



بهبود کنترل کننده تطبیقی عصبی-فازی با بکارگیری الگوریتم خوشه‌بندی فازی به منظور کنترل ارتعاشات سیستم تعلیق خودرو

غلامرضا بامی محمدی^{۱،۲*}، مهدی صالحی^{۲،۱*}

۱- گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

۲- مرکز تحقیقات فناوریهای نوین ساخت و تولید، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

* نجف‌آباد، کد پستی ۸۵۱۴۱۴۳۱۳۱، mehdi.salehi@pmc.iaun.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
سیستم تعلیق یکی از اجزاء مهم تشکیل دهنده خودرو می‌باشد که هدف اصلی آن جداسازی بدنه خودرو از ارتعاشات ناشی از شرایط مختلف جاده‌ای می‌باشد. امروزه دست‌یابی به یک سیستم تعلیق که بتواند خود را با شرایط مختلف جاده تطبیق دهد چالش پیش‌روی شرکت‌های سازنده خودرو می‌باشد. شرایط جاده و سرعت پیش‌روی خودرو از عوامل متغییر با زمان می‌باشند که باعث می‌شود رفتار دینامیکی سیستم تعلیق بسیار تصادفی باشد. از این‌رو طراحی و کنترل یک سیستم تعلیق که قابلیت تطبیق و انعطاف‌پذیری مناسب در مواجهه با شرایط مختلف جاده و سرعت پیش‌روی را داشته باشد، امری ضروری می‌باشد. در این پژوهش مدل دینامیکی خطی برای چهار چرخ خودرو در نظر گرفته شد و سپس معادلات دینامیکی مربوط به آن استخراج گردید. در ابتدا کنترل کننده فازی برای سیستم تعلیق خودرو طراحی شد، در مرحله بعد سیستم تعلیق خودرو با کنترل کننده فازی در مواجهه با شرایط مختلف جاده و سه سرعت پیش‌روی قرار گرفت. سپس با استفاده از داده‌های مربوط به کنترل کننده فازی دو کنترل کننده دیگر از طریق سیستم استنتاج تطبیقی عصبی-فازی مبتنی بر تقسیم‌بندی توری و خوشه‌بندی فازی آموزش داده شدند. نتایج شبیه‌سازی نشان دادند که کنترل کننده تطبیقی عصبی-فازی مبتنی بر خوشه‌بندی فازی با وجود تغییر در شرایط جاده و سرعت خودرو عملکرد سیستم تعلیق را بصورت قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌دهد، و در مقایسه با سایر روش‌های کنترلی توانایی بیشتری در کاهش شتاب خطی بدنه خودرو دارد.	مقاله پژوهشی کامل دریافت: ۲۸ تیر ۱۳۹۶ پذیرش: ۲۲ شهریور ۱۳۹۶ ارائه در سایت: ۱۵ آذر ۱۳۹۶
	کلیدواژگان سیستم تعلیق فازی تطبیقی عصبی-فازی تقسیم‌بندی توری خوشه‌بندی فازی

Improvement of adaptive neuro-fuzzy controller by fuzzy clustering means algorithm for control of vehicle suspension system

Gholamreza Bamimohamadi^{1,2}, Mehdi Salehi^{1,2*}

1- Department of Mechanical Engineering, Najafabad Branch, **Islamic Azad University**, Najafabad, Iran.

2- Modern Manufacturing Technologies Center, Najafabad Branch, **Islamic Azad University**, Najafabad, Iran.

*Najafabad,, P.O.B. 8514143131, mehdi.salehi@pmc.iaun.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received 19 July 2017

Accepted 13 September 2017

Available 6 December 2017

Keywords

Suspension system

Fuzzy

Adaptive neuro-fuzzy

Grid partitioning

Fuzzy clustering means

ABSTRACT

Suspension system is an important part of vehicle whose main role is to separate the vehicle body from road induced vibrations. Design and control of a suspension system that can adapt to different road conditions with high flexibility is essential. In this study, data were collected from three types of road conditions with different roughness coefficients in various forward speeds for training a suspension model. Primarily, dynamic equations were derived for a linear full model suspension system. Then, with the use of fuzzy system simulation data, two adaptive neuro-fuzzy controllers namely Grid Partitioning and Fuzzy Clustering were trained. Finally, four methods were evaluated and the results showed that decrease in linear deflection and acceleration of vehicle body is higher in adaptive neuro-fuzzy controller by Subtractive Clustering compared to other systems.

Please cite this article using:

Gholamreza Bamimohamadi, Mehdi Salehi, Improvement of adaptive neuro-fuzzy controller by fuzzy clustering means algorithm for control of vehicle suspension system, *Journal of Mechanical Engineering and Vibration*, Vol. 8, No. 3, pp. 7-17, 2017 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

در طراحی سیستم تعلیق همواره مصالحه بین راحتی سرنشینان و توانایی هدایت مناسب خودرو مدنظر می‌باشد. برای فراهم نمودن راحتی مسافران خودرو، یک سیستم نرم^۱ مورد نیاز است به طوری که جابجایی و شتاب بدنه خودرو کمینه شود، و از طرفی دیگر بمنظور تامین پایداری و هدایت مناسب خودرو در شرایط مختلف جاده‌ای به یک سیستم تعلیق سخت^۲ نیاز است. در سیستم تعلیق غیرفعال پارامترهای فنر و میراگر ثابت می‌باشد و هیچگونه کنترلی برای تطبیق و کاهش هر چه بیشتر ارتعاشات در مواجهه با پستی و بلندی‌های جاده وجود ندارد. در صورتیکه یک سیستم تعلیق فعال می‌تواند خود را با شرایط مختلف جاده‌ای تطبیق داده و همزمان جابجایی و شتاب بدنه خودرو را کاهش دهد [۱].

تا کنون پژوهش‌های فراوانی در خصوص بررسی انواع سیستم‌های کنترلی بمنظور کاهش ارتعاشات سیستم تعلیق در مواجهه با شرایط جاده انجام شده‌است. هر کدام از این پژوهش‌ها به جنبه‌های خاصی از موضوع پرداخته‌اند. منطق فازی^۳ یک روش نوین از محاسبات ریاضیات می‌باشد که در دهه‌های اخیر مورد توجه محققین علم کنترل قرار گرفته‌است و حاصل آن کنترل کننده‌ای بر مبنای منطق فازی می‌باشد. بارزترین خاصیت منطق فازی تخمین‌گر بودن آن می‌باشد، که می‌توان با ایجاد پایگاه داده مناسب سیستم را آموزش داد و بعنوان کنترل کننده نیروی عملگر در سیستم تعلیق استفاده نمود. کنترل کننده تطبیقی عصبی-فازی^۴ میانگین مربعات خطا^۵ را بعنوان تابع هزینه در نظر می‌گیرد و با کمینه نمودن آن کنترل کننده فازی را بهینه می‌کند. بدین معنی که در ابتدا یک سیستم فازی پایه بعنوان کنترل کننده در نظر گرفته می‌شود و سپس با بکارگیری الگوریتم تطبیقی عصبی-فازی دقت کنترل کننده افزایش می‌یابد. در [۲] یک سیستم استنتاج فازی عصبی برای سیستم تعلیق مدل یک چهارم خودرو طراحی شد که پایگاه داده برای آموزش کنترل کننده تطبیقی عصبی-فازی از خروجی‌های کنترل کننده‌های فازی، رگلاتور خطی درجه دوم^۶ و مد لغزشی^۷ تهیه گردید. سپس عملکرد سیستم تعلیق با

کنترل کننده تطبیقی عصبی-فازی با کنترل کننده‌های فازی و رگلاتور خطی درجه دوم مقایسه شد که نتایج نشان دادند کنترل کننده تطبیقی عصبی-فازی از لحاظ جابجایی بدنه، شتاب بدنه، زمان نشست و نیروی کنترلی عملکرد بهتری نسبت به دو کنترل کننده دیگر دارد. در [۳] برای مدل دینامیکی یک چهارم سیستم تعلیق کنترل کننده تناسبی مشتق‌گیر-انتگرال-گیر^۸ طراحی شد، و سپس شرایط جاده‌ای به سیستم اعمال گردید. از داده‌های مربوط به ورودی و خروجی کنترل کننده تناسبی مشتق‌گیر-انتگرال‌گیر برای آموزش کنترل کننده تطبیقی عصبی-فازی استفاده شد. در ادامه کنترل کننده تناسبی مشتق-گیر-انتگرال‌گیر از مدار خارج و کنترل کننده تطبیقی عصبی-فازی جایگزین گردید. با تغییر در پارامترهای سیستم تعلیق (تغییر در ضریب میرایی) مجدداً کنترل کننده تناسبی مشتق‌گیر-انتگرال‌گیر وارد مدار شد تا داده‌های جدید بمنظور آموزش کنترل کننده تطبیقی عصبی-فازی ایجاد شود و پس از آموزش مجدداً کنترل کننده تطبیقی عصبی-فازی به مدار وارد شد. در نهایت مشخص شد که عملکرد کنترل کننده تطبیقی عصبی-فازی نسبت به کنترل کننده تناسبی مشتق‌گیر-انتگرال-گیر حتی با تغییر در پارامترهای سیستم تعلیق بهتر می‌باشد. یک کنترل کننده می‌بایست بتواند خود را با تغییرات سیستم تعلیق تطبیق دهد و عملکرد سیستم تعلیق را بهبود بخشد. در [۴] با استفاده از یک شبکه عصبی-فازی به همراه آموزش پس-خورد خطا یک کنترل کننده غیرخطی برای سیستم تعلیق فعال جهت مدل نیم‌خودرو طراحی شد. ابتدا یک کنترل کننده تناسبی مشتق‌گیر برای سیستم تعلیق طراحی شد و از آن جهت آموزش کنترل کننده عصبی-فازی استفاده شد. این کنترل کننده با استفاده از خطای خروجی کنترل کننده تناسبی مشتق‌گیر بصورت بر خط^۹ آموزش دید، پس از آموزش کنترل کننده تناسبی مشتق‌گیر از مدار خارج و کنترول کننده عصبی-فازی وظیفه کنترل سیستم تعلیق را بعهده گرفت. با تغییر در پارامترهای سیستم تعلیق دوباره آموزش انجام گرفت. سیستم تعلیق با روش پیشنهادی در مواجهه با ورودی پله^{۱۰} اهداف کنترلی را برآورده نمود اما می‌بایست کنترل کننده پیشنهادی برای شرایط جاده تصادفی که به واقعیت نزدیک‌تر می‌باشد، ارزیابی گردد. در [۵] برای مدل یک‌چهارم خودرو کنترل کننده

1. Soft
2. Stiff
3. Fuzzy Logic
4. Adaptive Neuro-Fuzzy Interface System (ANFIS)
5. Mean Square Error (MSE)
6. Linear Quadratic Regulator (LQR)
7. Sliding Mode

8. Proportional-Integral-Derivative
9. Online
10. Step

۲- طرح مسئله

همانطور که اشاره شد برای داشتن یک سیستم تعلیق فعال، باید کنترل کننده به‌گونه‌ای طراحی شود تا بتواند طیف وسیعی از شرایط متغییر با زمان را پوشش دهد. در کنترل سیستم تعلیق عوامل متعددی دخالت دارند که در طول زمان تغییر می‌کنند، برای مثال می‌توان به خصوصیات فیزیکی سیستم تعلیق، سرعت پیشروی خودرو و شرایط زبری جاده اشاره نمود. در این پژوهش برای آموزش کنترل کننده تطبیقی عصبی-فازی از دو روش دسته‌بندی داده‌ها استفاده می‌شود:

۱- تقسیم‌بندی توری

۲- خوشه‌بندی فازی (روش پیشنهادی)

بدین منظور ابتدا یک کنترل کننده فازی طراحی می‌شود، سپس داده‌های ورودی و خروجی کنترل کننده فازی برای سه سرعت (۲۰، ۳۰ و ۴۰ متر بر ثانیه) و سه درجه از زبری جاده جمع‌آوری و کنترل کننده تطبیقی عصبی-فازی با دو روش بالا آموزش داده می‌شود. در نهایت روش‌های کنترلی مختلف با روش غیرفعال مقایسه می‌شوند و میزان سازگاری سیستم تعلیق با شرایط مختلف جاده‌ای از لحاظ شاخص‌های عملکرد سنجیده می‌شوند. در این پژوهش شاخص‌های عملکرد شامل موارد زیر می‌باشند:

۱- جابجایی خطی بدنه خودرو

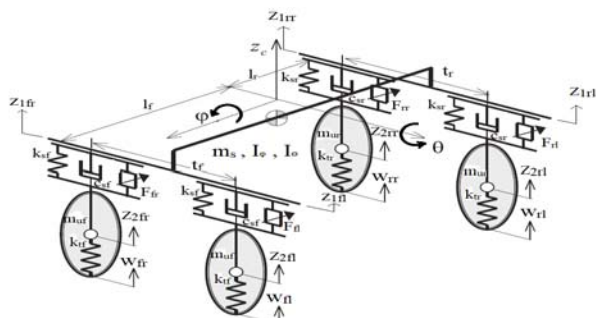
۲- شتاب خطی بدنه خودرو

۳- شتاب چرخشی (زاویه‌ای) بدنه خودرو

۴- جابجایی نسبی بین پروفیل جاده و شاسی (شاخص پایداری خودرو روی جاده)

۳- مدل دینامیکی سیستم تعلیق

همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود مدل دینامیکی سیستم تعلیق بصورت چهار چرخ و با هفت درجه آزادی در نظر گرفته شد، که با معادلات زیر توصیف می‌شود [۱۱].



شکل ۱ سیستم تعلیق کامل خودرو [۱۱]

تطبیقی عصبی-فازی طراحی شد (به روش تقسیم‌بندی توری^۱)، در مرحله بعد با استفاده روش خوشه‌بندی کاهشی^۲ کنترل کننده تطبیقی عصبی-فازی آموزش داده شد و در نهایت مقادیر بهینه برای شعاع خوشه‌ها توسط الگوریتم ازدحام ذرات^۳ بدست آمد. سه روش کنترلی مورد مقایسه قرار گرفت که نتایج نشان دادند که کنترل کننده تطبیقی عصبی-فازی بهینه شده با الگوریتم ازدحام ذرات بهترین عملکرد را برای سیستم تعلیق به همراه دارد. در [۶] برای سیستم تعلیق نیم‌خودرو یک کنترلر فازی خودتنظیم^۴ طراحی شد. سیستم تعلیق غیرفعال و فعال با کنترلر تناسبی مشتق‌گیر-انتگرال‌گیر با روش کنترلی پیشنهادی مورد ارزیابی قرار گرفتند. در [۷] با بکارگیری شبکه عصبی و بر اساس داده‌های کنترل کننده تناسبی مشتق‌گیر-انتگرال‌گیر، کنترل کننده‌ای آموزش داده شد که توانست اهداف کنترلی نظیر کاهش شتاب خطی وارد به بدنه خودرو را کاهش دهد.

راحتی سرنشینان تابعی از محتوای فرکانسی ارتعاشات انتقال یافته به مسافران در مواجهه با بی‌نظمی‌های جاده‌ای می‌باشد. محتوای فرکانسی با تغییرات سرعت خودرو در اثر شرایط مختلف عبور و مرور تغییر می‌کند. طراحی سیستم تعلیقی که بتواند خود را با شرایط مختلف عبور و مرور تطبیق دهد و راحتی سرنشینان را تامین کند امری ضروری می‌باشد [۸]. در [۹] روشی برای تخمین و طبقه‌بندی شرایط جاده‌ای، بر اساس استنتاج تطبیقی عصبی-فازی و تبدیل موجک^۵ ارائه گردید و سپس بعنوان ابزاری برای تشخیص پروفیل سطح جاده پیشنهاد شد، که پس از تخمین و طبقه‌بندی جاده میراگر خود را با شرایط جاده تطبیق می‌داد. در [۱۰] یک فیلتر کالمن^۶ بعنوان مشاهده‌گر حالت‌ها ناشناخته طراحی شد و با تخمین‌گر جاده ترکیب شد. با مواجه سیستم تعلیق نیمه فعال با شرایط جاده تصادفی بهبود شاخص‌های عملکرد سیستم تعلیق مشاهده شد. همانطور که بیان شد عوامل متعددی بر عملکرد سیستم تعلیق تاثیر گذارند که این عوامل بسیار ناشناخته و متغیر با زمان می‌باشند. از جمله از این عوامل شرایط جاده و سرعت پیشروی خودرو می‌باشد که در این پژوهش سعی خواهد شد کنترل کننده‌ای طراحی شود که برای طیف وسیعی از شرایط متغییر با زمان پاسخگو باشد.

1. Grid Partitioning
2. Subtractive Clustering
3. Particle Swarm Optimization
4. Self-Tunable
5. Wavelet Transform
6. Kalmen-Filter

$$-c_{sr}(\dot{z}_{2rl} - \dot{z}_{1rl}) - F_{rl} \quad (11) \quad z_{1fl} = z_s + l_f \theta + t_f \varphi \quad (1)$$

مقادیر پارامترها استفاده شده برای سیستم تعلیق خودرو در جدول ۱ مشخص می‌باشند.

$$z_{1fr} = z_s + l_f \theta - t_f \varphi \quad (2)$$

$$z_{1rl} = z_s - l_r \theta + t_r \varphi \quad (3)$$

جدول ۱ مقادیر پارامترهای سیستم تعلیق [۱۱]

پارامتر	مقدار	واحد(دیمانسیون)
m_s	۱۴۰۰	Kg
m_{uf}	۴۰	Kg
m_{ur}	۴۰	Kg
k_{sf}	۲۳۵۰۰	N/m
k_{sr}	۲۵۵۰۰	N/m
k_{tf}	۱۹۰۰۰۰	N/m
k_{tr}	۱۹۰۰۰۰	N/m
c_{sf}	۱۰۰۰	N.s/m
c_{sr}	۱۱۰۰	N.s/m
l_f	۰/۹۶	m
l_r	۱/۴۴	m
t_f	۰/۷۱	m
t_r	۱/۴۴	m
I_θ	۲۱۰۰	Kgm ²
I_φ	۴۶۰	Kgm ²

$$z_{1rr} = z_s - l_r \theta - t_r \varphi \quad (4)$$

$$m_s \ddot{z}_s = k_{sf}(z_{2fr} - z_{1fr}) + k_{sf}(z_{2fl} - z_{1fl}) + c_{sf}(\dot{z}_{2fr} - \dot{z}_{1fr}) + c_{sf}(\dot{z}_{2fl} - \dot{z}_{1fl}) + k_{sr}(z_{2rr} - z_{1rr}) + k_{sr}(z_{2rl} - z_{1rl}) + c_{sr}(\dot{z}_{2rr} - \dot{z}_{1rr}) + c_{sr}(\dot{z}_{2rl} - \dot{z}_{1rl}) + F_{fr} + F_{fl} + F_{rr} + F_{rl} \quad (5)$$

$$I_\theta \ddot{\theta} = L_f k_{sf}(z_{2fr} - z_{1fr}) + L_f c_{sf}(\dot{z}_{2fr} - \dot{z}_{1fr}) + L_f k_{sf}(z_{2fl} - z_{1fl}) + L_f c_{sf}(\dot{z}_{2fl} - \dot{z}_{1fl}) - L_r k_{sr}(z_{2rr} - z_{1rr}) - L_r c_{sr}(\dot{z}_{2rr} - \dot{z}_{1rr}) - L_r k_{sr}(z_{2rl} - z_{1rl}) - L_r c_{sr}(\dot{z}_{2rl} - \dot{z}_{1rl}) + L_f(F_{fr} + F_{fl}) - L_r(F_{rr} + F_{rl}) \quad (6)$$

$$I_\varphi \ddot{\varphi} = t_f k_{sf}(z_{2fl} - z_{1fl}) + t_f c_{sf}(\dot{z}_{2fl} - \dot{z}_{1fl}) + t_r k_{sr}(z_{2rl} - z_{1rl}) + t_r c_{sr}(\dot{z}_{2rl} - \dot{z}_{1rl}) - t_f k_{sf}(z_{2fr} - z_{1fr}) - t_f c_{sf}(\dot{z}_{2fr} - \dot{z}_{1fr}) - t_r k_{sr}(z_{2rr} - z_{1rr}) - t_r c_{sr}(\dot{z}_{2rr} - \dot{z}_{1rr}) + t_f(F_{fl} - F_{fr}) + t_r(F_{rl} - F_{rr}) \quad (7)$$

۴- روش آموزش و کنترل سیستم تعلیق

ابتدا برای سیستم تعلیق یک کنترل کننده فازی طراحی شد. سپس تابعی تصادفی بعنوان ورودی جاده به سیستم اعمال گردید. و از نتایج کنترل کننده فازی داده‌های آموزش برای کنترل کننده تطبیقی عصبی-فازی استخراج گردید.

$$m_{uf} \ddot{z}_{2fr} = k_{tf}(w_{fr} - z_{2fr}) - k_{sf}(z_{2fr} - z_{1fr}) - c_{sf}(\dot{z}_{2fr} - \dot{z}_{1fr}) - F_{fr} \quad (8)$$

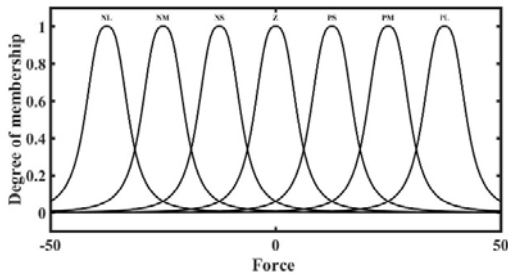
۴-۱- کنترل کننده فازی

از منطق فازی برای کنترل عملگر استفاده شد که شامل دو ورودی و یک خروجی بود. ورودی اول سرعت مطلق جابجایی در هر گوشه از خودرو برای مثال سرعت مطلق در گوشه جلو سمت راست بدنه خودرو v_{1fr} ، ورودی دوم جابجایی نسبی هر یک از گوشه‌های بدنه خودرو با ورودی جاده بود برای مثال جابجایی نسبی بین گوشه جلو سمت راست بدنه خودرو با وضعیت جاده مرتبط با آن Z_{1fr} - W_{fr} ، نیروی کنترلی نیز بعنوان خروجی در نظر گرفته شد. جدول ۲ بیان‌گر پایگاه قواعد کنترل کننده فازی

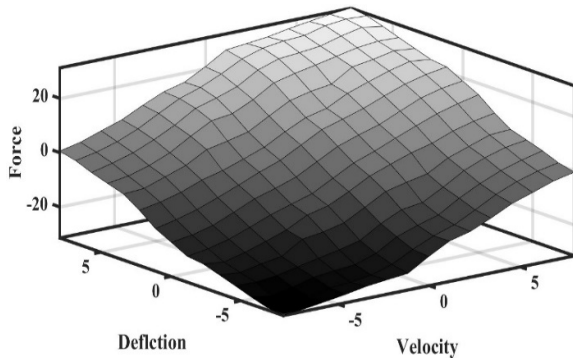
$$m_{uf} \ddot{z}_{2fl} = k_{tf}(w_{fl} - z_{2fl}) - k_{sf}(z_{2fl} - z_{1fl}) - c_{sf}(\dot{z}_{2fl} - \dot{z}_{1fl}) - F_{fl} \quad (9)$$

$$m_{ur} \ddot{z}_{2rr} = k_{tr}(w_{rr} - z_{2rr}) - k_{sr}(z_{2rr} - z_{1rr}) - c_{sr}(\dot{z}_{2rr} - \dot{z}_{1rr}) - F_{rr} \quad (10)$$

$$m_{ur} \ddot{z}_{2rl} = k_{tr}(w_{rl} - z_{2rl}) - k_{sr}(z_{2rl} - z_{1rl})$$



شکل ۴ توابع عضویت برای خروجی (نیرو)



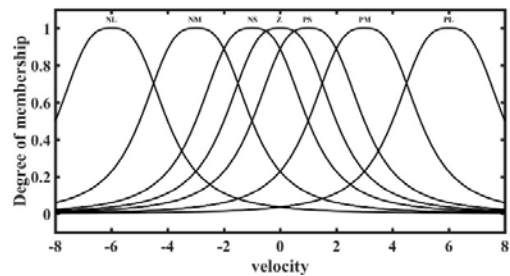
شکل ۵ سطح بین ورودی‌ها و خروجی کنترل کننده فازی

در شکل ۶ روش کنترل سیستم تعلیق با استفاده از کنترل کننده فازی و داده‌برداری بمنظور آموزش کنترل کننده تطبیقی عصبی-فازی برای یک چرخ بصورت نمونه نشان داده شده است. خروجی‌های کنترلی سیستم تعلیق شامل جابجایی نسبی بین $Z_{1fr}-W_{fr}$ و سرعت مطلق V_{1fr} می‌باشند، در حقیقت کنترل کننده فازی دو ورودی و یک خروجی دارد. خروجی‌های هدف برای سیستم کنترلی شامل شتاب خطی بدنه خودرو \ddot{Z} ، جابجایی خطی بدنه خودرو Z و جابجایی زاویه‌ای (چرخش) خودرو θ در نظر گرفته شدند. که بدنبال کاهش مقادیر آنها می‌باشیم. و همچنین برای مقایسه روش‌های کنترلی از شاخص آماری ریشه میانگین مربعات^۱ استفاده شد.

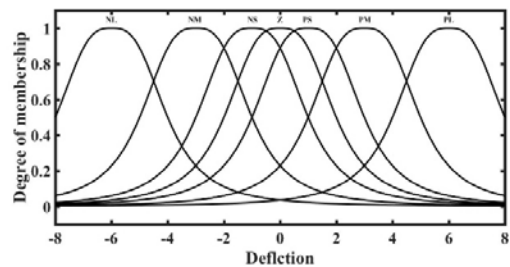
می‌باشد، همانطور که مشاهده می‌شود جابجایی نسبی و سرعت مطلق به هفت دسته تقسیم‌بندی شدند که عبارتند از: منفی بزرگ NL، منفی متوسط NM، منفی کوچک NS، صفر Z، مثبت کوچک PS، مثبت متوسط PM، مثبت بزرگ PL. هر کدام از این تقسیم‌بندی‌ها بیان‌گر یک تابع عضویت می‌باشد (شکل‌های ۲، ۳ و ۴).

جدول ۲ پایگاه قواعد کنترل کننده فازی [۱۲]

Input 2	Input 1						
	NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL
NL	NL	NL	NM	NS	NS	NS	Z
NM	NL	NM	NS	Z	NS	Z	PS
NS	NM	NS	Z	Z	Z	PS	PM
Z	NM	NS	Z	Z	Z	PS	PM
PS	NM	NS	Z	Z	Z	PS	PM
PM	NS	Z	PS	Z	PS	PM	PL
PL	Z	PS	PS	PS	PM	PL	PL



شکل ۲ توابع عضویت برای ورودی اول (سرعت)



شکل ۳ توابع عضویت برای ورودی دوم (جابجایی)

1. Root Mean Square

A_i و B_i توابع عضویت مربوط به ورودی‌های فازی هستند که در قسمت مقدم هر کدام از قواعد آورده می‌شوند. r_i و q_i , p_i پارامترهای هستند که در هنگام فرآیند آموزش تعیین می‌شوند. لایه اول: (گره‌های ورودی) در این لایه به درجه عضویت گره‌ها ورودی با استفاده از تابع عضویت به بازه‌های مختلف فازی تقسیم‌بندی می‌شوند:

$$O_{1,i} = \mu A_i(x) \quad i=1, 2 \quad (12)$$

$$O_{1,i} = \mu B_i(y) \quad i=3, 4 \quad (13)$$

در این پژوهش توابع عضویت بصورت گوسی^۵ در نظر گرفته شد که از رابطه 14 بدست می‌آیند.

$$\mu A(x) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}} \quad (14)$$

که در آن c میانگین و σ انحراف معیار می‌باشد.

لایه دوم: (گره‌های قاعده) در این لایه ارزش هر قاعده از طریق عملگر ضرب مشخص می‌شود:

$$O_{2,i} = w_i = \mu A_i(x) \mu B_i(y) \quad i=1, 2 \quad (15)$$

لایه سوم: لایه دوم را نرمالیزه می‌کند:

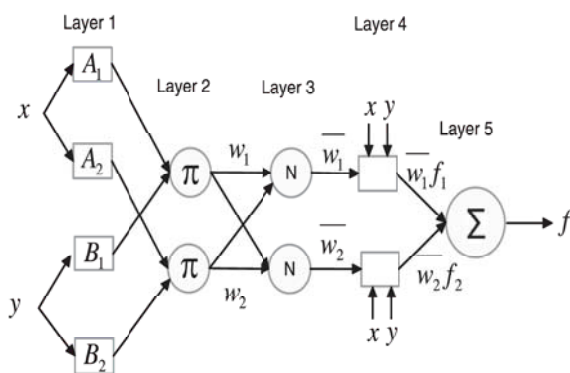
$$O_{3,i} = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2} \quad i=1, 2 \quad (16)$$

لایه چهارم: (گره‌های نتیجه) در این لایه خروجی هر گره برابر است با:

$$O_{4,i} = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i) \quad (17)$$

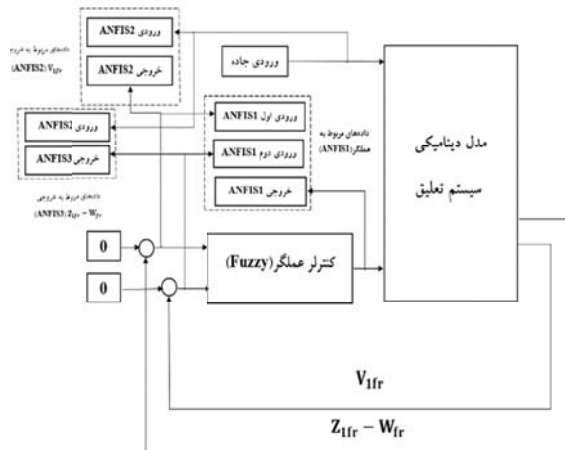
لایه پنجم: (گره‌های خروجی) در این لایه مقدار خروجی نهایی هر گره از رابطه 18 محاسبه می‌شود:

$$O_{5,i} = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum w_i f_i}{\sum w_i} \quad (18)$$



شکل ۷ معماری شبکه تطبیقی عصبی-فازی

همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، برای هر چرخ سه سیستم تطبیقی عصبی-فازی آموزش داده شد. که در جدول ۳ مشخصات ورودی و خروجی مربوط به هر کدام از سیستم‌های



شکل ۶ دیاگرام بلوکی کنترل کننده فازی و استخراج داده‌های برای آموزش کنترل کننده تطبیقی عصبی-فازی

۴-۲- کنترل کننده تطبیقی عصبی-فازی

یک سیستم استنتاج عصبی-فازی در حقیقت تلفیقی از ساختار شبکه عصبی^۱ و منطق فازی می‌باشد که اولین بار توسط راجر جانگ در سال ۱۹۹۳ ارائه شد [۱۳]. این سیستم استنتاج دارای پنج لایه می‌باشد که هر کدام از لایه‌ها عملیاتی بر روی داده‌های ورودی می‌دهند و در نهایت یک سیستم استنتاج فازی را فراهم می‌کند که با دریافت داده‌های ورودی، خروجی مورد نظر را تخمین می‌زند. سیستم استنتاج عصبی-فازی با ترکیب روش-های حداقل مربعات خطا و پس انتشار گرادیان نزولی^۲ پارامترهای بهینه را برای توابع عضویت یافته و سیستم استنتاج فازی را آموزش می‌دهد. در شکل ۷ معماری سیستم استنتاج عصبی-فازی مشاهده می‌شود، x و y بعنوان ورودی به سیستم و f خروجی می‌باشد. در منطق فازی قواعد بصورت استلزام^۳ مقدم و تالی بیان می‌شوند (اگر-آنگاه)، که در این پژوهش از استلزام سوگنو^۴ برای اعتباردهی به قواعد استفاده شد. برای مثال داریم:

$$f_1 = p_1 x + q_1 y + r_1$$

قاعده ۱: اگر x برابر با A_1 باشد و y برابر با B_1 آنگاه

$$f_2 = p_2 x + q_2 y + r_2$$

1. Neural Network
2. Back Propagation Gradient Descent
3. Implication
4. Sugeno

5. Gauss

در خوشه‌های دیگر غیر مشابه می‌باشند. برای مشابه بودن می‌توان معیارهای مختلفی را در نظر گرفت مثلاً می‌توان معیار فاصله را برای خوشه‌بندی مورد استفاده قرار داد و اشیائی را که به یکدیگر نزدیکتر هستند را بعنوان یک خوشه در نظر گرفت که به این نوع خوشه بندی، خوشه بندی مبتنی بر فاصله^۲ نیز گفته می‌شود.

۴-۴- الگوریتم خوشه‌بندی فازی

در این الگوریتم تعداد خوشه‌ها C از قبل مشخص شده است. تابع هدفی که برای این الگوریتم تعریف شده است بصورت زیر می‌باشد [۱۴]:

$$J = \sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^n U_{ik}^m d_{ik}^2 = \sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^n U_{ik}^m \|x_k - v_i\|^2 \quad (۱۹)$$

در فرمول فوق m یک عدد حقیقی بزرگتر از ۱ است که در اکثر موارد برای آن عدد ۲ انتخاب می‌شود. x_k نمونه k ام است و v_i نماینده یا مرکز خوشه i ام می‌باشد. U_{ik} میزان تعلق نمونه k ام در خوشه i ام را نشان می‌دهد. علامت $\|\cdot\|^*$ میزان تشابه (فاصله نمونه‌ها از مرکز خوشه) می‌باشد، که می‌توان هر تابعی که بیانگر تشابه نمونه و مرکز خوشه باشد را بکار برد. از روی U_{ik} می‌توان یک ماتریس U تعریف کرد که دارای c سطر و n ستون باشد. مولفه‌های U هر مقداری بین ۰ تا ۱ را می‌توانند اختیار کنند (اگر تمامی مولفه‌های ماتریس U بصورت ۰ و یا ۱ باشند الگوریتم مشابه C میانگین کلاسیک خواهد بود). با اینکه مولفه‌های ماتریس U می‌توانند هر مقداری بین ۰ تا ۱ را اختیار کنند اما مجموع مولفه‌های هر یک از ستون‌ها باید برابر ۱ باشد و داریم:

$$\forall k = 1, \dots, n, \quad J = \sum_{i=1}^c U_{ik} = 1 \quad (۲۰)$$

معنای این شرط این است که مجموع تعلق هر نمونه به خوشه باید برابر ۱ باشد. با استفاده از رابطه ۳-۳۰ مراکز خوشه-ها در k امین مرحله، با توجه به مقدار U در مرحله k-1 محاسبه می‌شود.

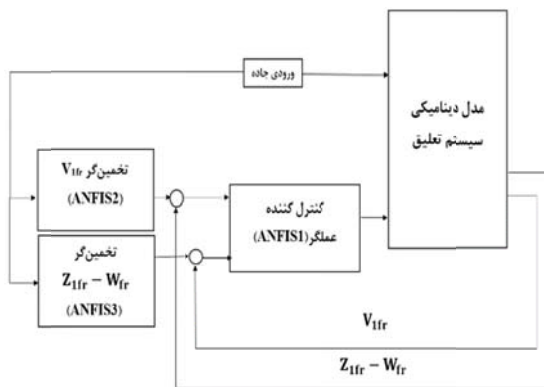
$$v_i = \frac{\sum_{k=1}^n U_{ik}^m x_k}{\sum_{k=1}^n U_{ik}^m} \quad (۲۱)$$

با تعیین مراکز خوشه‌ها از رابطه با می‌توان از رابطه ۳-۳۱ ماتریس تعلق U_{ik} بدست آورد.

$$U_{ik}^m = \frac{1}{\sum_{j=1}^c \left(\frac{d_{ik}}{d_{jk}} \right)^{2/(m-1)}} \quad (۲۲)$$

مراحل الگوریتم:

تطبیقی عصبی-فازی مشاهده می‌شود. روند آموزش برای سایر چرخ‌ها بصورت مشابه تکرار شد.



شکل ۸ دیاگرام بلوکی کنترل کننده تطبیقی عصبی-فازی برای یک چرخ از خودرو

جدول ۳ انواع سیستم‌های تطبیقی عصبی-فازی برای یک چرخ خودرو

سیستم	توضیحات	ورودی	خروجی
ANFIS1	کنترل کننده	V_{1fr}	F_{fr}
	عملگر	$Z_{1fr}-W_{fr}$	
ANFIS2	تخمین گر		V_{1fr}
	خروجی کنترلی	W_{fr}	
ANFIS3	تخمین گر		V_{1fr}
	خروجی کنترلی	W_{fr}	$Z_{1fr}-W_{fr}$

۴-۳- خوشه‌بندی فازی

خوشه‌بندی یکی از شاخه‌های یادگیری بدون نظارت^۱ می‌باشد و فرآیند خودکاری است که در طی آن، نمونه‌ها به دسته‌هایی که اعضای آن مشابه یکدیگر می‌باشند تقسیم می‌شوند که به این دسته‌ها خوشه گفته می‌شود. بنابراین خوشه مجموعه‌ای از اشیاء می‌باشد که در آن اشیاء با یکدیگر مشابه بوده و با اشیاء موجود

همانگونه که قبلا اشاره شده اگر سرعت پیشروی خودرو ثابت در نظر گرفته شود جابجایی جاده را ایستا می‌نامند و از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$W_{fl} = W_{fr} = \sum_{n=1}^{N_f} S_n \sin(n\omega_0 t + \varphi_n) \quad (25)$$

$$S_n = \sqrt{2S_g(n\Delta\Omega)\Delta\Omega} \quad (26)$$

$$\Delta\Omega = \frac{2\pi}{l} \quad (27)$$

$$\omega_0 = \left(\frac{2\pi}{l}\right) v_0 \quad (28)$$

φ_n متغییر تصادفی می‌باشد که در بازه $[0, 2\pi]$ عمل می‌کند، از طرفی دیگر همانطور که می‌دانیم $n\omega_0 = 2\pi f$ پس می‌توان نوشت:

$$f = \frac{n\omega_0}{2\pi} \quad (29)$$

برای بدست آوردن بیشترین فرکانس می‌بایست N_f را بجای n در رابطه فوق قرار دهیم، با توجه به ثابت بودن ω_0 و سایر مقادیر در این رابطه، می‌توان با استفاده از رابطه ۳۰ و تعیین مقدار N_f محدوده فرکانسی را مشخص نمود.

$$f_{max} = \frac{N_f}{l} v_0 \quad (30)$$

در رابطه فوق مقادیر سرعت پیشروی و طول جاده ثابت می‌باشد و تنها با تغییر در مقدار N_f می‌توان محدوده فرکانسی اغتشاشات ورودی به سیستم تعلیق را مشخص نمود. با توجه به اینکه محدوده فرکانسی ۰-۴۰ Hz برای بدن انسان قابل درک می‌باشد بیشترین مقدار فرکانس را معادل ۴۰ Hz قرار می‌دهیم و برای N_f مقدار ۲۰۰ را خواهیم داشت. در این پژوهش بمنظور آموزش کنترل کننده‌ها از چهار وضعیت جاده ذکر شده و سه سرعت ۱۰، ۲۰ و ۳۰ (m/s) داده کاوی بعمل آمد که جزئیات مربوط به آن در قسمت آموزش کنترل کننده‌ها ارائه می‌گردد.

۵- ایجاد پروفیل جاده نایستا^۳

بمنظور بررسی میزان تطبیق‌پذیری کنترل کننده‌های طراحی شده، عملکرد سیستم تعلیق درمواجه با پروفیل جاده تصادفی و نایستا بررسی شد، زیرا در شرایط جاده نایستا سرعت و ضریب سختی جاده همزمان تغییر می‌کنند و شرایط واقعی‌تر از تردد خودرو بر روی جاده ایجاد می‌نماید. همچنین آزمون مناسبی برای بررسی عملکرد سیستم تعلیق با کنترل کننده‌های متفاوت از لحاظ شاخص‌های عملکرد می‌باشد. برای ایجاد پروفیل جاده نایستا از روش قبلی استفاده شد و جاده با ضرایب سختی و سرعت‌های متفاوت بدست آمد، سپس طبق جدول ۵ این پروفیل‌های ایستا کنار هم بصورت ماتریسی قرار گرفتن و در

۱. مقدار دهی اولیه برای c ، m و U^0 خوشه‌های اولیه حدس زده می‌شوند.

۲. محاسبه مراکز خوشه‌ها (محاسبه v_i ها).

۳. محاسبه ماتریس تعلق با توجه به مراکز خوشه‌های محاسبه شده در مرحله دوم.

۴. اگر $\|U^{(k+1)} - U^{(k)}\| \leq \varepsilon$ الگوریتم خاتمه می‌یابد و در غیر اینصورت الگوریتم از مرحله دوم تکرار می‌شود.

۴- ایجاد پروفیل جاده بصورت تصادفی ایستا^۱ به روش

چگالی طیف توان

در این پروفیل سطح جاده بصورت تصادفی تغییر می‌کند، و این نوع از جابجایی سطح جاده عامل ایجاد ارتعاشات تصادفی در دینامیک سیستم تعلیق می‌باشد. باید در نظر داشت که در این روش سرعت پیشروی خودرو ثابت می‌باشد و شرایط ایستا می‌باشد. برای ایجاد چنین پروفیل تصادفی از رابطه‌های زیر استفاده می‌شود [۱۵].

$$S_g(\Omega) = \begin{cases} S_g(\Omega_0) \left(\frac{\Omega}{\Omega_0}\right)^{-n_1}, & \text{if } \Omega < \Omega_0 \\ S_g(\Omega_0) \left(\frac{\Omega}{\Omega_0}\right)^{-n_2}, & \text{if } \Omega \geq \Omega_0 \end{cases} \quad (23)$$

در رابطه بالا Ω_0 فرکانس فضایی مرجع که از رابطه ۲۴ بدست می‌آید.

$$\Omega_0 = \frac{1}{2} \pi \quad (24)$$

همچنین در معادله فوق Ω فرکانس فضایی در هر لحظه از زمان، $S_g(\Omega_0)$ بیانگر ضریب سختی جاده^۲ و n_1 و n_2 ثوابت سختی جاده می‌باشند، که به ترتیب دارای مقادیر ۲ و ۱/۵ هستند. برای تعیین کیفیت جاده از لحاظ سختی استاندارد ISO دسته‌بندی با توجه به ضریب سختی جاده $S_g(\Omega_0)$ ارائه می‌کند که در جدول ۴ به آن اشاره می‌شود.

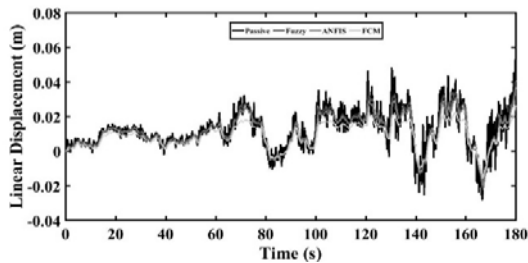
جدول ۴ دسته‌بندی سختی جاده بر اساس استاندارد ISO

درجه جاد	مقدار (m^3)
خوب (A)	16×10^{-6}
متوسط (B)	64×10^{-6}
ضعف (C)	256×10^{-6}

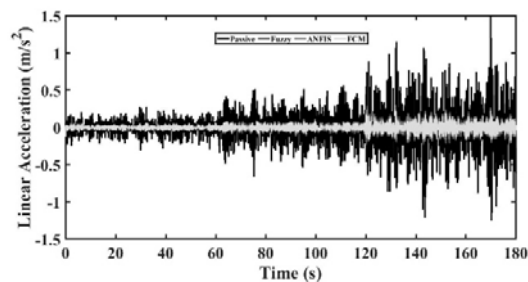
1. Stationary
2. Rough Road Coefficient

3. Nonstationary

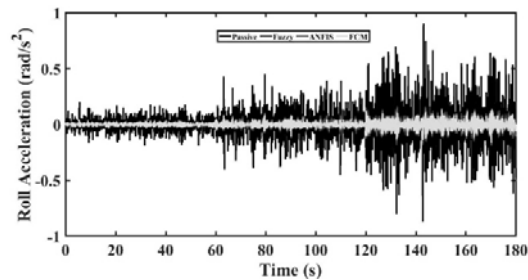
جابجایی خطی، شتاب خطی و شتاب زاویه‌ای باشد. در شکل ۱۰ نتایج مربوط به جابجایی خطی، شتاب خطی و شتاب زاویه‌ای بدنه خودرو در مواجهه با پروفیل جاده نایستا ملاحظه می‌گردد.



(a)



(b)



(c)

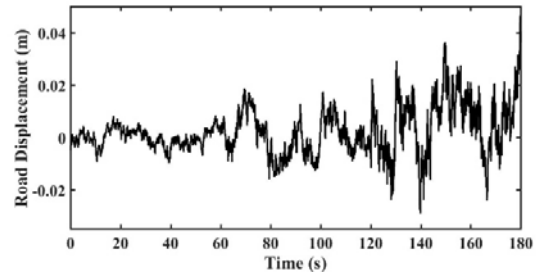
شکل ۱۰ شاخص‌های عملکرد (a) جابجایی خطی، (b) شتاب خطی و (c) شتاب پیچشی بدنه خودرو در مواجهه با ورودی جاده نایستا

در جدول ۶ مقادیر عددی ریشه میانگین خطا را برای شاخص‌های مختلف ملاحظه می‌شود.

جدول ۶ RMS مربوط به شاخص‌های عملکرد جابجایی خطی، شتاب خطی و پیچشی بدنه خودرو برای جاده نایستا

شاخص‌های عملکرد			کنترلر
شتاب چرخشی (rad/s ²)	شتاب خطی (m/s ²)	جابجایی خطی (m)	
(×۱۰ ^{-۲})	(×۱۰ ^{-۲})	(×۱۰ ^{-۲})	
۱۶/۶۵	۲۴/۳۸	۱/۶۹۵	Passive
۳/۴۶۰	۵/۱۱۴	۱/۵۸۹	Fuzzy
۳/۰۹۸	۴/۵۸۵	۱/۴۷۲	ANFIS

مجموع یک پروفیل جاده تصادفی به همراه تغییرات سرعت و ضریب سختی جاده ایجاد شد (شکل ۹).



شکل ۹ ورودی جاده بصورت تصادفی و نایستا

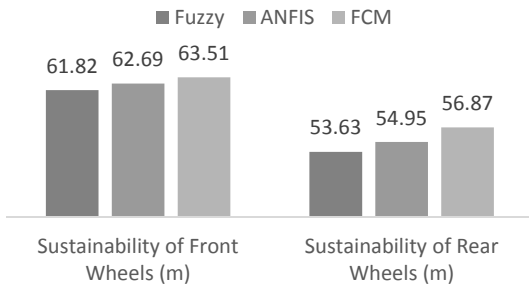
جدول ۵ پروفیل جاده نایستا

درجه زبری جاده	سرعت (m/s)	بازه زمانی (s)
A	۱۰	[۰, ۱۰]
A	۱۵	[۱۰, ۲۰]
A	۲۰	[۲۰, ۳۰]
A	۲۵	[۳۰, ۴۰]
A	۳۰	[۴۰, ۵۰]
A	۳۵	[۵۰, ۶۰]
B	۱۰	[۶۰, ۷۰]
B	۱۵	[۷۰, ۸۰]
B	۲۰	[۸۰, ۹۰]
B	۲۵	[۹۰, ۱۰۰]
B	۳۰	[۱۰۰, ۱۱۰]
B	۳۵	[۱۱۰, ۱۲۰]
C	۱۰	[۱۲۰, ۱۳۰]
C	۱۵	[۱۳۰, ۱۴۰]
C	۲۰	[۱۴۰, ۱۵۰]
C	۲۵	[۱۵۰, ۱۶۰]
C	۳۰	[۱۶۰, ۱۷۰]
C	۳۵	[۱۷۰, ۱۸۰]

۶- نتایج

در شرایط واقعی سرعت پیشروی و نوع جاده ثابت نیست و پیوسته تغییر می‌کند از اینرو یک پروفیل جاده در نظر گرفته شد که در آن سرعت پیشروی و نوع جاده بصورت همزمان تغییر می‌کند. یک کنترل کننده می‌بایست خود را با تغییرات نوع جاده و سرعت پیشروی تطبیق دهد، بطوریکه با وجود تغییر در نوع جاده و سرعت پیشروی قادر به بهبود شاخص‌های عملکرد

۷/۳۴۱	۹/۸۶۹	Passive
۳/۴۰۴	۳/۷۶۷	Fuzzy
۳/۳۰۷	۳/۶۸۲	ANFIS
۳/۱۶۶	۳/۶۰۱	FCM



شکل ۱۲ بهبود پایداری سیستم تعلیق در مواجهه با جاده ناپایستا

در جدول ۸ نیروی مصرفی برای عملگرهای جلو و عقب سیستم تعلیق نشان داده شده است، بیشترین مقدار نیرو مصرفی برای چرخ‌های جلو و عقب متعلق به کنترل کننده با خوشه‌بندی فازی بهینه می‌باشد.

جدول ۸ RMS مربوط به نیرو عملگر جلو و عقب برای جاده ناپایستا

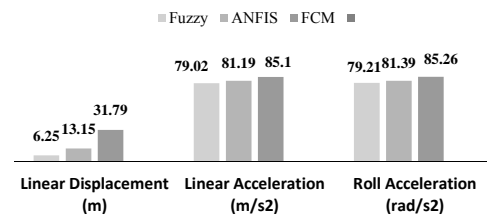
نیرو (N)		کنترل
F_{rr}	F_{fl}	
۱۵۱/۸	۱۵۰/۷	Fuzzy
۱۸۶/۳	۱۸۸/۶	ANFIS
۲۹۹/۹	۳۰۶/۲	FCM

۷- نتیجه‌گیری

همانطور که پیش‌تر اشاره شد تغییرات سرعت پیشروی خودرو و شرایط جاده‌ای دو عامل متغییر با زمان می‌باشد که باعث می‌شوند رفتار سیستم تعلیق ماهیت تصادفی داشته باشد، به همین دلیل می‌بایست کنترل کننده‌ای طراحی نمود که توانایی تطبیق با طیف وسیعی از شرایط متغییر با زمان را داشته باشد. شاخص‌های متفاوتی برای ارزیابی سیستم تعلیق مطرح می‌شود که مهمترین آن‌ها شتاب وارد به بدنه خودرو می‌باشد. در رویکرد پیشنهادی، سعی شد با آموزش کنترل کننده‌های تطبیقی عصبی-فازی برای شرایط جاده‌ای مختلف و سرعت‌های متفاوت، یک سیستم تعلیق فعال با قابلیت تطبیق هرچه بیشتر با شرایط گوناگون ایجاد شود. با توجه به نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی رفتار دینامیکی سیستم تعلیق خودرو در مواجهه با جاده ناپایستا

۲/۴۵۴	۳/۶۳۱	۱/۱۵۶	FCM
-------	-------	-------	-----

همانطور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، کنترل کننده با خوشه‌بندی فازی بهترین عملکرد را از لحاظ شاخص‌های جابجایی خطی، شتاب خطی و شتاب زاویه‌ای دارد. این کنترل کننده به ترتیب جابجایی خطی، شتاب خطی و شتاب زاویه‌ای را به میزان ۳۱/۷۹، ۸۵/۱ و ۸۵/۲۶ درصد کاهش داده است. سایر کنترل کننده‌ها نیز عملکرد مناسبی نسبت به سیستم تعلیق غیرفعال دارند، در شکل ۱۱ وضعیت عملکرد هر کدام از کنترل کننده‌ها مشاهده می‌شود.



شکل ۱۱ بهبود شاخص‌های عملکرد سیستم تعلیق در مواجهه با جاده ناپایستا

تمام کنترل کننده‌ها خود را با تغییرات در سرعت پیشروی و نوع جاده تطبیق داده‌اند، ولی بهترین عملکرد متعلق به کنترل کننده با خوشه‌بندی فازی که دارای کمترین مقدار جابجایی خطی، شتاب خطی و شتاب زاویه‌ای به ترتیب به میزان ۰/۱۵ (m)، ۰/۳۶ (m/s²) و ۰/۲۴ (rad/s²) می‌باشد. یکی از شاخص‌های مورد توجه در کنترل فعال سیستم تعلیق خودرو، شاخص پایداری می‌باشد، که همواره باید بین این شاخص و شاخص‌های جابجایی خطی، شتاب خطی و شتاب زاویه‌ای مصالحه برقرار کرد. در جدول ۷ مقادیر جابجایی نسبی بین ورودی جاده و شاسی (شاخص پایداری) خودرو مشاهده می‌شود، برای چرخ‌های جلو و عقب کمترین مقدار جابجایی نسبی بین ورودی جاده و شاسی متعلق به کنترل کننده با خوشه‌بندی فازی می‌باشد، و بیشترین مقدار به کنترل کننده فازی تعلق دارد. در شکل ۱۲ عملکرد کنترل کننده‌های مختلف از لحاظ پایداری برای چرخ‌های جلو و عقب نشان داده شده است.

جدول ۷ RMS مربوط به عملکرد پایداری خودرو برای چرخ‌های جلو و عقب برای جاده ناپایستا

شاخص پایداری خودرو		کنترل
$Z_{2rr}-W_{rr}$	$Z_{2fl}-W_f$	
($\times 10^{-4}$)	($\times 10^{-4}$)	

- vehicle suspension system, Using Feedback Error Learning, *Journal Aerospace and Mechanics*, Vol. 4, No. 3, pp.45-57, 2008. (in Persian)
- [5] R. Kothandarama and L. Ponnusamy, PSO tuned adaptive neuro-fuzzy controller for vehicle suspension systems, *Journal of Advances in Information Technology*, Vol. 3, No. 1, 2012.
- [6] H. Souilem, S. Mehjoub, and N. Derbel, Intelligent control for a half-car active suspension by self-tunable fuzzy inference system, *International Journal of Fuzzy Systems and Advanced Application*, Vol. 2, pp. 9-15, 2015.
- [7] R. Kalaivani, K. Sudhagar, and P. lakshmi, Neural network based vibration control for vehicle active suspension system, *India Journal of Science and Technology*, Vol. 9, No. 1, 2016.
- [8] M. Soleymani, M. Montazeri, Gh. Amiryan, Adaptive fuzzy controller vehicle active suspension system based on traffic condition, *Journal of Scientia Iranica*, Vol.19, No.3, pp.443-453, 2012.
- [9] Y. Qin, R. Langari, and L. Gu, The use of vehicle dynamic response to estimate road profile input in time domain, *Proceeding of the ASME Dynamic Systems and Control Conference*, p. 8, 2014.
- [10] Y. Qib, M. Dong, R. Langari, L. Gu, and J. Guan, Adaptive hybrid control of vehicle semiactive suspension based on road profile estimation, Hindawi Publishing Corporation, Shock and Vibration, Vol. 2015, pp. 1-13, 2015.
- [11] H. Li, *Robust control design for vehicle active suspension system with uncertainty*, PhD Thesis, University of Portsmouth, Portsmouth, 2012.
- [12] M. V. C. Rao, and V. Prahlad, A tunable fuzzy logic controller for vehicle-active suspension systems, *Fuzzy set and System*, Vol. 85, No. 1, pp.11-21, 1997.
- [13] J. S. Roger Jang, ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system, *IEEE, Transaction System, Man and Cybernetics*, Vol. 23, No. 3, 1993.
- [14] E. T. Georg and S. Haralambos, A new approach for measuring the validity of the fuzzy c-means algorithm, *Advances in Engineering Software*, Vol. 35, pp.567-575, 2004.
- [15] H. Du and N. Zhang, Constrained H_{∞} control of active suspension for a half-car model with a time delay in control, *Automobile Engineering Journal*, Vol. 222, pp.665-683, 2008.

که در آن سرعت پیشروی و ضریب زبری جاده همزمان تغییر می‌کند، مشخص می‌شود که کنترل کننده تطبیقی عصبی-فازی با خوشه‌بندی فازی با وجود تغییرات در شرایط جاده و سرعت پیشروی توانسته است جابجایی و شتاب خطی بدنه خودرو و همچنین جابجایی زاویه را کاهش دهد. از طرف دیگر این کنترل کننده توانایی بهبود پایداری خودرو بر روی جاده را دارد.

۳- فهرست علائم

C_{sf}	ضریب میرایی دمپ‌های جلو خودرو (N.s/m)
C_{sr}	ضریب میرایی دمپ‌های عقب خودرو (N.s/m)
F	نیروی کنترلی (N)
I_{θ}	ممان اینرسی قطبی $(Kg m^2)$
I_{φ}	ممان اینرسی قطبی $(Kg m^2)$
k_{tf}	ضریب سختی چرخ‌های جلو خودرو (N/m)
k_{tr}	ضریب سختی چرخ‌های عقب خودرو (N/m)
k_{sf}	ضریب سختی فنرهای جلو خودرو (N/m)
k_{sr}	ضریب سختی فنرهای عقب خودرو (N/m)
l_f	فاصله مرکز ثقل خودرو تا محور جلو خودرو (m)
l_r	فاصله مرکز ثقل خودرو تا محور عقب خودرو (m)
m_s	جرم مرکز ثقل بدنه خودرو (Kg)
m_{uf}	جرم قسمت جلو سیستم تعلیق (Kg)
m_{ur}	جرم قسمت عقب سیستم تعلیق (Kg)
t_f	فاصله مرکز ثقل خودرو تا چرخ‌های چپ خودرو (m)
t_r	فاصله مرکز ثقل خودرو تا چرخ‌های راست خودرو (m)
w	ورودی جاده (m)

۴- مراجع

- [1] A. Karami-Mollaei, Design of dynamic sliding mode controller for active suspension system, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 2, pp. 51-58, 2016. (in Persian)
- [2] H. Moghadamfard, F. Samadi, Active suspension system control using adaptive neuro-fuzzy (ANFIS) controller, *International Journal of Engineering (IJE)*, Vol. 28, No. 3, 396-401, 2015.
- [3] S. Heydariyan, A. Ramezani, M. Naseriyan, Decrease vibration of vehicle body due to road disturbances using the adaptive neuro-fuzzy controller, *Journal of Telecommunication Engineering*, Vol. 5, No. 17, 2015. (in Persian)
- [4] S. H. Sadati, M. Aliyari Shooredli, and A. Davari Edalatpanah, Designing a neuro-fuzzy controller for a