

تصميم أداة بحثية وتعليمية لدراسة استجابة نظام التعليق في المركبات باستخدام حزمة برمجيات Matlab/Simulink

د. م فراس القطان⁽¹⁾ و د. م رياض قبيسي⁽²⁾

الملخص

نطوّر في هذا البحث أداة بحثية وتعليمية لدراسة حساسية استجابة منظومة تعليق المركبة لتأثير تعرجات الطريق كتابع لخصائص وبارامترات مكونات التعليق. هذه الأداة هي عبارة عن برنامج يمكن استخدامه لأي نموذج منشأ باستخدام حزمة برمجيات Matlab/Simulink بمكتباته المختلفة. يمكن إدخال أنواع مختلفة من النماذج كنماذج المعادلات التفاضلية المعيرة عن النموذج الرياضي أو المخططات الصندوقية، أو نموذج فضاء الحالة. تمكن هذه الأداة الطالب أيضاً من تعرف مكونات التعليق، والبارامترات التصميمية الأساسية لها، واختيار هذه البارامترات. وتمكن الباحثين والطلبة من اختبار النماذج من حيث الاستجابة والتجاوز الأعظمي لقيمة الدخل، والحساسية، عند إجراء المحاكاة لظروف العمل المختلفة.

الكلمات مفتاحية: النمذجة، المحاكاة، Matlab/Simulink، نابض، مخمد، تعليقة السيارة، استجابة، حساسية.

⁽¹⁾ قسم هندسة السيارات والآليات الثقيلة - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق.

⁽²⁾ قسم هندسة السيارات والآليات الثقيلة - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق.

The design of a research and educational tool to study the response of a vehicle suspension system using Matlab/Simulink

Dr. Alkatan Feras.⁽¹⁾ and Dr. Kubaisi Rayad⁽²⁾

ABSTRACT

In this research, a research and educational tool for studying the sensitivity of the vehicle's suspension system to the properties and parameters of the suspension's components is developed. This tool is a program that can study different models created using the Matlab/Simulink software package with its various libraries.

Different types of models can be analysed, such as differential equation models expressing a mathematical model, block diagrams, or state space models. The tool also enables students to identify the suspension's components, and its basic design parameters, and choose these parameters.

Researchers and students will be able to test their models in terms of response, overshoot, and sensitivity, when conducting simulations in different working conditions.

Keywords: Modelling, simulation, Matlab/ Simulink, spring, Damper, suspension, response, sensitivity.

⁽¹⁾ Department of Automotive Engineering and Heavy Machinery Faculty of Mechanical and Electrical Engineering Damascus University.

⁽²⁾ Department of Automotive Engineering and Heavy Machinery Faculty of Mechanical and Electrical Engineering Damascus University.

1- المقدمة:

يوفر راحة الركاب، وسلامة الحمولة ويؤمن موثوقية عمل كبيرة، ويعطي إنتاجية مرتفعة، ويحقق اقتصادية جيدة [1,3].

وتقيم الحركة الاهتزازية بترددتها (أو بدورها)، ويسعتها، ويتسارعها ويسرعة تغير تسارعها، وبعد تردد الحركة الاهتزازية أهم مؤشرات تقييم صفاء حركة المركبة لأنه يقيم الاهتزاز من جهة ويؤثر في المؤشرات الأخرى من جهة ثانية، لأن تسارع وسرعة تغير تسارع الحركة الاهتزازية ذو علاقة وطيدة بتردد الاهتزاز، فتسارع جسم السيارة، والسرعة، والإزاحة، والقوة الرأسية المؤثرة في الإطارات، هي الجوانب التي تؤثر بشكل مباشر في راحة القيادة وسلامة المركبة [7,8]. يعد الاهتزاز ذو تردد (60-70) اهتزازة في الدقيقة أكثر الشروط ملائمة لراحة الركاب من الناحية الفيزيولوجية، والذي يتوافق مع سرعة السير العادية على الأقدام، نقول عن المركبة السياحية إنها تتمتع بصفاء حركة جيدة عند تردد اهتزاز (40-60) اهتزازة في الدقيقة. لتحديد هذه الخاصية لابد من دراسة استجابة المركبة عند العمل على طرق ذات ظروف استثمارية مختلفة [1,4,14].

يتم تطبيق الأبحاث على منظومة التعليق على النماذج المنشأة لهذه الغاية، وهذه النماذج يمكن أن تُبنى بأكثر من طريقة حسب رؤية النمذج والغاية من النمذج، ويتم تصنيف أنظمة تعليق السيارة كنظم سلبية، فعالة، ونصف فعالة [10,11,12]. ويعبر عن النمذج عادة إما بمعادلات تفاضلية، وهي النمذج الرياضي المعبر عن أهم الخواص الفيزيائية للنمذج، أو عن طريق المخططات الصندوقية، أو باستخدام نمذج فضاء الحالة. ولابد من التأكد من مصداقية النمذج من حيث الدقة والثوقية، ومدى تأثير نظريات التبسيط والتقريب المستخدمة في نسبة انحراف النمذج في تعبيره عن النمذج الحقيقي.

يعد نظام التعليق في السيارة (الشكل 1) مكوناً أساسياً من مكوناتها لأنه يرتبط بالأداء الديناميكي للسيارة. وهو يضمن التماس الدائم بين العجلة والطريق، ويمتص الصدمات الناتجة عن تغيرات الطريق ويحولها إلى اهتزازات، ويحافظ على ثبات السيارة من خلال توزيع القوى على العجلات، ويوفر الراحة والأمان لركاب السيارة. ويصمم نظام التعليق بحيث يربط بين كتلة السيارة المعلقة (تدعى أيضاً الكتلة الفوقية وهي مؤلفة من كتلة الهيكل مع الركاب أو الحمولة وكتلة جسم السيارة (الشاسيه) والمحرك وكافة العناصر والميكانيزمات التي يصل وزنها إلى العجلات من خلال التعليق)، والكتلة غير المعلقة (الكتلة السفلية المؤلفة من الإطارات والعجلات والمحاور) وتشكل الكتلة السفلية حوالي 10% من الكتلة الفوقية [1,4]، ويربط كذلك النظم الفرعية الأخرى، مثل مكونات دارة التوجيه والفرامل.



الشكل (1): نظام التعليق المستقل لإحدى عجلات السيارة.

2- مشكلة البحث:

يعبر مصطلح صفاء حركة السيارة عن الخاصية الاستثمارية المسؤولة عن امتصاص الاهتزازات الناتجة عن حركة المركبة على طرق غير مستوية بالشكل الذي

3- هدف البحث:

هدف البحث هو إنشاء أداة برمجية قادرة على مساعدة الباحثين والطلاب في الحكم على مصداقية النموذج بغض النظر عن بنيته، ومساعدتهم في معرفة مدى تعبير النموذج المقترح عن المسألة المطروحة، واستجابته لإشارات الدخل القياسية، بالإضافة لقدرته على عرض النتائج على شكل مخططات بيانية، والقدرة على المقارنة بين النتائج المختلفة.

ونعالج في هذه الدراسة استجابة تعليقة المركبة تحت تأثير التغيرات المختلفة لتعرجات الطريق، وأثرها في راحة الركاب وأمانهم، وكمثال سنحلل نمودجا بسيطاً لمنظومة تعليق مستقلة بهدف تبيان طريقة استخدام الأداة موضوع البحث لدراسة السلوك الديناميكي للنمودج وتحليله، وتحديد البارامترات المؤثرة في تصميمه من خلال دراسة التأثير المتبادل لهذه البارامترات.

4- أدوات البحث:

سنستخدم في بحثنا طريقة النمذجة باستخدام حزمة برنامج Matlab [13,15]، وهي لغة برمجة يتم استخدامها لأغراض التحليل العددي ومعالجة المصفوفات وعرض المنحنيات والبيانات وتنفيذ الخوارزميات وإنشاء واجهات المستخدم، ويلحق بالبرنامج صناديق الأدوات التي تسهل عملية النمذجة والمحاكاة مثل مكتبات Simulink التي سنستخدمها في بحثنا هذا، بالإضافة لواجهات المستخدم المرئية GUI التي سيتم استخدامها لإنشاء واجهة البرنامج وعرض النتائج.

5- منهجية البحث المتبعة:

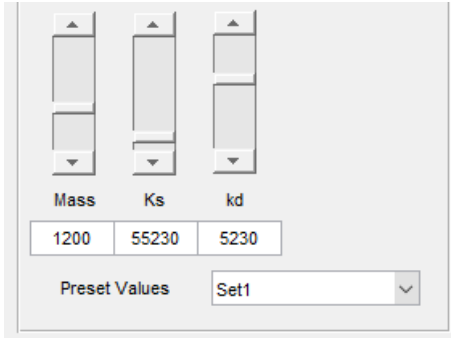
بعد استعراض العديد من الأبحاث العلمية المرتبطة بأنظمة التعليق المختلفة [5,6,8,9,16]، حيث اتبع الباحثون، كلُّ على حدة، جزءاً من الإجراءات الآتية لدراسة حساسية استجابة نظام التعليق للاهتزازات والصدمات

الناجمة عن تغيرات الطريق المختلفة كتابع لخصائص المركبة ومكونات منظومة التعليق والتي يمكن تلخيصها بالبنود الآتية:

- اختيار النابض والمخمد المناسبين لعربة ذات كتلة محددة.
- تحديد الحمولة القصوى لمركبة ذات تعليقة محددة الموصفات (K_s و K_d)، بحيث تحافظ على راحة الركاب، وصفاء حركة السيارة.
- دراسة تحليلية لنظام التعليق المدروس بهدف الحصول على النموذج الرياضي المعبر عنه.
- اختبار مصداقية النماذج المختلفة.
- تحديد مجموعة من إشارات الدخل المعبرة عن تعرجات الطريق مثل: مطب، حفرة، حافة، تابع رياضي؛ علماً أن شكل التابع الرياضي المعبر عن تعرجات الطريق هو عبارة عن قياس حقيقي أو نمذجة رياضية لتعرجات الطريق، والتي تكون تابعاً لكل من سرعة المركبة وتسارعها [7].

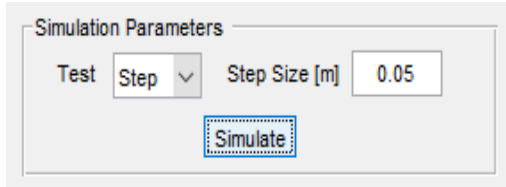
يمكن للباحث أن يحصل على هذه القياسات بإجراء تجارب فعلية أثناء مسير المركبات على الطرق المراد نمذجة تعرجاتها باستخدام معدات خاصة تشمل على حساسات وأجهزة استقبال [4].

- إجراء تجارب محاكاة عددية على النموذج، وإظهار استجابة المنظومة لإشارات الدخل المختلفة.
- استخلاص نتائج المحاكاة للنموذج.
- دراسة حساسية النموذج لتغير البارامترات المختلفة: كتلة السيارة وخصائص التعليقة (معامل التخميد وثابت صلابة النابض) وخصائص العجلة.
- إظهار تغير الاستجابة كتابع للبارامترات المختلفة.



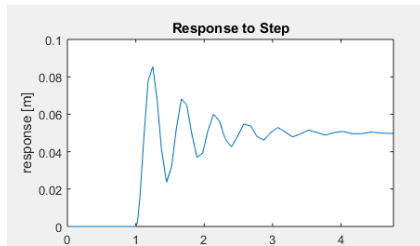
الشكل (4): اختيار بارامترات النموذج في واجهة البرنامج.

- تحديد طبيعة الطريق المراد اختبار النموذج عليه (مطب، حفرة، حافة) حيث يكون على شكل تابع رياضي قادر على التعبير عن تعرجات الطريق، وتحديد قيمة المطال. (الشكل 5)



الشكل (5): اختيار طبيعة الطريق في واجهة البرنامج.

- إجراء تجارب محاكاة عددية على النموذج، وإظهار استجابة المنظومة لتعرجات الطريق المختار (الشكل 6).



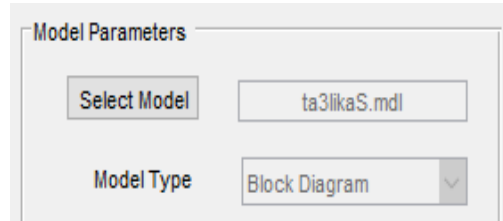
الشكل (6): استجابة المنظومة.

- استخلاص نتائج المحاكاة للنموذج بشكل تلقائي مثل: زمن الاستقرار (settling time)، والتجاوز الأعظمي لقيمة الدخل (over shoot).

6- واجهة الأداة:

تم تصميم واجهة برنامج الأداة وتطويرها لتسمح باختبار مصداقية النماذج المختلفة، وبحيث يكون المستخدم قادراً على:

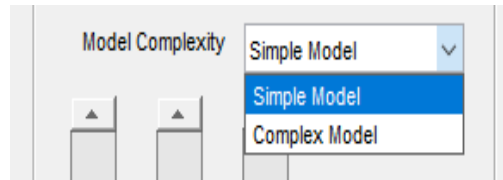
- اختيار النموذج المراد دراسة استجابته من حيث:
- نوع النموذج: يقوم البرنامج تلقائياً بتعرف نوع النموذج الذي تم اختياره من بين النماذج المبينة في البندين (3-1-7 و 4-1-7) كما هو مبين في الشكل 2.



الشكل (2): اختيار نوع النموذج

في واجهة البرنامج.

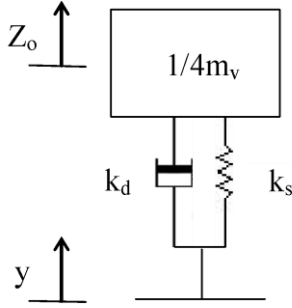
- درجة تعقيد النموذج: يمكن اختيار النموذج المبسط (بإهمال نابضية وتخميذ العجلة)، أو النموذج المعقد (بأخذ نابضية العجلة وتخميذها بعين الاعتبار).



الشكل (3): إمكانية اختيار

النموذج البسيط أو المعقد.

- تحديد قيمة بارامترات النموذج: (كتلة السيارة، ثابت صلابة نابض التعليق، ثابت صلابة مخمد التعليق، خصائص العجلة من حيث النابضية والتخميذ) حيث يمكن تغيير كل بارامتر على حدة، أو يمكن اختيار قيم محددة مسبقاً لتعليقات بارامتراتها معلومة (الشكل 4).

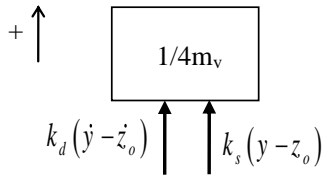


الشكل (9): نموذج تعليق
مستقلة لربع المركبة

حيث y إشارة الدخل: وهي عبارة عن التغير الشاقولي لسطح الطريق. و z_0 إشارة الخرج: وهي التغير الشاقولي لموضع مركز ثقل الكتلة الفوقية.

2.7 الدراسة التحليلية لنموذج تعليق المركبة المبسط:

1. 2.7 رسم مخطط الجسم الحر لربع كتلة السيارة (الشكل 10).



الشكل (10): مخطط الجسم الحر لربع كتلة السيارة.

2. 2.7 إيجاد المعادلة التفاضلية المعبرة عن حركة المنظومة:

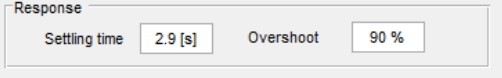
نطبق قانون نيوتن الثاني على ربع كتلة السيارة:

$$\sum F = \frac{1}{4} m_v \ddot{z}_0$$

$$\frac{1}{4} m_v \ddot{z}_0 = k_s (y - z_0) + k_d (\dot{y} - \dot{z}_0)$$

$$\ddot{z}_0 = \frac{4k_s}{m_v} y - \frac{4k_s}{m_v} z_0 + \frac{4k_d}{m_v} \dot{y} - \frac{4k_d}{m_v} \dot{z}_0 \quad (1)$$

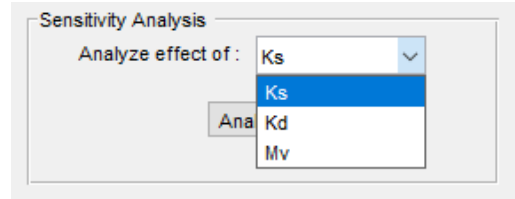
وهي المعادلة التفاضلية أو النموذج الرياضي المعبر عن المنظومة، والتي يمكن استخدامها لبناء النموذج المبين في الملحق.



الشكل (7): استجابة الحالة المستقرة

والتجاوز الأعظمي لقيمة الدخل.

- دراسة حساسية النموذج لتغير البارامترات المختلفة: مثل كتلة السيارة وخصائص التعليق (معامل التخميد، وثابت صلابة النابض) بغية الاختيار الأمثل لهذه البارامترات.



الشكل (8): اختيار البارامترات

لتحليل حساسية المنظومة.

7- شرح طريقة بناء البرنامج وعمله،

والنتائج المستخلصة من خلال مثال:

النموذج المدروس:

يتم نمذجة المنظومة بأخذ مجموعة من فرضيات التبسيط، بحيث نفترض أن تعليق كل عجلة من عجلات السيارة متطابقة، وبإهمال الكتلة السفلية و نابضية العجلة ومعامل تخميدها، وهي بارامترات يمكن إدخالها في الأداة عند اختبار نماذج أكثر تعقيداً [1,2,17].

يأخذ النموذج بعين الاعتبار الكتلة الفوقية، وهي عبارة عن ربع كتلة السيارة m_v ، ومحمد ذي معامل تخميد k_d ، ونابض معامل مرونته k_s كما هو مبين في الشكل (9).

4. 2.7 الطريقة الثانية:

نموذج فضاء الحالة (state space): هي إحدى طرق تبسيط حل المعادلة التفاضلية ذات الرتبة العالية بتحويلها إلى مجموعة من المعادلات التفاضلية من الرتبة الأولى باستخدام متغيرات وسيطة تدعى متغيرات الحالة [17].

ويتم اختيار متغيرات الحالة بما يتوافق مع رتبة المعادلات التفاضلية المعبرة عن المنظومة، وهي في مثالنا من الدرجة الثانية، ومن ثم يلزمنا متغيري حالة.

نفرض أن:

$$z_o = x_1 \Rightarrow \dot{z}_o = \dot{x}_1 = x_2$$

$$\dot{z}_o = x_2 \Rightarrow \ddot{z}_o = \dot{x}_2$$

وتكون متغيرات الحالة: x_1, x_2

وبالنسبة لإشارة الدخل نفرض أن:

$$y = u_1$$

$$\dot{y} = u_2$$

بالتعويض في المعادلة (1) ينتج:

$$\dot{x}_2 = \frac{4k_s}{m_v} u_1 - \frac{4k_s}{m_v} x_1 + \frac{4k_d}{m_v} u_2 - \frac{4k_d}{m_v} x_2 \quad (2)$$

المعادلات العامة لصيغة فضاء الحالة تأخذ الشكل

الآتي:

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx + Du$$

معادلة الحالة:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{4k_s}{m_v} & -\frac{4k_d}{m_v} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{4k_s}{m_v} & \frac{4k_d}{m_v} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}$$

معادلة الخرج:

$$z_o = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}$$

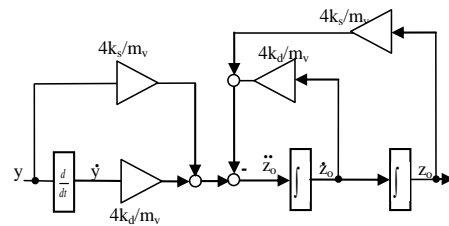
وتكون المصفوفات المعبرة عن بارامترات فضاء الحالة:

يلحظ في هذه الطريقة أن المعادلة التفاضلية الناتجة هي تعبير مجرد يصعب على الطالب ملامسة محتواه الفيزيائي، ولذلك يلجأ للطريقة الثانية التي تعتمد على رسم مخطط صندوقي يعبر عن النموذج الرياضي المدروس.

3. 2.7 الطريقة الأولى:

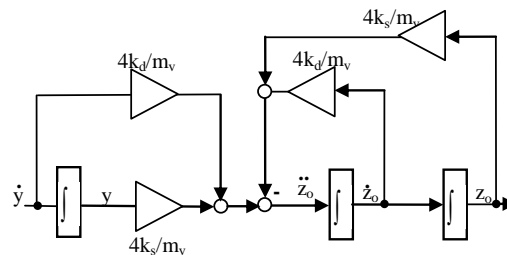
المخطط الصندوقي (block diagram) وهو أحد طرق التعبير عن المعادلة التفاضلية، ويمكننا من إدخالها إلى Matlab من خلال مكتبات Simulink بحيث يتم إيجاد الاستجابة لتعرجات الطريق [17] ، ويمكن اعتبار إشارة دخل المخطط الصندوقي هي الإزاحة الشاقولية التي تتعرض لها العجلة y كما هو مبين في الشكل 11.

كما يمكن اعتبار إشارة الدخل هي سرعة التغيير الشاقولي لسطح الطريق \dot{y} ، ورسم المخطط الصندوقي المعبر عن حركة المنظومة في هذه الحالة كما هو مبين في الشكل 12.



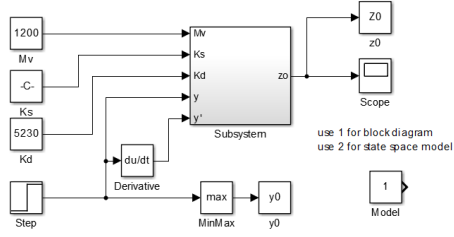
الشكل (11): المخطط الصندوقي للنموذج باعتبار إشارة

الدخل y .



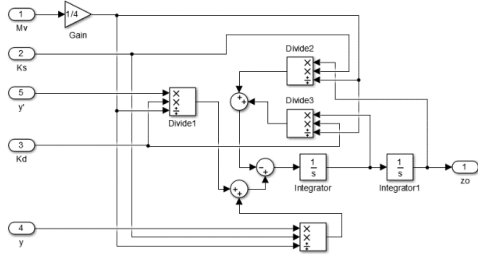
الشكل (12): المخطط الصندوقي للنموذج

باعتبار إشارة الدخل \dot{y} .



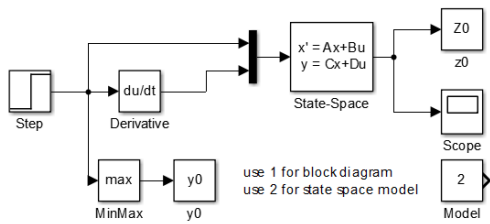
الشكل (14): المخطط الصندوقي للنموذج المدروس

ويبين الشكل 15 تفاصيل النموذج المصمم وفق طريقة المخطط الصندوقي.



الشكل (15): تفاصيل المخطط الصندوقي.

كما يظهر الشكل 16 تفاصيل النموذج المصمم وفق طريقة نموذج فضاء الحالة.



الشكل (16): مخطط نموذج فضاء الحالة.

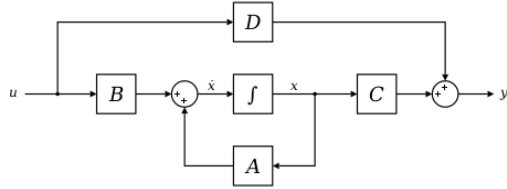
نتائج المحاكاة:

يتم استخلاص نتائج المحاكاة على شكل مخططين بيانيين، يبين المخطط الأول الاستجابة لتعرجات الطريق،

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{-4k_s}{m_v} & \frac{-4k_d}{m_v} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{4k_s}{m_v} & \frac{4k_d}{m_v} \end{bmatrix}$$

$$C = [1 \quad 0], \quad D = [0 \quad 0]$$

ويتم إدخال هذه المصفوفات عن طريق نموذج Simulink ويتم تعديل البارامترات (m_v , K_s , K_d) من خلال الأداة المصممة ويكون المخطط الصندوقي المعبر عن نموذج فضاء الحالة كما هو موضح في الشكل 13.



الشكل (13): المخطط الصندوقي لنموذج فضاء الحالة.

3.7 بناء الأداة اعتماداً على الدراسة التحليلية:

تم بناء الأداة باستخدام Matlab/ Simulink وتم نمذجة المخطط الصندوقي ونموذج فضاء الحالة، وتم ربط هذه النماذج بالأداة باستخدام واجهات المستخدم المرئية GUI لإنشاء واجهة البرنامج وعرض النتائج. ويأخذ بعين الاعتبار اختيار إشارة الدخل الناتجة عن تعرجات الطريق، واختيار نوع النموذج المراد دراسته، ومجموعات من البارامترات لتعليقات لمركبات مختلفة، كما يمكن إدخال بارامترات جديدة مختلفة عن البارامترات المعطاة في المجموعات، حيث يتم معالجة هذه المعطيات وإعطاء الاستجابة لتعرج الطريق المفترض، كما يعطي البرنامج استجابة الحالة المستقرة، وتجاوز قيمة الدخل، ويقوم أيضا بدراسة تغير أحد بارامترات التعليق مع ثبات البارامترات الأخرى.

يبين الشكل 14 شكل المخطط الصندوقي المدمج في

الأداة

وذلك بإدخال هذه البارامترات في الخانات رقم (1) من الشكل 17.

وتم اختيار نموذج فضاء الحالة الذي تمت نمذجته وفقاً للشكل 16 وتم إدخال نوع النموذج لأداة المحاكاة في الخانة رقم (2) من الشكل 17، وتم تحديد مطال إشارة الدخل، وهو تابع الخطوة في الخانة رقم (3) من الشكل 17.

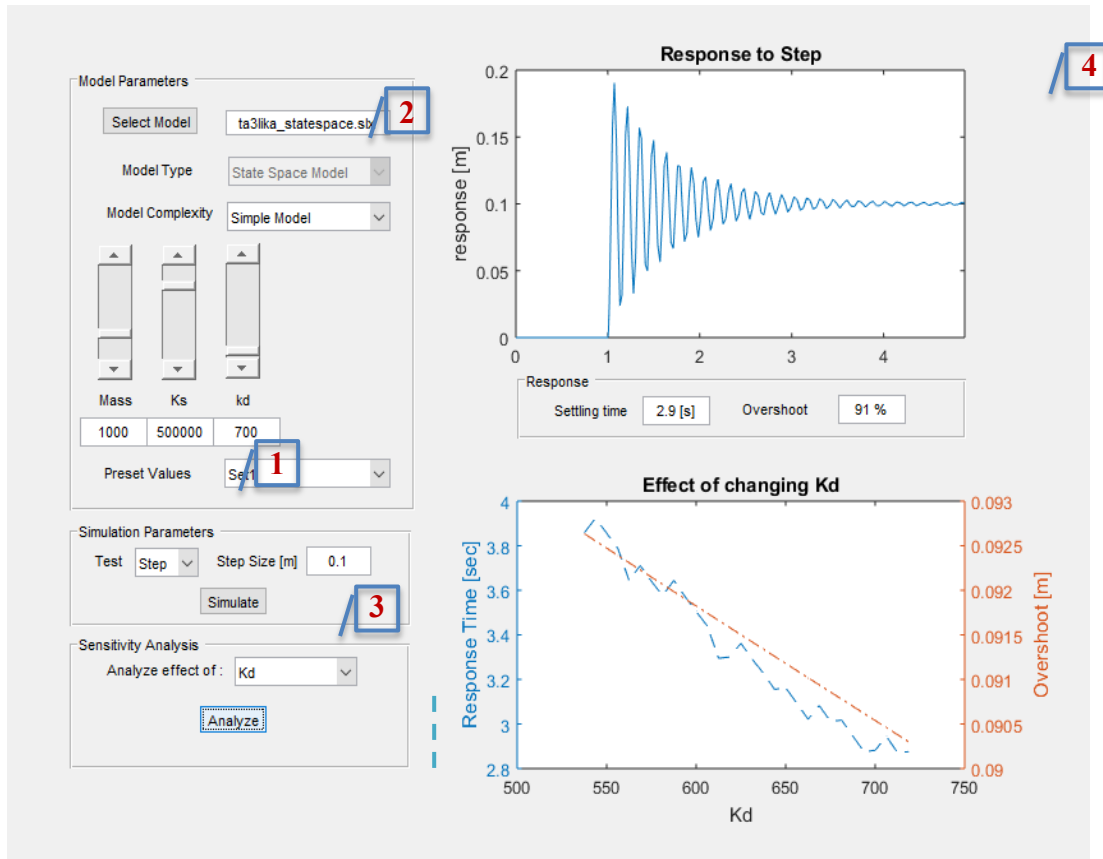
وتم إظهار نتيجة التجربة العددية (المحاكاة) في الخانة رقم (4) من الشكل 17.

في حين يبين المخطط الثاني حساسية المنظومة لتغير بارامترات التعليقة،

بالإضافة للمخططين هناك نافذتان تعطيان قيمة زمن الاستقرار (settling time)، والتجاوز الأعظمي لقيمة الدخل (over shoot) كما هو موضح في الشكل 17.

اختبار الأداة من خلال مثال تطبيقي:

تم استخدام الأداة لاختبار نظام تعليق لمركبة صغيرة كتلتها [kg] 1000 ومزودة بنابض ثابت صلابته 500×10^3 [N/m] ومخمّد ثابت تخميده 700 [N.s/m]



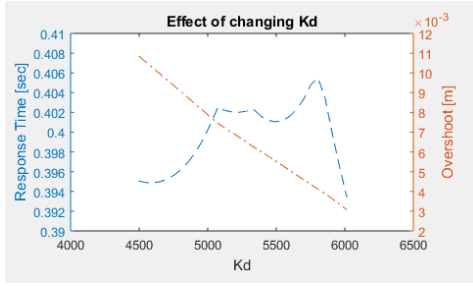
الشكل (17): واجهة البرنامج مع نوافذ إظهار النتائج.

1- حساسية المنظومة لتغير ثابت النابض:

يبين الشكل 18 حساسية المنظومة لتغير ثابت صلابة نابض التعليقة، مع تثبيت كتلة السيارة وثابت تخميد المخمد، لإحدى الحالات المدروسة حيث نستطيع

6.7 حساسية النموذج لتغير البارامترات:في

الجانب البحثي تقود دراسة حساسية أحد البارامترات مع تثبيت البارامترات الأخرى إلى إيجاد القيم المثلى للبارامتر المدروس.



الشكل (19): حساسية المنظومة

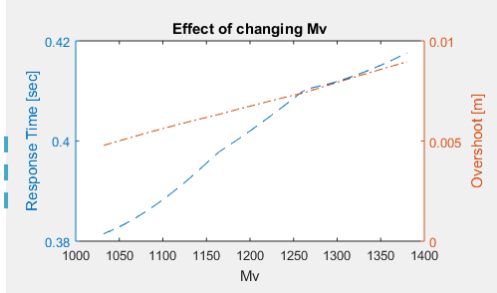
لتغير ثابت المخمد @ $k_d=55230[\text{Ns/m}]$,
 $m_v=1200[\text{kg}]$

3- حساسية المنظومة لتغير الكتلة:

كما يبين الشكل 20 حساسية المنظومة لتغير كتلة السيارة، مع تثبيت ثابت المخمد وثابت صلابة النابض، لإحدى الحالات المدروسة، حيث تم رسم الاستجابة عند تغير كتلة السيارة ضمن المجال:

$[-1200 \times 15\%, 1200, +1200 \times 15\%]$ [kg]

نلاحظ أن زمن الاستجابة والتجاوز الأعظمي لقيمة الدخل يأخذان منحى تصاعدياً، ولكن التغير طفيف.



الشكل (20): حساسية المنظومة لتغير الكتلة @

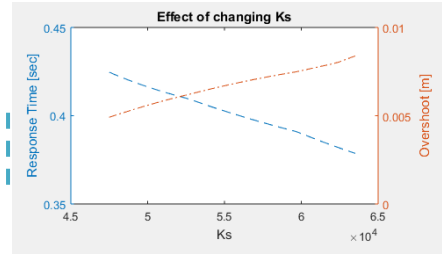
$k_d=5230[\text{Ns/m}]$, $k_s=55230[\text{N/m}]$

إن هذه النتائج تختلف بحسب الحالة المدروسة، وبما أنه لم يظهر تأثير كبير للحساسيات في الحالات المعروضة، فإن هذا يدل على أن القيم المختارة لبارامترات التعليق (k_d, k_s) جيدة بالأساس.

بينما يبين الشكل 20 حالة أخرى حيث يظهر تأثير حساسية k_d في زمن الاستقرار بشكل أكبر بسبب اختيار قيمة بدائية غير موفقة.

رسم الاستجابة عندما يتغير ثابت صلابة النابض ضمن المجال

$[-5.5 \times 10^4 \times 15\%, 5.5 \times 10^4, +5.5 \times 10^4]$ [N/m]
 نلاحظ أن زمن الاستجابة يتناقص كلما ازداد ثابت الصلابة، وأن تجاوز قيمة الدخل العظمى تتناسب طردياً مع ازدياد ثابت صلابة النابض، وأن القيمة المقابلة لثابت صلابة $5.2 \times 10^4[\text{N/m}]$ وهي القيمة التي تعطي تسوية بين الرغبة بزمن استقرار سريع، وتجاوز أعظمي صغير لقيمة الدخل.



الشكل (18): حساسية المنظومة

لتغير ثابت النابض @ $k_d=5230[\text{Ns/m}]$,
 $m_v=1200[\text{kg}]$

2- حساسية المنظومة لتغير ثابت المخمد:

ويبين الشكل 19 حساسية المنظومة لتغير ثابت مخمد التعليق، مع تثبيت كتلة السيارة وثابت صلابة النابض، لإحدى الحالات المدروسة، حيث تم رسم الاستجابة لتغير ثابت المخمد ضمن المجال $[-5250 \times 15\%, 5250, +5250 \times 15\%]$ [Ns/m] تغير ثابت المخمد k_d لا يغير من زمن الاستجابة (التغير صغير جداً بحدود 0.1%)، بينما يتأثر مقدار التجاوز الأعظمي لقيمة الدخل حيث يهبط من 11mm إلى 2mm.

المراجع REFERENCES

- [1] د. عبد الحليم السيد، "هندسة السيارات - نظرية السيارة" منشورات جامعة دمشق
- [2] د. عبدو شحادة، د. وعد عمران، "ديناميك الآلات والاهتزازات" منشورات جامعة دمشق (2016).
- [3] ASTM E1926-08; « Standard Practice for Computing International Roughness Index of Roads from Longitudinal Profile Measurements ». American Society for Testing and Materials International. (2015).
- [4] Baggio De Mello M. H., B., Idehara J. S., «Measurement and Analysis of Vehicle Comfort and Road Quality» International Journal of Research in Engineering and Technology, <https://doi.org/10.15623/ijret.2018.0709011>, (2018)
- [5] James T. A., Tinghao G., Zhi H., « Co-Design of an Active Suspension Using Simultaneous Dynamic Optimization» Journal of Mechanical Design by ASME Vol136 / 081003-1. (2014)
- [6] Kuznetsov A., Mammadov M., Sultan I., Hajilarov E., «Optimization of improved suspension system with inerter device of the quarter-car model in vibration analysis», Applied Mechanics (2010)
DOI: 10.1007/s00419-010-0492-x
- [7] Lajqi Sh., Pehan S., «Designs and Optimizations of Active and Semi-Active Non-linear Suspension Systems for a Terrain Vehicle», Journal of Mechanical Engineering, vol 58, p. 732-743, (2012).
- [8] Lajqi Sh., Gugler J., Lajqi N., Shala, A., Likaj R., «Possible experimental method to determine the suspension parameters in a simplified model of passenger car», International Journal of Automotive Technology, vol. 13, no. 4, p. 615-621, (2012).
- [9] Mouleeswaran S. k., « Genetic algorithm-based proportional derivative controller for the development of active suspension system» ISSN 1392 – 124X Information Technology and Control, vol. 36, no 1, (2007).
- [10] Popovic, V., Vasic, B., Petrovic, M., Mitic, S., «System Approach to Vehicle Suspension System Control in CAE Environment », Journal of Mechanical Engineering vol. 57, 2, p. 100-109, (2011).

9- الخلاصة:

مكنتنا هذه الدراسة من تصميم أداة لدراسة التأثير المتبادل للبارامترات المختلفة المؤثرة في تصميم أو اختيار عناصر التعليق المستقلة في المركبة، والتي تتعرض لتأثير تعرجات الطريق. وقد سمحت باستخراج عدة نقاط أساسية:

- الأداة بحثية تسمح للباحث بإجراء تجارب محاكاة رقمية، واختيار أفضل الطول لاختيار التعليق المناسبة لسيارة معينة من حيث زمن الاستجابة وتجاوز إشارة الدخل الأعظمي.
 - كما تسمح للباحث بإدخال تعرجات الطريق على شكل تابع رياضي، بالإضافة لإمكانية البرنامج إعطاء الاستجابة لإشارات الدخل القياسية.
 - الأداة قادرة على اختبار نماذج مبنية على شكل مخططات صندوقية، أو على شكل نموذج فضاء الحالة.
 - تمكن الأداة الطالب من تعرف عناصر التعليق، واختبار صحة نمودجه، وإجراء تجارب محاكاة عددية على النموذج، وإظهار استجابة المنظومة لإشارات الدخل المختلفة.
- يمكن تطوير هذه الأداة في المستقبل لدراسة أنواع أخرى من النماذج على سبيل المثال نموذج تعليقة كاملة للمركبة، ودراسة حالات أخرى لتعرجات الطريق. ملاحظة: يمكن للمهتمين الحصول على الأداة بالتواصل مع ناشري البحث.

- [11] Sehovic J., Pikula B., « Automatic Determination of PID Controller Parameters by Using Simulink and Its Justification in Simulating Vehicle Active Suspension System » International Journal of Engineering and Scientific Research, ISSN: 2347-6532 , Vol.4 Issue 12, (2016).
- [12] Guo S., Yang S., Pan C., «Analysis on Harmonic Responses of Vehicle Suspension Systems With Magneto-rheological Dampers». ASME International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, Long Beach, California USA, September 24-28, (2005).
- [13] S. R. Otto; J. P. Denier; «An introduction to programming and numerical methods in Matlab», ISBN-13: 978-185233-919-7; Springer (2005)
- [14] Taskin Y., Hacioglu Y., Yagiz N., « The Use of Fuzzy-Logic Control to Improve the Ride Comfort of Vehicles» Journal of Mechanical Engineering vol. 53, 4, p. 233-240, (2007).
- [15] The MathWorks « Learning MATLAB». ISBN 0-9755787-6-6 .(2005),
- [16] VERROS G., NATSIAVAS S., PAPANIMITRIOU C., «Design Optimization of Quarter-car Models with Passive and Semi-active Suspensions under Random Road Excitation», Journal of Vibration and Control, vol. 11:P. 581–606, (2005). DOI: 10.1177/1077546305052315
- [17] William Bolton., «Mechatronics: Electronic control systems in mechanical and electrical engineering », ISBN 978-1-292-07668-3, Sixth edition, Pearson Education Limited, (2015).

Received	2020/07/20	إيداع البحث
Accepted for Publ.	2020/10/15	قبول البحث للنشر