



دانشگاه صنعتی سهند

نشریه سالانه علمی غیرخطی در مهندسی برق

دوره ۴- شماره های ۱ و ۲

تابستان و زمستان ۱۳۹۶

صفحه ۴ الی ۲۵

ISSN: 2322-3146

<http://jnsee.sut.ac.ir>

شناسایی مدل غیرخطی جدید برای میراگر MR و استفاده از آن در کنترل سیستم تعلیق نیمه فعال خودرو

محمد مرادی نوین^۱، مهدی میرزایی^۲ و سجاد آقاسی زاده شعرباف^۳

^۱فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند تبریز mo_moradi@sut.ac.ir

^۲نویسنده مسئول، دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند تبریز mirzaei@sut.ac.ir

^۳دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند تبریز s_ghasizade@sut.ac.ir

(تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۵/۱۳ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۸/۲۴)

چکیده

در مقاله حاضر یک مدل غیرخطی جدید برای میراگر مغناطیسی MR بر پایه مدل بوک-ون ساده شناسایی و ارائه می‌شود که علی‌رغم دارا بودن خاصیت غیرخطی هیستریزیس، نسبت به جریان الکتریکی خطی است. این مزیت باعث می‌شود که بتوان به راحتی از این مدل به عنوان مدل معکوس در سیستم کنترلی تعلیق نیمه فعال خودرو جهت تبدیل نیرو به جریان الکتریکی استفاده کرد. همچنین برای ارزیابی بهتر مدل پیشنهادی، یک مدل چند جمله‌ای غیر هیستریزیسی مشابه با آنچه که در مراجع وجود، نیز دارد نیز برای میراگر مغناطیسی طراحی شده است. مقایسه دقت مدل‌ها نشان می‌دهد که مدل بوک-ون ارائه شده در هر دو حالت مستقیم و معکوس در نواحی سرعت پایین دقت بالاتری نسبت به مدل چند جمله‌ای دارد. در گام دوم، یک کنترل کننده بهینه برای محاسبه‌ی نیروی فعال سیستم تعلیق طراحی و در کنار مدل‌های معکوس شناسایی شده، استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی برای کنترل سیستم تعلیق خودرو در حالت‌های فعال و نیمه‌فعال با دو مدل میراگر بر روی یک جاده استاندارد ارائه می‌شوند. مشاهده می‌گردد که از بین دو مدل معکوس طراحی شده، مدل بوک-ون پیشنهادی، عملکرد بهتری در کنترل سیستم تعلیق نیمه‌فعال دارد. همچنین، با افزایش دامنه سرعت میراگر در سیستم تعلیق نتایج دو مدل تعلیق نیمه فعال به هم نزدیک‌تر می‌شوند.

واژه‌های کلیدی

سیستم تعلیق خودرو،

میراگر MR،

شناسایی،

هیستریزیس،

مدل بوک-ون.



Sahand University
of Technology

Journal of Nonlinear
Systems in Electrical
Engineering
Vol.4, No.1 and 2,
Summer and Winter 1396
ISSN: 2322 – 3146
<http://jnsee.sut.ac.ir>

Identification of a New Non-linear Model for MR Damper and Its Application in Control of Vehicle Semi-active Suspension System

Mohammad Moradi Narbin¹, Mehdi Mirzaei² and Sajjad Aghasizadeh³

¹ M.Sc. Graduated in Mechanical Engineering, Mechanical Engineering Department, Sahand University of Technology, mo.moradi.86@gmail.com

² **Corresponding Author**, Associate Prof., Mechanical Engineering Department, Sahand University of Technology, mirzaei@sut.ac.ir

³ Ph.D. Student in Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, s_ghasizade@sut.ac.ir

ABSTRACT

Keywords

Vehicle Suspension System,
MR Damper,
Identification,
Hysteresis,
Bouc-Wen Model.

In this paper, a new nonlinear model is identified for magnetorheological (MR) damper based on the bouc-wen model. This model which includes the hysteresis loop is linear with respect to the input current. This advantage makes it easy to use the proposed model in semi-active suspension systems as the inverse model. For better comparison, a polynomial model developed in the prevalent papers is also designed. The performance evaluation of two models shows that the proposed bouc-wen model has higher accuracy in the smaller velocity range. At the rest of the paper, an LQR controller designed for calculation of the active suspension force is integrated with the two identified inverse models. The simulation studies are carried out for active and semi-active suspension systems on a standard road. The results show that the simplified nonlinear bouc-wen model has better performance in controlling the semi active suspension system compared to the other models. In high amplitude velocities of the damper, the performance of two models is close to each other.

۱- مقدمه

امروزه کاهش ارتعاشات وارده به خودرو ناشی از نوسانات جاده یکی از مهم‌ترین هدف‌های شرکت‌های خودروسازی است. در حال حاضر سیستم تعلیق غیرفعال به عنوان ساده‌ترین سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این سیستم مشخصه‌های کلی سیستم تعلیق اعم از هندسه، ضرایب میرایی و سفتی ثابت هستند و به همین دلیل سرعت میرایی نوسانات در محدوده‌ی وسیعی از شرایط کاری پایین است. برای رفع این نقیصه، در سال‌های اخیر سیستم تعلیق فعال مطرح شده است. در این سیستم نیروی خارجی لازم برای کنترل سیستم تعلیق توسط محرک‌های هیدرولیکی و یا نیوماتیکی تامین می‌شود. اما پیچیدگی این سیستم‌ها، میزان مصرف انرژی بالا و هزینه نگهداری که در صنایع خودروسازی عوامل مهمی هستند، باعث محدود شدن استفاده از این تکنولوژی و تجاری سازی آن شده است. برای رفع این مشکلات در دو دهه اخیر سیستم تعلیق نیمه فعال بسیار مورد توجه بوده است [۱، ۲]. یکی از متداول‌ترین راه‌های به‌کارگیری سیستم تعلیق نیمه‌فعال استفاده از میراگرهای هوشمند مغناطیسی است که قابلیت تغییر در مشخصات خود را دارند. ویسکوزیته روغن داخل این میراگرها با تغییر میدان مغناطیسی تغییر می‌کند و در نتیجه نیروی تولید شده توسط میراگر با توجه به جریان و ولتاژ اعمالی به سیم‌پیچ تغییر می‌کند [۳]. این میدان مغناطیسی با جریان الکتریکی در ارتباط است و در نتیجه می‌توان جریان الکتریکی را برای این میراگرها به عنوان ورودی کنترلی در نظر گرفت. رابطه بین جریان الکتریکی و نیروی تولید شده میراگر باید در قالب یک مدل بیان شود تا بتوان از آن در سیستم کنترلی و استخراج قانون کنترلی به راحتی استفاده کرد. البته میراگرهای مغناطیسی دارای خاصیت هیستریزس هستند؛ بنابراین مدلی که بتواند این خاصیت را نشان دهد عملکرد بهتری در سیستم کنترلی خواهد داشت.

مدل‌های پارامتری و غیر پارامتری مختلفی برای میراگرهای هوشمند پیشنهاد شده است. Wereley و همکارانش در سال ۱۹۹۸ مدل پارامتری ویسکوالاستیک-پلاستیک را که مبتنی بر قوانین سیالات است، به کار گرفتند [۴]. Bouc و همکارش Wen مدل پارامتری بر پایه مدل هیستریزس ارائه کردند [۱]. این مدل که به بوک-ون مشهور است بر پایه پارامترهای فیزیکی مانند سفتی و میرایی بدست آمده است. Spencer و همکارانش در سال ۱۹۹۷ این مدل را توسعه دادند [۵]. مدل توسعه یافته بوک-ون بسیار دقیق و کامل است ولی استفاده مستقیم از آن در معادلات سیستم تعلیق به منظور استخراج قوانین کنترلی موجب بالا رفتن مرتبه سیستم، افزایش حجم محاسبات و در نتیجه سخت‌تر شدن روند طراحی و پیاده‌سازی کنترل کننده می‌شود. استفاده از مدل‌های ساده‌تر هر چند با دقت کمتر، راه حل مناسبی برای مشکلات اشاره شده است. مدل‌های شبکه عصبی و فازی مدل‌های غیر پارامتری هستند که قابلیت بیان رفتار این سیستم‌ها را دارند. Roschke و Schurter در سال ۲۰۰۰ مدل فازی را برای مدل‌سازی رفتار میراگر پیشنهاد کردند [۶]. Du و همکارانش با استفاده از RBF^۱ که نوع خاصی از شبکه‌های عصبی هست، مدلی معکوس برای میراگر بدست آوردند [۷]. آنها داده‌های لازم برای آموزش شبکه را از روی نتایج حاصل از مدل بوک-ون تعمیم یافته بدست آوردند.

در حالت کلی دو نوع رویکرد کنترلی برای استفاده از میراگرهای هوشمند در سیستم تعلیق نیمه‌فعال استفاده می‌شود. رویکرد اول، استفاده مستقیم از دینامیک میراگر در معادلات سیستم و بدست آوردن جریان ورودی میراگر به عنوان قانون کنترلی

¹ Radial Basis Function

است. Motavali و همکارانش از کنترل کننده پیش‌بین در کنار مدل چندجمله‌ای میراگر، جهت کنترل سیستم تعلیق نیمه فعال استفاده کردند که در این مدل خاصیت هیستریزیس میراگر در نظر گرفته نشده است [۸]. آنها این مدل را بصورت مستقیم در معادلات فضای حالت سیستم وارد کرده و جریان ورودی میراگر را کنترل کردند. همچنین Yao و همکارانش از مدل بوک-ون ساده و کنترل کننده روشن-خاموش روی مدل یک چهارم خطی استفاده نمودند [۹].

رویکرد دوم، بدست آوردن مدل معکوس این میراگرها و به کارگیری آن در کنار کنترل کننده فعال است. بدین ترتیب که ابتدا کنترل کننده نیروی مناسب را محاسبه کرده و سپس مدل معکوس با داشتن این نیرو جریان الکتریکی مناسب را محاسبه و به میراگر ارسال می‌کند. در نهایت نیروی واقعی کنترلی با تغییر ضریب میرائی میراگر تولید شده و به سیستم تعلیق وارد می‌شود. برای پیاده سازی روش بالا داشتن یک مدل معکوس با دقت خوب بسیار ضروری است. چندین مدل تاکنون مطرح شده است. Choi و همکارانش مدل چند جمله‌ای را ارائه دادند [۱۰]. Du و همکارانش از این مدل در کنار کنترل کننده H_{∞} در یک سیستم تعلیق استفاده کردند و توانستند تا حد قابل قبولی سیستم تعلیق را کنترل کنند [۱۱]. همچنین Dong و همکارانش پس از شناسایی مدل چندجمله‌ای میراگر، عملکرد انواع کنترل کننده‌ها را برای کنترل سیستم تعلیق با هم مقایسه کردند [۱۲]. مدل چندجمله‌ای ارائه شده در این کار از دو سری ضرایب چندجمله‌ای برای شتابهای مثبت و منفی استفاده می‌کند که باعث پیچیدگی و کندی سیستم کنترلی می‌شود. مهمترین خاصیت مدل چندجمله‌ای ارائه شده در این مقاله، امکان مدلسازی خاصیت هیستریزیس در رفتار میراگر است. از سوی دیگر Turnip و همکارانش با ارائه یک مدل چند جمله‌ای که خاصیت هیستریزیس را مدل نمی‌کرد نشان دادند که این مدل با وجود سادگی و استفاده از یک سری ضریب می‌تواند رفتار میراگر را بدون خاصیت هیستریزیس نشان دهد [۱۳]. Zong و همکارانش مدل ANFIS^۱ را مطرح کردند [۱۴]. این مدل مانند شبکه‌های عصبی متداول به آموزش نیاز دارد. برای آموزش از پنج ورودی شامل سرعت، جابجایی، نیرو و همچنین مقادیر گذشته آنها استفاده کردند. آنها این مدل را با ورودی تصادفی ارزیابی و در کنار کنترل کننده‌ی نیرو جهت کنترل نیمه‌فعال استفاده کردند. لازم به ذکر است که استفاده از چنین مدلی در حالت مستقیم و معکوس به آموزشهای جداگانه برای شبکه نیاز دارد.

جمع‌بندی مطالعه مراجع نشان می‌دهد که مدل چند جمله‌ای با دو دسته ضرایب چند جمله‌ای، یکی از مدل‌های هیستریزیسی استفاده شده در کنترل سیستم تعلیق نیمه فعال است. همانگونه که در بالا اشاره شد این مدل بر خلاف نمونه‌ی ساده خود که از یک مجموعه ضرایب استفاده می‌کرد، از دو مجموعه ضریب استفاده می‌کند که باعث پیچیدگی محاسباتی و کندی پیاده‌سازی می‌شود. بنابراین شناسایی و استفاده از مدل هیستریزیسی با دقت بالا که موجب تسریع پاسخ سیستم تعلیق نیمه فعال شود از اهمیت زیادی برخوردار است.

مدل بوک-ون از جمله مدل‌های معروف میراگر مغناطیسی است که خاصیت هیستریزیس میراگر را نیز به خوبی مدل می‌کند [۱۵]. پارامترهای این مدل در حالت کلی توابع غیرخطی از جریان ورودی میراگر هستند که استفاده از آن را بعنوان مدل مستقیم و معکوس در سیستم کنترلی با مشکلات محاسبه‌ای و پیاده‌سازی همراه می‌کند.

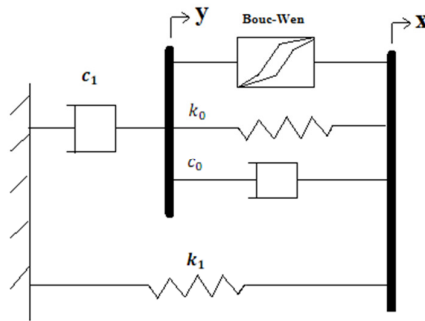
¹ Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System

در مقاله حاضر شکل جدیدی از مدل بوکون ارائه می‌شود که ضمن داشتن خاصیت هیستریزس، رابطه جریان و نیروی تولیدی میراگر را به صورت خطی بیان می‌کند. این مزیت باعث می‌شود که بتوان به راحتی از این مدل به عنوان هم مدل مستقیم و هم مدل معکوس در سیستم کنترلی تعلیق نیمه فعال جهت تبدیل نیرو به جریان الکتریکی استفاده کرد. همچنین برای مقایسه بهتر مدل پیشنهادی، یک مدل چند جمله‌ای غیر هیستریزیسی مشابه با آنچه در مراجع وجود دارد، برای مدل کردن رابطه نیرو و جریان میراگر طراحی شده است. بدین ترتیب در پژوهش حاضر سعی شده است که ضمن شناسایی دو نوع ساختار جدید برای مدل بوک-ون و یک ساختار برای مدل چندجمله‌ای، توانایی آنها برای بیان رفتار میراگر هوشمند و عملکرد آنها در سیستم تعلیق نیمه فعال در حالت معکوس بررسی شود. معیار نهایی انتخاب مدل معکوس، عملکرد آن در کنار کنترل کننده فعال است. در این تحقیق ابتدا مدل پارامتری بوک-ون اصلاح شده با ورودی جابجایی سینوسی با فرکانس‌ها و جریان‌های مختلف شناسایی شده سپس مدل چند جمله‌ای با همان داده‌های قبلی شناسایی و پارامترهای آن با استفاده از الگوریتم کمترین مربعات بدست آمده است. لازم به ذکر است که برای داده‌های شناسایی از مدل بوک-ون کامل و تعمیم یافته که صحت آن با نتایج آزمایشگاهی بررسی شده استفاده گردیده است. این مدل بعنوان مدل مرجع در این مقاله استفاده شده است. در نهایت نتایج هر دو مدل شناسایی شده به همراه کنترل کننده LQR مورد مقایسه قرار گرفته اند. همچنین در مقاله حاضر سعی شده است که تاثیر استفاده از یک مدل هیستریزیسی در عملکرد کنترل کننده نیمه فعال بررسی شود تا دلیل استفاده از یک مدل با قابلیت نشان دادن خاصیت هیستریزیسی بیشتر معلوم شود. البته این تاثیر در مقایسه با عملکرد یک مدل غیر هیستریزیسی در مراجع و تحقیقات پژوهشی پیشین دیده نمی‌شود. همچنین در بخش پیاده‌سازی کنترل نیمه فعال، شرایط واقعی سیستم رعایت شده است. این بدان معنی است که سیستم تعلیق واقعی بر اساس مدل کامل بوک ون توسعه یافته در نظر گرفته شده و از مدل‌های پیشنهادی شناسایی شده به عنوان مدل معکوس در کنار کنترل کننده فعال استفاده شده است. بدین ترتیب اثر اختلاف این دو مدل بعنوان نامعینی ناشی از دینامیک مدل نشده بررسی شده است.

ساختار مقاله حاضر به این صورت است که ابتدا در بخش ۲ مدل مرجع و واقعی میراگر معرفی شده و در بخش ۳ روش شناسایی مدل‌های ساده تر به همراه نتایج به دست آمده تشریح شده است. در بخش ۴ مدل‌های به دست آمده به صورت معکوس مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. طراحی کنترل کننده نیمه فعال با استفاده از هر یک از مدل‌ها و همچنین مقایسه عملکرد آنها در بخش ۵ صورت گرفته است.

۲- مدل مرجع میراگر

منظور از مدل مرجع، مدلی است که رفتار آن به واقعیت نزدیک بوده و اعتبار آن با نتایج آزمایشگاهی صحت سنجی شده است. در اینجا از مدل بوک-ون تعمیم یافته که در مرجع [۱۴] معرفی شده، به عنوان مدل مرجع استفاده شده است. این مدل یکی از پر کاربردترین مدل‌های مورد استفاده جهت بیان رفتار میراگر مغناطیسی می‌باشد که پارامترهای آن از داده‌های آزمایشگاهی بدست آمده‌اند. میراگر مورد استفاده در این مطالعه دارای بیشترین جابجایی ۳۵ میلی‌متر با حداکثر فرکانس ۴Hz و جریان ۲/۵ آمپر با حداکثر فرکانس ۴Hz در نظر گرفته شده است. در شکل ۱، شماتیک مدل میراگر نشان داده شده است.



شکل ۱. مدل بوک-ون تعمیم یافته [۱۴]

روابط حاکم بر مدل بوک-ون تعمیم یافته بصورت (۱) - (۶) است [۱۴]:

$$F = c_1 \dot{y} + k_1 (x - x_0) \quad (1)$$

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

$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x} - \dot{y}| z |z|^{n-1} - \beta |z|^n + A (\dot{x} - \dot{y}) \quad (3)$$

$$\alpha = \alpha_a + \alpha_b I \quad (4)$$

$$c_0 = c_{0a} + c_{0b} I \quad (5)$$

$$c_1 = c_{1a} + c_{1b} I \quad (6)$$

در این روابط F نیروی میراگر، I جریان الکتریکی، x جابجایی نسبی پیستون، x_0 تغییر شکل اولیه فنر آکومولاتور^۱، y جابجایی داخلی میراگر، k_0 ضریب سفتی در سرعت‌های بالا، k_1 ضریب سفتی آکومولاتور، c_0 و c_1 به ترتیب ضرایب میرایی در سرعت‌های بالا و پایین هستند. همچنین z متغیر دینامیکی و بیان کننده خاصیت هیستریزیس میراگر می‌باشد [۱۴]. مدل فوق شامل ۱۱ پارامتر است که از روی نتایج آزمایشگاهی یا داده‌های یک مدل معتبر خاص تعیین می‌شوند. ابتدا پاسخ میراگر در شرایط مشخص بدست می‌آید و سپس پارامترهای میراگر به گونه‌ای تعیین می‌شوند که اختلاف نیروی پیش بینی شده توسط مدل و نیروی واقعی میراگر به کمترین مقدار ممکن برسد. در مرجع [۱۴] از روش الگوریتم ژنتیک برای بدست آوردن پارامترها استفاده شده است. مقادیر پارامترهای مدل در * جدول ۱ نشان داده شده است.

¹Accumulator

جدول ۱. پارامترهای مدل بوک-ون توسعه یافته [۱۴]

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
C_{0a}	977 (Ns/m)	k_0	10.72 (N/m)
C_{0b}	0 (Ns/m/A)	k_1	134 (N/m)
C_{1a}	8168 (Ns/m)	x_0	0.114 (m)
C_{1b}	2725 (Ns/m/A)	β	$7 \times 10^4 \text{ (m}^{-2}\text{)}$
α_a	0 (N/m)	A	300
α_b	1723 (N/m/A)	γ	$7 \times 10^4 \text{ (m}^{-2}\text{)}$
n	۲		

جابجایی، سرعت نسبی دو سر میراگر و همچنین جریان الکتریکی ورودی‌های این مدل هستند. همانطور که در روابط این مدل نیز دیده می‌شود رابطه بین جریان الکتریکی ورودی میراگر و نیروی تولیدی آن بصورت یک معادله درجه دوم بدست می‌آید که حل آن علاوه بر زمانبر بودن می‌تواند خطاهای عددی را نیز در بر داشته باشد، بنابراین در قسمت بعد سعی شده تا شکلی از مدل بوک ون ارائه شود که یک رابطه خطی بین ورودی میراگر و خروجی آن ایجاد کند. علاوه بر این، یک مدل معکوس چند جمله‌ای نیز برای مقایسه با مدل بوک-ون پیشنهاد شده ارائه و با همین اطلاعات شناسایی می‌شود.

۳- شناسایی مدل‌های ساده شده میراگر

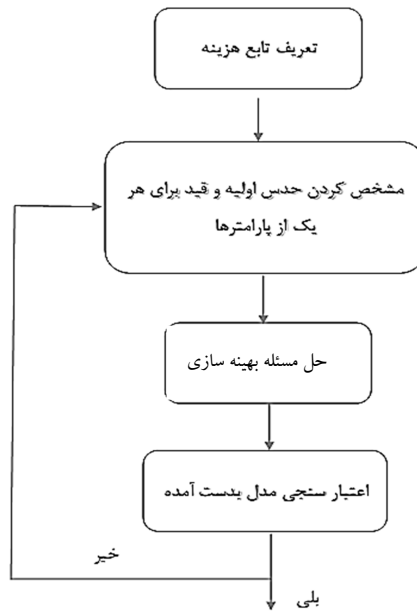
با توجه به اینکه در مقاله حاضر از رویکرد مدل معکوس میراگر در طراحی کنترل کننده نیمه فعال استفاده خواهد شد، هدف از شناسایی مدل میراگر مغناطیسی بدست آوردن مدل معکوس آن است. مدل معکوس میراگر، مدلی است که خروجی آن جریان الکتریکی و ورودی آن نیرو، جابجایی و سرعت نسبی دوسر میراگر است. استفاده از مدل معکوس موجب سهولت در پیاده‌سازی سیستم کنترلی نیمه فعال می‌شود. در این بخش دو نوع مدل از داده‌های مدل مرجع که در قسمت قبل توضیح داده شد، شناسایی شده و در بخش‌های بعد، از آنها در سیستم کنترلی استفاده می‌شود.

برای اجرای مراحل شناسایی ابتدا باید یک تابع هزینه که معرف خطای خروجی مدل مورد نظر با مقادیر واقعی است، تعریف شود. شناسایی در این حالت با کمینه کردن این تابع هزینه به شرط ارضا شدن قیود پارامترها انجام می‌شود. قیود مسئله شناسایی می‌تواند ناشی از فیزیک مسئله باشند، همچنین حدس اولیه برای پارامترها می‌تواند باعث همگرایی سریع و یا حتی در شرایطی باعث واگرایی پاسخ‌ها شود [۱۶].

در شکل ۲ الگوریتم بدست آوردن مدل پیشنهادی با استفاده از روش کمترین مربعات نشان داده شده است. همانطور که در بالا نیز ذکر شد دو عامل حدس اولیه و قید برای پارامترها در اختیار طراح بوده و با تنظیم آنها می‌توان به جواب نزدیک شد.

تابع هزینه که در مسئله حاضر معرف خطای خروجی (نیروی میراگر) مدل‌های ارائه شده (مدل جدید و مدل چند جمله‌ای) نسبت به مدل مرجع (مدل تعمیم یافته بوک-ون) است، به صورت (۷) تعریف می‌شود:

$$\text{cost} = \sum (F_{\text{reference}} - F_{\text{model}})^2 \quad (7)$$



شکل ۲. الگوریتم شناسایی مدل‌های میراگر

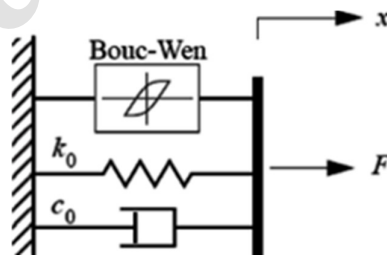
اگر جابجایی میراگر بصورت $x = a \sin 2\pi ft$ در نظر گرفته شود، که در آن دامنه a بر حسب متر و فرکانس f بر حسب هرتز است، کل حالت‌هایی که داده‌های لازم بدست می‌آید، بصورت زیر است:

$$f = [3 \ 2 \ 1] \quad a = [0.03 \ 0.02 \ 0.01] \quad I = [2.5 \ 2 \ 1.5 \ 1 \ 0.5 \ 0]$$

روند شناسایی بدین صورت است که ابتدا جابجایی و جریان به صورت مقادیر بالا به مدل مرجع اعمال شده و نتایج ذخیره می‌شوند. در مرحله بعد با استفاده از یک روش بهینه‌سازی مقید پارامترهای هر یک از مدل‌ها بدست می‌آیند.

۳-۱- مدل بوک-ون پیشنهادی

مدل بوک-ون ساده که در شکل ۳ ملاحظه می‌گردد در حقیقت شکل ساده و پایه مدل بوک-ون تعمیم یافته است.



شکل ۳. مدل بوک-ون ساده [۱]

روابط حاکم بر مدل بوک-ون ساده در (۸) - (۹) آورده شده است.

$$F = c_0 \dot{x} + k_0(x - x_0) + \alpha z \quad (8)$$

$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x}| z |z|^{n-1} - \beta |z|^n + A \dot{x} \quad (9)$$

در تحقیقات انجام شده توسط پژوهشگران مختلف پارامترهای C_0 و k_0 توابعی غیرخطی از جریان و جابجایی در نظر گرفته شده‌اند و α عدد ثابت فرض شده است [۱، ۵، ۱۰ و ۱۷]. در این مقاله، برای ایجاد ارتباط خطی بین نیرو و جریان الکتریکی، برای C_0 و k_0 توابع خطی از جریان پیشنهاد می‌شود. با این انتخاب از دقت مدل کمی کاسته می‌شود که با متغیر انتخاب کردن ضریب α بر خلاف کارهای قبلی، سعی می‌شود که این نقیصه جبران شود. برای مقایسه‌ی بهتر، ابتدا دو ساختار مختلف بر حسب ثابت و یا متغیر بودن ضریب α مطابق جدول ۲ در نظر گرفته شده و سپس تاثیر انتخاب هر یک از ساختارها در دقت مدل پیشنهادی بررسی می‌شود. بدین منظور جابجایی سینوسی با فرکانس ۴ هرتز و دامنه ۱۵ میلی متر در جریان‌های مختلف به مدل پیشنهادی با دو ساختار فوق و همچنین به مدل مرجع (مدل بوک ون توسعه یافته) اعمال شده و نتایج بصورت درصد خطا در مقایسه با مدل بوک ون توسعه یافته در جدول ۳ نمایش داده شده‌اند.

جدول ۲. دو نوع ساختار برای مدل جدید

روابط پارامترها	ساختار
$\alpha = \text{constant}$ $k_0 = k_{0a} + k_{0b}I$ $c_0 = c_{0a} + c_{0b}I$	نوع ۱
$\alpha = \alpha_a + \alpha_b I$ $k_0 = k_{0a} + k_{0b}I$ $c_0 = c_{0a} + c_{0b}I$	نوع ۲

جدول ۳. درصد خطای دو ساختار پیشنهادی برای مدل جدید در ورودی‌های مختلف

جریان ورودی	درصد خطای ساختار نوع ۱	درصد خطای ساختار نوع ۲
۰/۵ آمپر	۲۵ درصد	۹ درصد
۱ آمپر	۲۷ درصد	۱۰ درصد
۲ آمپر	۳۲ درصد	۹ درصد

با توجه به نتایج دقت سنجی دو ساختار پیشنهادی در جدول ۳، تغییرات این پارامترها مطابق با ساختار نوع ۲ بصورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$\alpha = \alpha_a + \alpha_b I \quad (10)$$

$$c_0 = c_{0a} + c_{0b}I \quad (11)$$

$$k_0 = k_{0a} + k_{0b}I \quad (12)$$

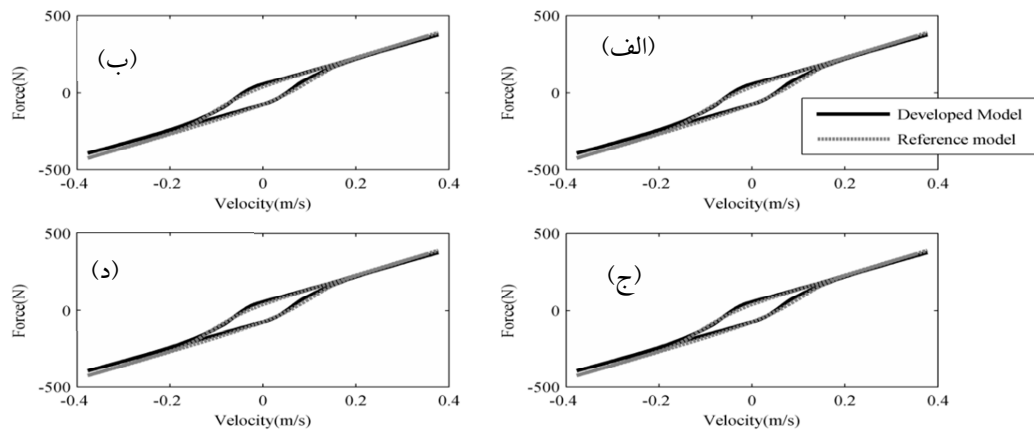
پارامترهای مدل پیشنهادی با استفاده از روش LS^1 بدست آمده و در جدول ۴ نشان داده شده است. برای بدست آوردن این پارامترها ابتدا یک تابع هزینه بصورت اختلاف خروجی‌های مدل تعمیم یافته و مدل ساده تعریف و در گام بعدی سعی می‌شود که این تابع کمینه شود. همانطور که در جدول ۴ دیده می‌شود، از آنجایی که پارامترهای مدل بوک-ون ساده از المان‌های مکانیکی مانند ضریب فنریت و میرایی میراگر تشکیل شده‌اند، به همین دلیل مقادیر تمام آنها مثبت است. پس قید پارامترها در شناسایی مدل بوک-ون بزرگتر از صفر بودن آنها است. البته حد بالایی پارامترها هم به گونه‌ای مقید می‌شود که تابع هزینه تعریف شده کمینه شده و مسئله بهینه‌سازی واگرا نشود.

جدول ۴. پارامترهای مدل بوک-ون پیشنهادی

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
C_{0a}	$921/22 \text{ (Ns/m)}$	x_0	$0/1267 \text{ (m)}$
C_{0b}	$93/69 \text{ (Ns/m/A)}$	β	$0/43 \text{ (m}^{-2}\text{)}$
k_{0a}	$64/07 \text{ (N/m)}$	A	$339/5$
k_{0b}	$0/7275 \text{ (N/m/A)}$	γ	$1969 \text{ (m}^{-2}\text{)}$
α_a	$1/0512 \text{ (Ns/m)}$	n	$0/5167$
α_b	1964 (Ns/m/A)		

در شکل ۴ پاسخ مدل بوک-ون ارائه شده و مدل بوک-ون تعمیم یافته که نماینده میراگر واقعی است، در جابجایی سینوسی با جریان‌های مختلف با هم مقایسه شده‌اند. با توجه به این شکل‌ها مشخص است که مدل بوک-ون ارائه شده در این مقاله به خوبی حلقه هیستریزس میراگر را دنبال می‌کند. البته تفاوت دو مدل در حلقه هیستریزس بصورت محسوسی رویت می‌شود به نحوی که مدل مرجع، حلقه هیستریزس کوچکتری نسبت به مدل توسعه یافته دارد. توجه شود که در شکل ۴ منظور از مدل مرجع مدل بوک-ون توسعه یافته می‌باشد.

¹ Least Square



شکل ۴. مقایسه مدل بوک-ون ارائه شده و پاسخ واقعی میراگر برای جابجایی سینوسی با دامنه ۰/۱۵ متر و فرکانس ۴ هرتز
(الف) جریان ۰/۷۵ آمپر، (ب) جریان ۱/۲۵ آمپر، (ج) جریان ۱/۷۵ آمپر، (د) جریان ۲/۲۵ آمپر.

۲-۳- مدل چند جمله‌ای

برای اینکه لزوم مدل کردن خاصیت هیستریزیس به خوبی معلوم شود در این بخش یک مدل چند جمله‌ای استفاده شده در کارهای قبلی [۱۳، ۸] که خاصیت هیستریزیس ندارد با همان داده‌های قبلی شناسایی می‌شود. مدل چند جمله‌ای به صورت رابطه (۱۳) در نظر گرفته می‌شود:

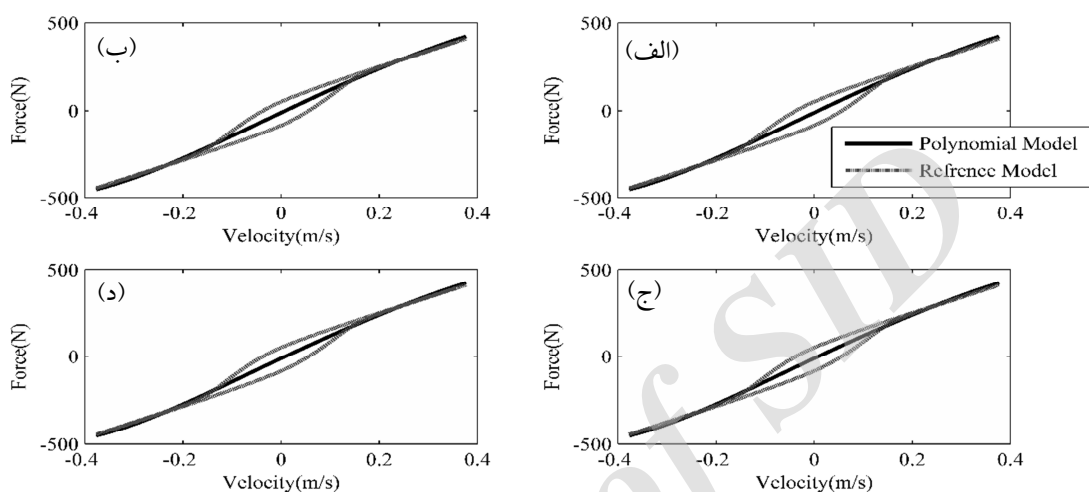
$$F = \sum_{i=0}^n (a_i + b_i I) v^i \quad (13)$$

در رابطه بالا سه سری مجهول وجود دارد که عبارتند از ضرایب a ، b و همچنین n که نشان دهنده مرتبه چند جمله‌ای مورد استفاده است. این مجهولات توسط الگوریتم ارائه شده در شکل ۲ و مشابه مدل بوک-ون ساده توسط روش کمترین مربعات بدست می‌آید. در جدول ۵ مقادیر ضرایب این مدل آورده شده است. در اینجا مقدار n با سعی و خطا برابر شش انتخاب شده است.

جدول ۵. ضرایب مدل چند جمله‌ای

ضریب	مقدار	ضریب	مقدار
a_0	-۱۱/۵	b_0	-۰/۲
a_1	۸۸۷/۸	b_1	۸۰۵/۳
a_2	-۳۷۴/۸	b_2	۶۷/۷
a_3	-۹۴۷/۵	b_3	-۹۲۷۲/۶
a_4	۴۹۱۰/۵	b_4	-۱۶۳۹/۳
a_5	۹۹۹۱/۴	b_5	۹۹۸۷/۳
a_6	-۹۸۵۸/۸	b_6	-۹۹۹۲/۷

در مدل چند جمله‌ای بر خلاف مدل بوک-ون ساده متغیرها پارامترهای فیزیکی نیستند. یعنی هر مقداری را می‌توانند به خود بگیرند. پس در این مدل قیدگذاری روی پارامترها بطور کامل در اختیار طراح است. در مقاله حاضر حد بالایی برای ضرایب چند جمله‌ای مقدار 10^4 و حد پایینی مقدار $10^4 -$ در نظر گرفته شده است. البته باید تاکید شود معیار تغییر این محدوده‌ها کاهش خطای بین پاسخ مدل چند جمله‌ای و داده‌های واقعی است. در شکل ۵ پاسخ مدل چند جمله‌ای با داده‌های مدل واقعی میراگر مقایسه شده است.



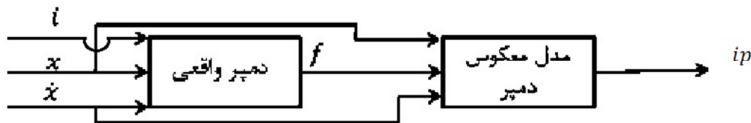
شکل ۵. مقایسه مدل چند جمله‌ای و پاسخ واقعی میراگر برای جابجایی سینوسی با دامنه $0/15$ متر و فرکانس 4 هرتز
 الف) جریان $0/75$ آمپر، ب) جریان $1/25$ آمپر، ج) جریان $1/75$ آمپر، د) جریان $2/25$ آمپر.

با توجه به شکل ۵ مشخص است که مدل چند جمله‌ای ارائه شده حلقه هیستریزیس میراگر را دنبال نکرده است. به عبارت دیگر در ناحیه سرعت پایین میراگر دقت این مدل به شدت کاهش می‌یابد. در بخش بعد دو مدل چند جمله‌ای و مدل بوک-ون ارائه شده، در حالت معکوس مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

۴- ارزیابی و مقایسه دو مدل در حالت معکوس

با توجه به اینکه دو مدل ارائه شده در حالت معکوس استفاده خواهند شد، در اینجا برای ارزیابی هر چه بهتر آنها از ورودی‌های تصادفی برای جابجایی و جریان استفاده می‌شود. همچنین در ادامه جهت بررسی تاثیر خاصیت هیستریزیس در دقت مدل‌های معکوس از سرعت‌ها و جریان‌های ثابت استفاده می‌شود. از آنجایی که میراگر مورد بررسی از لحاظ فرکانسی هم برای جریان و هم برای جابجایی محدود است، این داده‌ها قبل از اعمال به میراگر باید از یک فیلتر پایین گذر عبور داده شوند که فرکانس قطع برای هر دو 4Hz انتخاب می‌شود.

شکل ۶ فلوجارت ارزیابی دو مدل مذکور را نشان می‌دهد. در این شکل به جای بلوک میراگر واقعی از مدل بوک-ون توسعه یافته که یک مدل پیچیده و نزدیک به واقعیت است، استفاده گردیده است. با توجه به شکل ۷ کاملاً مشخص است که ورودی جابجایی که برای تست انتخاب شده است در محدوده عملکرد میراگر می‌باشد. همچنین بیشترین مقدار جریان ورودی محدود به $2/5$ آمپر است.



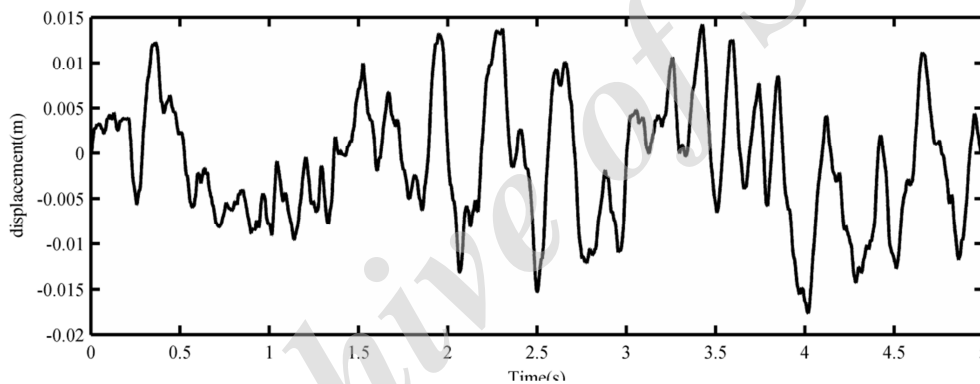
شکل ۶. فلوجارت تست مدل معکوس

حال برای پیدا کردن خطای مدل کافی است که جذر میانگین مربعات بردار $(i - ip)$ حساب شود. این خطا از رابطه (۱۴)

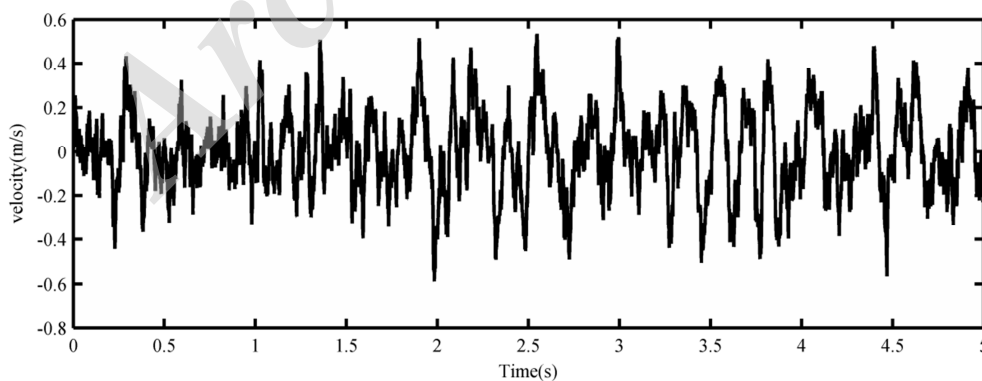
محاسبه می شود.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (i_j - ip_j)^2}{n}} \quad (14)$$

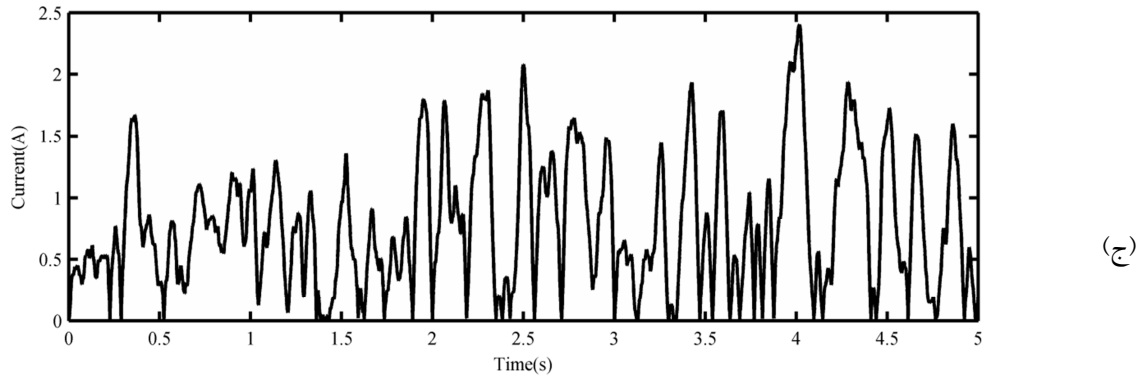
در رابطه بالا منظور از n بعد بردار می باشد. ip جریان خروجی از مدل معکوس میراگر و i جریان ورودی به میراگر واقعی است. از همین معیار خطا در قسمت های بعد نیز استفاده خواهد شد. برای ارزیابی دقت مدل ها، ورودی های نشان داده شده در شکل ۷ مطابق فلوجارت شکل ۶ اعمال شده و نتایج بصورت مقایسه جریان واقعی و پاسخ هر یک از این مدل ها در شکل ۸ آمده است.



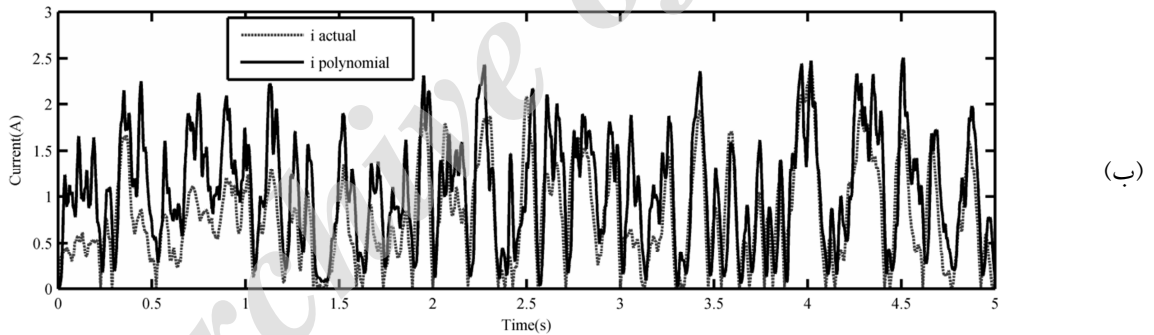
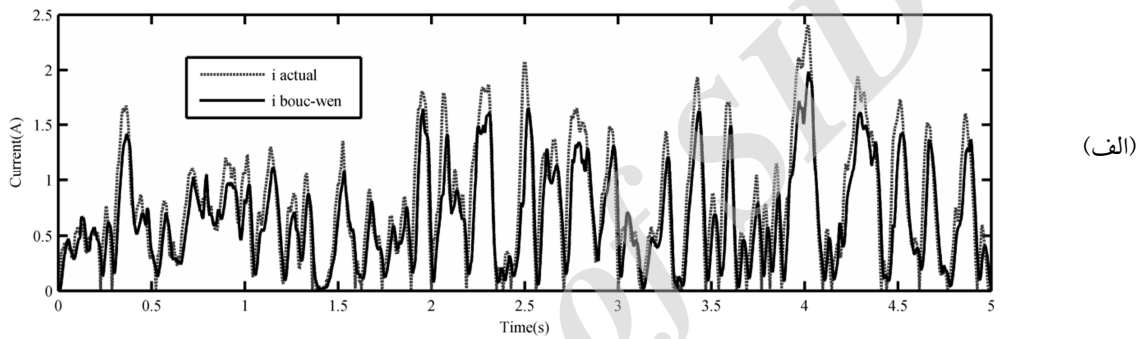
(الف)



(ب)

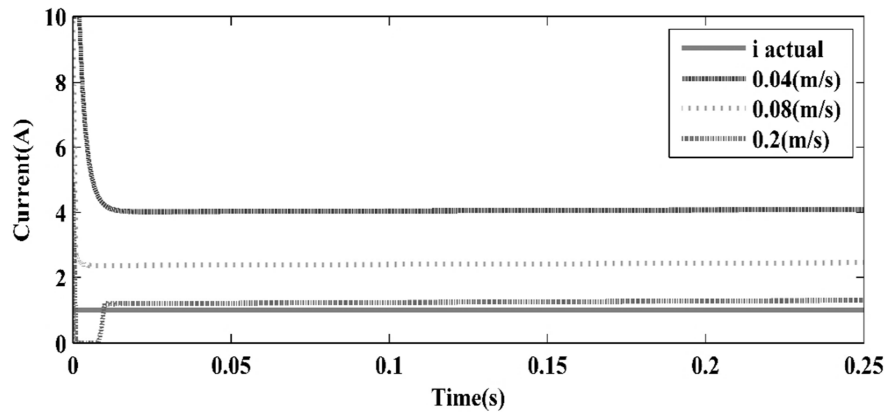


شکل ۷. ورودی‌های تست مدل‌های میراگر مغناطیسی (الف) جابجایی میراگر، (ب) سرعت میراگر، (ج) جریان ورودی میراگر

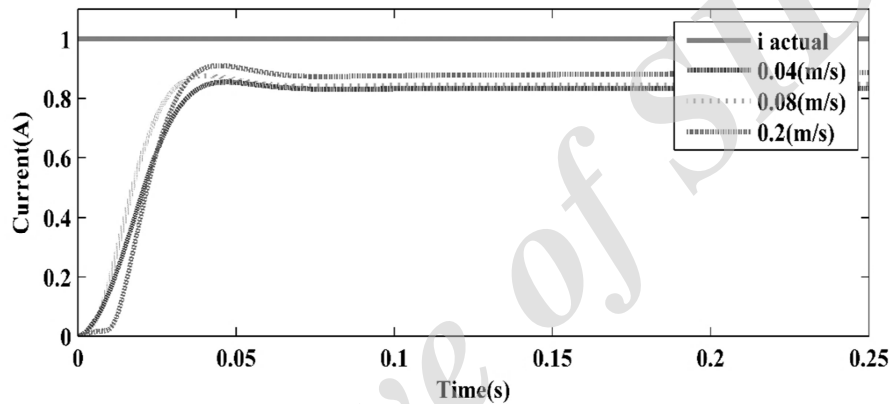


شکل ۸. مقایسه پاسخ مدل‌های میراگر در حالت معکوس با جریان واقعی (الف) مدل بوک-ون پیشنهادی، (ب) مدل چند جمله‌ای.

از لحاظ عددی نیز خطای مدل طبق رابطه (۱۲) برای مدل چند جمله‌ای ۴۰ درصد و خطای مدل بوک-ون ساده ۲۵ درصد می‌باشد. یکی از راه‌های بررسی تاثیر خاصیت هیستریزیس بر دقت مدل‌های معکوس، تست این مدل‌ها در سرعت‌های مختلف است. بدین منظور پاسخ مدل معکوس چند جمله‌ای در شکل ۹ و پاسخ مدل بوک-ون در شکل ۱۰ به ازاء سرعت‌های ثابت و مختلف آورده شده است.



شکل ۹. مقایسه جریان واقعی با پاسخ مدل معکوس چند جمله‌ای در سرعت‌های مختلف

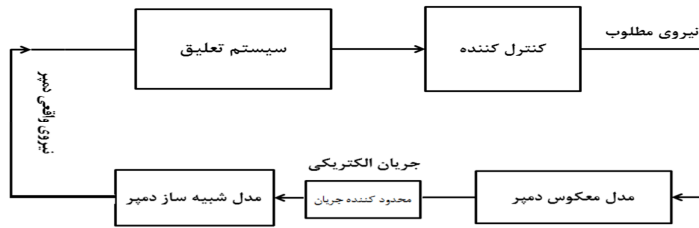


شکل ۱۰. مقایسه جریان واقعی با پاسخ مدل معکوس بوک-ون ارائه شده در سرعت‌های مختلف

با توجه به اینکه حلقه هیستریزس در سرعت‌های پایین میراگر قابل مشاهده است، بررسی شکل‌ها نشان می‌دهد که دقت مدل معکوس بوک-ون ارائه شده در سرعت‌های پایین بهتر از مدل معکوس چند جمله‌ای است. همچنین با افزایش سرعت، دقت مدل چند جمله‌ای بهبود می‌یابد. در بخش بعد، از دو مدل چند جمله‌ای و مدل جدید بوک-ون به عنوان مدل معکوس میراگر در سیستم کنترلی نیمه فعال و از مدل مرجع یا همان مدل توسعه یافته بوک-ون به عنوان مدل شبیه‌ساز استفاده خواهد شد.

۵- طراحی کنترل کننده نیمه فعال

برای شبیه‌سازی و ارزیابی سیستم تعلیق سه حالت فعال، نیمه فعال و غیرفعال در نظر گرفته می‌شود. در حالت فعال نیروی کنترلی مطلوب توسط یک عملگر خارجی مانند جک هیدرولیکی و با توجه به یک قانون کنترلی تولید شده و به سیستم تعلیق اعمال می‌شود. در حالت نیمه فعال نیروی فعال کنترلی به واسطه مدل معکوس شناسائی شده به جریان الکتریکی تبدیل شده و سپس به میراگر مغناطیسی اعمال می‌شود. اما نیروئی که میراگر تولید می‌نماید با نیروی مطلوب کنترل کننده در حالت فعال برابر نیست چون که جریان الکتریکی ورودی میراگر محدود است. در حالت غیرفعال جریان الکتریکی ورودی میراگر صفر است و مانند یک میراگر با ضریب میرایی ثابت عمل می‌کند. برای طراحی سیستم تعلیق نیمه فعال می‌بایست ابتدا سیستم تعلیق فعال طراحی شده و مطابق شکل ۱۱ با مدل معکوس میراگر مغناطیسی ترکیب شود.



شکل ۱۱. سیستم کنترلی نیمه فعال با میراگر مغناطیسی

پس برای طراحی کنترل کننده نیمه فعال سیستم تعلیق، ابتدا مدل سیستم تعلیق معرفی شده و معادلات ریاضی حاکم بر آن نوشته می شود. سپس با استفاده از یک روش کنترلی مناسب که در ادامه بحث خواهد شد، کنترل کننده برای محاسبه نیروی فعال سیستم تعلیق طراحی شده و نتایج پیاده سازی آن بررسی می شود. در ادامه کنترل کننده فعال طراحی شده با مدل های معکوس میراگر مغناطیسی که در بخش قبل شناسایی شدند و مورد ارزیابی قرار گرفتند، ترکیب می شود تا عملکرد سیستم تعلیق در حالت نیمه فعال ارزیابی گردد.

سیستم تعلیق استفاده شده بطور شماتیک در شکل ۱۲ دیده می شود. این سیستم تعلیق شامل جرم معلق (m_b)، جرم غیرمعلق (m_w)، ضریب فنریت تعلیق (k_s)، ضریب فنریت تیر (k_t) است. U نشان دهنده نیروی خارجی کنترل کننده سیستم تعلیق است. معادلات سیستم تعلیق در زیر آورده شده است.

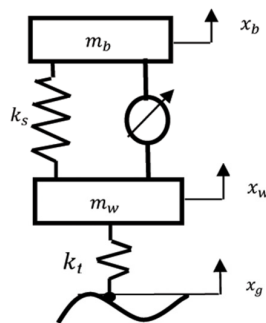
$$m_b \ddot{x}_b + k_s(x_b - x_w) = -U$$

$$m_w \ddot{x}_w - k_s(x_b - x_w) + k_t(x_w - x_g) = U \quad (15)$$

x_g ورودی جاده است که با توجه به رابطه (۱۶) تولید می شود [۱۴].

$$\dot{x}_g = -2\pi f_0 x_g + 2\pi \sqrt{G_0 V_0} w \quad (16)$$

که در آن $w(t)$ ورودی تصادفی و V_0 سرعت خودرو می باشد.



شکل ۱۲. مدل سیستم تعلیق [۱۴]

بردار حالت به صورت $X = [\dot{x}_b \ \dot{x}_w \ x_b \ x_w \ x_g]^T$ معرفی می شود. در این صورت معادلات (۱۵) و (۱۶) به فرم فضای حالت (۱۷) نوشته می شوند:

$$\dot{X} = AX + BU + Fw \quad (17)$$

که در آن:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -k_s/m_b & k_s/m_b & 0 \\ 0 & 0 & k_s/m_w & -(k_s + k_t)/m_w & k_t/m_w \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -2\pi f_0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} -1/m_b \\ 1/m_w \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 2\pi\sqrt{G_0 V_0} \end{bmatrix}$$

هدف از کنترل سیستم تعلیق، بهبود پارامترهایی همچون جاده‌پذیری، راحتی سفر و جابجایی سیستم تعلیق در کنار حداقل کردن انرژی کنترلی است. با توجه به اینکه در سیستم تعلیق خودرو با بهبود راحتی سفر، جاده‌پذیری خودرو کمتر می‌شود، برای ایجاد مصالحه بین این اهداف باید از کنترل کننده بهینه استفاده کرد. از طرفی چون سیستم تعلیق استفاده شده در این مقاله خطی است کنترل کننده LQR می‌تواند مناسب باشد. پس ابتدا تابع هدف در رابطه (۱۸) جهت کمینه کردن تعریف می‌شود.

$$J = \int_0^{\infty} [q_1 (x_w - x_g)^2 + q_2 (x_b - x_w)^2 + \ddot{x}_b^2 + rU^2] dt \quad (18)$$

در این تابع هدف، ضریب مربوط به راحتی سفر یک در نظر گرفته شده و ضرایب جاده‌پذیری، جابجایی تعلیق و انرژی کنترلی به ترتیب q_1 ، q_2 و r می‌باشد.

جهت طراحی کنترل کننده LQR تابع هدف به صورت (۱۹) بازنویسی می‌شود:

$$J = \int_0^{\infty} [X^T Q X + U^T R U + 2X^T N U] dt \quad (19)$$

که در آن:

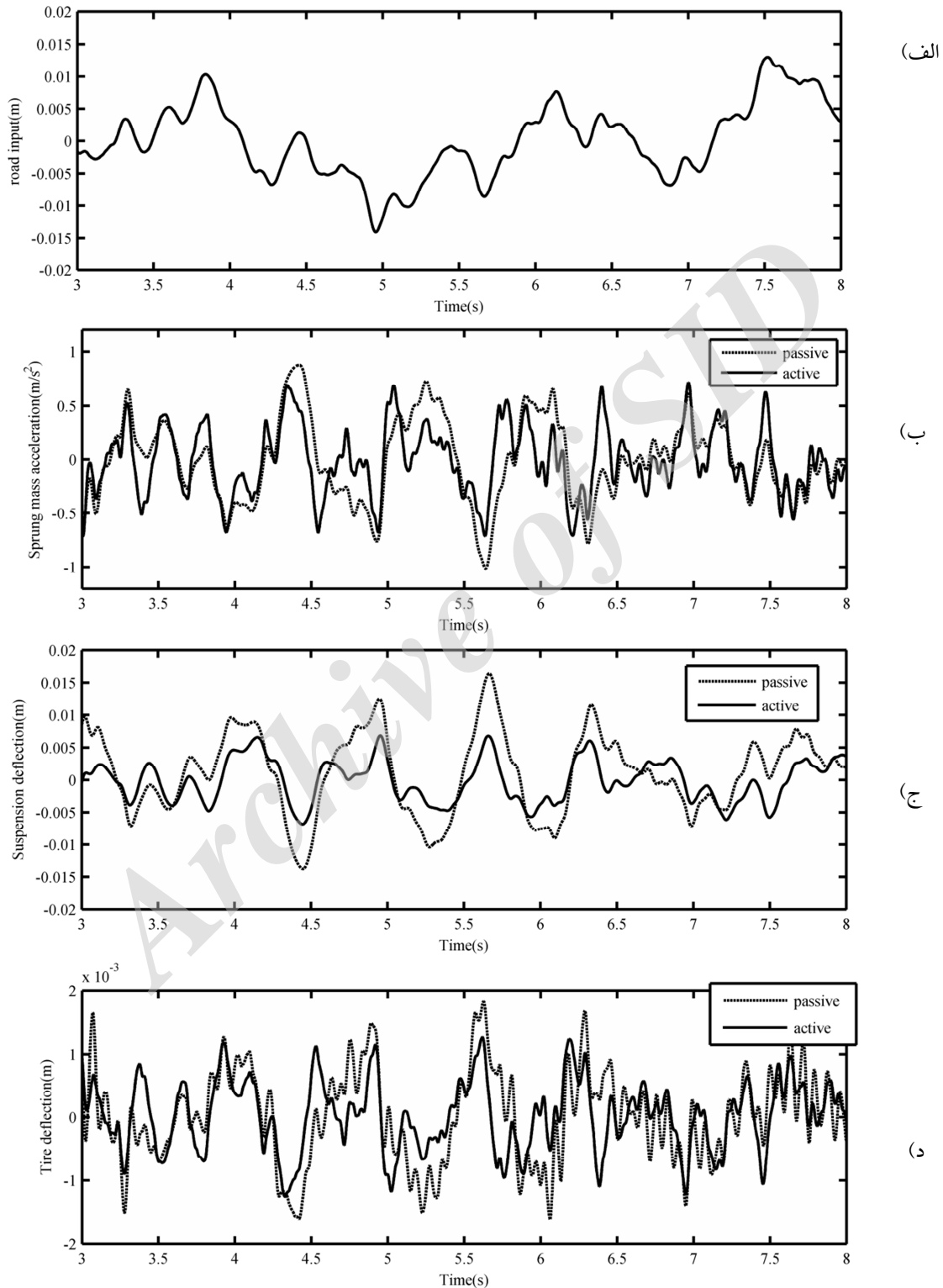
$$Q = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (k_s/m_b)^2 + q_2 & -(k_s/m_b)^2 - q_2 & 0 \\ 0 & 0 & -(k_s/m_b)^2 - q_2 & (k_s/m_b)^2 + q_2 + q_1 & -q_1 \\ 0 & 0 & 0 & -q_1 & q_1 \end{bmatrix}, N = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -k_s/m_b^2 \\ k_s/m_b^2 \\ 0 \end{bmatrix}, R = 1/m_b^2 + r$$

جهت رسیدن به بهترین حالت می‌بایست ضرایب وزنی q_1 ، q_2 و r به گونه‌ای انتخاب شوند که بین متغیرهای کنترلی هدف یک مصالحه برقرار شود. بدین منظور ابتدا مقادیر هر یک از ضرایب وزنی به صورت مستقل تغییر داده می‌شود و با توجه به تغییرات خطای هر یک از اهداف کنترلی سرانجام مقادیر نهایی ضرایب وزنی انتخاب می‌شوند [۱۴]. در مقاله حاضر مقادیر آنها به ترتیب 10^4 ، 10^5 و صفر می‌باشد. مقادیر پارامترهای سیستم تعلیق و ورودی جاده در جدول ۴ آورده شده است. در شکل ۱۳ عملکرد دو سیستم تعلیق فعال و غیر فعال مقایسه شده‌اند. همانطور که در این شکل دیده می‌شود این کنترل کننده تمامی معیارهای عملکرد سیستم تعلیق را با توجه به ضریب اهمیت آنها، کنترل کرده است.

جدول ۴. پارامترهای سیستم تعلیق

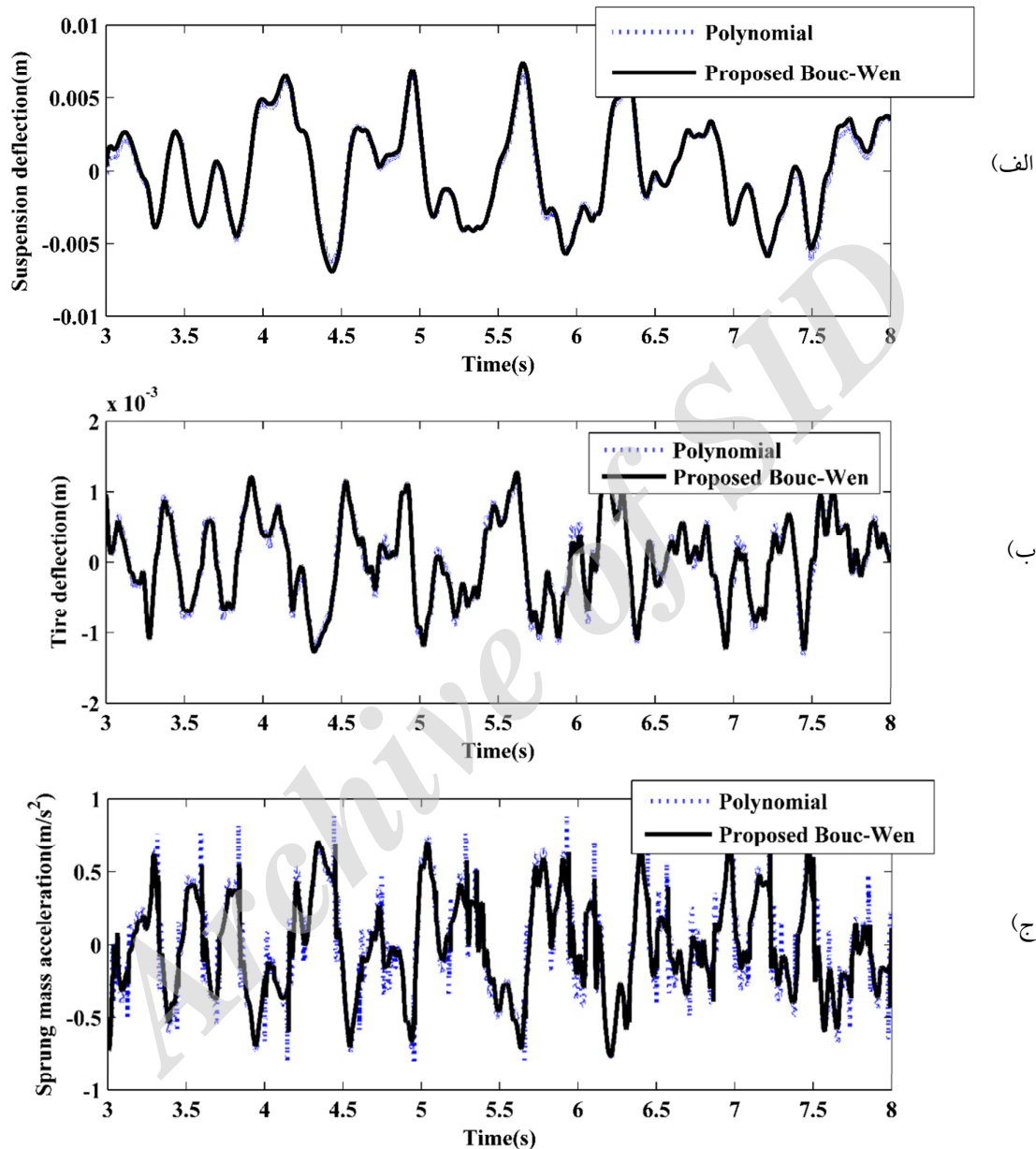
پارامتر	m_b (kg)	m_w (kg)	k_s ($\frac{N}{m}$)	k_t ($\frac{N}{m}$)	f_0 (Hz)	G_0	V_0 ($\frac{m}{s}$)
مقدار	۳۶۰	۴۰	2×10^4	2×10^5	۰/۰۱	5×10^{-6}	۱۰

با توجه به شکل ۱۳ خروجی های سیستم تعلیق در حالت فعال نسبت به حالت غیر فعال در بیشتر موارد بهبود می یابد. در موارد معدودی مانند شتاب جرم فنربندی شده در ثانیه ۶ تا ۸ نیز عملکرد سیستم تعلیق غیر فعال بهتر از فعال است؛ اما با توجه به بهبود صورت گرفته در سایر خروجی ها، عملکرد ضعیف در مورد خروجی شتاب قابل توجیه است.



شکل ۱۳. شبیه سازی سیستم تعلیق فعال (الف) ورودی جاده، (ب) شتاب سرنشین، (ج) جابجایی تعلیق، (د) فشردگی تایر

برای بررسی میزان تاثیر مدل میراگر در شبیه سازی حالت نیمه فعال سیستم تعلیق می بایست هر یک از مدل های طراحی شده در بخش قبل به عنوان مدل معکوس میراگر مطابق شکل ۱۱ بکار گرفته شوند. در شکل ۱۴ نتایج کنترل سیستم تعلیق نیمه فعال در دو حالت استفاده از مدل جدید و مدل چند جمله ای با هم مقایسه شده اند.



شکل ۱۴. شبیه سازی کنترل نیمه فعال سیستم تعلیق، (الف) جابجایی تعلیق، (ب) فشردگی تایر، (ج) شتاب سر نشین مدلی می تواند بهترین عملکرد را داشته باشد که کمترین نامعینی را در سیستم کنترلی ایجاد کرده و تطابق بیشتری با میراگر واقعی داشته باشد. جهت بررسی دقیق تر، عملکرد هر دو سیستم فعال و نیمه فعال باید نسبت به سیستم غیر فعال سنجیده شوند. در جدول ۵ این مقایسه به صورت درصد بهبود هر یک از معیارهای سیستم تعلیق نسبت به حالت غیر فعال انجام شده است. مشاهده می شود

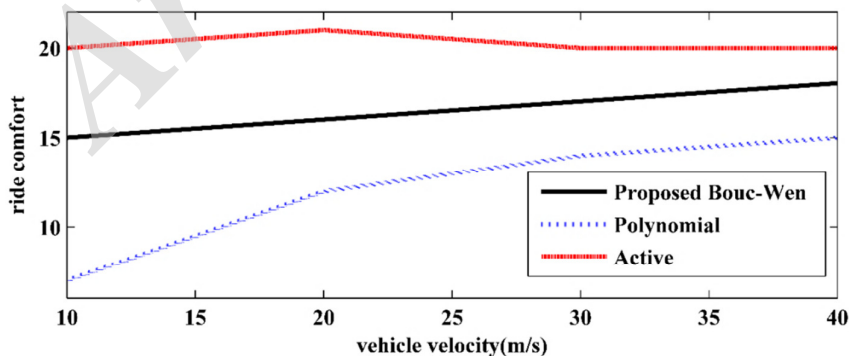
که عملکرد مدل معکوس بوک-ون ارائه شده در این مقاله به دلیل دارا بودن دقت بالاتر در بیان رفتار میراگر مغناطیسی نسبت به مدل چند جمله‌ای بهتر است.

جدول ۵. درصد بهبود معیارهای عملکرد سیستم تعلیق نسبت به حالت غیر فعال

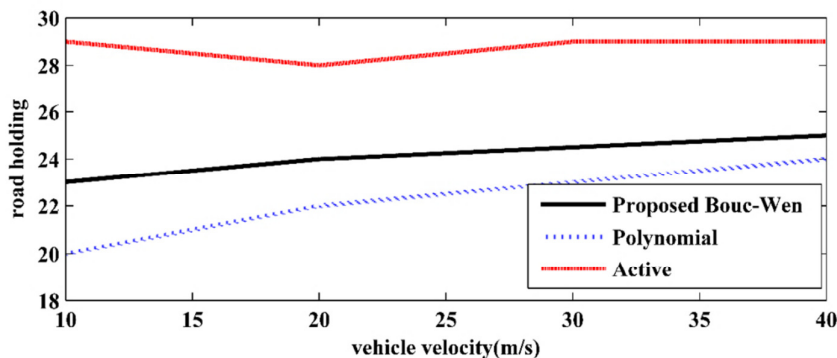
معیار	فعال	نیمه فعال با مدل بوک-ون ارائه شده برای میراگر	نیمه فعال با مدل چند جمله‌ای برای میراگر
شتاب سرنشین	۲۰	۱۵	۷
جابجایی تعلیق	۴۸	۴۷	۴۸
فشرده‌گی تایر	۲۹	۲۳	۲۰

در بخش‌های قبل نشان داده شد که عملکرد مدل بوک-ون ارائه شده در هر دو حالت مستقیم و معکوس در سرعت‌های پایین بهتر از مدل چند جمله‌ای غیر هیستریزیسی است. در کنترل سیستم تعلیق نیز انتظار می‌رود که با بالا رفتن سرعت میراگر که همان اختلاف سرعت جرم معلق و غیر معلق است، عملکرد دو سیستم تعلیق نیمه فعال به هم نزدیک شود. برای تحقیق بهتر این موضوع عملکرد دو سیستم تعلیق نیمه فعال در سرعت‌های مختلف خودرو (V_0 در معادله (۱۶)) مطالعه شده است. افزایش سرعت خودرو موجب بالا رفتن دامنه سرعت وارده به میراگر می‌شود.

در اشکال ۱۵ و ۱۶ به ترتیب درصد بهبود راحتی سفر و جاده‌پذیری نسبت به حالت غیرفعال در سرعت‌های مختلف خودرو برای سه حالت سیستم تعلیق با هم مقایسه شده است. با توجه به اینکه عملکرد سیستم تعلیق فعال در سرعت‌های مختلف ثابت بوده است تغییر در عملکرد سیستم تعلیق نیمه فعال در اثر تغییر عملکرد مدل معکوس استفاده شده در سرعت‌های مختلف است. با دقت در شکل‌ها مشخص است که با کاهش سرعت خودرو عملکرد هر دو سیستم تعلیق نیمه فعال افت می‌کند که این افت در مورد سیستم تعلیق با مدل معکوس چند جمله‌ای بیشتر است.



شکل ۱۵. درصد بهبود راحتی سفر برای سه نوع سیستم تعلیق نسبت به حالت غیرفعال در سرعت‌های مختلف خودرو



شکل ۱۶. درصد بهبود جاده پذیری برای سه نوع سیستم تعلیق نسبت به حالت غیرفعال در سرعت‌های مختلف خودرو

۶- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر یک سیستم کنترل نیمه فعال طراحی و به مدل یک چهارم سیستم تعلیق خودرو اعمال شد. در این سیستم، نیروی کنترلی فعال توسط کنترل کننده LQR و جریان الکتریکی متناظر با این نیرو توسط مدل معکوس میراگر که یک مدل غیرخطی است تولید می‌شود. در مطالعه حاضر دو مدل بوک-ون اصلاح شده و چند جمله‌ای غیر هیستریزیسی به عنوان مدل معکوس برای میراگر غیرخطی شناسایی شده است. نتایج ارزیابی دقت دو مدل با ورودی‌های تصادفی نشان داد که هر دو مدل از دقت قابل قبولی برخوردار هستند. همچنین با بررسی نمودار نیرو سرعت در دو مدل مرجع و مدل بوک-ون ارائه شده در این مقاله دیده می‌شود که این مدل نسبت به مدل چند جمله‌ای به خوبی حلقه هیستریزیس میراگر را در سرعت‌های پایین دنبال می‌کند. پارامترهای مدل بوک-ون ارائه شده بصورت تابع خطی از جریان ورودی میراگر تعریف شده اند که همین امر سبب می‌شود تا به راحتی بتوان از این مدل به عنوان مدل معکوس میراگر استفاده کرد. نتایج شبیه‌سازی سیستم تعلیق روی جاده نشان داد که عملکرد مدل بوک-ون ساده بهتر از مدل چند جمله‌ای است. عملکرد بهتر مدل بوک-ون ارائه شده نشان دهنده اهمیت خاصیت هیستریزیس و لزوم در نظر گرفتن آن در مدل است.

۷- مراجع

- [۱] E. Guglielmino, Semi-active suspension control: improved vehicle ride and road friendliness: Springer, 2008.
- [۲] G. Peng, W. Li, H. Du, H. Deng, and G. Alici, "Modeling and Identifying the Parameter of a Magneto-rheological Damper with a Force-Lag Phenomenon," Applied Mathematical Modelling, vol. 38, pp.3763-3773, 2014..
- [۳] A. Milecki and M. Hauke, "Application of magnetorheological fluid in industrial shock absorbers," Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 28, pp. 528-541, 2012.
- [۴] N. M. Wereley, L. Pang, and G. M. Kamath, "Idealized hysteresis modeling of electrorheological and magnetorheological dampers," Journal of Intelligent Material Systems and Structures, vol. 9, pp. 642-649, 1998.
- [۵] B. Spencer Jr, S. Dyke, M. Sain, and J. D. Carlson, "Phenomenological model for magnetorheological dampers," Journal of Engineering Mechanics, vol. 123, pp. 230-238, 1997.

- [۶] K. C. Schurter and P. N. Roschke, "Fuzzy modeling of a magnetorheological damper using ANFIS," Ninth IEEE International Conference on Fuzzy Systems, 2000, pp. 122-127.
- [۷] H. Du, J. Lam, and N. Zhang, "Modelling of a magneto-rheological damper by evolving radial basis function networks," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 19, pp. 869-881, 2006.
- [۸] A. M. Khiavi, M. Mirzaei, and S. Hajimohammadi, "A new optimal control law for semi-active suspension system considering nonlinear magneto-rheological damper model," *Journal of Vibration and Control*, vol. 20(14), pp. 2221-2233, 2014.
- [۹] G. Yao, F. Yap, G. Chen, W. Li, and S. Yeo, "MR damper and its application for semi-active control of vehicle suspension system," *Mechatronics*, vol. 12, pp. 963-973, 2002.
- [۱۰] S. B. Choi, S. K. Lee, and Y. P. Park, "A hysteresis model for the field-dependent damping force of a magnetorheological damper," *Journal of Sound Vibration*, vol. 245, pp. 375-383, 2001.
- [۱۱] H. Du, K. Yim Sze, and J. Lam, "Semi-active control of vehicle suspension with magneto-rheological dampers," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 283, pp. 981-996, 2005.
- [۱۲] X.-m. Dong, M. Yu, C.-r. Liao, and W.-m. Chen, "Comparative research on semi-active control strategies for magneto-rheological suspension," *Nonlinear dynamics*, vol. 59, pp. 433-453, 2010.
- [۱۳] A. Turnip, S. Park, and K.-S. Hong, "Sensitivity control of a MR-damper semi-active suspension," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 11, pp. 209-218, 2010.
- [۱۴] L. H. Zong, X. L. Gong, C. Y. Guo, and S. H. Xuan, "Inverse neuro-fuzzy MR damper model and its application in vibration control of vehicle suspension system," *Vehicle System Dynamics*, vol. 50, pp. 1025-1041, 2012.
- [۱۵] İ. Şahin, T. Engin, and Ş. Çeşmeci, "Comparison of some existing parametric models for magnetorheological fluid dampers," *Smart Materials and Structures*, vol. 19, p. 035012, 2010.
- [۱۶] L. LJUNG, *System Identification*. Springer, USA, 1999.
- [۱۷] H. A. Metered, "Modeling and control of magnetorheological dampers for vehicle suspension system," Doctor of Philosophy, Faculty of Engineering and Physical Sciences, Manchester, 2010.