with McPherson mechanism is fabricated and its elasto-damping elements are dynamically identified by a nonlinear model. The inputs of test rig are road roughness and its acceleration and the outputs are sprung mass acceleration, un-sprung mass acceleration, suspension deflection, and tire deflection which are recorded by sensors. The test rig of suspension system includes McPherson mechanism with nonlinear spring and damper. This system is categorized as a multi-input-multi-output (MIMO) identified system. The nonlinear least squares iterative method, as a gray-box identification method, is used for finding the elasto-damping coefficients of tire and suspension elements. In this method, a nonlinear mathematical model is considered for the system and its parameters are calculated using the test rig data. The Levenberg-Marquardt algorithm (LMA) is used to solve the non-linear least squares problem. The outputs of the identified nonlinear model are compared with the measured experimental data. As a result, the test rig outputs are followed by the outputs of the identified model with acceptable errors. The compared results indicate a good performance of the proposed model to estimate the behavior of the nonlinear suspension elements.

1- مقدمه

سرنشینان ناشی از ناهمواری‌های جاده را سیستم تعلیق خودرو بر عهده دارد.

همچنین حفظ تماس مؤثر تایر و جاده از وظایف اصلی این سیستم در خودرو به شمار می‌رود. سیستم تعلیق غیرفعال به‌عنوان ساده‌ترین نوع این سیستم‌ها

امروزه راحتی و افزایش ایمنی سرنشینان از مهم‌ترین اهداف در صنعت خودرو به شمار می‌رود. در این راستا وظیفه جذب ارتعاشات منتقل شده به

Please cite this article using:

M. M. Salmani Arani, M. Mirzaei, A. Akbari Alvanagh, S. Aghasizade Shaarbaf, Identification of a nonlinear model for elements of a test rig of quarter car suspension system, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 11, pp. 136-142, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

غیرخطی از مکفرسون ارائه کردند که علاوه بر این ویژگی‌ها، مناسب برای کاربردهای کنترلی است. در این مقاله با خطی‌سازی معادلات غیرخطی و تبدیل آن به فرم فضای حالت به مدلی مناسب جهت مقاصد کنترلی دست یافته‌اند. در مدل‌سازی سیستم تعلیق از روش‌های مبتنی بر رفتار همانند شبکه‌های عصبی برای کاربردهایی نظیر شبیه‌سازی نیز استفاده گردیده است [18]. در مرجع [19] با استفاده از یک مدل یک چهارم خطی ارتعاشات سیستم تعلیق کنترل شده است. که با توجه به ساده بودن مدل در محدوده‌ی یک سیستم غیرخطی قرار نمی‌گیرد. در مرجع [20] نیز مدلی از یک سیستم تعلیق شبیه‌سازی و کنترل شد. در این مقاله از یک تحریک شبه سینوسی جهت تحریک استفاده شده است.

هدف مقاله‌ی حاضر شناسایی مدل ریاضی مناسب برای عناصر سیستم تعلیق خودروی ملی سمند جهت کاربردهای مدل‌سازی و کنترل می‌باشد. در این مقاله سعی شده تا با ساخت دستگاه آزمایش یک چهارم خودرو مبتنی بر مشخصات سیستم تعلیق یک خودرو پرتیراژ داخلی (سمند)، یک مدل ریاضی برای فنر و میراگر سیستم تعلیق که تطابق بیشتری با نتایج آزمایشگاهی دارد استخراج شود. مدل مذکور یک مدل غیرخطی ساده با پارامترهای مجهول است که این پارامترها با استفاده از روش حداقل مربعات خطای داده‌های تجربی و شبیه‌سازی بدست می‌آید. مدل پیشنهادی مناسب برای محدوده‌ی کاری وسیعی از سیستم می‌باشد. در دستگاه آزمایش ساخته شده داده‌های خروجی با استفاده از سنسورهای شتاب و موقعیت دریافت و جهت شناسایی جعبه خاکستری از آن‌ها استفاده می‌شود. نتایج حاصل می‌تواند در بازطراحی و بهینه‌سازی سیستم تعلیق خودروی مذکور و کنترل غیرخطی آن مورد استفاده قرار گیرد.

در ادامه ابتدا به معرفی دستگاه، ورودی و خروجی آن، نحوه انجام آزمایش و انتخاب داده‌ها جهت شناسایی اشاره شده است. سپس در مورد مدل‌سازی سیستم بحث می‌شود و در نهایت نتایج شناسایی مدل یک چهارم غیرخطی ارائه شده و نتیجه‌گیری کلی بیان می‌شود.

2- دستگاه آزمایش و انتخاب داده‌ها

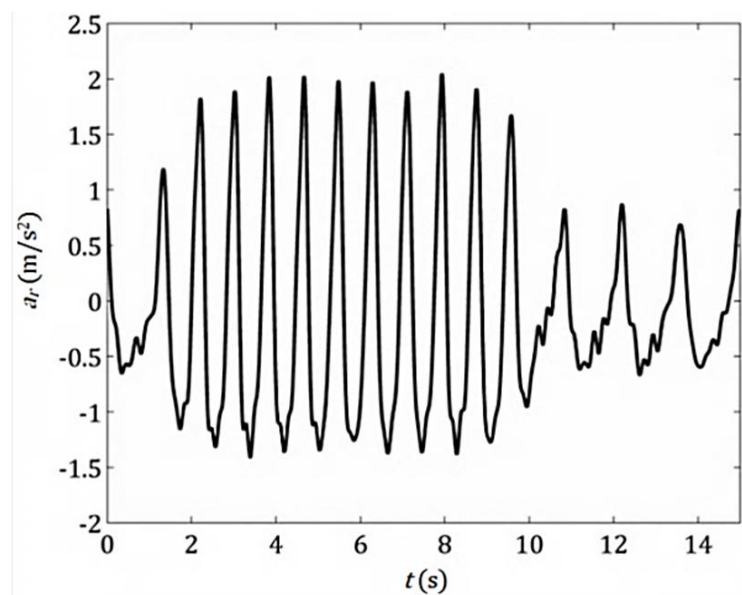
در دستگاه ساخته شده در آزمایشگاه از مکانیزم مکفرسون موجود در سیستم تعلیق جلوی خودروی سمند بدون تغییر هندسه و زوایای آن اقتباس شده است. در این دستگاه یک قاب جهت سوارشدن تیر، فنر و کمک‌فنر به کارگرفته شده و حرکت در ریل‌ها توسط غلتک‌های تفلونی با اصطکاک پایین انجام می‌شود. در بالای این قاب وزنه‌های بتنی که معادل یک چهارم وزن خودرو سمند است قرار دارد. در شکل 1 دستگاه آزمایش ساخته شده نمایش داده شده است.

در این دستگاه 3 عدد سنسور شتاب آنالوگ برای اندازه‌گیری شتاب قائم اجزای مختلف به کار گرفته شده است. یکی از این شتاب‌سنج‌ها بر روی سگ‌دست مکانیزم مکفرسون برای گرفتن شتاب جرم غیرمعلق، سنسور شتاب دوم بر روی قسمت متحرک یا جرم معلق برای اندازه‌گیری شتاب جرم معلق نصب شده است. سنسور سوم نیز برای اندازه‌گیری شتاب پایه تحریک بر روی صفحه تحریک کننده تعبیه شده است. همچنین از 3 عدد سنسور فاصله‌ی آنالوگ نیز استفاده شده است که یکی بر روی جرم معلق برای اندازه‌گیری فاصله‌ی نسبی حرکت جرم معلق نسبت به جرم غیرمعلق بوده و دو سنسور دیگر نیز برای اندازه‌گیری فشردگی تیر و جابجایی صفحه تحریک نصب شده‌اند.

دارای کاربرد وسیعی در خودروهای سواری است. در دهه‌های اخیر به منظور کنترل و کاهش بیشتر ارتعاشات وارد بر سرنشینان از سیستم تعلیق نیمه فعال و فعال استفاده شده است. این سیستم‌های کنترلی با بهره‌گیری از مدل ریاضی حاکم بر دینامیک سیستم تعلیق و با ایجاد قوانین کنترلی مناسب، به کاهش ارتعاشات وارد بر سرنشین و همچنین ایجاد تماس بهتر بین تیر و جاده می‌پردازند [1-4].

بنابراین اولین قدم در طراحی کنترل‌کننده‌ی انواع سیستم تعلیق، ایجاد یک مدل ریاضی منطبق با رفتار واقعی سیستم می‌باشد. در مطالعات کنترلی انجام شده، از مدل‌های خطی [4] و غیرخطی [3,1] برای شبیه‌سازی و همچنین طراحی کنترل‌کننده برای سیستم تعلیق استفاده شده است. در مقالاتی که از مدل‌های غیرخطی در طراحی کنترل‌کننده و یا شبیه‌سازی استفاده می‌کنند، عواملی مثل اثرات غیرخطی دمپر، اثرات ناشی از تغییر سفتی فنرهای سخت شونده و نرم شونده و همین‌طور تقریب‌های هندسی مربوط به توابع مثلثاتی در هندسه سیستم تعلیق می‌توان اشاره نمود [5]. استفاده از مدل‌های غیرخطی دقیق کمک بسزایی در رسیدن به نتایج ثنوری مطلوب و همچنین طراحی کنترل‌کننده با عملکرد بهتر می‌نماید. مدل‌های استفاده شده در مقالات همچنین از نظر گستردگی و پوشش درجات آزادی مختلف به سه دسته‌ی مدل‌های یک چهارم خودرو [1-4]، مدل‌های نصف خودرو [6,7] و همچنین مدل کامل خودرو [8] تقسیم می‌شوند که متناسب با اهداف پژوهشی از آن‌ها بهره گرفته می‌شود. در طراحی دستگاه‌های آزمایش برای بررسی عملکرد سیستم تعلیق و استخراج مدل‌های ریاضی، دستگاه آزمایش یک چهارم سیستم تعلیق از نمونه‌های پرکاربرد در پروژه‌های تحقیقاتی به شمار می‌رود که در این تحقیق نیز مورد استفاده قرار گرفته است.

برای شناسایی دستگاه آزمایش و استخراج مدل ریاضی حاکم از روش‌های مختلفی می‌توان بهره جست. روش‌های مبتنی بر مدل روش‌هایی هستند که عمدتاً به مدل‌سازی ریاضی سیستم تعلیق و المان‌های آن به صورت خطی و غیرخطی می‌پردازد. در مرجع [9] پارامترهای دستگاه آزمایش یک چهارم خودرو در یک مدل خطی به صورت متمرکز شناسایی شده است. در مرجع [10] مدل‌های خطی و غیرخطی از دستگاه آزمایش یک چهارم سیستم تعلیق فعال شناسایی شده است. در مراجع [11,12] به شناسایی مکانیزم یک سیستم تعلیق دوجناغی در یک فرایند پیچیده و با حصول معادلات جبری دیفرانسیلی پرداخته شده است. اما مدل شناسایی شده بدلیل پیچیدگی برای طراحی کنترل‌کننده‌های مبتنی بر مدل چندان مناسب نیست. در تحقیق جامع‌تری که گزارش فنی آن منتشر گردیده است، دستگاه آزمایش یک چهارم سیستم تعلیق مربوط به یک موتورسیکلت چهار چرخ شناسایی شده است [13]. در این کار عناصر اصلی سیستم تعلیق مثل فنر به صورت خطی و برای محدوده‌ی کاری مشخصی از سیستم مدل شده است. ضمن این‌که این عناصر از دستگاه جدا شده و به صورت مجزا شناسایی گردیده‌اند. استفاده از سیستم تعلیق با عناصر خطی در یک مدل با مرتبه کاهش یافته در کارهای دیگری نیز به چشم می‌خورد [14]. این در حالی است که استفاده از مدل‌های غیرخطی در شناسایی سیستم تعلیق مورد توجه برخی محققین بوده است. در مراجع [15,16] مدل‌های غیرخطی برای مکانیزم مکفرسون ایجاد شده است. این مدل‌ها جهت بررسی رفتار دینامیکی و سینماتیکی سیستم تعلیق و مشخصه‌های آن مناسب‌اند ولی در کاربردهای کنترلی به دلیل پیچیدگی زیاد معادلات دینامیکی حاصل از آن‌ها ناکارآمد به نظر می‌رسند. فلاح و همکارانش [17] در سال 2008 مدل



شکل 3 شتاب تحریک جاده به عنوان ورودی دستگاه آزمایش

دستگاه آزمایش تخمین زده شده و شناسایی می‌شود. بنابراین در این روش ساختار مدل با استفاده از قوانین حاکم بر سیستم (مدل‌سازی جعبه سفید) و مقادیر پارامترهای مدل با استفاده از ورودی و خروجی‌های سیستم (جعبه سیاه) به دست می‌آید. به همین علت به این نوع مدل‌سازی، مدل‌سازی ترکیبی نیز گفته می‌شود.

مدل‌های مختلفی برای شناسایی یک سیستم تعلیق خودرو یک چهارم ارائه می‌شود. از جمله مهم‌ترین این مدل‌ها می‌توان مدل دو درجه آزادی مک‌فرسون را نام برد. در انواع مدل‌های سیستم تعلیق می‌توان فنر و کمک‌فنر که عناصر اصلی مدل تعلیق هستند را به صورت خطی و غیرخطی در نظر گرفت. ساده‌ترین مدل یک چهارم مدلی با فنر و کمک‌فنر خطی است که مدل تایر هم به صورت یک فنر در نظر گرفته شده است. این مدل با اضافه کردن میراکننده برای تایر کامل‌تر می‌شود. بوش هم جزء دیگری است که می‌توان به سیستم اضافه نمود.

با بررسی مدل‌های مختلف سیستم تعلیق، در این مقاله از مدلی با فنر و کمک فنر غیرخطی برای عناصر اصلی سیستم تعلیق استفاده می‌شود که مناسب برای دامنه‌ی کاری وسیع از سیستم است و به مشابه آن در دیگر مقالات نیز اشاره شده است [2]. در این مدل تایر نیز به صورت خطی مدل می‌شود. مطابق شکل 4 که شماتیکی از مدل یک چهارم غیرخطی را نشان می‌دهد روابط ریاضی حاکم به صورت معادلات (1) و (2) بیان می‌شود.

$$m_s \ddot{Z}_s = K_{s1}(Z_u - Z_s) + K_{s2}(Z_u - Z_s)^2 + K_{s3}(Z_u - Z_s)^3 + C_{s1}(\dot{Z}_u - \dot{Z}_s) + C_{s2}(\dot{Z}_u - \dot{Z}_s)^2 \quad (1)$$

$$m_u \ddot{Z}_u = -K_{s1}(Z_u - Z_s) - K_{s2}(Z_u - Z_s)^2 - K_{s3}(Z_u - Z_s)^3 - C_{s1}(\dot{Z}_u - \dot{Z}_s) - C_{s2}(\dot{Z}_u - \dot{Z}_s)^2 + K_t(Z_r - Z_u) + C_t(\dot{Z}_r - \dot{Z}_u) \quad (2)$$

که در این معادلات، m_s و m_u به ترتیب جرم معلق و غیرمعلق، $Z_u - Z_s$ و $Z_r - Z_u$ به ترتیب جابجایی تعلیق و فشردگی تایر، K_t ضریب فنریت تایر، C_t ضریب میرایی آن، $K_{s1,s2,s3}$ ضرایب فنر غیرخطی و $C_{s1,s2}$ ضرایب میرایی کمک‌فنر تعلیق هستند. \ddot{Z}_u و \ddot{Z}_s مقادیر شتاب‌های جرم معلق و غیرمعلق و \dot{Z}_u و \dot{Z}_s سرعت‌های آن‌ها می‌باشند. لازم بذکر است که در انتخاب مدل توصیف شده با معادلات (1) و (2)، معیار سادگی و دقت مناسب از اهمیت برخوردار است.

برای انجام شبیه‌سازی، مدلی با دو ورودی و چهار خروجی در نرم‌افزار متلب ایجاد شد. در این مدل مقادیر پارامترهای فنر و کمک‌فنر تعلیق ($K_{s1,s2,s3}$ و $C_{s1,s2}$) و پارامترهای ضریب فنریت و میرایی تایر (K_t و C_t) به صورت مجهول اعمال شدند. این مدل با گرفتن جابجایی و شتاب تحریک به عنوان

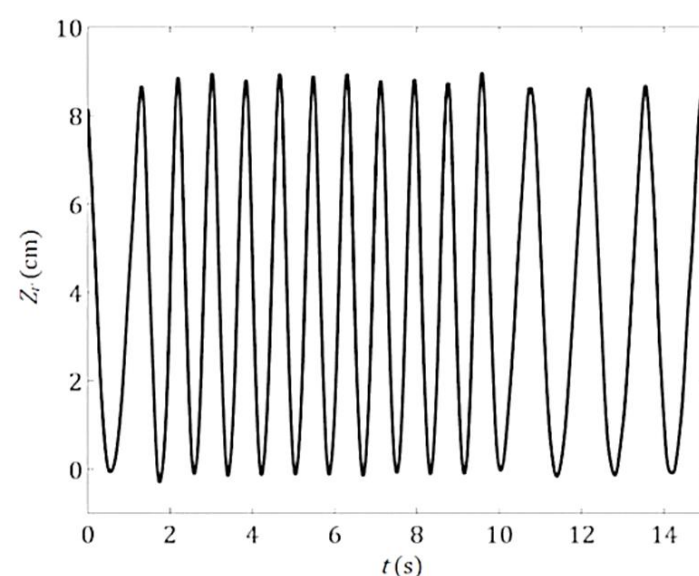


شکل 1 دستگاه آزمایش یک چهارم سیستم تعلیق ساخته شده

برای تحریک این دستگاه و شبیه‌سازی ناهمواری جاده از یک مکانیزم لنگ-پیستون که وظیفه تبدیل حرکت دورانی به جابجایی سینوسی از فرکانس 0/5 تا 1/5 هرتز با دامنه ثابت 9 سانتی‌متر را دارد تشکیل شده است. شکل‌های 2 و 3 نمونه‌ای از ورودی دستگاه آزمایش شامل ناهمواری جاده و شتاب ناهمواری جاده را نشان می‌دهد که توسط سنسور ثبت شده‌اند. در این ورودی دامنه ثابت بوده و فرکانس تحریک به صورت پیوسته از مقدار 1/5 هرتز تا مقدار 0/5 هرتز تغییر می‌کند. در این دستگاه از فرکانس‌های بالای 0/5 هرتز که دارای تحریک شدیدتر است استفاده گردید تا رفتار غیرخطی عناصر دستگاه آزمایش کاملاً نمایان شود و نیز از فرکانس‌های بیش از 1/5 هرتز به دلیل ایجاد جدایش لاستیک از جاده صرف نظر شد. در ادامه‌ی مقاله بعد از مرحله‌ی شناسایی، خروجی‌های متناسب با این ورودی‌ها شامل شتاب جرم معلق، شتاب جرم غیرمعلق، جابجایی تعلیق و فشردگی تایر نشان داده شده و با خروجی‌های مدل شناسایی شده مقایسه خواهد شد.

3- مدل‌سازی دستگاه آزمایش

منظور از مدل‌سازی دستگاه آزمایش، شناسایی رفتار آن با استفاده از اطلاعات ورودی و خروجی می‌باشد. شناسایی معمولاً به یکی از سه روش جعبه سیاه، جعبه سفید و جعبه خاکستری انجام می‌شود. در شناسایی جعبه خاکستری ساختار مدل با استفاده از قوانین حاکم بر سیستم به دست می‌آید و مقادیر پارامترهای آن از نمونه‌برداری سیگنال‌های ورودی و خروجی



شکل 2 نمونه‌ای از ناهمواری جاده به عنوان ورودی دستگاه آزمایش

تغییرات پارامترهای مورد نظر می‌باشد. J ماتریس ژاکوبین خطای یک تکرار با N سطر (تعداد زمان‌های نمونه برداری شده) و P ستون (تعداد پارامترهای شناسایی شده) است و با رابطه‌ی (6) تعریف می‌شود.

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial e_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial e_1}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial e_1}{\partial \theta_p} \\ \frac{\partial e_2}{\partial \theta_1} & \frac{\partial e_2}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial e_2}{\partial \theta_p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial e_N}{\partial \theta_1} & \frac{\partial e_N}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial e_N}{\partial \theta_p} \end{bmatrix}, \quad \frac{\partial e_k}{\partial \theta} = \begin{bmatrix} \frac{\partial e_k}{\partial \theta_1} \\ \frac{\partial e_k}{\partial \theta_2} \\ \vdots \\ \frac{\partial e_k}{\partial \theta_p} \end{bmatrix}, \quad \underline{e} = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_N \end{bmatrix} \quad (6)$$

با کمینه کردن تابع خطا که در رابطه (7) براساس مجموع مربعات خطای خروجی‌های قابل اندازه‌گیری که شامل 4 خروجی دستگاه آزمایش و مدل شناسایی شده است، پارامترهای مدل یک چهارم غیرخطی در هر مرحله از تکرار بدست می‌آیند.

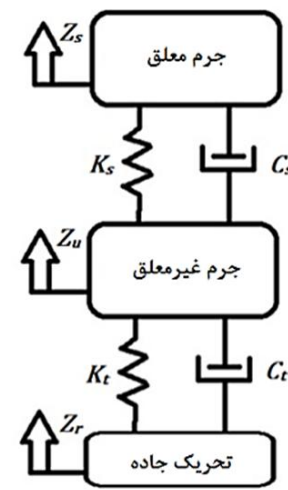
$$S = \min \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N e_i \cdot e_i^T = \min \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^P (e_{i,j}^2) \quad (7)$$

اولین مرحله در شناسایی، ثبت ورودی و خروجی دستگاه آزمایش طراحی شده برای یک چهارم سیستم تعلیق است. برای این مرحله با یک دستگاه نمونه‌برداری، از لحظه اعمال ورودی به دستگاه، خروجی سیستم همگام با ورودی نمونه‌برداری شده در رایانه ذخیره می‌گردد. در طول این آزمایش زمان نمونه‌برداری 0/0025 ثانیه است. یعنی با گذشت هر 0/0025 ثانیه یک مجموعه کامل از سیگنال‌های ورودی و خروجی نمونه‌برداری می‌شود. تمامی اطلاعات حاصل از سنسورها همراه با نویز بوده است که با روش‌های سخت افزاری (فیلترهای پایین گذر مرتبه 1) و نرم‌افزاری با حفظ ماهیت اصلی سیگنال فیلتر شده است. از فیلتر سخت‌افزاری جهت فیلترشدن نویزهای فرکانس بالای 100 هرتز و از فیلترهای مرتبه بالای نرم‌افزاری نیز برای حذف نویزهای بین 10 تا 100 هرتز همانند نویزهای برق شهر و نمونه‌برداری استفاده شده است. در مرحله بعد نیاز به مدلی دینامیکی از این دستگاه آزمایش است که با استفاده از معادلات (1) و (2) در بخش 3 یک مدل یک چهارم خودرو غیرخطی مشابه شکل 4 استخراج می‌شود.

برای شناسایی از 5600 داده در 15 ثانیه از دستگاه آزمایش که ورودی‌های آن در بخش 2 نمایش داده شده استفاده می‌گردد. از این داده‌ها که شامل شتاب تحریک به عنوان ورودی و شتاب جرم معلق، شتاب جرم غیرمعلق، جابجایی تعلیق و فشردگی تایلر به عنوان خروجی هستند برای شناسایی استفاده می‌شود. در مدل سیستم تعلیق جرم‌ها طبق جدول 1 به وسیله ترازو اندازه‌گیری شده و سایر پارامترها شناسایی می‌شوند. شرایط اولیه برای شناسایی پارامترهای این مدل غیرخطی در جدول 2 نمایش داده شده است. این مقادیر به صورت حدس اولیه و در محدوده‌ی یک سیستم تعلیق غیرخطی در نظر گرفته شده است. همچنین مقادیر سرعت و جابجایی اولیه جرم معلق و غیرمعلق، صفر در نظر گرفته شده است که شرایط مرزی و همگرایی حل معادلات را پوشش می‌دهد.

5- نتایج مدل شناسایی شده و ارزیابی آن

با اعمال روش شناسایی، پارامترهای مدل شناسایی شده و در جدول 3 نمایش داده شده است. مقادیر ضرایب فنریت و میرایی و نرخ‌های تغییرات آن در این جدول نشان داده شده است. همچنین در این جدول مقدار ضریب میرایی منفی نرخ تغییرات میرایی با اضافه شدن سرعت در سیستم را نشان می‌دهد. نتایج خروجی مدل شناسایی شده در مقایسه با داده‌هایی که در شناسایی مورد استفاده قرار گرفته‌اند در شکل‌های 5 تا 8 نمایش داده شده است. در شکل‌های 5 و 6 به ترتیب شتاب جرم معلق و غیرمعلق حاصل از



شکل 4 شماتیک مدل یک چهارم غیرخطی خودرو

ورودی، 4 خروجی شامل شتاب جرم معلق یا بدنه، شتاب جرم غیرمعلق یا تایلر، جابجایی تعلیق و فشردگی تایلر را تولید و برای شناسایی پارامترهای مجهول استفاده می‌کند.

4- شناسایی مدل

یکی از روش‌های شناسایی تکراری، روش حداقل مربعات غیرخطی است که از مهم‌ترین روش‌های شناسایی به شمار می‌رود. در این روش این واقعیت همواره در نظر گرفته می‌شود که تمامی اطلاعات اندازه‌گیری با خطا و نویز همراه است. در روش حداقل مربعات هدف اصلی این است که پارامترها به‌گونه‌ای تخمین زده شوند که مجموع مربعات خطای حاصل از مقایسه خروجی مدل و خروجی اندازه‌گیری شده از دستگاه آزمایش برای همه نمونه‌های داده (i) و همین‌طور همه تکرارهای (k) حداقل ممکن گردد.

برای شناسایی سیستم تعلیق مورد نظر، ابتدا پارامترهای سیستم تعلیق که همان ضریب فنریت تایلر، میرایی تایلر و ضرایب مرتبه 1، 2 و 3 از جابجایی فنر و مرتبه 1 و 2 از سرعت اعمال شده به میراکننده تعلیق است به ترتیب به صورت بردار θ_k برای تکرار k ام طبق رابطه (3) تعریف می‌شود:

$$\theta_k = [K_t \quad C_t \quad K_{s1} \quad K_{s2} \quad K_{s3} \quad C_{s1} \quad C_{s2}]^T \quad (3)$$

که پارامترهای K_t ، C_t ، $K_{s1,s2,s3}$ و $C_{s1,s2}$ ثابت‌های معادلات (1) و (2) می‌باشند.

حال با فرض θ اولیه، θ های تکرار بعد در یک روش تکراری به‌گونه‌ای بدست می‌آید که خطای همه خروجی‌های دستگاه آزمایش و خروجی‌های مدل شناسایی شده (مدلی که از θ آن مرحله بدست آمده) در همه زمان‌های نمونه‌برداری به حداقل ممکن برسد. در این روش بردار خطای خروجی‌های اندازه‌گیری شده برای داده نمونه‌ی i ام به شکل رابطه (4) تعریف می‌شود:

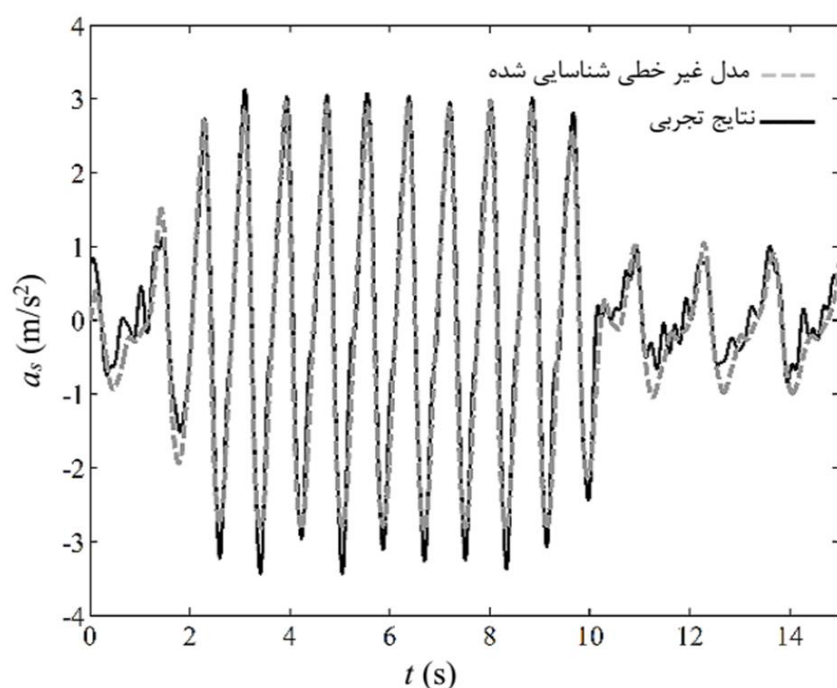
$$e_i = \begin{bmatrix} a_u(i) & a_s(i) & (Z_u(i) - Z_s(i)) & (Z_r(i) - Z_u(i)) \\ -\hat{a}_u(i) & -\hat{a}_s(i) & (\hat{Z}_u(i) - \hat{Z}_s(i)) & (\hat{Z}_r(i) - \hat{Z}_u(i)) \end{bmatrix} \quad (4)$$

در این مقاله θ از روش تکراری لوبنبرگ-مارکارد² استخراج می‌شود. در این روش مشابه سایر روش‌های شناسایی تکراری، مقادیر θ در هر مرحله با داشتن θ تکرار قبل محاسبه می‌شود. بنابراین، پارامترهای سیستم شناسایی شده طبق رابطه‌ی (5)، براساس تابع برداری خطا و اطلاعات تکرار قبل بروز شده و بهینه می‌شوند.

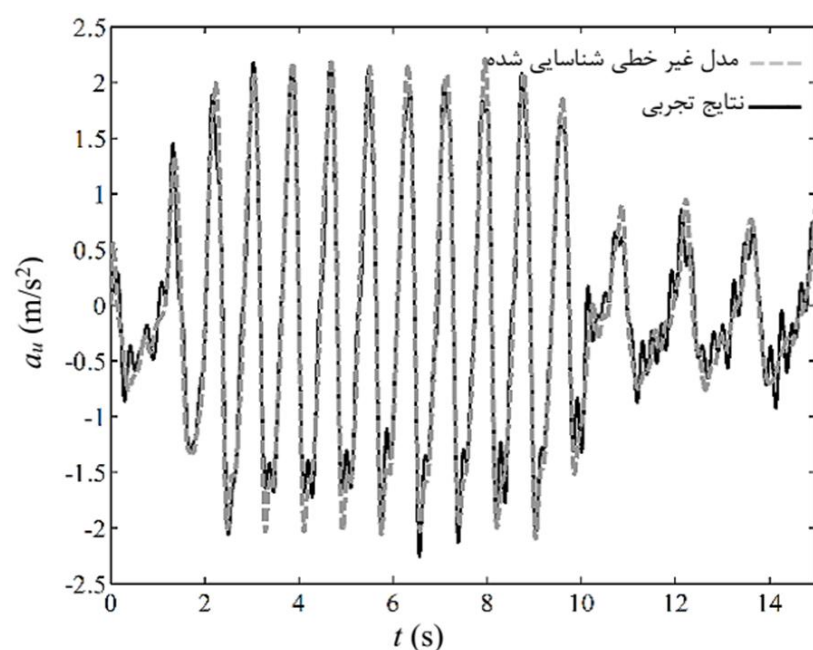
$$\theta_k = \theta_{k-1} - (J^T J + \alpha I)^{-1} J^T e_k \quad (5)$$

در این رابطه k نشانگر شمارنده تکرار و I یک ماتریس واحد می‌باشد. α مقداری دلخواه و تعیین کننده دقت بهینه‌سازی و سرعت همگرایی در بازه

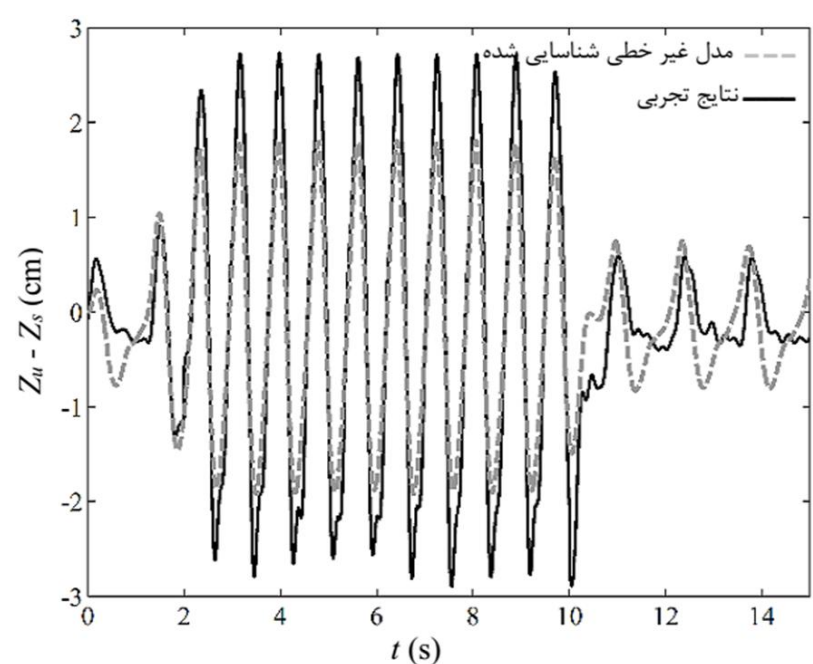
1- Iteration
2- Levenberg-Marquardt



شکل 5 شتاب جرم معلق برای داده‌های شناسایی



شکل 6 شتاب جرم غیرمعلق برای داده‌های شناسایی



شکل 7 جابجایی تعلیق برای داده‌های شناسایی

به خوبی توانسته شتاب جرم معلق دستگاه آزمایش را مطابق شکل 9 و شتاب جرم غیرمعلق را مطابق شکل 10 تخمین زند. در شکل 11 جابجایی تعلیق در مدل به خوبی جابجایی اندازه‌گیری شده از دستگاه آزمایش را ردیابی کرده است. فشردگی تایر نیز در شکل 12 با نتایج آزمایش مقایسه و بر آن منطبق است.

جدول 1 مقادیر جرم معلق و غیرمعلق اندازه‌گیری شده در دستگاه آزمایش

نام جزء بکار رفته در مدل یک چهارم	وزن (کیلوگرم)
جرم معلق شامل:	250
سازه متحرک و غلتک‌ها، وزنه‌های بتنی، نصف جرم طبق	
جرم غیرمعلق شامل:	46/1
تایر، سگدست، فنر و میراکننده، نصف جرم طبق	

جدول 2 مقادیر اولیه برای پارامترهای شناسایی شده (مقدار θ اولیه)

نام پارامتر	اندیس	مقدار
ضریب فنریت تایر	K_t	150000 (N/m)
ضریب میرایی تایر	C_t	1000 (N.s/m)
	K_{s1}	10000 (N/m)
ضرایب فنر	K_{s2}	-100000 (N/m²)
	K_{s3}	1000000 (N/m³)
	C_{s1}	1000 (N.s/m)
ضرایب میرایی	C_{s2}	100 (N.s/m²)

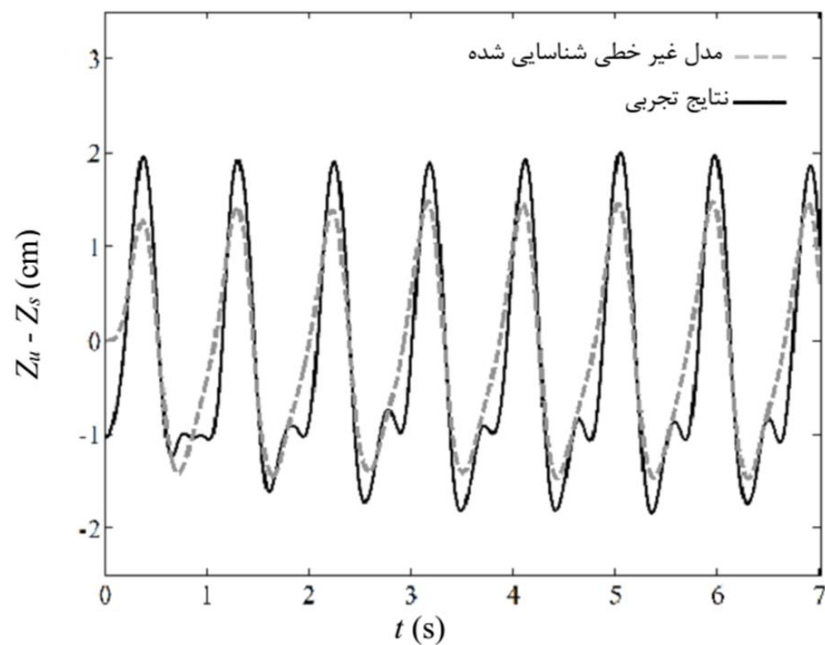
آزمایش و مدل غیرخطی شناسایی شده مقایسه شده است. همان‌طور که از نمودارهای 5 و 6 مشهود است و انتظار آن نیز می‌رفت، با کاهش فرکانس ناهمواری ورودی جاده، میزان دامنه شتاب وارد بر سرنشین کاهش یافته است. این پدیده کاهش دامنه برای سرعت و جابجایی جرم غیرمعلق نیز قابل پیش‌بینی است که در شکل‌های 5 تا 8 از زمان شروع تا زمان 2 ثانیه و همچنین از ثانیه دهم تا انتهای شبیه‌سازی رخ داده است. در این شکل‌ها مدل غیرخطی به خوبی خروجی تجربی دستگاه آزمایش را ردیابی کرده است و مدل شناسایی شده به خوبی توانسته است شتاب وارد بر دو جرم معلق و غیرمعلق خودرو را در مواجهه با طیف فرکانس متغیر ورودی جاده شبیه‌سازی کند. در شکل 7 مقدار جابجایی تعلیق با مدل ارائه شده مقایسه گردیده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود مدل توانسته خروجی دستگاه آزمایش را با کمی خطا در مقادیر حداکثر ردیابی کند. در شکل 8 نیز مدل توانسته به خوبی فشردگی تایر را تخمین بزند.

برای ارزیابی بهتر مدل شناسایی شده، خروجی این مدل باید با نتایج آزمایشگاهی دیگری هم مقایسه شود که در شناسایی آن دخیل نبوده‌اند. از این رو داده‌های ارزیابی برای ورودی با فرکانس تحریک حدود 1/05 هرتز از دستگاه آزمایش مجدداً استخراج شد. نتایج تخمین در مدل شناسایی شده برای این داده‌ها در شکل‌های 9 تا 12 نمایش شده است.

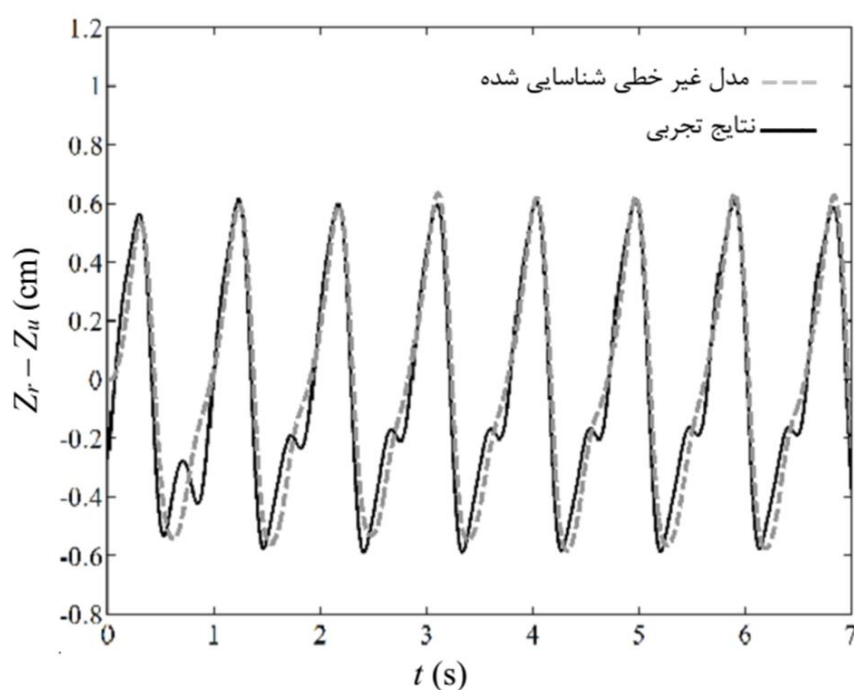
همچنین مقادیر مجذور میانگین مربعات خطا و مقادیر نرمال‌سازی شده برای داده‌های شناسایی و ارزیابی در جداول 4 و 5 نشان داده شده است. در این جدول مقادیر خطا بسیار کم است که با توجه به تجربی بودن نتایج، درصد خطا قابل قبول است. در داده‌های ارزیابی، مدل یک چهارم غیرخطی

جدول 3 پارامترهای مدل غیرخطی شناسایی شده (θ)

نام پارامتر (واحد)	اندیس	مقدار
ضریب فنریت تایر	K_t	99592 (N/m)
ضریب میرایی تایر	C_t	759 (N.s/m)
	K_{s1}	24369 (N/m)
ضرایب فنر	K_{s2}	132058 (N/m²)
	K_{s3}	26537273 (N/m³)
	C_{s1}	2817 (N.s/m)
ضرایب میرایی	C_{s2}	-10 (N.s/m²)



شکل 11 جابجایی تعلیق برای داده‌های ارزیابی



شکل 12 فشردگی تایر برای داده‌های ارزیابی

جدول 4 مجذور میانگین مربعات خطا و درصد خطا برای شتاب جرم معلق و غیرمعلق برای داده‌های شناسایی و ارزیابی

نوع داده	فرکانس تحریک (هرتز)		خطای شتاب جرم معلق		خطای شتاب جرم غیرمعلق	
	NRMS	RMS	NRMS	RMS	NRMS	RMS
داده‌های شناسایی	1/2 و 0/73	0/3343	8/36%	0/2193	7/31%	0/2193
داده‌های ارزیابی	1/05	0/3282	8/21%	0/2493	9/97%	0/2493

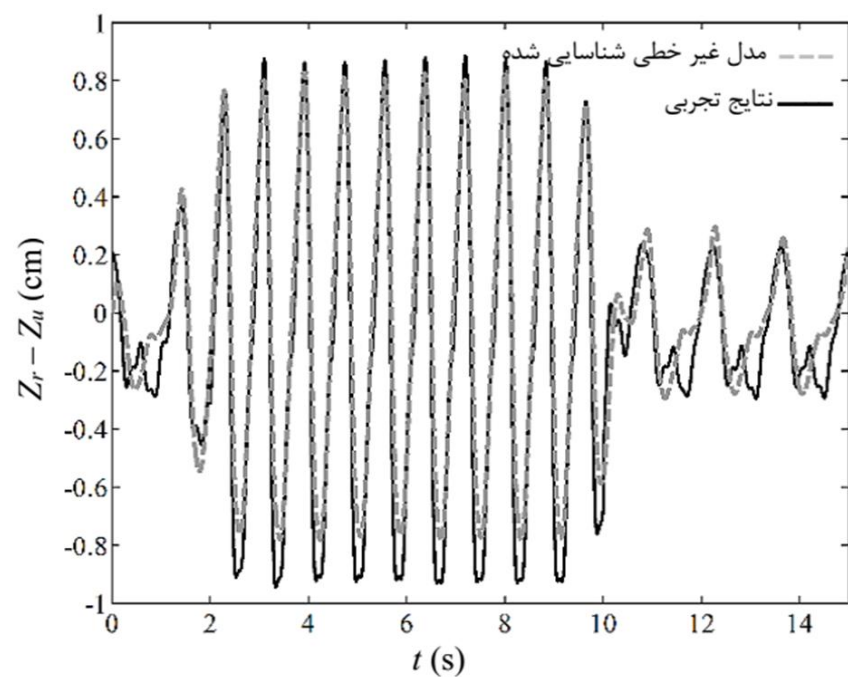
جدول 5 مجذور میانگین مربعات خطا و درصد خطا برای جابجایی تعلیق و فشردگی تایر برای داده‌های شناسایی و ارزیابی

نوع داده	فرکانس تحریک (هرتز)		خطای جابجایی تعلیق		خطای فشردگی تایر	
	NRMS	RMS	NRMS	RMS	NRMS	RMS
داده‌های شناسایی	1/2 و 0/73	0/0068	22/67%	0/0012	9/60%	0/0012
داده‌های ارزیابی	1/05	0/0056	14/00%	0/0011	9/16%	0/0011

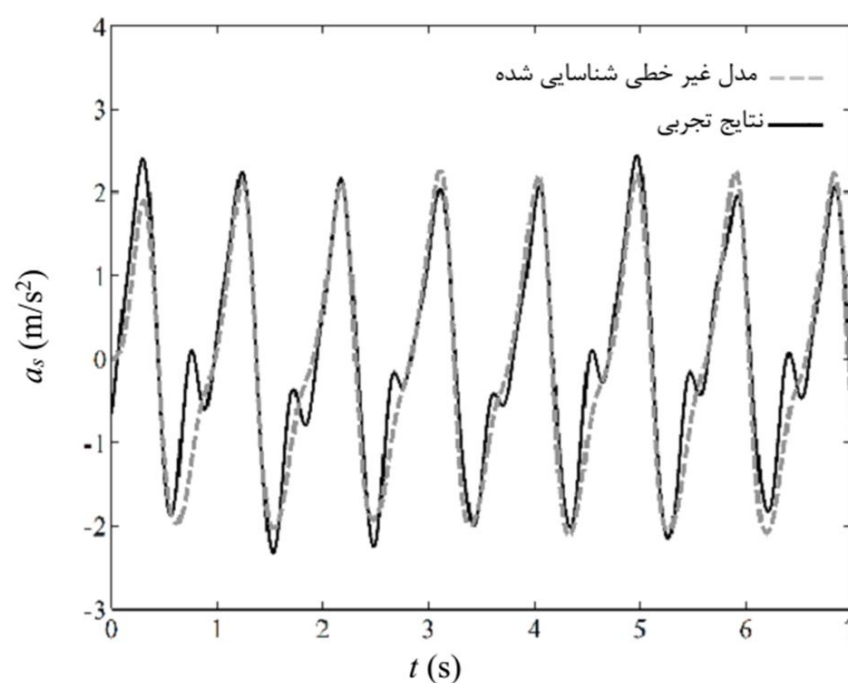
6- نتیجه‌گیری

در این مقاله نتایج شناسایی یک مدل دینامیکی غیرخطی برای دستگاه آزمایش یک چهارم سیستم تعلیق ارائه شد. نوآوری ویژه این کار در تهیه یک مدل ریاضی با دید کاربردی در زمینه کنترل غیرخطی است که برای دستگاه

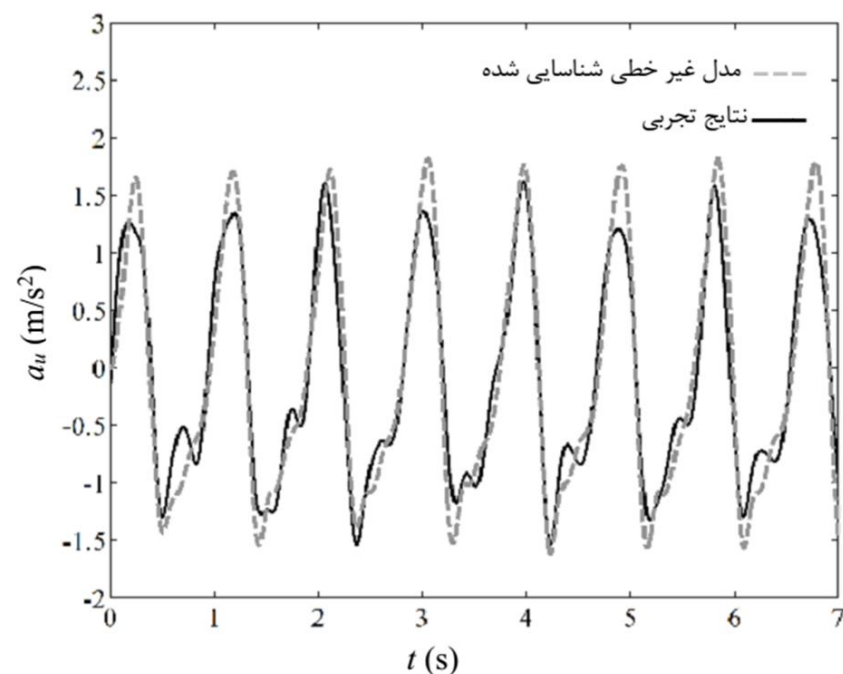
در شکل 13 با گرفتن تبدیل فوریه سریع از شتاب جرم غیرمعلق حاصل از نتایج تجربی و مدل شناسایی شده محتوای فرکانسی سیگنال برداشت شده تا فرکانس قطع آن نمایش داده شده است. در این شکل نشان داده شده است که خروجی‌ها علاوه بر تشابه در بعد زمان، در حوزه فرکانس نیز متشابه‌اند.



شکل 8 فشردگی تایر برای داده‌های شناسایی



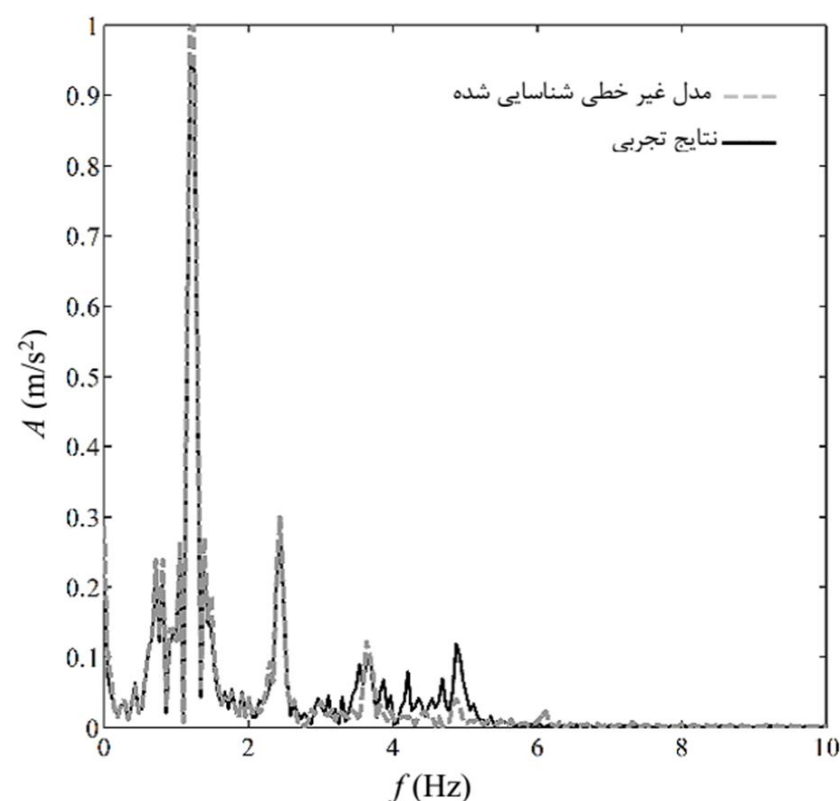
شکل 9 شتاب جرم معلق برای داده‌های ارزیابی



شکل 10 شتاب جرم غیرمعلق برای داده‌های ارزیابی

7- مراجع

- [1] A. Malekshahi, M. Mirzaei, Designing a non-linear tracking controller for vehicle active suspension systems using an optimization process, *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 13, pp. 263-271, 2012.
- [2] C. Kim, P. Ro, A sliding mode controller for vehicle active suspension systems with non-linearities, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, Vol. 212, pp. 79-92, 1998.
- [3] A. Motavali Khiavi, M. Mirzaei, S. Hajimohammadi, A new optimal control law for the semi-active suspension system considering the nonlinear magneto-rheological damper model, *Journal of Vibration and Control*, Vol. 20(14), pp. 2221-2233, 2014.
- [4] T. Van der Sande, B. Gysen, I. Besselink, J. Paulides, E. Lomonova, H. Nijmeijer, Robust control of an electromagnetic active suspension system: Simulations and measurements, *Mechatronics*, Vol. 23, pp. 204-212, 2013.
- [5] M. Salmani Arani, M. Mirzaei, S. Aghasizade, B. Abdi, ANFIS Identification of McPherson suspension system of vehicle, in *14th Iranian conference on fuzzy systems*, Tabriz, Iran, 2014. (In Persian)
- [6] A. Malekshahi, M. Mirzaei, S. Aghasizade, Non-Linear Predictive Control of Multi-Input Multi-Output Vehicle Suspension System, *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, Vol. 34, pp. 87-106, 2015.
- [7] K. Li, M. Nagai, Control and evaluation of active suspension for MDOF vehicle model, *JSAE review*, Vol. 20, pp. 343-348, 1999.
- [8] S. Aghasizade Shaarbaf, *Intelligent multi layer control of semi-active suspension with MR fluid, for the improvement of overall ride and road holding aspects*, MSc Thesis, Department of Vehicle Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, 2010. (In Persian)
- [9] Y. Taskin, N. Yagiz, I. Yuksek, Lumped parameter identification of a quarter car test rig, in *International Conference on Mathematical Modelling in Physical Sciences*, Budapest, Hungary Vol. 410, 2013.
- [10] Z. Zulfatman, *Identification of test rig for a quarter car active suspension systems*, MSc Thesis, Department of Electrical Engineering, Universiti Teknologi Malaysia, Malaysia, 2008.
- [11] C. Sandu, E. R. Andersen, S. Southward, Multibody dynamics modelling and system identification of a quarter-car test rig with McPherson strut suspension, *Vehicle System Dynamics*, Vol. 49, pp. 153-179, 2011.
- [12] E. R. Andersen, *Multibody dynamics modeling and system identification for a quarter-car test rig with McPherson strut suspension*, MSc Thesis, Department of Mechanical Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, United States, 2007.
- [13] G. Koch, E. Pellegrini, S. Spirk, B. Lohmann, *Design and modeling of a quarter-vehicle test rig for active suspension control*, Institute of Automatic Control, Germany, Vol. TRAC-5, 2010.
- [14] C. Kim, P. Ro, Reduced-order modelling and parameter estimation for a quarter-car suspension system, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, Vol. 214, pp. 851-864, 2000.
- [15] K. Chen, D. G. Beale, Base dynamic parameter estimation of a MacPherson suspension mechanism, *Vehicle System Dynamics*, Vol. 39, pp. 227-244, 2003.
- [16] J. Hurel, A. Mandow, A. García-Cerezo, Nonlinear two-dimensional modeling of a McPherson suspension for kinematics and dynamics simulation, in *Advanced Motion Control (AMC)*, Bosnia and Herzegovina, pp. 1-6, 2012.
- [17] M. Fallah, R. Bhat, W. Xie, New nonlinear model of macpherson suspension system for ride control applications, in *2008 American Control Conference*, Washington, USA, pp. 3921-3926, 2008.
- [18] D. Hanafi, M. Rahmat, System identification of hammerstein model a quarter car passive suspension systems using Multilayer Perceptron Neural Networks (MPNN), *Jurnal Teknologi*, Vol. 43, pp. 95-109, 2005.
- [19] A. Shehata, H. Metered, W. A. Oraby, Vibration Control of Active Vehicle Suspension System Using Fuzzy Logic Controller, *Vibration Engineering and Technology of Machinery*, Vol. 23, pp. 389-399, 2015.
- [20] M. F. Ismail, Y. M. Sam, S. Sudin, K. Peng, M. K. Aripin, Modelling and Control of MacPherson Active Suspension System Using Composite Nonlinear Feedback under Chassis Twisted Road Condition, *AsiaSim 2014*, Vol. 724, pp. 310-321, 2014.



شکل 13 محتوای فرکانسی سیگنال (تبدیل فوریه سریع شتاب جرم غیر معلق)

ساخته شده در آزمایشگاه انجام پذیرفته است. در این مدل به علت رفتار ارتعاش غیرخطی دستگاه آزمایش در بازه تحریک 9 سانتی‌متر، از مدل فنر و کمک‌فنر غیرخطی استفاده شده است. همچنین مدل انتخاب شده ضمن ساده‌بودن از دقت کافی برخوردار است. نتایج شناسایی حاکی از ردیابی خوب خروجی‌های دستگاه آزمایش در مدل شناسایی شده برای داده‌های شناسایی و ارزیابی است و این مدل به خوبی توانسته در مقایسه با مدل‌های ارائه شده به شناسایی دستگاه آزمایش بپردازد. مقادیر مجذور میانگین مربعات خطا و درصد خطا در تخمین مدل شناسایی شده و نتایج آزمایشگاهی برای شتاب جرم معلق، غیرمعلق و فشرددگی تایر کمتر از 10 درصد است. این خطاها ناشی از عوامل مختلفی مانند دینامیک‌های مدل نشده، اصطکاک، کالیبراسیون سنسورها و خطای اندازه‌گیری می‌باشد.

از ویژگی‌های دیگر این مدل می‌توان به قابلیت استفاده در کاربردهای کنترلی در سیستم‌های تعلیق فعال و نیمه فعال اشاره کرد. همچنین از مدل ارائه شده می‌توان به عنوان یک تخمین‌گر مناسب جهت تخمین فشرددگی تایر استفاده کرد. از نکات برجسته مدل، تطبیق خروجی مدل و دستگاه آزمایش موجود با وجود دینامیک‌های مدل نشده و خطاهای ناشی از اندازه‌گیری است. در پایان، نتیجه کار انجام شده یک مدل غیرخطی کارآمد را در عین سادگی برای دستگاه آزمایش یک چهارم خودرو شناسایی می‌کند که قابلیت پیاده‌سازی عملی در کاربردهای کنترلی نیز دارد.