

## تصميم نظام تعليق نصف فعال باستخدام المتحكم الضبابي ذاتي التنظيم

الدكتور محمد خنيسي\*

الدكتور محسن داوود\*\*

محمود منى\*\*\*

(تاريخ الإيداع 22 / 10 / 2014. قُبل للنشر في 26 / 3 / 2015)

### □ ملخص □

إن من وظائف نظام التعليق في السيارة عزل الاهتزازات الناتجة بسبب وعورة الطريق عن السائق وتأمين قيادة مريحة. ولكن تصميم أنظمة التحكم لأنظمة التعليق نصف الفعالة أمر صعب بسبب اللاخطية التي تديها العناصر المكونة لهذه الأنظمة مما جعل الدراسات المرتبطة بها تتسم بالتعقيد. لذلك وفي سبيل تحسين أداء أنظمة التعليق نصف الفعالة دون تكلف عناء تصميم متحكم يعتمد على النموذج مباشرة تم تصميم نظام تحكم باستخدام المتحكم الضبابي ذاتي التنظيم بالاعتماد على مبدأ التأخير في الجزء للتحكم بنظام تعليق نصف فعال يستخدم المخدمات المغناطيسية الريولوجية. إذ يقوم المتحكم بمحاولة تحسين أداء النظام بناء على الاستجابة المرغوبة الموصوفة في جدول الجزء. يستخدم المتحكم الضبابي متغيرين كدخل للمتحكم وهما سرعة الكتلة المعلقة وسرعة الكتلة غير المعلقة. باستخدام نموذج ربع سيارة بدرجتي حرية تمت نمذجة ومحاكاة النظام في بيئة<sup>®</sup> MATLAB & Simulink، وتمت مقارنة النتائج مع استراتيجية sky-hook الواسعة الاستخدام، حيث أظهرت المحاكاة قدرة المتحكم الضبابي ذاتي التنظيم على تقديم نتائج جيدفي التقليل من تسارع الكتلة المعلقة في نماذج الطرق المتنوعة بالمقارنة مع استراتيجية sky-hook.

**الكلمات المفتاحية:** تحكم ضبابي، نظام تعليق، نصف فعال، تحكم تكيفي، تنظيم ذاتي، التأخير في الجزء.

\*أستاذ مساعد - قسم هندسة الميكاترونك - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

\*\*أستاذ - قسم هندسة الميكاترونك - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

\*\*\*طالب دراسات عليا (ماجستير) - قسم هندسة الميكاترونك - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين، سورية.

## Design of a semi-active suspension system using self-organizing fuzzy controller

Dr. Mohammed Khnissi\*  
Dr. Mohsen Dawood\*\*  
Mahmood Mona\*\*\*

(Received 22 / 10 / 2014. Accepted 26 / 3 / 2015)

### □ ABSTRACT □

One of a car's suspension system functions is to isolate vibrations resulting from road on the driver and ensure a comfortable ride. But the design of control systems for semi-active suspension systems is difficult because of the non-linearity of the constituent elements of these systems which make the researches related to it characterized by complexity. So in order to improve the performance of semi-active suspension systems without bearing the effort of designing a model based controller, a control system is designed using self-organizing fuzzy controller based on the principle of delay-in-penalty to control a semi-active suspension system which uses a magneto rheological damper. The controller tries to enhance system performance using the desired response as it is described in the penalty table. The fuzzy logic controller is based on two inputs namely sprung mass velocity and unsprung mass velocity. Using a quarter car model with 2 degree-of-freedom the system is modeled and simulated in MATLAB & Simulink® and the results are compared to the widely used sky-hook strategy. The simulation showed the ability of the self-organizing fuzzy controller to provide good results in minimizing sprung mass acceleration in various road profiles compared to sky-hook strategy.

**Keywords:** Fuzzy control, suspension system, semi-active, sky-hook, adaptive control, self-organizing, delay-in-penalty.

---

\*Associate Professor, Department of Mechatronics Engineering, Faculty of mechanical and electrical engineering, Tishreen University, Syria.

\*\*Professor, Department of Mechatronics Engineering, Faculty of mechanical and electrical engineering, Tishreen University.

\*\*\*Postgraduate student, Department of Mechatronics Engineering, Faculty of mechanical and electrical engineering, Tishreen University, Syria.

**مقدمة:**

تعد أنظمة التعليق (Suspension Systems) من أهم الأنظمة المكونة للسيارات والتي تحوز اهتمام مهندسي السيارات، يعرّف نظام التعليق بأنه النظام المكون من ماص الصدمات (Shock Absorber) والنوابض (Springs) والوصلات (Links) التي تربط الآلية بعجلاتها، ويسمح بالحركة النسبية بين العجلات وجسم الآلية، بحيث تقوم العجلات من خلاله بدفع الآلية وتوجيهها وإيقافها.

في الدراسة التقليدية لديناميكية السيارة، يوجد نقطتا اهتمام أساسيتان هما: القيادة الآمنة (Ride Safety)، والقيادة المريحة (Ride Comfort). تركز القيادة الآمنة على استقرار السيارة وإمكانية التحكم بها من قبل السائق أثناء حالات الانعطاف. أما القيادة المريحة فتركز على جودة عزل ركاب السيارة عن الاهتزازات الخارجية المتولدة من المطبات ومن وعورة الطريق [1]، وعزل الاهتزازات المحرصة الناتجة عن الطريق عن جسم الآلية [2].

يمكن تصنيف أنظمة التعليق وظيفياً كما يلي:

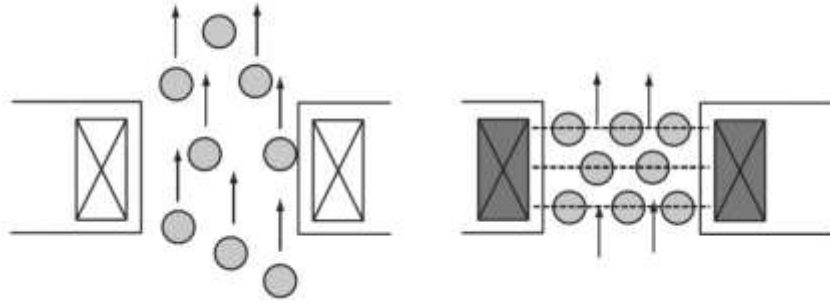
1- خاملة (Passive).

2- فعالة (Active).

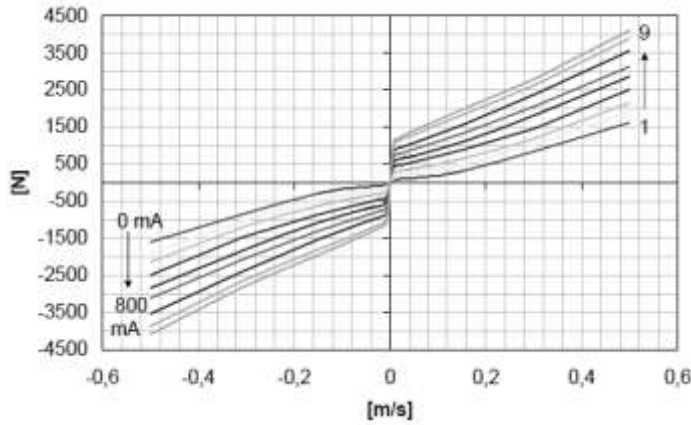
3- نصف فعالة (Semi-active)، وتسمى أيضاً تكيفية (Adaptive).

يتكون نظام التعليق الخامل من نوابض ومخمدات (Dampers) فقط، وتقوم فقط بتبديد الطاقة بشكل ثابت. أما في أنظمة التعليق الفعالة يتم استبدال النابض والمخمد (أو يتم دعمهما) بمشغل هيدروليكي (Hydraulic-Actuator) أو بمحرك كهربائي خطي (Linear Electric Motor)، والذي يقوم بالمحافظة على ثبات جسم السيارة. أما الأنظمة نصف الفعالة فتتكون من نوابض ومخمدات، إلا أن المخمدات في هذه الأنظمة تمتلك عامل تخميد متغير ويتم التحكم بعامل تخميدها في حلقة تحكم مغلقة، وذلك يتم بشكل تفاعلي مع عدة متغيرات وفقاً لخوارزمية التحكم. حيث يتم استخدام عدة أنواع من المخمدات منها المخمدات الكهربية الريولوجية (Electro Rheological ER) أو المغناطيسية الريولوجية (Magneto Rheological MR) أو المخمدات ذات الفوهة المتغيرة. بطبيعة الحال، إن أداء النظام نصف الفعال يتخلف عن أداء الأنظمة الفعالة، إلا أنه أقل تكلفة بشكل كبير، بحيث أنه يقدم 50% من أداء النظام الفعال بما يقدر بـ 5% من تكلفته، مما يجعله ذو جدوى اقتصادية مرتفعة.

تستخدم المخمدات المغناطيسية الريولوجية موائع ذات لزوجة متغيرة بتغير الظروف الفيزيائية المحيطة، إذ إنه كلما ازدادت لزوجة المائع كلما كانت قوة التخميد المولدة أكبر، يتم تشكيل المواد المغناطيسية الريولوجية عن طريق تعليق حبيبات ميكروية في مائع ذي لزوجة منخفضة. وتُصنع هذه الحبيبات من مواد مغناطيسية، كالحديد اللين على سبيل المثال. عندما يتعرض المائع لحقل مغناطيسي تصطف هذه الحبيبات مع خطوط الحقل المغناطيسي المطبق، كما يظهر في الشكل (1)، هذا الاصطفاف في شكل متسلسل يعيق حركة المائع فتزداد الطاقة الميكانيكية اللازمة لإخضاع بنية المائع بزيادة قيمة الحقل المطبق. وكلما كانت قيمة الحقل أكبر كلما شكلت الحبيبات خطوطاً أكثر تماسكاً، الأمر الذي ينعكس على إجهاد الخضوع وبالتالي لزوجة المائع. أما عند عدم تطبيق حقل مغناطيسي فتتوضع هذه الحبيبات في المائع كيفما اتفق لتعود الصفات الميكانيكية للمائع الحامل للحبيبات هي الطاغية ليبيدي سلوكاً نيوتونياً [3].



الشكل (1): توضع الحبيبات الميكروية في المانع المغناطيسي الريولوجي: دون تطبيق حقل مغناطيسي (يسار)، مع تطبيق حقل مغناطيسي (يمين) [3].



الشكل (2): مميزات (السرعة - قوة التخميد) للمخمد المغناطيسي الريولوجي [8MR].

تتميز المخمدات المغناطيسية الريولوجية MR بأن القدرة المطلوبة للعمل منخفضة جداً (3 واط بشكل متوسط في كل صدمة)، وزمن استجابة قليل جداً، عادة ما يكون أقل من 2 ميلي ثانية. مما يعني أن للمخمد القدرة على أن يعدل قوة التخميد بمقدار 500 مرة في الثانية عند كل صدمة، يبين الشكل (2) الخصائص اللاخطية والتي هي مميزة (السرعة - القوة) للمخمد عند قيم تيار ثابتة متعددة.

لقد تم إنجاز العديد من الدراسات على أنظمة التعليق النصف فعالة والتي تستخدم غالباً المخمدات المغناطيسية الريولوجية وقد تم استخدام عدة استراتيجيات تحكم للتحكم بهذه المخمدات، ومنها (Skyhook)، (Ground hook) [4]، [5]، [6]، [7]،  $H_2/H_\infty$ ، المنظم التريبيعي الخطي [8] LQR، [9]، التحكم الضبابي [10].

ففي الورقة البحثية التي قدمها (Giua وآخرون 2004) [8] تم الاعتماد على نموذج فراغ الحالة لربع سيارة، ثم إنشاء قانون تحكم فعال باستخدام المنظم التريبيعي الخطي LQR، ومن ثم تقريب قوة نظام التعليق لتقليل الفرق بينها وبين القوة الناتجة عن القانون الفعال. تم تسجيل تحسين بنسبة 28.24% مقارنة بالأنظمة الخاملة. وفي البحث الذي قدمه (Khajavi, Abdullahi 2007) تم تصميم متحكم ضبابي للتحكم بمعامل التخميد بناءً على سرعة الكتلة المعلقة و السرعة النسبية. وكانت نسبة التحسين 10.5% مقارنة بالأنظمة الخاملة.

أما البحث الذي قدمته (Zeynep 2009) [11] تم استخدام التحكم الأمثل LQR لتصميم نظام تعليق نصف فعال باستخدام نموذج فراغ الحالة لسيارة كاملة. وتمت المحاكاة في المجال الزمني وتم إجراء تحليل للاستجابة الترددية. وتم تسجيل تحسين يقدر بـ 30.6% مقارنة بالأنظمة الخاملة.

تميزت الدراسات المرتبطة بأنظمة التعليق نصف الفعالة بالتعقيد في غالب الأحيان وكثير منها لم يستخدم نماذج تمثل اللاخطية والتخلفية التي تعاني منها المخمدات المغناطيسية الريولوجية. بل إن بعض الأبحاث اكتفى بالتحكم بمعامل تخميد خطي.

## أهمية البحث وأهدافه:

تأتي أهمية هذا البحث من أهمية تحسين أداء أنظمة التعليق نصف الفعالة في سيارات الركاب. إلا أن اللاخطية التي تديها المخمدات المغناطيسية الريولوجية المستخدمة في هذه الأنظمة جعلت تصميم أنظمة التحكم المناسبة أمراً صعباً. جعل البحث عن طرق تحكم جديدة غير تقليدية يكتسب أهمية كبيرة. ويعتبر المتحكم الضبابي ذاتي التنظيم من المتحكمات التكيفية القادرة على التعامل مع مشكلات اللاخطية لذلك تم الاعتماد عليه في هذا البحث. يهدف البحث إلى تصميم آلية تحكم بسيطة بنظام التعليق نصف الفعال، للحصول على نتائج جيدة من منظور راحة السائق. دون تكلف عناء تصميم متحكم معتمد على النموذج مباشرة، وذلك باستخدام المتحكم الضبابي ذاتي التنظيم.

## طرائق البحث ومواده:

تم في هذا البحث تصميم متحكم ضبابي ذاتي التنظيم مبني على مبدأ التأخير في الجزاء للتحكم بنظام تعليق نصف فعال باستخدام نموذج ربع سيارة، ونمذجة ومحاكاة النظام في بيئة المحاكاة Simulink®، لاختبار إمكانية المتحكم في تحسين أداء النظام، وسنقوم بمقارنة نتائج المحاكاة مع الاستراتيجية المشهورة في مجال التحكم بأنظمة التعليق نصف الفعالة وهي استراتيجية Sky-hook. وتقوم منهجية البحث على مايلي:

1. بناء نموذج نظام التعليق.
2. اعتماد نموذج مناسب للمخمد المغناطيسي الريولوجي وبنائه لاستخدامه مع نموذج نظام التعليق.
3. تصميم المتحكم الضبابي ذاتي التنظيم وملاءمته للعمل مع نظام التعليق نصف الفعال.
4. تصميم جدول جزاء مناسب انطلاقاً من الاستجابة المرغوبة للنظام بدلالة متغيري الدخل.
5. تدريب النظام (تفعيل التنظيم الذاتي) على نموذج طريق محدد يمثل عينة تدريب للنظام، لبناء جدول التحكم بواسطة آلية التعديل بالاعتماد على جدول الجزاء.
6. اختيار جدول التحكم الذي يعطي أفضل قيمة لمؤشر الأداء المدروس (راحة السائق).
7. استخدام جدول التحكم الناتج لاختبار أداء النظام في عينات طرق أخرى.

### نموذج نظام التعليق لربع سيارة:

في هذا النموذج يتم تمثيل ربع السيارة فقط بنظام اهتزازي بدرجتي حرية، كما هو مبين في الشكل (3) حيث يتعرض هذا النظام إلى تحريض حركي من الطريق، ويتم تمثيل نظام التعليق بعامل صلابة وقوة إخماد، أما الإطار فيتم تمثيله بعامل صلابة وعامل إخماد والذي في غالب الأحيان يتم إهماله. وحيث أن:

$z_s$ : إحداثي الموضع الشاقولي للكتلة المعلقة (الهيكل).

$z_u$ : إحداثي الموضع الشاقولي للكتلة غير المعلقة (العجلة والإطار والوصلات .. إلخ).

$z_R$ : إحداثي الموضع الشاقولي لسطح الطريق.

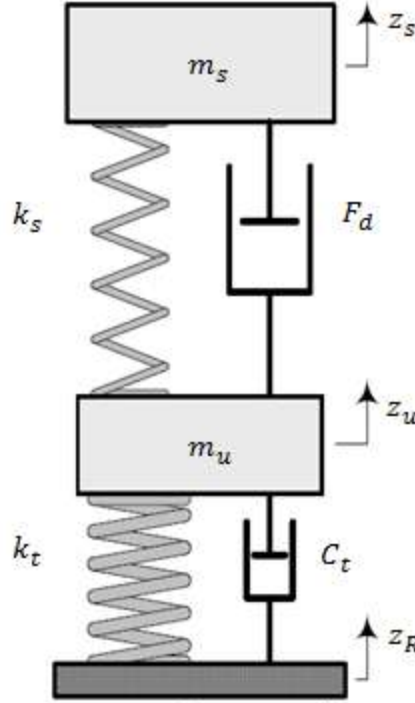
$k_s$ : عامل صلابة نابض التعليق.

$F_d$ : قوة الإخماد الناتجة عن المخمد.

$k_t$ : عامل صلابة إطار العجلة.

$c_t$ : عامل إخماد إطار العجلة.

لم يتم تمثيل إخماد نظام التعليق بعامل إخماد لأنه سيتم اعتماد نموذج مخصص للمخمد والذي سيولد قوة الإخماد بالاعتماد على علاقات لا خطية وليس بالاعتماد على معامل الإخماد فقط. وتكون معادلات الحركة كما يلي:



الشكل (3): نموذج ربع سيارة

$$m_s \ddot{z}_s = F_d + F_s - W_s \quad (1)$$

$$m_u \ddot{z}_u = -F_d - F_s + F_{st} + F_{dt} - W_u \quad (2)$$

حيث أن:  $F_d$ : قوة إخماد المخمد.

$F_s$ : قوة إرجاع النابض وتساوي إلى  $-k_s(z_s - z_u) \geq 0$  لأن النابض يعمل على الانضغاط فقط.

$F_{st}$ : قوة صلابة الإطار وتساوي إلى  $-k_t(z_u - z_R) \geq 0$  لأن قوة الإطار تظهر عند الانضغاط فقط

$F_{dt}$ : قوة إخماد الإطار والتي سيتم إهمالها.

$W_s$ : قوة ثقل الهيكل ويساوي إلى  $m_s g$

$W_u$ : قوة ثقل الكتلة غير المعلقة ويساوي إلى  $m_u g$

نحصل على ما يلي:

$$m_s \ddot{z}_s = F_d + k_s(z_u - z_s) - m_s g \quad (3)$$

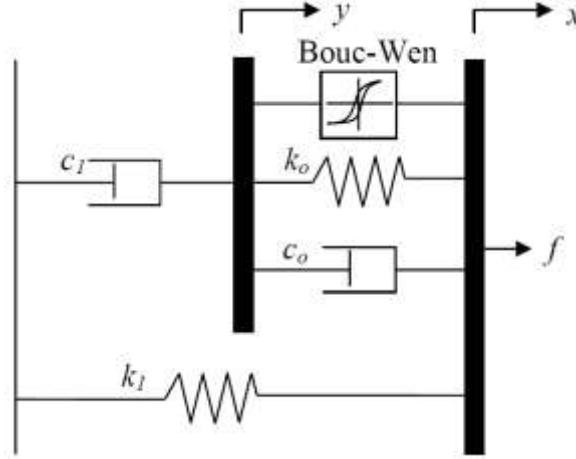
$$m_u \ddot{z}_u = -F_d - k_s(z_u - z_R) + k_t(z_R - z_u) - m_u g \quad (4)$$

وهاتان المعادلتان هما اللتان تم الاعتماد عليهما في بناء النموذج، ومن الواضح من المعادلتين بأنه لم يتم

تعويض الثقل بالإزاحة الساكنة للنابض أو الإطار، وذلك من أجل تمثيل ديناميكية النظام بشكل أفضل.

### نموذج المخمد المغناطيسي الريولوجي:

من أجل إكمال نموذج نظام التعليق نصف الفعال تم اعتماد نموذج المخمد المغناطيسي الريولوجي الذي قدمه سبنسر وآخرون [12]. يعتمد هذا النموذج على علاقة Bouc-Wen لتمثيل التخلفية التي تظهر في أداء المخمد المغناطيسي الريولوجي. يبين الشكل (4) النموذج الميكانيكي الذي تم الاعتماد عليه في استنتاج العلاقات الحاكمة للنموذج.



الشكل (3): النموذج الميكانيكي لنموذج سبنسر [1].

ويقوم هذا النموذج على سبع معادلات تحتوي على أربعة عشر حداً وهذه المعادلات هي كالتالي:

$$\dot{y} = \frac{1}{(c_0 + c_1)} [\alpha z + k_0(x - y) + c_0 \dot{x}] \quad (5)$$

$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x} - \dot{y}| |z|^{n-1} z - \mu (\dot{x} - \dot{y}) |z|^n + A (\dot{x} - \dot{y}) \quad (6)$$

$$F = c_1 \dot{y} + k_1(x - x_0) \quad (7)$$

حيث أن:  $x$  إزاحة المخمد.

$y$  الإزاحة الداخلية للمخمد.

$\alpha$  عامل باوس-وين الذي يصف إجهاد الخضوع للمائع المغناطيسي الريولوجي.

$c_0$  عامل الإخماد اللزج في السرعات العالية.

$k_0$  عامل الصلابة في السرعات العالية.

$k_1$  عامل تمثيل قوة الغاز المضغوط في المجموع.

$c_1$  لتمثيل الدوران العكسي في القيم التجريبية عند السرعات القريبة من الصفر.

$z$  متغير تطوري لتمثيل ارتباط استجابة المخمد مع القيم السابقة.

$\gamma, \mu, A, n$  متغيرات تحديد حجم وشكل حلقة التخلفية.

وحيث أن كلاً من  $\alpha, c_1, c_0$  يتغير بشكل خطي بتغير الجهد المطبق على ملف المخمد فإن هذه المتغيرات

تعطى بالمعادلات التالية:

$$\alpha = \alpha(u) = \alpha_a + \alpha_b u \quad (8)$$

$$c_1 = c_1(u) = c_{1a} + c_{1b} u \quad (9)$$

$$c_0 = c_0(u) = c_{0a} + c_{0b} u \quad (10)$$

أما الجهد المطبق  $u$  فيخضع للديناميكية التالية:

$$\dot{u} = -\eta(u - v) \quad (11)$$

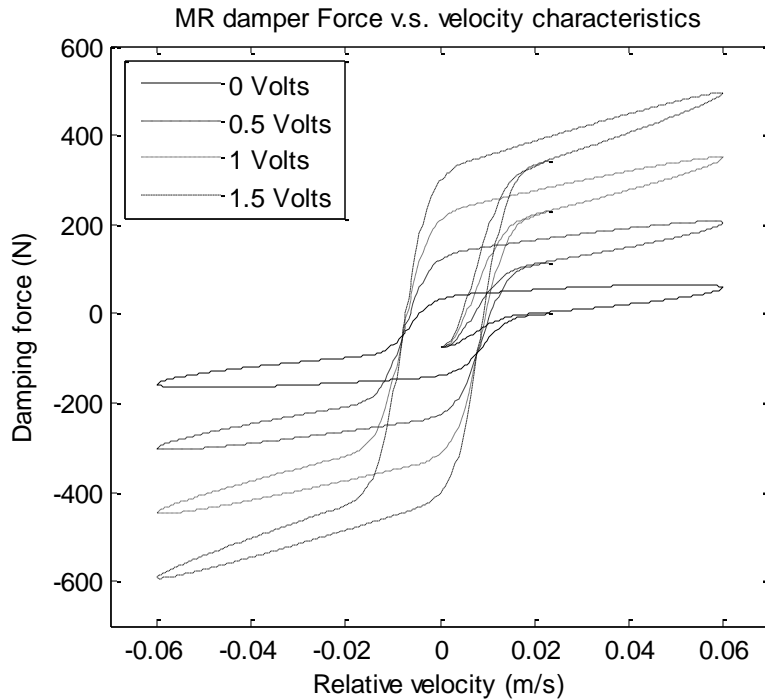
حيث أن  $v$  يمثل الجهد المطبق على دائرة قيادة التيار. تمثل هذه المعادلة حالة الوصول إلى التوازن الريولوجي للمائع بسبب تغير الحقل المغناطيسي، حيث أن سرعة الوصول إلى التوازن تحكمها قيمة  $\eta$ . عمل لام وآخرون على تحديد قيم الحدود  $(c_{0a}, c_{0b}, k_0, c_{1a}, c_{1b}, k_1, x_0, \alpha_a, \alpha_b, \gamma, \mu, A, n, \eta)$  من أجل المخمد (RD - 1005 - 1) المنتج من شركة Lord وقيم هذه المتغيرات مبينة في الجدول.

الجدول(1): قيم نموذج سينسر للمخمد (RD - 1005 - 1)[13].

المتغير	القيمة	المتغير	القيمة
$\alpha_a$	12441 N/m	$c_{0a}$	784 Ns/m
$\alpha_b$	38430 N/Vm	$c_{0b}$	1803 Ns/m
$\gamma$	136320 m <sup>-2</sup>	$k_0$	3610 N/m
$\mu$	2059020 m <sup>-2</sup>	$c_{1a}$	14649 Ns/m
$A$	58	$c_{1b}$	34622 Ns/Vm
$n$	2	$k_1$	840 N/m
$\eta$	190 s <sup>-1</sup>	$x_0$	0.0908 m

ويبين الشكل (5) نتائج محاكاة النموذج باستخدام Simulink بتطبيق دخل سرعة جيبي وقيم الجهد التالية

$(0, 0.5, 1, 1.5, 2)$ .



الشكل(4): مميزات السرعة-القوة لنموذج المخمد المغناطيسي الريولوجي.

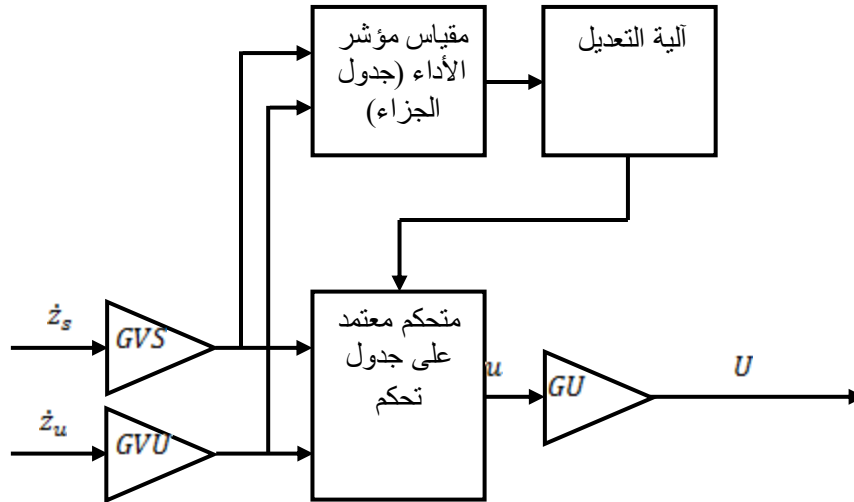


### المتحكم الضبابي الذاتي التنظيم:

يمتلك المتحكم الضبابي ذاتي التنظيم البنية الهيكلية المبينة في الشكل (6)، والتي تتألف الحلقة الداخلية فيها من متحكم ضبابي يقوم على جدول تحكم، حيث أن كل خلية فيه تعبر عن قاعدة تحكم، أما الحلقة الخارجية فتعبر عن آلية التعديل (باصطلاح التحكم التكيفي). إنالفكرة من التنظيم الذاتي هي أن نسمح لآلية التعديل أن تغير القيم في جدول التحكم، بالاعتماد على الأداء الحالي للمتحكم. ففي حال كان أداء المتحكم سيئاً فإن الخلية في جدول التحكم المسؤولة عن ذلك (والتي عملت قبل فترة زمنية محددة تمثل التأخير الذي يعترى النظام) يفرض عليها قيمة جزائية، ليكون مؤشر الأداء في المرة التالية التي يتم فيها زيارة الخلية قريباً أو مساوياً للصفير.

### المتحكم الضبابي المستخدم:

المتحكم المستخدم عبارة عن متحكم تناسبي\* (Proportional Controller). لقد تم اختيار سرعة الكتلة المعلقة  $\dot{z}_s$  وسرعة الكتلة غير المعلقة  $\dot{z}_u$  كبارامترتي دخل للمتحكم. إذ إن قوة الإخماد التي سيتم التحكم بها تتعلق بشكل أساسي بالسرعة النسبية بين الكتلتين والتي هي ناتج فرق البارامترين السابقين، ثم يتم جداولهما بربحين  $GVS$  و  $GVU$  على التوالي لملاءمة القيم. ثم تمرر هذه القيم إلى جدول التحكم  $F$  الذي يضم مجموعة قواعد التحكم والذي يمكن أن يكون فارغاً بداية أو يمكن كتابته وفق المعلومات المتوفرة عن العملية. القيمة الناتجة عن المتحكم، تعبر عن قيمة إشارة التحكم  $u$  التي يتم جداولها بالريح  $GU$  لتصبح  $U$  لتنتج إشارة التحكم والتي تعبر عن الجهد الكهربائي الذي سيتم تطبيقه على ملف المخدم المغناطيسي الريولوجي لتوليد قوة الإخماد المطلوبة.



الشكل(5): البنية الهيكلية للمتكم الضبابي ذاتي التنظيم

لنممثل فضاء الدخل والذي يتمثل بسرعة الكتلة المعلقة  $\dot{z}$  وسرعة الكتلة غير المعلقة  $\dot{z}$  المضروبين بربحي المواعمة  $GVS$  و  $GVU$  على الترتيب ليصبحان  $\dot{z}_S$  و  $\dot{z}_U$ . تم استخدام توابع انتماء مثلثية يرمز لها كما يلي:

$$\dot{z}_{S_i}; i = -6, -5, \dots, 5, 6 \quad (12)$$

\* بمعنى أن خرج المتحكم الضبابي يتم تطبيقه على العملية مباشرة بعد جداوله بريح الخرج، إذ أن هناك نوعان من المتحكمات الضبابية  $GU$  أو  $GO$  (وهو المستخدم في هذا البحث) والنوع الآخر  $GCO$  أو  $GCU$  ولكل منهما ارتباطه بشكل أو بآخر بنمط من أنماط التحكم التقليدي PID من ناحية علاقة الخرج بالدخل [16] (Jantzen, Jan 1990)

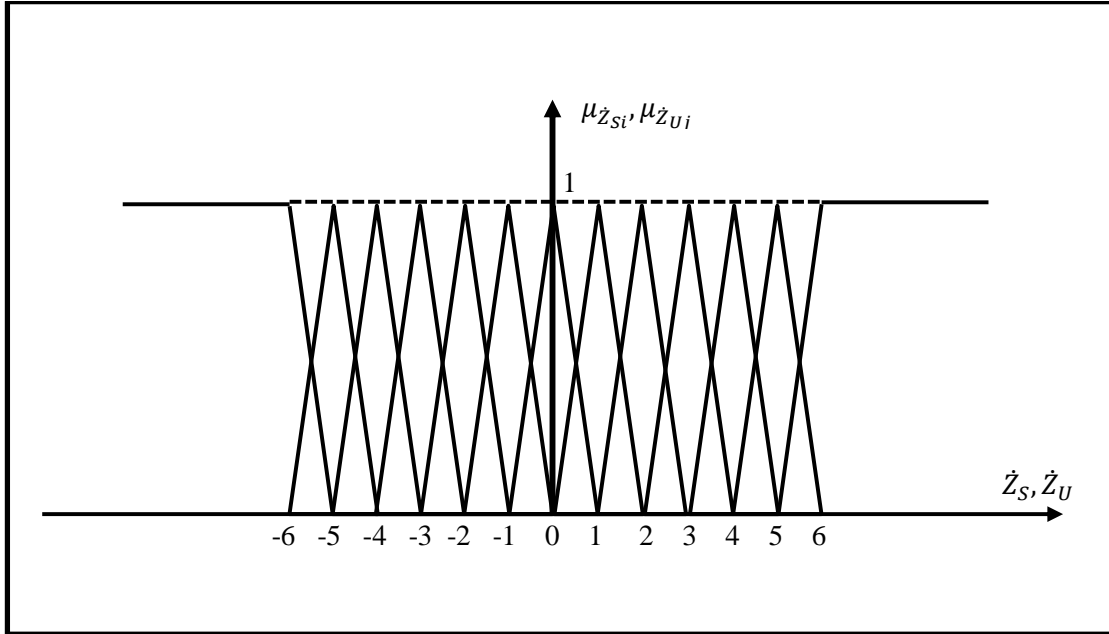
$$\dot{Z}_{Uj}; j = -6, -5, \dots, 5, 6 \quad (13)$$

حيث أن  $\mu_{\dot{Z}_{Si}}(\dot{Z}_S), \mu_{\dot{Z}_{Uj}}(\dot{Z}_U)$  تمثل قيمة توابع الانتماء ويتم التعبير عنها رياضياً كما يلي:

$$\mu_{\dot{Z}_{Si}}(\dot{Z}_S) = \begin{cases} 1 - |\dot{Z}_S - i| & ; i - 1 < \dot{Z}_S < i + 1 \\ 0 & ; \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

$$\mu_{\dot{Z}_{Si}}(\dot{Z}_U) = \begin{cases} 1 - |\dot{Z}_U - i| & ; i - 1 < \dot{Z}_U < i + 1 \\ 0 & ; \text{otherwise} \end{cases} \quad (15)$$

وبين الشكل (7) تمثيل توابع انتماء فضاء الدخل:



الشكل (6): توابع انتماء فضاء الدخل.

إن المتحكم المبني على الجدول يعبر عن مجموعة قواعد تحكم ضبابية تتحكم بإشارة الخرج من أجل متغيرات الدخل الحالية. ويمكن التعبير عن هذه القواعد بشكل عام كما يلي:

$$R_{ij}: \text{IF } E_i \text{ IS } E_i \text{ AND } C_j \text{ IS } C_j \text{ THEN } U \text{ IS } F(i, j)$$

أما قيمة خرج المتحكم فيتم حسابها باستخدام علاقة المتوسط المنقلب المعروفة في التحكم الضبابي [14]، ويمكن التعبير عنها كما يلي:

$$u = \frac{\sum_i \sum_j [\mu_{\dot{Z}_{Si}}(\dot{Z}_S) \times F(i, j) + \mu_{\dot{Z}_{Uj}}(\dot{Z}_U) \times F(i, j)]}{\sum_i \sum_j [\mu_{\dot{Z}_{Si}}(\dot{Z}_S) + \mu_{\dot{Z}_{Uj}}(\dot{Z}_U)]} \quad (16)$$

مقياس الأداء:

يأخذ مقياس الأداء (أو جدول الجزاء)  $P$  (Penalty table) شكل جدول مماثل في حجمه لحجم جدول التحكم  $F$  ويتكون من قيم موضوعة مسبقاً تعبر عن ما هو مرغوب، أو ما ليس مرغوباً، في الاستجابة العابرة بالاعتماد على القيم الحالية لمتغيرات الدخل. يمكن استخدام نفس مقياس الأداء في أكثر من عملية "موضوع التحكم" دون معرفة مسبقة عن العملية، طالما أنه يعبر عن الاستجابة المرغوبة للحالة العابرة. يمكن بناء مقياس الأداء باستخدام قواعد

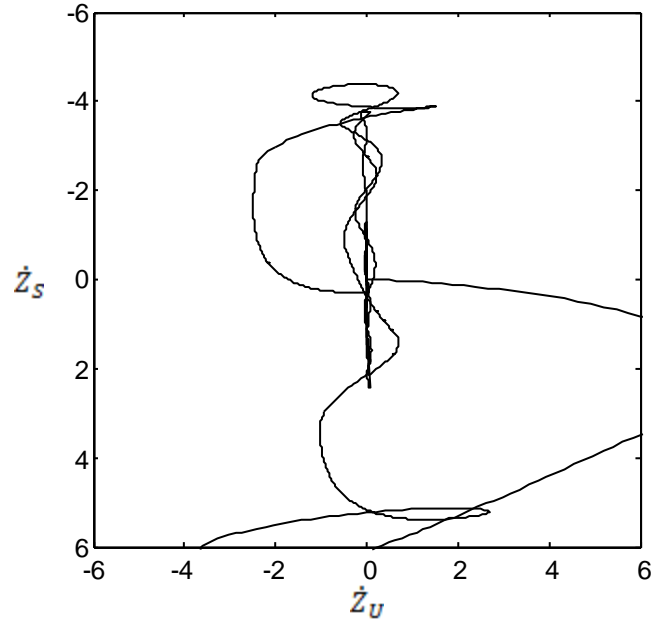
مكتوبة، إلا أنه غالباً يتم كتابة قيمه يدوياً، ويبين الجدول (2) مثالاً لمقياس أداء يستخدم لتقييم الأداء في المتحركات ذاتية التنظيم في أنظمة الملاحقة.

الجدول (2): جدول تقييم الأداء [15].

CE

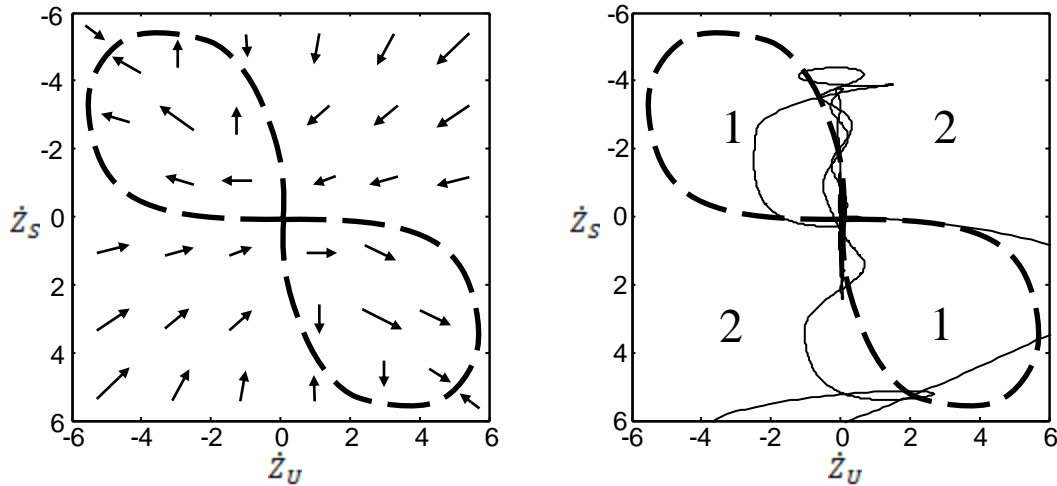
	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	
-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	
-5	-6	-6	-6	-6	-5	-4	-4	-4	-3	-2	-1	0	0	
-4	-6	-6	-6	-5	-4	-3	-3	-3	-2	-1	0	0	0	
-3	-6	-6	-5	-4	-3	-2	-2	-2	-1	0	0	1	2	
-2	-6	-5	-4	-3	-2	-1	-1	-1	0	0	1	2	3	
-1	-5	-4	-3	-2	-1	-1	0	0	0	1	2	3	4	
E	0	-5	-4	-3	-2	-1	0	0	0	1	2	3	4	5
	1	-3	-2	-1	0	0	0	0	1	1	2	3	4	5
	2	-2	-1	0	0	0	1	1	1	2	3	4	5	6
	3	-1	0	0	0	1	2	2	2	3	4	5	6	6
	4	0	0	0	1	2	3	3	3	4	5	6	6	6
	5	0	0	1	2	3	4	4	4	5	6	6	6	6
	6	0	1	2	3	4	5	6	6	6	6	6	6	6

أما بالنسبة لنظام التعليق نصف الفعال فتم بناء مقياس مؤشر أداء (جدول جزاء) اعتماداً على متغيرات الدخل المختارة  $\dot{Z}_S$  و  $\dot{Z}_U$ ، وفي سبيل ذلك تم رصد هذين المتغيرين أثناء الصعود والهبوط على عينة التدريب وهي مطب بشكل شبه منحرف بارتفاع 0.2 m وبطول 10 m. بحيث تحقق حالة صعود واستقرار وهبوط. فلوحظ وجود اهتزاز كبير في قيمهما، الشكل (9).



الشكل (7): رصد متغيري الدخل أثناء الصعود والهبوط على مطب شبه منحرف بارتفاع 0.2 m.

في محاولة لتحسين استجابة النظام تم تصميم جدول جزاء لجعل تغير هذه البارامترات ضمن مجال استجابة ناعمة محددة قليلة الاهتزاز. ويبين الشكل تمثيل جدول الجزاء المقترح حيث يمثل المنحني المتقطع الاستجابة المرغوبة (القيم الصفوية) والذي يقسم الجدول إلى منطقتين رئيسيتين كما هو مبين في الشكل (9): المنطقة 1 وتمثل هذه المنطقة حالة إخماد زائد نسبياً يجب فيها إنقاص قيمة قوة الإخماد (أي الإشارة الكهربائية المطبقة على المخمد)، الأمر الذي يسمح للسرعة بالتزايد وبالتالي عودة النظام إلى الحالة المرغوبة، والمنطقة 2 التي تمثل حالة قليلة الإخماد ويجب فيها زيادة قيمة الإشارة الكهربائية المطبقة على المخمد من أجل زيادة قيمة قوة الإخماد، مما يؤدي إلى ممانعة حركة الكتلتين وتخفيض سرعتيهما للعودة كذلك بحالة النظام إلى منحنى القيم المرغوبة. وبالنتيجة فإن قيم الجزاء الموجودة في كلتا المنطقتين تسعى لتوليد قوة إخماد تدفع بحالة النظام إلى الحالة المرغوبة قدر الإمكان كما هو مبين في الشكل (9).



الشكل (8): شكل جدول الجزاء المقترح (يسار)، الهدف من القيم التي سيتم وضعها في الجدول (يمين).

ويبين الجدول (3) القيم الرقمية لجدول الجزاء المقترح استخدامه في نظام التحكم.

الجدول (3): جدول الجزاء المقترح لنظام التعليق نصف الفعال، حيث تمثل القيم الصفرية الحالات المرغوبة لنظام التعليق، والقيم الموجبة الحالات التي يجب فيها زيادة قوة الإخماد، أما القيم السالبة فتمثل الحالات التي يجب فيها إنقاص قوة الإخماد.

		$\dot{z}_u$												
		-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
$\dot{z}_s$	-6	1	1	1	1	1	2	3	4	4	5	5	6	6
	-5	1	0	0	0	1	1	2	3	3	4	4	5	5
	-4	0	-1	-1	-1	0	1	1	2	2	3	3	4	4
	-3	0	-1	-3	-3	-1	0	1	1	2	2	2	3	3
	-2	0	-1	-3	-3	-1	0	1	1	1	2	2	2	2
	-1	0	-1	-1	-1	-1	-1	0	1	1	1	1	1	1
	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	1	1	1	1	1	1	1	0	-1	-1	-1	-1	-1	0
	2	2	2	2	2	1	1	1	0	-1	-3	-3	-1	0
	3	3	3	2	2	2	1	1	0	-1	-3	-3	-1	0
	4	4	4	3	3	2	2	1	1	0	-1	-1	-1	0
	5	5	5	4	4	3	3	2	1	1	0	0	0	1
	6	6	6	5	5	4	4	3	2	1	1	1	1	1

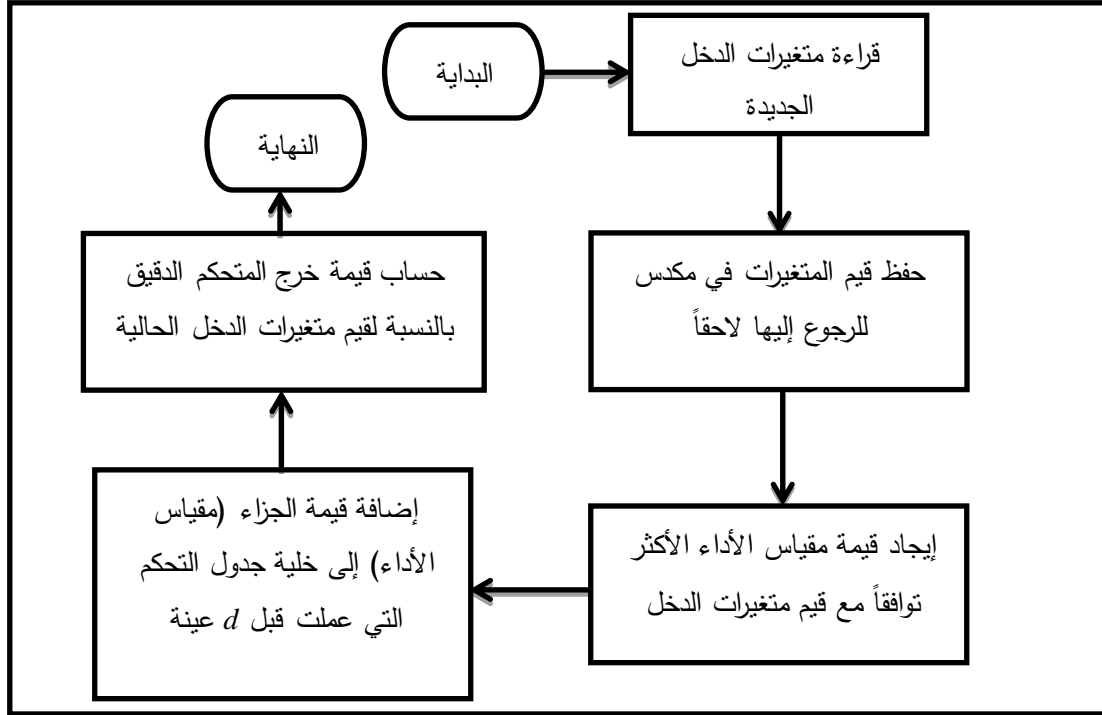
#### استراتيجية sky-hook

تقوم استراتيجية Sky-hook للتحكم بالمخمد المتغير نسبة التخمد على توليد قوة إخماد محددة كلما كانت تستطيع الحد من حركة الكتلة المعلقة. وطالما أن قوة الإخماد تمنع الحركة النسبية بين الكتلتين فإن ذلك يكون ذلك في حالتين، الأولى عندما تكون الكتلة المعلقة في صعود والمخمد يتعرض للتمدد، والثانية عندما تكون الكتلة المعلقة في هبوط والمخمد يتعرض للانضغاط. أما في الحالات الأخرى فيتم استخدام تغذية صفرية لتقليل قوة الإخماد قدر الإمكان [3]، [9]. ويمكن التعبير عن الاستراتيجية كما يلي:

$$F_d = \begin{cases} f(v_{skyhook}) & ; z_s(z_s - z_u) > 0 \\ f(0) & ; z_s(z_s - z_u) \leq 0 \end{cases} \quad (17)$$

#### النمذجة واعتبارات عملية:

لقد تم بناء نموذج للتحكم الضبابي ذاتي التنظيم بناء على المبادئ النظرية التي تم عرضها في القسم السابق، ويبين الشكل (10) مخططاً صندوقياً يصف الخوارزمية التي تم الاعتماد عليها في بناء النموذج لدورة عمل واحدة، حيث تتكرر هذه العملية عند كل عينة جديدة.



الشكل (9): خوارزمية التحكم والتعديل التي تم اعتمادها في النموذج.

### توليف متغيرات المتحكم:

لتوليف بارامترات المتحكم الضبابي ذاتي التنظيم نحتاج لبعض الإجراءات المبدئية:

- 1- التأخير في الجزء  $d$  : بما أننا نقوم بالتحكم بقوة الإخماد عن طريق الإشارة الكهربائية المطبقة على ملف المحمد، فإنه لا يوجد تأخير في النظام سوى زمن استجابة المحمد المغناطيسي الريولوجي، والذي يقدر بزمن 2 [8ms]، أما أثر قوة الإخماد على حالة النظام فإنه يظهر بشكل آني. وبالتالي فإن قيمة التأخير في الجزء تعتمد على قيمة زمن التعيين:

$$d = \frac{0.002}{T_s}$$

- 2- قيم الربح  $GVS, GUV, GU$ : يمكن توليف هذه البارامترات يدوياً بجعل ربحي الدخل يؤمنان مواعمة لقيم الدخل مع مجال قيم جدول التحكم والذي هو  $[-6 +6]$ . أما ربح الخرج  $GU$  فيجب أن يتناسب مع القيم التشغيلية للمحمد المغناطيسي الريولوجي والذي هو  $[0 5]$  فولط.
- 3- تم ربط مقياس الأداء بالمتغير  $G_P$  الذي يمثل ربح الجزء ليصبح بالإمكان التحكم بقيم جدول الجزء، وعدم الالتزام بمجال القيم المكتوبة في الجدول. على الشكل التالي:

$$P = G_P * \frac{\text{Penalty table}}{6}$$

حيث أنه بزيادة قيمة هذا المتغير تصبح عملية بناء أو تعديل جدول التحكم أسرع، إلا أن زيادته بشكل كبير جداً يمكن أن تجعل عملية التدريب غير مستقرة. ويمكن القول أن قيمة هذا المتغير يجب أن تكون أصغر أو تساوي 20% من قيمة المجال التشغيلي للمحمد المغناطيسي الريولوجي.

4- إن تتابع عمليات تعديل جدول التحكم يمكن أن يعطي أثراً سلبياً إذا تم بشكل سريع. فربما لم يتوافق التعديل الحالي مع الأثر الناتج عن التعديل السابق بسبب زيادة دور عملية التعديل وعدم تحديد زمن التأخير بدقة. فلذلك من الأفضل إعطاء آلية التعديل وقتاً كافياً بعد كل عملية تعديل على جدول التحكم لتراقب أثر ذلك على استجابة النظام لجعل عملية ضبط البارامترات أقل حساسية، ويتم ذلك بإيقاف آلية التعديل عن عملها لمدة  $d$  عينة بعد كل تعديل. وفي النهاية لا بد من التنويه أنه يجب عزل الخلية  $F(0,0)$  عن عملية التعديل لأنها تمثل الحالة المستقرة ولا بد أن تبقى بمعزل عن أي تعديل.

### النتائج والمناقشة:

تم بناء نماذج ربع السيارة، والمخمد المغناطيسي الريولوجي، والمتحكم الضبابي ذاتي التنظيم لنظام تعليق نصف فعال باستخدام Simulink® كما يظهر في الشكل (11) الذي يحوي على النماذج الثلاثة. ولتقييم أداء نظام التعليق بالنسبة لراحة القيادة تم مراقبة مؤشرين بهذا الخصوص وهما تكامل مربع تسارع الكتلة المعلقة  $\sum z_s^2$  (Integral Square Acceleration ISA) و تكامل مربع إزاحة الكتلة المعلقة أيضاً (Integral Square Displacement ISD)  $\sum z_s^2$ . أيضاً تم الاستئناس بقيمة الإزاحة الأعظمية للكتلة المعلقة  $Max(z_s)$  أو التجاوز الأعظمي (Maximum Over Shoot MOS) (أيهما قبل التطبيق) والأخيران يكونان في نماذج الطرق المحددة فقط (المطبات والحفر). وللبداء بعملية المحاكاة تم توليف بارامترات المتحكم وفق ما أوردناه سابقاً كما يلي:

$$GVS = 4$$

$$GVU = 1$$

$$GU = 1$$

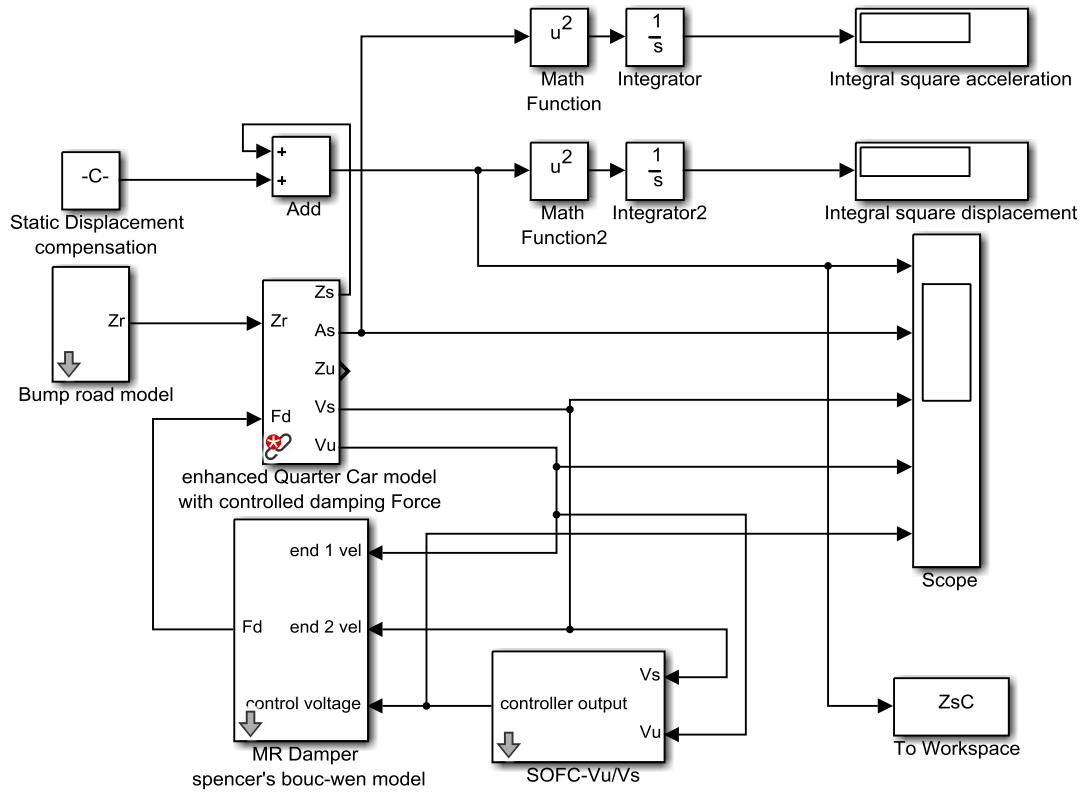
$$G_p = 0.1$$

$$d = 2 \text{ sample}$$

حيث أن زمن التعيين (sampling time) للمتحكم والمعدل متماثلان ويساويان (0.001s). ولقد تم اختيار ثابت التعلم  $G_p$  بقيمة صغيرة للحصول على تغير ناعم في قيم إشارة التحكم وبالنتيجة تغير ناعم في قيم مؤشرات الأداء للمساعدة في اختيار جدول التحكم الأفضل. وتمت عملية التدريب بدءاً بجدول تحكم فارغ أما بالنسبة لبيانات نموذج ربع السيارة فتم استخدام قيم لسيارة SAMAND من شركة IRANKHODRO كما هو مبين في الجدول (4).

الجدول (4): قيم نموذج نظام التعليق لسيارة SAMAND من شركة IRANKHODRO [10].

الرمز	الوصف	القيمة	الوحدة
$m_s$	الكتلة المعلقة	290	Kg
$k_s$	صلابة نابض نظام التعليق	12000	N/m
$m_u$	الكتلة غير المعلقة	50	Kg
$k_t$	معامل صلابة الإطار	200000	N/m



الشكل(10): مخطط نموذج نظام التعليق نصف الفعال في Simulink®.

## التدريب:

تم تدريب النظام على مطب بشكل شبه منحرف بارتفاع 0.2m وطول 10m تجتازه السيارة بسرعة 20 kmph، حيث أن هذا النموذج يعطي متغيرات الدخل الحالات المختلفة التي يمكن أن يتعرض لها النظام من صعود وهبوط واستقرار. وقبل عرض نتائج التدريب نبين في الجدول (5) نتائج محاكاة نفس النموذج باستخدام استراتيجية Sky-hook عند ثلاث قيم لتغذية المخمد. تم اختيار الأولى من أجل أصغر قيمة لمؤشر الفاصلة، والثانية تم اختيارها من أجل أصغر قيمة لمؤشر التسارع، أما الثالثة فتم اختيارها من أجل انعدام التجاوز الأعظمي.

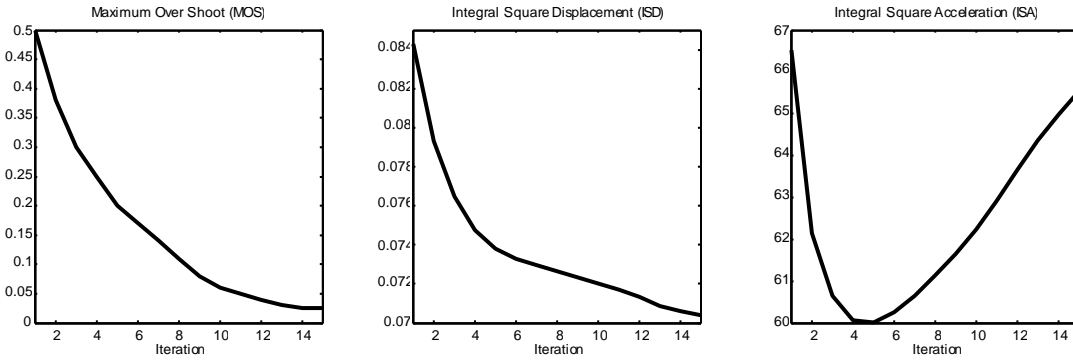
الجدول (5): نتائج المحاكاة باستخدام طرق مختلفة للتحكم بالمخمد المغناطيسي الريولوجي.

الطريقة	ISA	ISD	MOS
تغذية صفرية	86.41	0.09425	80%
Sky-hook (1)	66.45	0.06109	N/A
Sky-hook (2)	62.13	0.07674	15%
Sky-hook (3)	63.5	0.06545	0%

يبين الشكل (12) تغير قيم كل من المؤشرات الثلاثة لنظام التعليق نصف الفعال أثناء عملية التدريب لعدد من المرور. حيث أننا نلاحظ مع تقدم التدريب تحسناً في مؤشر التسارع إلى حد معين ليبلغ أفضل قيمة في المرور الخامس متجاوزاً بذلك استراتيجية Sky-hook. كما نلاحظ استمراراً في تحسن مؤشر الإزاحة والتجاوز الأعظمي مع



استمرار عملية التدريب، ثم تم إيقاف عملية التدريب عندما اقتصر التحسن على مؤشر الإزاحة فقط. إذ إن ذلك ترافق مع تراجع بشكل كبير في مؤشر التسارع بسبب قوى التخميد المتزايدة مع كل مرور لعملية تدريب.



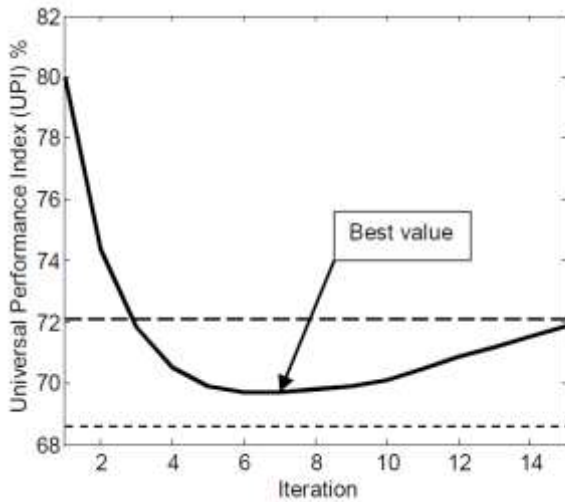
الشكل (11): تغير مؤشرات الأداء مع تقدم عملية التدريب (التنظيم الذاتي).

لاختيار جدول التحكم المناسب يجب الأخذ بعين الاعتبار كل من مؤشري التسارع والفاصلة إذ إنه في أغلب الأحيان يتم تشكيل مؤشر أداء لراحة السائق كمجموع موزن من هذين المؤشرين [2]. فلذلك تم حساب مؤشر شامل (UPI) من كل من المؤشرات الثلاث (حين وجودها) بعد تنسيب قيمها لقيمة المؤشر الموافق في حالة التغذية الصفرية لنلاحظ مدى التحسن كنسبة مئوية فتكون قيمته 100% في بداية التدريب وكلما قل كان أفضل. ويمكن التعبير عنه كما يلي:

$$UPI = 65 \times \frac{ISA}{ISA_{zv}} + 30 \times \frac{ISD}{ISD_{zv}} + 5 \times \frac{MOS}{MOS_{zv}} \quad (19)$$

أو

$$UPI = 65 \times \frac{ISA}{ISA_{zv}} + 30 \times \frac{ISD}{ISD_{zv}} + 5 \times \frac{Max(z_g)}{Max(z_g)_{zv}} \quad (20)$$



الشكل (12): تغير قيمة مؤشر الراحة الشامل أثناء تقدم التنظيم الذاتي.

تم إعطاء مؤشر التسارع الوزن الأكبر لأن له الأثر الأكبر على راحة السائق بسبب قوة العطالة. ويبين الشكل (13) منحنى المؤشر الشامل مع تقدم عملية التدريب والذي يظهر أن المرور ذو قيمة المؤشر الأفضل هو المرور السابع حيث بلغت قيمته 69.71% من قيمته عند التغذية الصفرية فلذلك تم اختيار جدول التحكم الناتج عنه. أما المستقيم المنقطع فيمثل قيمة المؤشر لاستراتيجية Sky-hook التي حققت أفضل قيمة لمؤشر التسارع، أما الخط المنقط فيمثل قيمة المؤشر لنفس الاستراتيجية عند القيمة التي انعدم عندها التجاوز الأعظمي الأمر الذي يفسر انخفاض قيمة المؤشر. ويبين الجدول (6) جدول التحكم الناتج عن المرور السابع.

الجدول (6): جدول التحكم الناتج عن المرور السابع في التدريب.

		$\dot{z}_v$												
		-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
$\dot{z}_s$	-6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	-5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	-4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.54	1.58	1.67	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	-3	0.00	0.00	0.00	0.00	-1.01	0.00	2.57	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	-2	0.00	0.00	0.00	0.00	-1.48	0.00	2.62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	-1	0.00	0.00	0.00	0.00	-1.18	0.00	0.82	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.15	-0.16	0.00	-0.02	-0.05	-0.05	-0.06	0.00	0.00
	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.42	-0.07	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.01
	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.29	0.26	1.38	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.86	0.46	0.36	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	4	0.00	0.00	0.00	0.00	1.02	0.85	0.27	0.13	0.06	0.00	-0.05	-0.18	-0.07
	5	0.00	0.00	0.00	0.13	1.09	1.67	0.00	0.00	0.28	0.06	0.00	0.00	0.00
	6	0.00	0.00	0.00	0.79	1.32	2.40	1.19	0.49	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

الاختبار:

لقد تم استخدام نماذج طرق مختلفة (مطب، وطرق عشوائية) لاختبار أداء النظام مع جدول التحكم الذي تم اختياره، وفيما يلي نتائج الاختبار لكل نموذج على حده. نبين في الجدول (7) نتائج المحاكاة باستخدام مطب شبه منحرف بطول متر واحد وارتفاع عشرين سنتيمتراً وتم استخدام هذا المطب لشيوعه في الطرقات.

الجدول (7): نتائج المحاكاة باستخدام مطب شبه منحرف بارتفاع 0.2m، وبطول 1m، تجتازه السيارة بسرعة 20Kmph.

الطريقة	ISA	ISD	$Max(z_s)$	%UPI
SOFC	58.75	0.0082	0.19	65.43
تغذية صفرية	84.59	0.0167	0.22	100
Sky-hook (1)	66.67	0.0110	0.178	75.07
Sky-hook (2)	63.48	0.0078	0.186	67.07

نلاحظ في هذه الحالة تفوق النظام على Sky-hook في كل من مؤشر التسارع والمؤشر الشامل أما بالنسبة لمؤشر الإزاحة فكانت لاستراتيجية Sky-hook القيمة الأفضل. ومع تماثل شكل نموذج المطب مع عينة التدريب إلا أن اختلاف الطول أدى إلى تغيير قيم المؤشرات المختلفة. أما في الجدول (8) فنبين نتائج المحاكاة باستخدام مطب جببي بطول متر واحد وارتفاع عشرين سنتيمتراً.

الجدول (8): نتائج المحاكاة باستخدام مطب جيبي بارتفاع 0.2m، وبطول 1m، تجتازه السيارة بسرعة 20Kmph.

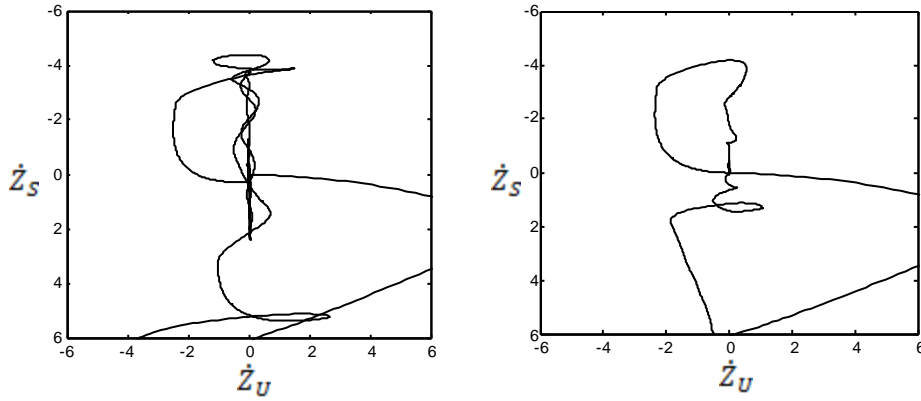
الطريقة	ISA	ISD	$Max(z_s)$	%UPI
SOFC	34.42	0.0031	0.12	69.25
تغذية صفرية	42.67	0.0073	0.147	Reference
Sky-hook (1)	39.93	0.0054	0.106	69.03
Sky-hook (2)	36.05	0.0025	0.113	86.62

نلاحظ في هذه الحالة أن أداء النظام لم يتفوق على جميع نتائج استراتيجية Sky-hook بالنسبة للمؤشر الشامل ومؤشر الإزاحة، إلا أنه حقق أفضل قيمة لمؤشر التسارع متفوقاً على استراتيجية Sky-hook. بعد الانتهاء من نمونجي الطرق المحددة تم استخدام نماذج لطرق عشوائية وفقاً للمعيار ISO8608[16] لاختبار أداء النظام في ظروف أكثر واقعية وأكثر حدوثاً، فكانت النتائج كما هي مبينة في الجدول (9):

الجدول (9): نتائج اختبار النظام مع نماذج الطرق العشوائية.

طريق عشوائي سريع Class A طول 100m بسرعة 120Kmph			طريق عشوائي جيد Class C طول 100m بسرعة 80Kmph			طريق عشوائي وعر Class E طول 100m بسرعة 40Kmph			المؤشر
النسبة	S.H.(2)	SOFC	النسبة	S.H.(2)	SOFC	النسبة	S.H.(2)	SOFC	
53%	1.92	0.889	33%	15.31	10.25	30%	204.2	141.6	ISA
-66%	1.75e-4	2.92e-4	-35%	5.00e-3	6.76e-3	-6.4%	0.185	0.197	ISD

يبين لنا من الجدول (9) أنه في النماذج الثلاثة حقق النظام نصف الفعال المقترح تحسناً في مؤشر التسارع على استراتيجية Sky-hook إلا أنه تراجع في مؤشر الإزاحة بنسبة ازدادت مع تحسن جودة سطح الطريق. وفي النهاية نورد استجابة النظام لعينة التدريب باستخدام جدول التحكم لنرى مدى تغير الاستجابة وموافقته للاستجابة المرغوبة، انظر الشكل (14)، نجد أن آلية التعديل استطاعت تحسين شكل الاستجابة إلى حد ما لتصبح ناعمة قليلة الاهتزاز كما أريد لها تقريباً. لقد تمكن النظام من إعطاء نتائج جيدة في حالات الاختبار المختلفة، إلا إن تفوق استراتيجية Sky-hook غالباً في مؤشر الإزاحة والإزاحة الأعظمية والتجاوز الأعظمي يعزى إلى أن الاستراتيجية تقوم على أساس واضح وهو تقليل حركة الكتلة المعلقة كلما أمكن ذلك. بخلاف النظام الذي قدمناه والذي يعتمد على استجابة النظام بمتغيريه وهما سرعتي الكتلتين، مما يجعله غير قادر على التحكم بإزاحة الكتلة المعلقة بشكل مباشر.



الشكل (13): استجابة النظام قبل بدء التنظيم الذاتي (يمين)، وباستخدام جدول التحكم النهائي (يسار)

### الاستنتاجات والتوصيات:

لقد تم تصميم نظام تعليق نصف فعال باستخدام المتحكم الضبابي ذاتي التنظيم للتحكم بالمخمد المغناطيسي الريولوجي. استناداً إلى جدول الجزاء الذي تم بناؤه للوصول إلى استجابة مرغوبة استطاع المتحكم تحسين استجابة النظام والتقليل من اهتزازه وجعل منحنى الاستجابة لعينة التدريب قريباً من الاستجابة المرغوبة. بعد عدد من تكرارات التدريب تم اختيار جدول تحكم بناءً على مؤشر أداء محدد موجه لمراقبة راحة السائق. كما أظهرت المحاكاة أن النظام وباستخدام جدول التحكم المختار أعطى نتائج جيدة من منظور راحة السائق في نماذج الطرق المختلفة متوقفاً في بعض الأحيان على استراتيجية Sky-hook التي تمت مقارنة النتائج معها.

إن اختيار جدول التحكم المناسب يرتبط ارتباطاً مباشراً بمؤشر الأداء الذي سيتم الاختيار وفقاً له والغاية منه. إذ إن الجداول الناتجة عن التكرارات اللاحقة يمكن أن تعطي نتائج أفضل بالنسبة لمؤشر الإراحة والإراحة الأعظمية إلا إن ذلك سيكون على حساب مؤشر التسارع. إذ لم يتم التمكن من الوصول إلى جدول تحكم شامل لكل الحالات والظروف، لأن استمرار التدريب سيؤدي إلى محاولة إجبار النظام للوصول إلى الاستجابة الموصوفة في جدول الجزاء بتوليد قوى إخماد أكبر ستحسن من مؤشر الإراحة ولكن ذلك سيولد تسارعات كبيرة تنعكس سلباً على مؤشر التسارع. ولكن يمكن استخدام جداول التحكم المختلفة كتوليفات مختلفة يمكن للسائق الاختيار بينها.

تم استخدام عملية التنظيم الذاتي كعملية تدريب للنظام يتم إيقافها عند الوصول إلى نتائج مرضية. إذ لم يتم التمكن من إيجاد طريقة لجعل عملية التنظيم تستمر ليتقارب جدول التحكم إلى القيم المثلى كما هو الحال في أنظمة الملاحقة طالما أن القيم التي يتم مراقبتها والتحكم بها تتغير بتغير المؤثرات الخارجية (تغير وعورة الطريق وشكله وتغير سرعة السيارة).

يمكن العمل في دراسات لاحقة على تحقيق المتحكم الضبابي ذاتي التنظيم عملياً باستخدام المتحكمات الصغيرة ونماذج مخبرية، أو بإجراء المحاكاة باستخدام تقنية (المحاكاة مع العتاد-داخل-الحلقة) (Hardware-in-the-Loop) (Simulation HILS) لاختبار أداء النظام عملياً. أيضاً يمكن البحث في دمج استراتيجية Sky-hook مع المتحكم الضبابي ذاتي التنظيم بحيث يعمل المتحكم على تحديد جهد عمل استراتيجية Sky-hook للحصول على النتائج الأفضل من كلا الاستراتيجيتين. كما يمكن البحث أيضاً عن جداول جزاء أخرى تسمح بإبقاء عملية التنظيم الذاتي فعالة لاستمرار مقارنة الأداء الأفضل.

## المراجع:

1. Jazar, Reza N. *Vehicle Dynamics: Theory and Applications*. New York : Springer, 2008. p. 1015. ISBN:978-0-387-74243-4.
2. Rill, George. *Vehicle Dynamics*. University of Applied Sciences. Fachhochschule Regensburg, 2006. p. 157, Lecture notes.
3. Dixon, John C. *The Shock Absorber Handbook*. Chichester : Wiley, 2007. p. 445. ISBN: 9780470510209.
4. A *Quarter-Car Experimental Analysis of Alternative Semi-active Control Methods*. Ahmadian, Mehdi and Pare, Christopher A. 8, August 2000, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 11.
5. *No-Jerk Skyhook Control Methods for semiactive suspension*. Ahmadian, Mehdi and Southward, Steve C. 4, January 2004, Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 126.
6. *Can Semiactive Dampers with Skyhook Control Improve Roll Stability of Passengers Vehicles?* Ahmadian, Mehdi and Simon, David E. 2004. SAE 2004 Automotive Dynamics, Stability & Controls Conference and Exhibition.
7. *Semi-active  $H_{\infty}$  Control of Vehicle Suspension with MR Dampers*. Du, H. S. 2005.
8. *Design of a predictive semiactive suspension system*. Giua, Alessandro, et al., et al. 4, Caligari, April 2004, Vehicle System Dynamics, Vol. 41, pp. 277-300.
9. Erdoğan, Zeynep. *Development of a control strategy for road vehicles with semi-active suspensions using a full vehicle ride model*. Department of Mechanical Engineering, Middle East Technical University. 2009. M.S. Thesis.
10. *Comparison between Optimized Passive Vehicle Suspension System and Semi Active Fuzzy Logic Controlled Suspension System Regarding Ride and Handling*. Khajavi, Mehrdad N. and Abdollahi, Vahid. 1, Tehran: World Academy of Science, 2007, International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial and Mechatronics Engineering, Vol. 1, pp. 57-61.
11. *Semiactive Suspension Design with an Optimal Gain Switching Target*. Giua, Alessandro, Seatzu, Carla and Usai, Giampaolo. 4, Caligari: Taylor & Francis, 1999, Vehicle System Dynamics, Vol. 31, pp. 213-232.
12. *Phenomenological model for a Magnetorheological Damper*. Spencer, B.F., et al., et al. 3, March 1997, ASCE Journal of Engineering Mechanics, Vol. 123, pp. 230-238.
13. Lam, H. F., Lai, C. Y. and Liao, W. H. *Auto Mobile Suspension System with MR Fluid Dampers*. Mechanical And Automation Engineering, the Chinese university. Hong Kong , 2000. Bachelor thesis.
14. Chen, G. and Pham, T. T. *Introduction to Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Control Systems*. New York : CRC Press, 2001. p. 316.
15. Yamazaki, T. *An improved algorithm for a self-organizing controller and its experimental analysis*. Electrical and Electronic Engineering, Queen Mary College. London , 1982. p. 152, PhD thesis.
16. International Organization for Standardization. *ISO 8608: Mechanical Vibrations - Road Surface Profiles - Reporting of Measured Data*. s.l. : International Organization of Standardization (ISO), 1995.
17. *Tuning-Rules for Fuzzy Controllers*. Jantzen, Jan. Istanbul : IEEE, 1990. IEEE International Workshop on Intelligent Motion Control. pp. 83-86. 90TH0272-5.