

تصميم وحدة تحكم لنظام التعليق في نموذج ربع المركبة باستخدام نظام الاستدلال العصبي الضبابي المتكيف الموسع

د. جعفر الخير*

د. بلسم عيد**

طارق برهوم***

(تاريخ الإيداع 21 / 6 / 2016. قُبِلَ للنشر في 6 / 9 / 2016)

□ ملخص □

تعتبر أنظمة التعليق من أهم المكونات في المركبات الحديثة كما أنها تعد أهم عوامل الراحة والأمان فيها لذلك كان لابد من تأمين متحكم يضمن التفاعل الكامل بين مكونات نظام التعليق ويساعد في اتخاذ القرارات الدقيقة في الوقت المناسب، يقترح البحث تصميم متحكم باستخدام نظام الاستدلال العصبي الضبابي المتكيف الموسع (EANFIS) واستخدامه كوحدة اتخاذ قرار في نظام التعليق لنموذج ربع المركبة بغاية المحافظة على ثبات المركبة على الطرقات لتأمين راحة الركاب حيث يقوم بتحقيق دقة في اتخاذ القرار للمساهمة في تخفيض الاهتزازات و امتصاص الصدمات الناتجة عن عدم استواء الطريق وبالتالي يمنع وصولها إلى مقصورة القيادة ويؤمن الثبات والتماسك المطلوب تم تطبيق المتحكم على نموذج ربع المركبة ودراسة استجابة النموذج في حال حدوث اضطرابات مختلفة ومقارنة أداء المتحكم مع متحكم يعتمد على نظام الاستدلال الضبابي ومع استجابة النموذج الرياضي ذو الحلقة المفتوحة بوجود اضطرابات دخل مختلفة وقد أظهر المتحكم توفراً في الأداء من حيث تخفيض الإزاحات وسرعة الاهتزاز وتسارعه.

الكلمات المفتاحية: نظام الاستدلال العصبي الضبابي المتكيف الموسع، نظام الاستدلال الضبابي نظام

التعليق، المنطق الضبابي، الشبكات العصبونية، نموذج ربع مركبة.

* أستاذ مساعد - قسم هندسة الحاسبات والتحكم الآلي-كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية-جامعة تشرين-اللاذقية-سورية.

** مدرسة - قسم هندسة الحاسبات والتحكم الآلي-كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية-جامعة تشرين-اللاذقية-سورية.

*** طالب دراسات عليا (دكتوراه) - قسم هندسة الحاسبات والتحكم الآلي-كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية -جامعة تشرين -اللاذقية- سورية.

Designing a control unit for suspension system in quarter car model using Extended Adaptive Neuro Fuzzy Inference System

Dr. Jafar alkheir*
Dr. Balsam Eid**
Tarek Barhoum***

(Received 21 / 6 / 2016. Accepted 6 / 9 / 2016)

□ ABSTRACT □

Suspension system is considered one of the most important components of modern automobiles as it is the responsible for the vehicle's stability, balance and safety. The presence of robust controller is very necessary in order to ensure full interaction between suspension components and making accurate decisions at the right time. This paper proposes to design an Extended Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (EANFIS) controller for suspension system in quarter car model. The proposed controller is used as decision maker In order to contribute in absorbing shocks caused by bumpy roads, and to prevent vibrations from reaching the cockpit. Furthermore, it provides stability and coherence required to reduce the discomfort felt by passengers, which arises from road roughness, which in turn, improve the road handling. The MATLAB Simulink is used to simulate the proposed controller with the controlled model and to display the responses of the controlled model under different types of disturbance. In addition, a comparison between EANFIS controller, Fuzzy controller and open loop model (passive suspension) was done with different types of disturbance on order to evaluate the performance of the proposed model. Controller has shown excelled performance in terms of reducing displacements, velocity and acceleration.

Keywords: EANFIS, ANFIS, Fuzzy inference system, Suspension system, Fuzzy logic, neural networks, quarter car model.

* Associate Professor, Department of Computers and Automatic Control Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Lattakia, Syria.

** Prof assistant, Department of Computers and Automatic Control Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Lattakia, Syria .

*** Postgraduate Student, Department of Computers and Automatic Control Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Lattakia, Syria.

مقدمة:

مع التقدم التكنولوجي في وسائل الراحة والرفاهية والاتصالات تشهد صناعة السيارات تقدماً آخر في مجال وسائل الحماية والعمل على تطوير الأنظمة المختلفة لمنع الانزلاقات والتحكم بالثبات وانتشارها في معظم قطاعات السيارات بما فيها السيارات الصغيرة حيث أصبحت صناعة إلكترونيات السيارات تقف اليوم على عتبة قفزة نوعية وكمية جديدة عنوانها التحكم الإلكتروني الكامل بأنظمة السيارة. ليسهم التكامل والتفاعل بين هذه الأنظمة في تحسين عوامل الراحة والرفاهية والحماية معاً. وتعتبر أنظمة التعليق واحدة من أهم المكونات بالسيارات كما أنها تعد أهم عوامل الراحة والأمان فيها لذلك كان لا بد من تأمين متحكم يضمن التفاعل الكامل بين مكونات نظام التعليق ويساعد في اتخاذ القرارات الدقيقة التي تضمن العمل الأمثل لهذا النظام.

أهمية البحث وأهدافه:

يهدف البحث إلى المحافظة على ثبات المركبة على الطرق المختلفة من خلال تحسين أداء نظام التعليق وذلك باستخدام نظام الاستدلال العصبي الضبابي المتكيف الموسع (EANFIS) كوحدة اتخاذ قرار في نظام التعليق النشط وإجراء محاكاة لهذا المتحكم ومقارنة أدائه مع الأنواع الأخرى من المتحكمات التي يتم استخدامها في هذا المجال. وإن وجود وحدة تحكم متينة لأنظمة التعليق النشط هو أمر في غاية الأهمية من أجل ضبط أداء النظام وتحسين عملية التخميد وامتصاص الصدمات وبالتالي تأمين انسيابية المركبة مع مختلف أنواع الطرق، ويساهم البحث في تحسين أداء نظام الاستدلال العصبي الضبابي من خلال دراسة سلوكه عند التعامل مع الأنظمة كوحدة تحكم، تمت الدراسة باستخدام النموذج الرياضي لربع المركبة وذلك لبساطة النموذج وقدرته على إظهار فاعلية المتحكم ومدى سرعة الاستجابة له عند تطبيق الاضطرابات المختلفة.

طرائق البحث ومواده:

أنظمة التعليق في المركبات:

يعد نظام التعليق هو النظام المسؤول عن الثبات والتوازن في هيكل السيارة وغرفة القيادة والمحافظة على ثبات السيارة على الطرقات والمنعطفات حيث يقوم بامتصاص الصدمات الناتجة عن وعورة الطريق ويمنع وصولها إلى مقصورة القيادة ويؤمن الثبات والتماسك المطلوب [1].

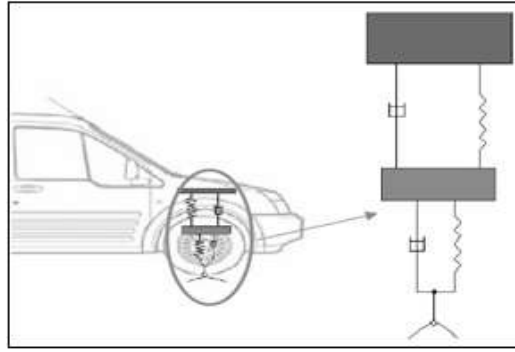
وتعد أنظمة التعليق من أهم الأنظمة داخل المركبات الحديثة وذلك بسبب الدور الحيوي الذي تلعبه، فتعرف أنظمة التعليق بأنها حلقة الوصل أو الرابط بين هيكل السيارة بما تحتويه من مكونات مختلفة وبين المحاور والعجلات حيث تقوم وظيفته الأساسية على تحقيق أكبر قدر من الثبات على الطريق بالإضافة إلى توفير إحساس الراحة للركاب بتقليل شعورهم بوجود نتوءات أو مطبات على الطريق [2].

وقد أجرت كبرى شركات السيارات نقلة نوعية في أنظمة التعليق الخاصة بالإصدارات الأحدث من سياراتها حيث انتقلت من أنظمة التعليق العادية (Passive) التي تتكون من النوابض مع ممتص الصدمات إلى أنظمة التعليق النشط (Active) والتي تتكون من حساسات (Sensors) ومشغلات (Actuators) بالإضافة إلى وحدة تحكم (Control unit) [7] وبعض المكونات الهيدروليكية وهذا النظام يعمل بطريقة إلكترونية ويمكن التحكم فيه إلكترونياً

حسب حالة الطريق حيث تقوم وحدة تشغيل actuator هيدروليكية مرتبطة بنظام إلكتروني يتبلغ معلوماته باستمرار من وحدة تحكم تعتمد على حساسات رصد حركة المقود وحركة الهيكل بالإبقاء على السيارة في أفضل وضعية ممكنة من الاستواء الطبيعي. وقد تم اجراء العديد من الدراسات باستخدام عدة نماذج رياضية لتمثيل حركة المركبة وقد تم استخدام النموذج الرياضي لربع المركبة في العديد منها لبساطته وسهولة اختبار النظام التحكمي بالاعتماد عليه [2,3].

3-1-1 نموذج نظام التعليق لربع مركبة:

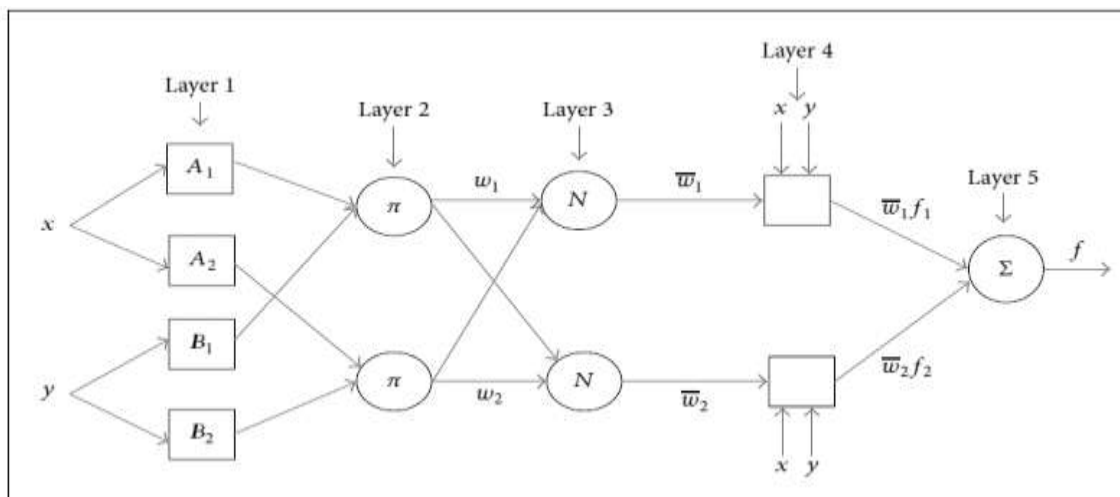
في هذا النموذج فإن 4\1 فقط من السيارة يتم أخذه بعين الاعتبار عند إجراء عملية التحليل والدراسة ويتكون من مخمد متغير أو مشغل هيدروليكي يربط على التوازي مع النوابض ويمكن التحكم به من خلال وحدة تحكم كما هو مبين في الشكل (1) حيث تتم دراسة حركة كتلة السيارة وسرعة الاهتزاز وتسارعه عند التعرض لاضطرابات مختلفة وكذلك سرعة استجابة المشغل الهيدروليكي ودقة الإزاحات التي تضمن استواء المركبة[3].



الشكل (1) نموذج ربع المركبة

3-2 نظام الاستدلال العصبي الضبابي المتكيف Adaptive Neuro Fuzzy Inference System:

يعتبر نظام الاستدلال الضبابي Fuzzy Inference System من الأنظمة العملية الشائعة الاستخدام، لكنه يتطلب خبرة مسبقة لتعريف توابع العضوية وتحديد بارامتراتهما، وبالتالي لا يوجد معيار لعملية اكتساب المعرفة لذلك قد تختلف النتائج إذا عمل مهندس آخر في عملية اكتساب المعرفة أي ستختلف النتائج حسب الخبير الذي يقوم بالعمل[2]. وقد تم التغلب على هذه المشكلة في النظام العصبي الضبابي حيث استبدلت عملية اكتساب المعرفة عن طريق الإنسان بعملية التدريب باستخدام مجموعات بيانات دخل-خرج. وبالتالي بدلاً من الاعتماد على الخبرة البشرية سيقوم النظام العصبي الضبابي بالاعتماد على عملية التدريب في تحديد البارامترات المرتبطة بالنظام العصبي الضبابي عن طريق تقليل معيار الخطأ ، يسمى النظام العصبي الضبابي بنظام الاستدلال العصبي الضبابي المتكيف (ANFIS). ويتكون من خمس طبقات ذات انتشار أمامي كما هو موضح في الشكل (2) ويمكن لل ANFIS أن تعبر عن المعرفة الخاصة بها على صيغة قواعد من الشكل IF-Then. تتكون بنية (ANFIS) من ثلاثة أجزاء رئيسية:



الشكل (2) معمارية الـ ANFIS [2]

1- جزء الدخل: يتم في هذا القسم نمذجة متغيرات الدخل باستخدام توابع العضوية.

2- جزء القواعد: في هذا الجزء يتم تشكيل القواعد من مجموعة توابع العضوية، وباعتبار لا يوجد اي سبب مسبق لاستبعاد أي مجموعة من القواعد المدمجة مع بعضها من مجموعة توابع العضوية وبالتالي سيتم تشكيل جميع مجموعات القواعد الممكنة.

3- جزء الخرج: في هذا الجزء سيتم تشكيل المخارج باستخدام مجموعات مخارج القواعد، يوجد خيارين شائعين: الأول هو أن الخرج سيكون عبارة عن تجميع خطي للمداخل. أما الثاني فهو استخدام تابع خرج Takaga- (TSK) Sugeno-Kang والذي يعد آلية تتيح تأثير مباشر للدخل على الخرج.

تعاني معمارية الـ ANFIS الشائعة من بعض العيوب التي تحد من أدائها مع الأنظمة العملية وخصوصاً الأنظمة اللاخطية العالية التعقيد وهي: القصور في قابلية التوسع مع الأعداد الكبيرة من متغيرات الدخل، وكذلك لا يوجد طرق مخصصة ليتم فيها اختيار تابع العضوية وعدد توابع العضوية المطلوب لكل متغير دخ ل يعتمد ذلك على المستخدم. وبالتالي ليس هناك حل لمشكلة عدد القواعد التي سيتم تشكيلها فلن يتم تشكيل القواعد حسب الحاجة، في الواقع فإن معمارية الـ ANFIS لا تقوم بأي عملية افتراض مسبق لبنية القواعد وبالتالي فإنه من المطلوب أن يتم تشكيل جميع المجموعات الممكنة من متغيرات الدخل، وبالتالي فعندما يكون عدد المتغيرات كبيراً فإنه سيكون من الصعب أن يتم تطبيق المعمارية على الأنظمة العملية فعلى الرغم من بساطة نموذج ربع المركبة في أنظمة التعليق إلا أن وجود تابع عضوية بشكل محدد (مثلثي مثلاً) سيحد من تكيف المتحكم مع الدخل المعطى وهنا سيتم تجريب المتحكم مع توابع دخل مختلفة للوصول إلى أداء مقبول.

3-3 نظام الاستدلال العصبي الضبابي المتكيف الموسع (Extended Adaptive Neuro Fuzzy)

(Inference System): (EANFIS)

يتيح هذا النظام التعامل مع أبعاد دخل أعلى من خلال تجنب الحاجة لتشكيل القواعد في المستوى الأول. تعد الـ EANFIS توسع لنظام الاستدلال العصبي الضبابي المتكيف (ANFIS) من خلال دمج طبقات إضافية في بنية الـ ANFIS الأساسية ثانياً سيتم استخدام تابع خاص يقوم بتنظيم العقدة ذاتياً كتابع عضوية والذي يملك خاصية الضبط الأتوماتيكي لشكله حسب المداخل [6]. يتم تشكيل بنية الـ EANFIS باتباع الخطوات التالية:

1 - توليد تابع العضوية المناسب.

2 - تشكيل القواعد الضبابية بشكل مناسب للدخل.

3 - تعليم البارامترات المرتبطة بالطبقات.

4 - تعليم بارامترات طبقة الخرج.

إن أول خطوتين تتعلقان بتحديد بنية المعمارية المناسبة للدخل المعطى بينما الخطوتين الأخريين تتعلقان بتقدير البارامترات بعد تحديد البنية.

3-3-1 معمارية نظام الاستدلال العصبي الضبابي المتكيف الموسع:

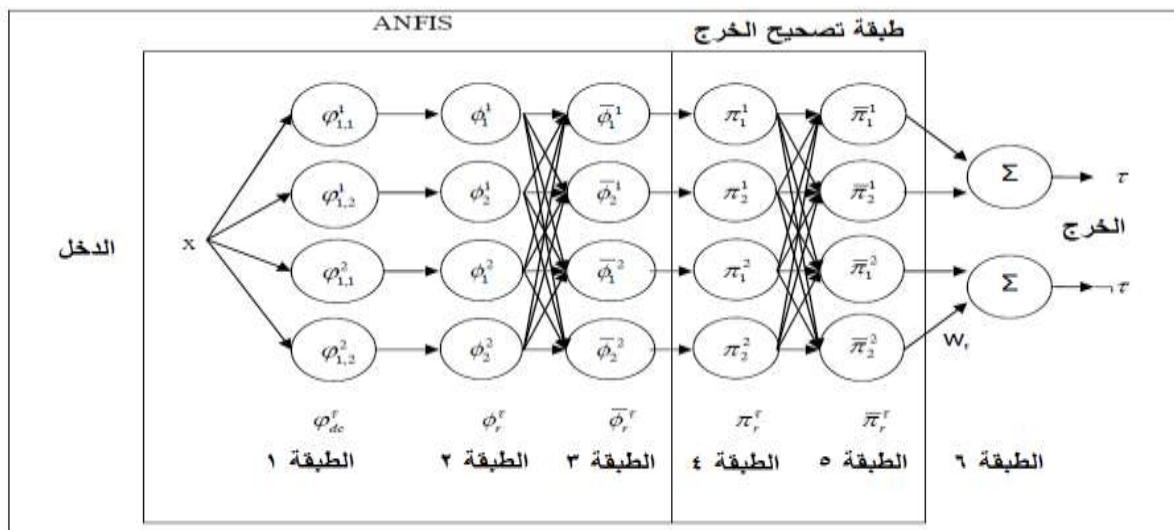
تم في هذه المعمارية تعديل بنية نظام الـ ANFIS التقليدية باستخدام طريقة مستوحاة من العمل بمشاكل تنقيب البيانات حيث تم تحديد بنية المعمارية قبل عملية تقدير البارامترات. وبالتالي باستخدام هذه الطريقة نتخلص من الحاجة لتطبيق جميع عمليات الدمج لمخارج تابع العضوية ونصبح بحاجة فقط لتطبيق بعض عمليات الدمج لمخارج تابع العضوية وهذا ما يؤدي إلى التخلص من مشكلة العدد الهائل من توابع العضوية التي يتم تشكيلها عند التعامل مع عدد كبير من المداخل في بنية الـ ANFIS التقليدية والذي يؤدي في الكثير من الأحيان إلى توقف عمل الشبكة. يوضح الشكل (3) معمارية نظام الاستدلال العصبي الضبابي المتكيف الموسع.

أما بالنسبة لتوابع العضوية فقد لاحظنا أن تحديد عدد ونوع توابع العضوية يتم كحلقة مفتوحة في بنية الـ

ANFIS التقليدية أي أن اختيار نوع تابع العضوية المرشح الذي سيتم استخدامه و تطبيقه يجري بطريقة التجريب والخطأ. لذلك تم إيجاد طريقة تسمى طريقة العقدة الجبلية الذاتية التنظيم (self-organizing mountain clustering method) تتيح لنا إيجاد شكل تابع العضوية المطلوب واختيار العدد المناسب من التوابع [6,8] وهي بشكل أساسي إجراء مشابه في التنقيب عن البيانات لعمليات التقريب في إيجاد تابع الكثافة الاحتمالية للبيانات المعطاة، فتساعد بذلك على عدم توليد عدد كبير من توابع العضوية.

تعد طريقة العقدة الجبلية الذاتية التنظيم تقنية عامة من أجل بناء توابع العضوية انطلاقاً من البيانات المعطاة، وباعتبار أنه بالإمكان تطبيقه على بنية الـ ANFIS بالتالي سوف يكون البديل لإيجاد مراكز وهوامش الانتشار لتوابع العضوية كتابع العضوية الغوصي الأكثر استخداماً في بنية الـ ANFIS [10].

في معمارية الـ EANFIS سيتم توسيع صيغة معمارية الـ ANFIS بالاعتماد على الخرج. وبشكل عام فسوف نحتاج إلى اعتبار حالتين مختلفتين للخرج: الأولى عندما يكون الخرج متقطع (discrete) والثانية عندما يكون الخرج متواصل، ويبين الشكل (3) معمارية الـ EANFIS.



الشكل (3) معمارية الـ EANFIS

إذا فرضنا أن الخرج متقطع ولدينا T أصناف خرج. سوف نرمز للخرج المطلوب بـ d_i^T حيث $i=1,2,\dots,T$ حيث a هو العدد الكلي لعينات التدريب و $\tau=1,2,3,\dots,T$ حيث T هو عدد أصناف الخرج. ولنمذجة أصناف الخرج المتقطعة هذه سوف نفترض أن خرج الـ EANFIS سيكون متقطعاً ونرمز له بـ y_i^T حيث y_i^T هي الخرج المقابل للدخل ذو الترتيب i ، ويكون الخرج المطلوب المقابل له d_i^T . بالاعتماد على ما سبق سوف نقوم ببناء شبكة ANFIS مستقلة لكل صنف من أصناف الخرج τ يتكون نظام الاستدلال العصبي الضبابي المتكيف الموسع من ستة طبقات وهي:

الطبقة الأولى (طبقة الدخل):

في هذه الطبقة يكون شعاع الدخل X_d حيث $d=1,2,3,\dots,D$ حيث شعاع الدخل هذا يتم إدخاله إلى تابع عضوية حيث يمكن أن يكون لدينا C تابع عضوية لكل دخل. ولنفرض أن خرج تابع العضوية $\varphi_{dc}^T(X_d)$ حيث $d=1,2,\dots,D$ و $c=1,2,\dots,C$ و $\tau=1,2,3,\dots,T$ ، في الواقع إن مخارج تابع العضوية يمكن اعتبارها مقياساً للتشابه بين الدخل X_d وتابع العضوية ذو الترتيب c لكل صنف خرج معين τ . فإذا كانت متقاربة فإن الخرج $\varphi_{dc}^T(X_d)$ سوف يكون عالياً. أما إذا كان التطابق بين تابع العضوية ذو الترتيب c والدخل x_d قليلاً (متباعدة) فإن الخرج $\varphi_{dc}^T(X_d)$ سوف يكون منخفضاً.

الطبقة الثانية (طبقة القواعد):

في هذه الطبقة يتم ضرب مخارج توابع العضوية ببعضها البعض وفق نظام محدد كما يلي:
 إذا افترضنا أنه من أجل صنف خرج معين τ لكل بعد دخل C تابع عضوية فإذا بدأنا بـ $d=1$ فتكون توابع العضوية لها $\varphi_{1,1}^T, \varphi_{1,2}^T, \dots, \varphi_{1,c}^T$ ومن أجل $d=2$ تكون المتغيرات: $\varphi_{2,1}^T, \varphi_{2,2}^T, \dots, \varphi_{2,c}^T$.
 سنحتاج من أجل تشكيل دمج ثنائي للمتغيرات $\varphi_{1,i}^T$ حيث $i=1,2,\dots,C$ مع المتغيرات $\varphi_{1,j}^T$ حيث $j=1,2,\dots,C$ وذلك كما يلي: $\varphi_{1,1}^T \varphi_{1,1}^T, \varphi_{1,1}^T \varphi_{1,2}^T, \dots, \varphi_{1,1}^T \varphi_{1,c}^T, \varphi_{1,2}^T \varphi_{1,1}^T, \varphi_{1,2}^T \varphi_{1,2}^T, \dots, \varphi_{1,2}^T \varphi_{1,c}^T, \dots, \varphi_{1,c}^T \varphi_{1,1}^T, \varphi_{1,c}^T \varphi_{1,2}^T, \dots, \varphi_{1,c}^T \varphi_{1,c}^T$ ويكون المجموع الكلي c^2 حد. ثم من أجل $d=3$ سنحتاج لتشكيل الحدود التالية $\varphi_{3,1}^T, \varphi_{3,2}^T, \dots, \varphi_{3,c}^T$ وذلك من أجل كل النتائج المتشكلة عن طريق ربط بعدي الدخل 1 و 2 مع بعضهما البعض. وبالتالي سيكون مجموع الحدود c^3 حد. حيث ستكون الصيغة العامة: $\varphi_{1,i}^T \varphi_{2,j}^T \varphi_{3,k}^T$. وهذه الطريقة يمكن تعميمها من أجل جميع قيم d حتى الوصول إلى

قيمة $d=D$. وبالتالي سوف ينتج معنا c^D قاعدة لكل قيمة من قيم τ . وبالتالي سيصبح العدد الكلي للقواعد التي تم تشكيلها TC^D قاعدة.

سوف نرمز لكل قاعدة من القواعد بالرمز $\varphi_{1,i}^{\tau}, \varphi_{2,j}^{\tau}, \dots, \varphi_{d,k}^{\tau}$ وتكون بالتالي الصيغة العامة للقواعد

إن كل تابع خرج تم إنتاجه يكافئ بالأداء عملية الـ T-Norm الضبابية ويمثل إجراء عملية الإطلاق لهذه القاعدة.

الطبقة الثالثة (طبقة المعيارية) (Normalized layer):

في هذه الطبقة يتم حساب معدل عمليات الإطلاق بالنسبة لمجموع عمليات الإطلاق الكلية [11]، وبمعنى آخر تقوم هذه الطبقة بحساب المخارج التي تم إجراء عمليات المعيرة (الضبط المعياري) لها في طبقة القواعد.

$$\bar{\varphi}_r^{\tau} = \frac{\varphi_r^{\tau}}{\sum_{r=1}^R \varphi_r^{\tau}} \quad (1)$$

نلاحظ أن الطبقات من 1 حتى 3 هي نفسها في الموجودة في معمارية الـ ANFIS التقليدية، إلا في حالة إذا قمنا بفصل كل صنف من أصناف الخرج. نلاحظ أيضاً أن $\bar{\varphi}_r \in [0,1]$ والذي يرمز إلى القيمة التي تم تطبيعها للقاعدة التي تقابل الدخل ذو الترتيب d مع تابع العضوية ذو الترتيب c .

الطبقة الرابعة (طبقة تصحيح الخطأ):

تستخدم هذه الطبقة من أجل المعايرة والضبط للخرج في الطبقة الثالثة وذلك باستخدام التابع اللوجستي (logistic function).

$$\bar{\omega}(\bar{\varphi}_r, \gamma_r) = \frac{2}{1 + \exp(-(1-\gamma_r)(\bar{\varphi}_r - 1))} \quad (2)$$

حيث $\gamma \in R$ هو بارامتر قابل للضبط. وبالتالي فإن التابع اللوجستي هو من التوابع التي يمكن ضبط معامل انحداره γ . إن الخرج لهذه الطبقة هو: $\pi_r = \bar{\omega}(\bar{\varphi}_r, \gamma_r)$

بشكل عام قد تحتوي مخارج عقدة القاعدة الضبابية (في الطبقة 3) في بنية الـ ANFIS على تناقضات وتداخلات وتضاربات والتي قد تنتج عن الضجيج في قاعدة بيانات التدريب أو مجموعة غير واضحة المعالم من مجموعات الخرج المختلفة، إن طبقة تصحيح الخطأ المقترحة (الطبقة الرابعة) تقترح وتقدم طريقة واحدة لحل هذه المشاكل وبالتالي تصبح هذه الطبقة فعالة إذا كان خرج النظام العصبي-الضبابي ضبابياً، فمثلاً إذا كان لدينا قاعدتين ضبابيتين تطلقان لنفس الخرج، في هذه الحالة فإنه سيكون من الصعب تمييز الفعالية للقواعد وبالتالي باستخدام هذه الطبقة سنكون قادرين على تمييز فعالية القواعد، وبالمقابل فإن هذه الطبقة غير مطلوبة إذا كانت جميع القواعد سوف تطلق لمخارج سهلة التمييز عن بعضها وواضحة.

ويمكن فهم مبدأ عمل هذه الطبقة كما يلي:

- 1- إذا كانت درجة التشابه $\bar{\varphi}_r$ قريبة من 1 وكانت $\bar{\omega}(\bar{\varphi}_r, \gamma_r)$ عالية وبالتالي فإن الخرج π_r سيكون عالياً .
- 2- إذا كانت درجة التشابه $\bar{\varphi}_r$ قريبة من 0 وكانت $\bar{\omega}(\bar{\varphi}_r, \gamma_r)$ صغيرة عندها فإن الخرج π_r سيبقى عالياً وذلك بسبب أنه يمكن أن يعتقد بأنه حالة نادرة عندما يكون هناك عدد قليل جداً من العينات التي لها هذه الحالة .

3- إذا كانت درجة التشابه $\bar{\theta}_r$ قريبة من 0.5 وكانت $\bar{\omega}(\bar{\theta}_r, \gamma_r)$ صغيرة عندها فإن الخرج π_r سيكون منخفضاً وذلك بسبب أن القاعدة الضبابية تملك $\bar{\omega}(\bar{\theta}_r, \gamma_r)$ منخفضة والذي يعني أنها تساهم بالعديد من الأخطاء أثناء عملية التدريب . وبالتالي فإن الخرج الذي ينتج عن هذه القاعدة يكون غير جدير بالثقة (غير موثوق) . وبالتالي فإن الخرج π_r سيكون أقل وفقاً لهذه الحالة.

4- إذا كانت درجة التشابه $\bar{\theta}_r$ قريبة من 0.5 وكانت $\bar{\omega}(\bar{\theta}_r, \gamma_r)$ عالية وبالتالي فإن الخرج π_r سيكون متوسطاً . إذا كانت $\bar{\omega}(\bar{\theta}_r, \gamma_r)$ عالية فإنها لن تجري أي تخفيض للخرج π_r .
يمكن تمثيل القواعد في الطبقة كما يلي :

Rule r : If x1 is $\varphi_{2,c}^{\tau}$ and x2 is $\varphi_{d,c}^{\tau}$ andand xd is $\varphi_{d,c}^{\tau}$ then $\pi_r = \bar{\omega}(\bar{\theta}_r, \gamma_r)$
 $\varphi_{1,c}^{\tau}$

الطبقة الخامسة (طبقة معايرة) (Normalized layer):

تقوم هذه الطبقة بتطبيع خرج الطبقة الرابعة حيث:

$$\bar{\pi}_r = \frac{\pi_r}{\sum_{r=1}^R \pi_r} \quad (3)$$

إن خرج هذه الطبقة يتم معيرته لتصبح قيمته تقع بين 0 و 1 .

الطبقة السادسة (طبقة الخرج):

يمكن لطبقة الخرج قبول صيغتين ممكنتين، الخرج ذو الترتيب الصفري ومخطط الـ TSK على الترتيب.

من أجل الخرج المتواصل سوف نفترض أن $\tau=1$ ، وهكذا فإن حالة الخرج المستمر سوف تعتبر حالة خاصة من الحالة العامة الأكثر انتشاراً وهي حالة الخرج المتقطع .

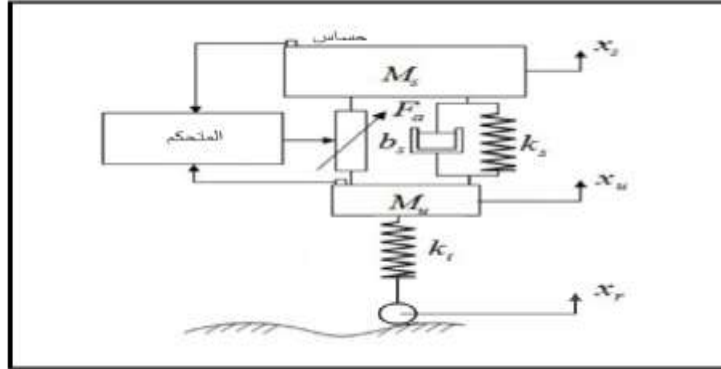
إن البارامترات القابلة للضبط لهذه المعمارية هي γ_r حيث $r=1,2,\dots,R$ و ω_r حيث $r=1,2,\dots,R$ في حالة تابع الخرج عبارة عن تجميع خطي للمداخل وبالإضافة إلى α_{rd} و α_{r0} حيث $r=1,2,\dots,R$ ، و $d=1,2,\dots,D$ في حالة آلية الخرج TSK. علاوة على ذلك فهناك بارامترات مرتبطة مع تابع العضوية كذلك، وهذا يعتمد على تابع العضوية المستخدم. كمثال على ذلك إذا قمنا باستخدام تابع العضوية الغوسي وبالتالي سيكون هناك بارامترين مرتبطين بكل تابع عضوية، ومن ناحية أخرى إذا استخدمنا تابع العضوية المتثلثي فسيكون هناك ثلاثة بارامترات مرتبطة بكل تابع عضوية.

النتائج والمناقشة:

1 النموذج الرياضي المستخدم :

تم تطبيق المتحكم على نموذج رياضي لربع المركبة quarter car model الذي يتألف من الكتلة العلوية Ms التي تمثل كتلة المركبة (الكتلة المخمدة) والكتلة السفلية Mu التي تمثل كتلة العجلة (الكتلة غير المخمدة) وكذلك الأجزاء التي تربط بين هاتين الكتلتين [12,13]، يتم تمثيل الحركة الشاقولية للنظام بالإزاحة xs ، والإزاحة xu أما الإثارة الناتجة عن الطريق التي تمثل الضجيج في النظام فيتم تمثيلها من خلال Xr ، يرمز لثابت التخميد لنظام

التعليق بالرمز k_s ، ويرمز لمعامل التخميد بالرمز bs ، ويرمز لثابت تخميد العجلات بالرمز kt ويوضح الشكل (4) نموذج التعليق لربع المركبة .



الشكل (4) نموذج التعليق لربع مركبة

ويوضح الجدول التالي قيم بارامترات النموذج الرياضي المستخدم:

الجدول (1) بارامترات النموذج الرياضي

البارامتر	الرمز	القيمة	الوحدة
كتلة جسم المركبة	Ms	240	kg
كتلة العجلة	Mu	36	kg
ثابت صلابة التعليق	ks	16	kN/m
معامل التخميد	bs	980	Ns/m
ثابت صلابة العجلة	kt	160	KN/m

ويتطبيق قانون نيوتن الثاني تعطى معادلات الحركة للكتل المخمدة وغير المخمدة لنموذج ربع المركبة بالشكل

الموضح كما يلي [8]:

$$M_s \ddot{x}_s + k_s (x_s - x_u) + F_a = 0 \quad (4)$$

$$M_u \ddot{x}_u + k_s (x_s - x_u) + k_t (x_u - x_r) - F_a = 0 \quad (5)$$

حيث F_a قوة التحكم الناتجة عن المشغل الهيدروليكي ويمكن تلخيص المعادلات باستخدام المصفوفات التالية:

$$x = [x_s \quad x_u \quad \dot{x}_s \quad \dot{x}_u]^T$$

تكتب معادلة فضاء الحالة التي تعبر عن نظام التعليق كمايلي:

$$\dot{x} = Ax + BF_a + Dx_r \quad (6)$$

وتكتب مصفوفات فضاء الحالة كمايلي [7]:

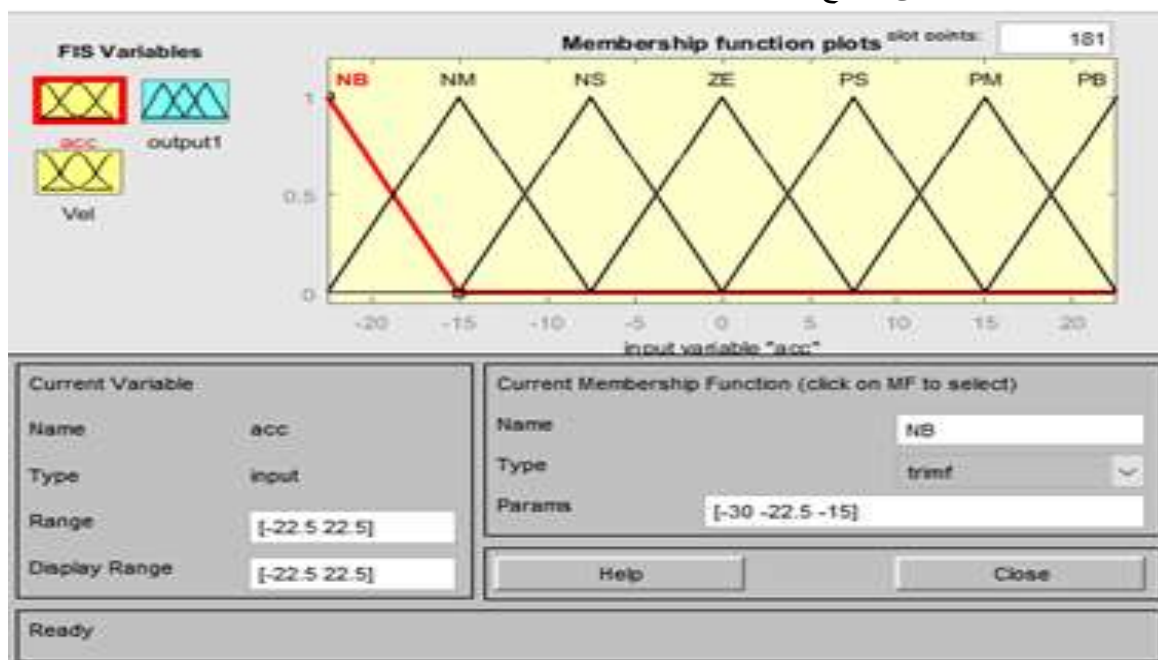
$$D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{k_t}{M_u} \\ 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{M_u} \\ \frac{1}{M_s} \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{(k_s + k_t)}{M_u} & \frac{k_s}{M_u} & -\frac{b_s}{M_u} & \frac{b_s}{M_u} \\ \frac{k_s}{M_s} & -\frac{k_s}{M_s} & \frac{b_s}{M_s} & -\frac{b_s}{M_s} \end{bmatrix}$$

أما معادلة الخرج فتكتب باستخدام المصفوفة C كما يلي: $Y=Cz$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

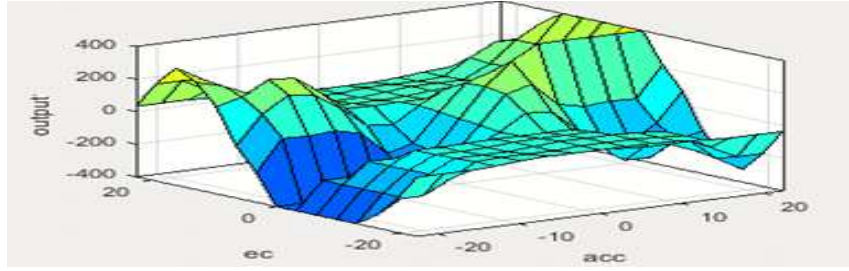
4-2 بناء وحدة تحكم ضبابية للنموذج الرياضي لنظام التعليق:

إن الخطوة الأساسية والأكثر أهمية في تصميم المتحكمات الضبابية هي اختيار قواعد ضبابية مناسبة وكذلك توابع عضوية مناسبة للدخل والخرج ، ويعتمد تحقيق ذلك على الخبرة والمعرفة لدى المصمم [1]، في نظام التعليق الذي يتم تطبيقه سيتم أخذ تسارع الاهتزاز (Acc) وكذلك السرعة (velocity) كمدخل النظام وبالتالي سيكون لدينا مدخلين لنظام الاستدلال الضبابي وخرج وحيد ، سيتم اختيار توابع العضوية ذات الشكل المثلي (تجريبياً) والشكل (5) يوضح توابع العضوية المثلية لأحد المداخل حيث تم تحديد مراكز توابع العضوية بالاعتماد على الخبرة التجريبية وإعادة ضبط المراكز بالاعتماد على النتائج.



الشكل (5) توابع العضوية المثلية الشكلية للمتحكم الضبابي

نلاحظ أنه لدينا 49 قاعدة ضبابية من النوع " If x is a and y is b then z is c " لكل مدخل وبالتالي نكون قد حصلنا على نظام الاستدلال الضبابي، وباعتبار أنه لا يوجد طريقة قياسية لاختيار توابع العضوية وقواعد التحكم تكمن فائدة استخدام نظام EANFIS كونه لديه القدرة على تشكيل القواعد وتوابع العضوية المناسبة بشكل أنوماتيكي بالاعتماد على بيانات الدخل المستخدمة في التدريب ويوضح الشكل (6) سطح القواعد الضبابية الناتجة.



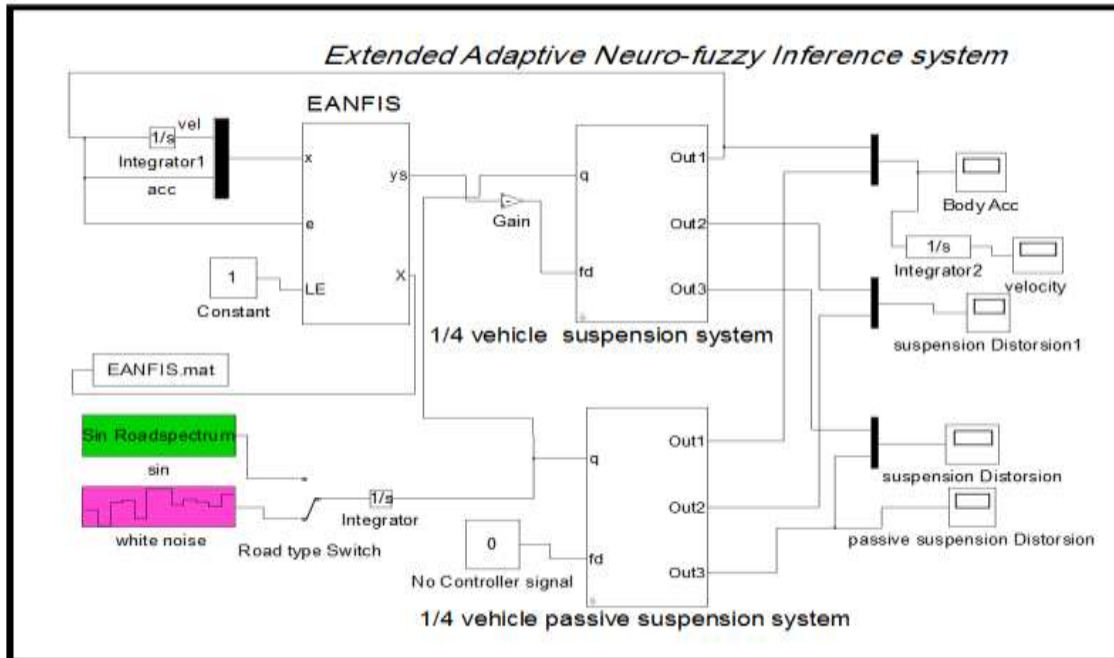
الشكل (6) سطح القواعد الضبابية

3 بناء وحدة تحكم الـ EANFIS:

يعتمد تصميم المتحكم العصبي الضبابي المتكيف الموسع على طريقة العنقدة الجبلية الذاتية التنظيم (self-organizing mountain clustering method) [6] التي تتيح لنا إيجاد شكل تابع العضوية المطلوب وعدد نوابع العضوية التي سيتم تشكيلها وعدم توليد عدد كبير من نوابع العضوية أي عدم توليد كافة نوابع العضوية الممكنة بل فقط نوابع العضوية المطلوبة مما يؤدي إلى زيادة سرعة المتحكم ودقة أكبر في اتخاذ القرار.

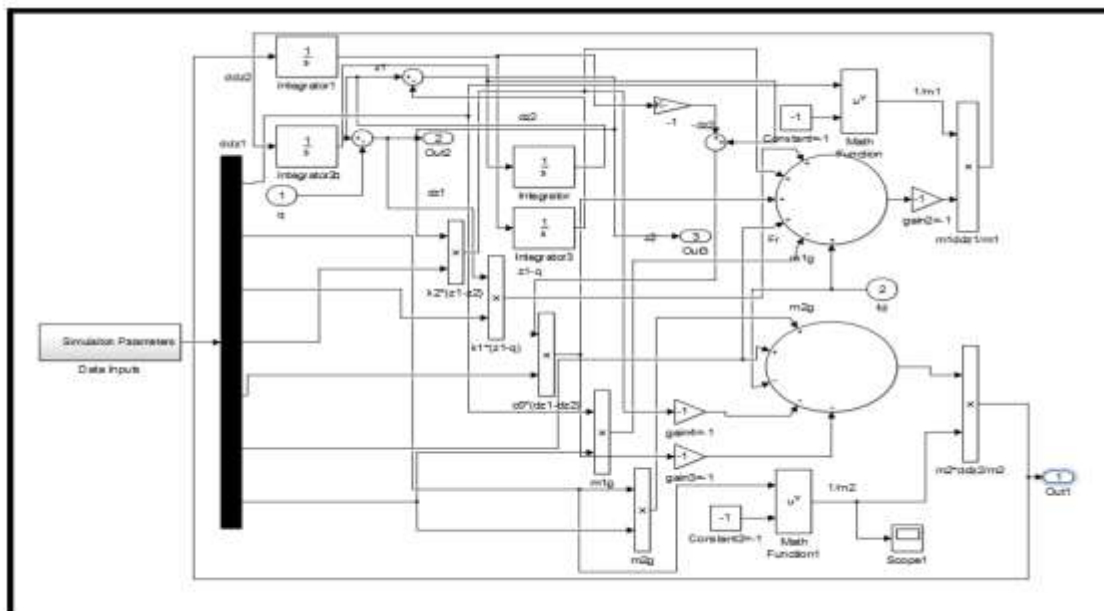
تم بناء المتحكم على شكل S-Function في بيئة الـ Matlab Simulink ونلاحظ أن دخل وحدة التحكم هي تسارع حركة النموذج الرياضي الناتج عن الاهتزاز (acceleration) وسرعة الاهتزاز (Velocity) وتم ادخال قيمة الإزاحة (Displacement) الناتجة كخطأ التدريب وتدريب المتحكم لتقليل قيمة هذا الخطأ إلى الحد الأدنى،

الشكل (7) يوضح المتحكم العصبي الضبابي الموسع في بيئة الـ MATLAB Simulink حيث يتضمن الشكل وجود وحدتي Sub system تحتوي كل منهما النموذج الرياضي لربع المركبة وقد تم إيصال الأولى بوحدة التحكم بينما لم يتم إيصال الثانية وذلك للمقارنة مع أداء النموذج من النوع الخامل Passive (حلقة مفتوحة) بحيث تم توصيل كلا الوحدتين إلى نوعين من الإشارات كدخل اضطراب.



الشكل (7) نموذج لربع المركبة مع وبدون وحدة التحكم EANFIS

يوضح الشكل (8) البنية الداخلية الـ Sub-System التي تتضمن نموذج ربع المركبة وهي ذات دخلين الأول هو إشارة التحكم والثاني هو دخل الاضطراب ولها ثلاث مخارج الأول هو خرج التسارع للمركبة والثاني هو خرج الإزاحة أما الثالث فهو الحمل المطبق على العجلات .



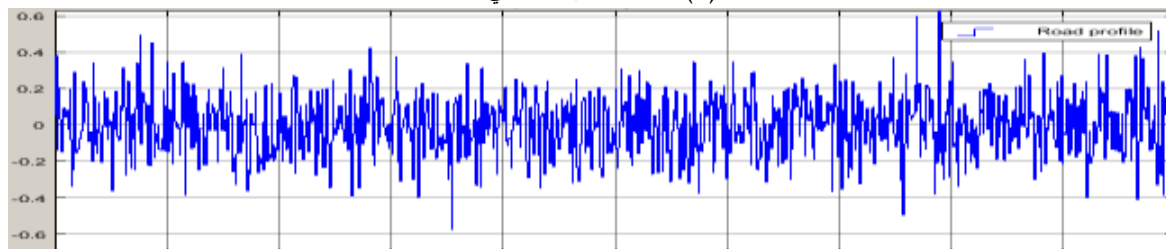
الشكل (8) البنية الداخلية لنموذج ربع المركبة

4 إشارات الاضطراب المدخلة (Road profiles):

تم استخدام نوعين من إشارات الاضطراب من أجل اختبار أداء المتحكم واستجابة النموذج، الأول هو إشارة من النوع الجيبي والثاني إشارة عشوائية.



الشكل (9) دخل الاضطراب الجيبي

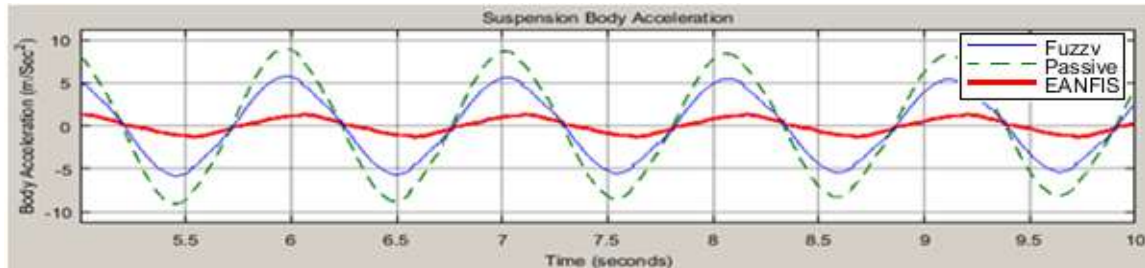


الشكل (10) دخل الاضطراب العشوائي

5 خرج المتحكم والمقارنة:

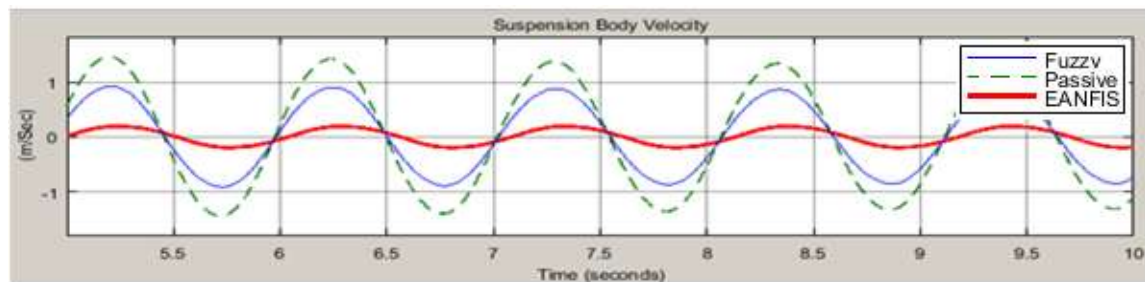
تم مقارنة أداء المتحكم EANFIS مع المتحكم الضبابي ومع النموذج الرياضي ذو الحلقة المفتوحة Passive. تم تحليل خرج النموذج الرياضي بدون وجود متحكم أي من النمط الخامل Passive وكذلك الخرج بوجود كل من

المتحكم الضبابي والمتحكم EANFIS والمعبر عن تسارع اهتزاز المركبة Acceleration وذلك عند تطبيق اضطراب من النوع الجيبي ونلاحظ تفوق المتحكم EANFIS من ناحية التقليل من تسارع الاهتزاز على المتحكم الضبابي وذلك لقدرة متحكم EANFIS على التكيف السريع مع الدخل المعطى وتعديل شكل ونوع تابع العضوية بشكل مناسب لتغيرات الدخل على عكس المتحكم الضبابي الذي يتقيد أداءه بنوع تابع العضوية الذي تم اختياره (في مثالنا) تابع العضوية المثلي.



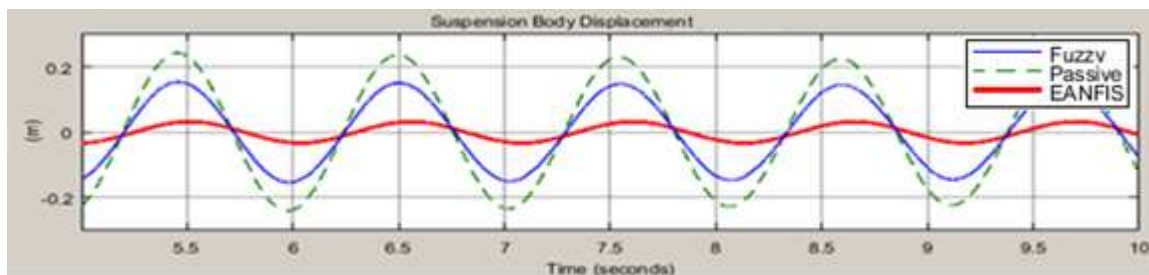
الشكل (11) خرج تسارع الاهتزاز للمركبة الناتج عن الاضطراب الجيبي

أما دراسة سرعة الاهتزاز للمركبة عند تطبيق Road Profile من النوع الجيبي فقد أظهرت تخميدياً جيداً لسرعة الاهتزاز في حالتها المتحكم الضبابي ومتحكم EANFIS عن سرعة الاهتزاز في حالة الحلقة المفتوحة.



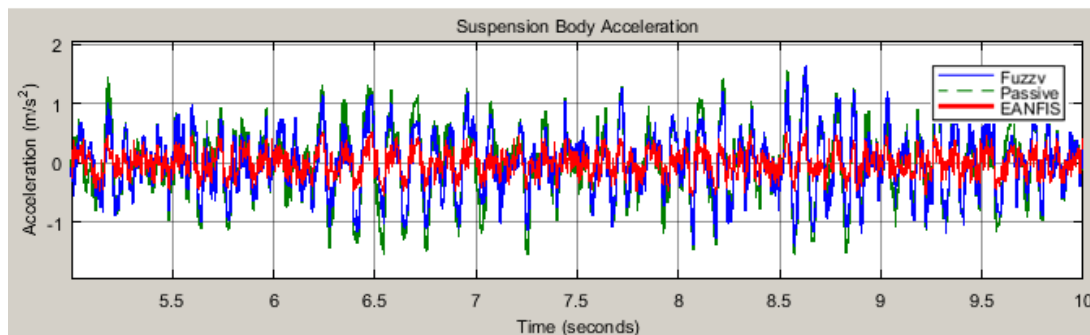
الشكل (12) خرج سرعة الاهتزاز للمركبة الناتج عن الاضطراب الجيبي

أنا عند تحليل إزاحات جسم المركبة ارتفاعاً وانخفاضاً عن مستوى الاستواء الطبيعي عند تطبيق اضطراب من النوع الجيبي فنلاحظ أن المتحكم من النوع EANFIS ساعد في تقليل إزاحات جسم المركبة وأدى إلى استقرار أكبر في حركتها بالمقارنة مع المتحكم الضبابي حيث قام متحكم EANFIS بتخفيض سرعة الاهتزاز بنسبة 75% بينما خفض المتحكم الضبابي سرعة الاهتزاز بحوالي 30% في وكذلك بالمقارنة مع عدم وجود وحدة تحكم (حلقة مفتوحة).



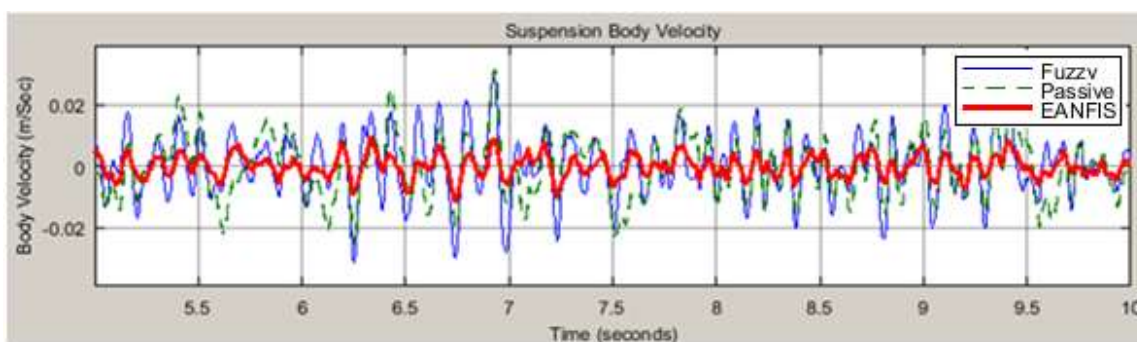
الشكل (13) خرج الإزاحة للمركبة الناتج عن الاضطراب الجيبي

وعند تحليل تسارع حركة الاهتزاز لجسم المركبة عند تطبيق اضطراب من النوع العشوائي نلاحظ أداء أن المتحكم EANFIS ساعد في تخفيض تسارع الاهتزاز بنسبة 35% وكذلك أظهر المتحكم الضبابي قدرة على تخفيض التسارع بنسبة 20% وهو ما يساعد في تحقيق ثبات أكبر للمركبة واستواء جيد.



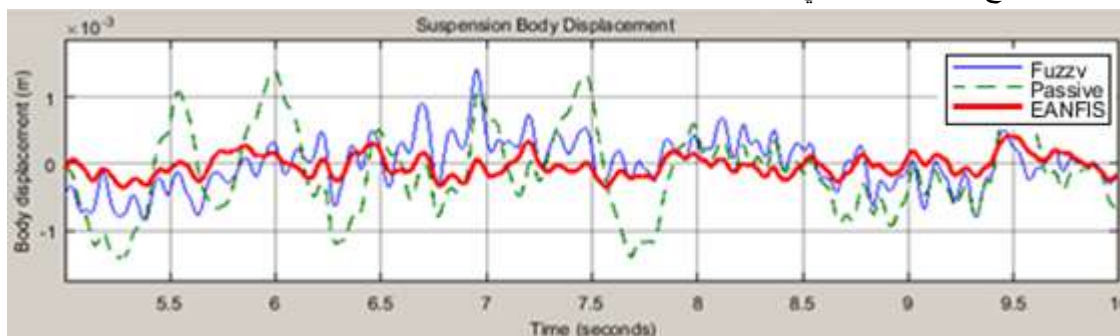
الشكل (14) خرج تسارع الاهتزاز للمركبة الناتج عن الاضطراب العشوائي

أظهر تحليل سرعة الاهتزاز لجسم المركبة عند تطبيق اضطراب من النوع العشوائي أداء جيد للمتحكم حيث خفض أيضاً المتحكم EANFIS من سرعة الاهتزاز للمركبة بشكل مقبول بينما خفضها المتحكم الضبابي بشكل قليل.



الشكل (15) خرج سرعة الاهتزاز للمركبة الناتج عن الاضطراب العشوائي

أما عند تحليل إزاحة جسم المركبة عند تطبيق اضطراب من النوع العشوائي نلاحظ وجود تخفيض كبير في الإزاحات لجسم المركبة في حالة استخدام متحكم EANFIS حيث يعبر تناقص مطال الإشارة على انخفاض حدة الاهتزازات في جسم المركبة الناتج عن امتصاص نظام التعليق لهذه الاهتزازات وهنا يلعب المتحكم الدور الأكبر من خلال إعطائه لإشارات تحكم تتناسب مع الدخل المعطى حيث نلاحظ أن المتحكم الضبابي أيضاً أظهر قدرة على تخفيض مطال الانزياح عما كان عليه في حالة الحلقة المفتوحة.



الشكل (16) خرج الإزاحة للمركبة الناتج عن الاضطراب العشوائي

الاستنتاجات والتوصيات:

- تم تطبيق كلا المتحكمين العصبي الضبابي المتكيف الموسع (EANFIS) والمتحكم الضبابي واستخدامهما على نموذج رياضي لربع مركبة.
- من خلال النتائج السابقة أظهر متحكم EANFIS قدرة جيدة على تخفيض تسارع الاهتزاز للمركبة حيث نلاحظ أنه خفض التسارع في حالة الاضطراب الجيبي بنسبة كبيرة وتفوق على المتحكم الضبابي الذي أظهر أداء جيد في حالة الاضطراب الجيبي كما أظهر المتحكم EANFIS أداء مقبول في حالة الاضطراب العشوائي وعلى الرغم من أنها إشارة ذات تردد عالي فمزال المتحكم قادر على العمل مع تغيرات سريعة وكبيرة في الدخل.
- ساهم متحكم EANFIS أيضاً في تقليل سرعة الاهتزاز للمركبة بشكل كبير في حالة الاضطراب الجيبي وأظهر قدرة جيدة تخميد سرعة الاهتزاز في حالة الاضطراب العشوائي وأيضاً تفوق على المتحكم الضبابي الذي خفض الاهتزاز بنسبة لا بأس بها.
- تفوق متحكم EANFIS على المتحكم الضبابي في تقليل الإزاحات في حالة الاضطراب الجيبي.
- إن تفوق المتحكم EANFIS على المتحكم الضبابي في تخميد كل من إزاحات المركبة وسرعة وتسارع الاهتزاز يعود لقدرته على التكيف مع الدخل المعطى وتعديل شكل ونوع وهوامش تابع العضوية بشكل متناسب مع تغيرات الدخل بينما يتقيد أداء المتحكم الضبابي بنوع تابع العضوية المعطى وبالتالي لن يكون قادراً على التكيف الدائم مع الدخل ولا بد من إعادة تجريب نوع آخر من التوابع بالاعتماد على النتائج حتى الوصول إلى أداء مقبول.

التوصيات:

- 1 - يعد النموذج الرياضي لربع المركبة نموذجاً بسيطاً نسبياً ولا يحاكي كامل الحركات التي تتعرض لها المركبة حيث يتطلب التصميم العملي له وجود وحدة تحكم لكل جزء من أجزاء المركبة وإن اختبار النموذج الرياضي لربع المركبة عملياً لن يعطي النتيجة المرضية من حيث الاتزان كون وحدة التحكم لن تتمكن من دراسة كامل حركات الارتداد لباقي أجزاء المركبة وخصوصاً عن الإقلاع والفرملة والذي يتطلب دراسة أثر الارتداد على الربع المقابل أيضاً لذلك يجب العمل على اختبار وحدة التحكم ذات نظام الاستدلال العصبي الضبابي المتكيف الموسع على النموذج الرياضي لنصف المركبة وتحليل أداء المتحكم مع درجات حرية أكبر وعلى أكثر من نوع من الاضطرابات.
- 2 - اختبار وحدة التحكم ذات نظام الاستدلال العصبي الضبابي المتكيف الموسع على النموذج الرياضي لكامل المركبة وذلك لتحليل أداء المتحكم مع الأنظمة اللاخطية العالية التعقيد واختبار قدرة المتحكم على توليد توابع عضوية مناسبة بازدياد عدد المداخل وزيادة تعقيد الأداء اللاخطي للنظام.
- 3 - اختبار المتحكم وتطبيقه على أنظمة أخرى خارج مجال التعليق للمركبات وتحليل أداءه.
- 4 - مقارنة أداء المتحكم مع المتحكمات الأخرى المستخدمة في نفس المجال كالمحكم من نوع PID

و.EPID

المراجع:

- [1]- FARD, H., SAMADI, F. *Active Suspension System Control Using Adaptive Neuro Fuzzy (ANFIS) Controller*, International Journal of Engineering, Vol.28, No.3, 2015, 396-401.
- [2]- WEIHUA, LI., HAIPING, D. *An adaptive Neuro fuzzy hybrid control strategy for a semi active suspension with magneto rheological damper*. Hindawi Publishing Corporation. Vol. 3, No.4, 2014, 71-82.
- [3]- HEIDARI, M., HOMAELI, H. *Design a PID Controller for Suspension System by Back Propagation Neural Network*. Journal of Engineering. Vol.13, No.1, 2013, 1-9.
- [4]- QAMAR, SH., KHAN, L., SAIMA A. *Adaptive B-Spline Based Neuro-Fuzzy Control for Full Car Active Suspension System*, Middle-East Journal of Scientific Research. Vol.16, No.10, 2013, 1348-1360.
- [5]- AFZAL, U., FARRUKH, KH., FIAZ, M. *Optimization of Semi-Active Suspension System Using Particle Swarm Optimization Algorithm*, AASRI Conference on Intelligent Systems and Control. Vol.4, No.1, 2013, 160-166.
- [6]- PRATAMA, M. RAJAB, S. *Extended Approach of ANFIS in Cascade Control*, PhD thesis, International Journal of Computer and Electrical. Vol. 3, No.4, 2011, 572-576.
- [7]- TURKAY, S., AKCAY, H. *A Study of Random Vibration Characteristics of the Quarter-car Model*, J. Sound Vib. vol. 282, No.2, 2009, 111-124.
- [8]- CHIOU, J., LIU, M.T. *Using Fuzzy Logic Controller And Evolutionary Genetic Algorithm For Automotive Active Suspension System*, Int. J. Automot. Technol., vol. 10, No.1, 2009, 703-710.
- [9]- QAZI, A., KHAN, A., KHAN, M., NOOR, S. *A Parametric Study on Performance of Semi-Active Suspension System with Variable Damping Coefficient Limit*, AASRI Conference on Intelligent Systems and Control, Vol. 4, No.1, 2013, 154 – 159.
- [10]- MISTRY, G., VAGHELA, M. *Development Of Active Suspension System For Car Using Fuzzy Logic Controller, PID & Genetically Optimize PID Controller*, Journal Of Information, Knowledge And Research In Electrical Engineering, Vol.2, No.2, 2013, 347-351.
- [11]- TANG, C., ZHAO, G. ZHANG, Y. *The Application of Fuzzy Control Algorithm of Vehicle with Active Suspensions*, Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. Vol. 4, No.16, 2012, 2744-2747.
- [12]- AGHARKAKLI, A., SABET, G., BAROUZ, A. *Simulation and Analysis of Passive and Active Suspension System Using Quarter Car Model for Different Road Profile*, International Journal of Engineering Trends and Technology, Vol.3, No.5, 2012, 636-644.
- [13]- CREED, N., KAHAWATTE, S. *Design of an LQR Control Strategy for Implementation on a Vehicular Active Suspension System*. Vol. 2, No.2, 2010, 1-29.