

تأثير نوابض التعليق ومخمّذات الاهتزاز في سلاسة حركة السيّارة

د.م. جمعة شحادة¹

أستاذ مساعد - قسم هندسة السيارات والآليات الثقيلة- كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية-جامعة دمشق

الملخص

شهدت السنوات الأخيرة تطوراً ملحوظاً في أنظمة التعليق المستخدمة في السيارات، نظراً للدور البارز الذي تلعبه في امتصاص الاهتزازات وإخمادها. يكمن الهدف الرئيسي لهذا البحث في دراسة تأثير نوابض التعليق ومخمّذات الاهتزاز في سلاسة حركة السيّارة بشكل خاص، وتحليل أداء نظام التعليق بوجه عام.

استخدمت في هذا العمل الأساليب الحديثة في البحث العلمي، والتي تشمل عمليات النمذجة والمحاكاة باستخدام طريقة فضاء الحالة وبرنامج Matlab-2018 من ناحية، وعمليات النمذجة والمحاكاة باستخدام برنامج Simulink من ناحية ثانية، بالإضافة إلى استخدام برنامج الحسابات الشهير Excel

لقد أظهرت نتائج هذا البحث بأنه من أجل الحصول على أفضل الحلول بشأن الحد من الآثار الضارة للقوى الديناميكية والاهتزازات المتولدة عند حركة السيارة على الطرقات غير المستوية اعتماد الآتي: 1- أن تشكل قساوة نابض التعليق وسطياً (10-20%) من قساوة إطار العجلة، 2 - أن تقع شدة التخامد λ المسموح بها لسيارات الركوب في المجال (0.3-0.6) تقادياً لخطر الوقوع في ظاهرة الطنين. كما أظهرت نتائج هذا البحث الترددات الذاتية ومواصفات الحركة الاهتزازية لجسم السيارة، وذلك بالنسبة لحالتين دراسيتين مختلفتين إحداهما سيارة ركوب سياحية والأخرى شاحنة. وللدراسات المستقبلية ينبغي العمل على تطوير النموذج الديناميكي لجملة التعليق، بما يؤدي إلى زيادة الراحة في الركوب.

الكلمات المفتاحية: نظام التعليق، القساوة، مخمذات الاهتزاز، سلاسة الحركة، فضاء

الحالة، النمذجة والمحاكاة، شدة التخامد، راحة الركوب.

تاريخ الإيداع: 2022/7/24

تاريخ القبول: 2022/9/13



حقوق النشر: جامعة دمشق -سورية، يحتفظ

المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص

CC BY-NC-SA 04

The influence of suspension springs and vibration dampers on the smoothness of the vehicle motion

Dr. Jumua Shihada

Associate Professor , Department of Automobiles and Heavy Machines Engineering.
Faculty of Mechanical & Electrical Engineering. Damascus University.

Abstract

Recent years have witnessed a significant development in the suspension systems used in motor vehicles, due to the important role they play in absorbing and damping vibrations. The main objective of this research is to study the effect of suspension springs and vibration dampers on the smoothness of motion of the vehicle in particular, and to analyze the performance of the suspension system in general.

In this work, the modern scientific methods were applied, which include modeling and simulation operations using the state space method and Matlab-2018 program on the one hand, and modeling and simulation operations using Simulink program on the other hand. In addition to using the famous program Excel.

The results of the research showed that in order to obtain the optimal solutions for reducing the harmful effects of the dynamic forces, and vibrations generated when the car is moving on uneven roads, the following should be adopted: 1 - the average stiffness of the suspension spring must be in the range (10-20)% of the stiffness of the wheel tire, 2 - the allowed damping intensity λ for passenger cars must be in the range (0.3-0.6) in order to avoid the risk of resonance. The results of the research also showed the natural frequencies and specifications of the vibration of the vehicle body for two different study cases, one of which is a passenger car and the other is a truck. For future studies, work should be done to develop the dynamic model of the suspension system, which leads to an increase in riding comfort.

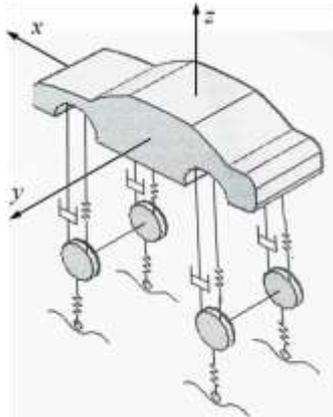
Keywords: suspension system, stiffness , vibration dampers, smoothness of motion, state space , modeling and simulation , damping intensity , ride comfort .

Received: 24/7/2022

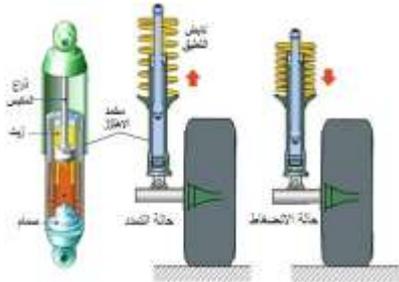
Accepted: 13/9/2022



Copyright: Damascus University- Syria, The authors retain the copyright under a CC BY- NC-SA



الشكل (1) مخطط عام لنظام التعليق



الشكل (2) مكونات مجموعة التعليق ومبدأ عملها

يتناول البحث الحالي تحليل أداء جملة التعليق بتطبيق الأساليب الحديثة في البحث ولاسيما علم المحاكاة، والذي يتضمن الخطوات الآتية [3]:

① - تحديد اشكالية البحث وخطته:

يتطرق هذا البحث إلى دراسة تأثير نوابض التعليق ومخمدات الاهتزاز على سلاسة حركة السيارة من ناحية، ومحاكاة نظام التعليق من ناحية ثانية.

② - جمع المعلومات [8]:

يشمل جمع المعلومات تحديد المعطيات الواردة في الجدولين (1) و (2)، والمتعلقة بالحالات المراد دراستها المبينة في الشكلين (3) و (4).

③ - اعداد النموذج الديناميكي:

للحصول على النموذج الديناميكي للنظام المدروس، وكما جرت العادة في العديد من الأبحاث، يمكن تقسيم نظام تعليق

1- المقدمة:

ترتبط معرفة مدى صلاحية السيارة للعمل في ظروف التشغيل المختلفة بمجموعة من الخصائص الاستثمارية، والتي يدخل في عدادها سلاسة أو صفاء الحركة [1,2].

هذا وتعتمد سلاسة حركة السيارة على خصائص نوابض التعليق ومخمدات الاهتزاز، وكذلك على نوع الإطارات المستعملة. لذلك فإن من المهام الأساسية للمصمم هي تصميم جملة تعليق تؤمن إمكانية السير السلس للسيارة على الطرق غير المستوية دون أن تكون هناك ارتجاجات تؤثر في السائق والركاب والحمل المنقول. تتعرض السيارة في أثناء الحركة كما

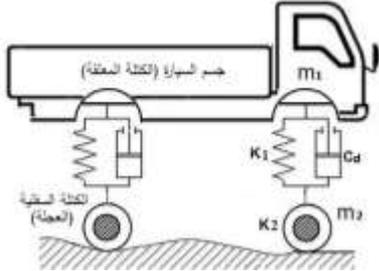
في الشكل (1) لأنواع الاهتزازات الآتية [2]:

- (a) اهتزازات طولية باتجاه المحور x .
- (b) اهتزازات عرضية باتجاه المحور y .
- (c) اهتزازات شاقولية باتجاه المحور z .
- (d) اهتزازات زاوية حول المحور x .
- (e) اهتزازات زاوية حول المحور y .
- (f) اهتزازات زاوية حول المحور z .

وهكذا فإن السيارة عبارة عن مجموعة اهتزازية معقدة، ذات درجات طلاقة متعددة. إلا أن الاهتزازات التي تؤثر بشكل رئيسي في سلاسة حركة السيارة هي الاهتزازات الخطية الشاقولية، باتجاه المحور Z ، والاهتزازات الزاوية حول المحور العرضي الأفقي x .

إن الغرض من نوابض التعليق هي امتصاص طاقة الصدم والارتجاجات الناجمة عن وعورة الطريق، أما مخمدات الاهتزاز فمهمتها تبديد تلك الطاقة. يبين الشكل (2) مبدأ عمل مجموعة التعليق في حالتها التمدد والانضغاط.

قساوة الإطار	K_2	175	175	kN/m
معامل التخماد	C_d	3.311	2.207	kN.s/m



الشكل (4) رسم تخطيطي مبسط لنظام التعليق في الشاحنة

الجدول رقم (2) معطيات نظام تعليق الشاحنة [8]

Parameters		Front	Rear	Units
الكتلة المعلقة	m_1	820	994	kg
الكتلة السفلية	m_2	133	321	kg
قساوة النابض	K_1	151	366	kN/m
قساوة الإطار	K_2	809	809	kN/m
معامل التخماد	C_d	11.34	27.41	kN.s/m

2- الترددات الذاتية لنظام التعليق:

يُعدُّ التردد الذاتي للحركة الاهتزازية من أهم مؤشرات تقييم سلاسة حركة السيارة، إذ ترتبط مواصفات الحركة ارتباطاً وثيقاً بتردها الذاتي.

ولكي تكون عملية حساب الترددات الذاتية لنظام التعليق المعقد ممكنة، يتوجب تبسيطها بشكل تتوضح معها قوانين الحركة الاهتزازية. إنّ الكتل السفلية لنظام التعليق أصغر بكثير من الكتل المعلقة، كما أن قساوة نوابض التعليق أصغر بعدة مرات من قساوة الإطارات. ونتيجة لهذا يكون تردد الاهتزازات الحرة للكتل السفلية أكبر بكثير من تردد الاهتزازات الحرة للكتل المعلقة. ولهذا فإنّ اهتزازات العجلات تنعكس بشكل بسيط نسبياً على انتقال الكتل المعلقة.

تشير الدراسات والأبحاث المختلفة [6] إلى أن الاهتزازات التي تتعرض لها السيارات يمكن تقسيمها حسب التردد إلى نوعين: اهتزازات عالية التردد تتعرض لها الكتل السفلية، وتقع ضمن المجال (5-15) Hz، واهتزازات منخفضة التردد تتعرض لها الكتل المعلقة تقع في المجال (1-2.5) Hz.

السيارة إلى من أربع جمل تعليق مستقلة، اثنتان منها أمامية (front) واثنتان خلفية (rear).

④- اعداد النموذج الرياضي:

تتضمن هذه الخطوة استنتاج العلاقات الرياضية التي تحدد السلوك الديناميكي لنظام التعليق.

⑤- تصميم برنامج حاسوبي:

الخطوة الخامسة في المحاكاة تصميم برنامج حاسوبي يقوم بحل المعادلات الرياضية الواردة في الخطوة السابقة. ولانجاز الدراسة الحالية وقع الاختيار على برنامج الحسابات Matlab- 2018.

⑥- التحقق من حسابات البرنامج:

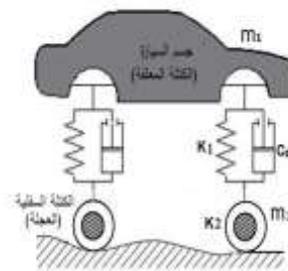
الخطوة السادسة في المحاكاة هي التأكد من أن العمليات الحسابية تمت بنجاح دون أخطاء.

⑦- التحقق من صلاحية النموذج الديناميكي:

في هذه الخطوة يجري التأكد من أن النموذج الديناميكي يحاكي النظام الحقيقي بشكل دقيق.

⑧- التجريب وتحليل النتائج:

في هذه الخطوة يجري تنفيذ عملية المحاكاة على نوعين من السيارات إحداهما سياحية والأخرى شاحنة [8]، وبعدها يجري تفسير النتائج.



الشكل (3) رسم تخطيطي لنظام التعليق في السيارة

الجدول رقم (1) معطيات نظام تعليق السيارة السياحية [8]

Parameters		Front	Rear	Units
الكتلة المعلقة	m_1	255	215	kg
الكتلة السفلية	m_2	48	57	kg
قساوة النابض	K_1	35.7	23.8	kN/m

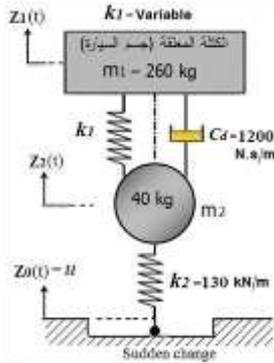
الجدول رقم (3) الترددات الذاتية لجمال التعليق

المؤشرات	السيارة السياحية		الشاحنة	
	front	Rear	front	Rear
m_1 (Kg)	255	215	820	994
m_2 (Kg)	48	57	133	321
K_1 (KN/m)	35.7	23.8	151	366
C_d (KN.s/m)	3.311	2.207	11.34	27.41
K_2 (KN/m)	175	175	809	809
K_e (KN/m)	29.65	20.95	127.2	252
ω_1 (rad/s)	10.78	9.87	12.46	15.92
(Hz)	1.72	1.57	1.98	2.54
K_u (KN/m)	210.7	198.8	960	1175
ω_2 (rad/s)	66.25	59.06	84.96	60.50
(Hz)	10.55	9.40	13.53	9.63
λ	0.60	0.52	0.56	0.87

خلاصة القول: تلعب قساوة نوابض التعليق والإطارات دوراً مهماً في تحديد الترددات الذاتية للاهتزاز.

3- تأثير نوابض التعليق على الأداء:

إنّ دراسة تأثير قساوة النوابض على أداء جملة التعليق [4]، تجري في العديد من الدراسات بالاعتماد على المخطط الحسابي المبسط لجملة التعليق. وللقيام بهذه الدراسة سيتم استخدام معطيات جملة التعليق المبينة في الشكل (5).



الشكل (5) المخطط الحسابي لدراسة تأثير نوابض التعليق

ومن ناحية ثانية سنقوم بإدخال مصطلح نسبة القساوة R_s (Ratio of stiffness) الذي يشير إلى نسبة قساوة الإطارات المطاطية للعجلات إلى قساوة نابض التعليق، أي أن:

$$R_s = K_2/K_1 \quad (4)$$

بعد ذلك نقوم بحساب نسبة الإزاحة الشاقولية R_d (Ratio of displacemen)، والتي تمثل مقدار انتقال جسم

وبناء على ما سبق يمكن التعامل مع كل كتلة من الكتلتين المعلقة (Sprung mass) والسفلية (Unsprung mass) على أنها نظام مستقل، ونتيجة لذلك وبعد اهمال معامل تخامد الإطارات المطاطية للعجلات، يمكن تحديد تردد الاهتزازات الحرة ω_1 للكتلة المعلقة، وللكتلة السفلية ω_2 على النحو الآتي [8]:

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{K_e}{m_1}} ; \omega_2 = \sqrt{\frac{K_u}{m_2}} \quad (1)$$

وتحسب كل من القساوتين K_u و K_e بالعلاقتين :

$$K_e = \frac{K_1 K_2}{K_1 + K_2} ; K_u = K_1 + K_2 \quad (2)$$

هذا وتنعين نسبة التخماد لجملة التعليق بالعلاقة:

$$\lambda = \frac{C_d}{2m_1\omega_1} = \frac{C_d}{2\sqrt{K_e m_1}} \quad (3)$$

وبعد تطبيق هذه العلاقات على السيارتين المدروستين، تمّ التوصل إلى النتائج الموضحة في الجدول (3). وهنا نلاحظ بوضوح أن الكتل المعلقة لنظام التعليق تخضع لتأثير اهتزازات منخفضة التردد، بينما نلاحظ أن الكتل السفلية تخضع لتأثير اهتزازات عالية التردد، وجميعها تقع ضمن الحدود المقبولة لراحة الركوب التي يحتاجها الإنسان.

استواء الطريق. وهنا نلاحظ بوضوح بأنه كلما ارتفعت نسبة القساوة انخفضت قيمة نسبة الانتقال، وازدادت في الوقت ذاته راحة الركوب التي يحتاجها الإنسان. إنَّ قساوة نابض التعليق يجب أن تشكل وسطياً حوالي (10-20)% من قساوة إطار العجلة، وهذا المجال يوافق $R_s > 5$.

الجدول رقم (4) المعطيات الحسابية

المعطيات	الحالة الاولى	الحالة الثانية	الحالة الثالثة
R_s	5	8	12
K_1 (kN/m)	26	16.25	10.83
$A_1 * 10^6$	3380	2113	1408
$B_1 * 10^6$	156	156	156
$A * 10^2$	104	104	104
$B * 10^6$	41.60	38.68	37.05
$C * 10^6$	0.36	0.36	0.36

السيارة Z_1 مقسوماً على مقدار الدخل Z_0 الناتج عن تموج سطح الطريق، وباستخدام العلاقة الآتية [4]:

$$R_d = \sqrt{\frac{A_1^2 + (B_1\omega)^2}{(A\omega^4 - B\omega^2 + A_1)^2 + (B_1\omega - C\omega^3)^2}} \quad (5)$$

حيث تتعين القيم المجهولة الواردة في هذه العلاقة على النحو الآتي:

$$A_1 = K_1 K_2 ; B_1 = K_2 C_d$$

$$A = m_1 m_2$$

$$B = m_2 K_1 + m_1 (K_1 + K_2)$$

$$C = m_1 C_d + m_2 C_d$$

يبين الجدول رقم (4) قيم هذه الثوابت، كما يوضح

الجدول رقم (5) تسلسل عملية الحساب باستخدام برنامج

Excel، وذلك من أجل ثلاث قيم مختلفة للنسبة R_s . يبين

المخطط البياني الموضح في الشكل (6) تغير نسبة الانتقال

كتابع لتردد الاهتزازات ω التي تنجم عن التغير المفاجئ في

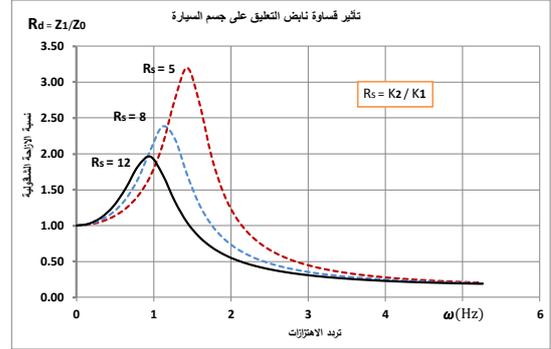
الجدول رقم (5) حساب نسبة الازاحة كتابع لتردد الاهتزازات

تردد الاهتزازات		نسبة الازاحة الشاقولية لجسم السيارة			تردد الاهتزازات		نسبة الازاحة الشاقولية لجسم السيارة		
		الحالة الاولى	الحالة الثانية	الحالة الثالثة			الحالة الاولى	الحالة الثانية	الحالة الثالثة
ω (rad/s)	ω (Hz)	R_d	R_d	R_d	ω (rad/s)	ω (Hz)	R_d	R_d	R_d
0	0.000	1.00	1.00	1.00	17	2.707	0.55	0.41	0.35
1	0.159	1.01	1.02	1.03	18	2.866	0.49	0.38	0.33
2	0.318	1.05	1.08	1.11	19	3.025	0.44	0.35	0.31
3	0.478	1.12	1.19	1.27	20	3.185	0.40	0.32	0.29
4	0.637	1.24	1.37	1.52	21	3.344	0.36	0.30	0.28
5	0.796	1.41	1.65	1.82	22	3.503	0.34	0.28	0.26
6	0.955	1.69	2.05	1.96	23	3.662	0.31	0.27	0.25
7	1.115	2.12	2.38	1.71	24	3.822	0.29	0.26	0.24
8	1.274	2.76	2.21	1.34	25	3.981	0.28	0.25	0.23
9	1.433	3.20	1.71	1.04	26	4.140	0.26	0.24	0.23
10	1.592	2.70	1.29	0.84	27	4.299	0.25	0.23	0.22
11	1.752	1.95	1.00	0.70	28	4.459	0.24	0.22	0.21
12	1.911	1.43	0.81	0.60	29	4.618	0.23	0.21	0.21
13	2.070	1.10	0.68	0.52	30	4.777	0.22	0.21	0.20
14	2.229	0.89	0.58	0.47	31	4.936	0.21	0.20	0.20
15	2.389	0.74	0.51	0.42	32	5.096	0.21	0.20	0.20
16	2.548	0.63	0.46	0.38	33	5.255	0.20	0.19	0.19

الخطوة الثانية في الدراسة هي حساب نسبة قيم الازاحة R_d (Transmissibility) التي تمثل مقدار انتقال جسم السيارة Z_1 مقسوماً على مقدار الدخل Z_0 الناتج عن عدم استواء سطح الطريق. وبعد الرجوع إلى العلاقة التي تحدد نسبة الازاحة الخطية المذكورة سابقاً نقوم بإجراء الحسابات الرياضية باستخدام برنامج Excel عند قيم مختلفة للنسبة λ . يوضح الجدول رقم (6) المعطيات الحسابية للنظام الديناميكي المدروس، بينما يوضح الجدول رقم (7) تسلسل عملية الحساب، وذلك من أجل ثلاث قيم مختلفة للنسبة λ . واستناداً إلى الجدول الأخير تم انشاء المخطط البياني الموضح في الشكل (8) الذي يبين كيف تتغير نسبة الازاحة R_d كتابع لتردد الاهتزازات ω التي تتجم عن عدم استواء الطريق. وهنا نلاحظ بوضوح بأنه كلما ارتفعت شدة التخامد انخفضت قيمة نسبة الازاحة، وازدادت في الوقت ذاته راحة الركوب التي يحتاجها الإنسان. تؤدي شدة التخامد المنخفضة إلى ارتفاع ملموس في نسبة الإزاحة وانخفاض سلاسة حركة السيارة، واحتمال حدوث الطنين (Resonance). ولهذا يسعى المصممون إلى استخدام مخمدات شدة تخامدها عالية نسبياً ($\lambda > 3$).

الجدول رقم (6) المعطيات الحسابية

المعطيات	الحالة الاولى	الحالة الثانية	الحالة الثالثة
λ	0.20	0.40	0.60
C_d (N.s/m)	701	1402	2104
$A_1 * 10^6$	1690	1690	1690
$B_1 * 10^6$	91.15	182.30	273.46
$A * 10^2$	104	104	104
$B * 10^6$	37.70	37.70	37.70
$C * 10^6$	0.21	0.42	0.63



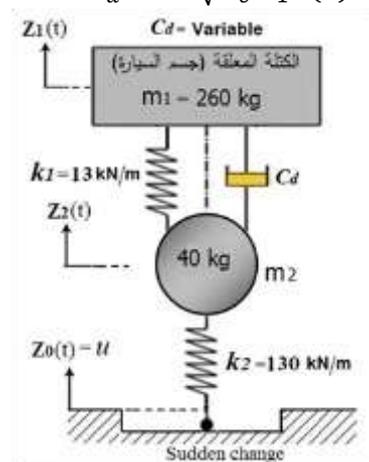
الشكل (6) منحنيات تأثير قساوة نابض التعليق على اهتزازات جسم السيارة

4- تأثير مخمدات الاهتزاز على الأداء

إن دراسة تأثير مخمدات الاهتزاز على أداء جملة التعليق مماثلة من حيث المبدأ لدراسة تأثير قساوة نوابض التعليق على اهتزازات جسم السيارة [4]. تكمن الخطوة الاولى في هذه الدراسة في اختيار المعطيات كما هو موضح في الشكل (7). في هذه الحالة، سيكون المتغير الوحيد التابع لجملة التعليق المفروضة هو معامل التخامد C_d ، والذي يمكن حسابه مباشرة من خلال علاقة نسبة التخامد λ (Ratio of damping) الآتية:

$$\lambda = \frac{C_d}{2\sqrt{K_e m_1}}$$

$$C_d = 2\lambda \sqrt{K_e m_1} \quad (6)$$

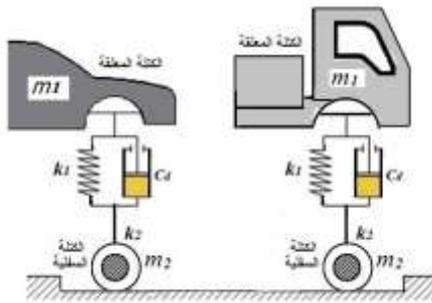


الشكل (7) المخطط الحسابي لدراسة تأثير مخمدات الاهتزاز

الجدول رقم (7) حساب نسبة الازاحة الشاقولية لجسم السيارة كتابع لتردد الاهتزازات

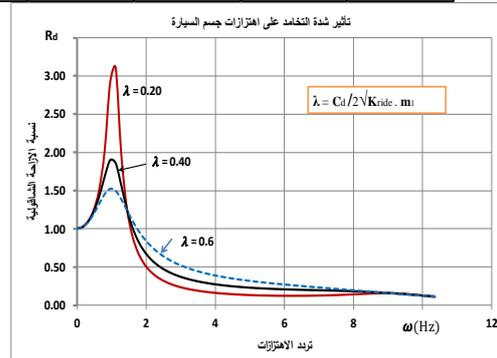
تردد الاهتزازات		نسبة الازاحة الشاقولية لجسم السيارة			تردد الاهتزازات		نسبة الازاحة الشاقولية لجسم السيارة		
		الحالة الاولى	الحالة الثانية	الحالة الثالثة			الحالة الاولى	الحالة الثانية	الحالة الثالثة
ω (rad/s)	ω (Hz)	R_d	R_d	R_d	ω (rad/s)	ω (Hz)	R_d	R_d	R_d
0	0.000	1.00	1.00	1.00	17	2.707	0.27	0.42	0.58
1	0.159	1.02	1.02	1.02	18	2.866	0.25	0.39	0.55
2	0.318	1.10	1.09	1.09	19	3.025	0.23	0.36	0.52
3	0.478	1.24	1.22	1.19	20	3.185	0.21	0.34	0.49
4	0.637	1.51	1.42	1.33	21	3.344	0.20	0.32	0.46
5	0.796	2.02	1.68	1.46	22	3.503	0.19	0.31	0.44
6	0.955	2.91	1.90	1.53	23	3.662	0.18	0.29	0.42
7	1.115	3.11	1.86	1.50	24	3.822	0.17	0.28	0.41
8	1.274	2.00	1.58	1.39	25	3.981	0.16	0.27	0.39
9	1.433	1.29	1.27	1.25	26	4.140	0.15	0.26	0.38
10	1.592	0.92	1.03	1.11	27	4.299	0.15	0.25	0.36
11	1.752	0.70	0.85	0.99	28	4.459	0.14	0.25	0.35
12	1.911	0.56	0.72	0.89	29	4.618	0.14	0.24	0.34
13	2.070	0.46	0.63	0.80	30	4.777	0.13	0.23	0.33
14	2.229	0.40	0.56	0.73	31	4.936	0.13	0.23	0.32
15	2.389	0.35	0.50	0.68	32	5.096	0.13	0.22	0.31
16	2.548	0.31	0.46	0.63	33	5.255	0.13	0.22	0.30

يعتمد البحث الحالي في دراسة السلوك الديناميكي لنظام التعليق على المخطط الموضح في الشكل (9)، والذي نحصل عليه بعد تقسيم السيارة إلى أربعة أجزاء، ثم تركيز الضوء على أحد هذه الأرباع (الأمامي مثلاً).



الشكل (9) رسم تخطيطي مبسط لجملة التعليق

يبين الشكل رقم (10)، المخطط الحسابي لجملة التعليق، والذي يضم جميع القوى المؤثرة في الكتلتين المعلقة والسفلية لجملة التعليق [5,6].



الشكل (8) منحنيات تأثير شدة التخميد على الحركة الاهتزازية لجسم السيارة

5- المخطط الحسابي ومعادلات الحركة:

تؤدي حركة السيارة على الطرقات غير المستوية إلى اهتزاز الأجزاء الواقعة أعلى مجموعة التعليق وأسفلها، والتي تضم نوابض التعليق ومخمدات الاهتزاز. وكما جرت العادة، تسمى الأجزاء الواقعة أعلى مجموعة التعليق بجسم السيارة أو الكتلة المعلقة (Sprung mass)، بينما تسمى الأجزاء الواقعة إلى الأسفل منها بالكتلة السفلية.

وبعد استنتاج النموذجين الديناميكي والرياضي لجملّة التعليق، ننقل إلى حل المعادلات التفاضلية باستخدام طريقة فضاء الحالة.

6- تطبيق طريقة فضاء الحالة: إنّ طريقة فضاء الحالة هي إحدى الطرق الحديثة المستخدمة حالياً على نطاق واسع في حل جمل المعادلات التفاضلية المعقدة [9,10]. وعلى وجه العموم، يتطلب استخدام هذه الطريقة عند حل أي نموذج رياضي يتكون من معادلتين تفاضليتين ومن المرتبة الثانية، كما هو الحال في البحث الحالي، اتباع الخطوات الأربع الأساسية الآتية:

1. اختيار أربعة متغيرات وبسيطة (x_1, x_2, x_3, x_4) تدعى متغيرات الحالة، بهدف تخفيض مرتبة المعادلات التفاضلية المفروضة من المرتبة الثانية إلى المرتبة الأولى. إذ يتعلق عدد هذه المتغيرات بمرتبة المعادلات التفاضلية وبعدها في النظام الديناميكي قيد البحث.

$$x_i = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}$$

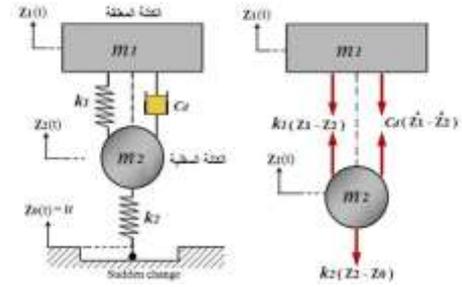
2. تحديد المشتق الزمني لكل متغير من متغيرات الحالة $(\dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{x}_3, \dot{x}_4)$ ، بعد الرجوع إلى المعادلات التفاضلية الأساسية.

$$\dot{x}_i = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix}$$

3. استنتاج مصفوفات المعادلة الرئيسية الأولى من معادلات فضاء الحالة، والتي تدعى بمعادلة الحالة والتي تأخذ الشكل الآتي :

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

حيث: x - يمثل مصفوفة متغيرات الحالة، A - تمثل مصفوفة الحالة، B - تمثل مصفوفة الدخل، u - تابع الدخل Z_0 . إنّ الصيغة العامة للمصفوفتين A و B على الشكل الآتي:



الشكل (10) المخطط الحسابي لجملّة التعليق

وبما أنّ الاهتزازات التي تؤثر بشكل رئيسي في صفاء حركة السيارة هي الاهتزازات الشاقولية، باتجاه المحور Z ، لذا سنكتفي بدراسة هذا النوع من الاهتزازات فقط. إنّ المعادلة التفاضلية التي تمثل اهتزازات الكتلة المعلقة m_1 تتحدد بمعادلة الحركة:

$$\sum F = m_1 \ddot{z}_1$$

$$-K_1(Z_1 - Z_2) - C_d(\dot{Z}_1 - \dot{Z}_2) = m_1 \ddot{z}_1$$

وبشكل آخر :

$$m_1 \ddot{z}_1 + C_d(\dot{Z}_1 - \dot{Z}_2) + K_1(Z_1 - Z_2) = 0 \quad (7)$$

أما المعادلة التفاضلية، التي تمثل اهتزازات الكتلة السفلية m_2 فتتحدد بمعادلة الحركة الآتية:

$$\sum F = m_2 \ddot{z}_2$$

$$K_1(Z_1 - Z_2) + C_d(\dot{Z}_1 - \dot{Z}_2) - K_2(Z_2 - Z_0) = m_2 \ddot{z}_2$$

وبشكل آخر:

$$m_2 \ddot{z}_2 - C_d(\dot{Z}_1 - \dot{Z}_2) - K_1(Z_1 - Z_2) + K_2(Z_2 - Z_0) = 0 \quad (8)$$

حيث :

Z_1 - الانتقال الشاقولي للكتلة المعلقة.

Z_2 - الانتقال الشاقولي للكتلة السفلية.

Z_0 - التغير المفاجئ في سطح الطريق.

K_1 - قساوة نابض التعليق .

K_2 - قساوة إطار عجلة السيارة.

C_d - معامل التخماد.

$$\dot{x}_4 = \frac{K_1}{m_2}x_1 + \frac{C_d}{m_2}x_2 - \frac{(K_1 + K_2)}{m_2}x_3 + \frac{C_d}{m_2}x_4 + \frac{K_2}{m_2}u$$

3- كيفية تحديد عناصر مصفوفات معادلة الحالة

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= (0)x_1 + (1)x_2 + (0)x_3 + (0)x_4 + (0)u \\ \dot{x}_2 &= \left(-\frac{K_1}{m_1}\right)x_1 + \left(-\frac{C_d}{m_1}\right)x_2 + \left(\frac{K_1}{m_1}\right)x_3 \\ &\quad + \left(\frac{C_d}{m_1}\right)x_4 + (0)u \\ \dot{x}_3 &= (0)x_1 + (0)x_2 + (0)x_3 + (1)x_4 + (0)u \\ \dot{x}_4 &= \left(\frac{K_1}{m_2}\right)x_1 + \left(\frac{C_d}{m_2}\right)x_2 - \left(\frac{K_1 + K_2}{m_2}\right)x_3 \\ &\quad + \left(-\frac{C_d}{m_2}\right)x_4 + \left(\frac{K_2}{m_2}\right)u\end{aligned}$$

4- تمثيل معادلة الحالة على شكل مصفوفات

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{K_1}{m_1} & -\frac{C_d}{m_1} & \frac{K_1}{m_1} & \frac{C_d}{m_1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{K_1}{m_2} & \frac{C_d}{m_2} & -\frac{(K_1+K_2)}{m_2} & -\frac{C_d}{m_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{K_2}{m_2} \end{bmatrix} u$$

5- كيفية تحديد عناصر مصفوفات معادلة الخرج

$$\begin{aligned}z_1 = x_1 &= (1)x_1 + (0)x_2 + (0)x_3 + (0)x_4 + (0)u \\ z_2 = x_3 &= (0)x_1 + (0)x_2 + (1)x_3 + (0)x_4 + (0)u \\ \dot{z}_1 = x_2 &= (0)x_1 + (1)x_2 + (0)x_3 + (0)x_4 \\ &\quad + (0)u \\ \dot{z}_2 = x_4 &= (0)x_1 + (0)x_2 + (0)x_3 + (1)x_4 \\ &\quad + (0)u\end{aligned}$$

6- تمثيل معادلة الخرج على شكل مصفوفات

$$z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (9)$$

7- برنامج الحساب ونتائج المحاكاة :

بعد تبسيط النموذج الرياضي لجملة التعليق باستخدام طريقة فضاء الحالة، يمكننا باستخدام برنامج Matlab-2018

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix}$$

4. استنتاج مصفوفات المعادلة الرئيسية الثانية من

معادلات فضاء الحالة، والتي تدعى بمعادلة الخرج والتي تأخذ

الشكل الآتي :

$$z = Cx + Du$$

حيث : z - يمثل تابع الخرج ، C - تمثل مصفوفة الخرج

، D - تمثل مصفوفة التحويل. إن الصيغة العامة لتابع الخرج

هي على الشكل الآتي :

$$z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix}$$

إن الصيغة العامة للمصفوفتين C و D هي:

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ d_4 \end{bmatrix}$$

وبناء على ما سبق، نستطيع الآن وبسهولة تطبيق طريقة

فضاء الحالة على النظام الديناميكي قيد البحث، وذلك وفق

التسلسل المبين الآتي:

1- اختيار متغيرات الحالة

$$\begin{aligned}x_1 = z_1 &\Rightarrow \dot{x}_1 = \dot{z}_1 ; x_2 = z_1 \Rightarrow \dot{x}_2 \\ &= \dot{z}_1 \\ x_3 = z_2 &\Rightarrow \dot{x}_3 = \dot{z}_2 ; x_4 = z_2 \Rightarrow \dot{x}_4 \\ &= \dot{z}_2\end{aligned}$$

2- تحديد المشتق الزمني لكل متغير من متغيرات الحالة

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -\frac{K_1}{m_1}x_1 - \frac{C_d}{m_1}x_2 + \frac{K_1}{m_1}x_3 + \frac{C_d}{m_1}x_4 \\ \dot{x}_3 &= x_4\end{aligned}$$

$K1/m2, Cd/m2, -K1/m2 - K2/m2, -Cd/m2];$
 $B=[0;0;0;K2/m2];$

Stage (3): Matrices of output Equation

$C1=[1,0,0,0];$
 $C2=[0,0,1,0];$
 $C3=[0,1,0,0];$
 $C4=[0,0,0,1];$
 $D=[0];$

Stage (4) : Calculating Displacement and Velocity

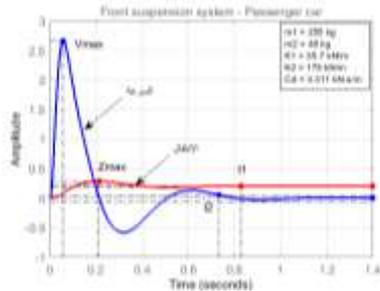
$Z1=ss(A,B*u,C1,D);$
 $Z2=ss(A,B*u,C2,D);$
 $V1=ss(A,B*u,C3,D);$
 $V2=ss(A,B*u,C4,D);$

Stage (5) : Results Output

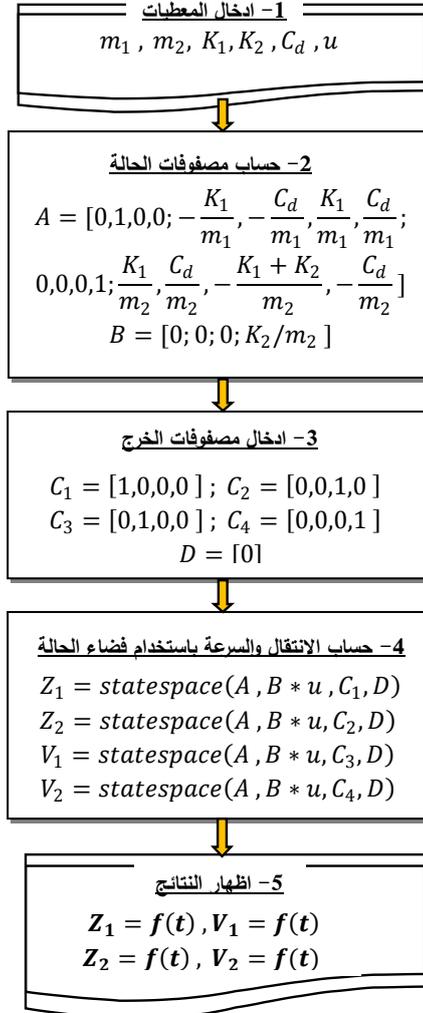
figure;
 step(Z1,V1)
 axis([0 10 -1 2])
 legend(' Displacement ','velocity');
 title('Velocity and displacement of Sprung Mass')

figure;
 step(Z2,V2)
 axis([0 1 -2 7])
 legend(' Displacement ','velocity');
 title('Velocity and displacement of UnSprung Mass')

تبيين الأشكال الآتية منحنيات الانتقال والسرعة لحركة جسم السيارة الاهتزازية، ولكل حالة من الحالات المدروسة، وذلك عند إشارة دخل ثابتة للطريق مقدارها $Z_0=20\text{cm}$.



إجراء البرمجة وتنفيذ المحاكاة للنظام الديناميكي المراد دراسته. يوضح الشكل (11) والبرنامج الذي يليه تسلسل المراحل الضرورية لذلك.



الشكل (11) مراحل محاكاة جملة التعليق

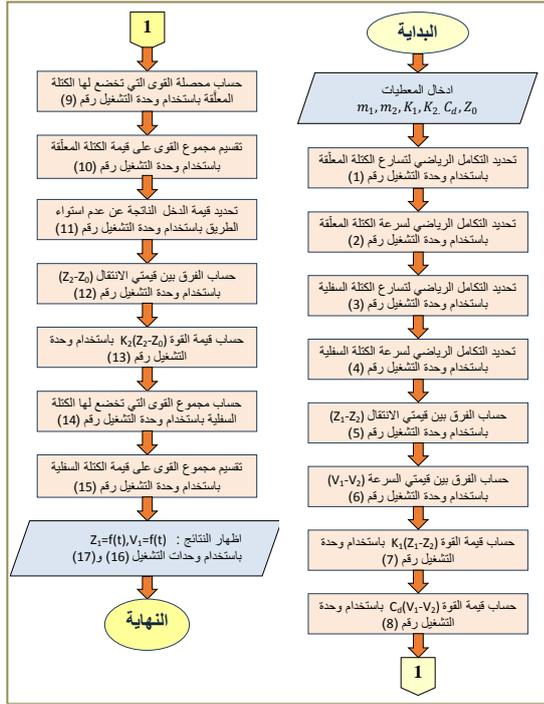
Stage (1) : Data input

$m1=\text{input}(\text{'Enter value of } m1\text{'});$
 $m2=\text{input}(\text{'Enter value of } m2\text{'});$
 $K1=\text{input}(\text{'Enter value of } K1\text{'});$
 $K2=\text{input}(\text{'Enter value of } K2\text{'});$
 $Cd=\text{input}(\text{'Enter value of } Cd\text{'});$
 $u=\text{input}(\text{'Enter value of } u\text{'});$

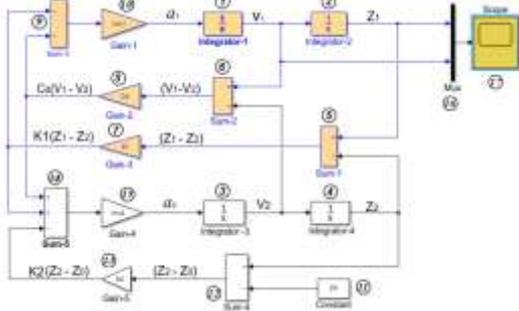
Stage (2): Matrices of State Equation

$A=[0, 1, 0, 0; -K1/m1, -Cd/m1, K1/m1, Cd/m1; 0, 0, 0, 1;$

(window التابعة لبرنامج Matlab. يبين الشكل (17) المخطط الصندوقي لبرنامج المحاكاة والذي يتضمن مجموعة من وحدات التشغيل (blocks) التي تقوم بالعمليات الحسابية المختلفة [9].



الشكل(16) خوارزمية المحاكاة باستخدام Simulink



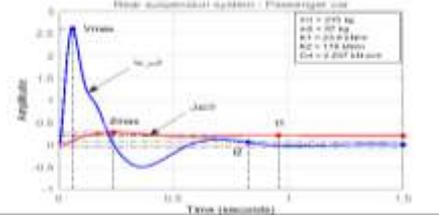
الشكل(17) مخطط سير العمليات الحسابية باستخدام Simulink

9- تحليل النتائج:

- تشير نتائج المحاكاة المتعلقة بنظام التعليق في سيارة الركوب السياحية، إلى أن خصائص الحركة الاهتزازية لجسم السيارة (الكتلة المعلقة) في جملي التعليق الأمامية (front) والخلفية (rear) كانت مقاربة كما هو واضح في الجدول رقم (8).

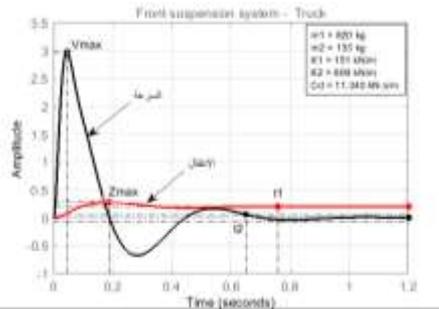
الشكل(12) منحنيات الانتقال والسرعة لجسم السيارة في جملة

التعليق الأمامية- سيارة سياحية



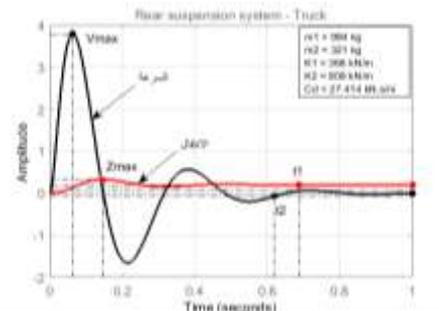
الشكل(13) منحنيات الانتقال والسرعة لجسم السيارة في جملة

التعليق الخلفية- سيارة سياحية



الشكل(14) منحنيات الانتقال والسرعة لجسم السيارة في جملة

التعليق الأمامية- شاحنة



الشكل(15) منحنيات الانتقال والسرعة لجسم السيارة في جملة

التعليق الخلفية- شاحنة

8- محاكاة النظام باستخدام Simulink:

إنّ عملية محاكاة السلوك الديناميكي لنظام التعليق باستخدام برنامج Simulink، تجري انطلاقاً من المخطط الحسابي ومعادلات الحركة الاهتزازية لنظام التعليق المذكورة في البند الخامس من هذا البحث. وفي هذا الصدد، يوضح الشكل رقم (16)

تسلسل خطوات سير عملية المحاكاة، مع الانتباه إلى أن ادخال المعطيات يجري عادة في نافذة الأوامر (command

قساوة نابض التعليق يجب أن تشكل وسطياً حوالي (20%) (10 من قساوة إطار العجلة.

2. أثبتت الدراسة الحالية أيضاً أن شدة التخميد المنخفضة ($\lambda < 0.3$) تؤدي إلى ارتفاع حاد في الازاحة الشاقولية لجسم السيارة، الأمر الذي قد ينتج عنه خطر حدوث ظاهرة الطنين.

3. تشير نتائج المحاكاة إلى أن خصائص الحركة الاهتزازية لجسم السيارة في جملتي التعليق الأمامية والخلفية كانت متقاربة بالنسبة لكل حالة من الحالتين المدروستين.

4. تطابقت في هذا البحث نتائج المحاكاة باستخدام برنامج Matlab مع نتائج المحاكاة باستخدام برنامج Simulink.

5. تتميز عملية النمذجة والمحاكاة لنظام التعليق باستخدام برنامج Simulink بالسهولة والبساطة بالمقارنة مع عملية النمذجة والمحاكاة باستخدام برنامج Matlab.

6. أنجزت الدراسة الحالية باستخدام ثلاثة برامج حاسوبية: برنامج الحسابات Excel ، وبرنامج Matlab-2018 ، وبرنامج Simulink.

7. تتعلق راحة الركوب بتصميم المقاعد وبقدرتها على امتصاص الاهتزازات المنقولة إلى السائق والركاب، ولهذا يقترح الباحث تطوير النموذج الديناميكي لجملته التعليق بحيث يشمل مقاعد الجلوس أيضاً.

التمويل: هذا البحث ممول من جامعة دمشق وفق رقم التمويل (501100020595).

الجدول رقم (8) نتائج محاكاة نظام تعليق سيارة الركوب

خصائص الحركة الاهتزازية Characteristics		سيارة الركوب السياحية	
		جملة التعليق الامامية	جملة التعليق الخلفية
الانتقال الاعظمي	Z_{max} (m)	0.29	0.28
السرعة القصوى	V_{max} (m/s)	2.65	2.60
زمن الاستقرار	t_1 (sec)	0.83	0.93
Settling time	t_2 (sec)	0.73	0.83
زمن الحركة	t_{ss} (sec)	1.4	1.5

• كما تشير أيضاً، نتائج المحاكاة المتعلقة بنظام التعليق في الشاحنة، إلى أن خصائص الحركة الاهتزازية لجسم الشاحنة (الكتلة المعلقة) في جملتي التعليق الأمامية والخلفية كانت متقاربة كما هو واضح في الجدول رقم (9).

الجدول رقم (9) نتائج محاكاة نظام تعليق الشاحنة

خصائص الحركة الاهتزازية Characteristics		الشاحنة	
		جملة التعليق الامامية	جملة التعليق الخلفية
الانتقال الاعظمي	Z_{max} (m)	0.29	0.33
السرعة القصوى	V_{max} (m/s)	2.98	3.79
زمن الاستقرار	t_1 (sec)	0.76	0.69
Settling time	t_2 (sec)	0.65	0.62
زمن الحركة	t_{ss} (sec)	1.2	1

• جاءت نتائج المحاكاة باستخدام برنامج Simulink مطابقة تماماً لنتائج المحاكاة التي اعتمدت على طريقة فضاء الحالة وعلى البرمجة باستخدام Matlab. وهذا الأمر يؤكد دقة نتائج البحث.

10- الخلاصة والمقترحات:

1. تلعب قساوة نوابض التعليق دوراً مهماً في تحديد قيم الترددات الذاتية للاهتزاز ، وتؤثر بشكل ملحوظ على سلسلة حركة السيارة في أثناء السير. لقد أثبت البحث الحالي أنّ

References

1. Letvinov , A. C. , Farobin , Y. E. Theory of Motor Vehicles , Moscow, 1989.
2. Artamonov, M. D. , Ilarionov, V. A. , Morin, M. M., Fundamentals and Design of Motor Vehicles, Mir, Moscow,1976.
3. Averill , M. L. , Simulation Modeling and Analysis, Fourth Edition, McGraw-Hill, USA , 2007.
4. Happian-Smith , J., An Introduction to Modern Vehicle Design , First Edition, Butterworth-Heinemann, 2001.
5. Grishkevich , A. E. , Theory of Motor Vehicles , Minsk, 1986.
6. Shitena, V. A. , Lokenski, V. C. , Vakhlamov, V. K., Motor Vehicles, Transport, Moscow.1989.
7. Bosch , Automotive Handbook, Robert Bosch GmbH,7th edition,2007.
8. Ahmed , A.K.W. , Ground Transportation Systems , Concordia University, Montreal, Canada . 2001.
9. Soliman,Ahmad, Simulink Lab Manual , Amman: Dar Al-Essar,2009.
10. Hahn, B. D. , Valentine, D. T. , Essential Matlab for Engineers and Scientists, Third Edition, Butterworth-Heinemann, 2007.