



الجمهورية العربية السورية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة دمشق
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية
قسم هندسة السيارات والآليات الثقيلة

تأثير أنظمة التعليق في السيارات السياحية على راحة الركاب

رسالة مقدمة لنيل درجة الماجستير في هندسة الآليات
والمحركات

إعداد

م. عمار عوض

إشراف

د. جمعة شحادة

العام

٢٠٢٤ - ٢٠٢٥

قرار الحكم

دقت هذه الرسالة تحت عنوان:

"تأثير أنظمة التعليق في السيارات السياحية على راحة الركاب"

وأجيزت يوم الأربعاء الواقع في ٢٠٢٥/٢/٢٦ من قبل السادة أعضاء لجنة الحكم التالية أسماؤهم:

الاسم	المرتبة العلمية	الصفة عضوًا أو مشرفًا	التوقيع
د. جمعة شحادة	أستاذ	عضوًا مشرفًا	
د. فراس القطان	أستاذ مساعد	عضوًا	
د. رياض قبيسي	مدرس	عضوًا	

أجريت التعديلات، وأصبحت الرسالة صالحة لمنح درجة الماجستير في هندسة السيارات والآليات.

تصريح خطي

أنا الموقع أدناه أصرح بعلمي الكامل وقبولي:

١- أن كل ما ينتج عن البحث والأطروحة هو ملكية فكرية ومالية بالتشارك مع جامعة دمشق، وأنني ألتزم بأخذ موافقة الجامعة في حال رغبتني بنشر البحث أو الأطروحة أو جزء منها نصاً أو مضموناً خارج إطار الجامعة (من دور نشر أو مكنتبات أو مواقع الكترونية وغيرها من وسائل النشر).

٢- أنه لا يوجد أي جزء من هذه الأطروحة اقتبس من عمل علمي آخر، أو أنجز للحصول على شهادة أخرى في جامعة دمشق أو أية جامعة أو معهد تعليمي داخل أو خارج الجمهورية العربية السورية.

الاسم والتوقيع

م. عمار عوض

شكر وإهداء

إلى أعز الناس وأقربهم إلى قلبي، إلى والديّ العزيزين، اللذين كانا عوناً وسنداً لي، ولم يتوانيا في تذليل الصعاب حتى أصل مبتغاي، وكان لدعائهما المبارك أعظم الأثر في بلوغ مرادي...

إلى من ساندتني وخطت معي خطواتي، ويسرت لي الصعاب، إلى زوجي الغالية، التي تحملت الكثير وعانت، ووقوفني في هذا المكان ما كان ليحدث لولا تشجيعها المستمر...

إلى زهرتي وفلذتي كبدي، ابنتي العزيزة سنا وابني الصغير موفق، اللذين حرمت منهما طيلة المدة التي قضيتها في إعداد هذا البحث...

إلى أساتذتي ومعلمي وأهل الفضل عليّ، وأخص بالذكر الدكتور جمعة شحادة، الذين غمروني بالدعم والتقدير والنصيحة والتوجيه والإرشاد...

إلى من وقفوا جانبي وأمدوني بحبهم ورجائهم الخير لي ودعوا باليسر لي عند كل خطوة أخطوها، إلى إخوتي وأصدقائي...

إلى كل هؤلاء أهديهم هذا العمل المتواضع، سائلاً المولى العلي القدير أن يكون ذا نفعٍ ومعيناً لمن بعدي...

وإلى حبيبتي ومهد صباي التي طلع عليها فجر الحرية بعد عهد الظلم والاستبداد، إلى سوريّتي وعروبتني وشامي...

فهرس المحتويات

10.....	الملخص
12.....	المقدمة
13.....	الفصل الأول: الدراسات المرجعية السابقة
14.....	١-١- الدراسة الأولى (M.C. Gameiro da Silva; Portugal, 2002)
15.....	٢-١- الدراسة الثانية (Ayman A. Aly, Taif Un; Saudi Arabia, 2012)
17.....	٣-١- الدراسة الثالثة (Anil Shirahatt, Ahamadnagar, India, 2008)
19.....	٤-١- الدراسة الرابعة (A.Sezgin,N.Yagiz,Istanbul Un,Turkey, 2012)
22.....	٥-١- الدراسة الخامسة (Zheng Yao; Windsor Un; Canada, 2016)
23.....	٦-١- الدراسة السادسة (Z.Ding & Z.Lei; Changsha, China, 2016)
26.....	٧-١- الدراسة السابعة (Sh.Koumura & T.Shionoya; TOYOTA Co, 2016)
28.....	٨-١- الخلاصة
29.....	مشكلة البحث
29.....	هدف البحث
29.....	أهمية البحث
30.....	مسوغات البحث
30.....	محددات البحث
30.....	حدود البحث
31.....	منهج البحث وأدواته
	الفصل الثاني: دراسة خاصة صفاء الحركة الاستثمارية والمؤشرات التي تتعلق بجمللة
32.....	التعليق
33.....	١-٢- صفاء حركة السيارة
34.....	٢-٢- الأهداف من صفاء حركة السيارة
35.....	٣-٢- تصميم نظام التعليق
36.....	٤-٢- عوامل تقويم صفاء حركة السيارة
36.....	١-٤-٢- معايير (Olley)
37.....	٢-٤-٢- الاهتزازات وتوابعها
39.....	٣-٤-٢- المربع الوسطي للجذر (RMS) لقيم التسارع والرجفة
41.....	٤-٤-٢- مخطط التحمل للإنسان
43.....	٥-٢- الأنواع المختلفة لاهتزازات السيارة وتأرجحها
44.....	١-٥-٢- التأرجح حول المحور الطولي (Roll)

47.....	٢-٥-٢ - التآرجح حول المحور الجانبي (Pitch)
48.....	٦-٢ - توضيح للمصطلحات القساوة (Hardness)، الصلابة (Stiffness)، المرونة (Elasticity)
51.....	٧-٢ - أنظمة التعليق
55.....	٨-٢ - أهمية ضبط اتزان زوايا العجلات الهامة في نظام التعليق
57.....	٩-٢ - الكتلة العلوية والكتلة السفلية (Sprung Mass/Unsprung Mass)
59.....	١٠-٢ - صلابة النابض
60.....	١١-٢ - معدل التخميد
61.....	١٢-٢ - المرباط اللينة (البطانات The Bushings)
61.....	١٣-٢ - العجلات
62.....	١٤-٢ - الخلاصة
63.....	الفصل الثالث: النمذجة والمحاكاة لنظام التعليق
64.....	١-٣ - نماذج الدراسة لجسم السيارة
71.....	٢-٣ - مواصفات السيارة المدروسة
72.....	٣-٣ - أنواع الاختبارات
73.....	٤-٣ - أنواع الطرائق المستخدمة
76.....	٥-٣ - النمذجة والمحاكاة
81.....	الفصل الرابع: إجراء التجارب الحاسوبية وتحليل النتائج
83.....	١-٤ - التجربة الأولى: مقارنة أنظمة التعليق تبعاً لطريقة التحكم بها
91.....	٢-٤ - التجربة الثانية: مقارنة بين النظامين التقليدي والنصف فعال في التآرجح (Pitch) والتآرجح (Roll)
94.....	٣-٤ - التجربة الثالثة: مقارنة بين أنظمة التعليق وفقاً لنوع التصميم
99.....	٤-٤ - التجربة الرابعة: دراسة تأثير صلابة النابض
103.....	٥-٤ - التجربة الخامسة: دراسة تأثير معدل التخميد
108.....	٦-٤ - التجربة السادسة: دراسة تأثير نسبة الكتلة العلوية إلى السفلية
113.....	٧-٤ - التجربة السابعة: دراسة تأثير طول قاعدة العجلات
119.....	٨-٤ - التجربة الثامنة: دراسة تأثير سرعة المركبة على أداء نظام التعليق
128.....	٩-٤ - تلخيص النتائج
130.....	الفصل الخامس: التوصيات
133.....	المراجع

فهرس الأشكال التوضيحية

- الشكل (١): توزع الإجهادات في جذع الانسان.....14
- الشكل (٢): مقارنة في الراحة والثبات باعتبار قيم التخميد.....15
- الشكل (٣): انتقال الاهتزازات الشاقولية من منصة إل جسم الانسان.....16
- الشكل (٤): مقارنة قيم التسارع بين النظامين التقليدي والفعال.....18
- الشكل (٥): نموذج فيزيائي لحساب أثر الاهتزازات في جسم الانسان.....19
- الشكل (٦): معدل تسارع العنق.....20
- الشكل (٧): معدل تسارع الرأس.....20
- الشكل (٨): تصميم مبتكر للتوصيل المترابط بين النظامين الأمامي والخلفي.....22
- الشكل (٩): نموذج حركي لباص.....23
- الشكل (١٠): مقارنة تسارع الاهتزازات وفق PSD للنموذجين التجريبي والحسابي.....23
- الشكل (١١): مقارنة التسارع الجانبي في مسار دائري ثابت قبل عمليات التحسين وبعدها....24
- الشكل (١٢): مقارنة معدل التآرجح حول المحور الشاقولي (Yaw) قبل عمليات التحسين وبعدها.....25
- الشكل (١٣): مقارنة بين قيم ثابت صلابة النابض ومعامل التخميد عند ترددات اهتزازات مختلفة قبل التخفيض من قيم الاحتكاك في المرباط وبعده على المحور الأمامي.....26
- الشكل (١٤): مقارنة بين قيم ثابت صلابة النابض ومعامل التخميد عند ترددات اهتزازات مختلفة قبل التخفيض من قيم الاحتكاك في المرباط وبعده على المحور الخلفي.....27
- الشكل (١٥): الضجيج والاهتزاز وأثرهما.....34
- الشكل (١٦): مخطط تصميم نظام التعليق.....35
- الشكل (١٧): صفاء حركة السيارة باعتبار الاهتزازات وتوابعها.....37
- الشكل (١٨): صفاء حركة السيارة بالاهتزازات وتوابعها ومؤشراتها.....38
- الشكل (١٩): مخطط التحمل لجسم الانسان.....41
- الشكل (٢٠): بعض زوايا العجلات.....42
- الشكل (٢١): أنواع الاهتزازات وتآرجح السيارة حول محاورها الثلاث.....43
- الشكل (٢٢): التآرجح حول المحور الطولي (Roll)44
- الشكل (٢٣): أثر الزاوية (Camber) في التآرجح (Roll)44

الشكل (٢٤): أثر التعليقة المستقلة وغير المستقلة في التآرجح (Roll) وفي الزاوية (Camber)	45.....
الشكل (٢٥): شريط الموازنة.....	46.....
الشكل (٢٦): التآرجح أو التمايل حول المحور الجانبي (Pitch) وأنواعه.....	47.....
الشكل (٢٧): تأثير زاوية (Caster) ومراكز دوران المحاور الأمامية والخلفية في تخفيف التآرجح (Pitch)	48.....
الشكل (٢٨): تصنيف أنظمة التعليق تبعًا للتحكم بها.....	51.....
الشكل (٢٩): تصنيف أنظمة التعليق تبعًا لارتباط محاورها.....	53.....
الشكل (٣٠): بعض أنواع أنظمة التعليق المستقلة.....	53.....
الشكل (٣١): تصميم حركي لنوعي نظام تعليق مستقل.....	54.....
الشكل (٣٢): نظام التعليق الخلفي المستقل من نوع Tri-Links.....	54.....
الشكل (٣٣): الكتلة العلوية والسفلية.....	57.....
الشكل (٣٤): تأثير الكتلة السفلية على أداء نظام التعليق.....	58.....
الشكل (٣٥): بعض أنواع النوابض الحلزونية.....	59.....
الشكل (٣٦): نابض حلزوني ذو قطر سلك ثابت ونابض متغير قطر السلك.....	60.....
الشكل (٣٧): المرباط اللينة.....	61.....
الشكل (٣٨): أبعاد العجلة وتأثير ضغط الإطارات عند خشونة الطريق.....	62.....
الشكل (٣٩): أنواع النماذج لدراسة نظام التعليق.....	64.....
الشكل (٤٠): النموذج الفيزيائي لكامل السيارة بنظام تعليق تقليدي.....	65.....
الشكل (٤١): مخطط القوى للنموذج كامل السيارة بنظام تعليق تقليدي.....	66.....
الشكل (٤٢): النموذج الفيزيائي لكامل السيارة بنظام تعليق فعال أو نصف فعال.....	67.....
الشكل (٤٣): مخطط علاقة معدل تخميد الإطارات بالسرعة والتردد.....	70.....
الشكل (٤٤): أنواع الاختبارات.....	72.....
الشكل (٤٥): طريق ذو مطب صغير.....	73.....
الشكل (٤٦): طريق متموج طوليًا بسعات مختلفة.....	74.....
الشكل (٤٧): طريق متموج عرضيًا وبسعات مختلفة.....	75.....
الشكل (٤٨): تحديد نوع السيارة والاختبار المطلوب.....	76.....

- الشكل (٤٩): تحديد أبعاد السيارة..... 77
- الشكل (٥٠): تحديد نظام التعليق والمؤشرات المتعلقة به..... 78
- الشكل (٥١): الاختبار والحصول على النتائج..... 79
- الشكل (٥٢): حساب مؤشرات الراحة..... 80
- الشكل (٥٣): الوظيفة (Scope) المتواجدة في (Matlab/Simulink)..... 82
- الشكل (٥٤): نوع النظام التعليق التقليدي..... 83
- الشكل (٥٥): المتحكم لنظام التعليق نصف الفعال..... 83
- الشكل (٥٦): المتحكم لنظام التعليق الفعال في ربع السيارة..... 85
- الشكل (٥٧): نموذج ربع السيارة في مخطط نظام التعليق الفعال الموجود في Matlab..... 86
- الشكل (٥٨): نتائج التجربة لنظام التعليق الفعال المستخدم..... 87
- الشكل (٥٩): مقارنة نتائج اختبار الارتداد للأنظمة الثلاث (التقليدي، النصف فعال، الفعال)..... 89
- الشكل (٦١): مقارنة بين النظامين التقليدي والنصف فعال في التآرجح (Pitch) والتأرجح (Roll)..... 93
- الشكل (٦٢): بعض أنواع تصاميم أنظمة التعليق المستخدمة..... 94
- الشكل (٦٣): مقارنة نتائج الاختبار لأنظمة التعليق وفقاً لنوع التصميم..... 97
- الشكل (٦٤): المقارنة عند تعديل قيم صلابة النابض..... 101
- الشكل (٦٥): المقارنة عند تعديل قيم معدل التخميد..... 106
- الشكل (٦٦): المقارنة عند تعديل قيم نسبة الكتلة العلوية إلى السفلية..... 111
- الشكل (٦٩): المقارنة عند تعديل طول قاعدة العجلات..... 117
- الشكل (٧٠): تأثير سرعة المركبة على أداء نظام التعليق بالسير على مطب بارتفاع (5cm) وبسرعات مختلفة..... 120
- الشكل (٧١): تأثير سرعة المركبة على أداء نظام التعليق بالسير على مطب بارتفاع (12cm) وبسرعات مختلفة..... 123
- الشكل (٧٢): فقدان السيطرة على المركبة عند السير على مطب بارتفاع (12cm) وبسرعات عالية..... 124
- الشكل (٧٣): تأثير سرعة المركبة على أداء نظام التعليق بالسير على طريق متموج طولياً وبسرعات مختلفة..... 127

المصطلحات والرموز

المصطلح	الواحدة	الرمز	The Term
تردد الاهتزازات	Hz	f	Frequency of Vibration
التسارع الشاقولي	m/s^2	$\ddot{Z}, a$	Vertical Acceleration
الزمن	s	T	Time
السرعة الزاوية للاهتزازات	$^\circ/s$	ω	Angular Velocity
السرعة الشاقولية	cm/s	$\dot{Z}, V$	Vertical Velocity
معدل تغير التسارع (الرجفة)	m/s^3	J	Jerk
الموضع أو الانتقال الشاقولي	cm	Z	Vertical Position
جذر متوسط التربيع		RMS	Root Mean Square
زاوية الدوران حول المحور الجانبي	°	θ	Pitch Angle
زاوية الدوران حول المحور الطولي	°	ϕ	Roll Angle
مرونة الإطار	kN/m	K_{1n}	Tire stiffness coefficients
ثابت صلابة النابض	kN/m	K_{2n}	Spring Constant
معامل التخميد	$kN.s/m$	c	Damping Coefficient
الكتلة العلوية	kg	m	Sprung Mass
الكتلة السفلية	kg	m_n	Unsprung Mass
سعة الاهتزاز	cm	A	Vibration Capacity
الدور	s	T	Turn
منحنى الطريق	m	q	Road Curve
ثابت الجاذبية	m/s^2	g	Gravity Constant
الأبعاد الأفقية للعجلات عن مركز ثقل السيارة	mm	a, b, c, d	The distances of the Horizontal Positions of Wheels to Vehicle's Centre Gravity
عطالة جسم السيارة حول المحور الطولي	$Kg.m^2$	J_x	The chassis moment of inertia around X axis
عطالة جسم السيارة حول المحور الجانبي	$Kg.m^2$	J_y	The chassis moment of inertia around Y axis
نصف قطر الدوران حول المحور الجانبي	m	r	Radius of Gyration in Pitch
القوى الناتجة من المشغلات	N	f_d	The forces provided by actuators
عدة في الدقيقة	CPM	CPM	Counts per Minute

الملخص

خلفية البحث:

يتناول البحث دراسة تأثير أنظمة التعليق بمجمل أنواعها التقليدي والنصف فعال والفعال، وتصاميمها من مستقل وغير مستقل، ومؤشراتها كصلابة النابض ومعدل التخميد والنسبة بين الكتلتين العلوية والسفلية وقاعدة العجلات، وذلك في معايير الراحة من تسارع ورجفة (معدل تغير التسارع بالنسبة للزمن) وتردد الاهتزازات عن طريق النمذجة والمحاكاة لنظم التعليق وشروط عملها والمقارنة فيما بينها.

هدف البحث:

تحليل أداء أنظمة التعليق للوصول إلى معايير الراحة بالقيم المرغوبة التي تتناسب مع شعور الانسان بالراحة وفق المعايير القياسية المبنية على دراسة سلوك جسم الانسان وما يناسبه من قيم المؤثرات الموضوعية الناتجة عن الاهتزازات وتردداتها وتوابعها، والابتعاد عن التصميم أو القيم التي تؤدي إلى قيادة مزعجة أو مسببة للآلام والتعب.

المواد والطرائق:

استخدم برنامج المحاكاة (CarSim) لمحاكاة عمل سيارة من فئة (D-Class Sedan 2017) السياحية متوسطة الحجم بعد تحديد المواصفات والأبعاد والمؤشرات الخاصة بها، واختيار نوع الطريق والاختبار المطلوب من ارتداد شاقولي أو تأرجح حول المحور الطولي أو المحور الجانبي، وكان ذلك عند سرعة مسير واحدة (35 Km/h) حصراً لعدد التجارب، ولكن أفردت تجربة واحدة لاختبار أثر السرعة على أداء نظام التعليق، ثم ربطت النتائج ببرنامج (Matlab) الشهير للحصول على مؤشرات الراحة بوساطته من تسارع ورجفة وتردد اهتزاز ضمن بيئة (Simulink).

النتائج العملية:

كانت النتائج مرضية وأعطت الفرق الواضح عند اختلاف الأنظمة واختلاف مؤشرات نظام التعليق، وأظهرت تقدم نظام التعليق الفعال عن غيره في اختبار الارتداد بنسبة تتجاوز (50%) في قيم التسارع والرجفة والتردد، وبرز تقدم نظام التعليق المستقل وفق تصميمين مختارين في الأمام ومثليهما في الخلف عن غير المستقل في جميع معايير الراحة، وأوضحت الفرق عند رفع قيمة مؤشر من مؤشرات نظام التعليق أو خفضه للسيارة المستخدمة، فتبين أن صلابة النابض كلما ارتفعت كان الشعور بالراحة أفضل ولكن تفقد السيارة ثباتها عند بعض حالات التغير المفاجئة، وتم التوصل إلى القيمة المثالية لصلابة النوابض المناسبة لمواصفات السيارة المختارة، وتبين أن معدل التخميد يجب ألا يكون بمقدار ثابت بل يجب أن يقدم قيم موائمة لترددات الاهتزازات التي يتعرض لها المخدم، وكما ظهر الفرق الواضح عند رفع نسبة الكتلة العلوية على السفلية وأنه كلما زادت هذه النسبة تحسنت معايير الراحة بشكل أفضل، وأيضاً تم

الوصول إلى النسبة الأفضل بين الكتلتين، أما طول قاعدة العجلات فلم يعطي الأثر الواضح على معايير الراحة عند زيادته أو نقصانه، وكما أظهرت السرعة تأثيرها على أداء نظام التعليق بشكل كبير وأنه كلما انخفضت السرعة زادت معايير الراحة من تسارع شاقولي ورجفة.

الاستنتاجات من وجهة نظر الباحث:

- أعطى البحث فكرة عامة ومجملية عن سلوك نظام التعليق وأنواعه في الوصول إلى معايير الراحة، ولا بد من متابعة العمل إذا أردنا الغوص في نوع معين.
- الاستفادة العالية من البرنامج (CarSim).

الكلمات المفتاحية:

- نظام التعليق Suspension System – تقليدي Passive – نصف فعال Semi Active -
فعال Active – الاهتزازات Vibrations – التردد Frequency – الموضع أو الانتقال
الشاقولي Vertical Position - التسارع الشاقولي Vertical Acceleration – الرجفة Jerk
- التآرجح حول المحور الطولي Roll – التآرجح حول المحور الجانبي Pitch.

المقدمة

إن السعي وراء الراحة وتحقيق أعلى نتائج في الاستثمار مع أفضل أداء مرغوب كانت شغل الانسان الشاغل منذ الأزل، ونتيجة ما تقدمه المركبات من خدمات في النقل والسفر وقطع المسافات البعيدة، ازداد الوقت الذي يقضيه الناس في السيارات ازديادًا كبيرًا، وازدادت الحاجة إلى الشعور بالراحة وأسهمت العديد من العوامل في زيادة الاهتمام بتقويم الراحة التي يسعى إليها الركاب في المركبات، وأيضًا هناك عوامل تسويقية تنافسية قائمة بين الشركات المنتجة للسيارات زادت من هذه المتطلبات لتقديم أفضل التصميم وفق معايير الراحة المطلوبة.

لذلك توجب علينا البحث أكثر في معايير الراحة وتأثير أنظمة التعليق في الراحة في الترحال، وفي هذا البحث استخدم منهج النمذجة والمحاكاة باستعمال البرامج (CarSim) و (Matlab) لإجراء النمذجة والمحاكاة على سيارة سياحية متوسطة الحجم بمواصفات معينة وعلى طرق مختارة والمقارنة بين أنظمة وتصاميم عديدة لنظام التعليق، وبناءً عليه عرضت النتائج وقورنت مع معايير الراحة لنخرج بنتيجة تفيدنا في فهم سلوك أنظمة التعليق على أساس الراحة.

الفصل الأول

الدراسات المرجعية السابقة

الدراسات المرجعية السابقة

في هذا الفصل ستعرض دراسات سابقة حذت حذو فهم سلوك الانسان في أثناء ترحاله وتحديد معايير الراحة، وذلك بذكر نوع التجارب التي قاموا بها والأساليب التي اتخذوها للوصول إلى مؤشرات الراحة، ومن هذه الدراسات:

١-١ - الدراسة الأولى:

"Measurements of comfort in vehicles"

[M.C. Gameiro da Silva; Portugal, 2002]

أجرى الباحث دراسة حول معايير الراحة الأساسية ومدى تأثيرها على جسم الانسان وذلك باستعراض المبادئ الفيزيائية وتجارب واقعية تحليلية على جسم الانسان، وخرج بنتائج أبرزها:

- يمكن تصنيف الراحة التي يمر بها البشر في بيئة معينة بوصفها تقويمًا شخصيًا (Subjective)، لأنه من الممكن العثور على اختلاف كبير في استجابات الأشخاص المختلفين للوضع نفسه.

- ومع ذلك، فإن العوامل التي تستند إليها آراء الناس على مستوى الراحة هي المتغيرات المادية التي تميز البيئة المحيطة (Objective)، على سبيل المثال: درجة الحرارة، وسرعة الهواء، والتسارع، وشدة الضوء.

- وعند النظر إلى المعايير الرئيسية التي تسبب الشعور بالراحة من عدمها عند الترحال تبين أنها تتمثل في: درجة الحرارة، جودة الهواء، الضجيج، الاهتزاز، الضوء، بيئة العمل أو الترحال.

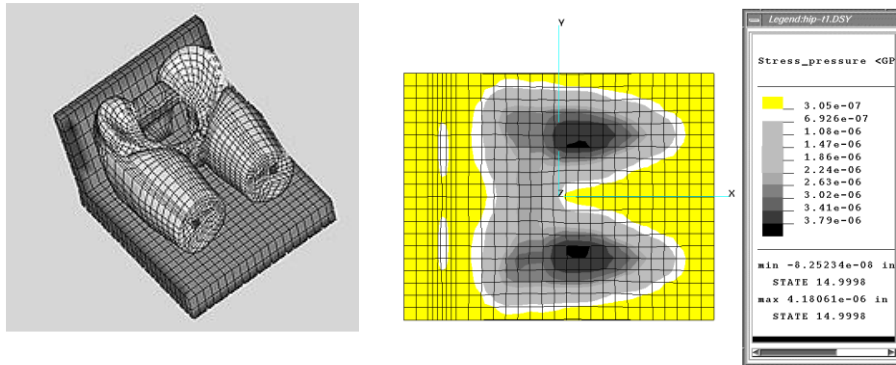
- ومنه يمكن تحليل راحة الركوب في ثلاثة جوانب مختلفة:

١. العوامل الديناميكية (الاهتزازات والصدمات والتسارع).

٢. العوامل المحيطة (الراحة الحرارية ونوعية الهواء والضوضاء وتدرجات الضغط).

٣. العوامل المكانية.

- وهنا بعض التجارب والدراسات التي أجريت في شأن الاهتزازات وتوزع الإجهادات على جسم الانسان:



الشكل (١): توزع الإجهادات في جذع الانسان

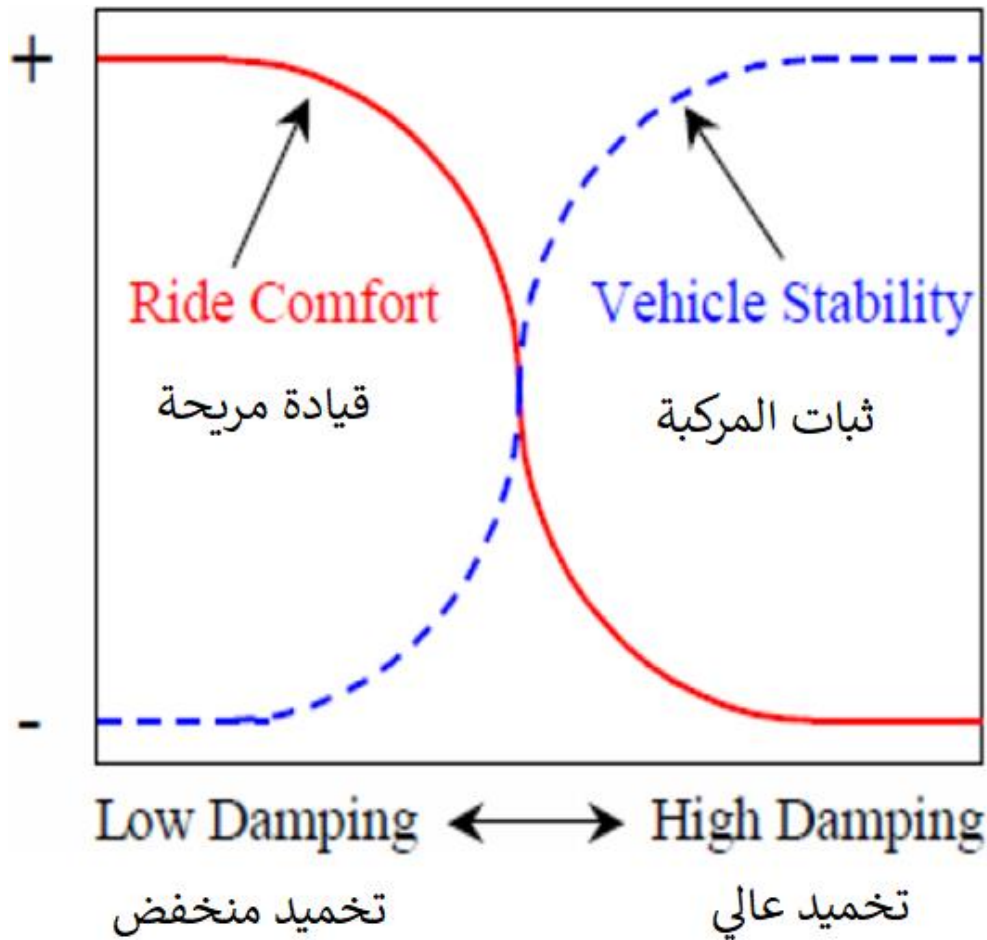
ومن هذه الدراسة يمكننا القول إنه يمكن الاستعاضة عن الآراء الشخصية لتحليل الراحة بالمتغيرات المادية لأنها تعتمد في وضعها وتحليلها على هذه الآراء أساساً، فهي تمثلها، وأيضاً بما أن هذه الدراسة تتمحور حول أداء نظام التعليق وما يقدمه من وظائف للحصول على الراحة أثناء الترحال فيمكن الاقتصار في هذا البحث على العوامل الديناميكية فقط والمتمثلة بالاهتزازات والصدمات والتسارعات.

٢-١ - الدراسة الثانية:

"Car Suspension Control Systems: Basic Principles"

[Ayman A. Aly, Taif Un; Saudi Arabia, 2012]

قام هنا الباحث بإعداد بحثٍ يجمع عددًا من نتائج دراسات سابقة تبين المعايير اللازمة لأداء نظام التعليق بشكلٍ أفضل، فوضع مقارنة أجريت للوصول إلى حل وسط بين وظيفتي نظام التعليق الأساسيتين المتضاربتين وهما الراحة والثبات في نظام التعليق التقليدي وفق قيمة التخميد، فنتج عند الملاحظة:

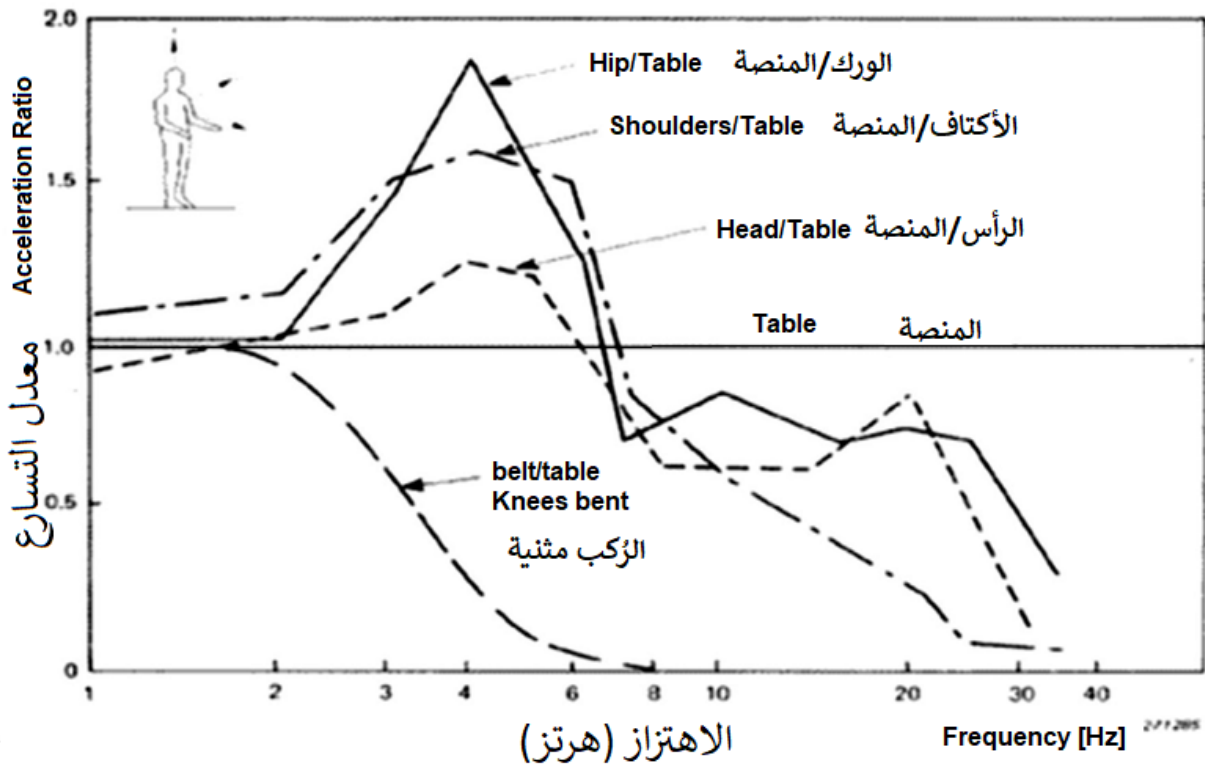


الشكل (٢): مقارنة في الراحة والثبات باعتبار قيم التخميد

أنه في العموم مع قيم تخميد منخفضة نحصل على راحة أكبر في القيادة وثبات أقل وهذا ما نراه في السيارات الفارهة، وعند زيادة قيمة التخميد نحصل على ثبات أكبر وانخفاض في الراحة وهذا ما نراه في سيارات السباق، ولتحقيق أداء مقارب يجمع بين الخاصتين يكون في الحالة الوسط

لأغلب السيارات السياحية، وللخروج من هذه المقارنة لا بد من استخدام نظام تعليق فعال يقدم هاتين الوظيفتين دون أن يكون محدود الأداء.

وذكرت الدراسة أيضًا أن المؤشرات الثلاثة لتحقيق الراحة والثبات هي انحراف العجلات والحمل الديناميكي للعجلات وتسارع جسم السيارة، ولتعريف الحدود المسموح بها لتسارع جسم السيارة، هناك مجال تردد يكون فيه البشر أكثر حساسية للاهتزاز (مجال حساسية الإنسان) ويبين فيه أن حد التحمل البشري لنطاق التردد إلى التسارع الرأسي هو (4-8Hz)، وللحصول على راحة كبيرة يجب أن يكون تردد جسم السيارة (حيث يمثل الكتلة العلوية أو المعلقة) الناتج عن الاهتزازات قريبًا من (1Hz)، وكما أنه يجب الحفاظ على تماس العجلات (حيث تمثل الكتلة السفلية أو غير المعلقة) للطريق لخفض حدة ترددها الذي يصل إلى (10Hz) ولوحظ أن أكثر الأعضاء تأثرًا هو الورك (الجزع) يليه الكتف ثم الرأس وأخيرًا الركب، والشكل يبين العلاقة بين التردد ومعدل التسارع الشاقولي لأعضاء الجسم البشري نسبةً إلى ثابت وهو المنصة عند انتقال الاهتزازات الشاقولية من المنصة إلى جسم الإنسان:



الشكل (٣): انتقال الاهتزازات الشاقولية من منصة إلى جسم الإنسان

ومن هذه الدراسة نتوصل بأنه لا يمكن أن نحصل على الراحة العالية مع الثبات القوي على الطريق عند استخدام نظام التعليق التقليدي، وإنما لدينا ثلاثة توجهات إما راحة عالية وإما ثبات قوي وإما حالة وسط تجمع بينهما مع انخفاض في الوظيفتين إلى حد ما، وللخروج من هذا التقييد لا بد من استخدام نظام تعليق فعال، وأنه يجب الحفاظ على تردد (1Hz) لجسم السيارة وألا يقع في المجال (4-8 Hz) حيث تصبح قيم التسارع عالية.

"Optimal Design of Passenger Car Suspension for Ride and Road Holding" [Anil Shirahatt, Ahamadnagar, India, 2008]

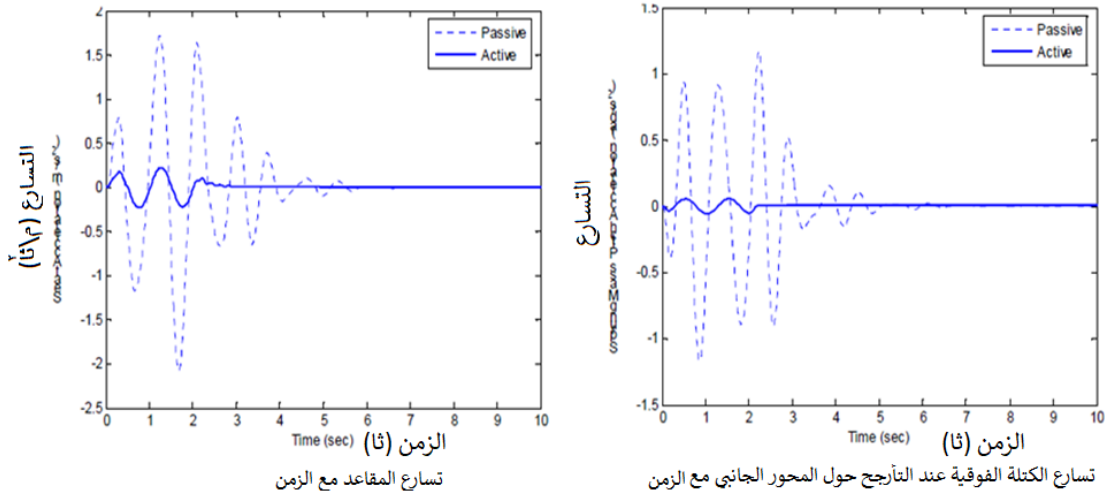
طبقت تقنية تحسين مناسبة في منصة خاصة للتصميم للحصول على بارامترات نظام التعليق الفعال وغير الفعال لسيارة ركاب.

قللت البارامترات الموضوعية (Objective) إلى عددٍ معين مثل تسارع الارتداد الأعظمي للمقعد وكتلة النوابض والرجفة (Jerk) والثبات على الطريق وانحراف العجلات إلى عدد من القيود، وتنشأ القيود من أسباب حركية عملية وأسباب الراحة، مثل حدود أقصى تسارع رأسي في مقعد الركاب وإزاحة الإطارات ومساحة عمل التعليق.

استخدمت الخوارزمية الجينية (Genetic Algorithms (GA) (الخوارزمية الجينية أو الوراثة) وهي من التقنيات المهمة في البحث عن الخيار الأمثل من مجموعة حلول متوافرة لتصميم معين، وتعتمد مبدأ داروين في الاصطفاء إذ تقوم هذه المعالجة الوراثة بتمرير المزايا المثلى بعمليات التوالد المتعاقبة، وتدعيم هذه الصفات، وتكون لهذه الصفات القدرة الأكبر على دخول عملية التوالد، وإنتاج ذرية أمثل، وبتكرار الدورة الوراثة تتحسن نوعية الذرية تدريجيًا^[17]) لحل المشكلة وقورنت النتائج مع تلك التي حصل عليها عن طريق تقنية محاكاة التطويع أو التلدين (Simulated Annealing (SA) (وهي خوارزمية احتمالية للبحث عن الحل الأمثل لتابع رياضي معين، ومبدؤها مستمد من طريقة معالجة المعدن حراريًا بتطويعه وتتمثل بتناوب دورات التبريد البطيء وإعادة التسخين حتى الوصول إلى وضعية تكون فيها الطاقة أصغر ما يمكن) ووجدت أنها تعطي مقاييس أداء مماثلة، كلا نظامي التعليق الفعال وغير الفعال وقورنت مع تحليلات المجال الزمني الخاضع إلى طريق جيبي بوصفه إشارة دخل.

سعت الدراسة إلى تحديد قيم البارامترات المثلى عند التصميم وفق المقارنة على أساس الراحة المطلوبة أثناء الترحال تحت معايير دولية ISO 2631-1 وأيضا مقدار تقلص نظام التعليق، وذلك كما ذكرنا باستخدام الخوارزمية الجينية (GA) لنموذج كامل السيارة بثمان درجات طلاقة (8DF) واستخدم فيها نظامي التعليق التقليدي والفعال، ومن ثم مقارنة النتائج مع نتائج استخدمت فيها تقنية محاكاة التلدين (SA)، ذكرت الدراسة أن النتائج التي تم الحصول عليها من طريقي الخوارزمية الجينية (GA) وتقنية محاكاة التلدين (SA) كانت متقاربة جدًا ويمكن الوصول إلى الأهداف المنشودة منها، وكما ذكرت الدراسة بأن ارتداد الركاب وتسارع الركاب وإزاحة الإطارات في نظام التعليق الفعال تنخفض بنسبة 74.2% و 88.72% و 28.5% على التوالي بمقارنته مع نظام التعليق التقليدي، وهذا يشير إلى أن نظام التعليق الفعال لديه إمكانيات أفضل من نظام التعليق التقليدي لتحسين كل من الراحة والثبات على الطريق.

وهنا بعض النتائج التي تم الحصول عليها والمقارنة بين نظام التعليق الفعال والتقليدي:



الشكل (٤): مقارنة قيم التسارع بين النظامين التقليدي والفعال

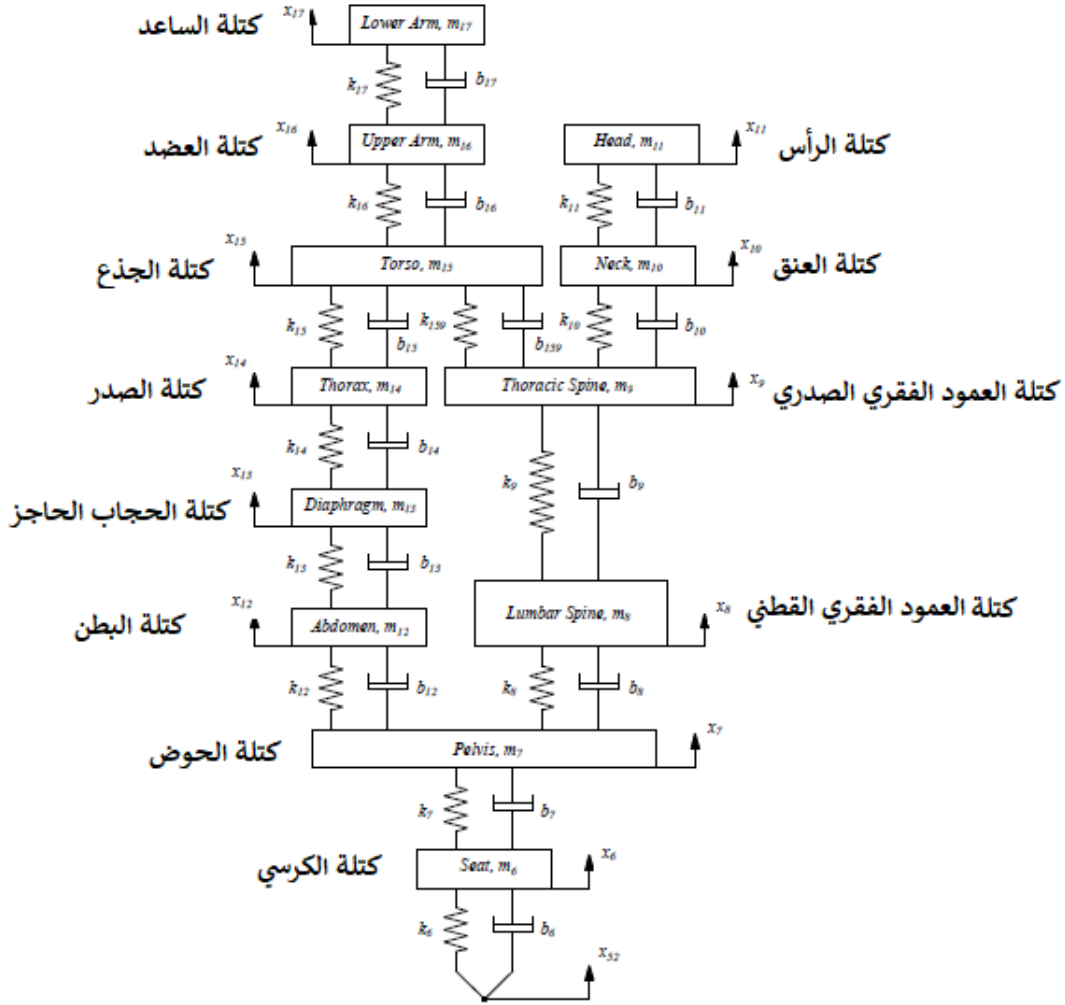
يمكننا القول أن قابلية نظام التعليق الفعال للتحسين والتطوير أكبر منها في النظام التقليدي بغية الحصول على الراحة المنشودة، وأيضًا إمكانية تحليل المؤشرات المطلوب تحديدها وذلك حتى عند مرحلة التصميم والاختبار الحاسوبي قبل البدء في تصنيع أنظمة التعليق، وبالتالي اختصار الجهد والنفقات باستخدام النمذجة والمحاكاة لأداء أنظمة التعليق.

٤-١ - الدراسة الرابعة:

"Analysis of Passenger Ride Comfort"

[A. Sezgin, N. Yagiz; Istanbul Un, Turkey, 2012]

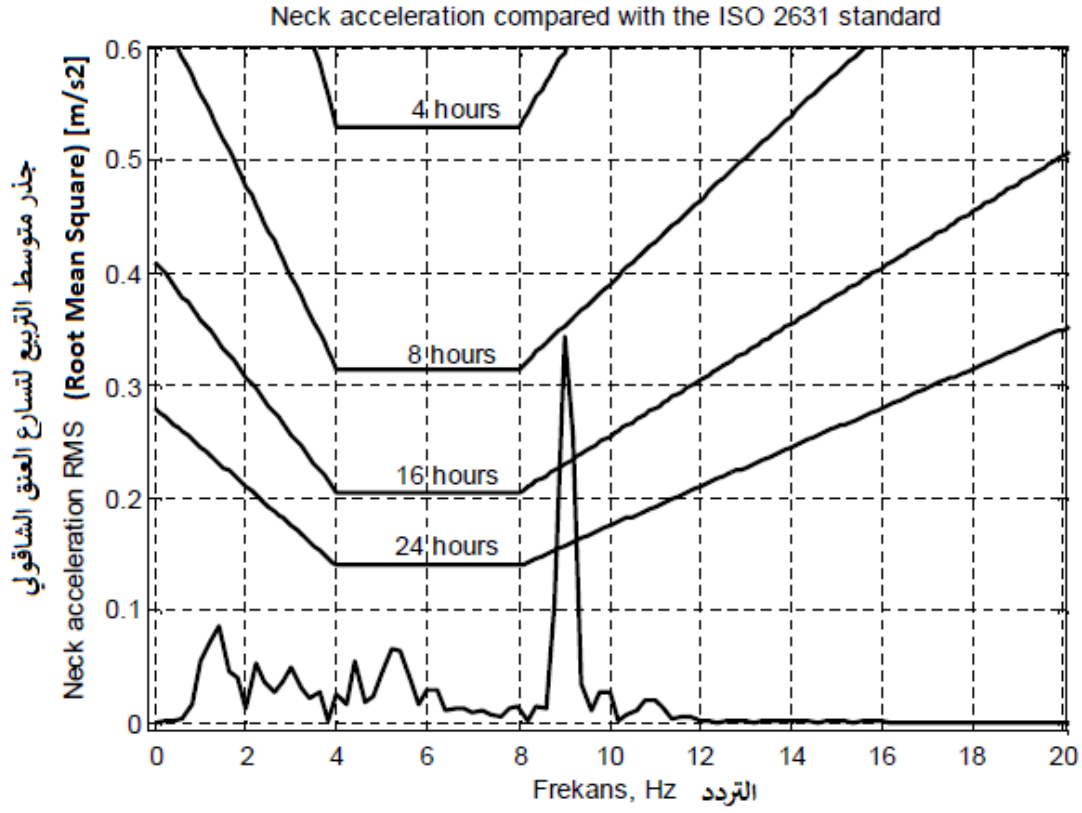
في هذا البحث دُرست تصاميم جديدة للمقاعد وأيضًا أثر هذه الاهتزازات في جسم الإنسان عن طريق نموذج فيزيائي:



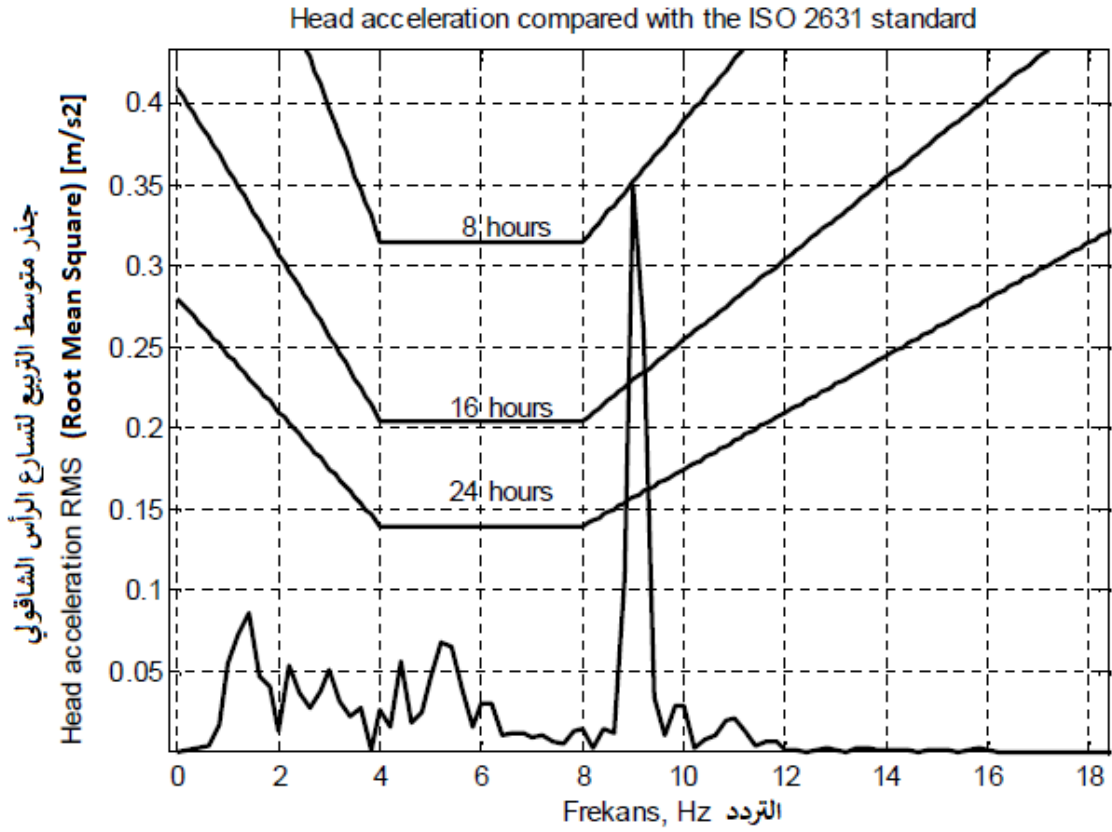
الشكل (٥): نموذج فيزيائي لحساب أثر الاهتزازات على جسم الانسان

ويبين النموذج الفيزيائي تسلسل التأثير على كتل جسم الانسان والترابط فيما بينها، معبرًا بذلك عن مجموعة الكتل (m) ومعامل المرونة (k) والتخميد (c) والموضع الشاقولي (x) لكل كتلة على حدا.

وهذه بعض النتائج التي حصل عليها:



الشكل (٦): معدل تسارع العنق



الشكل (٧): معدل تسارع الرأس

حيث يبين المخططان قيم التسارع الشاقولي لكل من العنق في الأعلى والرأس في الأسفل مع تغير قيم التردد، تمثل المحاور الشاقولية قيم التسارع الشاقولي محسوبًا وفق جذر متوسط التربيع RMS (Root Mean Square) والمحاور الأفقية قيم التردد، كما نلاحظ داخل المخطط وجود خطوط منكسرة تمثل قيم التسارع الشاقولي مع التردد ولكل منها فترة زمنية معينة، وتعتبر عن العتبات التي يبدأ الانسان عندها بالشعور بعدم الارتياح عند تجاوزها نحو الأعلى وهي قيم قياسية وفق ISO 2631، وذكرت النتائج في الدراسة أنه:

- الاهتزازات تؤثر على صحة جسم الانسان، وهي من المعايير الأساسية في تحقيق الراحة أثناء القيادة وأنه من الممكن للاهتزازات أن تضعف من أداء الجسم البشري، ومجال حساسية جسم الانسان للاهتزازات بين (1.2 – 9.5 Hz)، كما أن التردد الذاتي للكتلة العلوية للسيارة يجب أن تكون بحدود (1.2 Hz) وللكتلة السفلية (9.5 Hz).
- إذا كان للسائق رحلة بمعدل (72 km/h) ومن (5) إلى (6) ساعات على طريق سلس، فإنه يشعر بعدم الراحة.
- في مجال التردد من (8 – 10 Hz)، سيشعر السائق بعدم الارتياح بسبب التشنجات العضلية وآلام البطن، ومن ثمّ يمكن الاستنتاج أن الإنسان لا ينبغي أن يتعرض للاهتزازات لأكثر من (5) ساعات في ظل هذه الظروف.

تبين الدراسة أنّ الاهتزازات هي من أهم المعايير الواجب أخذها بالحسبان للحصول على الراحة أثناء القيادة، فهي توهن الجسم وخاصةً إذا تعرض لها لفترات طويلة، ويجب الحفاظ على تردد ذاتي للكتلة العلوية بحدود (1.2 Hz).

١-٥- الدراسة الخامسة:

"Design and Analysis of an Interconnected Suspension for a Small Off-road Vehicle" [Zheng Yao; University of Windsor; Canada, 2016]

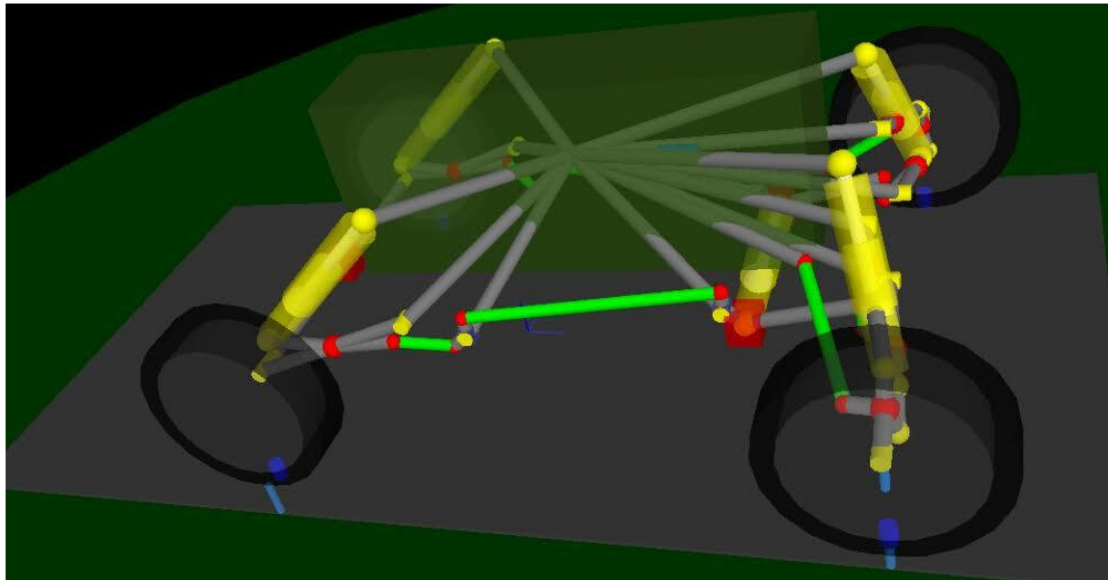
أجرى الباحث دراسة تعمل على تحسين الأداء باستخدام التوصيل المترابط المبتكر في نظام التعليق، تُركب آلية تربط بين التعليق الأمامي والخلفي على كل جانب من جوانب السيارة على الهيكل.

صممت سيارة افتراضية في (CATIA) وأجريت محاكاة ديناميكية باستخدام أدوات البرامج (EoM) و (Altair Motionview).

تهدف هذه الدراسة إلى كشف خصائص نظام التعليق المترابط المبتكر، والذي قد يحسن من أداء نظم التعليق، كانت التوقعات أنه عند زيادة مقاومة التآرجح حول المحور الطولي (Roll) دونما أن يكون مصطحبًا بزيادة في المقاومة للتآرجح المزدوج (Twist) قد يقدم نظريًا تحسن في تماسك الإطارات على الطريق وخفض التآرجح (Roll)، لكن النتائج لم تحقق التوقعات.

عند زيادة مقاومة التآرجح حول المحور الطولي (Roll) ومقارنة النتائج مع تصاميم أخرى ظهر تحسن بسيط، فتم خفض مقدار التآرجح (Roll) ولكن مع انخفاض في قيم الراحة كضريبة لهذا التحسن وذلك عند المقارنة مع تصميم شريط الموازنة (Anti-Roll Bar)، وأيضًا اختفى هذا التحسن عند التردد العالي، وهذا يفيد بأنه نظام التعليق المترابط مناسب أكثر على الطرق غير المعبدة (Off-Road) حيث التواءات والحفر تكون بسعات أكبر وتردد أقل.

وبالتالي التصميم المقترح كان أقل من التوقعات، وهذا يوحي أن هناك حاجة إلى مزيد من الدراسة للتصاميم البديلة، فهي لم تحقق شروط الراحة الكافية، بل خفضت من قيم الراحة.



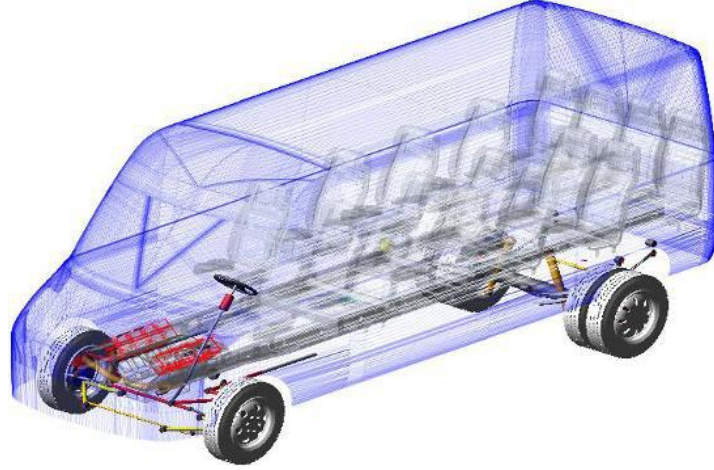
الشكل (٨): تصميم مبتكر للتوصيل المترابط بين النظامين الأمامي والخلفي

٦-١ - الدراسة السادسة:

"Simulation and Experimental Research on Vehicle Ride Comfort and Suspension Parameters Optimisation"

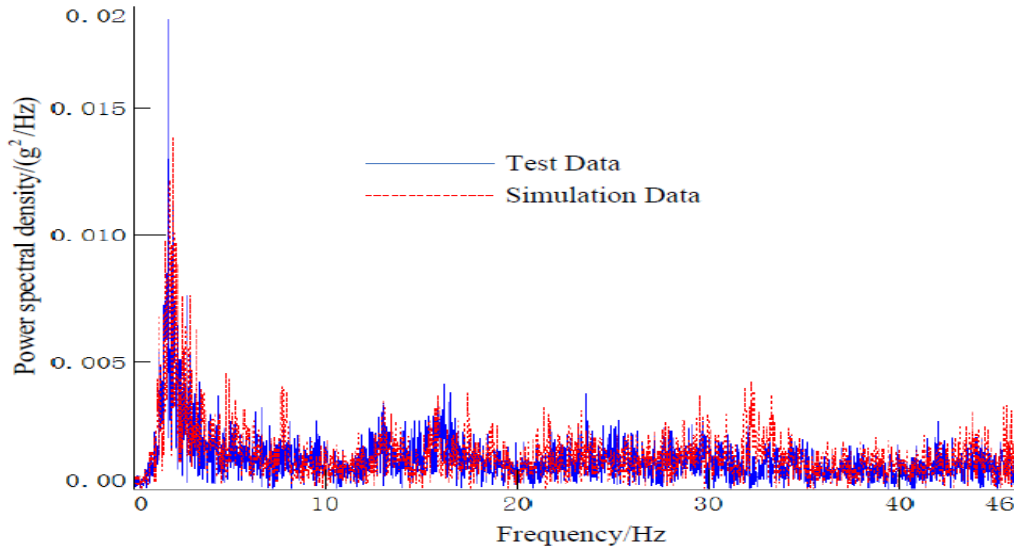
[Z.Ding & Z.Lei; Changsha Un, China, 2016]

في هذه الدراسة أنشئ نموذج حركي لباص صغير صمم حاسوبياً، ومن ثم استخرجت قيم مؤشرات الراحة عن طريق المحاكاة، وبالرجوع إلى القيم التجريبية استنتج صلاحية النموذج للمحاكاة:



الشكل (٩): نموذج حركي لباص

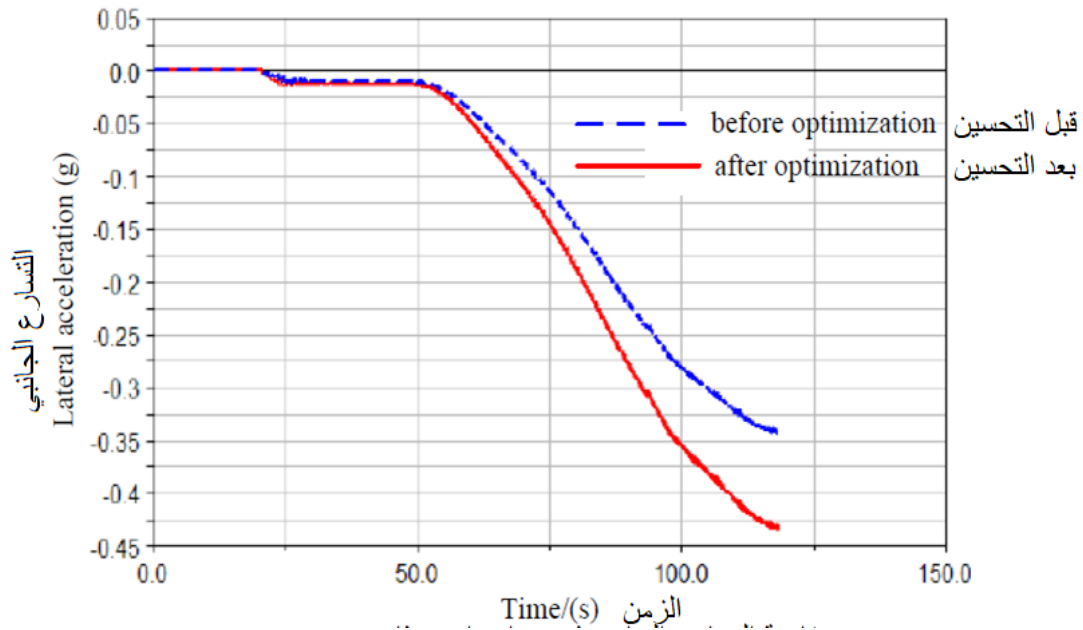
بعض النتائج التي حصل عليها حاسوبياً وتجريبيًا والمقارنة بينها:



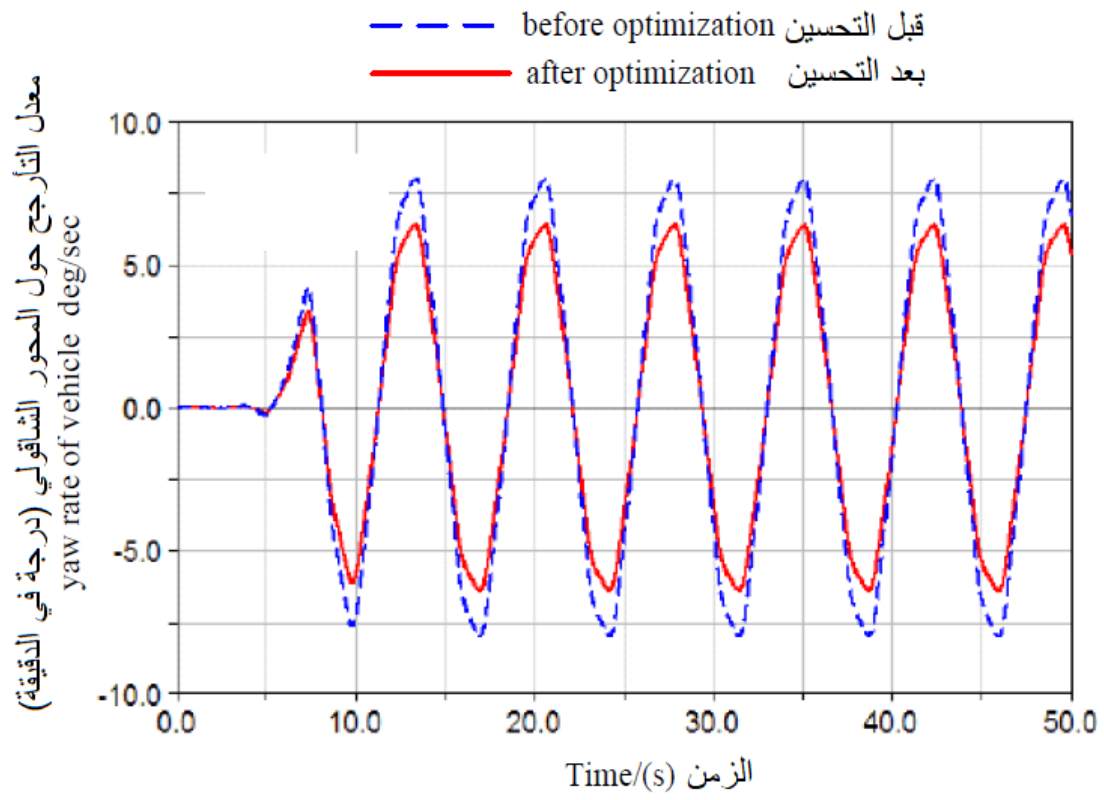
الشكل (١٠): مقارنة تردد التسارع وفق الكثافة الطيفية (PSD (Power Spectral Density) للنموذجين التجريبي والحسابي

وبعد التأكد من صلاحية النموذج للمحاكاة تم إجراء عمليات التحسين لمؤشرات نظام التعليق للمركبة باستعمال خوارزمية جينية، فالخوارزمية الجينية هي بحث شامل عشوائي وطريقة تحسين مشابهة لآلية التطور البيولوجي الطبيعي، فيمكنها اكتساب وتجميع المعلومات تلقائيًا ضمن مساحة البحث عند إجراء عملية البحث، وتتحكم بشكل تكيفي في عملية البحث للحصول على مجموعة Pareto وهي مجموعة من الحلول أو الخيارات التي لا يمكن تحسينها بشكل أكبر دون التأثير سلبًا على طرف آخر، أي أنه لا يمكن تحسين حالة أحد الأطراف دون أن يؤدي ذلك إلى تدهور حالة طرف آخر.

في هذا البحث استخدمت الخوارزمية الجينية التقليدية NSGA-II للتحسين متعدد الأغراض لمؤشرات أنظمة التعليق الأمامية والخلفية، لإجراء عملية التحسين تم استخدام برنامج Matlab، والجمع بين النموذج الأولي الافتراضي للمركبة الذي أنشئ في برنامج Adams لمطابقة وتحسين نظام التعليق الأمامي والخلفي، علمًا بأنه يلزم ضبط متغيرات التحسين مسبقًا، ويراعى بشكل أساسي المتغيرات التي تؤثر بشكل كبير على راحة القيادة وثبات السيارة، ويمكن اختيارها وفقًا للظروف الواقعية أو المؤكدة، أظهرت النتائج الحاصلة عن التحسين أن مستوى الراحة في القيادة ارتفع بشكل ملحوظ، وكانت النتائج بعد عملية التحسين وقبله كالآتي:



الشكل (١١): مقارنة التسارع الجانبي في مسار دائري ثابت قبل عمليات التحسين وبعدها



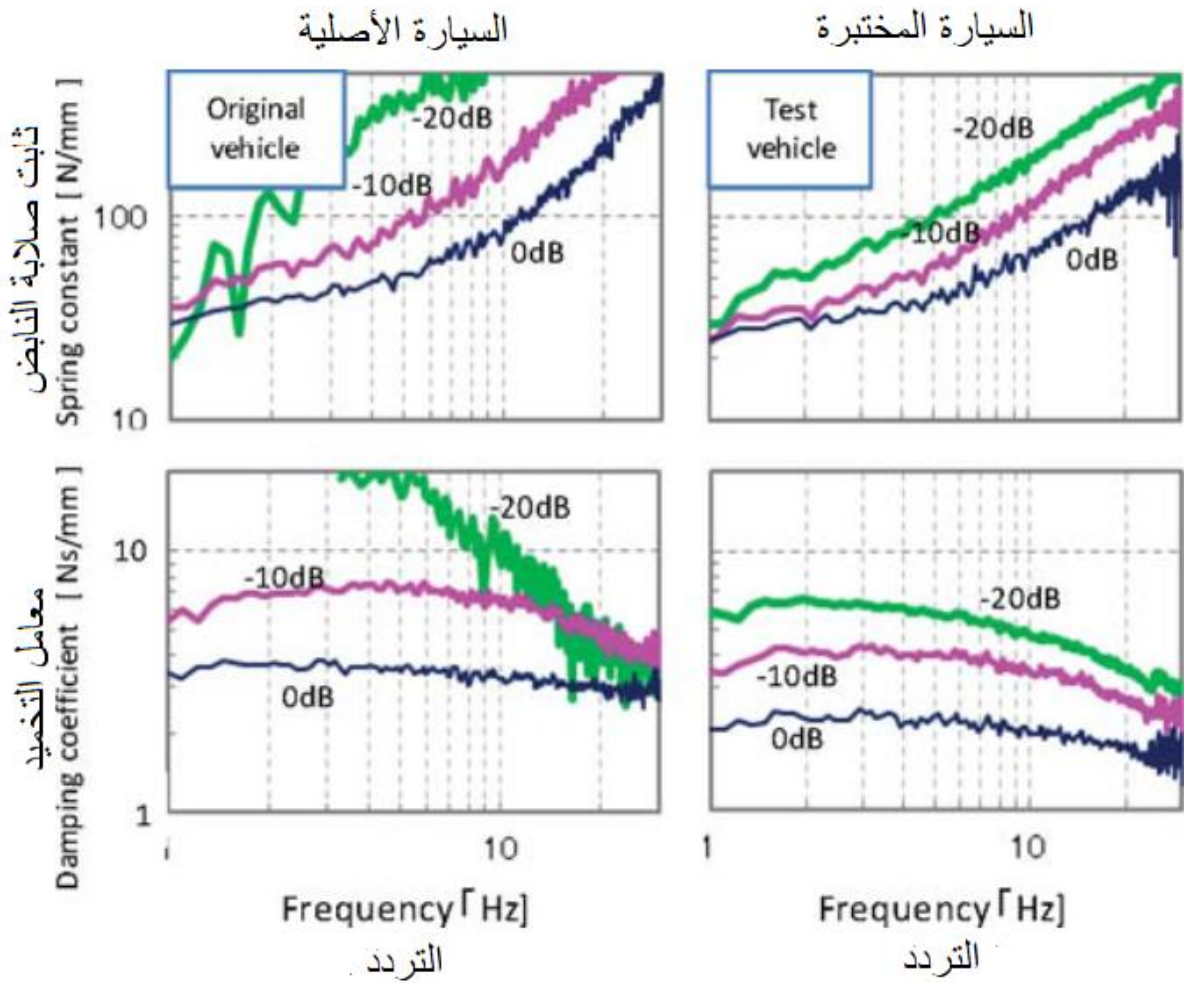
الشكل (١٢): مقارنة معدل التآرجح حول المحور الشاقولي (Yaw) قبل عمليات التحسين وبعدها

٧-١ - الدراسة السابعة:

"Ride Comfort Analysis Considering Suspension Friction with Series Rigidity" [Sh.Koumura & T.Shionoya; TOYOTA Co, 2016]

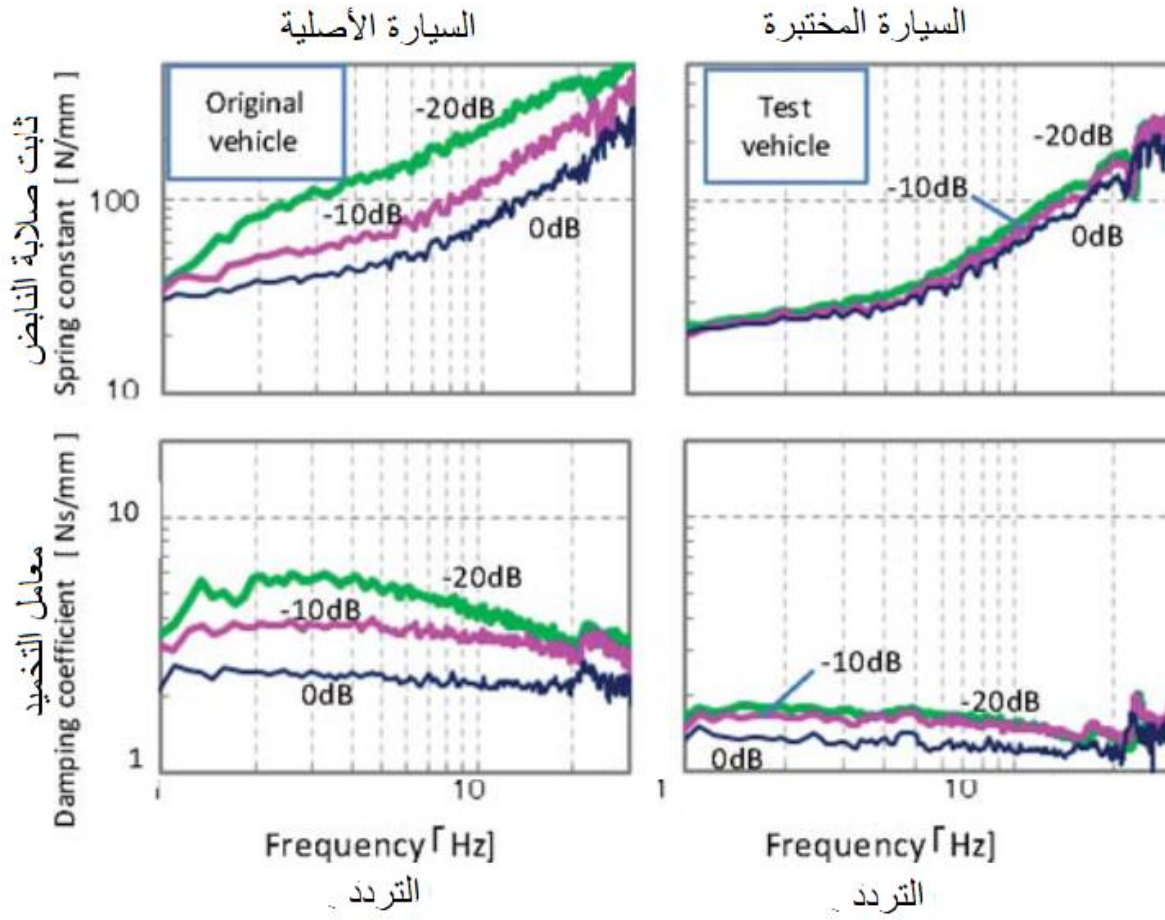
أظهرت الدراسة التي أجريت حاسوبياً عن طريق بناء نموذج ديناميكي لتحليل الاحتكاك في نظام التعليق أن الاحتكاك الناتج في مرابط الأجزاء المتحركة له شأن كبير في التقليل من قيمة ثابت صلابة النابض ومن قيمة عامل التخميد.

وهنا النتائج التي نتجت بعد التخفيض من قيم الاحتكاك وقبله على المحور الأمامي:



الشكل (١٣): مقارنة بين قيم ثابت صلابة النابض ومعامل التخميد عند ترددات اهتزاز مختلفة قبل التخفيض من قيم الاحتكاك في المرابط وبعده على المحور الأمامي

وهنا النتائج التي نتجت بعد التخفيض من قيم الاحتكاك وقبله على المحور الخلفي:



الشكل (١٤): مقارنة بين قيم ثابت صلابة النابض ومعامل التخميد عند ترددات اهتزاز مختلفة قبل التخفيض من قيم الاحتكاك في المرباط وبعده على المحور الخلفي

لقد لوحظ من النتائج أن الاحتكاك يرفع من قيم صلابة النابض ومعامل التخميد وخاصةً عند الترددات العالية للاهتزازات، وعند إجراء التحسين في التخفيف من الاحتكاك بين الأجزاء المتحركة انخفضت قيم صلابة النابض ومعامل التخميد وبشكل كبير عند الترددات العالية، وهذا يقلل من جساءة نظام التعليق حيث لا يمكن امتصاص الاهتزازات بالشكل المرغوب وضياح في مهمة نظام التعليق في تأمين الراحة عند الترحال.

٨-١- الخلاصة:

رأينا من هذه الدراسات كيف سعى الباحثون إلى فهم سلوك الإنسان عند الترحال عن طريق تحليل العوامل المؤثرة عليه كالتنظيم لعملية الترحال واختيار الموقع والآلية التي سيتم عن طريقها التنقل، ووجدوا أنه يمكن الاستعاضة بالمؤشرات الموضوعية والمادية (Objective) عن الآراء الشخصية (Subjective) في تعيين معايير الراحة وأنه يمكن تحليل الراحة عند الركوب في ثلاثة جوانب وهي العوامل الديناميكية (الاهتزازات والصدمات والتسارع) والعوامل المحيطة (الحرارة والضجيج والضغط ونوعية الهواء) وأيضًا العوامل المكانية، ولوحظ أن أكثر المؤثرات على جسم الإنسان هي الاهتزازات وتردداتها وقيم تسارعها، لذا بحثوا في ما يطيقه جسم الإنسان بأعضائه المختلفة من هذه الاهتزازات وتوابعها والمؤشرات المتعلقة بها.

وعند تطبيق الاهتزازات على جسم الإنسان لوحظ أن استجابة الجسم للاهتزازات تختلف تبعًا لقيم ترددها وأن أكثر الاهتزازات إزعاجًا هي ما كان ترددها بين (4 – 8 Hz) وأن أكثر الأعضاء تأثرًا بالاهتزازات هو الورك (الجزع) يليه الكتف ثم الرأس وأخيرًا الركب، ووبربط قيم التسارع الشاقولي مع قيم التردد للاهتزازات ظهرت لنا عتبات لقيم التسارع إذا اجتيزت شعر الإنسان عندها بعدم الراحة، وتنحدر هذه العتبات بشكل ملحوظ عند الترددات (4 – 8 Hz) أنفة الذكر، وأيضًا هذه العتبات تنخفض بقيمها مع التسارع الشاقولي كلما زاد الوقت المستغرق في الترحال بحيث تصبح حتى القيم المنخفضة للتسارع مزعجة كلما زاد الزمن المنقض في التنقل، فإذا كان للسائق رحلة بمعدل (72 km/h) ومن (5) إلى (6) ساعات على طريق سلس، فإنه يشعر بعدم الراحة، وفي مجال التردد (8 – 10 Hz)، سيشعر السائق بعدم الارتياح بسبب التشنجات العضلية وآلام البطن، ومن ثمّ يمكن الاستنتاج أن الإنسان لا ينبغي أن يتعرض للاهتزازات لأكثر من (5) ساعات في ظل هذه الظروف.

وفي سبيل هذا الأمر اهتم الباحثون في فهم نظام التعليق وتعامله مع التغيرات الناتجة عن الطريق بغية التقرب من الأداء الأمثل له وتأمين الراحة اللازمة عند التنقل، حيث تعدّ هذه الخواص من الوظائف الأساسية لنظام التعليق، ووجدوا أن أفضل أنظمة التعليق استجابةً هو نظام التعليق الفعال، كما تبين إحدى الدراسات إمكانية استخدام أسلوب المحاكاة حاسوبياً لأداء نظام التعليق للوصول إلى قيم شبيهة بالواقع بغية تسهيل الدراسة لنظام التعليق مع إمكانية إجراء تعديلات وتحسينات على نظام التعليق للوصول إلى الأداء الأمثل له ما أمكن.

لقد لوحظ أنه في الدراسات السابقة لم يكن هناك دراسة تهتم بمجمل نظام التعليق وتقدم ملخصاً لأداء نظام التعليق تحت إطار تأمين الراحة المطلوبة ويشمل جميع مكوناته الأساسية وتحت تجارب عدة تبين مختلف الظروف عند التغيير في قيم المؤشرات ليظهر التغير في الأداء، ونحن نريد في هذا البحث دراسة نظام التعليق بأنواعه المختلفة ومكوناته الأساسية وبمختلف الظروف لفهمه فهمًا أوسع وأكثر شمولية للوصول إلى معايير راحة مقبولة في أثناء الترحال ومعرفة الأنسب منها تبعًا لنوع الطرق التي يجب أن تسير عليها عند تصميمها عن طريق المحاكاة لأداء نظام التعليق.

مشكلة البحث

أسهمت العديد من العوامل في زيادة الاهتمام بتقويم الراحة التي يسعى إليها الركاب في المركبات، ونتيجة ما تقدمه المركبات من خدمات في النقل والسفر وقطع المسافات البعيدة، ازداد الوقت الذي يقضيه الناس في السيارات ازديادًا كبيرًا، وازدادت الحاجة إلى الشعور بالراحة، وأيضًا هناك عوامل تسويقية تنافسية جعلت من مصنعي السيارات تصب كل اهتمامها في تلبية هذه المتطلبات، فتبارزت الشركات لتقدم أفضل منتجاتها محققةً بذلك أفضل أداء وأعلى درجات الراحة، فبدأت دراسات حول فهم جسم الانسان وتأثره بالعوامل المحيطة به وسعت لتحليل هذه العوامل وعملت على تكوين أنظمة تعليق تحاكي في أدائها سلوك الانسان فيصبح الشعور بالراحة ملموسًا له والعوامل المحيطة موائمة كما يلزم.

يمكن تصنيف الراحة التي يمر بها البشر في بيئة معينة كتقويم ذاتي شخصي (Subjective)، لأنه من الممكن العثور على اختلاف كبير في استجابات الأشخاص المختلفين للوضع نفسه. ومع ذلك، فإن العوامل التي تستند إليها آراء الناس على مستوى الراحة هي المتغيرات المادية التي تميز البيئة المحيطة (Objective)، على سبيل المثال: الضوضاء والضجيج والاهتزازات ومعدل التسارع. لذا، فإن الخطوة الأولى في أي تقويم هي سرد أنواع مختلفة من الحوافز التي يمكن كشفها من قبل الحواس البشرية والحكم على سبب الانزعاج، مما يؤدي بالتالي إلى الإحساس بعدم الراحة.

هدف البحث

تحليل أداء أنظمة التعليق للوصول إلى معايير الراحة بالقيم المرغوبة والابتعاد عن التصاميم أو القيم التي تؤدي إلى قيادة مزعجة.

أهمية البحث

تكمن أهمية البحث في التعرف على الأسرار التصميمية لنظام التعليق لتلبية متطلبات الراحة للركاب والأمان وسلامة المواد المنقولة وتجنب نقل الصدمات الناتجة عن خشونة الطريق التي تؤدي إلى تعب أجزاء السيارة واهترائها، وتحقيق الأداء الأفضل لحركة السيارة على الطريق عن طريق تأمين التماس الأفضل للعجلات على الطريق.

مسوغات البحث

لقد كانت أغلب الدراسات السابقة تسعى لفهم الراحة في أثناء الترحال من اتجاه واحد محدد دون التنويع في المؤشرات والظروف، ودون إعطاء صورة مجملية لأداء نظام التعليق عند تعدد تصاميمه وأنواعه وتأثير مؤشرات، وكان المسوّغ في هذا البحث إعطاء هذه الصورة المجملية عن طريق المقارنة بين التصاميم والتعديلات المختلفة وباختبارات متنوعة.

محددات البحث

سيقتصر البحث في الدراسة على النمذجة والمحاكاة، نظرًا لقلّة التكاليف وسرعة الحصول على النتائج الضرورية وتشابه نتائجها مع الواقع إلى حدٍ كبير كما ذكرت بعض الدراسات المرجعية في الفصل السابق التي أجرت مقارنة بين الاختبارات الواقعية والحاسوبية وفق النمذجة والمحاكاة، علمًا أن التجارب الواقعية تبقى هي الأفضل لدقتها وعدم الشك فيها، وعليه ستقتصر الدراسة فقط على المؤثرات الموضوعية مستبعدين مراعاة التقويم الشخصي والحصول على الآراء في الاختبارات وأيضًا باعتبار أن التقويم الشخصي ناتج في الغالب عن المؤثرات الموضوعية حسب أغلب الدراسات.

حدود البحث

ستتم الدراسة على سيارة سياحية وبتطبيق التعديلات عليها في اختيار نوع نظام التعليق وتأثير مؤشرات النظام التابعة لمكوناته الأساسية.

منهج (مخطط) البحث وأدواته

١. دراسة مرجعية تتناول الدراسات السابقة حول موضوع البحث.

عُرض فيها (في الفصل الأول) عدد من الدراسات السابقة وما توصلت إليه في إطار فهم العوامل المؤثرة على الإنسان في أثناء الترحال بغية الوصول إلى الشعور بالراحة المنشودة وما المعايير والمؤشرات الواجب توفرها في المركبة لتأمين تلك الراحة.

٢. دراسة خاصة صفاء الحركة الاستثمارية والمؤشرات التي تتعلق بجملة التعليق.

تتضمن شرح صفاء حركة السيارة وما أهم المؤشرات المساعدة على الوصول إليها وأكثرها تأثيرًا مع شرح بسيط لأنواع أنظمة التعليق ومكوناته وخطوات التصميم وكيفية اختباره وما خصائصه، مع ذكر معايير الراحة والقيم الواجب الوصول إليها لتكون الرحلة مريحة.

٣. النمذجة والمحاكاة لنظام التعليق.

وفيها يُختار النموذج الرياضي لاختبار حركة السيارة، وذكر مواصفات السيارة اللازمة لإجراء الاختبار، ووصف أنواع الطرقات التي ستستخدم في دراسة حركة السيارة، وشرح خطوات النمذجة والمحاكاة في البرنامج (CarSim) لاستخراج البيانات اللازمة لدراسة مؤشرات الراحة، ومن ثم ربط هذه البيانات ببرنامج (Matlab/Simulink) لحساب مؤشرات الراحة.

٤. إجراء التجارب وتحليل النتائج ومناقشتها.

ستجري تجارب للمقارنة بين أنواع أنظمة التعليق وفق أصنافها على أساس معايير الراحة، وأيضًا ستجرى تجارب تعديل لمواصفات السيارة لدراسة تأثيرها في صفاء حركة السيارة.

٥. التوصيات.

الفصل الثاني

دراسة خاصة صفاء
الحركة الاستثمارية
والمؤشرات التي تتعلق
بجملة التعليق

دراسة صفاء حركة سيارة سياحية والمؤشرات التي تتعلق بجملته التعليق

في هذا الفصل سندرس علاقة نظام التعليق بالراحة في أثناء الترحال بدراسة مبسطة لصفاء حركة السيارة وما الهدف منها وما المؤشرات التي تعتمد عليها، وسنتكلم أيضاً على معايير الراحة المستخدمة لتقويم فعالية نظام التعليق في أثناء حركة السيارة وما الإجراءات الواجب اتخاذها لتصميم نظام تعليق مناسب.

١-٢ - صفاء حركة السيارة:

هي الخاصية المسؤولة عن امتصاص الاهتزازات الناتجة عن حركة السيارة على طرق غير مستوية بالشكل المطلوب الذي يوفر:

- الراحة للمسافرين.
- سلامة الحمولة المنقولة.
- موثوقية عمل كبيرة.
- إنتاجية مرتفعة.
- اقتصادية جيدة للسيارة.

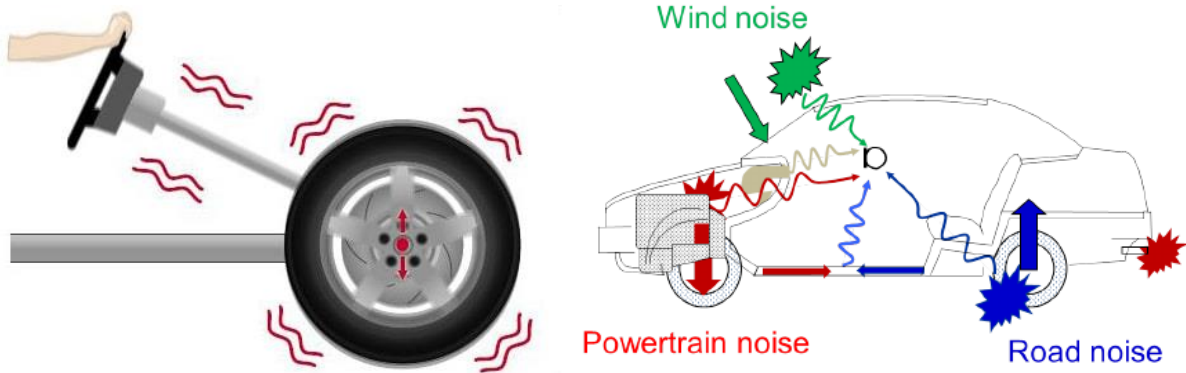
تؤدي الاهتزازات إلى ظهور التعب والدوار وغير ذلك من الانفعالات الفيزيولوجية لدى كل من السائق والركاب، كما أنها تؤثر على سلامة الحمولة المنقولة فتعرضها للكسر وربما للتفتت، بالإضافة إلى ذلك ترافق الاهتزازات بظهور قوى ديناميكية صادمة تؤثر على أجزاء الكتلة العلوية والكتلة السفلية (سيأتي الكلام عنها مع الفرق بينها في هذا الفصل لاحقاً) فتخضعها لمزيد من الاجهادات، تؤدي إلى زيادة تآكلها وسرعة اهترائها وربما تتسبب في تحطمها، لهذا فإن سرعة السيارات وبالتالي إنتاجيتها تنخفض كثيراً على الطرق غير المستوية إذا لم تكن تتمتع بخصائص صفاء حركة جيدة تمكنها من امتصاص الاهتزازات المتولدة على مثل هذه الطرقات بالشكل المطلوب.

يؤدي ظهور الاهتزازات إلى زيادة في استهلاك الوقود لتأمين القدرة اللازمة للتغلب على المقاومات الإضافية التي تتشكل في جميع عناصر التعليق، بما فيها العناصر المرنة والعناصر الموجهة والعناصر المخمدة، وكذلك لتغطية الهدر المرافق للقدرة في إطارات العجلات والقدرة الضائعة نتيجة لتصادم الكتل العلوية والسفلية.^[1]

٢-٢- الأهداف من صفاء حركة السيارة:

لتحقيق أفضل أداء لنظام التعليق يجب ضبط وتحديد المهام الأساسية اللازم العمل عليها والهدف منها، وهنا نذكر الأهداف الرئيسية لخاصية صفاء حركة السيارة الاستثمارية مع ذكر السبل اللازم إجرائها لتحقيق هذه الأهداف [18]:

- لتوفير أداء قيادة وتحكم مناسبين، يجب:
 - عزل الهيكل عن طريق تأمين مرونة في الحركة الرأسية للعجلات.
 - التأكد من أن العجلات تتلاءم وشكل الطريق.
 - تأمين تأرجح بسيط جدًا للإطارات.
- للتأكد من أن السيارة تتفاعل بالشكل المطلوب مع القوى الناتجة عن الإطارات في أثناء الكبح الطولي وقوى التسارع وقوى الانعطاف الجانبية وعزوم الكبح والتسارع:
 - يتطلب تصميم هندسة نظام التعليق لمقاومة ارتفاع مقدمة السيارة أو انخفاضها (Squat , Dive) وتأرجح جسم السيارة حول المحور الطولي (Roll).
- لتوفير عزل للاهتزازات عالية التردد الناتجة عن الإطارات، يجب:
 - توفير عزل مناسب في وصلات التعليقة.
 - منع انتقال الضجيج الناتج عن الطريق إلى جسم السيارة.



الاهتزاز Vibration

الضجيج Noise

الشكل (١٥): الضجيج والاهتزاز وأثرهما على المركبة [28],[29]

٣-٢- تصميم نظام التعليق:

بدايةً، عند تصميم نظام تعليق ما، يجب علينا فهم المخطط الآتي الذي يساعدنا على الوصول إلى معايير الراحة مع المتطلبات والمهام المطلوبة من السيارة المراد إنتاجها ونوع الطرق التي يجب أن تعمل بها، وبناءً عليه يمكننا اختيار المؤشرات المناسبة لنظام التعليق دون مبالغة أو تقصير في الإنتاج والكفاءة [13].



الشكل (١٦): مخطط تصميم نظام التعليق

٢-٤- عوامل تقويم صفاء حركة السيارة:

في البداية لا بد من التعرف على أهم عوامل تقويم نظام التعليق في توفير الراحة المطلوبة وتحديد معاييرها، ومن هذه المعايير المأخوذة بعين الاعتبار عند تصميم نظام التعليق:

٢-٤-١ - معايير (Olley):

معايير أولي، المعروفة أيضًا بمفهوم "القيادة السطحية" أو القيادة الموازية للسطح، هي مبادئ تصميمية لأنظمة تعليق المركبات تهدف إلى تقليل التآرجحات حول المحور الجانبي (Pitch) غير المريحة (الميلان من الأمام إلى الخلف) عند مواجهة المركبة للمطبات، وذلك بجعل التعليق الأمامي أكثر ليونة من الخلفي، وبذلك تصبح المركبة أكثر ثباتًا وراحة من خلال تقليل الإحساس بالاهتزاز الناتج عن التآرجح حول المحور الجانبي وتعزيز حركة ارتداد أكثر سلاسة، وهنا بعض المفاهيم الرئيسية:

التآرجح حول المحور الجانبي (Pitch) مقابل الارتداد (Bounce): تتعرض المركبات لنوعين رئيسيين من الحركة الشاقولية عند مواجهة المطبات: التآرجح حول المحور الجانبي (Pitch) (الدوران حول مركز الثقل) والارتداد (الحركة العمودية للمركبة بأكملها).

القيادة السطحية: يهدف معيار أولي إلى تقليل حركة التآرجح حول المحور الجانبي والسماح لحركة الارتداد بالسيطرة، حيث يُعتبر الارتداد أكثر راحة بشكل عام.

صلابة التعليق: يتمثل جوهر معايير (Olley) في ضبط صلابة التعليق (مقدار القوة اللازمة لضغط التعليق) للمحورين الأمامي والخلفي.

حالة عدم الارتباط: يُعد مفهوم "عدم الارتباط أو الاستقلالية" أحد الجوانب الأساسية في عمل (Olley)، والذي يقترح التعامل مع نظامي التعليق الأمامي والخلفي كنظامين منفصلين لتبسيط التحليل والتصميم.

ولتحقيق ذلك وضعت معايير محددة ومنها:

تعليق أمامي أكثر ليونة: صُمم نظام التعليق الأمامي ليكون أكثر ليونة من نظام التعليق الخلفي، مما يسمح له بامتصاص قدر أكبر من الصدمة الأولية وتقليل حركة التآرجح حول المحور الجانبي (Pitch).

نصف قطر الدوران: في التآرجح حول المحور الجانبي، يُفضل أن يكون نصف قطر الدوران (مقياس توزيع الكتلة) مساويًا في تربيعه لحاصل ضرب المسافة بين مركزي كتلة العجلات الأمامية والخلفية: $r^2 = a \cdot b = \sqrt{J_y/m}$.

معدل صلابة التعليق الخلفي: يجب أن يكون معدل (صلابة) نظام التعليق الخلفي أعلى بنحو ٢٠% من نظام التعليق الأمامي، وذلك لمنع الاهتزازات التي تؤدي للتآرجح (Pitch).

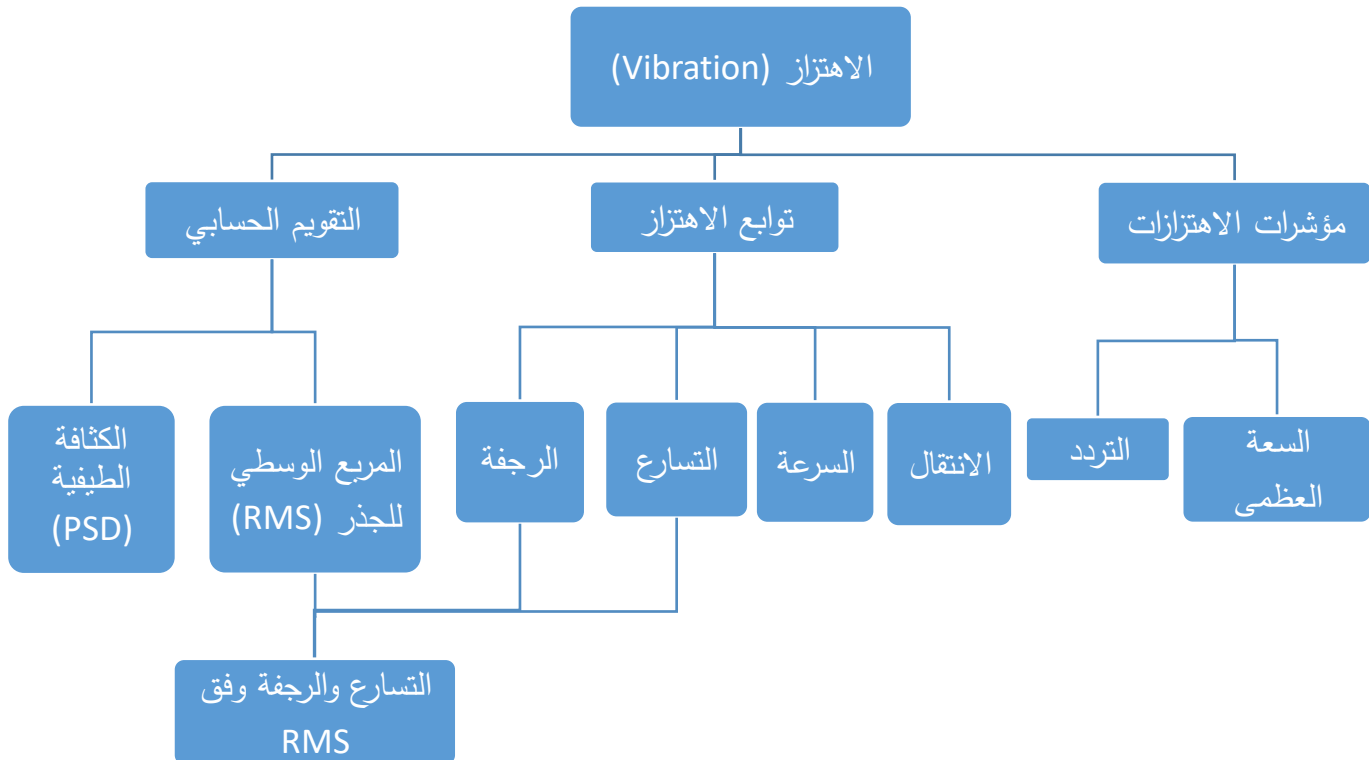
وعند تطبيق معايير Olley سنحصل على المزايا التالية:

- **تحسن في مستوى راحة القيادة:** من خلال تقليل التأرجح وتعزيز ارتداد أكثر سلاسة، تُسهم معايير أولي في توفير قيادة أكثر راحة للركاب.
- **تحسين في مستوى ثبات السيارة:** يؤدي خفض التأرجحات حول المحور الجانبي إلى تجربة قيادة أكثر استقرارًا وقابلية للتنبؤ. [25]

٢-٤-٢- الاهتزازات وتوابعها:

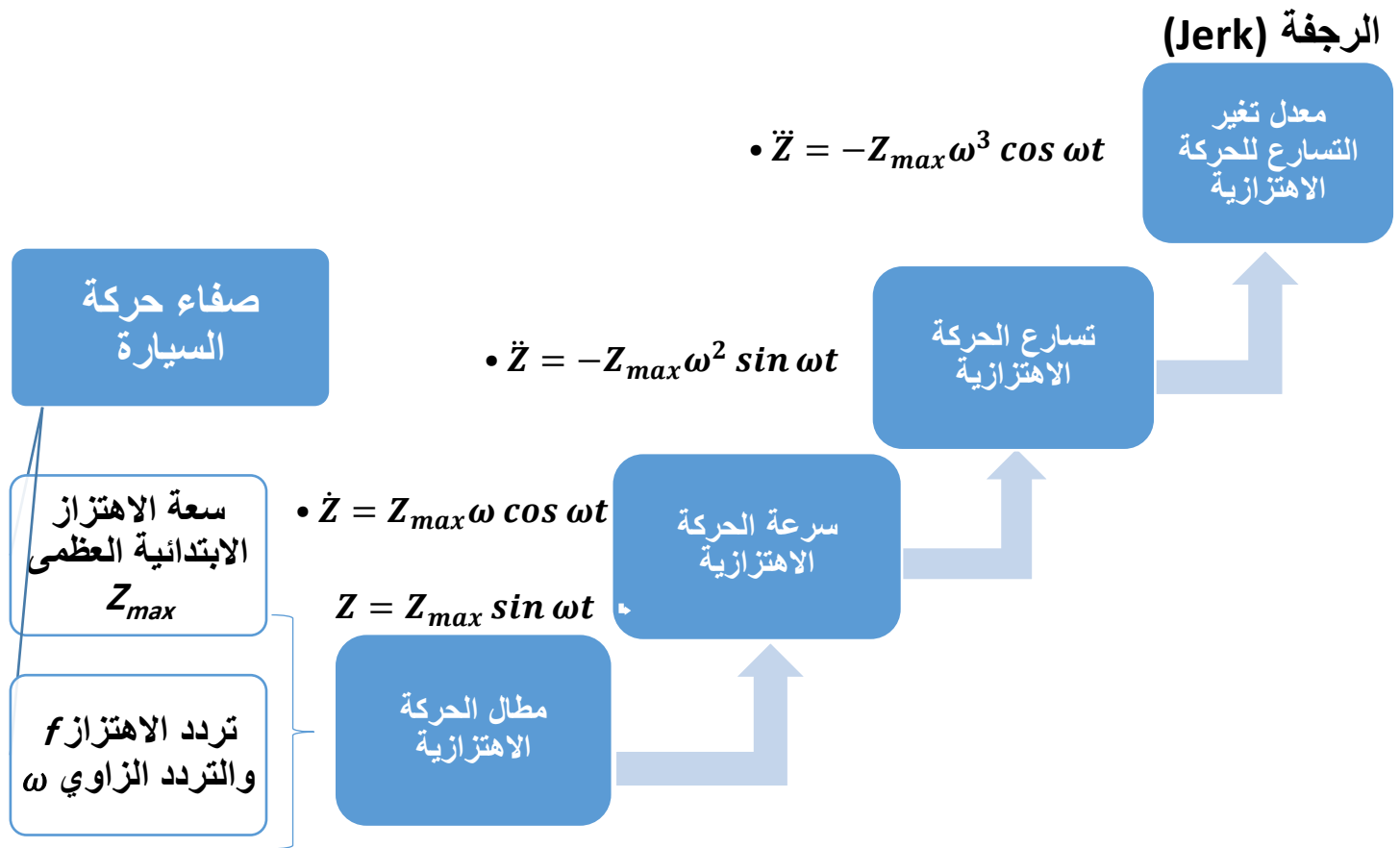
يمكن تقويم الراحة بعوامل عديدة (كالاhtزازات وتوابعها، والضجيج، والخشونة، والحرارة، والمدة الزمنية.... إلخ)، وقد تختلف أيضاً وفق أساليب حساب هذه العوامل (كالمربع الوسطي لجذر قيمة معينة Root Mean Square (RMS)، الكثافة الطيفية Power Spectral Density (PSD) ... إلخ)، في هذا البحث سنقتصر على بعض هذه العوامل في تقويم الراحة وهي الاهتزازات وما لها من مؤشرات (كالسعة العظمى والتردد)، وما لها من توابع (كالانتقال والسرعة والتسارع والرجفة)، وأساليب التقويم الحسابي (سنستخدم أسلوب الحساب RMS) وربطه ببعض قيم التوابع (كالتسارع والرجفة).

تعد الاهتزازات من أهم مؤشرات الراحة نظراً إلى أنها الممثل الأقوى لحركة السيارة عند مرورها على الطريق، وكما أن جميع الأبحاث قامت بأساسها على هذا العامل لتنوع توابعه ومشتقاته، وهنا مخطط يبين لنا التفاصيل المهمة لدراسة الاهتزازات من مؤشرات وتوابع وتقويم حسابي يسهل به دراسة الاهتزازات، تم إعداده من قبل الباحث تلخيصاً لما يتوجه إليه أغلب الباحثين:



الشكل (١٧): صفاء حركة السيارة باعتبار الاهتزازات وتوابعها [3],[4],[6],[8],[9],[10],[22],[24]

وهنا نورد التوابع الناتجة عن معادلة الاهتزازات التوافقية الذاتية (الحرّة) والقيم التي تؤدي دورًا في تقويم الراحة، ونلاحظ من الشكل (١٨)، أن صفاء حركة السيارة يمكن تمثيلها بمعادلة المطال وباشتقاقها بالنسبة إلى الزمن مرة أولى وثانية وثالثة نحصل على سرعة الاهتزاز والتسارع ومعدل تغير التسارع (الرجفة) على الترتيب، ويمكن بوساطة هذه العلاقات إرجاع الاهتزازات إلى مؤشرين اثنين هما السعة العظمى والتردد حيث تشترك في تكوين جميع هذه التوابع، ويظهر أثر التردد أكثر كلما اشتققنا بالنسبة للزمن أكثر حيث تزداد درجة التردد مع زيادة رتبة الاشتقاق، ولتقويم صفاء حركة السيارة يجب الاهتمام بالاهتزازات من حيث توابعها وأهمها التسارع والرجفة ومؤشرها وخاصةً التردد [1]، وسنبين القيم المرغوبة لكل من هذه المعايير لاحقًا:



الشكل (١٨): صفاء حركة السيارة باعتبار الاهتزازات وتوابعها ومؤشراتها [1]

- ويمكن حساب تردد الاهتزاز من العلاقة [1]:

$$f = \frac{\omega}{2\pi}$$

ولكن هذه المعادلات الواصفة للاهتزازات تعدّ من أبسط الأشكال ولا تمثل اهتزازات السيارة المعقدة، لذلك سنتكلم على النموذج المستخدم في توصيف اهتزازات السيارة في قسمٍ لاحق.

- ❖ عند دراسة المسير ومعدل حساسية الجسم للاهتزازات لدى انسان بالغ، تبين أن:
- معدل عدد الخطوات ما يقارب (90 - 60) خطوة في الدقيقة أو (عدة واحدة في الدقيقة [CPM[Counts per Minute])، وهو ما يمثل (التردد).
- يتحرك الجذع لأعلى ولأسفل حوالي (5 cm) أو (2 inch) مع كل خطوة، وهو ما يمثل (السعة).
- يعد الجذع المستشعر الرئيسي للاهتزازات الطولية، وتكون مزعجة عندما يتراوح التردد للاهتزازات الطولية بين (90 - 120 CPM) وهذه الاهتزازات تحدث عند تأرجح السيارة حول المحور الجانبي أو عندما تميل المقاعد إلى الخلف بزاوية أعلى من الطبيعي.
- التردد الذي يتراوح بين (30 - 40 CPM) سيسبب الشعور بالدوار.
- يصل معدل حساسية الرأس والعنق للاهتزازات إلى قرابة (1000 - 1200 CPM) أو ما يعادل (18 - 20 Hz) وهذا ما تصدره العجلات ومحاورها. [12]
- لذلك للحصول على قيادة مريحة يجب الحفاظ على معدل تردد بين (48 - 90 CPM) أو ما يعادل (0.8 - 1.5 Hz) في السيارات السياحية، وعندما يقترب التردد من (120 CPM) أو ما يعادل (2 Hz) يرى الركاب أن القيادة أصبحت مزعجة. [12], [27]

٢-٤-٣- المربع الوسطي للجذر (RMS) لقيم التسارع والرجفة:

- المربع الوسطي للجذر أو الجذر التربيعي لمتوسط القيم المربعة (Root Mean Square) ويختصر بـ (RMS)، المعروف أيضا بالمتوسط من الدرجة الثانية.
- هو قياس إحصائي لقيم متفاوتة في الكميات، فهو مفيد ولا سيما عندما تتنوع القيم إلى قيم موجبة وسالبة، على سبيل المثال في حسابات منحى الجيب، يمكن أن يحسب لسلسلة من القيم المنفصلة أو لدالة متغيرة مستمرة، الاسم يأتي من حقيقة أنه الجذر التربيعي لمتوسط القيم المربعة، بل هو حالة خاصة من "المتوسط" مرفوع إلى القوة (٢). [26]

$$x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} (x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2)}$$

- ومن تطبيقاته أنه يحسب متوسط جذر التربيع لقيم الاهتزازات وتوابعها بوصفها معياراً للراحة.
- بالنظر إلى قيم التسارع الشاقولي نحسب متوسط الجذر التربيعي لقيم التسارع ($\ddot{Z}_{RMS}$) وفق العلاقة [23]:

$$\ddot{Z}_{RMS} = [\frac{1}{T} \int_0^T \ddot{Z}^2(t) dt]^{1/2}$$

- وكذلك الأمر من أجل معدل تغير التسارع (الرجفة) ($Jerk_{RMS}$) [23]:

$$J_{RMS} = [\frac{1}{T} \int_0^T J^2(t) dt]^{1/2}$$

- ثم نقارنه مع الجدول (١) المعياري وفق (ISO 2631-1.1997) الذي يبين علاقة قيم متوسط الجذر التربيعي للتسارع الشاقولي لجسم السيارة مع تقويم الراحة:

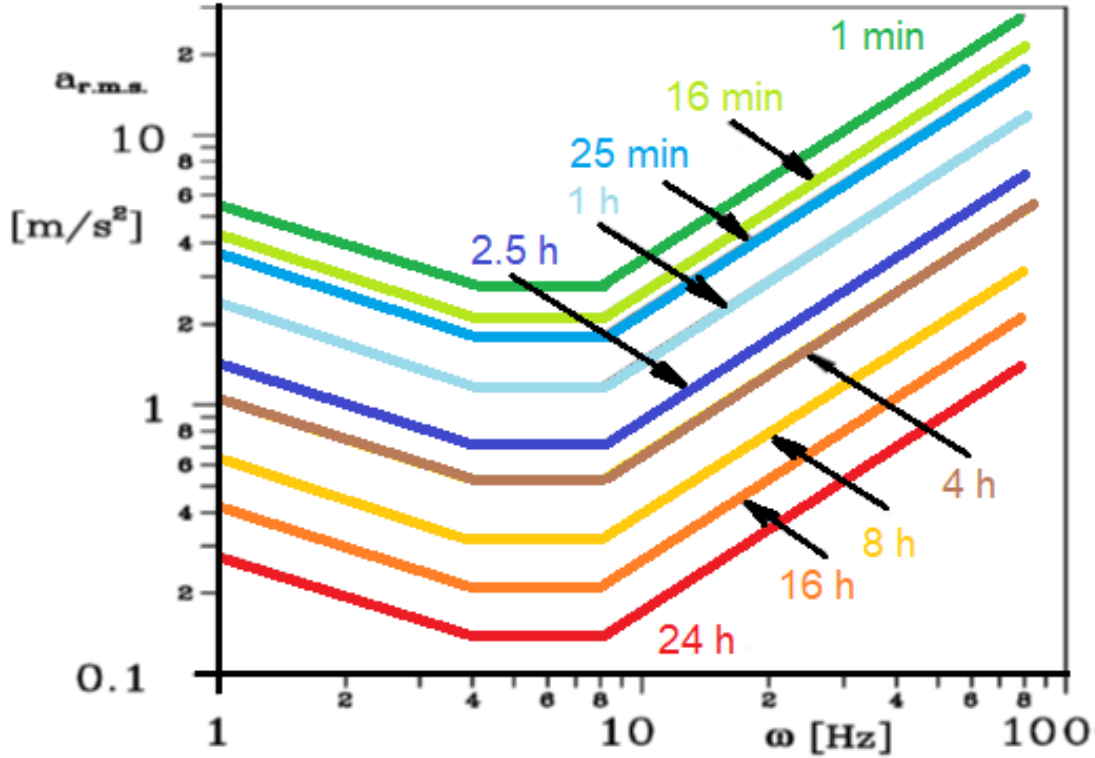
متوسط الجذر التربيعي للتسارع الشاقولي $\dot{Z}_{RMS}$	درجة الراحة
١) أقل من (0.315 m/s^2)	غير مزعج
٢) بين ($0.315 - 0.63 \text{ m/s}^2$)	مزعج قليلاً
٣) بين ($0.5 - 1 \text{ m/s}^2$)	مزعج إلى حدٍ ما
٤) بين ($0.8 - 1.6 \text{ m/s}^2$)	مزعج
٥) بين ($1.25 - 2.5 \text{ m/s}^2$)	مزعج جداً
٦) أكثر من (2 m/s^2)	مزعج إلى أبعد الحدود

وبالنسبة لقيم الرجفة الملائمة لمعايير الراحة فلا يوجد معيار ثابت لها، فقد يتباين الشعور بالانزعاج تبعاً للتردد ولقيم التسارع، ولكن إجمالاً تعتبر قيم الرجفة وفق المحور الشاقولي مزعجة عندما تتجاوز (2.94 m/s^3) [24].

٢-٤-٤- مخطط التحمل للإنسان:

يبين الشكل (١٩) مخطط قدرة تحمل الانسان باعتبار متوسط جذر التربيع لقيم التسارع الشاقولي عند مختلف الاهتزازات ولفترات معينة، وذلك وفق المعايير الدولية (ISO 2631).

نلاحظ من المخطط أن قدرة تحمل الانسان تنخفض كلما زاد تردد الاهتزازات إلى أن نصل إلى المجال (4 – 8 Hz) إذ تصبح قدرة التحمل منخفضة جداً، ثم تعود للزيادة مع زيادة التردد، ونلاحظ أنه مع ازدياد المدة الزمنية في الترحال تنخفض مقدرة الانسان على تحمل قيم التسارع الشاقولي إلى أن تصبح حتى القيم الضئيلة للتسارع مزعجة في الأوقات الطويلة [22]



الشكل (١٩): مخطط التحمل لجسم الانسان [22]

من اللازم قوله إن هذا المخطط ناتج عن تجارب أجريت على أناس فأخذت آراءهم الشخصية المعبرة عن هذه التجارب وتم تحويل هذه الآراء إلى قيم موضوعية تمكن من اعتبارها معايير تساعد في الوصول إلى الشروط الواجب توفيرها للحصول على الراحة المرغوبة أثناء القيادة، علماً أن هذه القيم قد لا تناسب بعض الأشخاص نظراً للعمر والحالة الصحية والبدنية.

❖ أنواع زوايا العجلات الرئيسية في تصميم نظام التعليق:

قبل الكلام عن تصميم نظم التعليق يجب التعريف بأهم الزوايا الواجب مراعاتها عند تصميم نظام التعليق:

• زاوية الميل العرضية للعجلة (Camber angle):

تمثل هذه الزاوية الانحراف العرضي لمحور تناظر العجلة عن خط الشاقول عند النظر من مقدمة السيارة، عندما يميل الجزء العلوي من العجلة نحو الخارج تكون الزاوية موجبة، وعندما يميل الجزء العلوي من العجلة نحو الداخل تكون زاوية الانحراف سالبة، تؤثر هذه الزاوية في مقدار مساحة تماس العجلة على الطريق وتعوض التغير في الشكل الهندسي لنظام التعليق في أثناء الالتفاف أو السير على سطح متموج، تستعمل الزاوية السالبة للحصول على ثبات أكبر، قد يُسبب الضبط الخاطئ لزاوية Camber غير الصحيح تأكلًا غير متساوٍ للإطارات، مما يؤثر على التحكم والأداء.

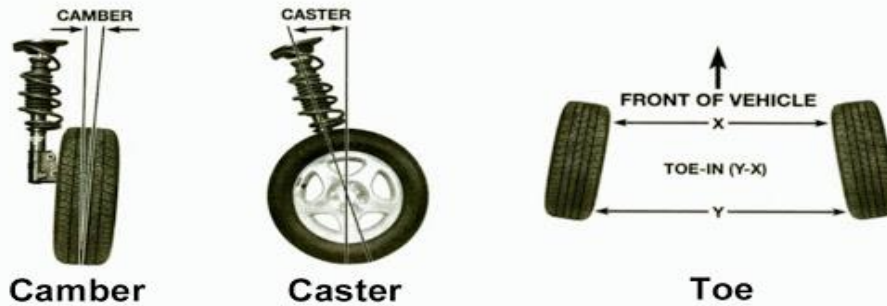
• زاوية الميل الطولية للمحور الرئيسي للعجلة (Caster angle):

تمثل انحراف محور التوجيه المفصلي الرئيسي للعجلة بالنسبة إلى خط الشاقول عند النظر من جانب السيارة، عندما يميل أعلى المحور باتجاه مؤخرة السيارة تكون الزاوية موجبة، تساعد الزاوية Caster الموجبة في الحفاظ على ثبات السيارة عند السرعات العالية، بينما قد تجعل الزاوية Caster السالبة السيارة غير مستقرة.

• تقارب العجلات الأمامية وتباعدها (Toe-in / Toe-out):

تهتم هذه الزاوية في محصلة تقارب العجلات أو تباعدها للمحور الأمامي أو الخلفي وما يناسبها من نوع الشد، أمامياً كان أم خلفياً، وذلك لمنع انحراف السيارة في أثناء المسير، وهي تشير إلى الزاوية التي تتجه بها الإطارات للداخل أو للخارج عند النظر إليها من الأعلى، فإذا كانت العجلات متجهة نحو بعضها البعض، تُسمى "Toe in"، وإذا كانت متجهة للخارج، تُسمى "Toe out". قد يؤدي ضبط الزاوية الخاطئ إلى تآكل مفرط للإطارات وضعف في التحكم. [31]، [2]

الشكل (٢٠) يوضح الزوايا الثلاث آنفة الذكر:



الشكل (٢٠): بعض زوايا العجلات

٥-٢- الأنواع المختلفة لاهتزازات السيارة وتأرجحها:

يمكن تصنيف الاهتزازات وفق درجات الطلاقة الست إلى:

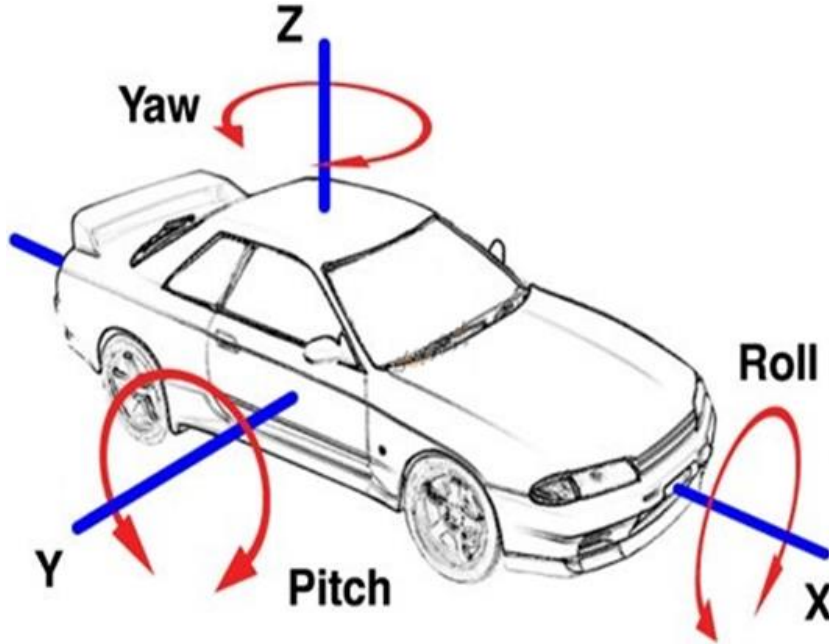
□ الاهتزازات الخطية:

- الاهتزازات الشاقولية وفق المحور (Z).
- الاهتزازات الطولية وفق المحور (X).
- الاهتزازات الجانبية وفق المحور (Y).

□ الاهتزازات الزاوية (التأرجحات):

عند دراسة حركة السيارة أثناء المسير والانعطاف هناك ثلاثة أنواع للتأرجح يمكن تمييزها من محاور السيارة الثلاث:

- التأرجح حول المحور الطولي (Roll) أي حول المحور (X).
- التأرجح حول المحور الجانبي (Pitch) أي حول المحور (Y).
- التأرجح حول المحور الشاقولي (Yaw) أي حول المحور (Z).

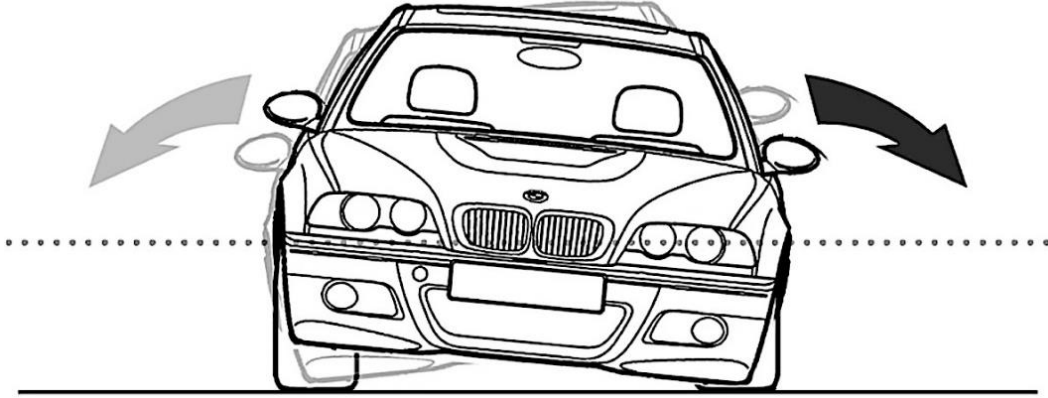


الشكل (٢١): أنواع الاهتزازات وتأرجح السيارة حول محاورها الثلاث

سنهتم فقط بالاهتزازات الشاقولية وفق المحور (Z) والتأرجحين حول المحور الطولي (Roll) وحول المحور الجانبي (Pitch)، لأن لها التأثير الأكبر والمباشر على معايير الراحة، وكما ذكرنا سابقاً فإن جذع الانسان المستشعر الرئيسي للاهتزازات الخطية الشاقولية والتأرجحات المرتبطة بها الطولية والجانبية، أما الاهتزازات العرضية والتأرجح حول المحور الشاقولي يهتم به بشكل أكبر في الانعطافات وأثناء عملية الكبح، أما الاهتزازات الطولية فيمكن إهمالها لوجود قوى الشد.

٢-٥-١ - التآرجح حول المحور الطولي (Roll):

يعرف محور التآرجح الطولي أنه المحور الواصل بين محوري تآرجح التعليقة الأمامية والخلفية، لذلك يجب الأخذ بالحسبان الشكل الهندسي لنظام التعليق^[11]

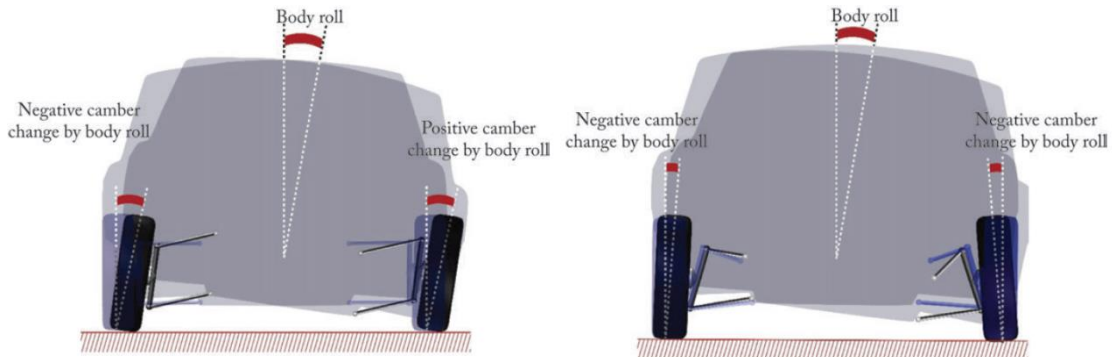


الشكل (٢٢): التآرجح حول المحور الطولي (Roll)

هناك عوامل ومؤثرات عديدة تؤخذ في الحسبان عند دراسة التآرجح حول المحور الطولي، ومنها تأثير الزاوية (Camber) ونوع نظام التعليق من حيث الاستقلالية (مستقل، غير مستقل)، ولتوضيح ذلك سنبين هذه العوامل:

• أثر الزاوية (Camber) في التآرجح (Roll) والحفاظ على وظيفة نظام التعليق:

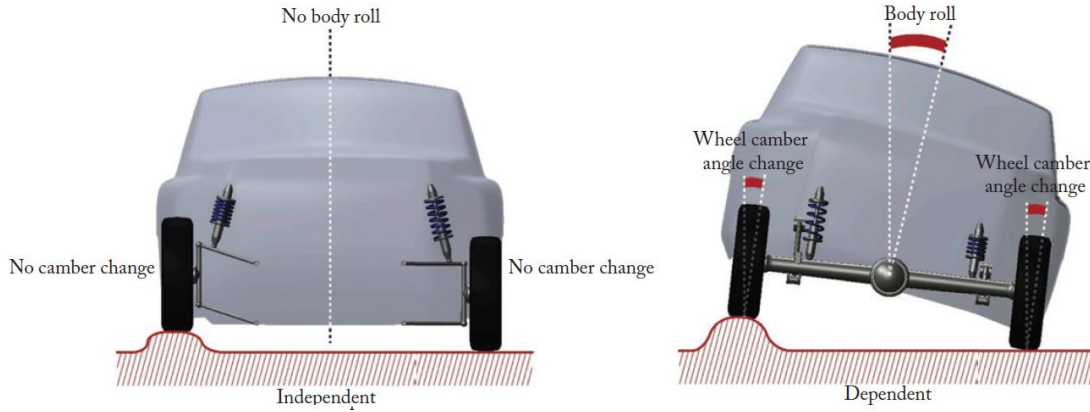
- تساعد زاوية (Camber) السالبة على ثبات السيارة، ولكن تخفيفاً لاهتراء الإطارات تفضل الزاوية الموجبة التي تعود تقريباً لقيمة الصفر عند التحميل المناسب للسيارة.
- وتبعاً لشكل الطريق وللتآرجح (Roll) ستتغير قيم الزاوية (Camber)، لذلك يجب تصميم نظام تعليق يتحكم بقيم الزاوية (Camber) على النحو المطلوب عند الأوضاع المختلفة.



الشكل (٢٣): أثر الزاوية (Camber) في التآرجح (Roll) [11]

• أثر التعليقة المستقلة وغير المستقلة في التآرجح (Roll) وفي الزاوية (Camber):

- نلاحظ من الشكل (٢٤) أن نظام التعليق المستقل يحاول الحفاظ على الزاوية (Camber) ثابتة قدر الإمكان في أثناء التآرجح (Roll)، على حين أنه في نظام التعليق غير المستقل يحدث لدينا تغير في الزاوية (Camber).



نظام تعليق مستقل

نظام تعليق غير مستقل

الشكل (٢٤): أثر التعليقة المستقلة وغير المستقلة في التآرجح (Roll) وفي الزاوية (Camber) [11]

❖ أشكال وأسباب تغير مقدار الزاوية (Camber):

إن الزاوية (Camber) تتغير وليست ثابتة دائماً، فبينما تكون ثابتة عند ركن السيارة، فإن زاوية العجلات بالنسبة لسطح الطريق تتغير باستمرار مع حركة السيارة، وهذا جانب أساسي في تصميم نظام التعليق، فيما يلي شرح مفصل لأسباب وكيفية تغير زاوية (Camber):

■ انتقال نظام التعليق (الاصطدام والارتداد/ تقلص وتمدد):

وهي الطريقة الأكثر تأثيراً لتغير زاوية (Camber)، فعندما تتحرك العجلة لأعلى (ارتطام، مثل الاصطدام بحفرة) أو لأسفل (ارتداد، مثل المرور فوق منحدر)، فإن البنية الهندسية لنظام التعليق صممت لتغيير زاوية (Camber).

- مقدار الزاوية (Camber): ويشير إلى معدل تغير زاوية (Camber) مع إزاحة العجلة رأسياً، في معظم أنظمة التعليق الحديثة تهدف للحصول على "مقدار الزاوية (Camber)" أي أن الزاوية تصبح بقيمة سلبية أكثر مع انضغاط نظام التعليق.
- الهدف منه: هو أمر بالغ الأهمية في الانعطاف، فعندما تنعطف السيارة يتأرجح هيكلها حول المحور الطولي إلى الخارج، يؤدي هذا التآرجح بشكل طبيعي إلى تأرجح الإطار الخارجي على حافته الخارجية، مما يقلل من رقعة التلامس والتماسك، وهنا تقوم زاوية (Camber) بعكس تأرجح الإطار، فمع انضغاط نظام التعليق الخارجي تكتسب العجلة مقداراً سلبياً من الزاوية (Camber) مما يُحافظ على رقعة تلامس الإطار مع الطريق ويعزز التماسك إلى أقصى حد.

■ تأرجح السيارة أثناء الانعطاف:

عند انعطاف السيارة ينزاح وزنها ويتأرجح هيكلها حول محورها الطولي، يُعد هذا التأرجح عاملاً رئيسياً في تغيير زاوية (Camber) ديناميكياً، مع تأرجح السيارة ينضغط نظام التعليق في الجانب الخارجي من المنعطف، ويتمدد في الجانب الداخلي منه، يؤدي التغير الناتج في حركة التعليق إلى تغيير زاوية (Camber) لكل من العجلات الداخلية والخارجية.

■ زاوية (Caster):

تؤثر زاوية (Caster) أيضاً على الزاوية (Camber) عند تحريك عجلة القيادة، عند الانعطاف تتسبب زاوية (Caster) في جعل زاوية (Camber) للعجلة الخارجية سلبية وللعجلة الداخلية موجبة، هذا يُساعد على التماسك والثبات أثناء الانعطاف.

■ ظروف الطريق:

تؤدي أسطح الطرق غير المستوية والحفر والمطبات إلى انضغاط نظام التعليق وارتداده، مما يؤدي إلى تغيرات طفيفة ومستمرة في زاوية (Camber)، وهذا جزء طبيعي من آلية عمل نظام التعليق للحفاظ على تلامس الإطارات مع الطريق.

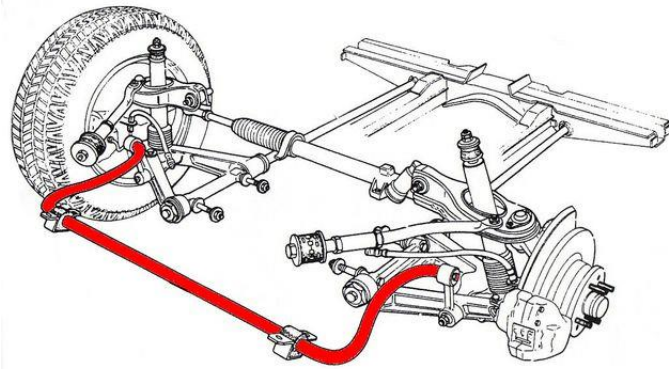
■ حمولة المركبة:

عندما تكون المركبة محملة بالركاب أو البضائع ينضغط نظام التعليق، وقد يؤدي هذا إلى تغير في زاوية (Camber) الثابتة عن مواصفاتها المحددة بدون حمولة، بالنسبة للمركبات الثقيلة غالباً ما يصمم المصنعون نظام التعليق بزاوية (Camber) موجبة وصغيرة عند عدم تحميلها، بحيث تقترب من زاوية (Camber) المعدومة عند التحميل الكامل. [32]

● مثال لتصميم يخفف من التأرجح حول المحور الطولي (Roll):

■ البعد العرضي بين العجلات الأمامية وأيضاً الخلفية والذي يؤثر في مقدار نصف قطر عطالة المركبة العرضي.

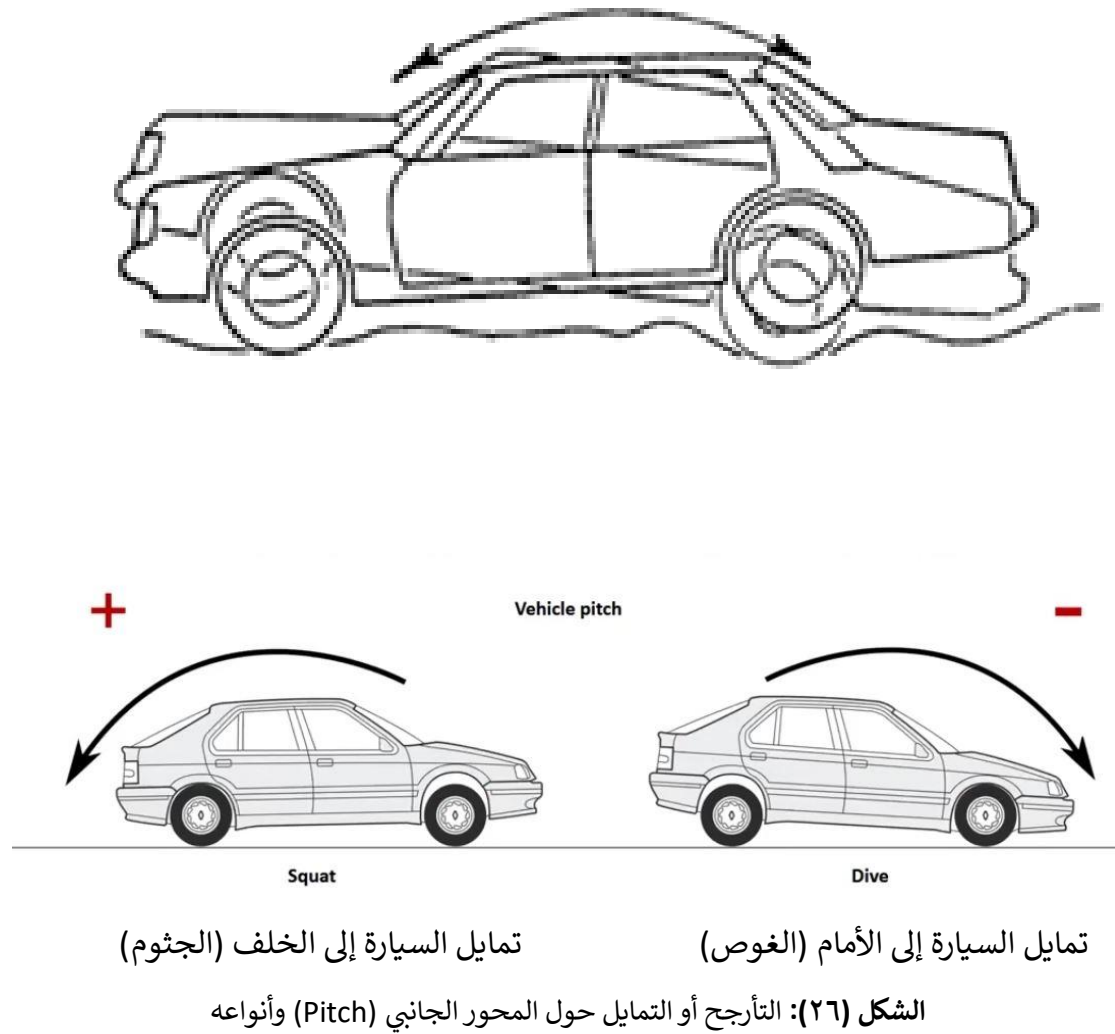
■ شريط الموازنة (Anti-Roll Bar) أو (Stabilizer Bar) وهو الجزء الذي يساعد على التخفيف من التأرجح (Roll) عند الانعطاف السريع أو في الطرق غير المستوية.



الشكل (٢٥): شريط الموازنة

٢-٥-٢- التآرجح حول المحور الجانبي (Pitch):

يعرف المحور الجانبي أنه المحور الموازي للمحور الأمامي والخلفي للعجلات، يحدث التآرجح (Pitch) أو تمايل السيارة إلى الأمام والخلف عند تسارع السيارة أو التباطؤ أو عند المرور على التواء (مطب) في الطريق أو حفرة أو طريق وعر، تبين الأشكال الآتية التآرجح حول المحور الجانبي (Pitch) وأنواعه (تمايل السيارة إلى الأمام وتمايل السيارة إلى الخلف):

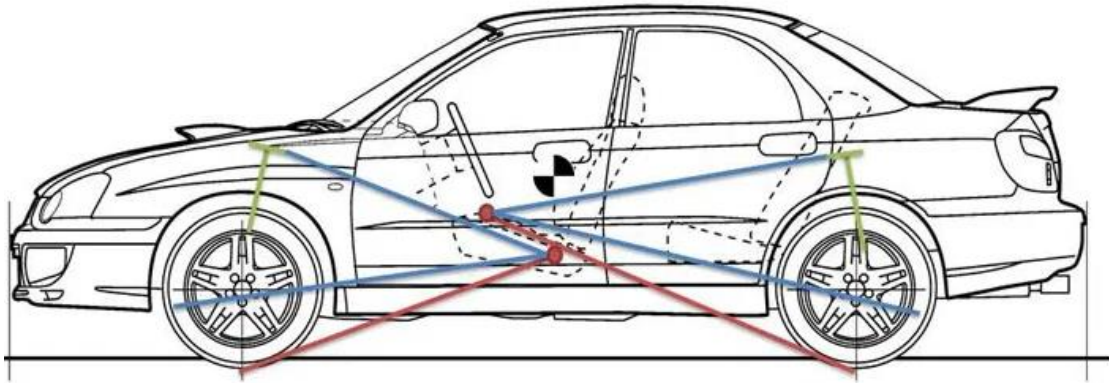


نلاحظ حدوث تمايل السيارة إلى الخلف (ارتفاع مقدمة السيارة) عند تسارع السيارة (الجثوم Squat)، ونلاحظ حدوث تمايل السيارة إلى الأمام (انخفاض مقدمة السيارة) عند الكبح أو التباطؤ (الغوص Dive).

• أمثلة لتصاميم تخفف من التآرجح حول المحور الجانبي (Pitch):

- زاوية (Caster) للمحاور الأمامية والخلفية، فعندما تكون الزاوية موجبة للمحاور الأمامية تساعد على ثبات السيارة واستقرارها، وعندما تكون سالبة تكون مقاومة العجلة للدحرجة في أثناء الالتفاف أقل ما يمكن.
- مراكز دوران المحاور الأمامية والخلفية حول المحور الجانبي والبعد بين المحاور الأمامية والخلفية (طول قاعدة العجلات) الذي يؤثر في مقدار نصف قطر عطالة المركبة الجانبي، إذ يجب أن تكون محاور الدوران أسفل مركز ثقل السيارة وبعيدة قدر الإمكان عن محاور العجلات حتى يكون مقدار ارتفاع أعلى العجلات أقل ما يمكن ولا يؤثر في مركز ثقل السيارة تأثيرًا كبيرًا وهذا يؤدي إلى عدم استقرارها وتآرجحها الكبير، حيث يجب أن يكون بعد مراكز دوران محاور العجلات متجاوزًا مركز الثقل على الأقل (6.5%) من طول قاعدة العجلات. [13],[25]

وهذه المبادئ تعرف بـ (Anti Squat , Anti Dive):



الشكل (٢٧): تأثير زاوية (Caster) ومراكز دوران المحاور الأمامية والخلفية في تخفيف التآرجح (Pitch)

٦-٢- توضيح للمصطلحات (القساوة (Hardness)، الصلابة (Stiffness)، المرونة (Elasticity)):

يمكن الفرق بين هذه الخصائص الثلاثة في الطريقة التي تستجيب بها المادة للقوة الخارجية، يمكن تلخيص الفرق على النحو التالي:

- **القساوة (Hardness):** هي مقاومة المادة للخدش أو التآكل أو الاختراق. كلما كانت المادة أكثر قساوة، كان من الصعب ترك علامة عليها. على سبيل المثال، الماس هو المادة الأكثر قساوة في العالم، وهذا هو السبب في استخدامه لقطع المواد الأخرى.
- **الصلابة (Stiffness):** هي مقاومة المادة للتشوه المرن أو الانحناء تحت تأثير قوة. المادة الصلبة لا تتشوه كثيرًا عند تطبيق قوة عليها. تُقاس الصلابة بمعامل المرونة (Young's

(Modulus)، فكلما زادت قيمة المعامل، زادت صلابة المادة. على سبيل المثال، قضيب من الفولاذ أكثر صلابة من قضيب من البلاستيك بنفس الأبعاد، لأنه يتطلب قوة أكبر لثنيه.

- **المرونة (Elasticity):** هي قدرة المادة على العودة إلى شكلها وحجمها الأصليين بعد إزالة القوة المؤثرة عليها. المادة المرنة تتشوه مؤقتًا ثم تستعيد شكلها. مثال شائع على ذلك هو شريط المطاط، الذي يمكن أن يتمدد ثم يعود إلى طوله الأصلي.

❖ للوصف العلمي الدقيق للنوابض، نستخدم مصطلحات **المرونة والصلابة**.

- **المرونة:** تُعرف النوابض بقدرتها الممتازة على المرونة، وهي خاصية تمكنها من العودة إلى شكلها الأصلي بعد إزالة القوة التي أثرت عليها (سواء كانت قوة شد أو ضغط). هذه القدرة على استعادة الشكل هي جوهر عمل النابض.
- **الصلابة:** أما الصلابة في سياق النوابض، فهي مصطلح فيزيائي يستخدم لوصف مقاومة النابض للتشوه (أي مدى صعوبة شده أو ضغطه). تُقاس الصلابة بـ "ثابت النابض" أو "ثابت الصلابة" (k)، والذي يُعبّر عنه في قانون هوك الشهير:

$$F = kx$$

- F هي القوة المطبقة على النابض.
- x هي مقدار الإزاحة أو الاستطالة (التغير في الطول).
- k هو ثابت الصلابة، وكلما زادت قيمته، زادت قوة النابض وأصبح من الصعب تشويبه.

الفرق بين الصلابة والقساوة: في بعض الأحيان، قد يُستخدم مصطلح "القساوة" بشكل غير دقيق كمرادف للصلابة، ولكن في الفيزياء، "الصلابة" (Stiffness) تُستخدم لوصف مقاومة المادة للانحناء أو التشوه بشكل عام، بينما "القساوة" (Hardness) تُستخدم لوصف مقاومة المادة للخدش أو التآكل. لذلك، عند الحديث عن النابض، فإن المصطلح الأكثر دقة هو الصلابة (Stiffness)، والذي يعبر عن ثابت النابض. أما "القساوة" (Hardness) فهي ليست المقياس الصحيح للنابض.

❖ للكلام عن الإطارات، تُستخدم المصطلحات الثلاثة: **الصلابة والقساوة والمرونة**، ولكل منها معنى مختلف ومهم.

- **القساوة (Hardness):** تُشير القساوة هنا إلى مقاومة المطاط المكون للإطار للخدش أو الاختراق أو التآكل، تُقاس هذه الخاصية بجهاز يُسمى "مقياس القساوة" (Durometer)، وهو أمر مهم جدًا في سباقات السيارات، حيث تؤثر قساوة الإطار على مستوى التماسك (Grip) وسرعة تآكله. الإطارات الأكثر ليونة (قساوتها أقل) توفر تماسكًا أفضل ولكنها تتآكل بسرعة، بينما الإطارات الأكثر قساوة تدوم لفترة أطول لكن تماسكها أقل.
- **الصلابة (Stiffness):** تُشير صلابة الإطار إلى مقاومته للتشوه أو الانحناء تحت تأثير القوة. الإطار ليس مجرد قطعة مطاط، بل هو هيكل كامل له صلابة في اتجاهات مختلفة:

- **الصلابة العمودية (Radial Stiffness):** مقاومة الإطار للضغط العمودي من وزن السيارة. كلما زادت هذه الصلابة، كان الإطار يدعم وزنًا أكبر ويمنح تحكمًا أفضل، لكنه قد يؤثر سلبيًا على راحة الركوب.
- **الصلابة الجانبية (Lateral Stiffness):** مقاومة الإطار للقوى الجانبية، وهي مهمة جدًا عند الانعطاف. الإطار ذو الصلابة الجانبية العالية يستجيب بسرعة لتوجيه عجلة القيادة.

■ **المرونة (Elasticity):** تُشير المرونة إلى قدرة مادة المطاط على استعادة شكلها الأصلي بعد أن تتعرض للتشوه تحت قوة، مثل التشوه الذي يحدث عند ملازمة الإطار للطريق. هذه الخاصية هي ما يسمح للإطار بامتصاص الصدمات والارتداد، وهو ما يُعرف بـ"تخميد الاهتزازات" (Damping). هذه المرونة أساسية لراحة الركاب وسلامة السيارة، بشكل مبسط، يمكن التلخيص وفق الآتي:

- **القساوة تُحدد مدى صعوبة خدش الإطار.**
- **الصلابة تُحدد مدى صعوبة تشوه الإطار تحت الحمل.**
- **المرونة تُحدد مدى قدرة الإطار على العودة إلى شكله بعد التشوه.**

❖ لوصف نظام التعليق في السيارة، فإننا نستخدم المصطلحات الثلاثة: **المرونة والصلابة والقساوة**، ولكل منها دور محدد ومختلف.

- **المرونة (Elasticity):** المرونة هي الخاصية الأساسية التي يقوم عليها نظام التعليق. تُشير إلى قدرة المكونات (مثل النوابض) على العودة إلى شكلها الأصلي بعد امتصاصها للصدمات من الطريق. هذه القدرة هي ما يسمح للسيارة بامتصاص المطبات والحفاظ على اتصال العجلات بالأرض، مما يضمن راحة الركاب واستقرار السيارة.
- **الصلابة (Stiffness):** في سياق نظام التعليق، تُشير الصلابة إلى مقاومة النوابض للضغط أو الشد. تُقاس هذه الخاصية بـ"ثابت النابض" (k)، فكلما كان هذا الثابت أعلى، كان النابض أكثر صلابة، مما يعني أنه يتطلب قوة أكبر لضغطه.

- **نظام تعليق صلب:** يكون ثابت النابض فيه عاليًا. يمنح هذا النوع من التعليق السيارة تحكمًا أفضل واستجابة أسرع عند الانعطاف، وهو ما يُفضل في سيارات السباق.
- **نظام تعليق ناعم:** يكون ثابت النابض فيه منخفضًا. هذا النوع يوفر راحة أكبر للركاب على الطرق غير المستوية، وهو ما يُفضل في السيارات العائلية.

■ **القساوة (Hardness):** في سياق أنظمة التعليق، غالبًا ما يتم استخدام مصطلح القساوة والصلابة بشكل مترادف. ولكن يمكن التفريق بينهما بالشكل التالي:

- **الصلابة** تُستخدم لوصف الأجزاء الميكانيكية مثل النوابض (springs).
- **القساوة** يمكن أن تُستخدم لوصف النظام ككل ومقاومته للتأرجح أو الانحناء.

على سبيل المثال، يتم استخدام قضيب في أنظمة التعليق يسمى قضيب القساوة (sway bar) أو قضيب منع التأرجح (anti-roll bar) أو شريط الموازنة، والذي يعمل على تقليل ميلان جسم

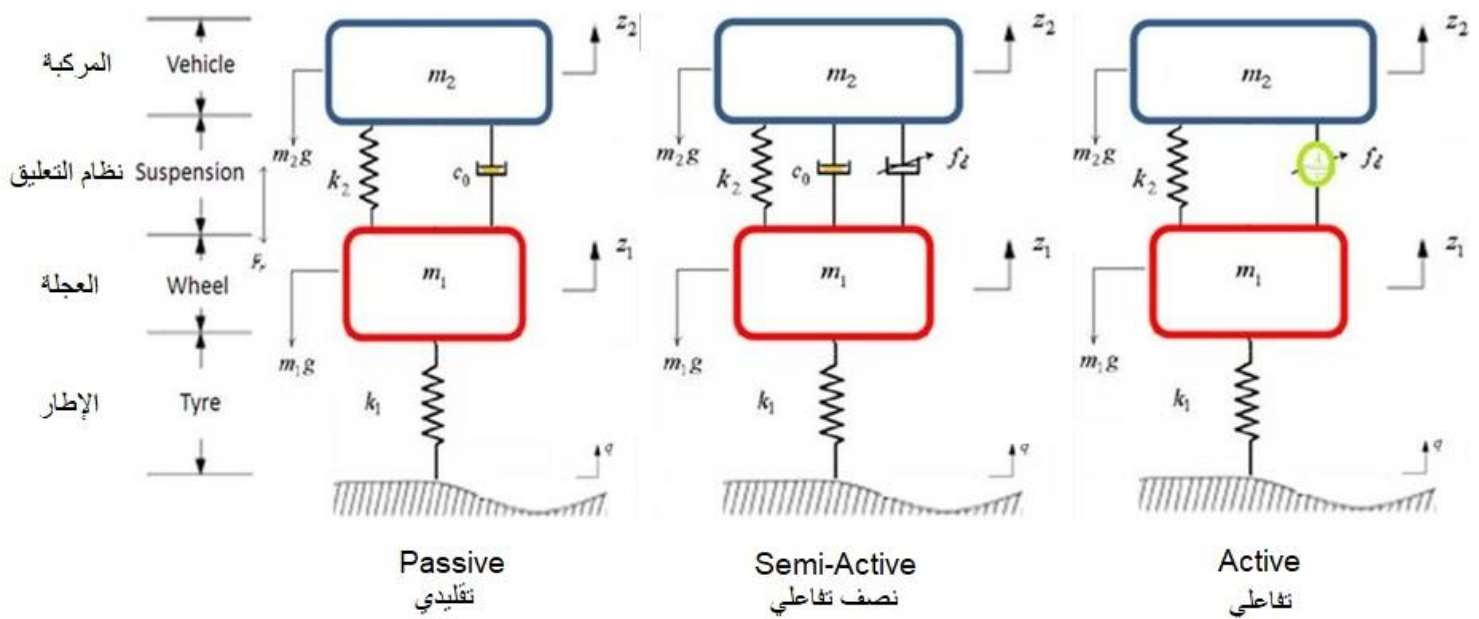
السيارة عند الانعطاف. هذا القضيب لا يمتص الصدمات، بل يزيد من قساوة السيارة ضد الميلان.

❖ بشكل عام، عندما نتحدث عن سلوك السيارة على الطريق، فإن المصطلحات الثلاثة مترابطة: **المرونة** تضمن امتصاص الصدمات، و**صلابة** النوابض تحدد مدى راحة أو رياضية السيارة، و**قساوة** النظام ككل (بفضل مكونات مثل قضيب القساوة) تتحكم في ثبات السيارة عند الانعطاف. [34],[35]

٧-٢- أنظمة التعليق:

تُركز العديد من الدراسات حاليًا على أنظمة التعليق في المركبات، بهدف تحسين الأداء عند القيادة والحصول على أعلى معايير الراحة، ومؤخرًا في محاولة استعادة جزء من الطاقة المُبددة في نظام التعليق نفسه، كالمخمدات المولدة للطاقة الكهربائية (Regenerative dampers). يُعد نظام التعليق أساسيًا لعزل هيكل المركبة عن اهتزازات الطريق، يعمل المُخمد على تقليل اهتزازات الطريق من خلال التخفيف من الصدمات، كما يلعب نظام التعليق دورًا أساسيًا في تحسين السلوك الديناميكي للمركبة، ويمكن تحسين القيادة من خلال التحكم في كمية التخميد، ووفقًا لمستوى التحكم الذي يُمكن الحصول عليه من النظام تُصنف أنظمة التعليق إلى:

- تقليدي (Passive).
- نصف فعال (Semi-Active).
- نشط أو فعال (Active).



الشكل (٢٨): تصنيف أنظمة التعليق تبعاً للتحكم بها [30]

٢-٧-١ - نظام التعليق التقليدي Passive suspension system:

تمتاز أنظمة التعليق التقليدية بأنها لا تحتاج إلى قوة إضافية لأداء مهامها، فخصائص النواض والمخمدات في هذه الأنظمة ثابتة وتوصف منحنياتها (إزاحة-قوة) و (سرعة-قوة) بأنها ثابتة، وتحدد هذه الخصائص من قبل المصمم لنظام التعليق وفقًا لأهداف التصميم ومجال الاستعمال لهذه الأنظمة.

فعندما يكون مقدار التخميد عاليًا سيرفع ذلك من خصائص القيادة والتحكم بالمرحلة، ولكن أيضًا سينتقل تأثير الطريق إلى جسم المرحلة بشكل أكبر، وعندما تسير المرحلة بسرعة مسير منخفضة وعلى طريق وعر أو عندما تسير بسرعة منخفضة وعلى طريق مستقيم فإنه من المتصور أن تصبح القيادة في هذا المستوى من التخميد العالي مزعجة.

وعندما يكون مقدار التخميد منخفض سيرفع ذلك من مقدار الراحة أثناء القيادة، ولكن قد يخفض من استقرار المرحلة بشكل ملحوظ عند الانعطافات أو المناورات.

تبعًا لمجال عمل المرحلة يجب تحديد الحل الوسطي الذي يجمع بين متطلبات الراحة أثناء القيادة والتحكم في القيادة، والذي ستبقى فيه خصائص نظام التعليق ثابتة لجميع أشكال الطرق التي ستسير عليها المرحلة.

٢-٧-٢ - نظام التعليق نصف فعال Semi-active suspension systems:

في أنظمة التعليق نصف فعالة يتم إنتاج قوة تشغيل عن طريق متحكم، في هذه الحالة تتغير خصائص التخميد ضمن مجال واسع إلى حد ما، تمتلك هذه الأنظمة خصائص أفضل في الأداء مقابل الأنظمة التقليدية، يمكن الحصول على خصائص التخميد القابلة للتعديل باستخدام تقنيات مختلفة مثل سوائل (Electro-Rheological) و (Magneto- Rheological) أو صمامات تحكم أو مشغلات كهرو-إجهادية.

٢-٧-٣ - نظام التعليق الفعال Active suspension system:

بمقدرة نظام التعليق الفعال إنتاج قوى بين جسم المرحلة والعجلات والتي تكون مستقلة وبشكل كامل في اتجاه انتقال نظام التعليق الحاصل، ولتطبيق هذه القوى يحتاج إلى كمية ليست بالضئيلة من الطاقة، ولذلك تحتاج إلى مصدر طاقة خارجية. [22]

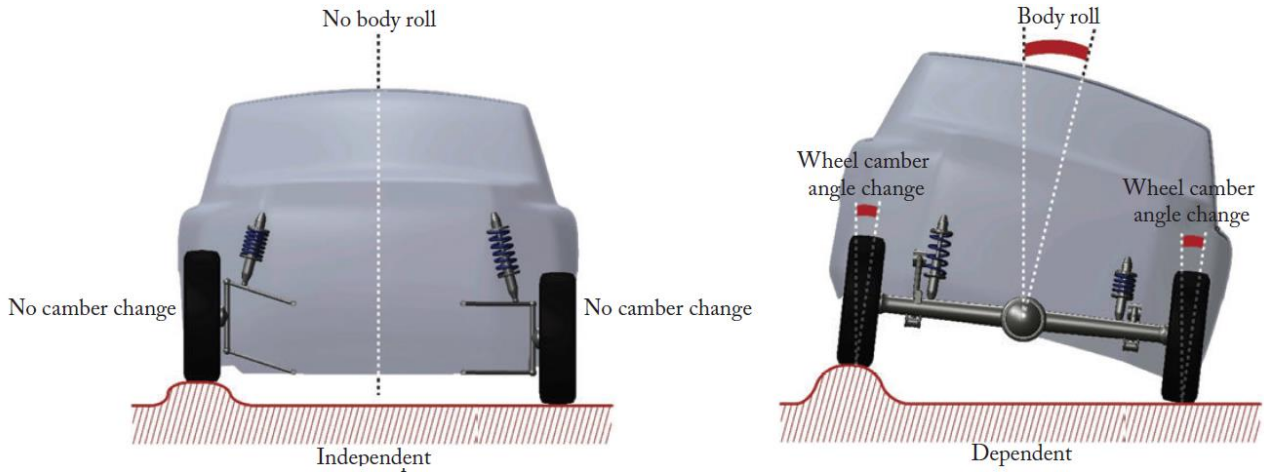
- إذا تميزت أنظمة التعليق التفاعلية عن التقليدية أنها تسمح في التحكم بمعدل قساوة التعليق وارتفاع السيارة، إلا أنها معقدة وباهظة الثمن، وتشكل الأنظمة نصف التفاعلية حلاً وسطًا بينهما عن طريق تقديم قوة تخميد متغيرة دون إمكانية التحكم بها عن طريق السائق.

❖ وهناك تصنيف رئيس لأنظمة التعليق تبعًا لارتباط محاورها:

■ مستقلة (Independent).

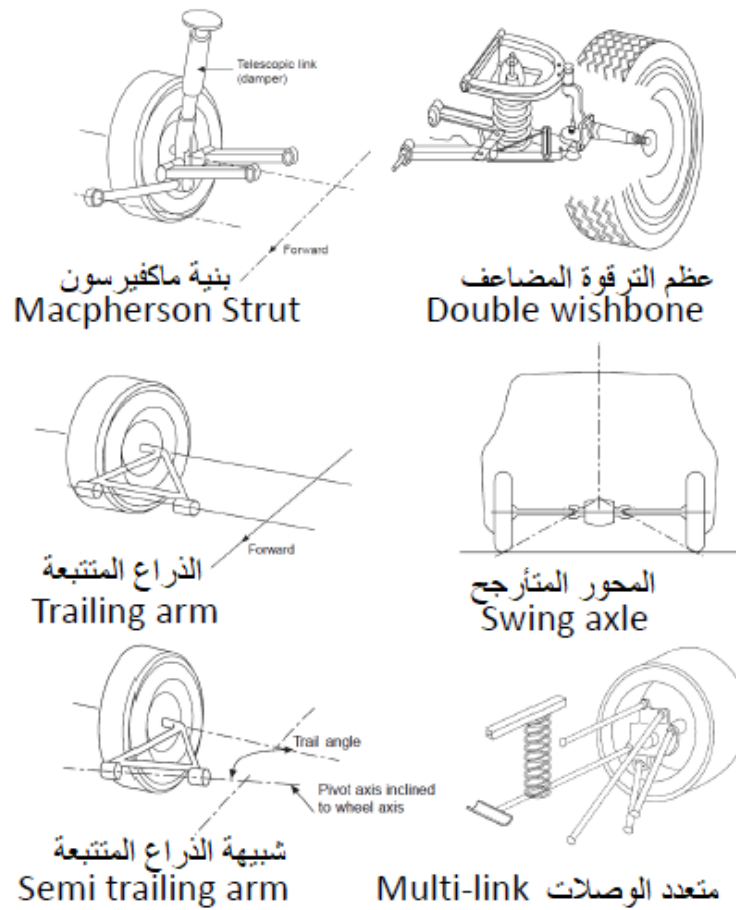
■ غير مستقلة (Dependent).

تختلف أنظمة التعليق المستقلة عن غير المستقلة بأن كل عجلة من أحد المحاور تتحرك عموديًا مستقلة عن الأخرى.



الشكل (٢٩): تصنيف أنظمة التعليق تبعاً لارتباط محاورها [11]

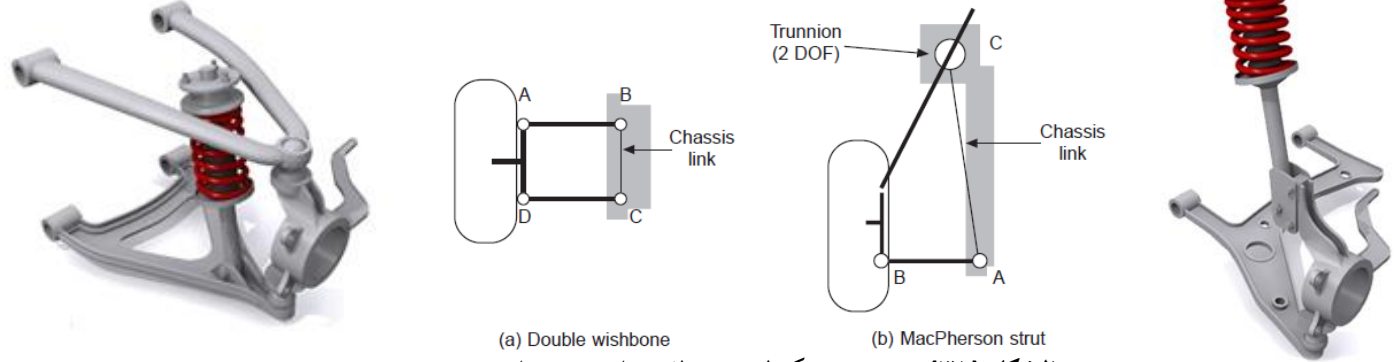
يظهر الشكل (٣٠) بعض أنواع أنظمة التعليق المستقلة:



الشكل (٣٠): بعض أنواع أنظمة التعليق المستقلة [18]

❖ عند تصميم نظام التعليق يجب عدّ بعض العوامل، ومنها:

- دليل الحركة العمودية لكل عجلة يتناسب مع هيكل السيارة ودون تغير واضح في الزاوية Camber.
- معامل درجة الطلاقة (DOF) Degrees of Freedom.
- عند زيادة عدد الوصلات ونقاط الاتصال تزداد مرونة نظام التعليق ولكن تزداد معه قيم الاحتكاك لهذه المرباط وتزداد تكاليف الصيانة.



الشكل (٣١): تصميم حركي لنوعي نظام تعليق مستقل

وكمثال لدينا المثال الموضح بالشكل (٣١) لنوعي نظام تعليق، الأول (Double Wishbone) فهو مرن لتعدد نقاط اتصاله ولكنه معقد ومكلف وثقيل الوزن، أما النوع الثاني (MacPherson) بسيط وخفيف وصيانته أقل ومنتشر بشكل كبير لكنه يرفع جسم السيارة وبالتالي مركز ثقلها.

نظام التعليق الخلفي المستقل من نوع (Tri-Link (3-Link):



الشكل (٣٢): نظام التعليق الخلفي المستقل من نوع (Tri-Link (3-Link)

تستخدم أنظمة الوصلات الثلاثية Tri-Link ثلاث وصلات (غالبًا وصلة علوية واثنان سفليتين) لربط محور العجلة أو المحور بجسم المركبة، مما يوفر تحكمًا أكثر تعقيدًا في حركة العجلات ومحاذاتها من خلال الزوايا Camber & Toe أثناء تحرك نظام التعليق، خاصة أثناء الانعطاف والتسارع مما يحسّن التحكم والثبات.

ولكن من سلبياته تصميم أكثر تعقيدًا، وقد يكون أكثر تكلفة في التصنيع، ويتطلب إعدادًا وتعديلًا دقيقين.

٨-٢- أهمية ضبط اتزان زوايا العجلات الهامة في نظام التعليق:

تكمن أهمية الزوايا في موازنة نظام التعليق في أثناء المسير، وإذا حدث خطأ في قيم الزوايا التصميمية يحدث انحراف للسيارة ولا تؤدي عملها الأمثل في الثبات والراحة، ولذلك يجب تصميم نظام التعليق بحيث يؤمن الحركة بين وصلاته ومكوناته دون الخروج عن القيم المطلوبة للزوايا.

• ضبط اتزان زوايا العجلات:

ضبط اتزان العجلات هو ضبط زوايا العجلات بما يتوافق مع مواصفات الشركة المصنعة للسيارة، تتضمن الموازنة الصحيحة ضبط مكونات نظام التعليق، وليس العجلات أو الإطارات نفسها، وهذه التعديلات تضمن أن تكون العجلات في الوضع الأمثل بالنسبة لهيكل السيارة، تُحسن الموازنة من راحة القيادة بشكل ملحوظ، فقد تُسبب العجلات غير الموزونة اهتزازات وانحرافًا جانبيًا وتآكلًا غير متساوٍ للإطارات، وكلها عوامل تؤثر سلبًا على راحة القيادة، في المقابل تضمن العجلات الموزونة بشكل صحيح تجربة قيادة أكثر سلاسة وثباتًا وراحةً أكبر، مما يُقلل الاهتزازات ويُحسن التحكم.

■ تقليل الاهتزازات:

قد يُسبب عدم موازنة العجلات ارتدادًا أو تأرجحًا، مما يُسبب اهتزازات في عجلة القيادة وفي جميع أنحاء السيارة، تُقلل العجلات الموزونة بشكل صحيح من هذه الاهتزازات، مما يؤدي إلى قيادة أكثر سلاسة وراحةً.

■ تحسن في التحكم والحفاظ على الأمان والسلامة:

يساهم ضبط اتزان العجلات بشكل صحيح في تحسين التحكم وتجربة القيادة بشكل عام، فعدم اتزان العجلات يُسبب انحراف السيارة جانبيًا، مما يتطلب تصحيحًا مستمرًا للتوجيه ويجعل القيادة أقل متعة والشعور بعدم اتزان عجلة القيادة أو عدم استجابتها، هذا يجعل القيادة غير مريحة وغير آمنة، خاصةً عند السرعات العالية أو عند الانعطاف، وتضمن الموازنة الصحيحة استجابة عجلة القيادة كما هو متوقع، وقيادة السيارة بشكل مستقيم ودقيق، مما يُعزز الراحة والسلامة، خاصةً في حالات الطوارئ التي تتطلب توجيهًا سريعًا ودقيقًا، سواءً كانت القيادة في شوارع المدينة أو على الطرق السريعة أو في المنعطفات الضيقة، فإن ضبط اتزان العجلات بشكل صحيح يجعل التحكم مثاليًا وأكثر سهولة وراحةً وآمن بشكل أكبر.

وقد تُشكل السيارة ذات العجلات غير المتزنة خطرًا عند الكبح، خاصةً إذا كانت تؤدي إلى كبح غير متوازن أو صعوبة في التحكم، حيث يؤدي إلى انحراف السيارة إلى جانب واحد أثناء الكبح، مما يزيد مسافات التوقف وصعوبة في السيطرة على السيارة، خاصةً في ظروف الطرق الخطرة، هذا يُمكن أن يزيد بشكل كبير من خطر الحوادث، خاصةً عند القيادة بسرعات عالية أو في الأحوال الجوية السيئة.

يضمن ضبط العجلات بشكل صحيح التحكم بشكل مُتوقع بالمركبة وكبحها بشكل مُتساوٍ، يُمكن أن يُساعد هذا الثبات في منع الحوادث وضمان عمل المركبة بأمان في مختلف الظروف،

وهو أمر بالغ الأهمية خاصةً لمن يقودون بشكل مُتكرر في ظروف صعبة، مثل الطرق المبتلة أو الشوارع الجليدية أو التضاريس غير المُستوية.

■ إجهاد أقل على مكونات نظام التعليق:

عندما تكون العجلات غير متزنة، يتحمل نظام التعليق الحمل الإضافي الناتج عن زوايا العجلات غير الصحيحة، قد يؤدي هذا الإجهاد الإضافي إلى تآكل مكونات نظام التعليق، مثل ممتصات الصدمات والدعامات، بسرعة أكبر، مما يؤدي إلى إصلاحات مكلفة، مع مرور الوقت قد تبدأ السيارة في مواجهة مشاكل مثل ضعف جودة القيادة والاهتزاز المفرط وانخفاض القدرة على التحكم، يمكن أن تساعد فحوصات وتعديلات اتزان العجلات بانتظام في منع الضغط غير الضروري على نظام التعليق، مما يطيل عمره ويضمن عمله على النحو المطلوب، هذا لا يوفر المال على الإصلاحات فحسب، بل يساعد أيضًا في الحفاظ على قيادة سلسة ومريحة.

■ تآكل الإطارات بشكل متساوٍ:

قد يُسبب عدم موازنة العجلات تآكلًا غير متساوٍ، حيث تتآكل بعض أجزاء الإطار أسرع من غيرها. قد يؤدي هذا التآكل غير المتساوي إلى قيادة وعرة وتتطلب استبدال الإطارات بشكل مُتكرر، يساعد ضبط زوايا العجلات بشكل صحيح على توزيع تآكل الإطارات بالتساوي، مما يضمن قيادة أكثر سلاسة ويطيل عمرها الافتراضي.

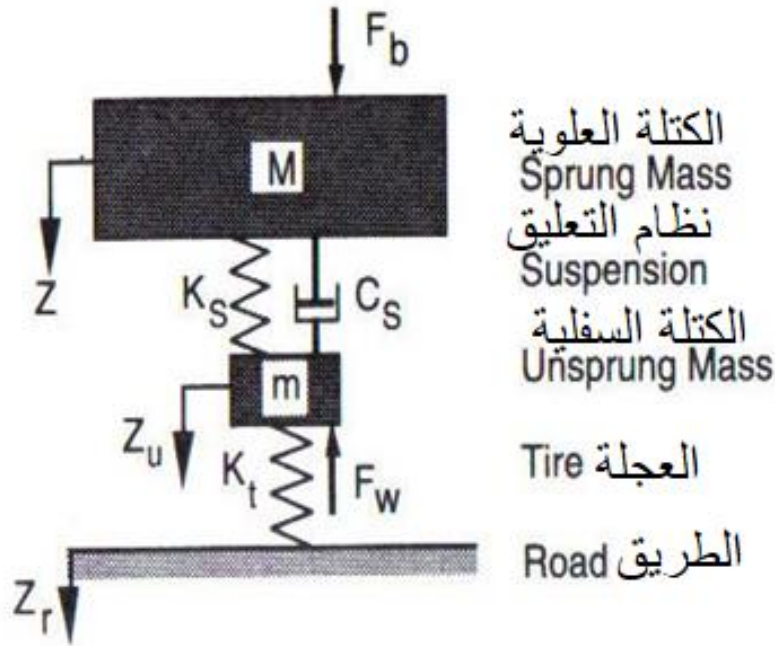
■ خفض استهلاك الوقود:

عندما تكون العجلات غير متزنة تُشكّل الإطارات مقاومة احتكاكية عند المسير على الطريق، يُجبر هذا الاحتكاك الإضافي المحرك على بذل جهد أكبر لدفع السيارة للأمام، مما يؤدي إلى زيادة في استهلاك الوقود، وبضبط اتزان العجلات يقل هذا الاحتكاك غير الضروري، مما يسمح للسيارة بالتحرك بسلاسة أكبر، واستهلاك وقود أقل وبالتالي يُحقق فوائد اقتصادية طويلة المدى ومزايا بيئية أعلى. [31]

٩-٢ - الكتلة العلوية والكتلة السفلية (Sprung Mass/Unsprung Mass) :

تعرف الكتلة العلوية المعلقة (Sprung Mass) أنها مجموع الكتل التي يحملها النابض (مثل: جسم السيارة، والمحرك، وعلبة السرعة، والركاب).

وتعرف الكتلة السفلية غير المعلقة (Unsprung Mass) أنها مجموع الكتل التي لا يحملها النابض (مثل: العجلات، وبعض مكونات نظام الكبح، وأذرع أنظمة التعليق والتوجيه، والمحور الخلفي) وتشكل % (12 – 20) من الكتلة العلوية. [5]



نموذج ربع سيارة Quarter-car Model

الشكل (٣٣): الكتلة العلوية والسفلية [13]

مع الانخفاض في قيمة الكتلة السفلية سنحصل على تماسك أفضل، وجودة أعلى في القيادة وذلك لسرعة استجابة العجلات للحفر والمطبات، وانخفاض قيم عطالة الأوزان سامحةً للنوابض والمخمدات أن تكون فعالة أكثر بخصائصها مع الكتلة العلوية. [5]

وعلى النقيض فعند انخفاض قيمة الكتلة العلوية سينتج لدينا معدل اهتزاز أكبر، وقيادة مزعجة لأنها لا تشكل قوة ضاغطة بما يكفي على النوابض والعجلات.

ومن ثم فإن هناك نسبة بين الكتل العلوية والسفلية تعدّ معيارًا لجودة الرحلة، وثبات السيارة، تسعى هذه النسبة إلى زيادة قيمة الكتلة العلوية وتقليل قيم الكتلة السفلية.

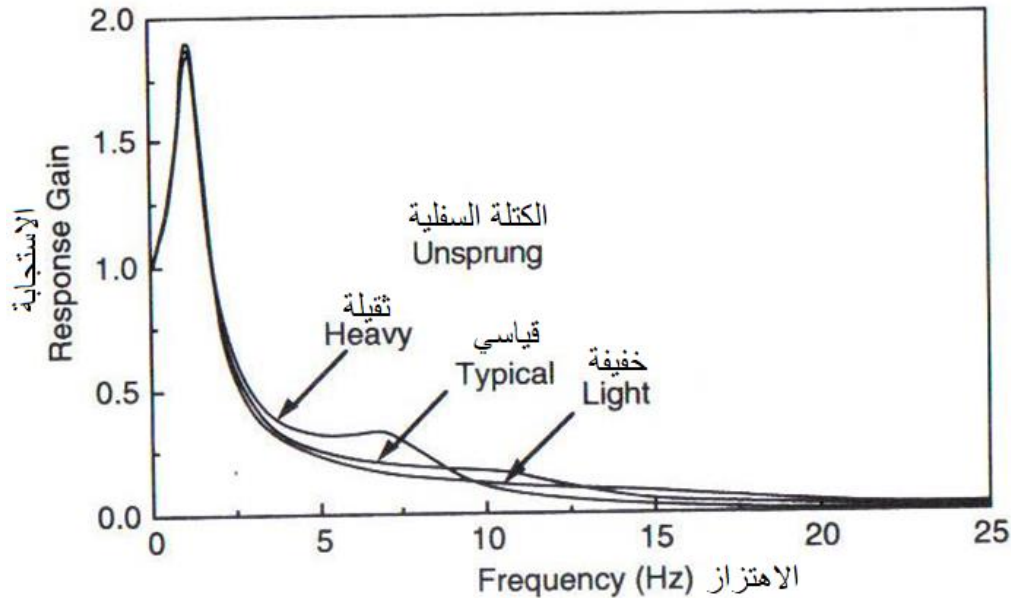
لكن يبقى أيضًا الاهتمام في توزيع الكتلة العلوية والتصميم الهندسي لنظام التعليق بحيث لا يحدث لدينا ارتفاع مقدمة السيارة عند التسارع أو انخفاض في مقدمة السيارة عند التباطؤ، لذلك يجب اختيار مواصفات السيارة وأبعادها وتوزيع كتل المركبة (الهيكل والمحرك وعلبة السرعة وأنظمة تعليق الأمامية والخلفية وأنظمة التوجيه والتحكم) بحيث تكون بنسبة (50% : 50%) في الأمام والخلف قدر الإمكان، فهو لا يمنع الغوص والجثوم بشكل مباشر، ولكنه

يقلل من كمية انتقال الوزن، فكلما كان توزيع الكتلة متوازنًا، كلما كانت قوة القصور الذاتي التي تسبب الغوص والجثوم أقل حدة، وأيضًا تحديد مركز ثقل جسم المركبة بالشكل الذي يضمن ذلك قدر الإمكان وباختيار قيم ثابت الصلابة للنوابض الأمامية والخلفية ومعدل التخميد وزوايا العجلات الأمامية والخلفية المناسبة لمنع الغوص والجثوم عند التسارع والتباطؤ، واختيار النسبة بين قيمتي الكتلة العلوية والسفلية الملائمة.

• تأثير الكتلة السفلية:

لا يمكن وضع قيمة ثابتة لتحديد ما إذا كانت الكتلة السفلية ثقيلة أو خفيفة، فهي قيمة نسبية مرتبطة بالكتلة العلوية وتختلف بين أصناف السيارات وتصاميمها، وربطًا بالمجال الذي تم تحديده بحيث تكون الكتلة السفلية ضمن المجال $(12 - 20)\%$ من الكتلة العلوية إذا تجاوزت الكتلة السفلية هذا المجال قلنا عنها أنها ثقيلة، وإذا كانت كتلتها أصغر من هذه النسبة فهي خفيفة.

عندما تكون الكتلة السفلية ثقيلة سيحصل لدينا ردة فعل منها عند الاهتزازات المتوسطة وعندما تكون الاهتزازات عالية فتأثيرها ضئيل، أما عندما تكون الكتلة السفلية خفيفة فلا تحدث ردة فعل عند الاهتزازات المتوسطة ولكن تأثيرها يطول حتى الاهتزازات العالية، والكتلة السفلية القياسية تعد حلًا وسطًا بينها.



الشكل (٣٤): تأثير الكتلة السفلية في أداء نظام التعليق [13]

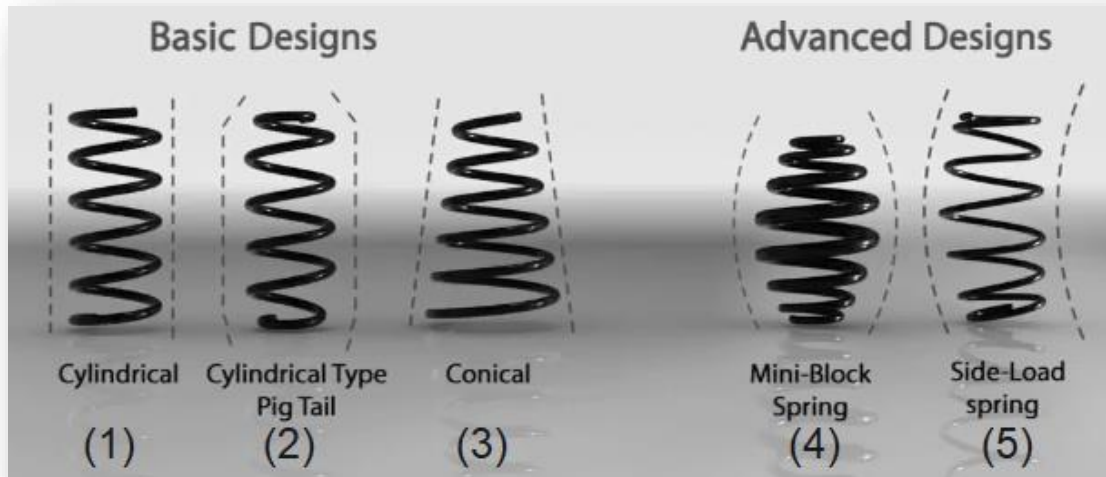
٢-١- صلابة النابض (Spring Rate):

تؤدي القوى المؤثرة في انضغاط النابض دورًا في جودة الرحلة ومقدار الحمولة التي يتحملها النابض.

- بازدياد طول النابض يرتفع معدل الصلابة.
- بازدياد عرض النابض الصفائحي يرتفع معدل الصلابة.
- بازدياد سماكة النابض يرتفع معدل الصلابة.
- في النوابض الصفائحية بازدياد عدد الصفائح يرتفع معدل الصلابة.
- في السيارات السياحية تتراوح قيمة معدل الصلابة لنظام التعليق بين $[20 - 50 \text{ [Kg/cm]}, [\text{KN/m}]]$. [1]

• بعض أنواع النوابض الحلزونية [20]:

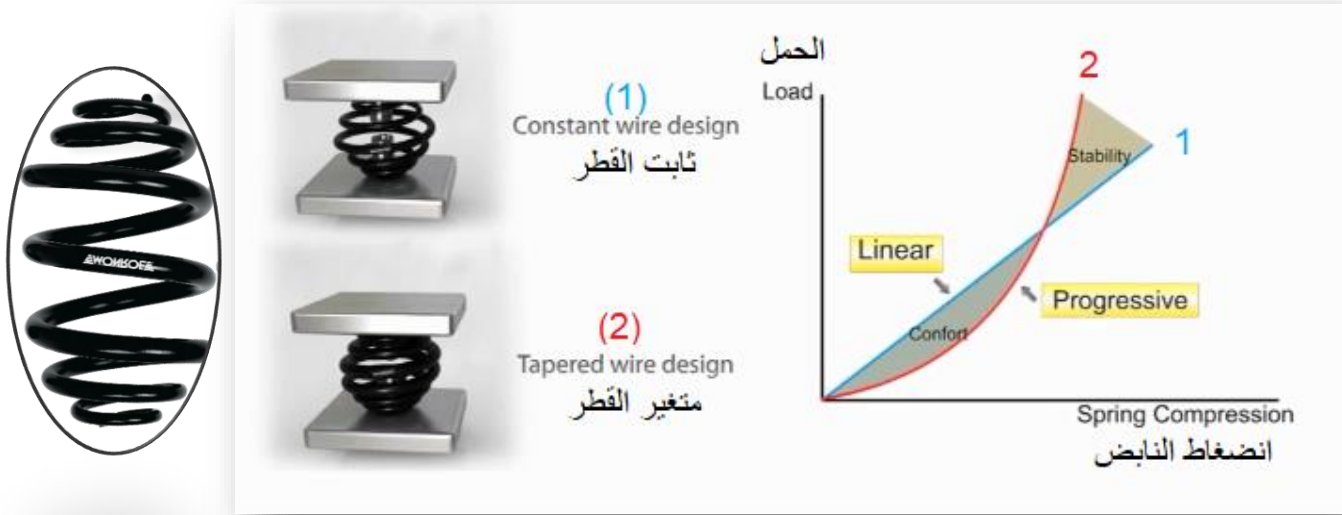
- (١) النابض الأسطواني، ويتميز بمعدل صلابة منتظم (خطي).
- (٢) النابض الأسطواني ذو الضفيرة، ويكون ضيق النهاية أو النهايتين.
- (٣) النابض المخروطي، للحصول على ثابت صلابة خطي، ولزيادة تحمل الأوزان.
- (٤) النابض ذو الكتلة الصغيرة، ويتميز بطول العمر وصغر الحجم وضجيج أقل.
- (٥) نابض التحميل الجانبي، يعزز القوة القطرية لمكافأة القوة الجانبية الناتجة عن تصميم نظام التعليق.



الشكل (٣٥): بعض أنواع النوابض الحلزونية

• تأثير قطر سلك النابض في الراحة:

في الآونة الأخيرة ابتكر نابض ذو سلك متغير القطر، الأمر الذي أسهم في زيادة الراحة والثبات، ونلاحظ من المخطط الموجود في الشكل (٣٦) أن النابض متغير قطر السلك يقدم عند انخفاض قيم انضغاطه راحة أكبر، وعند ارتفاع قيم انضغاطه نتحصل على ثبات أكبر مقارنةً مع النابض ذي قطر سلك ثابت [20]:



الشكل (٣٦): نابض حلزوني ذو قطر سلك ثابت ونابض متغير قطر السلك

١١-٢ - معدل التخميد (Damping Rate):

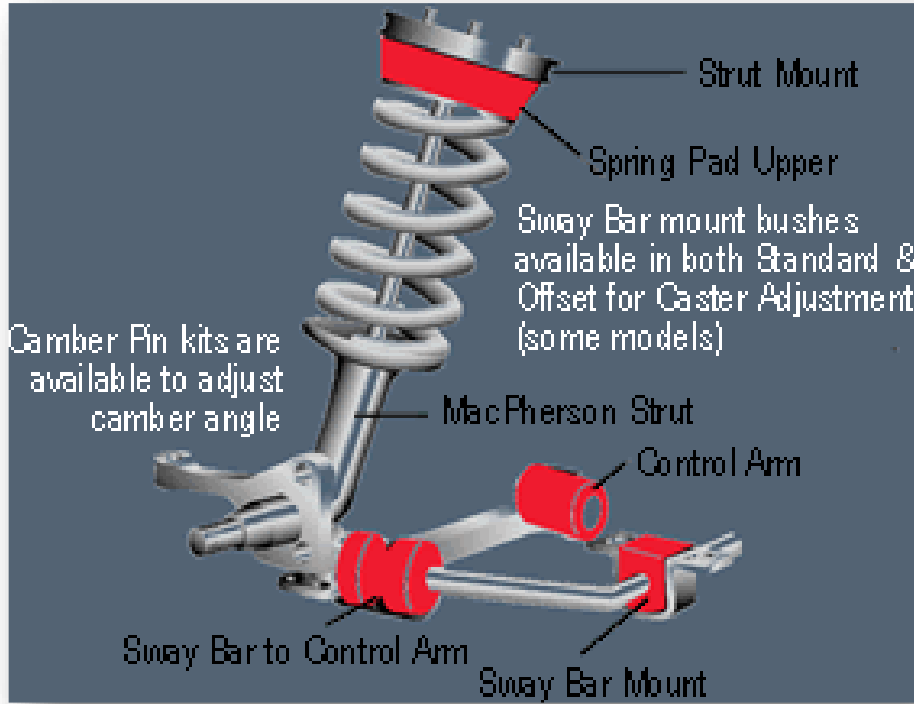
تعمل قوى التخميد على تحويل % (92 - 97) من القدرة الميكانيكية للحركة الاهتزازية إلى قدرة حرارية، ولمعدل التخميد عامل يحدد مقدار التخميد المناسب وتكون قيمة هذا العامل للسيارات في حدود (3,5 - 6) مرة تخميد عادةً. [1]

أغلب المخدمات تعطي معدل تخميد خطي ثابت القيمة (Linear)، ولكن توجد بعض المخدمات تعطي معدل تخميد غير ثابت (لاخطي Nonlinear) يتناسب مع القوة المؤثرة فيه، وفي الأنظمة نصف التفاعلية وبعض الأنظمة النشطة تستعمل مخمدات متغيرة معدل التخميد يتحكم بها وفق دائرة مغلقة تحوي إشارة راجعة إضافةً إلى أن الأنظمة الفعالة تقدم قوة إضافية تتحكم بقساوة وارتفاع نظام التعليق وأيضًا إمكانية التحكم بعملها من السائق.

١٢-٢ - المرباط اللينة (البطانات The Bushings):

تمنع المرباط التماس المباشر والاحتكاك بين الأجزاء المتحركة بهدف كتم الضجيج، وتخفيف الاهتزاز (كالمطاط الذي يستخدم في جسم السيارة أو نظام التعليق).

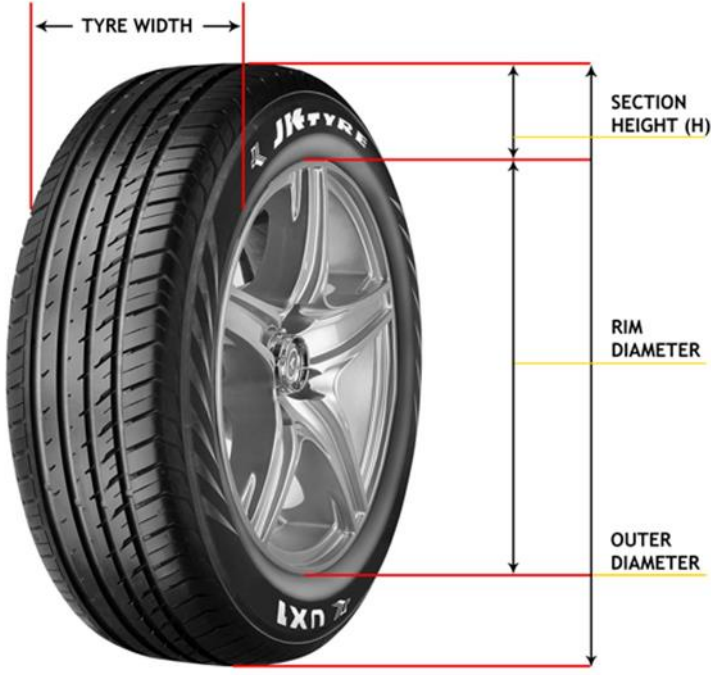
تصنف المرباط وفق درجات الطلاقة (DOF) بين الأجزاء التي تربطها، فمنها الأسطواناني الذي يسمح بحركة دائرية نسبية، وهناك الكروية التي تسمح بحركة دائرية في الاتجاهات جميعها.



الشكل (٣٧): المرباط اللينة

١٣-٢ - العجلات (Tires):

- فضلاً عن صلابة النابض فإن العجلات تؤدي دوراً في التخميد.
- تصبح القيادة مزعجة مع زيادة ضغط هواء الإطارات.
- معدل مرونة العجلات أكبر بما يقارب (٨) مرات من صلابة التعليق.
- كلما قلّ قطر العجلة الخارجي زاد انحرافها الشاقولي مع الحفر نظراً إلى دخولها في عمق أكبر ومن ثمّ تزداد سعة الاهتزازات.
- يعد ارتفاع الإطار المطاطي للعجلات (h) من المعايير الرئيسية لمرونة العجلات، فبازدياده تزداد مرونة العجلات وتخميد الاهتزازات.
- تساعد الإطارات العريضة أيضاً على الانعطاف، ولكن مع ازدياد في خشونة الرحلة.



الشكل (٣٨): أبعاد العجلة وتأثير ضغط الإطارات عند خشونة الطريق

٢-١٤- الخلاصة:

نستطيع القول إن ملخص المواصفات والمؤشرات الواجب أخذها بالحسبان عند دراسة صفاء حركة السيارة هي:

- قساوة التعليقة وصلابة النوابض ومرونة الإطارات.
- نصف قطر عطالة السيارة المرتبط بأبعاد المحاور والعجلات عن مركز الثقل للمركبة.
- نسبة الكتلة العلوية إلى الكتلة السفلية.
- مقاومات المخمدات.
- الحمولة نوعها وتوزيعها.

وبعد الانتهاء من دراسة صفاء حركة السيارة والتعرف على مؤشراتهما، لا بد من الانتقال إلى المرحلة التالية وهي وضع أسس ومبادئ النمذجة والمحاكاة للسيارة السياحية للتجهيز إلى اختبارها.

الفصل الثالث

النمذجة والمحاكاة لنظام التعليق

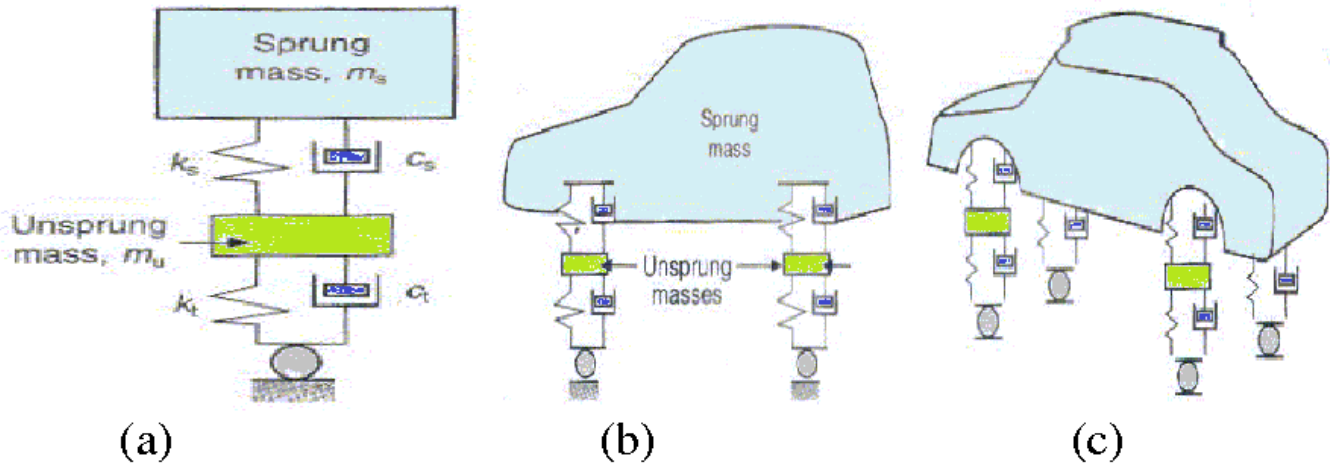
النمذجة والمحاكاة لنظام التعليق

في هذا الفصل سنستعرض النموذج الذي سنستخدمه في دراسة نظام التعليق والعلاقات الرياضية اللازمة لهذا النموذج، ومن ثم خطوات المحاكاة التي أجريت في البرنامج (CarSim)، البرنامج الذي يسمح بدراسة أنظمة السيارة وإجراء الاختبارات عليها، ومن هذا البرنامج سنحصل على بيانات تفيدنا في حساب مؤشرات الراحة وربطها ببرنامج (Matlab/Simulink)، مع ملاحظة أنه لم يتم إنشاء نماذج جديدة ولكن أجريت بعض التعديلات على النماذج المستخدمة للحصول على معايير الراحة.

٣-١ - نماذج الدراسة لجسم السيارة:

لدراسة نظام التعليق يوجد ثلاثة نماذج، وهي:

- نموذج ربع السيارة (Quarter Car).
- نموذج نصف السيارة (Half Car).
- نموذج كامل السيارة (Full Car).

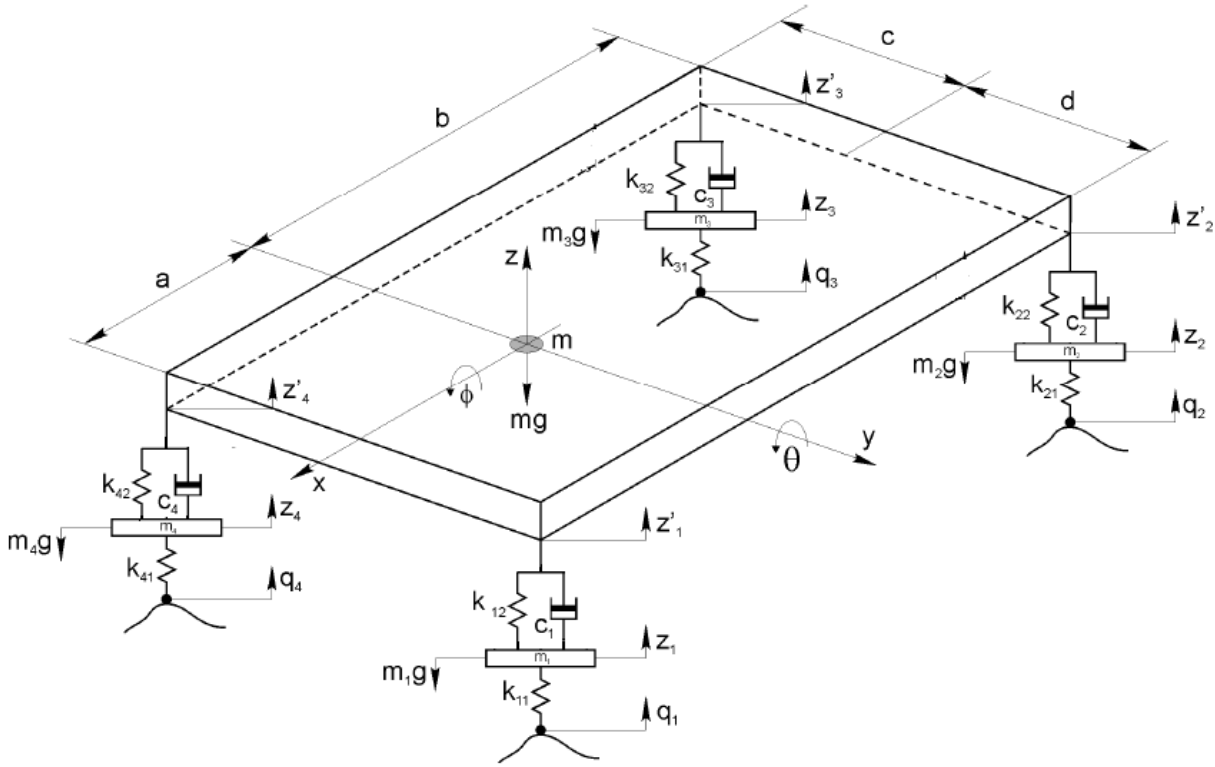


الشكل (٣٩): أنواع النماذج لدراسة أنظمة التعليق [33]

الذي سنستخدمه في دراستنا هو نموذج كامل السيارة، ولدينا تصميمين لنموذج كامل السيارة، فالموضح في الشكل (٤٠) هو نموذج فيزيائي لكامل السيارة بنظام تعليق تقليدي، والشكل (٤٢) هو نموذج فيزيائي لكامل السيارة مزود بنظام تعليق نصف فعال أو فعال، وستقتصر النتائج على حساب مركز ثقل السيارة لكون المقاعد الأمامية للسائق والمرافق (كما سنراه عند شرح مخطط أبعاد السيارة عند اختيار أبعاد المركبة في الشكل ٤٩) تقع على

نفس الخط العرضي للسيارة المار من مركز ثقل المركبة، ولم تؤخذ قيم تخميد المقاعد بالحسبان عند إجراء التجارب وبالتالي سلاحظ أن القيم ستكون مرتفعة نسبياً.

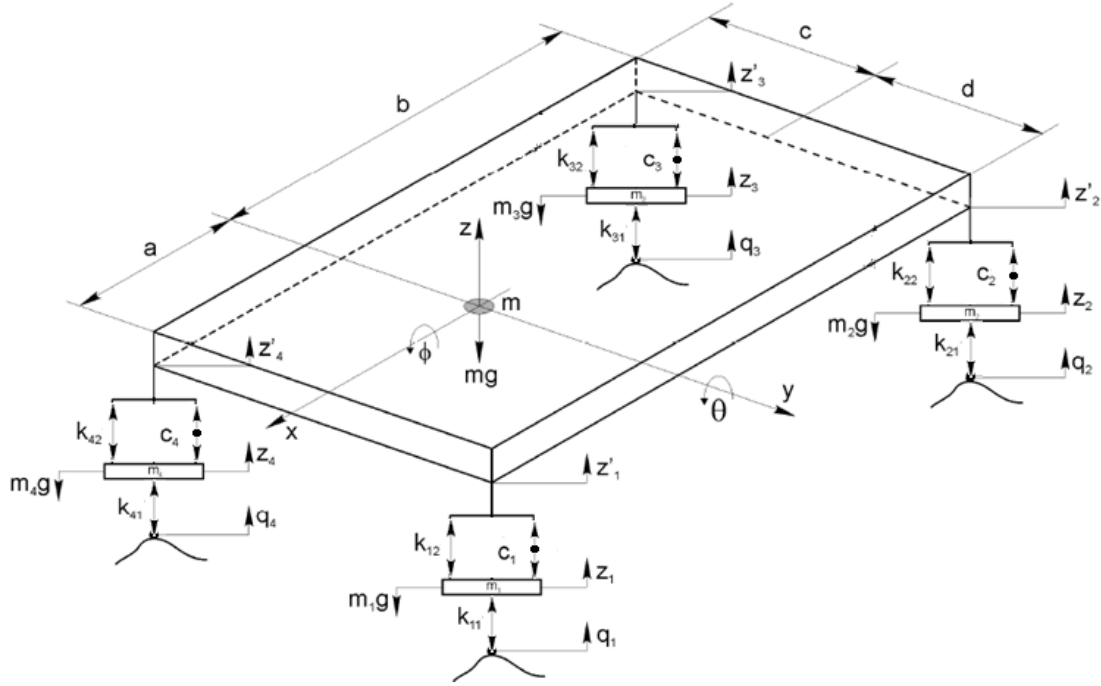
• الشكل التوضيحي للنموذج الفيزيائي لكامل السيارة بنظام تعليق تقليدي مستقل:



الشكل (٤٠): النموذج الفيزيائي لكامل السيارة بنظام تعليق تقليدي مستقل

يبين الشكل أعلاه، الكتلة العلوية (m) ومجموعة النوابض (k_{n2}) والمخمدات (c_n) والعجلات الأربع (k_{n1}) والكتل السفلية (m_n) أسفل منها، ويظهر من الكتلة العلوية مركز ثقلها وبعده عن كل مجموعة من المجموعات الأربع (a, b, c, d) وكما يحدد اتجاه المحاور الديكارتية الثلاث (x, y, z) وزاوية الدوران حول المحور الطولي (ϕ) وتمثل التآرجح (Roll) وزاوية الدوران حول المحور الجانبي (θ) وتمثل التآرجح (Pitch)، ويمثل (q_n) بيانات الطريق و (z_n) موضع الكتل السفلية الشاقولي و (z'_n) موضع الكتلة العلوية الشاقولي فوق مجموعة العجلات و (z) موضع مركز ثقل الكتلة العلوية [21]، إن زوايا العجلات ليست ظاهرة هنا، ولكن هذا لا يعني أنه لا اعتبار لها لأن انتقال العجلات وتآرجحها حول محورها مرتبط بمقادير زوايا عجلات والبنية الهندسية لنظام التعليق.

• مخطط القوى لنموذج كامل السيارة بنظام تعليق تقليدي مستقل:



الشكل (٤١): مخطط القوى لنموذج كامل السيارة بنظام تعليق تقليدي مستقل

الكلام هنا ينطبق على سابقه إلا أنه عوّض عن النوابض والمخمدات والعجلات بالقوى الناتجة عنها أثناء تغير بيانات الطريق.

• العلاقات الرياضية لنظام التعليق التقليدي المستقل:

تبين العلاقات الآتية القوى المؤثرة في الكتل السفلية للعجلات الأربع، يمثل الطرف الأيسر قوة التسارع أما الطرف الأيمن فتبين الحدود قوى مرونة الإطار ومرونة النابض وقوى التخميد ووزن الكتلة السفلية على التوالي بدءاً من اليسار [21]:

$$m_1 \ddot{z}_1 = k_{11}(q_1 - z_1) + k_{12}(z'_1 - z_1) + c_1(\dot{z}'_1 - \dot{z}_1) + m_1 g;$$

$$m_2 \ddot{z}_2 = k_{21}(q_2 - z_2) + k_{22}(z'_2 - z_2) + c_2(\dot{z}'_2 - \dot{z}_2) + m_2 g;$$

$$m_3 \ddot{z}_3 = k_{31}(q_3 - z_3) + k_{32}(z'_3 - z_3) + c_3(\dot{z}'_3 - \dot{z}_3) + m_3 g;$$

$$m_4 \ddot{z}_4 = k_{41}(q_4 - z_4) + k_{42}(z'_4 - z_4) + c_4(\dot{z}'_4 - \dot{z}_4) + m_4 g;$$

تبين العلاقة الآتية القوى المؤثرة في الكتلة العلوية، يمثل الطرف الأيسر قوة التسارع أما الطرف الأيمن فتبين الحدود على التوالي بدءاً من اليسار قوى مرونة النابض للعجلات الأربع ومثلها قوى التخميد والحد الأخير وزن الكتلة العلوية [21]:

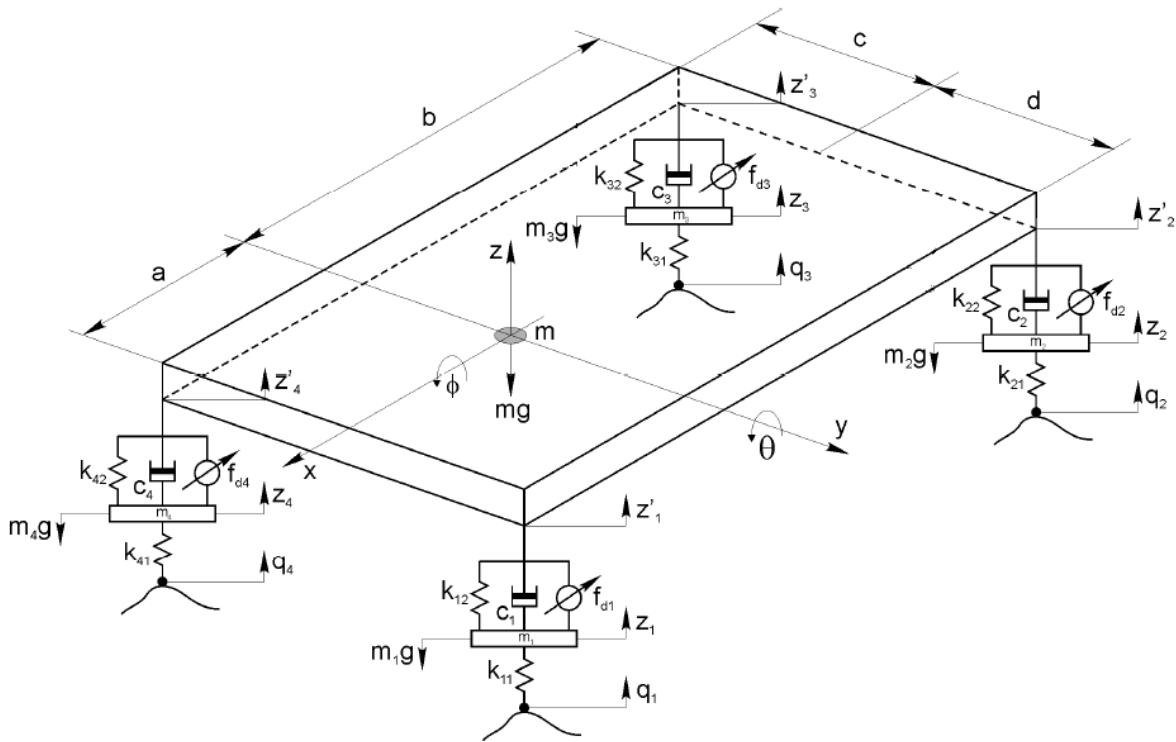
$$m \ddot{z} = k_{12}(z_1 - z'_1) + k_{22}(z_2 - z'_2) + k_{32}(z_3 - z'_3) + k_{42}(z_4 - z'_4) \\ + c_1(\dot{z}_1 - \dot{z}'_1) + c_2(\dot{z}_2 - \dot{z}'_2) + c_3(\dot{z}_3 - \dot{z}'_3) + c_4(\dot{z}_4 - \dot{z}'_4) + m g;$$

تبين العلاقتان الآتيتان العزوم المؤثرة حول المحورين الطولي والجانبى، يمثل الطرف الأيسر لكل معادلة عزم العطالة أما الطرف الأيمن فتبين الحدود على التوالي بدءاً من اليسار عزوم قوى مرونة النابض للعجلات الأربع ومثلها عزوم قوى التخميد [21]:

$$J_X \ddot{\phi} = -[k_{32}(z_3 - z'_3) + c_3(\dot{z}_3 - \dot{z}'_3) + k_{42}(z_4 - z'_4) + c_4(\dot{z}_4 - \dot{z}'_4)]c \\ + [k_{12}(z_1 - z'_1) + c_1(\dot{z}_1 - \dot{z}'_1) + k_{22}(z_2 - z'_2) + c_2(\dot{z}_2 - \dot{z}'_2)]d;$$

$$J_Y \ddot{\theta} = -[k_{12}(z_1 - z'_1) + c_1(\dot{z}_1 - \dot{z}'_1) + k_{42}(z_4 - z'_4) + c_4(\dot{z}_4 - \dot{z}'_4)]a \\ + [k_{22}(z_2 - z'_2) + c_2(\dot{z}_2 - \dot{z}'_2) + k_{32}(z_3 - z'_3) + c_3(\dot{z}_3 - \dot{z}'_3)]c;$$

• الشكل التوضيحي للنموذج الفيزيائي لكامل السيارة بنظام تعليق فعال أو نصف فعال مستقل [21]:



الشكل (٤٢): النموذج الفيزيائي لكامل السيارة بنظام تعليق فعال أو نصف فعال

في هذا النموذج تمت إضافة مشغل يساعد في التحكم أكثر بمقدار تقلص نظام التعليق ومعدل قساوته ويتم ذلك بتقديم قوة متغيرة تبعاً لظروف العمل تتحكم في عمل نظام التعليق (f_{dn})، ويكمن الاختلاف بين نظام التعليق الفعال والنصف فعال كما ذكر آنفاً بأن الفعال يمكن التحكم به عن طريق السائق أما النصف فعال فلا يمكن له التحكم به.

• العلاقات الرياضية لنظام التعليق الفعال والنصف فعال المستقل:

تبين العلاقات الآتية القوى المؤثرة في الكتل السفلية للعجلات الأربع، يمثل الطرف الأيسر قوة التسارع أما الطرف الأيمن فتبين الحدود قوى مرونة الإطار ومرونة النابض وقوى التخميد وقوى المشغل ووزن الكتلة السفلية على التوالي بدءًا من اليسار [21]:

$$m_1\ddot{z}_1 = k_{11}(q_1 - z_1) + k_{12}(z'_1 - z_1) + c_1(\dot{z}'_1 - \dot{z}_1) + f_{d1} + m_1g;$$

$$m_2\ddot{z}_2 = k_{21}(q_2 - z_2) + k_{22}(z'_2 - z_2) + c_2(\dot{z}'_2 - \dot{z}_2) + f_{d2} + m_2g;$$

$$m_3\ddot{z}_3 = k_{31}(q_3 - z_3) + k_{32}(z'_3 - z_3) + c_3(\dot{z}'_3 - \dot{z}_3) + f_{d3} + m_3g;$$

$$m_4\ddot{z}_4 = k_{41}(q_4 - z_4) + k_{42}(z'_4 - z_4) + c_4(\dot{z}'_4 - \dot{z}_4) + f_{d4} + m_4g;$$

تبين العلاقة الآتية القوى المؤثرة في الكتلة العلوية، يمثل الطرف الأيسر قوة التسارع أما الطرف الأيمن فتبين الحدود على التوالي بدءًا من اليسار قوى مرونة النابض للعجلات الأربع ومثلها قوى التخميد وقوى المشغلات الأربعة والحد الأخير وزن الكتلة العلوية [21]:

$$\begin{aligned} m\ddot{z} = & k_{12}(z_1 - z'_1) + k_{22}(z_2 - z'_2) + k_{32}(z_3 - z'_3) + k_{42}(z_4 - z'_4) \\ & + c_1(\dot{z}_1 - \dot{z}'_1) + c_2(\dot{z}_2 - \dot{z}'_2) + c_3(\dot{z}_3 - \dot{z}'_3) + c_4(\dot{z}_4 - \dot{z}'_4) \\ & + f_{d1} + f_{d2} + f_{d3} + f_{d4} + mg; \end{aligned}$$

تبين العلاقتان الآتيتان العزوم المؤثرة حول المحورين الطولي والجانبى، يمثل الطرف الأيسر لكل معادلة عزم العطالة أما الطرف الأيمن فتبين الحدود على التوالي بدءًا من اليسار عزوم قوى مرونة النابض للعجلات الأربع ومثلها عزوم قوى التخميد وعزوم قوى المشغلات فيها [21]:

$$\begin{aligned} J_X\ddot{\phi} = & -[k_{32}(z_3 - z'_3) + c_3(\dot{z}_3 - \dot{z}'_3) + k_{42}(z_4 - z'_4) + c_4(\dot{z}_4 - \dot{z}'_4)]c \\ & + [k_{12}(z_1 - z'_1) + c_1(\dot{z}_1 - \dot{z}'_1) + k_{22}(z_2 - z'_2) + c_2(\dot{z}_2 - \dot{z}'_2)]d \\ & + (f_{d1} + f_{d2})d - (f_{d3} + f_{d4})c; \\ J_Y\ddot{\theta} = & -[k_{12}(z_1 - z'_1) + c_1(\dot{z}_1 - \dot{z}'_1) + k_{42}(z_4 - z'_4) + c_4(\dot{z}_4 - \dot{z}'_4)]a \\ & + [k_{22}(z_2 - z'_2) + c_2(\dot{z}_2 - \dot{z}'_2) + k_{32}(z_3 - z'_3) + c_3(\dot{z}_3 - \dot{z}'_3)]c \\ & + (f_{d2} + f_{d3})b - (f_{d1} + f_{d4})a; \end{aligned}$$

حيث:

- $m_1...m_4$ تمثل الكتل لمجموعة العجلات الأربعة (الكتلة السفلية).
- m تمثل الكتلة العلوية.
- $k_{11}...k_{14}$ تمثل مرونة العجلات.
- $k_{21}...k_{24}$ تمثل ثوابت صلابة النوابض.
- $c_1...c_4$ تمثل معاملات التخميد للمخمدات.

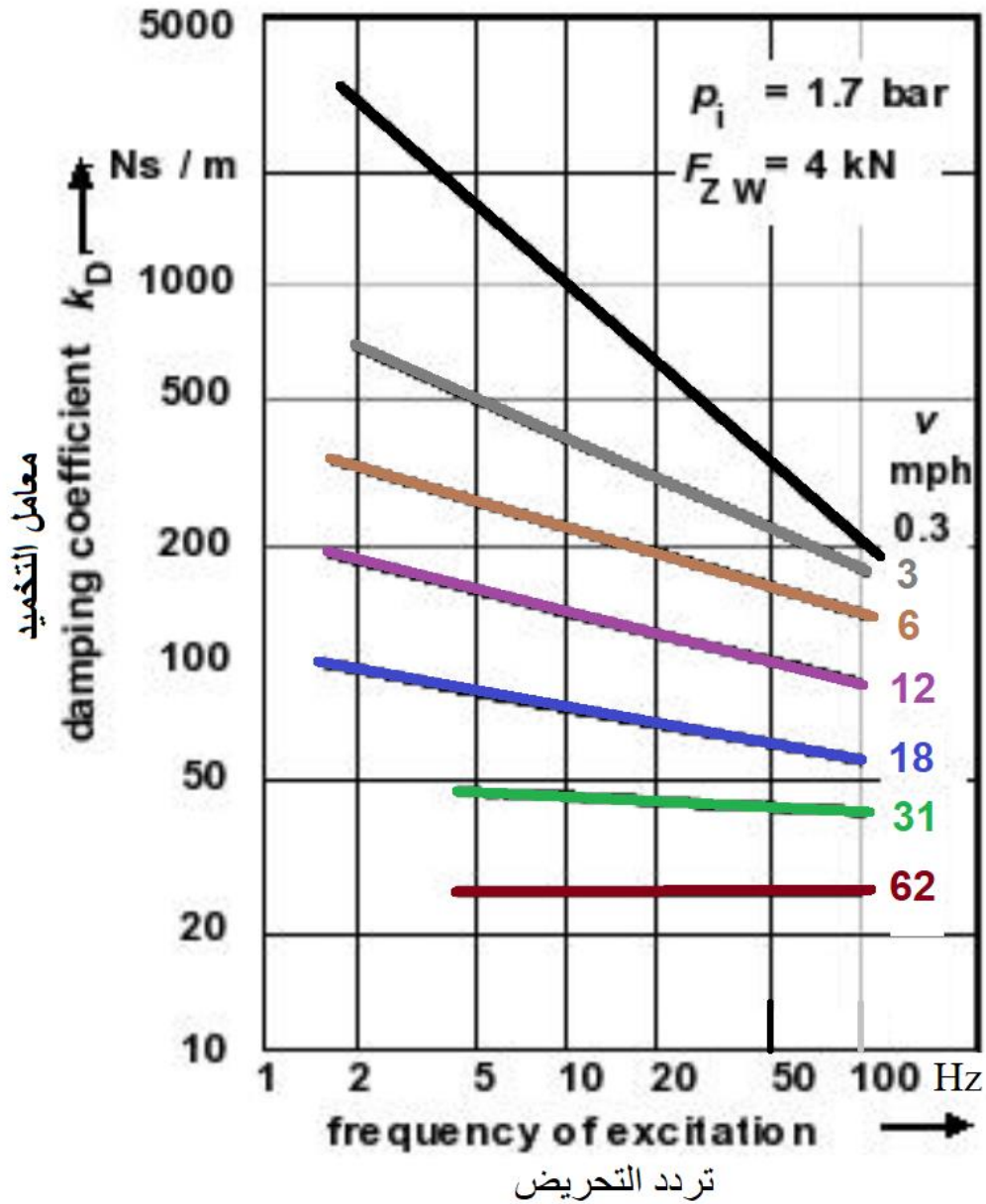
- a, b, c, d تمثل أبعاد العجلات عن مركز كتلة السيارة.
- $q_1...q_4$ تمثل تعرجات الطريق.
- $z_1...z_4$ تمثل الإزاحة الشاقولية لكل عجلة من العجلات الأربع.
- $z'_1...z'_4$ تمثل الإزاحة الشاقولية لجسم السيارة فوق العجلات الأربع.
- $\dot{z}_1 ... \dot{z}_4$ تمثل سرعة الحركة الاهتزازية لكل عجلة من العجلات الأربع.
- $\dot{z}'_1 ... \dot{z}'_4$ تمثل سرعة الحركة الاهتزازية لجسم السيارة فوق العجلة.
- z تمثل موضع مركز ثقل السيارة.
- $\ddot{z}$ تمثل تسارع مركز ثقل السيارة.
- J_X عطالة جسم السيارة حول المحور X.
- J_Y عطالة جسم السيارة حول المحور Y.
- ϕ زاوية دوران السيارة حول المحور الطولي (Roll).
- θ زاوية دوران السيارة حول المحور الجانبي (Pitch).
- $f_{d1}...f_{d4}$ القوى الناتجة عن المشغلات.

تم الاقتصار على تصميم واحد مشترك لنظامي التعليق المستخدمين الفعال ونصف الفعال نظرًا إلى اشتراكهم في احتوائهم على قوة مساعدة لعملية التخميد، ويكمن الفرق حيث يستبدل نظام التعليق نصف الفعال المخمد ذي المعدل الثابت بمخمد صدمات ذو معدل تخميد متغير يتم التحكم فيه إلكترونياً، يمكن تعديل خصائص هذا المخمد آنياً بناءً على مدخلات المستشعر (مثل حالة الطريق وسرعة السيارة) وخوارزمية تحكم، يمكن للنظام تغيير معامل التخميد لجعل التعليق أكثر ليونة لقيادة أكثر راحة أو أكثر صلابة لتحسين التحكم والثبات، يكمن القيد الرئيسي في قدرته على عدم وجود طاقة مستقلة به، أي أنه لا يمكنه إضافة طاقة إلى النظام، هذا يعني أنه قادر فقط على مقاومة الحركة، وليس على دفع أو سحب العجلة بشكل نشط.

بينما يتقدم نظام التعليق الفعال بخطوة حيث يضاف مشغل كهربائي بالتوازي مع النابض والمخمد، يمكن لهذا المُشغِّل توليد قوة مستقلة عن النظام، مما يعني أنه يُضيف طاقة إلى نظام التعليق، هذا يسمح بنطاق تحكم أوسع بكثير، لا يقتصر دور النظام النشط على ضبط التخميد فحسب، بل يدفع عجلة القيادة للأسفل في منحدر على الطريق أو يرفعها فوق مطب للحفاظ على استواء الهيكل، يوفر هذا تحكماً فائقاً في راحة القيادة، وتوجيه السيارة، ووضعية الهيكل (مما يُقلل من ميلان الهيكل، والغوص، والجنثوم)، ومع ذلك تأتي هذه القدرة الإضافية مع عيوب كثيرة، بما في ذلك زيادة التعقيد والوزن والتكلفة وارتفاع استهلاك الطاقة.

باختصار، لا يُمكن للنظام نصف الفعال التحكم في القوى في اتجاه السرعة الحالية لنظام التعليق إلا من خلال تغيير التخميد، بينما يُمكن للنظام الفعال توليد قوى في أي اتجاه، مما يجعله أكثر كفاءة ولكنه أيضاً أكثر تعقيداً وتكلفة. [22]

ويضاف إلى ذلك أن النظام الفعال يقدم مجالات متعددة لعملية التخميد يمكن التحكم بالمجال المرغوب فيه (ثبات - راحة أكثر - متوازن)، على حين أن النصف فعال يقدم قوة تخميد متغيرة ويعمل تلقائيًا دون إمكانية التحكم من السائق ويتم ذلك من دائرة مغلقة تحتوي إشارة راجعة لتحديد معدل التخميد المطلوب.



الشكل (٤٣): مخطط علاقة معدل تخميد الإطارات بالسرعة والتردد [15]

لقد تم إهمال معامل التخميد للعجلات لصغره عند السرعات العالية والمتوسطة، ويظهر المخطط كيف تنخفض قيمه مع زيادة السرعة ومع زيادة تردد التحريض المؤثر عليه وذلك عند ضغط إطارات ($p_i = 1.7 \text{ bar}$) وتأثير وزن مقداره ($F_{z w} = 4 \text{ kN}$)، حتى تصل إلى حدود ($0.1 - 0.02 \text{ N.s/mm}$) عند مجال السرعات ($28 - 100 \text{ Km/h}$) أو ($18 - 62 \text{ mile/h}$) وعند مجال تردد واسع، بينما يكون عاليًا عند السرعات المنخفضة، وينخفض عند قيمة سرعة

قليلة ثابتة عند زيادة تردد التحريض، ولكن حتى قيمه العالية يمكن إهمالها لانخفاضها بشكل كبير مقارنةً مع قيم معدل التخميد للمخمد، حيث عند السرعة (3 mile/h) أو بحدود (5 km/h) وعند أقل قيمة لتردد التحريض تكون أعلى قيمة لها (0.75 N.s/mm) ، وبالتالي يمكننا إهمالها^[15].

٢-٣- مواصفات السيارة المدروسة:

يبين الجدول رقم (٢) مواصفات السيارة الأساسية التي سنعتمد عليها في دراستنا، المعطيات موجودة ضمن مثال في برنامج (CarSim) لسيارة سياحية متوسطة الحجم:

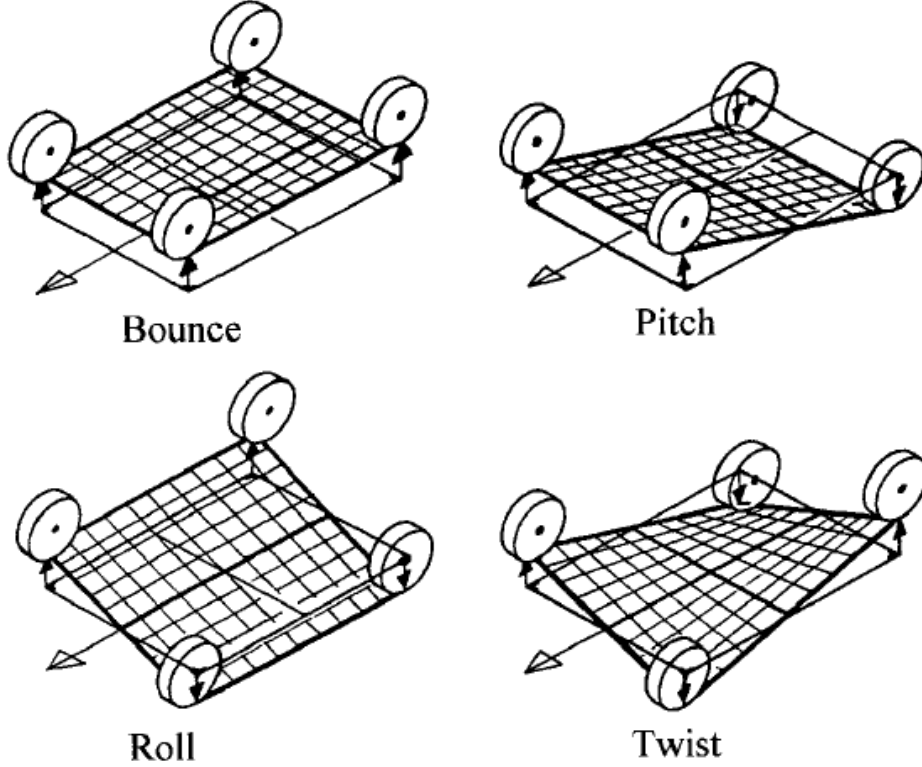
D-Class Sedan 2017	
المؤشر Parameter	القيمة Value
الكتلة الفوقية Sprung Mass	1370 Kg
الكتلة السفلية Unsprung Mass	160 Kg
صلابة النابض Stiffness of Springs	153 KN/m (Front) – 82 KN/m (Rear)
مرونة الإطارات Stiffness of Tires	268 KN/m
معدل التخميد Damping Ratio	تابع لاختي يتراوح بين (2 - 10 N.s/mm)
عطالة السيارة حول المحور الطولي Roll Inertia	671.3 kg.m ²
عطالة السيارة حول المحور الجانبي Pitch Inertia	1972 kg.m ²
طول قاعدة العجلات Wheel Base	2780 mm
البعد (a)	1110 mm
البعد (b)	1670 mm
البعد (c)	775 mm
البعد (d)	775 mm
نوع نظام التعليق في المحاور الأمامية	MacPherson(Strut)
نوع نظام التعليق في المحاور الخلفية	TriLink

إن نوع السيارة المختارة (D-Class Sedan) هي من الصنف متوسط الحجم وهي فئة تضم سيارات مثل (Alfa Romeo 159) و (Audi A4) و (BMW 3 Series) و (Cadillac CTS) و (Lexus IS) و (Mercedes-Benz C-Class).

٣-٣- أنواع الاختبارات:

عند اختبار نظام التعليق عادةً يجري عليه الاختبارات الآتية:

- الارتداد أو الاهتزاز إلى الأعلى وإلى الأسفل (Bounce).
- التآرجح حول المحور الجانبي (Pitch).
- التآرجح حول المحور الطولي (Roll).
- التآرجح المزدوج (Twist).

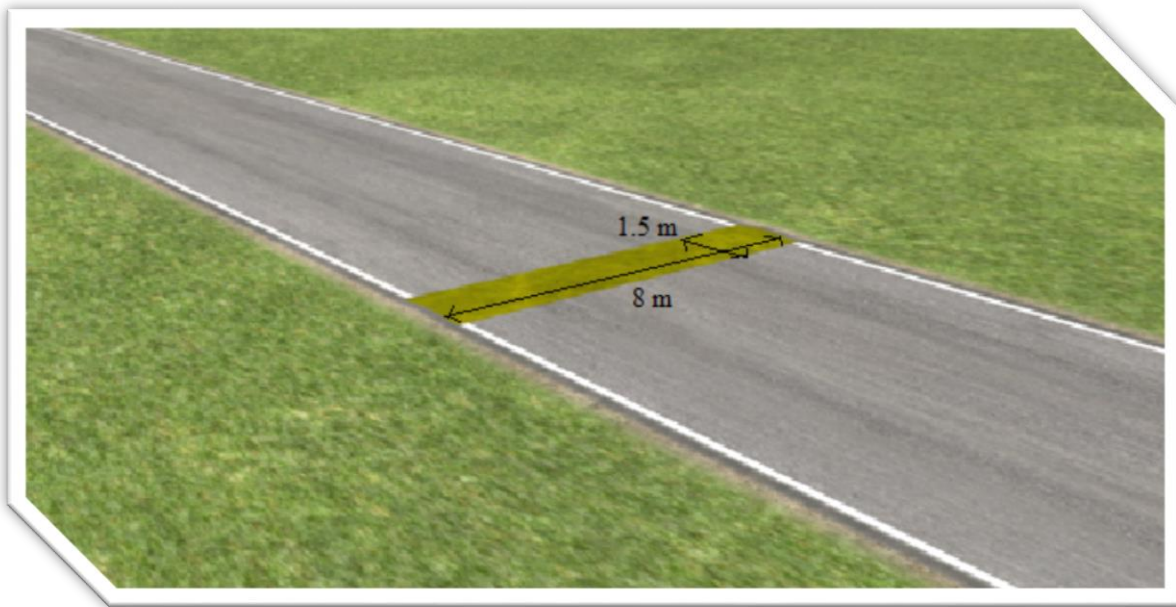
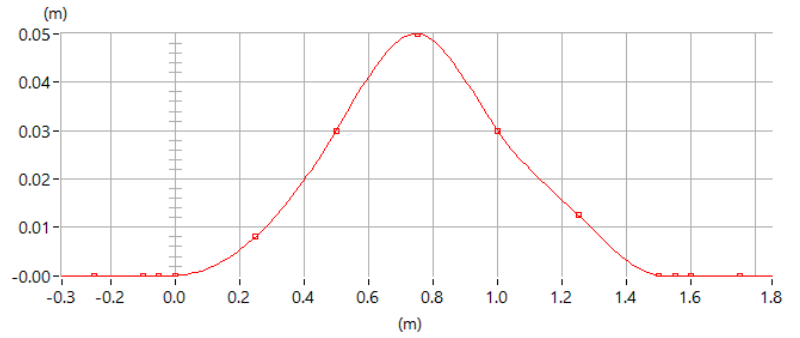
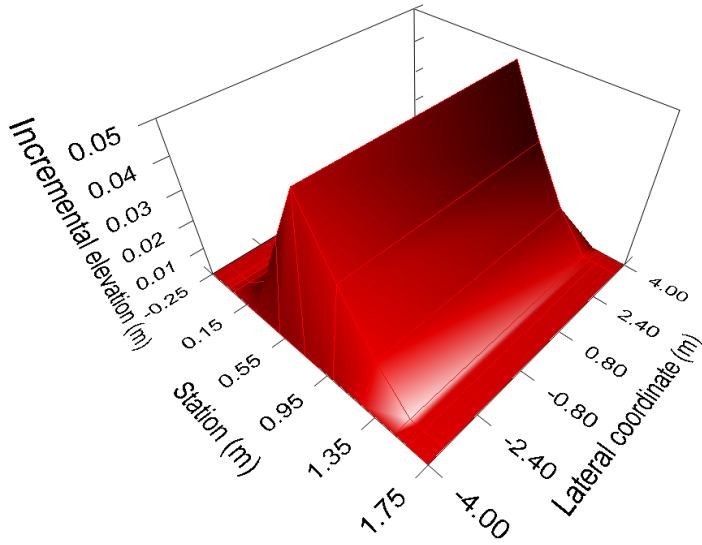


الشكل (٤٤): أنواع الاختبارات

وفي هذ الدراسة سنجري الاختبارات الثلاثة الأولى لأن طبيعة عمل السيارات السياحية المخصصة للسير على الطرق المعبدة غالبًا تتعرض لهذه الأنواع من التعرجات للطريق بينما يمثل الاختبار الأخير (Twist) السير على الطرقات غير المعبدة (Off Road) وأيضًا منعًا للإطالة في البحث، لإجراء اختبار الارتداد (Bounce) سنحاكي مرور السيارة على التواء (مطب أو تحدب Bump)، ولإجراء اختبار التآرجح حول المحور الجانبي (Pitch) سنحاكي مرور السيارة على طريق متموج طوليًا وبترددات متغيرة بدءًا من طول موجة كبير، ولإجراء اختبار التآرجح حول المحور الطولي (Roll) سنحاكي مرور السيارة على طريق متموج عرضيًا حول المحور الطولي للطريق، أيضًا بترددات متغيرة بدءًا من طول موجة كبير.

٣-٤- أنواع الطرق المستخدمة:

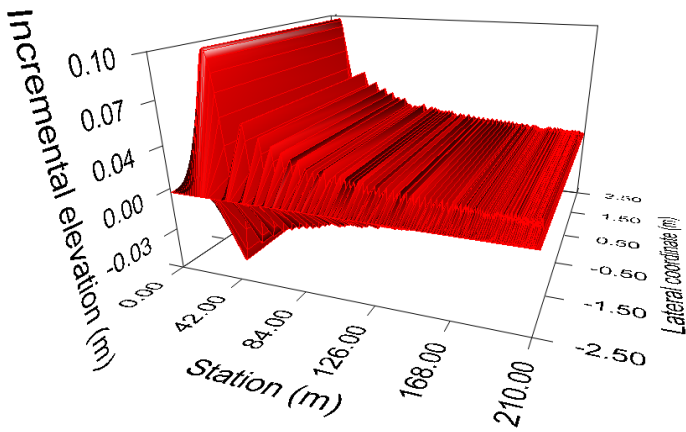
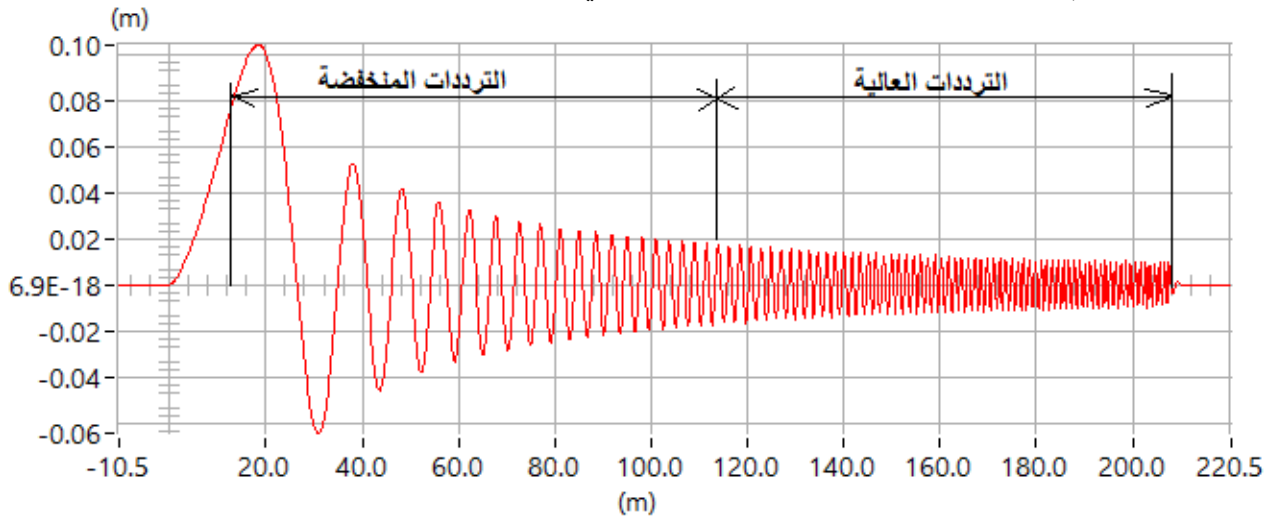
A. طريق ذو مطب صغير (Small Bump) لاختبار الارتداد الشاقولي (Bounce):



الشكل (٤٥): طريق ذو مطب صغير

سنستخدم هذا النوع من الطريق الموجود ضمن برنامج (CarSim) لتمثيل تجربة الارتداد (Bounce)، ارتفاع المطب في الطريق كما هو موضح في الصور العليا (5cm) وبطول (1.5m) للمطب وعلى عرض الطريق (8m) وسيستخدم في أغلب التجارب، وسيستخدم أيضًا مطب آخر بارتفاع (12cm) في تجارب معينة لاحقة عند اختبار أداء نظام التعليق عند اختلاف السرعة للمركبة [16].

B. طريق متموج طولياً بسعات مختلفة لاختبار الارتداد الشاقولي وتأرجح السيارة إلى الأمام وإلى الخلف (التأرجح حول المحور الجانبي) (Pitch and Bounce):

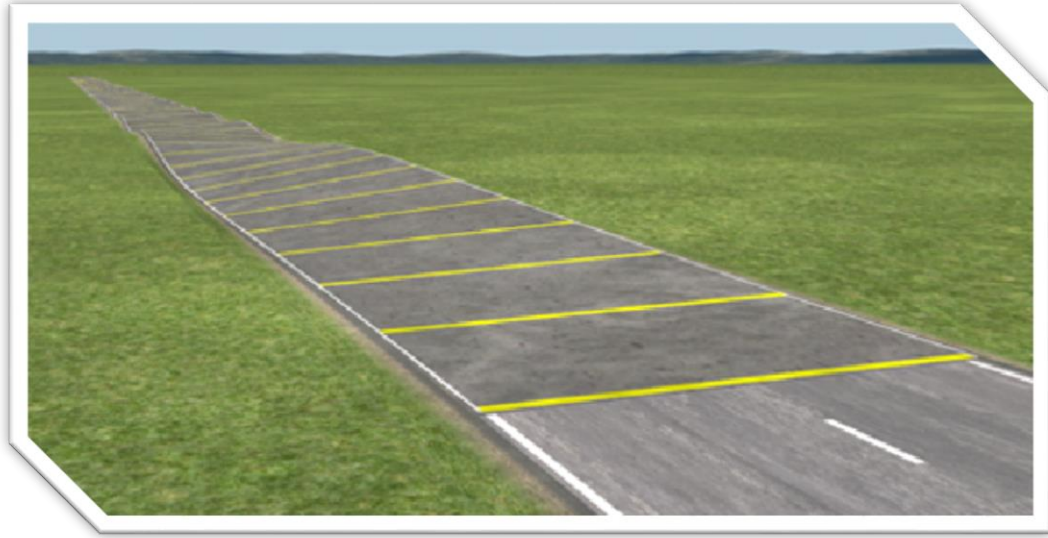
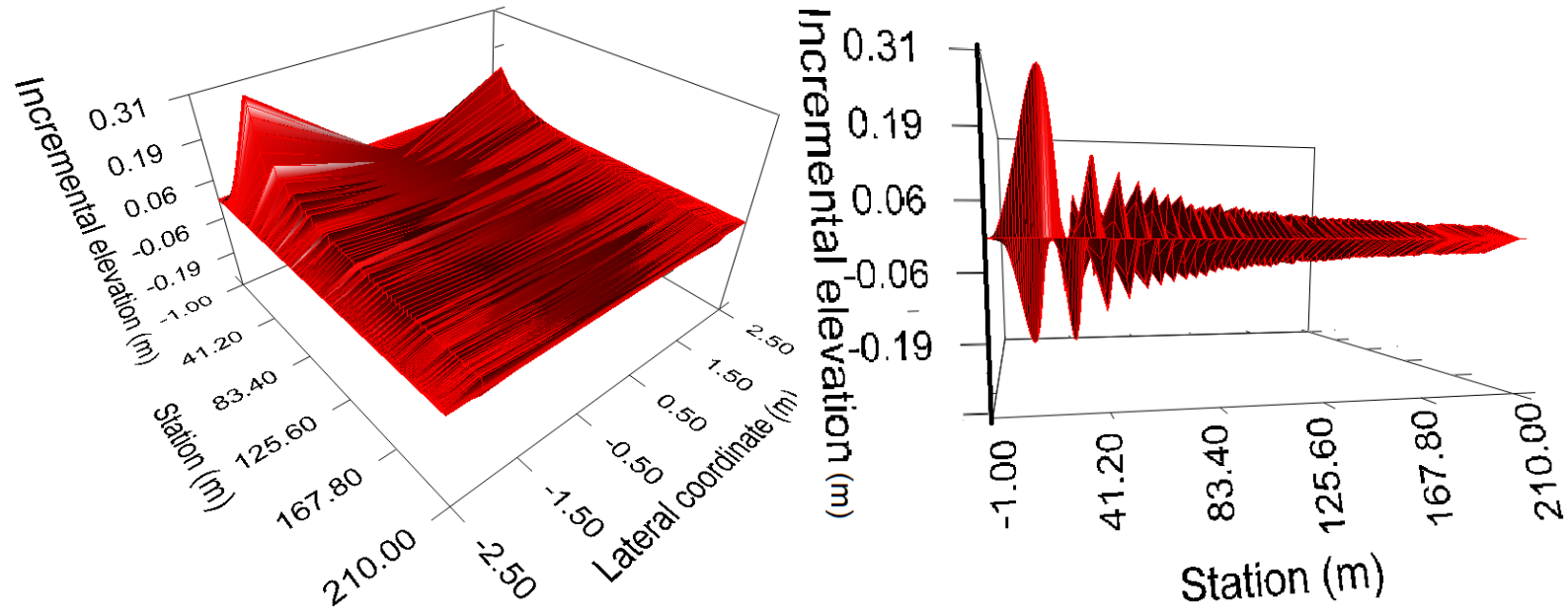


الشكل (٤٦): طريق متموج طولياً بسعات مختلفة

يمكن استخدام هذا النوع من الطريق لدراسة الارتداد الشاقولي والتأرجح حول المحور الجانبي، يتشكل هذا الطريق من مجموعة مطبات وحفر متتالية غير ثابتة القيم في الارتفاع والانخفاض ومتناقصة تعطي شكلاً جيبيًا متناقصًا للطريق، عرض الطريق (5m) وطوله (210m)، يبدأ الطريق بارتفاع مطب يصل إلى (10cm) وبطول (25m) تقريبًا وتليه حفرة بانخفاض (6cm) وبطول (8m) تقريبًا وهذا يعطي تموجات عالية وطويلة سنعتبرها ترددات منخفضة لتسهيل الوصف، تصل هذه الترددات ما يقارب (2.4 Hz) وسطيًا في النصف الأول من الطريق، ومع التقدم في المسار يقل ارتفاع التموجات فيصل ارتفاعها وانخفاضها لحدود (1-2cm) ويقصر طولها جدًا يصعب تحديد أبعادها من الشكل البياني، أي يزداد ترددها إلى أن تصل إلى حدود (5.2Hz) تقريبًا في النصف الثاني من الطريق وسنعتبرها الترددات العالية، لذلك من المحتمل أن تكون الترددات والتسارعات الشاقولية للسيارة في أثناء المسير عالية نظرًا لمواصفات الطريق، ولكننا سنستخدم أسلوب المقارنة عند إجراء التعديلات على مواصفات السيارة لدراسة مؤشرات الراحة[١٦].

ملاحظة: يجب التنويه أنه سيتم دمج الاختبار السابق مع هذا الاختبار في طريق واحد لبعض التجارب لخفض عدد المخططات البيانية، وذلك بوضع المطب في بداية هذا الطريق.

C. طريق متموج عرضياً حول المحور الطولي للطريق وبسعات مختلفة لاختبار تأرجح السيارة حول المحور الطولي (Roll):



الشكل (٤٧): طريق متموج عرضياً وبسعات مختلفة

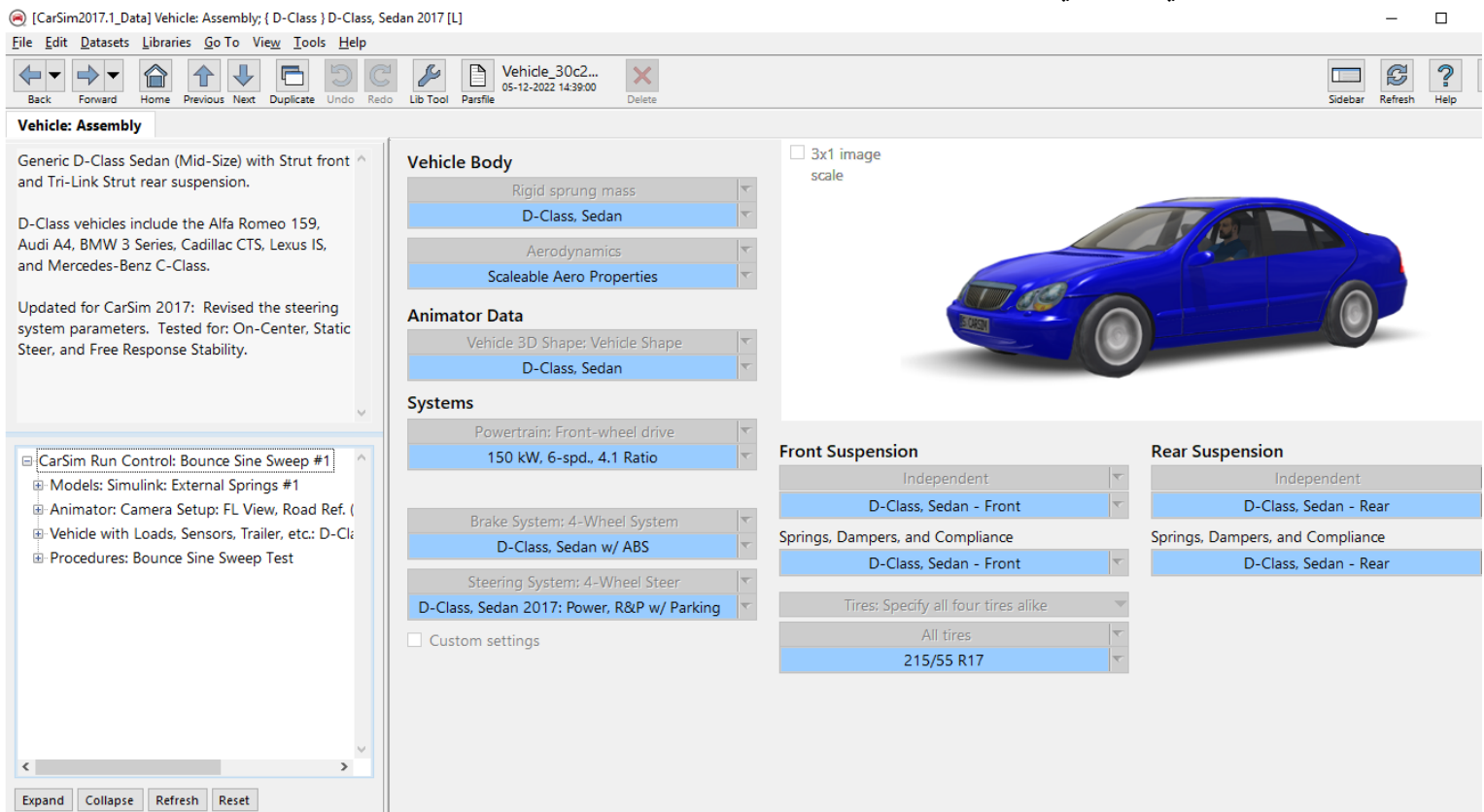
يتميز هذا الطريق عن سابقه بأنه يحتوي على تموجات حول عرضية حول المحور الطولي للطريق، يستخدم هذا الطريق لدراسة تأرجح السيارة حول المحور الطولي (Roll)، وأيضاً هذا الطريق يبدأ بتموجات عرضية ذات فرق ارتفاع عالٍ في جوانبه حيث يصل علو أول ارتفاع إلى (30cm) وأول انخفاض يهبط إلى (20cm) على الجهة المقابلة وبطول موجات كبير يصل إلى (30m) تقريباً، أي يكون بترددات منخفضة، ومع التقدم في المسار يقل فرق الارتفاع فيصل إلى حدود (5cm) في جوانبه باتجاه الأعلى وباتجاه الأسفل أيضاً، ويقل طول التموجات أي يصبح بترددات عالية.

٥-٣- النمذجة والمحاكاة:

نجري المحاكاة للسيارة باستخدام برنامج (CarSim) الذي بدوره يعطينا بعض البيانات اللازمة لحساب مؤشرات الراحة في برنامج (Matlab/Simulink):

- المرحلة الأولى: تحديد نوع السيارة والاختبار المطلوب.

ويكون ذلك في البرنامج (CarSim)، إذ يحدد في هذه النافذة نوع الاختبار الذي سيجري على السيارة ومن ثم السماح بالدخول إلى نوافذ متعددة لاختيار نوع السيارة والمحرك وعلبة السرعة ونوافذ تحدد نوع أنظمة التعليق في الأمام والخلف وتحديد مؤشراتهما كما هو موضح في التبويبات الزرقاء، ويمكننا رؤية شكل السيارة من صورة لها.

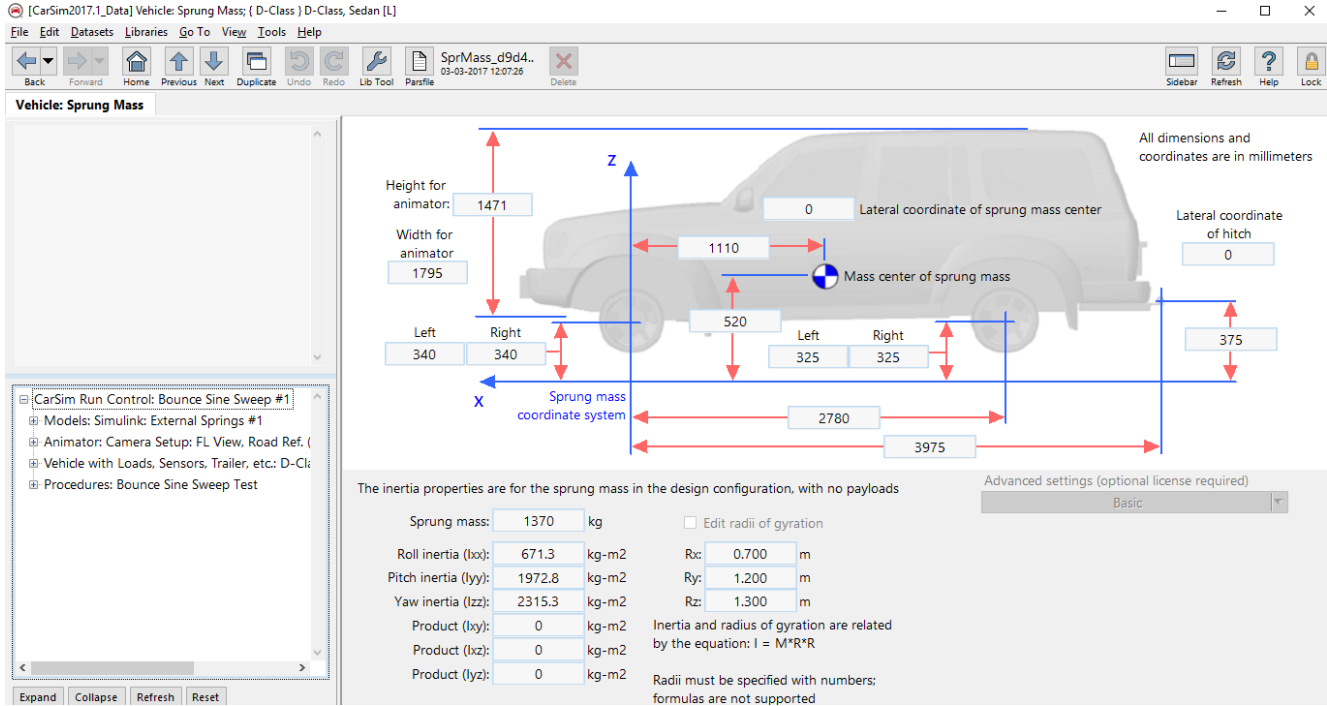


الشكل (٤٨): تحديد نوع السيارة والاختبار المطلوب

ويتبين لنا من الوصف في المربع يسار أعلى الصورة للبرنامج أن نوع السيارة (D-Class Sedan) هي من الصنف متوسط الحجم وهي فئة تضم سيارات مثل (Alfa Romeo 159) و (Audi A4) و (BMW 3 Series) و (Cadillac CTS) و (Lexus IS) و (Mercedes-Benz C-Class).

• المرحلة الثانية: تحديد أبعاد جسم السيارة ومواصفاتها.

إذ يحدد في هذه المرحلة وزن الكتلة العلوية، وعزوم العطالة حول المحاور الثلاثة، وتحديد أبعاد جسم السيارة.

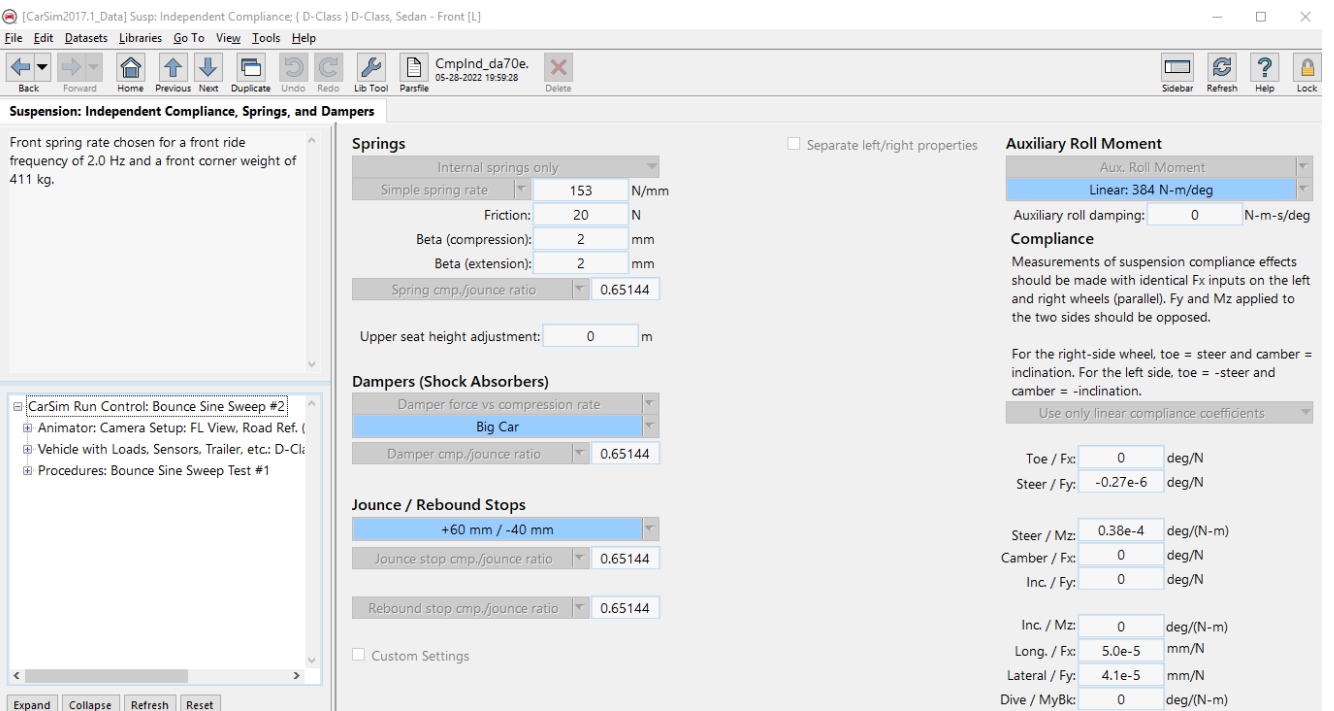
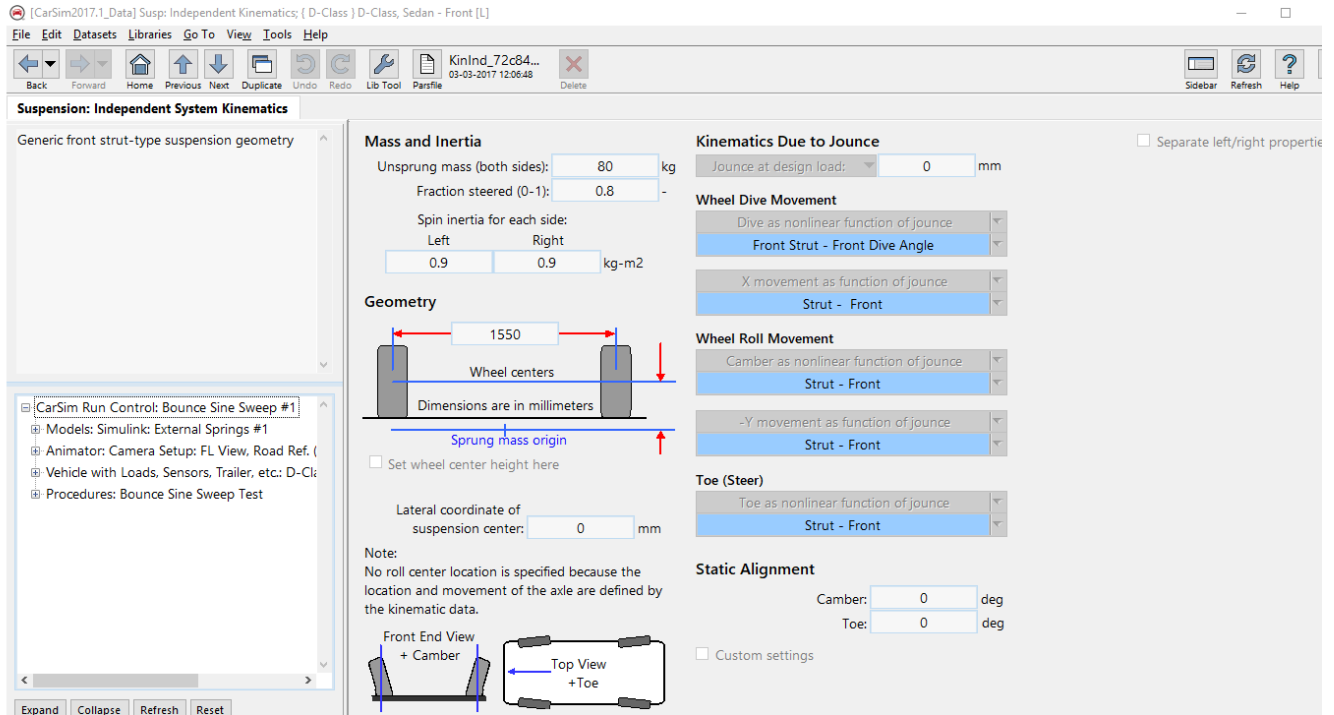


الشكل (٤٩): تحديد أبعاد السيارة

ونلاحظ من الشكل أن الخط العرضي بالنسبة للسيارة والمار من مركز ثقل جسم المركبة يكون في مكان جلوس الركاب في المقاعد الأمامية حيث يجلس السائق والمرافق، وأيضًا يكون ارتفاع مركز الثقل أخفض من الجذع بقليل عند الجلوس على المقاعد الأمامية للركاب.

• المرحلة الثالثة: تحديد نوع نظام التعليق والمؤشرات المتعلقة به.

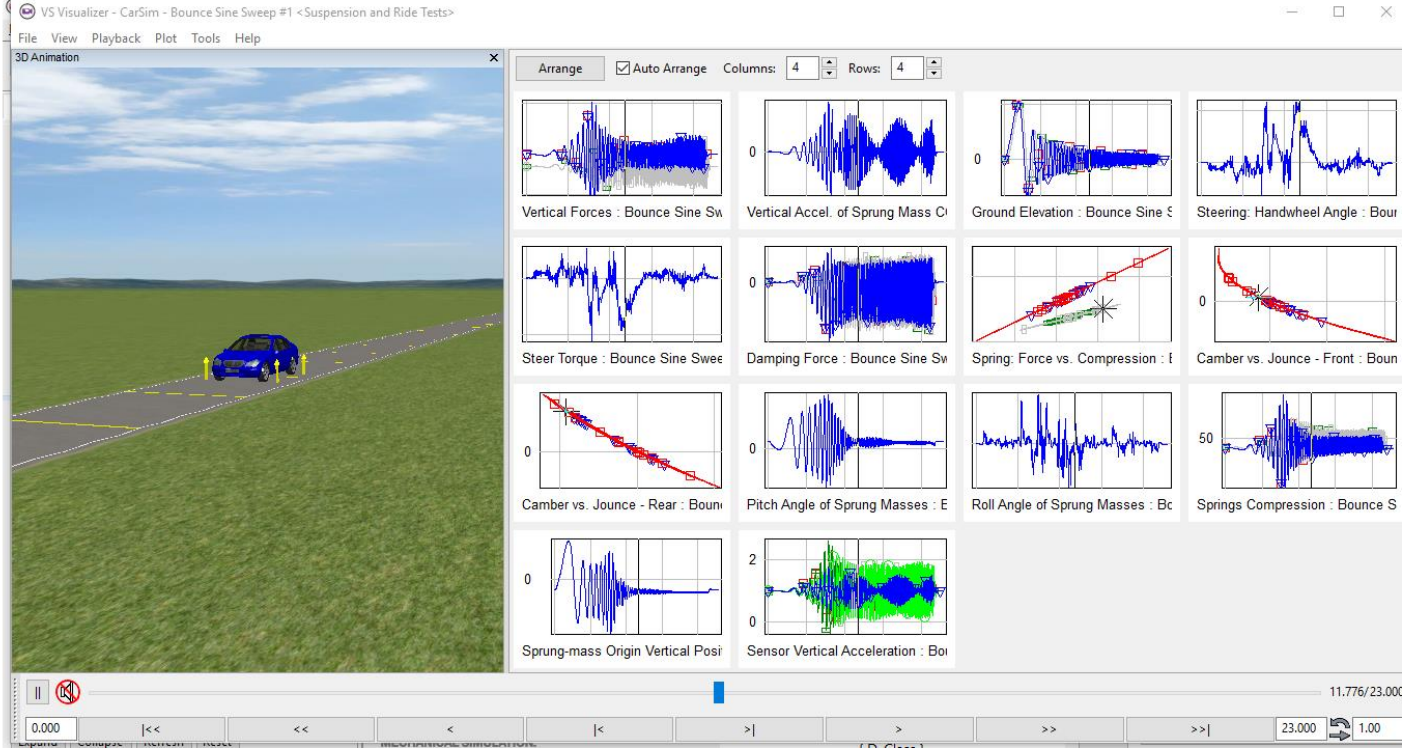
وفي هذه المرحلة يُختار نوع نظام التعليق من حيث التصميم لكل محور، ويحدد وزن الكتلة السفلية ومقدار الاحتكاك وتوزيع الوزن، وأيضًا مقدار زوايا العجلات ومقدار التقصص لنظام التعليق، كما يمكننا تحديد صلابة النابض ومعدل التخميد.



الشكل (٥٠): تحديد نظام التعليق والمؤشرات المتعلقة به

• المرحلة الرابعة: الاختبار والحصول على النتائج.

في هذه المرحلة تُختبر السيارة ويُعرض مقطع متحرك (Animation) يوضح أداء السيارة، كما يوضح أيضًا نتائج الاختبار الحاصل (كالإزاحة الشاقولية للعجلات الأربع وتسارع جسم السيارة ومقدار التآرجح حول المحورين الطولي والجاني والقوى التي تشكلها النوابض والمخمدات ومقدار الزاوية Camber ...)



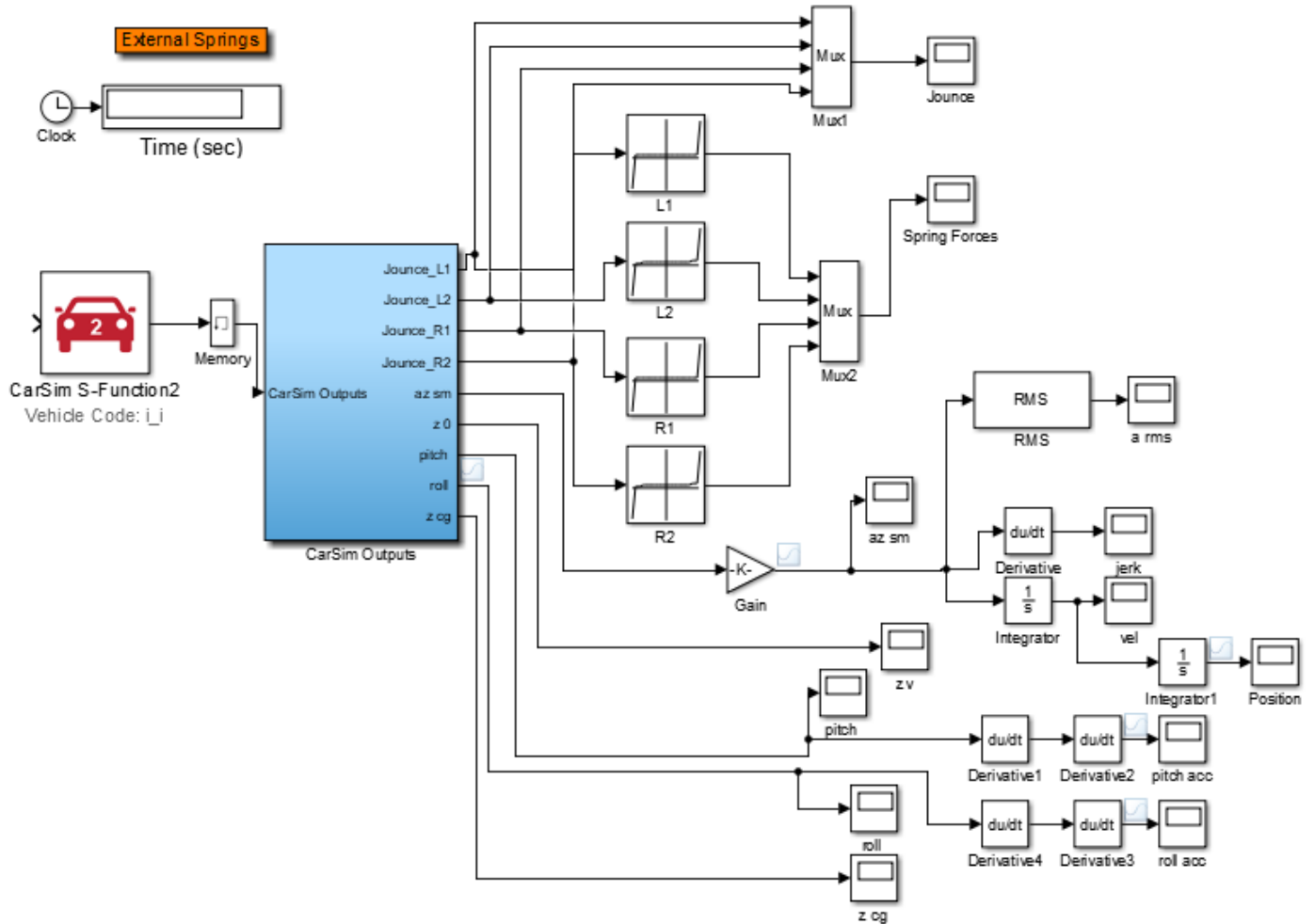
الشكل (٥١): الاختبار والحصول على النتائج

• المرحلة الأخيرة: نقوم بربط البيانات التي حصلنا عليها من برنامج (CarSim) ببيئة (Simulink) الموجودة في برنامج (Matlab) لحساب مؤشرات الراحة:

إن النتائج التي حصلنا عليها من البرنامج (CarSim) غير كافية، لذلك نستخدم هذه البيانات ونربطها ببرنامج (Matlab/Simulink) لحساب مؤشرات الراحة (كالرجفة Jerk وفق RMS والتسارع الشاقولي الوسطي وفق RMS لمركز ثقل جسم السيارة وأيضا السرعة والإزاحة الشاقوليتين لمركز الثقل، والتسارع الزاوي حول المحورين الطولي والجاني للسيارة...) ومن ثم تُعرض النتائج من صناديق عرض النتائج (Scope) لمقارنتها وتحسب الترددات وقيم التسارع الوسطي وقيم الرجفة الوسطية بيانياً.

لقد تم إجراء تعديلات على النموذج المعرف من برنامج (CarSim) والمرتببط بدالة مع برنامج (Matlab/Simulink) لحساب مؤشرات الراحة، كمثال اشتقاق التسارع للحصول على قيم الرجفة ومكاملة التسارع للحصول على السرعة ثم مكاملته مرة ثانية للحصول على الموضع.

ولشرح المخطط: أولاً، هذا المخطط يمثل نظام التعليق التقليدي، ولتفسير الصناديق نبدأ من اليسار إذ يمثل الصندوق المرمز بالسيارة دالة الوصل بين البرنامج CarSim وبرنامج Matlab الذي يعطي البيانات التي حصلنا عليها من البرنامج CarSim ويمكن أن يعطي إشارة راجعة (كالدائرة المغلقة للنظام الفعال ونصف الفعال)، ومن ثم من الصندوق الأزرق يمكننا فرز المعطيات للتحكم بها، ومثال لإحدى هذه البيانات نأخذ التسارع الشاقولي لمركز جسم السيارة المرموز له بالإشارة (az sm) في الصندوق الأزرق وهي الإشارة الخامسة، ونجري عملية تحويل للوحدة $[m/s^2]$ من الصندوق (gain) ومن ثم نأخذ منه أربعة أفرع، الفرع الأول لإظهار النتائج من صندوق العرض، والفرع الثاني لحساب التسارع الشاقولي الوسطي وفق RMS من خلال الصندوق (RMS)، أما الفرعين الباقيين فأحدهما يكون للاشتقاق للحصول على الرجفة (jerk) وإظهار النتائج والفرع الآخر فيكون للتكامل مرة أولى للحصول على السرعة (vel) ومرة ثانية للحصول على الإزاحة (position).



الشكل (٥٢): حساب مؤشرات الراحة

وبذلك نكون قد انتهينا من توضيح آلية إجراء النمذجة والمحاكاة لأداء نظام التعليق، وننتقل بها إلى الخطوة التالية وهي الحصول على النتائج عند مختلف التجارب ومقارنة هذه النتائج فيما بينها، وهذا ما سنبينه في الفصل القادم.

الفصل الرابع

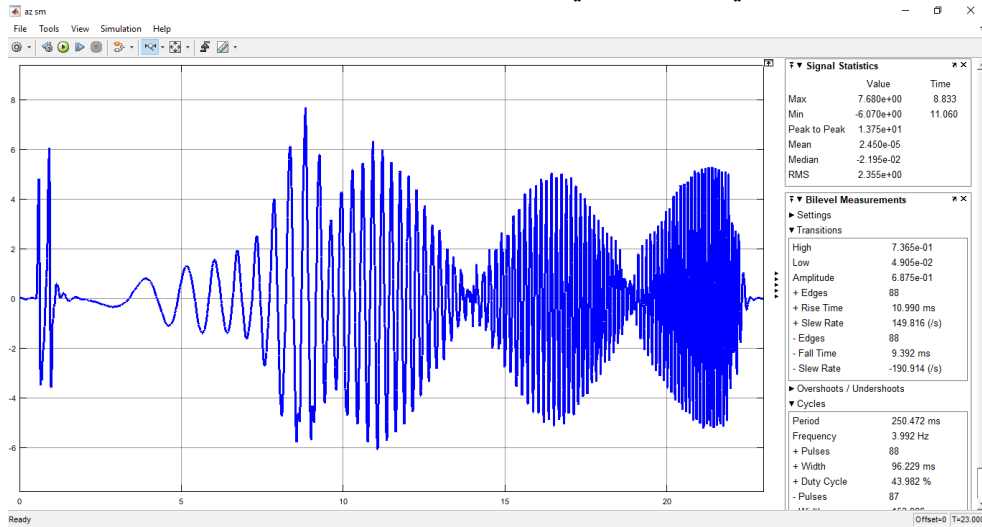
إجراء التجارب الحاسوبية وتحليل النتائج

إجراء التجارب الحاسوبية وتحليل النتائج

في هذا الفصل سنجري تجارب حاسوبية عدة في اختبار أنواع أنظمة التعليق وأيضا التعديل على مؤشرات نظام التعليق ومن ثم نعرض النتائج ونقارن فيما بينها.

ملاحظة:

- لاختبار نظام التعليق في تقديمه للراحة، يكون نطاق السرعة الأمثل عادةً بين السرعات المنخفضة والمتوسطة، وعادةً ما تتراوح بين (١٠ و ٥٠ كم/ساعة)، وعلى مختلف أسطح الطرق، وذلك لأنه يظهر خصائص نظام التعليق "الناعمة"، فعند المسير بسرعات منخفضة تتجلى راحة القيادة بشكل أوضح، لأن نظام التعليق سيتفاعل مع عيوب الطريق الأصغر والأكثر تكرارًا بشكل أفضل، مثل الحفر والمطبات والتشققات، أما عند المسير على السرعات العالية فالراحة لا تكون هي المطلوب بل الثبات والسيطرة على المركبة هو الأولي هنا [36]، لذلك أجريت التجارب جميعها على السرعة (35 Km/h) للسيارة إلا في التجربة الأخيرة، واختيرت هذه السرعة لتكون قيمة وسطية للمجال المذكور للسرعات المنخفضة والمتوسطة لحصر عدد التجارب والمخططات، وأفردت التجربة الأخيرة في إظهار أثر السرعات المختلفة على أداء نظام التعليق.
- ستظهر النتائج قيم كبيرة نسبياً للتسارع والرجفة على الوجه الأخص، وذلك لأن الدراسة لم تعتمد قيم تخميد المقاعد للاهتزازات، ولأن التجارب ستكون على طرق غير سهلة وذلك لإظهار كفاءة نظام التعليق بشكل أكبر، ولأن السرعة المختارة ليست منخفضة وإنما أقرب للتوسط.
- إن قيم السعات العظمى والترددات والرجفة الوسطية والتسارع الوسطي الظاهرة في النتائج محسوبة بيانياً باستخدام برنامج (Matlab) وذلك بالاستفادة من الخصائص الحسابية للوظيفة (Scope) الموجودة ضمن بيئة (Simulink)، والتي تظهر النتائج كمخطط بياني وتمكننا من تحليل هذه النتائج، إعطاء القيم الوسطية وفق (RMS) وأيضا تعطينا قيمة التردد ضمن مجل زمني معين وتعطي أيضا القيم الدنيا والعظمى.



الشكل (٥٣): الوظيفة (Scope) المتواجدة في (Matlab/Simulink) وميزاتها في تحليل النتائج

٤-١- التجربة الأولى: مقارنة أنظمة التعليق تبعًا لطريقة التحكم بها.

في هذه التجربة أجريت مقارنة لنظام التعليق التقليدي مع الفعال ونصف الفعال في اختبار المرور فوق المطب الصغير (Small Bump) مع تعديل في وزن الكتلة الفوقية ليصبح $(m=1200 \text{ kg})$.

• نظام التعليق التقليدي (Passive):

الاختبار تناول نظام تعليق من نوع (MacPherson Strut) في الأمام ومن نوع (Tri-Link) في الخلف، وهما النوعان المستخدمان في التجارب جميعها ما لم يذكر خلاف ذلك.



Tri-Link (Rear)

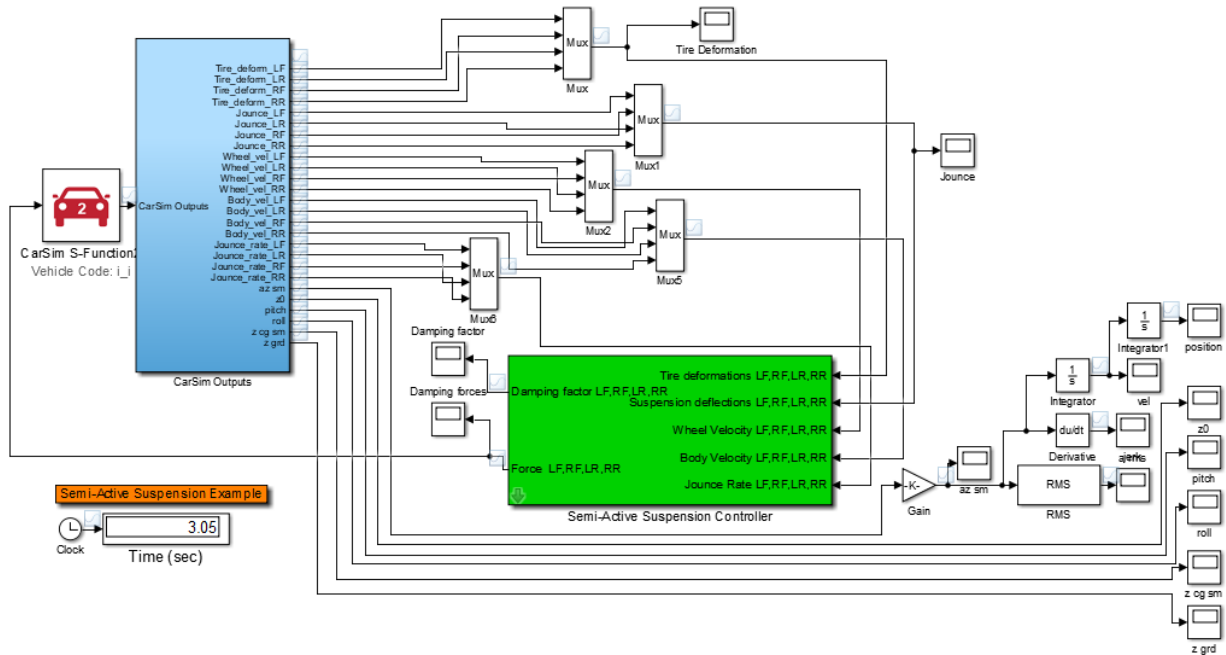


MacPherson Strut (Front)

الشكل (٥٤): نوع النظام التعليق التقليدي المستخدم

• نظام التعليق نصف فعال (Semi-Active):

استخدم النظام الموجود ضمن برنامج (CarSim) والمعرف في (Matlab/Simulink) وفق مخطط التحكم الآتي:



الشكل (٥٥): مخطط المتحكم لنظام التعليق نصف الفعال

وهذا المتحكم يقدم قوة تخميد متغيرة عن طريق دائرة مغلقة، ويكمن الفرق بينه وبين النظام الفعال في عدم إمكانية التحكم بعمله من السائق.

ولوصف المخطط، نبدأ من اليسار إذ يوجد دالة الربط مع البرنامج (CarSim) المرمزة بالسيارة التي تعطي البيانات للصندوق الأزرق بوصفها مدخلات وتأخذ إشارة راجعة لإجراء التحكم للنظام، الصندوق الأزرق يقوم بتوزيع المعطيات القادمة من دالة الربط ليسمح باستخدام هذه البيانات، البيانات منها ما سُرح في فقرة سابقة (مراحل النمذجة) لحساب معايير الراحة، ومنها ما يؤخذ للتحكم الخاص بالنظام نصف الفعال الملون بالأخضر (Semi-Active Suspension Controller) الذي يأخذ مدخلات كتشوه العجلات الأربع وتقلص نظام التعليق وسرعة العجلات الشاقولية وسرعة جسم السيارة فوق العجلات الشاقولية والإزاحة للعجلات الأربع، ومن ثم يعطي كمخرجات له عامل التخميد وقوة التخميد بوصفها إشارة راجعة لدالة الربط.

ملاحظة:

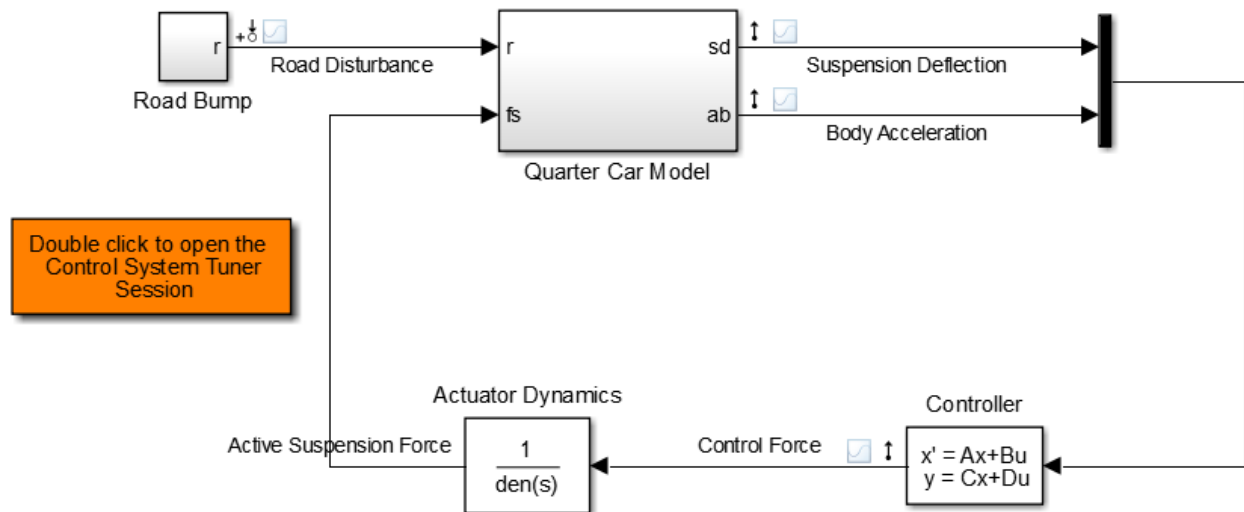
❖ إن المخطط بأكمله معرف بين البرنامجين (CarSim) و (Matlab/Simulink)، وقد تم إجراء إضافات لحساب معايير الراحة فقط، كحساب التسارع والرجفة الوسطيين وقيم الاهتزاز....إلخ.

❖ إن المدخلات للتحكم هي قيم محسوبة في برنامج (CarSim) عند إجراء التجارب وأعطيت كنتائج لبرنامج (Matlab).

• نظام التعليق الفعال (Active):

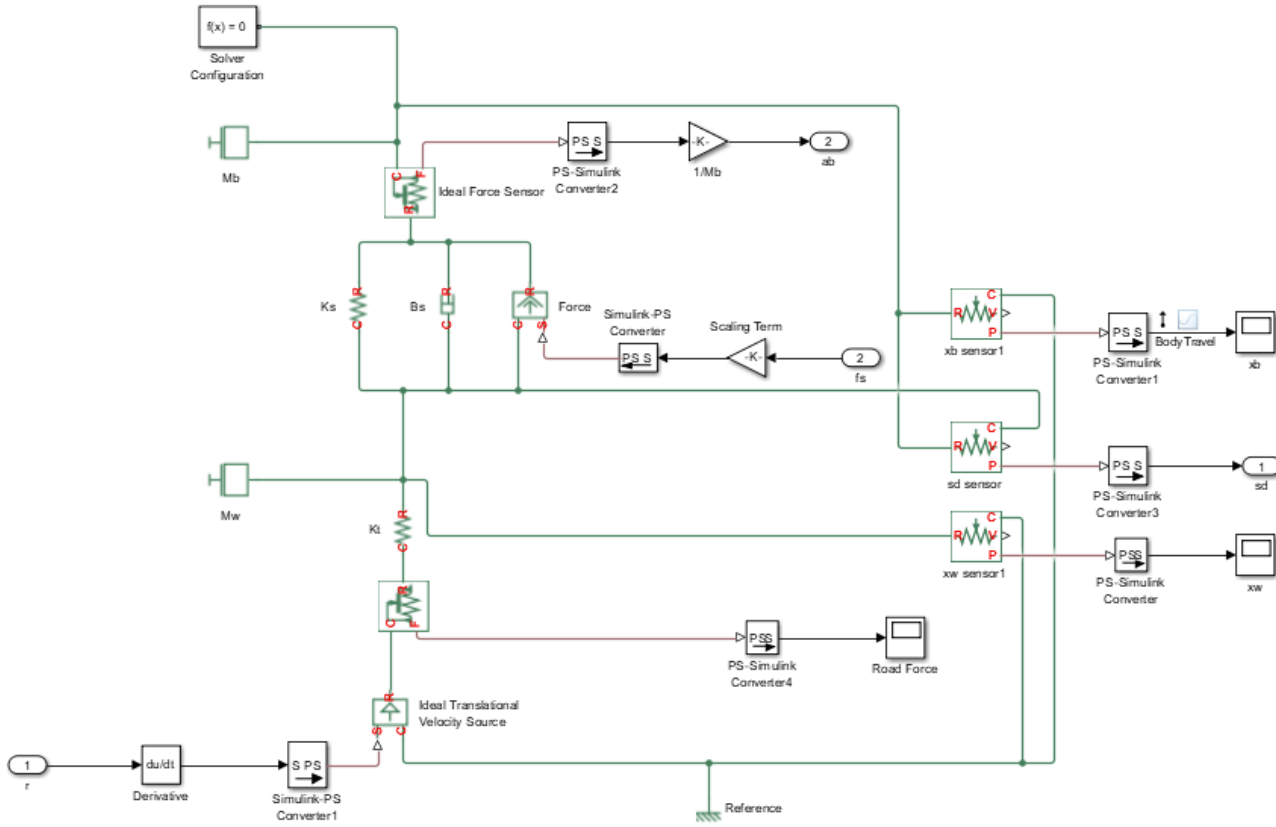
في النظام الفعال استخدم المتحكم الموجود في (Matlab) المستخدم لنموذج ربع السيارة وأجرينا عليه التجربة بعد تحويله لنموذج كامل السيارة وفق المعادلات المستخدمة في توصيف نظام التعليق المستقل الفعال (صفحة ٦٨).

Active Suspension Control on Quarter Car Model



الشكل (٥٦): المتحكم لنظام التعليق الفعال في ربع السيارة

ولشرح هذا المخطط لدينا إشارة الطريق (Road Bump) التي تدخل لصندوق نموذج ربع السيارة (Quarter car Model) الذي يحوي بداخله مخطط تصميم بنية النموذج (ويحوي كتلة علوية وكتلة سفلية وعجلة ونابض ومخمّد ذو قوة تخميد متغيرة...) ويعطي الصندوق إشارتين هما تقلص نظام التعليق وتسارع الكتلة العلوية فوق العجلة كمدخلات للمتحكم (Contoller) الذي يحدد القوة اللازمة للتخميد ويعطيها دخلاً لصندوق بنية نظام التعليق، إن المتحكم هو من نوع فضاء الحالة (State Space Model).

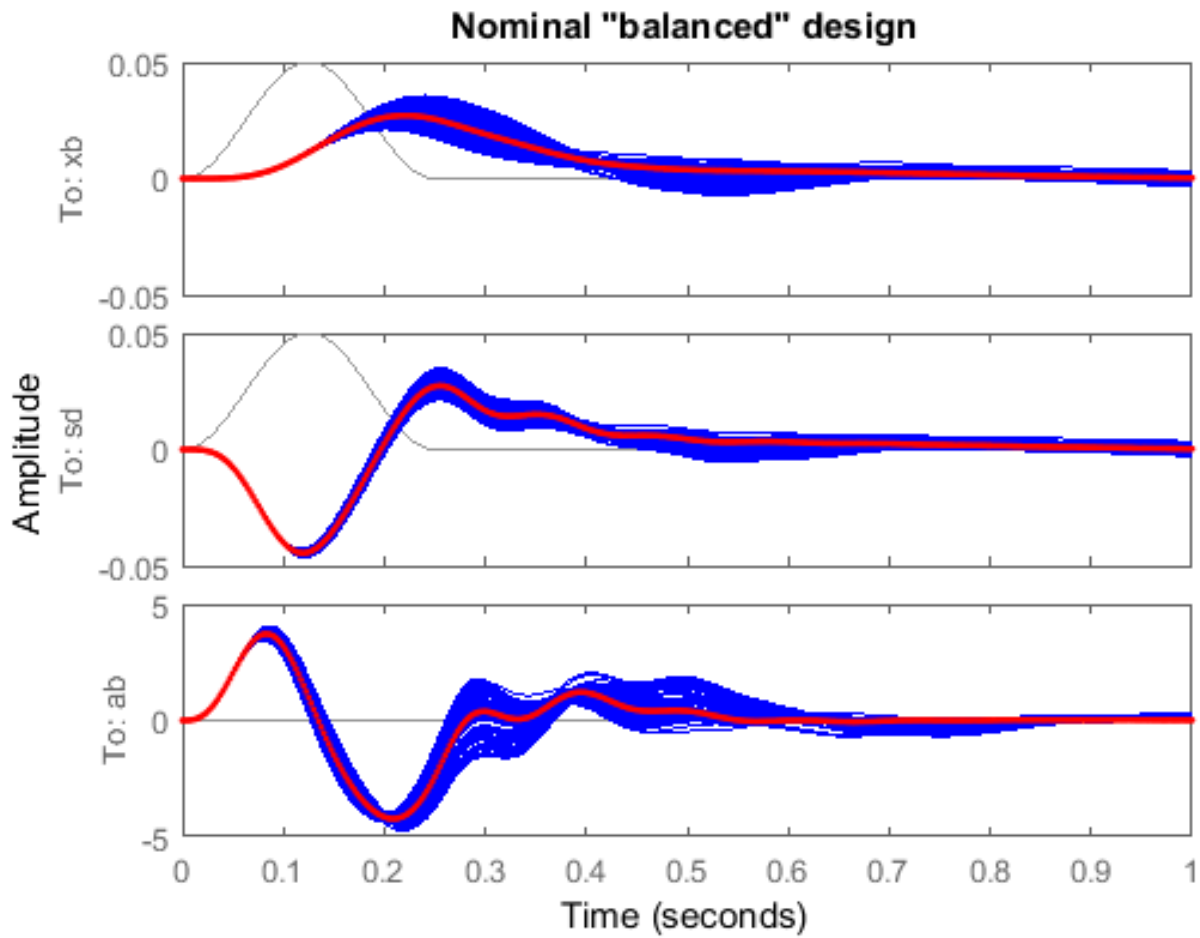


الشكل (٥٧): نموذج ربع السيارة في مخطط نظام التعليق الفعال الموجود في (Matlab)

وبين الشكل أعلاه نموذج ربع السيارة المستخدم في مخطط نظام التعليق الفعال الموجود في (Matlab).

استفيد من هذا المخطط (الشكل ٥٦) لإجراء تجربة الارتداد الشاقولي (الاهتزاز إلى أعلى وأسفل) لعدم توفر تصميم نظام تعليق فعال في البرنامج CarSim، وأجريت عليه التجربة عن طريق المعادلات النازمة لنموذج كامل السيارة التي سبق التكلم عنها في فقرة (نموذج كامل السيارة)، وتم ذلك بأخذ قيم التسارع الشاقولي لعجلات المحور الأمامي على حدا ومواءمتها مع شكل المعادلة النازمة لنموذج كامل السيارة (وهي نفسها قيم التسارع لعجلة واحدة لكن مضاعفة إلى اثنان لوجود العجلة اليمنى واليسرى، لكونها على استقامة واحدة وتلتقي بالمطب في نفس اللحظة)، ومن ثم حساب مدى تأثيرها على مركز ثقل المركبة وفق بعدها عنه وبعدها عن المحاور الخلفية كونها تشكل مركز دوران لها (وبالتالي نسبة وتناسب للأبعاد)، وبعدها تم إجراء نفس الخطوات للعجلات الخلفية في أخذ قيم التسارع وأيضا حساب مدى تأثيرها على مركز ثقل المركبة وفق بعدها عنه وبعدها عن المحاور الأمامية (أيضا نسبة وتناسب)، وأخيرا أضيفت القوة الناتجة عن وزن المركبة للعلاقة.

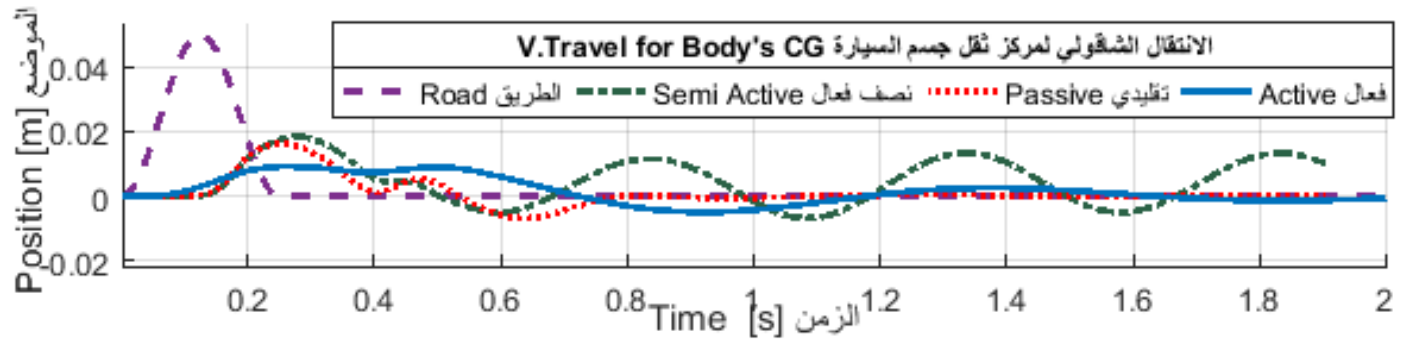
لا نستطيع من هذا المخطط حساب قيم التآرجح الزاوي حول المحور العرضي لذلك اكتفي بحساب قيم التسارع الشاقولي فقط عند الارتداد ومنه قيم الانتقال والسرعة بالتكامل بالنسبة للزمن وقيم الرجة بالاشتقاق بالنسبة للزمن.



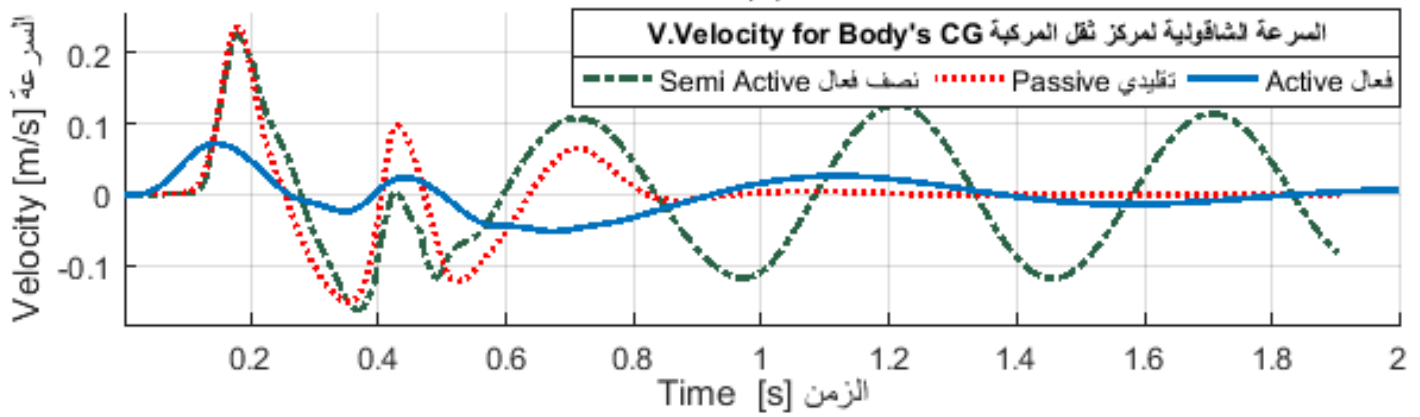
الشكل (٥٨): نتائج التجربة لنظام التعليق الفعال المستخدم في ربح سيارة

يبين الشكل (٥٨) نتائج تجربة نظام التعليق الفعال (Active Suspension) المستخدم في الاختبار والمصمم في برنامج (Matlab) الذي يمر على مطب صغير بارتفاع (5 cm)، هذه القيم خاصة بنموذج ربح السيارة (Quarter Car)، وتبين المجالات المختلفة الممكن الحصول عليها من نظام التعليق وهي القيم الاسمية للحصول على التوازن الأفضل والمناسب (Nominal Balanced)، يبين المخطط العلوي الانتقال الشاقولي لربح السيارة، ويبين المخطط الأوسط مقدار التقلص الحاصل لنظام التعليق في أثناء مروره على المطب، ويبين المخطط الأخير قيم تسارع جسم السيارة.

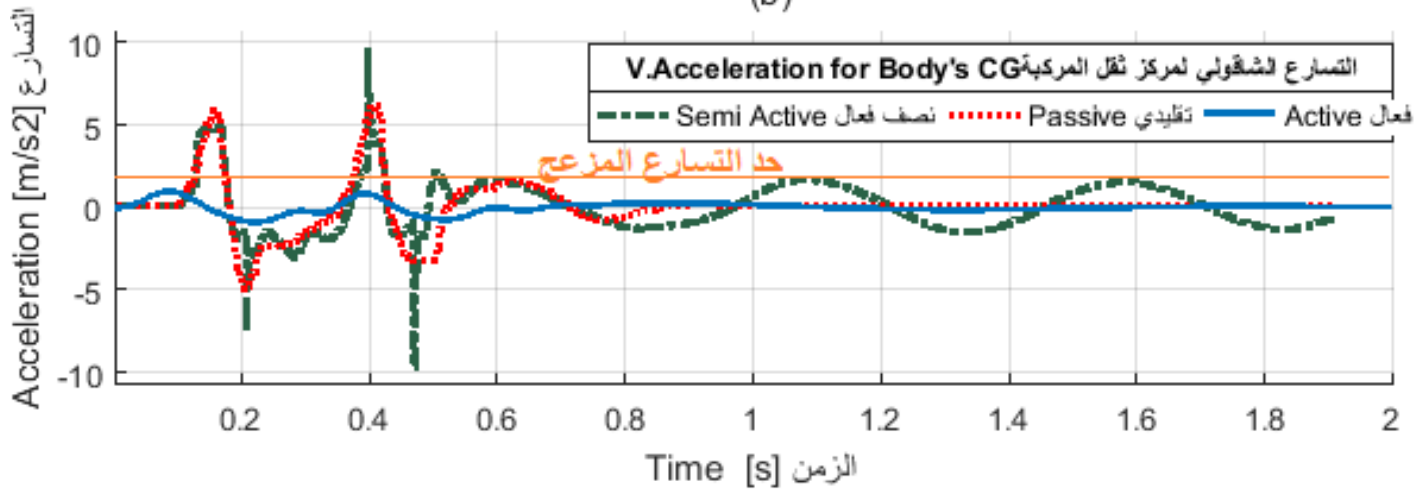
• نتائج التجربة الأولى:



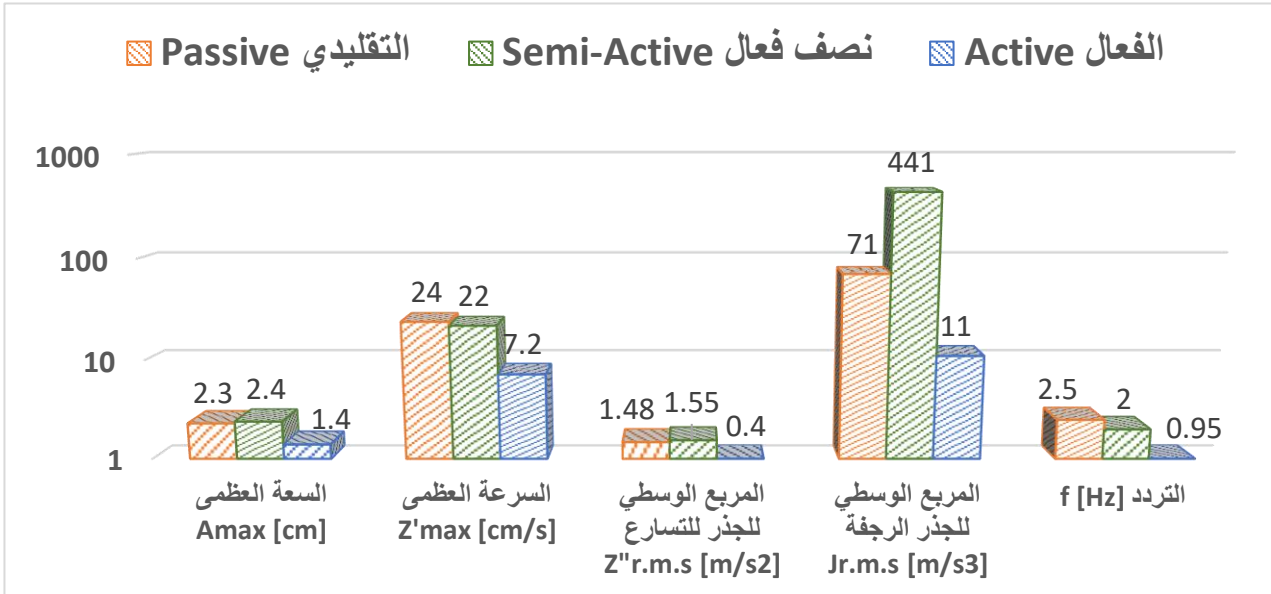
(a)



(b)



(c)



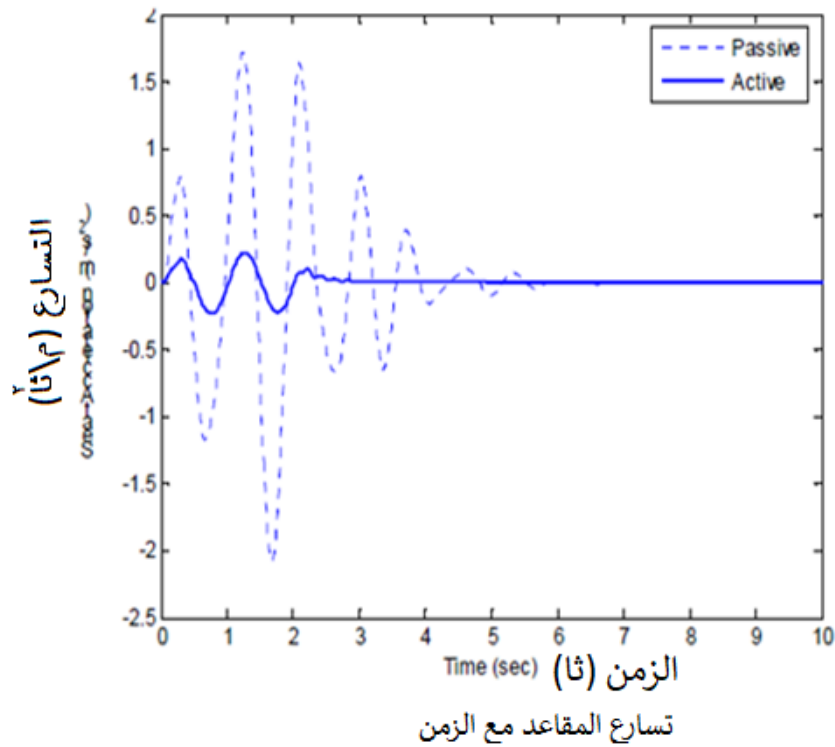
(d)

الشكل (٥٩): مقارنة نتائج اختبار الارتداد للأنظمة الثلاث (التقليدي، النصف فعال، الفعال)

[(a) الموضع الشاقولي - (b) السرعة الشاقولية - (c) التسارع الشاقولي - (d) مقارنة القيم]

- نلاحظ من الشكلين (a), (d) أن نظام التعليق الفعال أفضل من نظيره في امتصاص الصدمة الناتجة عن المطب، إذ بلغت السعة العظمى للاهتزاز مركز ثقل السيارة (1.4 cm) على حين النظامين الباقيين يزيدا في السعة العظمى بمقدار (1 cm) تقريباً عن النظام الفعال، ونلاحظ أيضاً جساءة النظام التقليدي في تخميده السريع للاهتزازات وارتفاع قيم التردد بالمقارنة مع النظامين الباقيين وابتعاده عن التردد المرغوب فيصل حتى تردد (2.5 Hz) ، أما بالنسبة للنظام النصف فعال فتستمر الاهتزازات لمدة طويلة دون تخميد وأيضاً يكون التردد عالٍ فيه، وكان ذلك تفوق في الأداء لنظام التعليق الفعال لأنه يقدم قوة إضافية ملائمة في كل لحظة تجعل المركبة أقرب من معايير الراحة.
- في الشكل (b) بدأ النظام التقليدي بسرعات عالية ثم انخفضت بالتتالي، أما النظام نصف الفعال فاستمرت قيم السرعة إلى مدة طويلة دون انخفاض، أما في النظام الفعال فسرعان ما انخفضت.
- نلاحظ من الشكلين (c), (d) انخفاض قيم التسارع والرجفة في النظام الفعال مقارنةً مع النظامين الباقيين بنسبة تتجاوز (50 %).
- وللتأكد من صحة التجربة، نجد أن القيم الناتجة للتسارع الشاقولي وبمقارنتها مع القيم الظاهرة للتسارع المذكورة في فصل الدراسات المرجعية وفي الدراسة الثالثة، تبين تقارب القيم بين النظام التقليدي والفعال إلى حدٍ كبير علمًا أنه في الدراسة المرجعية أخذت بعين الاعتبار تخميد المقاعد للاهتزازات (المخطط الأيسر من الشكل (٤)).

وهذه هي النتائج المذكورة في الدراسة المرجعية وهي مقارنة بين نظام التعليق الفعال والتقليدي:

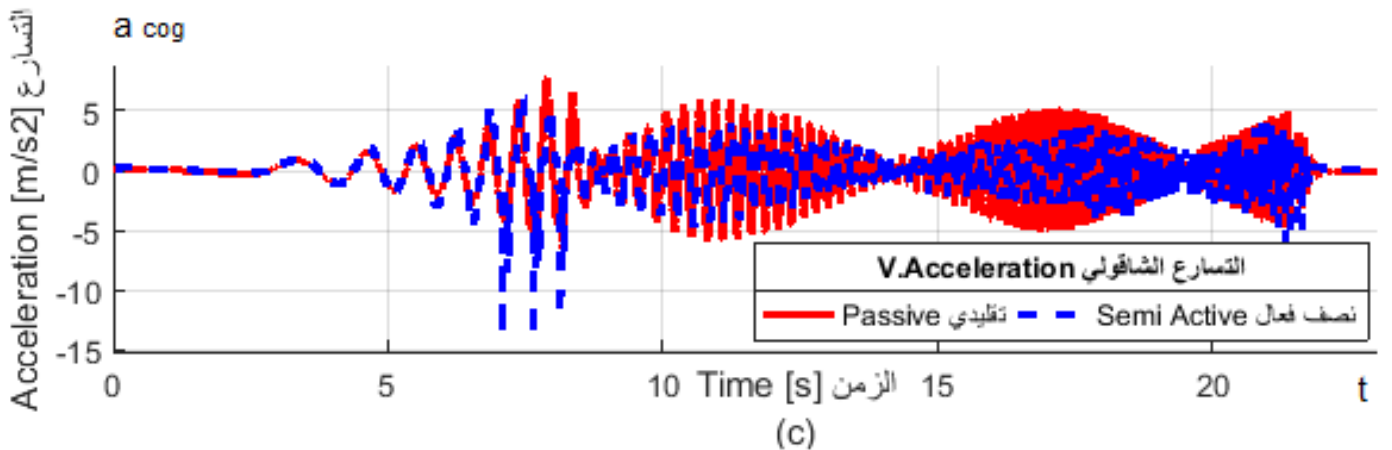
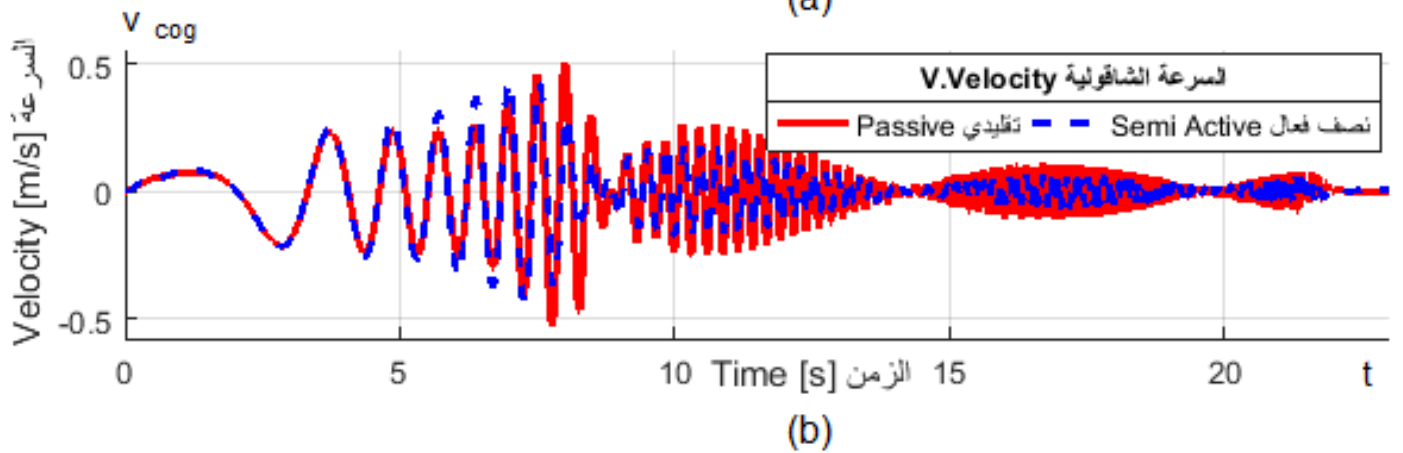
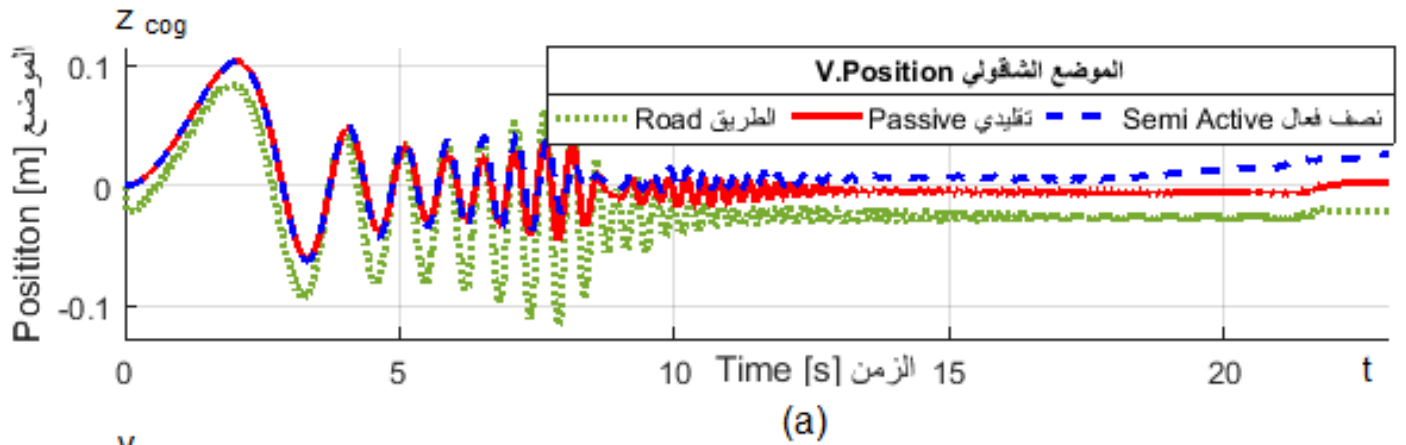


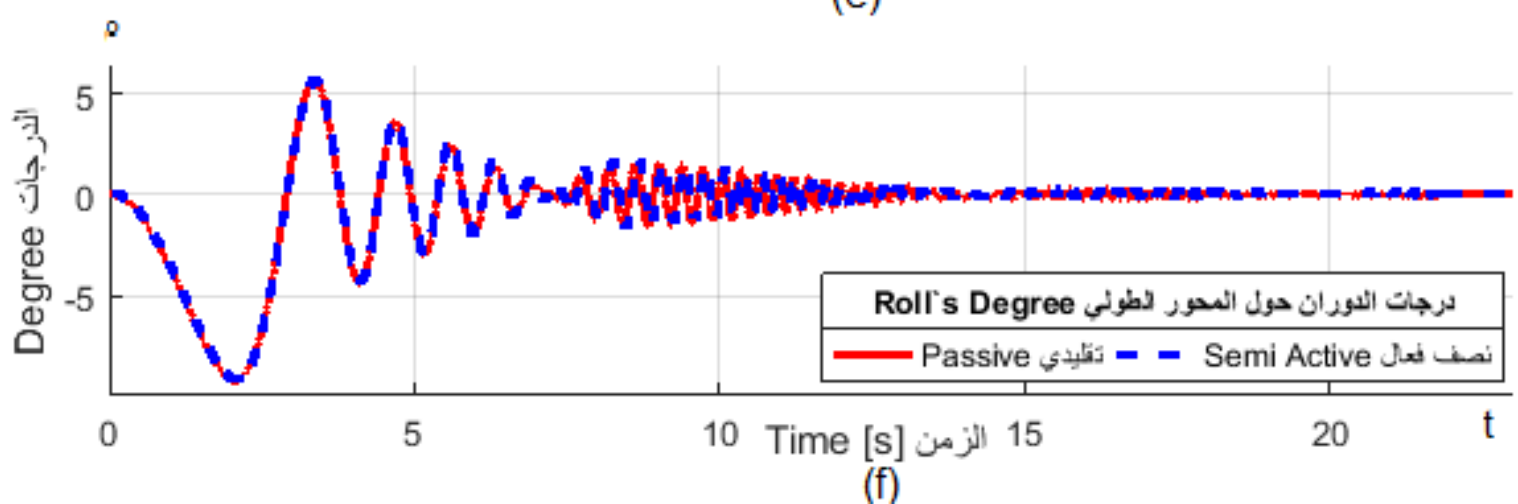
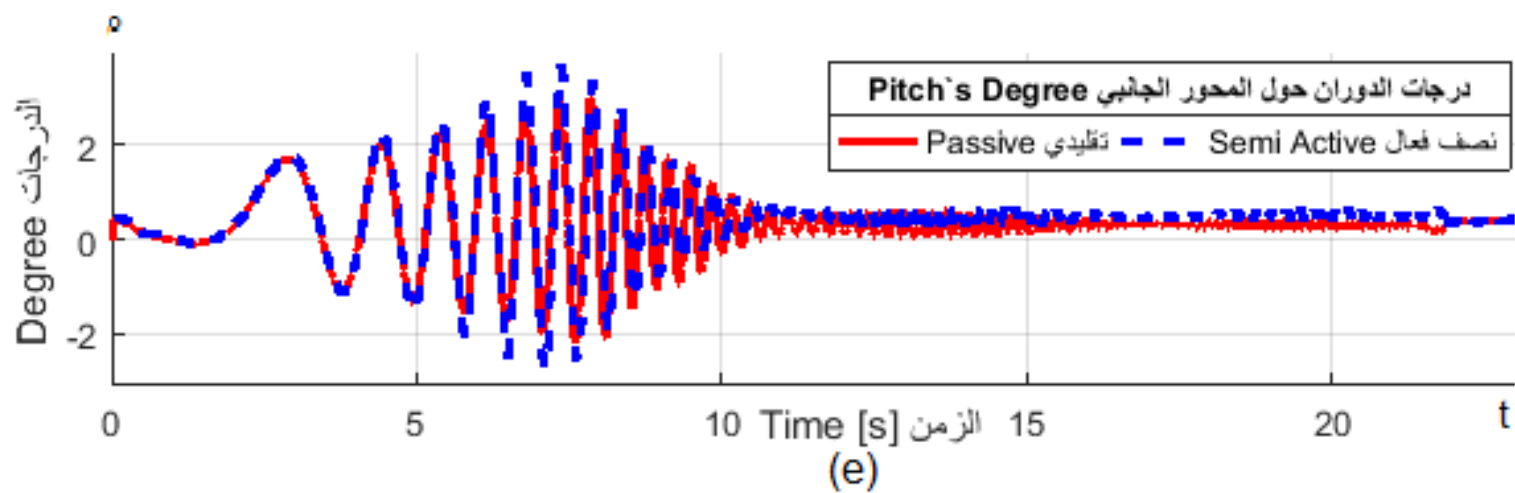
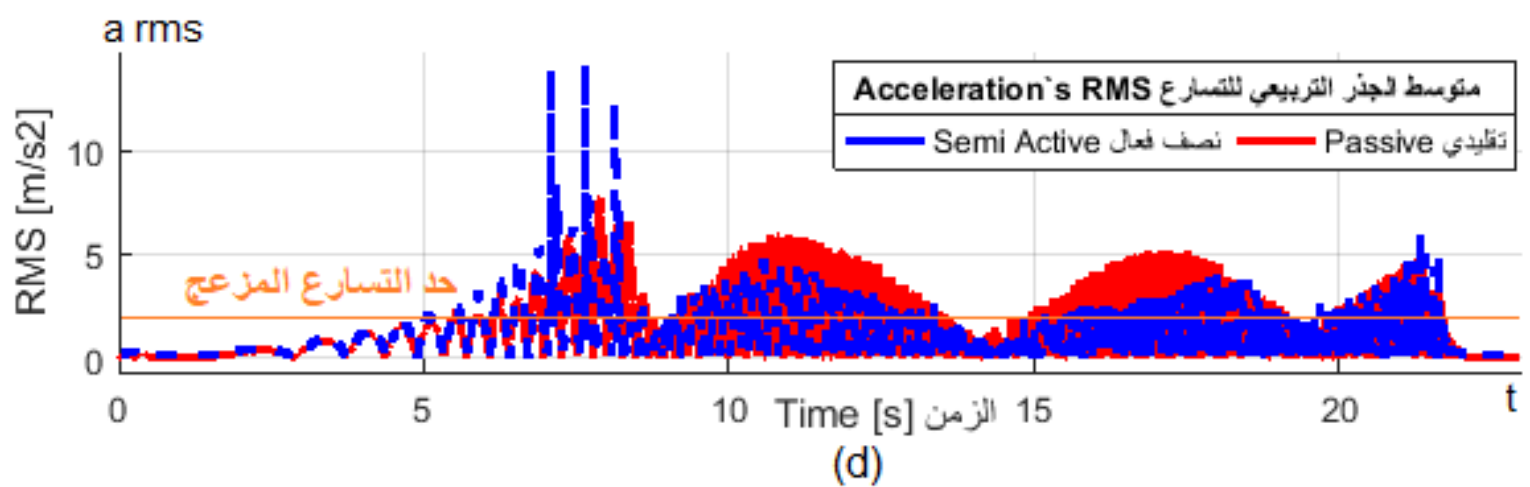
الشكل (٦٠): مقارنة قيم التسارع الشاقولي بين النظامين التقليدي والفعال

يمكننا القول إنه عند إجراء اختبار الأنظمة الثلاث في المرور على المطب كان النظام الفعال هو الأقرب لقيم معايير الراحة المرغوبة، أما النظام التقليدي فلم يحقق القيم المطلوبة وكان في أدائه جساءة، وكان النظام النصف فعال بعيداً أيضاً عن معايير الراحة، قد يعود ذلك إلى بنية المتحكم التي تحتاج إلى تحسين أو عدم موائمة المؤشرات المختارة للسيارة (كصلابة النابض ومعدل التخميد ووزن المركبة) مع هذا النظام، حيث لم يعطي قيم التخميد المناسبة.

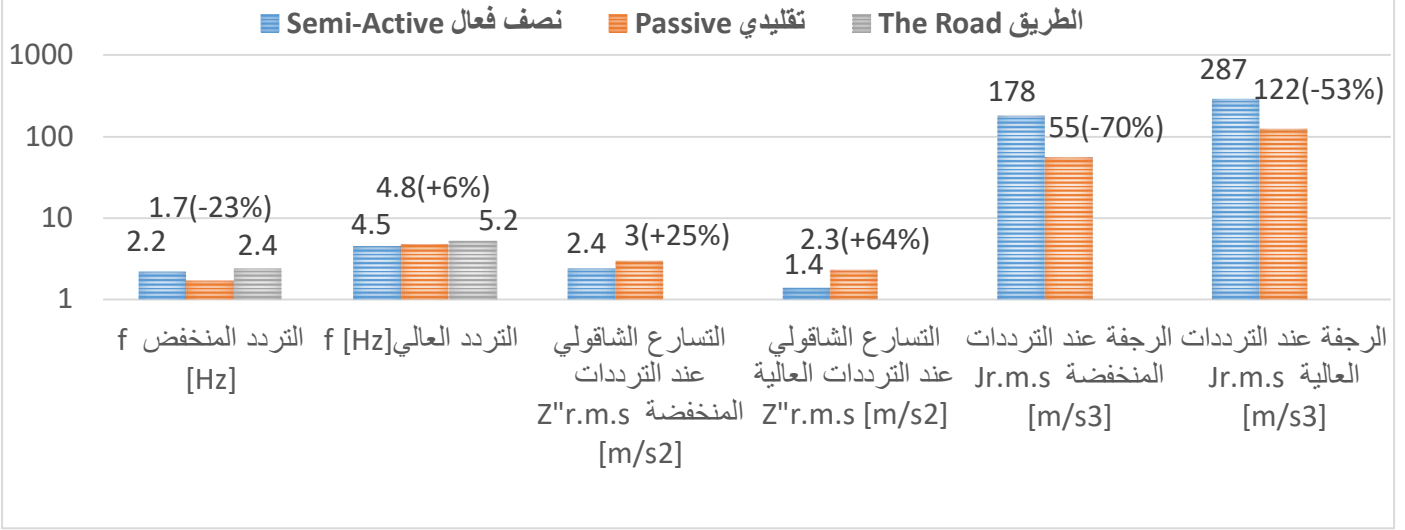
٢-٤- التجربة الثانية: مقارنة بين النظامين التقليدي والنصف فعال في التآرجح (Pitch) والتآرجح (Roll).

قورن نظام التعليق التقليدي مع النصف فعال وفق الاختبار الثاني (Pitch & Bounce) وأيضًا حُسبت درجات الانحراف (Roll) وفق الاختبار الثالث، لم يقارن نظام التعليق الفعال معهم لما ذكرناه سابقًا بأنه لا يوجد نظام تعليق معرف في برنامج (CarSim) والنموذج المستخدم هو نموذج ريع سيارة والموجود في برنامج (Matlab) ومن الممكن استخدامه كنموذج كامل السيارة لحساب التسارع الشاقولي عند المسير على مطب ولكن من الصعب استخدامه لاختبار باقي الطرق.





نوع نظام التعليق



(g) مقارنة القيم الناتجة

الشكل (٦١): مقارنة بين النظامين التقليدي والنصف فعال في التآرجح (Pitch) والتآرجح (Roll)

[(a) الموضع الشاقولي - (b) السرعة الشاقولية - (c) التسارع الشاقولي - (d) التسارع الشاقولي وفق (RMS) - (e) التآرجح (Pitch) - (f) التآرجح (Roll) - (g) مقارنة القيم الناتجة]

- القيم الظاهرة محسوبة بيانيًا وفق برنامج (Matlab).
 - نلاحظ من الشكلين (a), (g) ارتفاع قيم الانتقال الشاقولي لمركز ثقل السيارة في النظام نصف الفعال عند الترددات المنخفضة للطريق (أي عند طول الموجات الكبير) مقارنةً مع النظام التقليدي، وأيضًا ارتفاع تردد الاهتزازات (2.2 Hz) ولحوقها تقريبًا بقيم تردد الطريق (2.4 Hz)، أما عند التردد العالي للطريق فتتخفف قيم الانتقال الشاقولي وتردد الاهتزازات وتكون لدى النظام التقليدي مرتفعة.
 - وبالمثل نجد من مخططات السرعة والتسارع، الأشكال (b), (c), (d)، أن النظام نصف الفعال يكون ذا قيم عالية عند الترددات المنخفضة للطريق، أما عند الترددات العالية فتكون قيم السرعة والتسارع منخفضة بمقارنتها مع النظام التقليدي، وهذا نجده بالمثل في قيم التآرجح حول المحور الجانبي (Pitch) في الشكل (e).
 - ومن الشكل (f) نلاحظ تقارب النظامين وفق الانحراف (Roll).
 - ومن الشكل (g) نلاحظ ارتفاع قيم الرجفة في النظام نصف الفعال علمًا أن قيم التسارع أخفض بالمقارنة مع التقليدي، ويعود ذلك إلى التغير السريع في قيم التسارع.
- نستنتج من الأشكال أفضلية نظام التعليق نصف الفعال عند أطوال الموجات القصيرة (الترددات العالية) وانخفاض قيم التسارع الشاقولي فيها وتخميده للاهتزازات، على حين يتميز نظام التعليق التقليدي عند أطوال الموجات الكبيرة باستقراره وثباته وعدم تأرجحه لأنه يقدم قوى تخميد عالية، وبالجمع بين نتيجة التجربة السابقة مع هذه التجربة نخرج بأن النظام التقليدي أفضل

من حيث استقراره ولأن النصف فعال لا يقدم قوى تخميد مناسبة، وكما ذكرنا قد يعود السبب في ذلك قيم المؤشرات المحددة للسيارة غير المناسبة له.

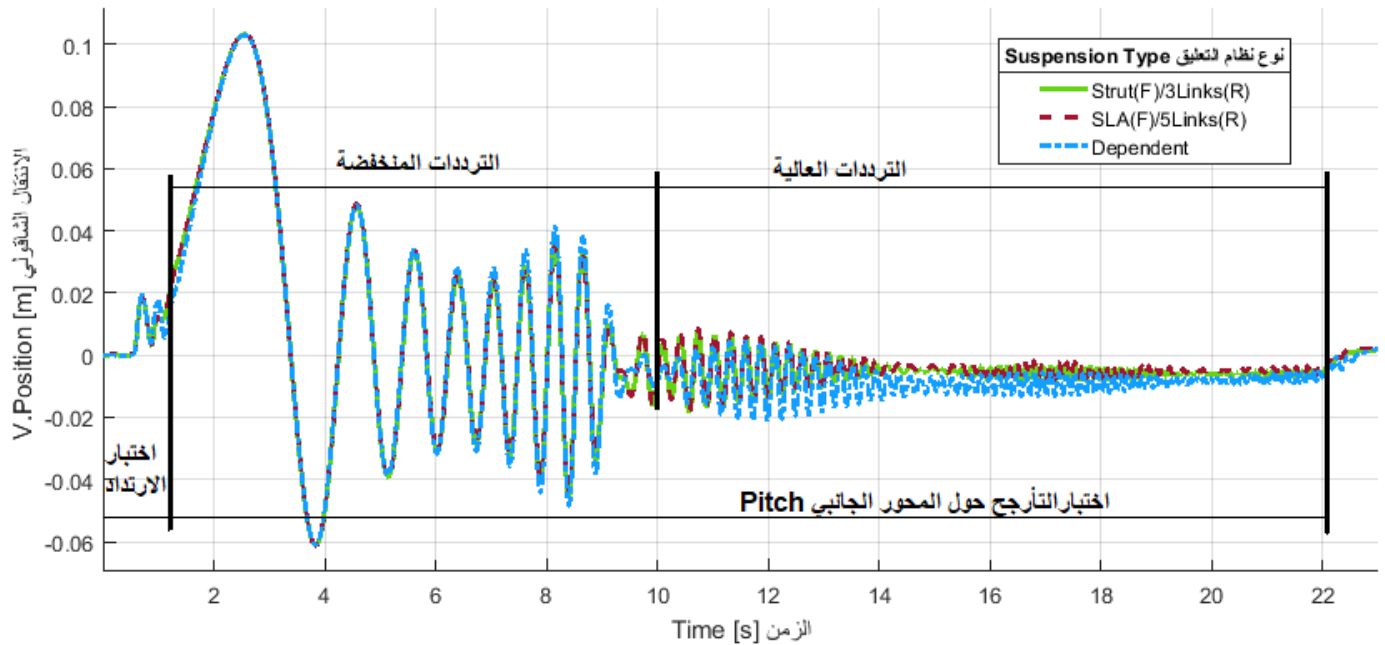
٤-٣- التجربة الثالثة: مقارنة بين أنظمة التعليق وفقًا لنوع التصميم.

تضمنت هذه التجربة مقارنة بين بعض أنواع أنظمة التعليق من حيث التصميم وفق الاختبار الأول (Small Bump 5cm) والاختبار الثاني (Pitch & Bounce) والاختبار الثالث (Roll) وعند سرعة (35 km/h) كما كررنا آنفًا في بداية الفصل، وذلك بحساب الانتقال الشاقولي والتسارع الشاقولي والرجفة لمركز ثقل السيارة وأيضًا بحساب التسارع الزاوي حول المحورين الجانبي والطولي.

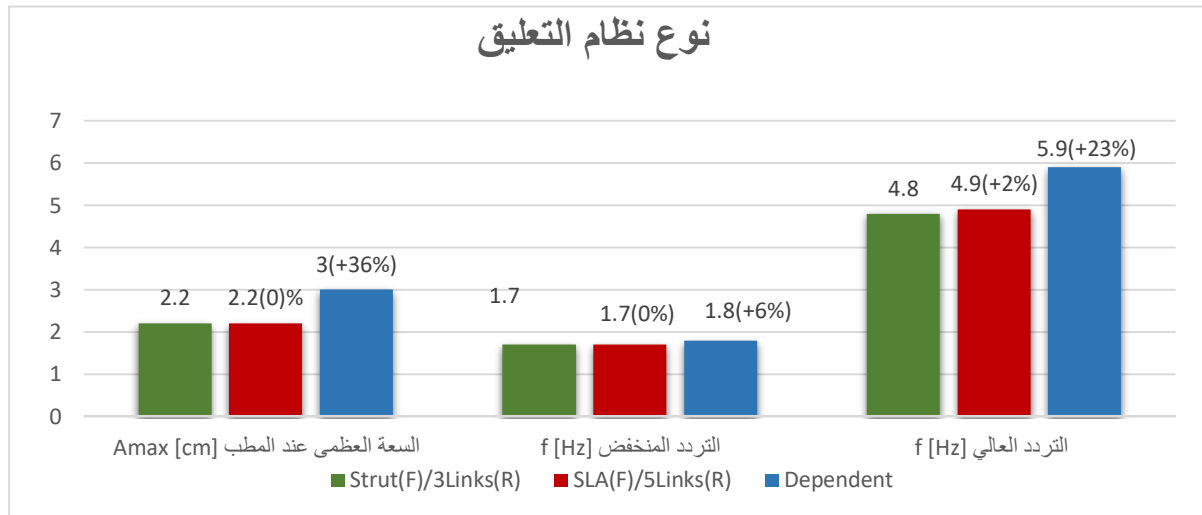


Twist Beam (Dependent) - Double Wishbone (SLA) - TriLink - MacPherson (Strut)

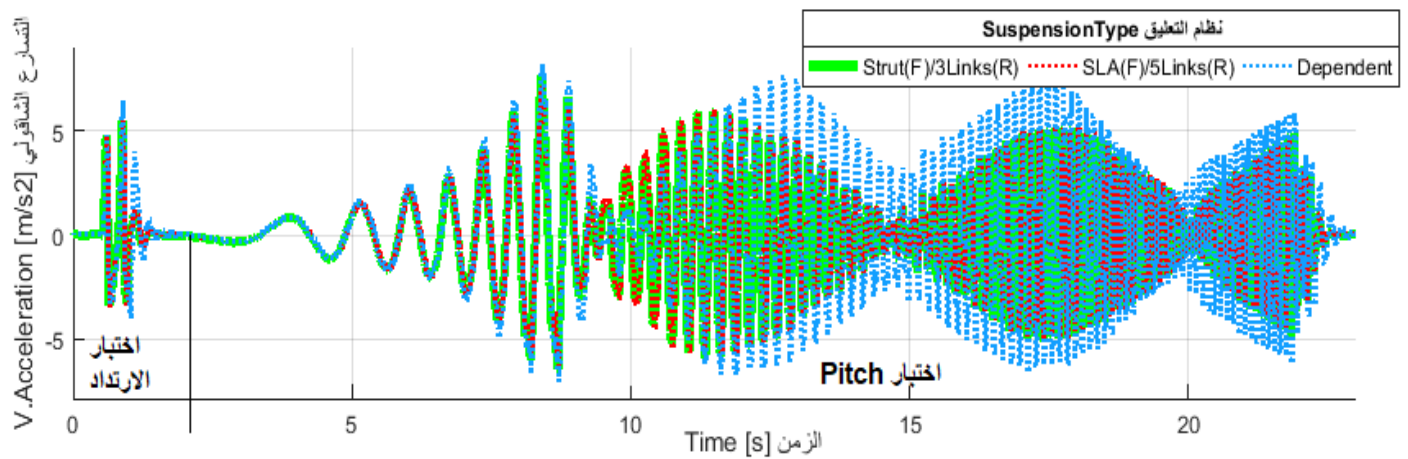
الشكل (٦٢): بعض أنواع تصاميم أنظمة التعليق المستخدمة



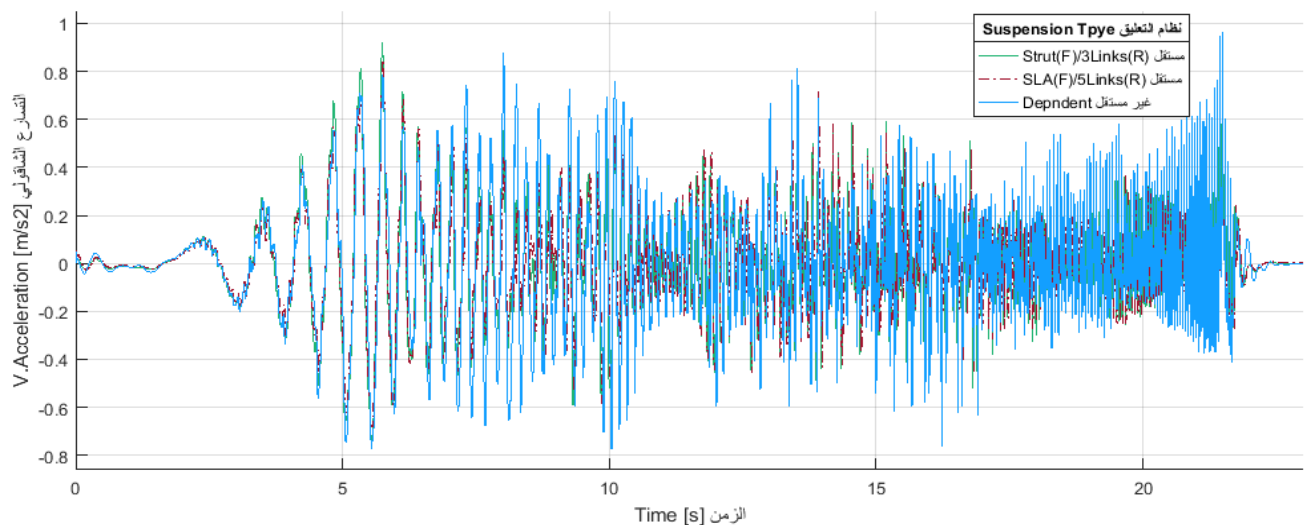
(a) الانتقال الشاقولي وفق الاختبار الأول والثاني



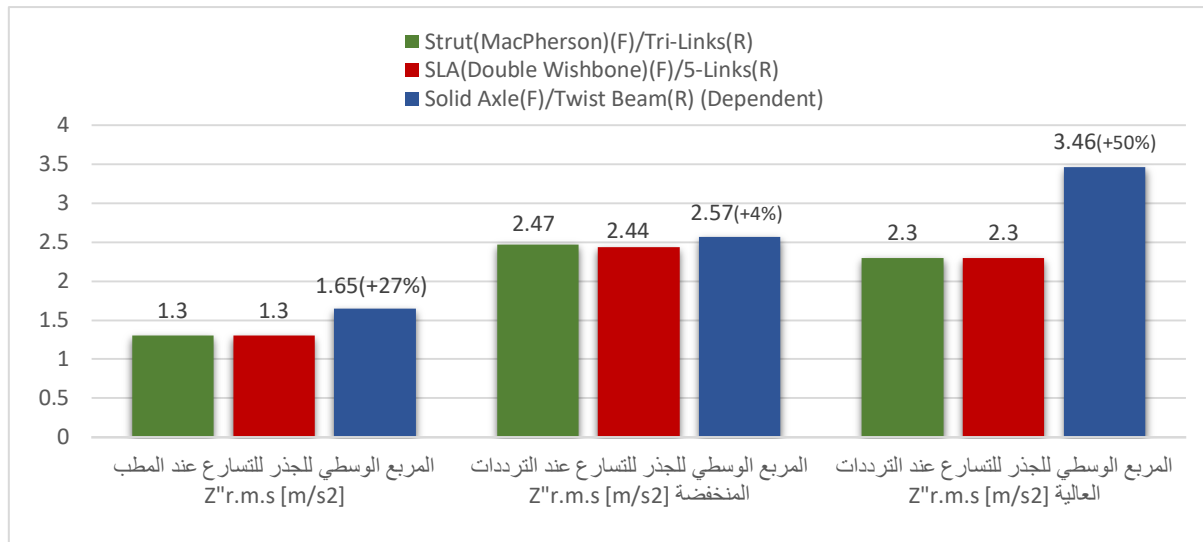
(b) قيم التردد والسعة العظمى وفق الاختبار الأول والثاني (Pitch & Bounce)



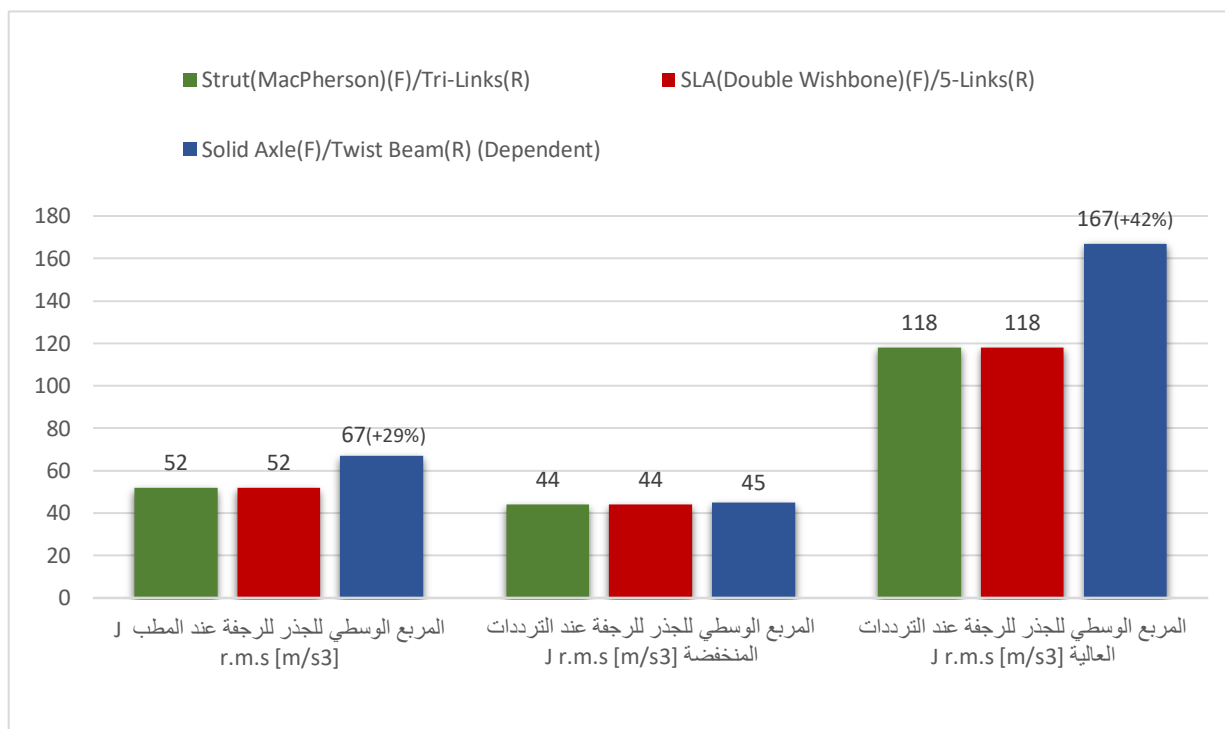
(c) التسارع الشاقولي وفق الاختبار الأول والثاني (Pitch & Bounce)



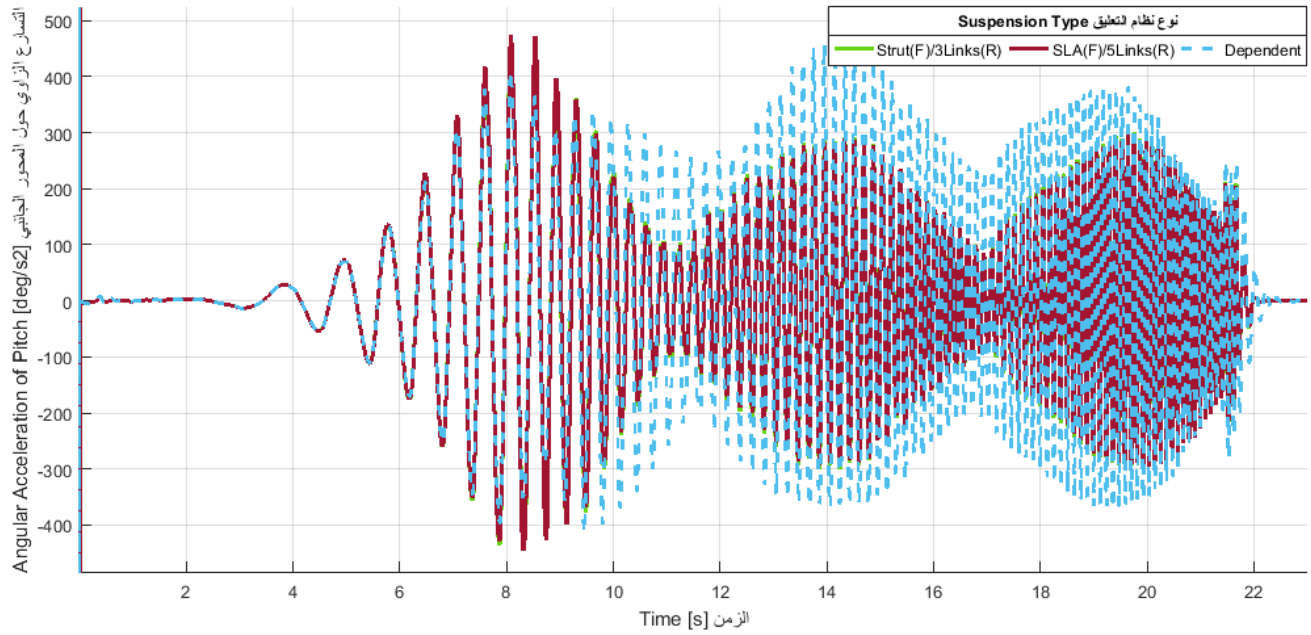
(d) التسارع الشاقولي وفق الاختبار الثالث (Roll)



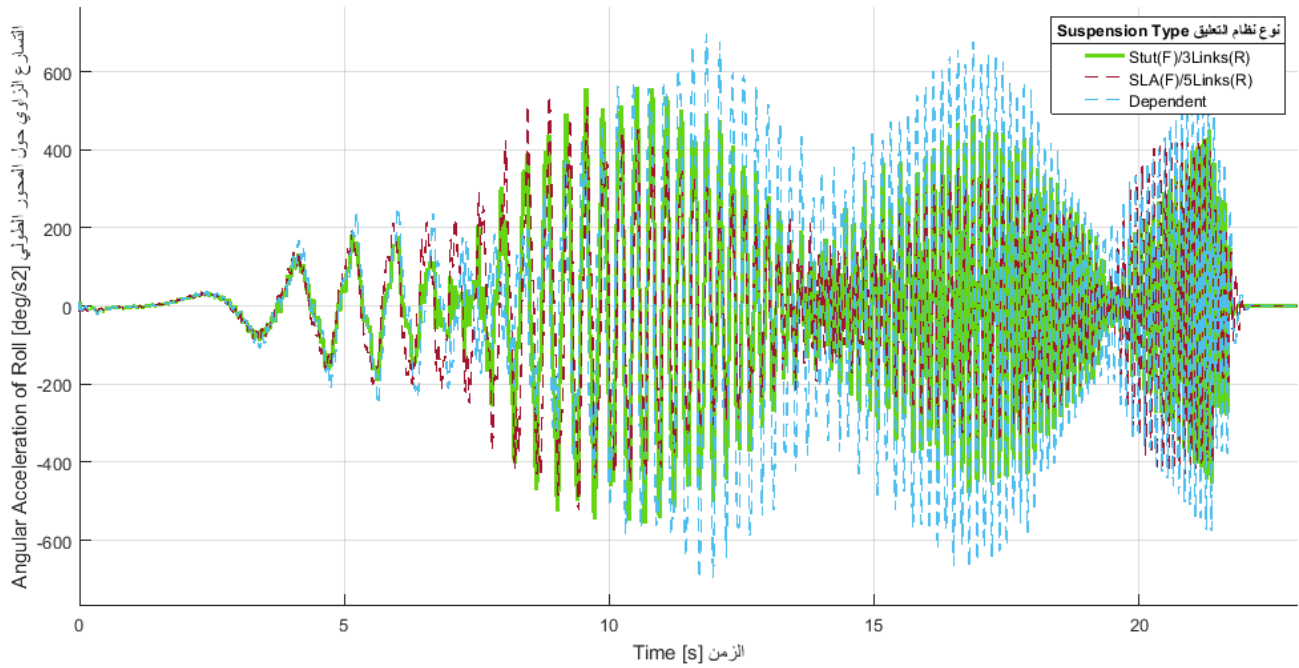
(e) قيم التسارع الشاقولي وفق (RMS)



(f) قيم الرجفة وفق (RMS)



(g) التسارع الزاوي حول المحور الجانبي (Pitch)



(h) التسارع الزاوي حول المحور الطولي (Roll)

الشكل (٦٣): مقارنة نتائج الاختبار لأنظمة التعليق وفقاً لنوع التصميم

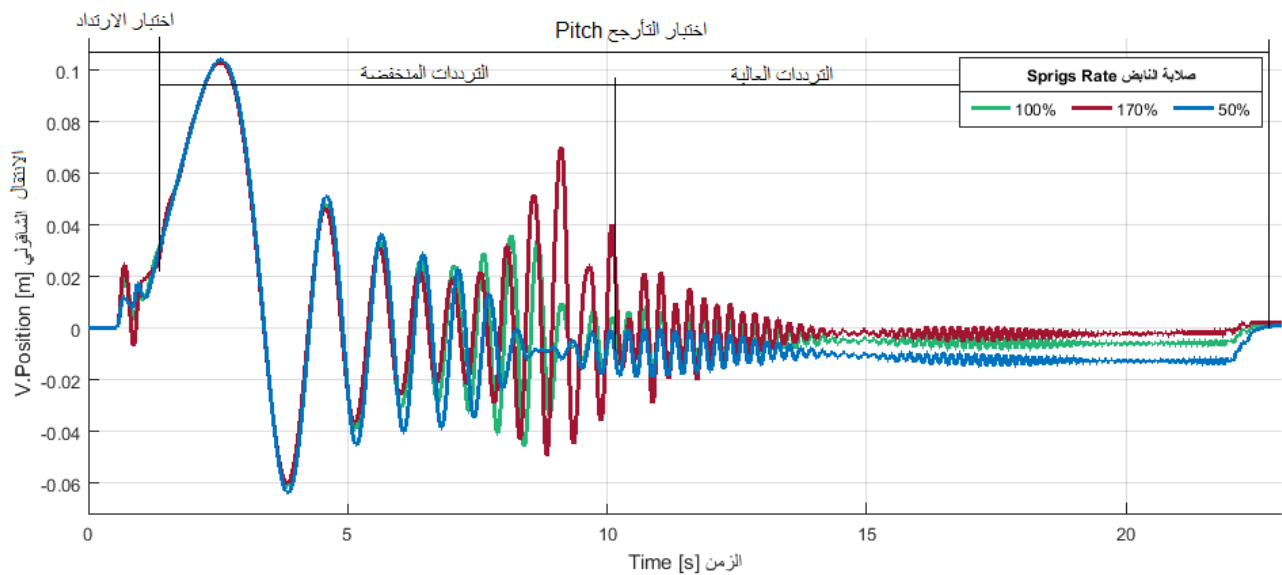
- [(a) الانتقال الشاقولي وفق الاختبار الأول والثاني (Pitch & Bounce) - (b) قيم التردد والسعة العظمى وفق الاختبار الأول والثاني (Pitch & Bounce) - (c) التسارع الشاقولي وفق الاختبار الأول والثاني (Pitch & Bounce) - (d) التسارع الشاقولي وفق الاختبار الثالث (Roll) - (e) قيم التسارع الشاقولي وفق (RMS) - (f) قيم الرجفة وفق (RMS) - (g) التسارع الزاوي حول المحور الجانبي (Pitch) - (h) التسارع الزاوي حول المحور الطولي (Roll)]

- من الشكلين (a),(b) نلاحظ تطابقاً إلى حدٍ ما لقيم الانتقال الشاقولي والتردد في النظامين المستقلين المستخدمين، وبمقارنتهما مع النظام غير المستقل نلاحظ ارتفاع قيم الانتقال الشاقولي وتردد الاهتزازات للنظام غير المستقل في الترددات العالية والمنخفضة للطريق، ونلاحظ ارتفاع قيمة السعة العظمى عند المرور على المطب للنظام غير المستقل مقارنةً مع النظامين المستقلين مع ازدياد في مدة التخميد.
- ومن الأشكال (c),(e),(f) نلاحظ تقارب قيم التسارع الشاقولي والرجفة للنظامين المستقلين عند الاختبار الأول (الارتداد) والاختبار الثاني (التأرجح حول المحور الجانبي)، على حين ترتفع قيم التسارع والرجفة ارتفاعاً ملحوظاً في النظام غير المستقل، وتصبح معايير الراحة متدنية جداً.
- بالنسبة إلى التأرجح حول المحور الجانبي (Pitch) ومن الشكل (g) نلاحظ أن قيم التسارع الزاوي للنظامين المستقلين متطابقة وفي النظام غير المستقل تزداد ازدياداً كبيراً.
- عند التأرجح حول المحور الطولي (Roll) وفي الشكلين (d),(h) كان النظام غير المستقل الأسوأ من بين الأنظمة عند الترددات جميعها إجمالاً، وترتفع قيم التسارعين الشاقولي والزاوي ارتفاعاً كبيراً، على حين أن نوعي نظامي التعليق المستقلين يكون في أدائهما تقارب إلا أن نظام التعليق من نوع ((Strut (F)/3Links (R)) يكون بقيم تسارع أقل عند الترددات المنخفضة أما في الترددات العالية فتكون الأفضلية لنظام التعليق المستقل من نوع ((SLA (F)/5Links(R)).
- إن قيم الرجفة والتسارع عالية جداً لعدم أخذ قيم تخميد المقاعد بالحسبان حيث من الممكن أن تصل قيم ثابت صلابة المقاعد إلى (90 KN/m) ومعدل التخميد قد يصل إلى (0.4 KNs/m)^[3]، وهي قيم من شأنها خفض هذه القيم العالية للتسارع والرجفة ونقل جزء منها إلى جسم الإنسان.

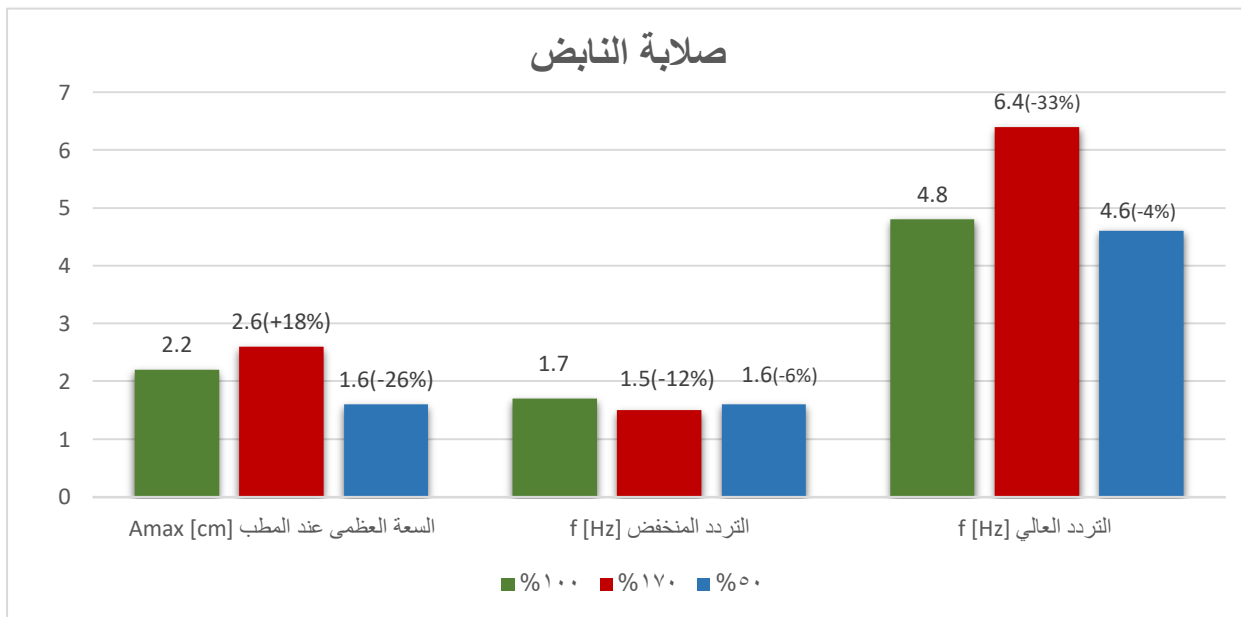
وهكذا نلاحظ سوء نظام التعليق غير المستقل على المعايير جميعها ولا سيما في التأرجح حول المحور الطولي (Roll)، على حين أن النظامين المستقلين المستخدمين ففي أدائهما تقارب ويفضل نظام التعليق ((SLA (F)/5Links(R)) عند التأرجح (Roll) وفي الترددات العالية نظراً إلى مرونته بسبب زيادة عدد الوصلات، ويستخدم الأخير غالباً في السيارات السياحية كبيرة الحجم نسبياً.

٤-٤- التجربة الرابعة: دراسة تأثير صلابة النابض.

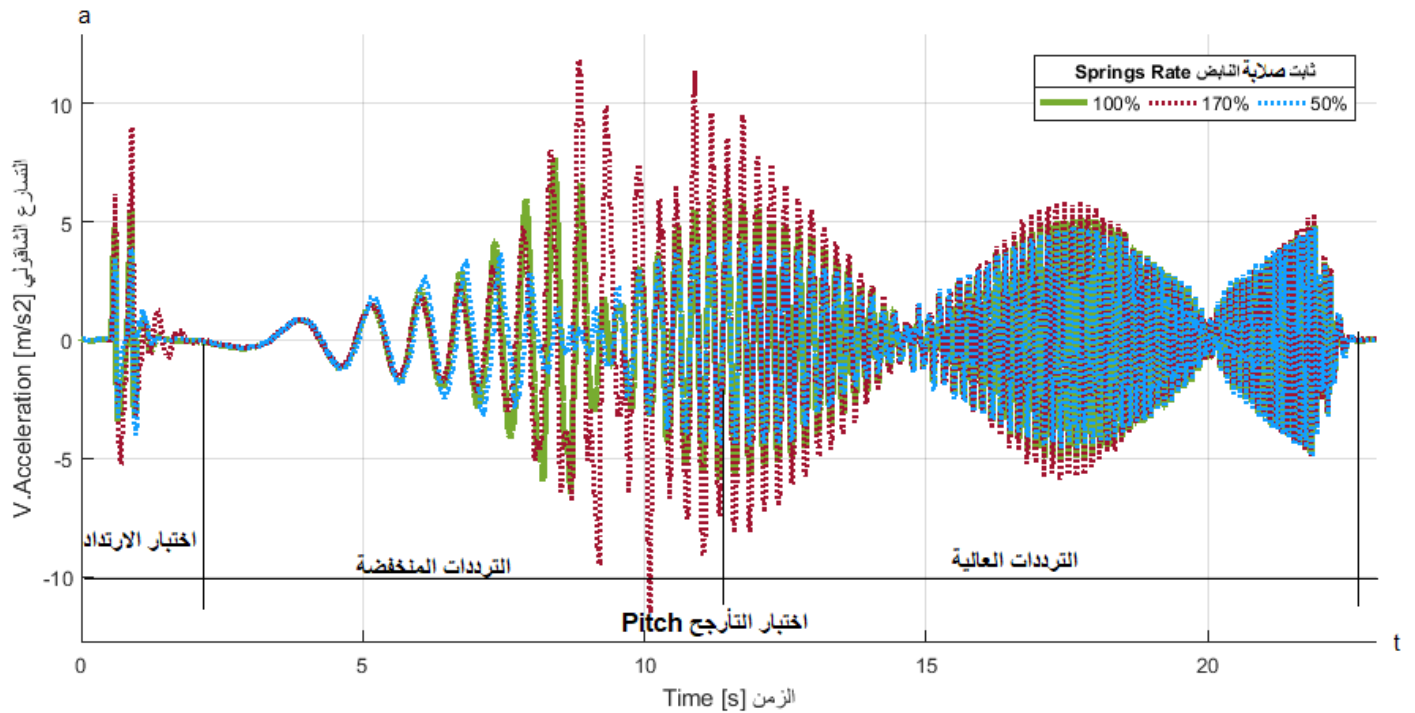
في هذه التجربة تركز الاهتمام على رفع صلابة النابض مرةً (+70%) نسبةً إلى القيمة الابتدائية المعطاة في جدول مواصفات السيارة المدروسة لتصبح في الأمام (250 KN/m) و (150 KN/m) في الخلف، وخفضه مرةً (-50%) لتصبح (75 KN/m) في الأمام و (45 KN/m) في الخلف، ومقارنته من حيث الانتقال الشاقولي والتسارع الشاقولي لمركز ثقل السيارة والرجفة وفق الاختبار الأول (Bounce) والاختبار الثاني (Pitch)، وحُسب أيضًا تردد الاهتزازات عند ترددات الطريق المختلفة، وحُسب التسارع الزاوي وفق الاختبار الثاني (Pitch) والثالث (Roll).



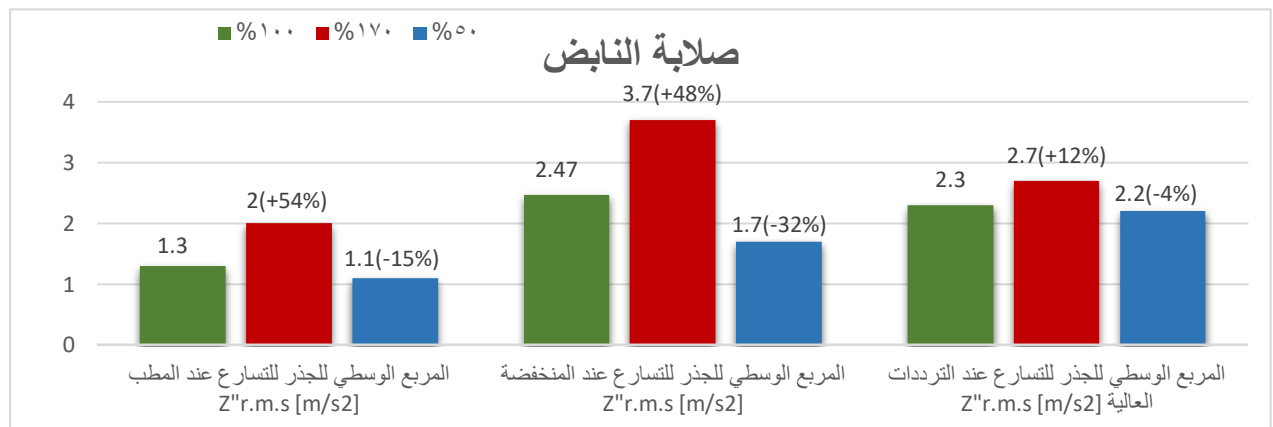
(a) الانتقال الشاقولي وفق الاختبار الأول والثاني (Pitch & Bounce)



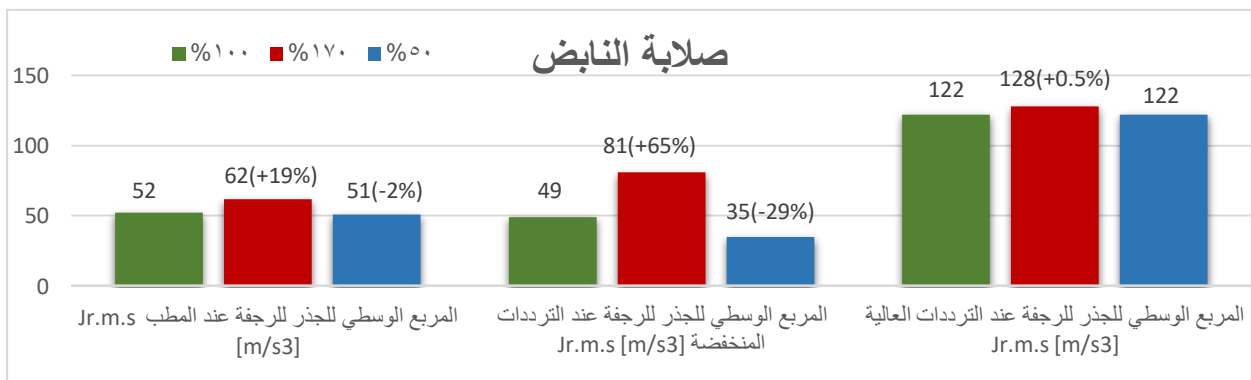
(b) قيم التردد والسعة العظمى وفق الاختبار الأول والثاني (Pitch & Bounce)



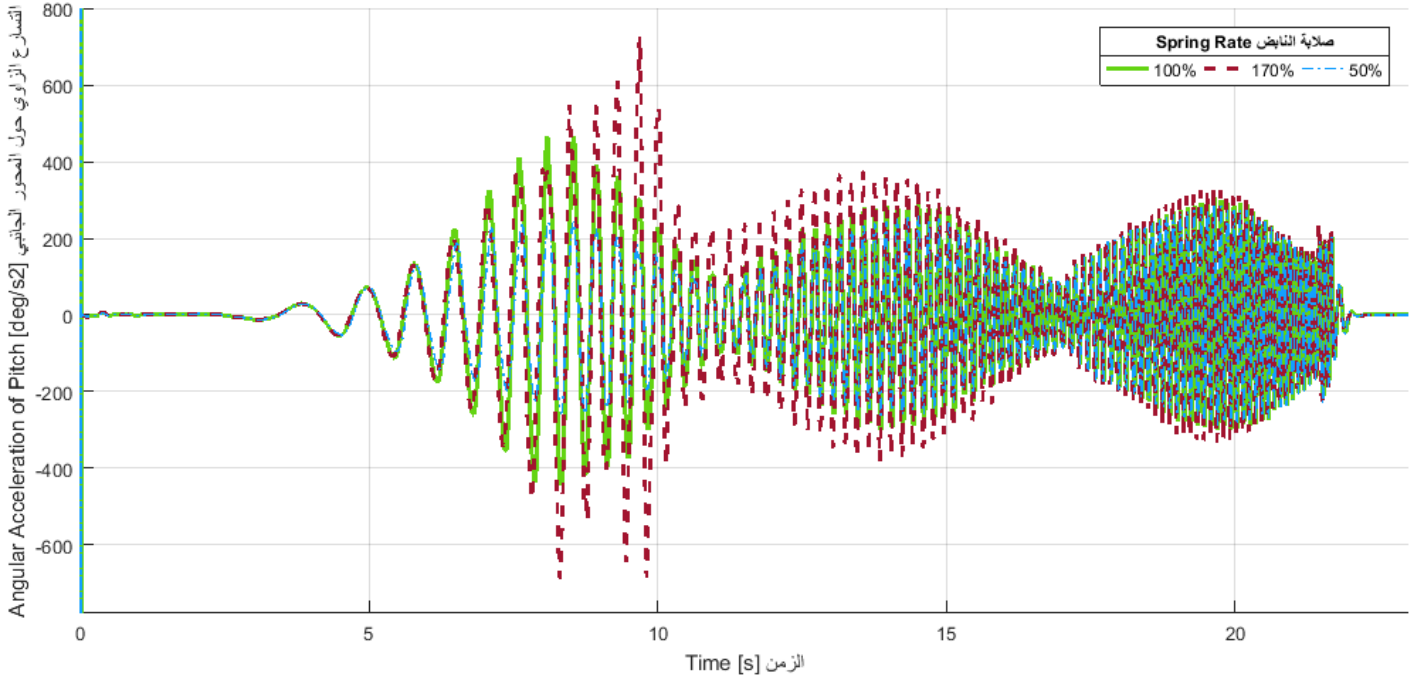
(c) التسارع الشاقولي وفق الاختبار الأول والثاني (Pitch & Bounce)



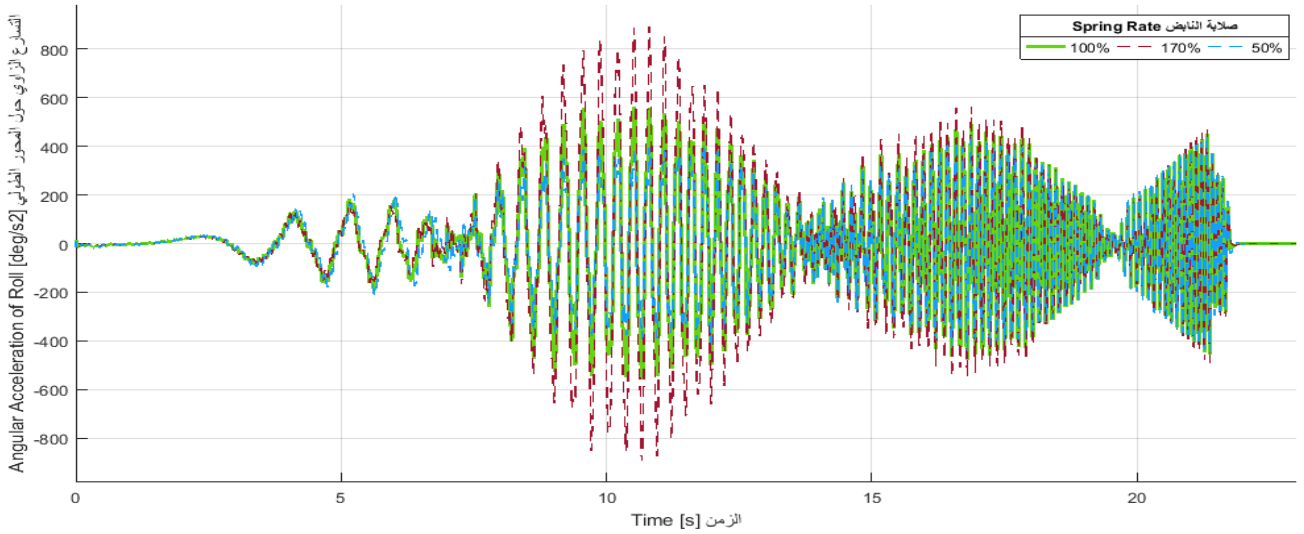
(d) قيم التسارع الشاقولي وفق (RMS)



(e) قيم الرجفة وفق (RMS)



(f) التسارع الزاوي حول المحور الجانبي (Pitch)



(g) التسارع الزاوي حول المحور الطولي (Roll)

الشكل (٦٤): المقارنة عند تعديل قيم صلابة النابض

[(a) الانتقال الشاقولي وفق الاختبار الأول والثاني (Pitch & Bounce) - (b) قيم التردد والسعة العظمى وفق الاختبار الأول والثاني (c) - التسارع الشاقولي وفق الاختبار الأول والثاني (Pitch & Bounce) - (d) قيم التسارع الشاقولي وفق (RMS) - (e) قيم الرجفة وفق (RMS) - (f) التسارع الزاوي حول المحور الجانبي (Pitch) - (g) التسارع الزاوي حول المحور الطولي (Roll)]

- نلاحظ من المخططين (b),(a) ارتفاع قيم الانتقال الشاقولي عند رفع قيمة صلابة النابض ولا سيما عند الترددات المنخفضة للاهتزازات وعند الارتداد في المطب، على حين أنه عند خفض قيمة صلابة النابض تنخفض ترددات الاهتزازات وتنخفض قيمة السعة العظمى عند المرور على المطب انخفاضًا ملحوظًا، ولكن يكون هناك ارتفاع في قيم الانتقال الشاقولي عند بداية التموجات الكبيرة بسبب حدوث التقلص الكبير لنظام التعليق دون مقاومة مناسبة له.

- ومن الأشكال (e),(d),(c) نلاحظ عند انخفاض قيمة صلابة النابض تنخفض قيم التسارع والرجفة عند المطب والأمواج الطويلة (أي في الترددات المنخفضة) إلا في بداياتها، وتكون متقاربة إلى حدٍ ما مع انخفاض قليل عند الأمواج القصيرة (أي في الترددات العالية)، على حين أنه عند رفع قيمة صلابة النابض ترتفع قيم التسارع والرجفة وتصبح القيادة مزعجة بشكلٍ كبير، ونلاحظ أن زمن التخميد للاهتزازات يطول بارتفاع قيمة صلابة النابض.

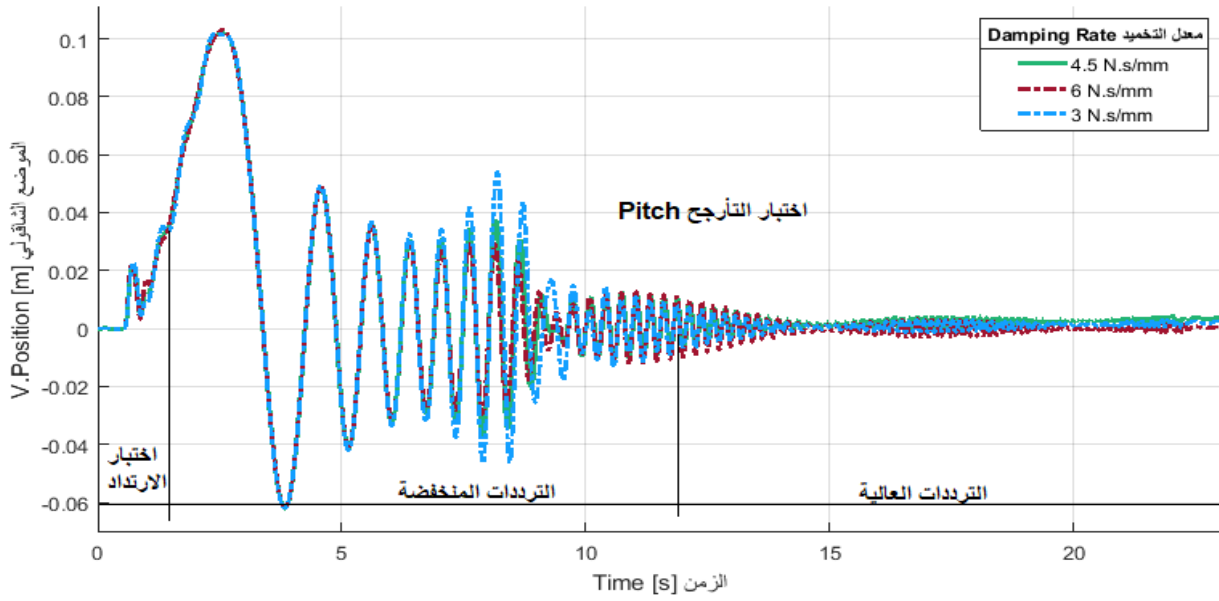
- ومن الشكلين (g),(f) عند رفع قيمة صلابة النابض تكون قيم التسارع الزاوي حول المحورين الطولي (Roll) والجانبى (Pitch) عند الترددات المنخفضة مرتفعة ارتفاعًا كبيرًا وعند خفضه تنخفض هذه التسارعات، أما عند الترددات العالية فيكون هناك تقارب لقيم التسارع مع ارتفاع قليل من قبل قيمة صلابة النابض المرتفعة وانخفاض قليل عند قيمة صلابة النابض المنخفضة.

في الخلاصة يمكن القول إنه كلما رفعنا قيمة صلابة النابض تصبح القيادة مزعجة، وعلى نقيضه عند خفض قيمة صلابة النابض تصبح الرحلة أكثر راحة، وقد يساعد خفض صلابة النابض أيضاً في ثبات السيارة على الطرقات من ناحية التأرجح حول المحور الجانبى والطولى، ولكن ذلك يؤثر على ثبات المركبة عند الصدمة الكبيرة والتسارع والتباطؤ أو عند الانعطاف بسرعة عالية إذ يتقلص نظام التعليق بشكلٍ كبير.

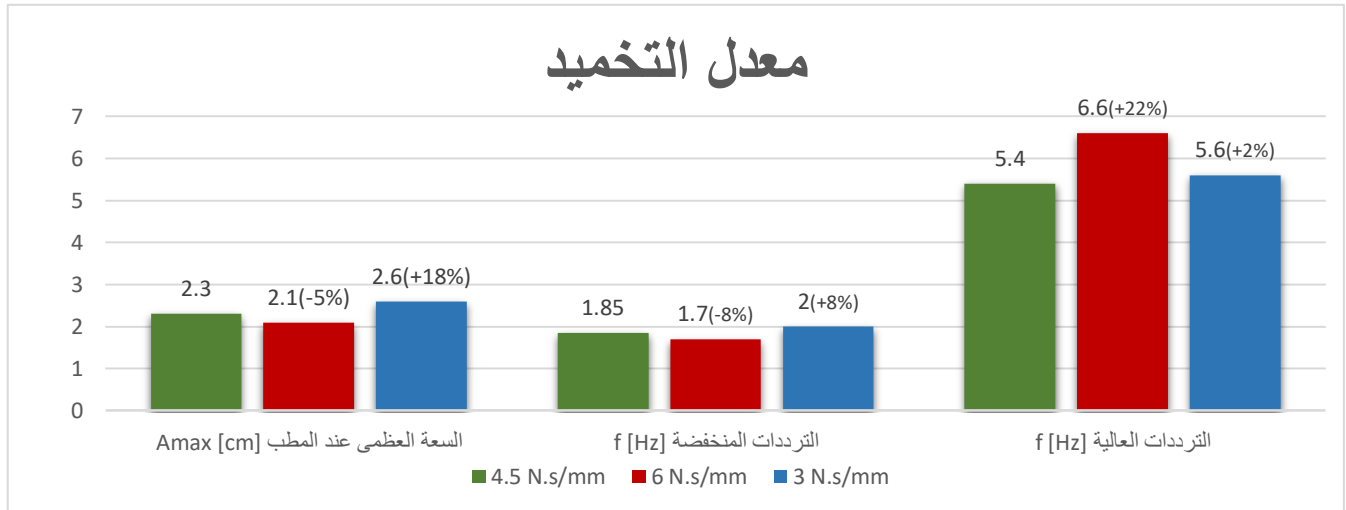
ولإيجاد القيمة المثالية لصلابة النابض تم إجراء عدة تغييرات على قيم صلابة النابض، ولوحظ أن القيم المثلى لتقديم أفضل راحة هي (55 KN/m) في الأمام و (40 KN/m) في الخلف، حيث يصبح بعد هذا التغير في القيمة لا يعطى الفرق الواضح، والتحسين الحاصل عند هذه القيم طفيف جدًا بالمقارنة مع القيم التي اختيرت في خفض صلابة النابض بنسبة (50%) في التجربة المعروضة بحيث لا يتعدى التحسن أكثر من (4%) في قيم التسارع والرجفة.

٤-٥- التجربة الخامسة: دراسة تأثير معامل التخميد.

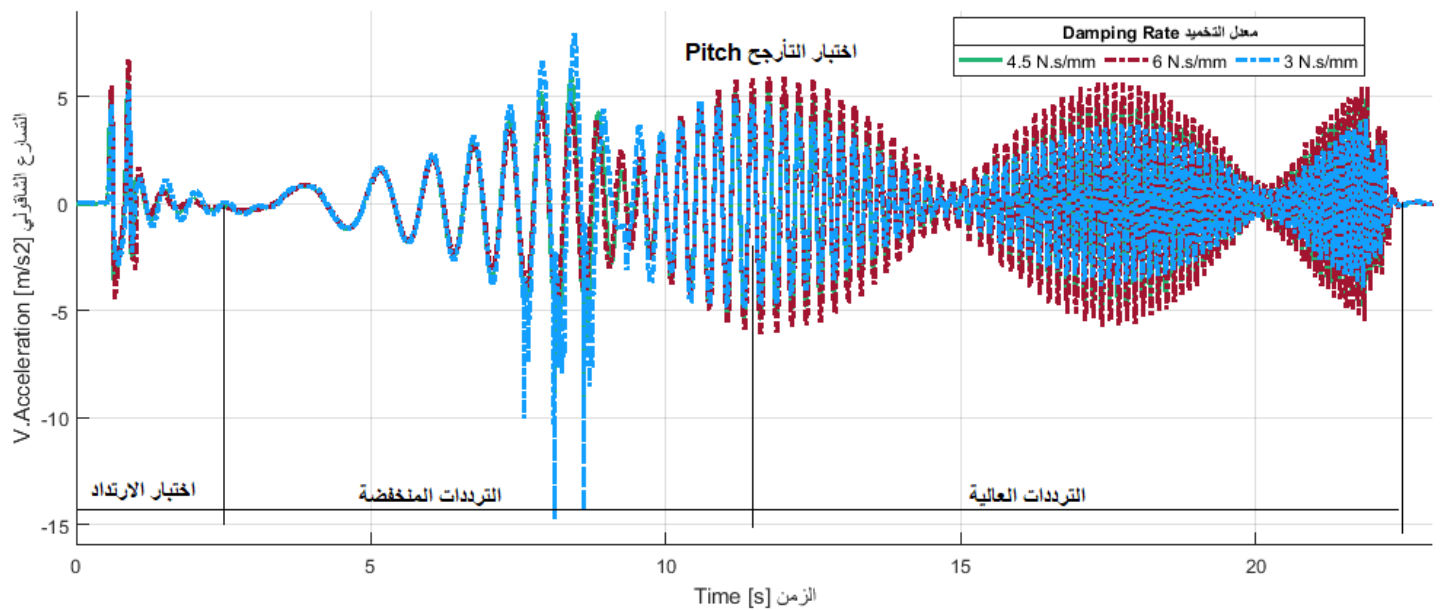
إن السيارة المستخدمة تمتلك معامل تخميد لخطي وقيمته تتغير تبعاً للقوة المؤثرة فيه، لذلك سنقوم بتثبيت قيمته عند (4.5 N.s/mm) ومن ثم نقوم برفع معدل التخميد مرةً إلى (6 N.s/mm) ومرةً بخفضه إلى (3 N.s/mm)، القيم اختيرت بشكل اعتباطي، ثم نجري مقارنة مع القيمة الابتدائية من حيث الانتقال الشاقولي والتسارع الشاقولي لمركز ثقل السيارة والرجفة وفق الاختبار الأول (Bump) والاختبار الثاني (Pitch & Bounce) وحساب الترددات للاهتزازات، ومن ثم سنقوم بحساب التسارع الزاوي للتأرجحين حول المحور الجانبي (Pitch) وحول المحور الطولي (Roll).



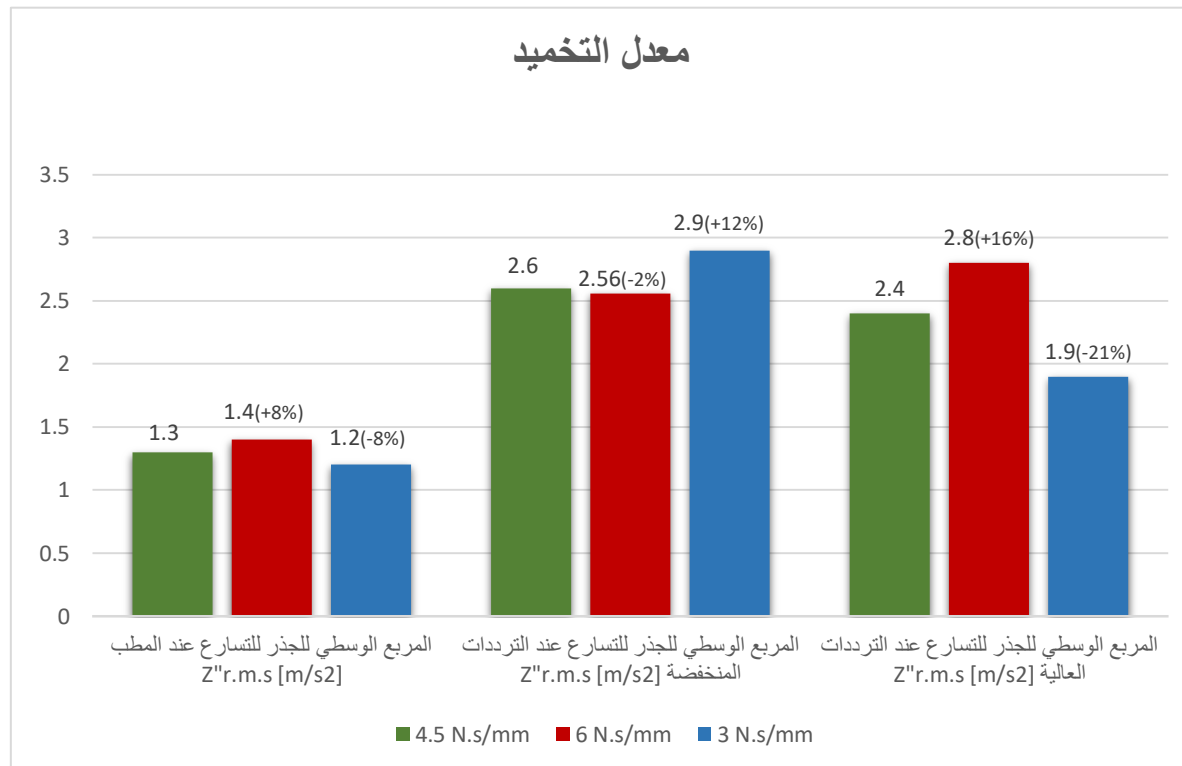
(a) الانتقال الشاقولي وفق الاختبار الأول والثاني (Pitch & Bounce)



(b) قيم التردد والسعة العظمى وفق الاختبار الأول والثاني (Pitch & Bounce)

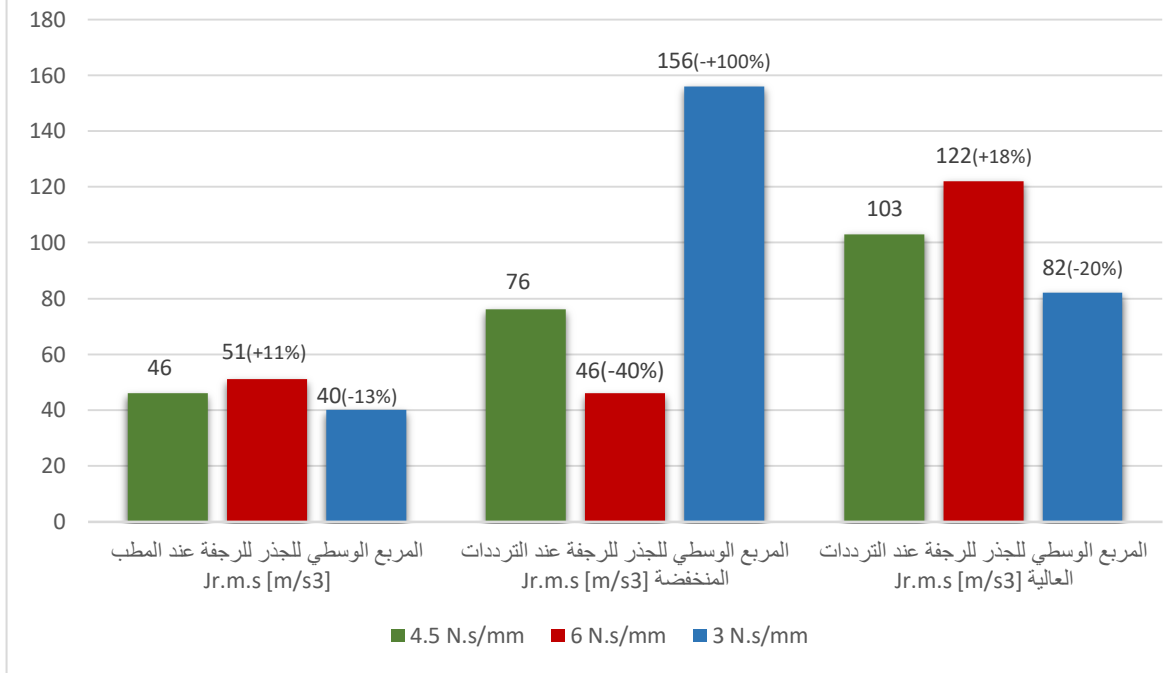


(c) التسارع الشاقولي وفق الاختبار الأول والثاني (Pitch & Bounce)

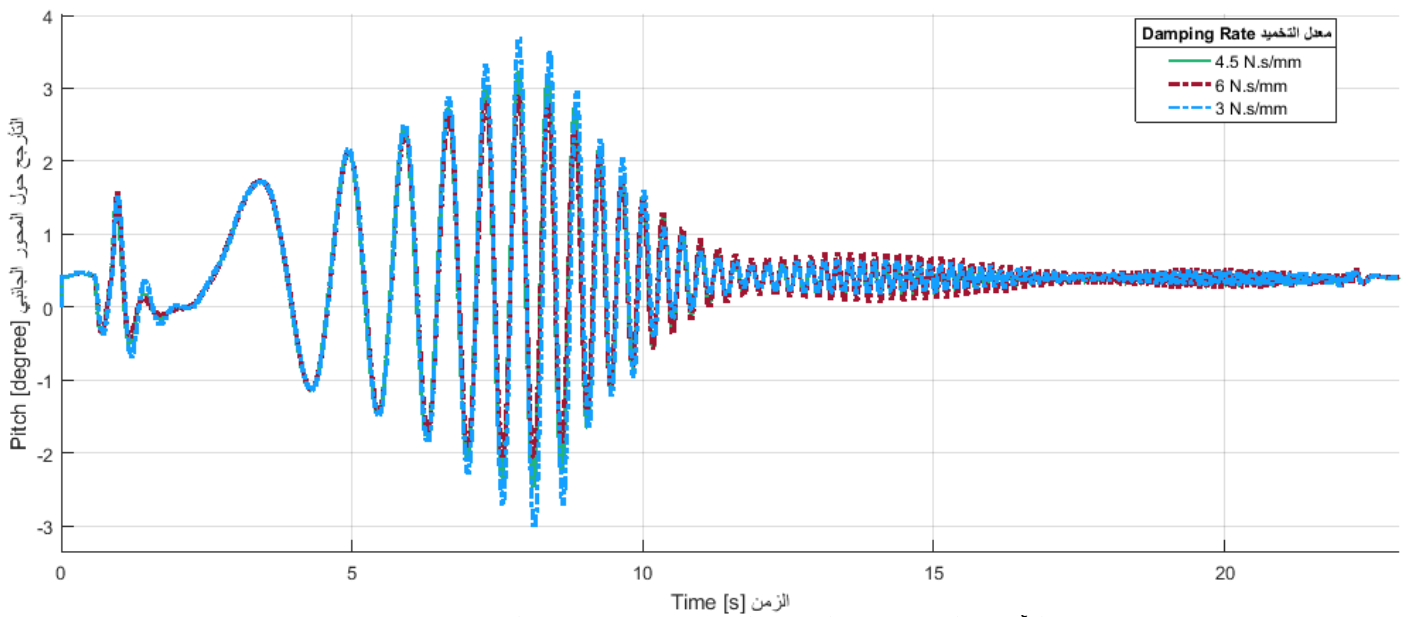


(d) قيم التسارع الشاقولي وفق (RMS)

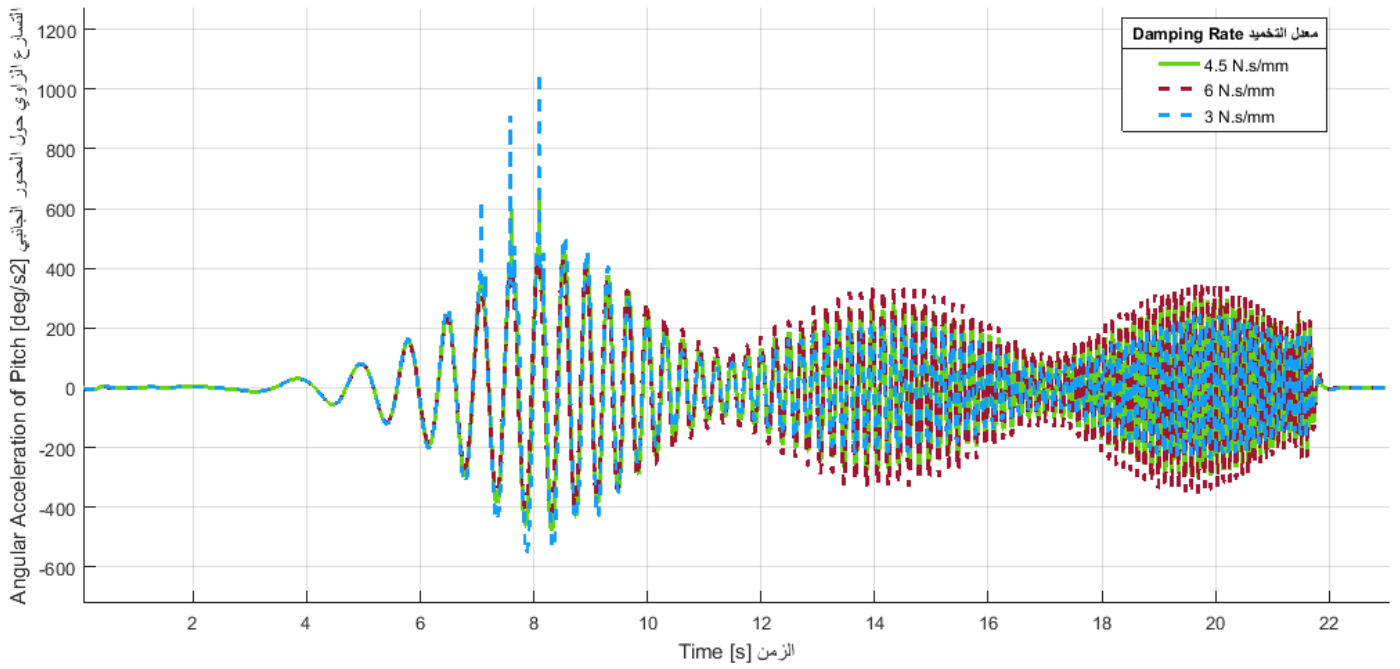
معدل التخميد



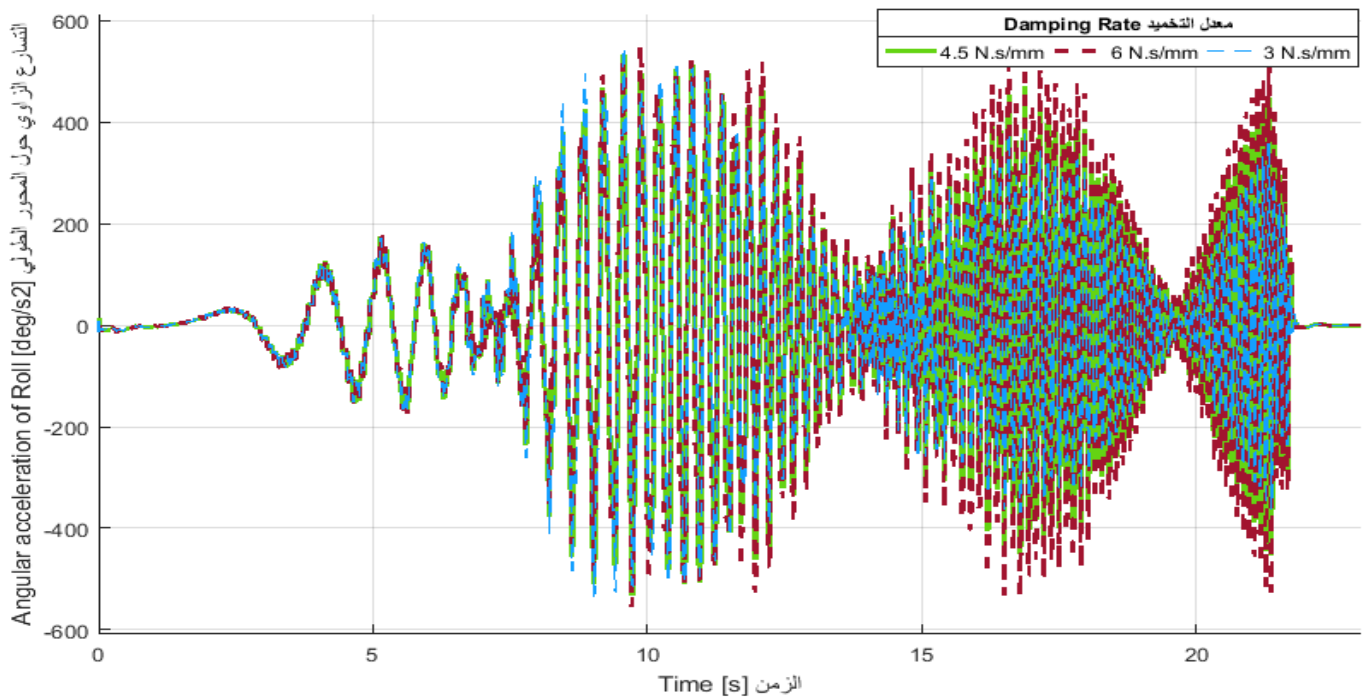
(e) قيم الرجفة وفق (RMS)



(f) التآرجح الزاوي حول المحور الجانبي (Pitch) وعند المرور على مطب



(g) التسارع الزاوي حول المحور الجانبي (Pitch)



(h) التسارع الزاوي حول المحور الطولي (Roll)

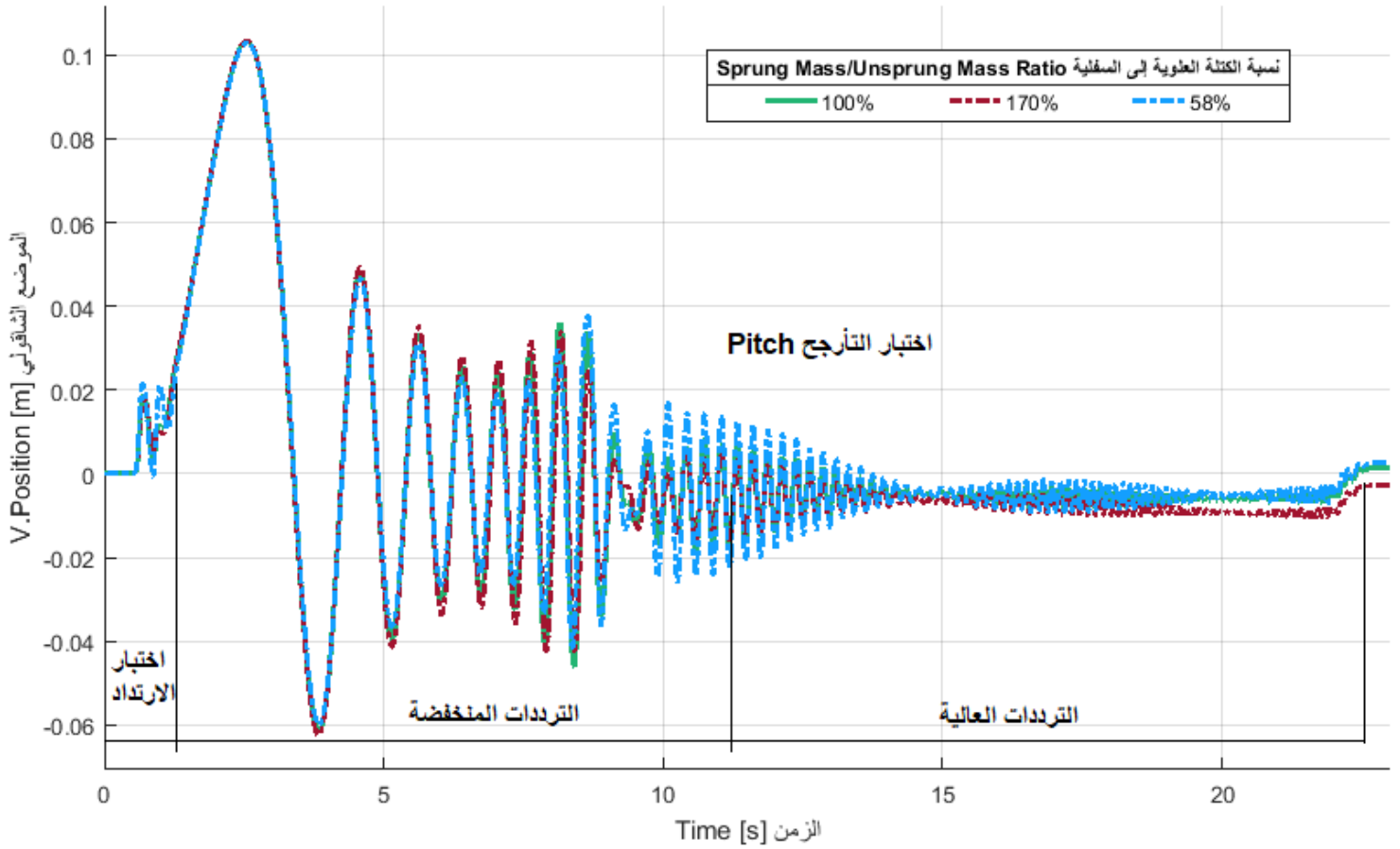
الشكل (٦٥): المقارنة عند تعديل قيم معدل التخميد

- [(a) الانتقال الشاقولي وفق الاختبار الأول والثاني (Pitch & Bounce) - (b) قيم التردد والسعة العظمى وفق الاختبار الأول والثاني (c) التسارع الشاقولي وفق الاختبار الأول والثاني (Pitch & Bounce) - (d) قيم التسارع الشاقولي وفق (RMS) - (e) قيم الرجفة وفق (RMS) - (f) التأرجح الزاوي حول المحور الجانبي (Pitch) وعند المرور على مطب - (g) التسارع الزاوي حول المحور الجانبي (Pitch) - (h) التسارع الزاوي حول المحور الطولي (Roll)]

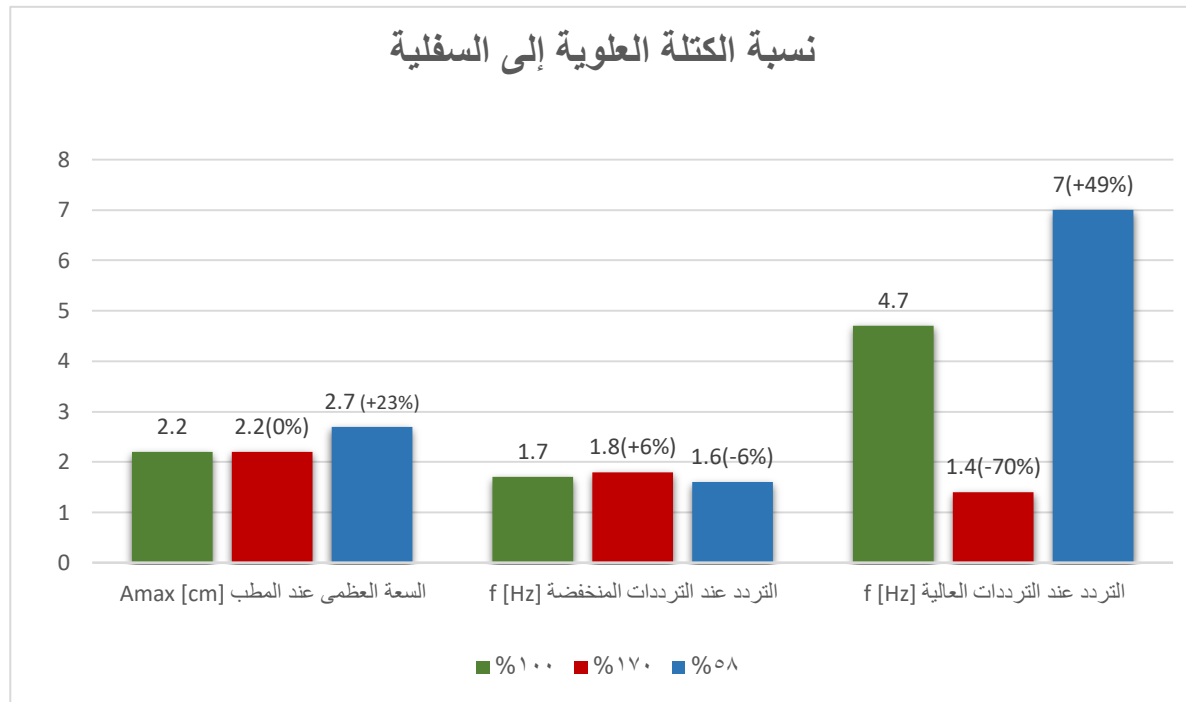
- من الشكل (a) نلاحظ ارتفاع قيم الانتقال الشاقولي عند المرور على المطب وفي الترددات المنخفضة للطريق (طول موجات كبير) عند خفض معدل التخميد ويحدث لدينا تجاوز أعظمي عند هذه الترددات، أما عند الترددات العالية للطريق (طول موجات صغير) فلا يكون هناك فارق كبير، على حين تنخفض قيم الانتقال الشاقولي عند رفع معدل التخميد في الترددات المنخفضة (طول موجات كبير) وفي المرور على المطب، أما عند الترددات العالية للطريق (طول موجات صغير) فتكون قيم الانتقال الشاقولي عالية وهذا يُفسر بسبب مقاومة المخمّد للحركة ومن ثمّ حدوث رد فعل من المخمّد.
 - ومن الشكل (b) يزداد تردد الاهتزازات عند رفع معدل التخميد وينخفض التردد بانخفاض معدل التخميد استناداً إلى الاستنتاج في البند السابق، كما تزداد السعة العظمى عند المرور على مطب في حال خفض قيمة التخميد وتنقص السعة بازدياد معدل التخميد.
 - ومن الأشكال (c),(d) نلاحظ عند رفع معدل التخميد تنخفض قيم التسارع الشاقولي عند الترددات المنخفضة (طول موجات كبير) وتختفي حالة التجاوز الأعظمي، أما عند المطب والترددات العالية (طول موجات صغير) فإن قيم التسارع تزداد، أما عند خفض معدل التخميد فتزداد قيم التسارع في الترددات المنخفضة ازدياداً كبيراً وتحدث حالة التجاوز الأعظمي وتنخفض قيم التسارع في الترددات العالية عند المطب، والكلام يتطابق بالنسبة لقيم الرجفة كما يوضحه الشكل (e).
 - ومن الشكل (f) نلاحظ أن قيم زاوية التآرجح حول المحور الجانبي (Pitch) عند خفض معدل التخميد تزداد عند المطب والترددات المنخفضة وتقل عند الترددات العالية، أما عند رفع معدل التخميد فإن زاوية التآرجح تقل عند الترددات المنخفضة والمطب وتزداد عند الترددات العالية.
 - ومن الشكل (g) يكون التسارع الزاوي حول المحور الجانبي (Pitch) عاليًا عند الترددات المنخفضة في معدل التخميد القليل وتحدث حالة التجاوز الأعظمي، وينخفض التسارع بازدياد التردد، وعلى نقيضه يكون التسارع في معدل التخميد العالي ويختفي التجاوز الأعظمي في الترددات المنخفضة.
 - في الشكل (h) نلاحظ أن قيم التسارع الزاوي حول المحور الطولي (Roll) تكون مرتفعة نسبيًا في الترددات المنخفضة لدى معدل التخميد المنخفض وتقل بازدياد التردد، والكلام عكسه عند رفع معدل التخميد.
- نستخلص من التجربة أنه للتخلص من حالة التجاوز الأعظمي المزعجة يجب علينا زيادة معدل التخميد ولكننا سنحصل على رد فعل قاسٍ عند الترددات العالية، ولكي نتخلص من رد الفعل القاسي عند الترددات العالية علينا خفض معدل التخميد، لذلك نجد أن بعض المصممين استعان بذلك على إنتاج مخمد ذي معدل تخميد لا خطي يتناسب مع الترددات المختلفة كما في مواصفات مثالنا (السيارة المستخدمة) في الاختبار.

٤-٦- التجربة السادسة: دراسة تأثير نسبة الكتلة العلوية إلى السفلية.

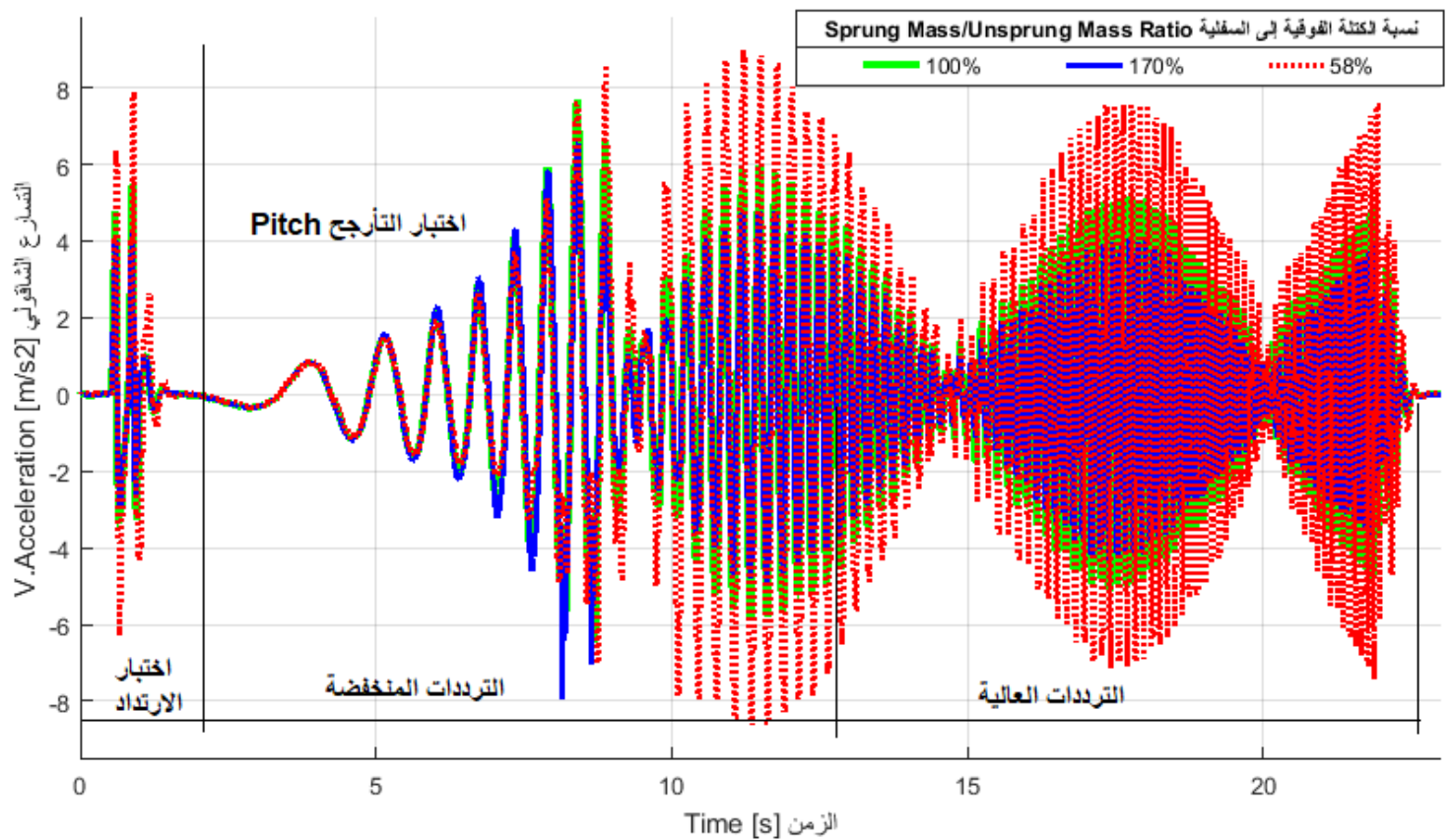
في هذه التجربة تركز الاهتمام على رفع نسبة الكتلة العلوية إلى السفلية مرةً بنسبة 70% (وذلك برفع قيمة الكتلة العلوية لتصبح (1500 Kg) وخفض قيمة الكتلة السفلية لتصبح (105 Kg)) ومرةً أخرى بخفضها 42% (وذلك بخفض قيمة الكتلة العلوية لتصبح (1000 Kg) ورفع قيمة الكتلة السفلية لتصبح (200 Kg)) ومقارنتها مع القيمة الابتدائية من حيث الانتقال الشاقولي والتسارع الشاقولي لمركز ثقل السيارة والرجفة وفق الاختبار الأول (Small Bump 5cm) والاختبار الثاني (Pitch & Bounce) وبحساب التسارع الزاوي حول المحورين الجانبي (Pitch) والطولي (Roll)، ولكن جراء هذه التعديلات لا يبقى الوزن نفسه للمركبة.



(a) الانتقال الشاقولي وفق الاختبار الأول والثاني (Pitch & Bounce)

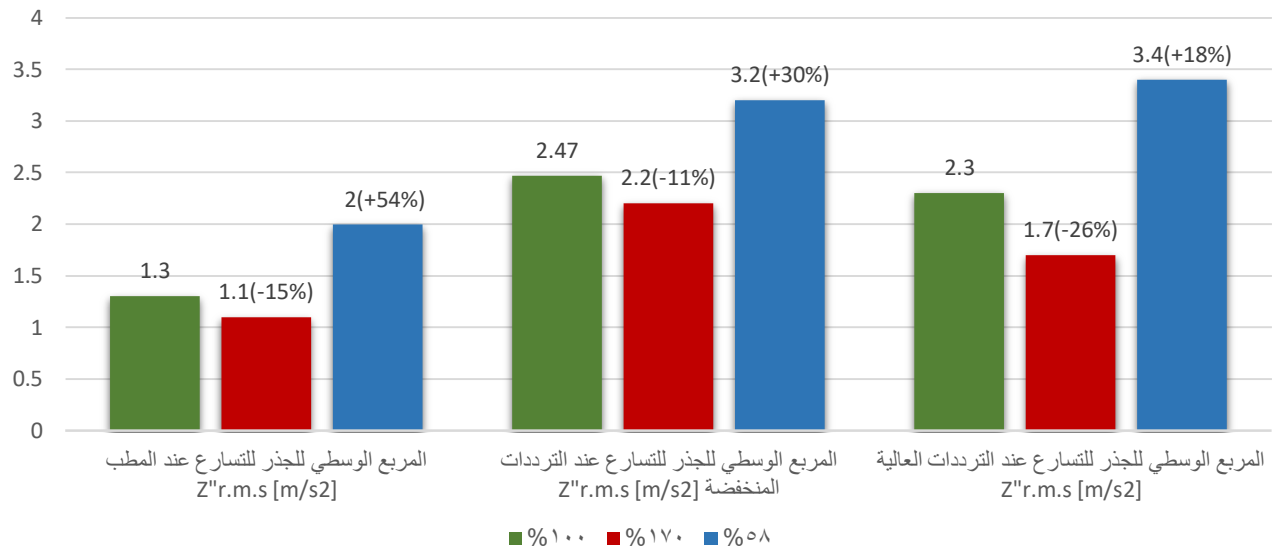


(b) قيم التردد والسعة العظمى وفق الاختبار الأول والثاني (Pitch & Bounce)



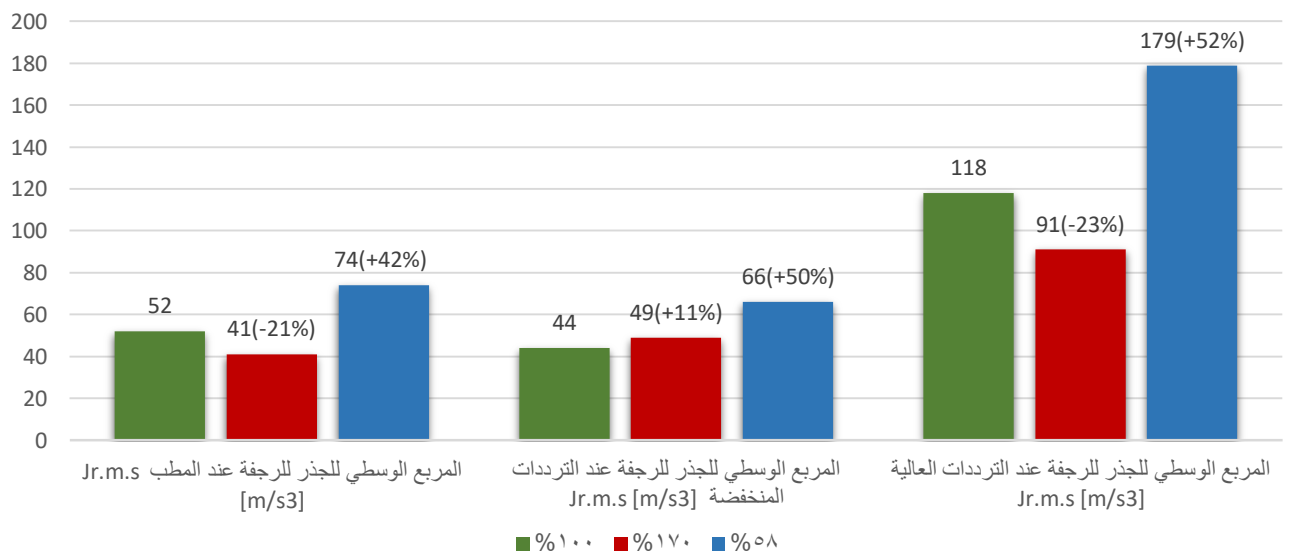
(c) التسارع الشاقولي وفق الاختبار الأول والثاني (Pitch & Bounce)

نسبة الكتلة العلوية إلى السفلية

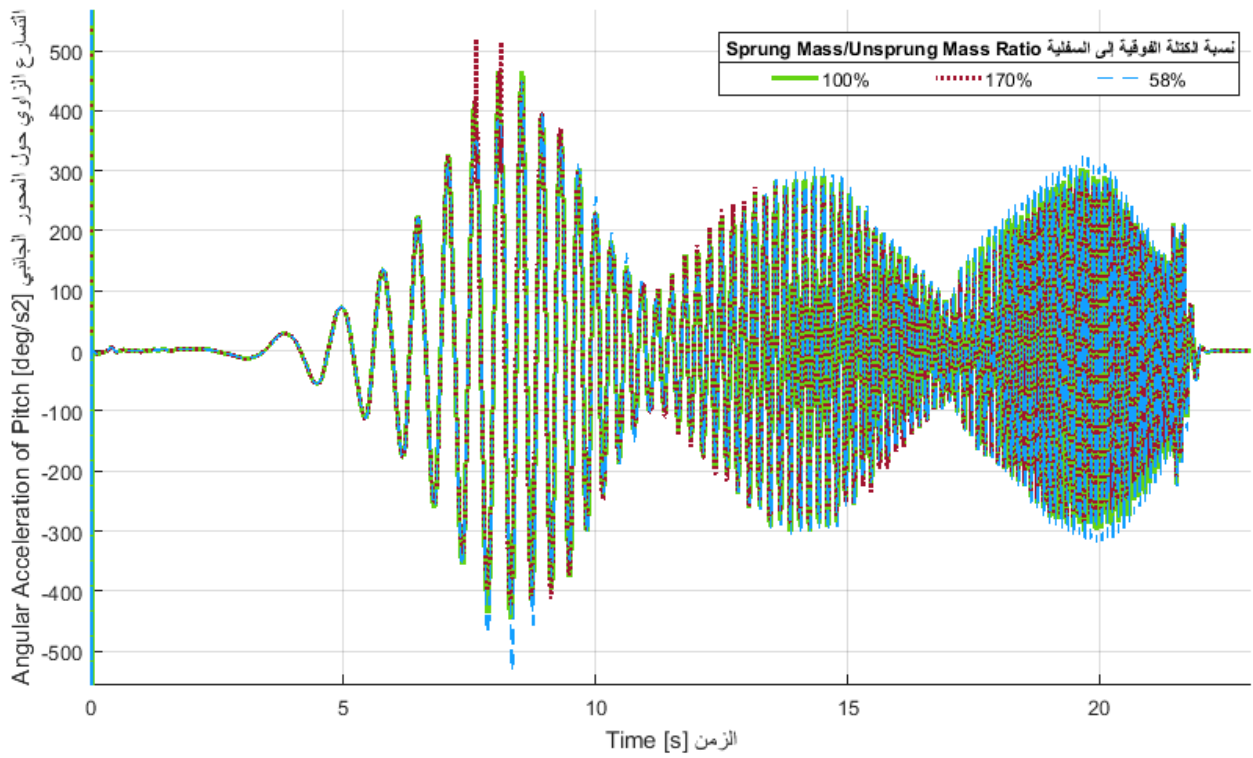


(d) قيم التسارع الشاقولي وفق (RMS)

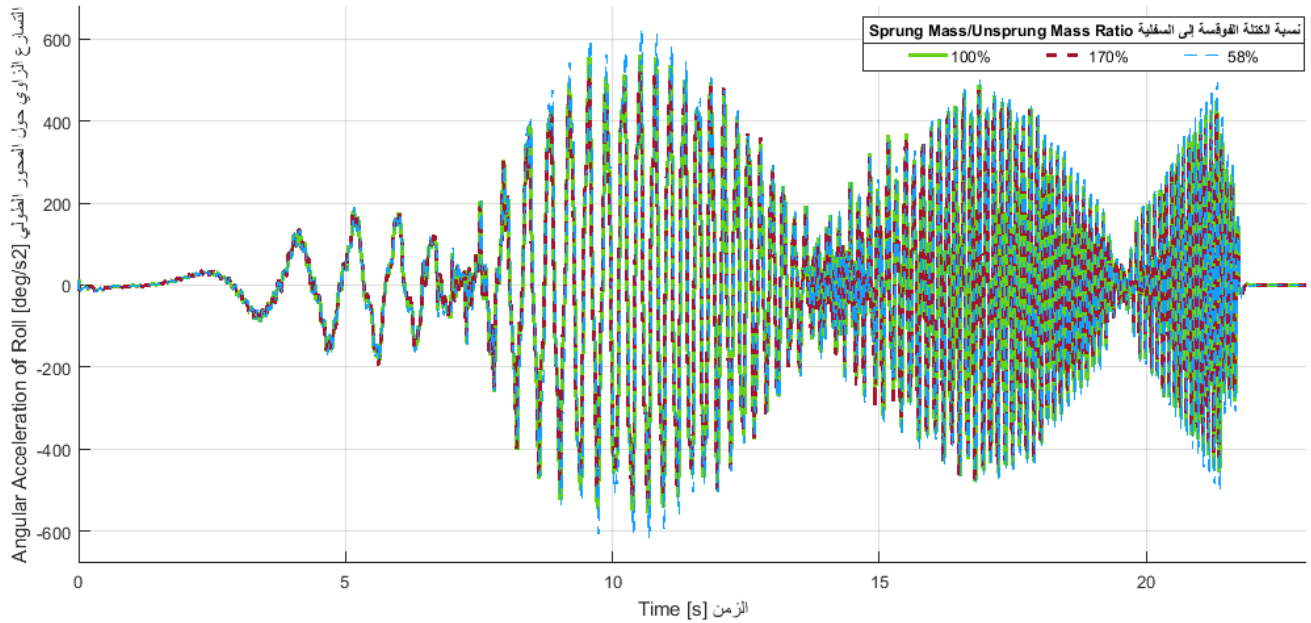
نسبة الكتلة العلوية إلى السفلية



(e) قيم الرجفة وفق (RMS)



(f) التسارع الزاوي حول المحور الجانبي (Pitch)



(g) التسارع الزاوي حول المحور الطولي (Roll)

الشكل (٦٦): المقارنة عند تعديل قيم نسبة الكتلة العلوية إلى السفلية

- [(a) الانتقال الشاقولي وفق الاختبار الأول والثاني (Pitch & Bounce) - (b) قيم التردد والسعة العظمى وفق الاختبار الأول والثاني (Pitch & Bounce) - (c) التسارع الشاقولي وفق الاختبار الأول والثاني (Pitch & Bounce) - (d) قيم التسارع الشاقولي وفق (RMS) - (e) قيم الرجفة وفق (RMS) - (f) التسارع الزاوي حول المحور الجانبي (Pitch) - (g) التسارع الزاوي حول المحور الطولي (Roll)]

- من الشكلين (a),(b) نلاحظ أن قيم الانتقال الشاقولي عند خفض نسبة الكتل (العلوية إلى السفلية) تزداد عند الارتداد فوق المطب وعند الترددات العالية نظرًا إلى سهولة تحريكها وتكون منخفضة نسبيًا عند الترددات المنخفضة، وكذلك الأمر من أجل ترددات الاهتزازات فإنها تزداد ازديادًا كبيرًا، وتكون السعة العظمى عالية عند المطب، أما عند رفع نسبة الكتل فإن قيم الانتقال الشاقولي تقل عند المطب وعند الترددات العالية وتنخفض ترددات الاهتزازات نظرًا إلى حصول قوة ضاغطة عالية نحو الأسفل من الكتلة العلوية ولانخفاض عطالة الكتلة السفلية، وتنخفض ترددات الاهتزازات انخفاضًا ملحوظًا وتنخفض السعة العظمى عند المطب.

- من الأشكال (c),(d),(e) نلاحظ أن قيم التسارع الشاقولي عند خفض نسبة الكتل تزداد ازديادًا كبيرًا عند المطب والترددات العالية وتنخفض انخفاضًا بسيطًا عند الترددات المنخفضة، وبالنسبة إلى الرجة فإنه يزداد إجمالًا بخفض نسبة الكتل، أما عند رفع نسبة الكتل فتتخفض قيم التسارع الشاقولي وتصبح السيارة أكثر ثباتًا عند المطب والترددات العالية أما عند الترددات المنخفضة فتزداد قيم التسارع، وبالنسبة إلى قيم الرجة تنخفض إجمالًا.

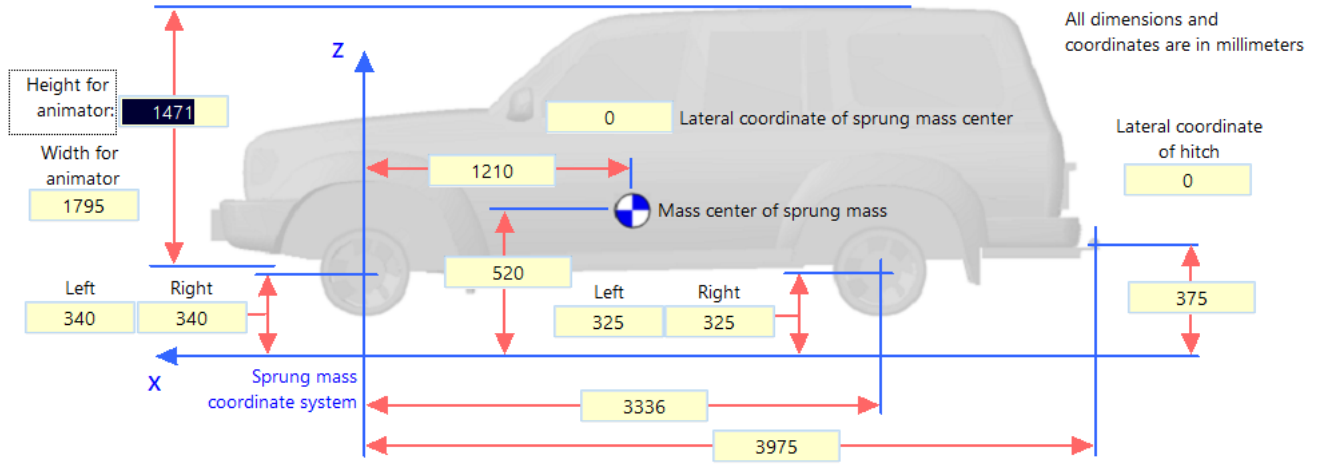
- من الشكلين (f),(g) نلاحظ تقارب قيم التسارعات الزاوية حول المحورين الطولي والجانبى إلى حدٍ ما عند رفع نسبة الكتل أو خفضها.

نستخلص أنه للحصول على راحة أكبر وثبات أكثر يجب علينا زيادة الكتلة العلوية وخفض الكتلة السفلية (أي رفع نسبة الكتلة العلوية إلى السفلية، ولكن كان التعديل مغيرًا للوزن الكلي للمركبة في هذه التجربة) شريطة توزيع الأوزان توزيعًا مناسبًا وخفض مركز ثقل السيارة.

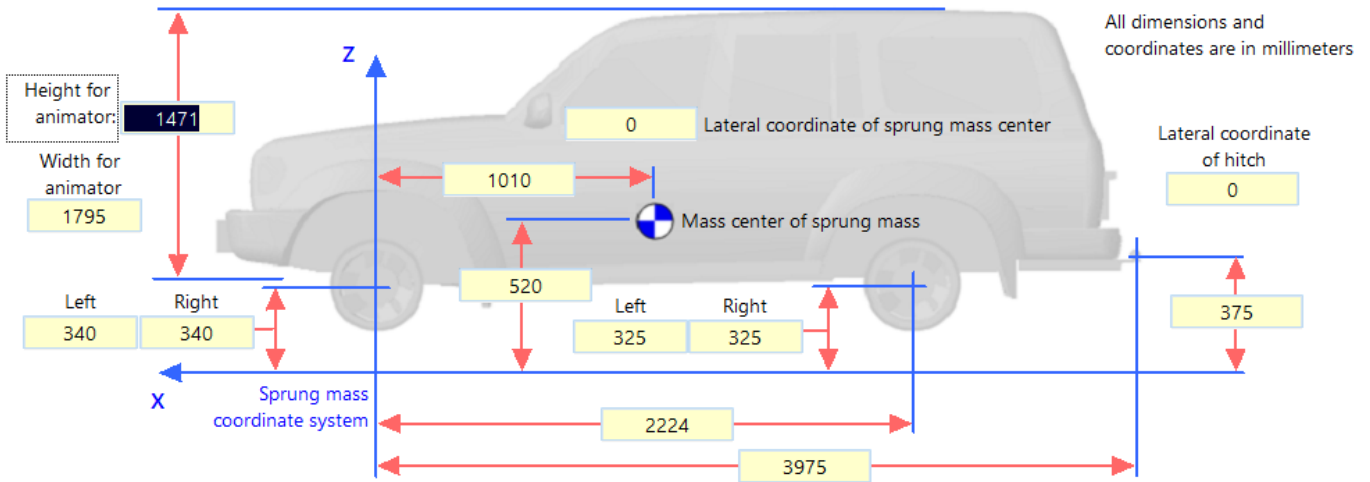
وللحصول على أفضل نسبة بين الكتلتين العلوية والسفلية مع ثبات مجموع الكتلتين (1530 Kg) لكلا الكتلتين، تم إجراء عدة تجارب برفع النسبة بين الكتلتين العلوية والسفلية مع الحفاظ على الوزن ثابت لمجموع الكتلتين عدة مرات وخفضها عدة مرات مع ثبات مجموع الكتلتين أيضًا، فتبين أنه برفع النسبة بين الكتلتين بحيث تصبح الكتلة العلوية (1430 Kg) والكتلة السفلية بوزن (100 Kg) تنخفض قيم التسارع حوالي (20%) وقيم الرجة عند المطب تنخفض حوالي (9%)، ومن غير المعقول أن نخفض من الكتلة السفلية أكثر من ذلك (حيث توزع الكتلة السفلية بالتساوي بين الأمام والخلف [50Kg : 50Kg]) توقفنا عند هذا الحد، وبالتالي كانت أفضل نسبة بين الكتلتين هي (1430/100=14.3) عند الحفاظ على وزن السيارة الكلي ثابت.

٧-٤- التجربة السابعة: دراسة تأثير طول قاعدة العجلات.

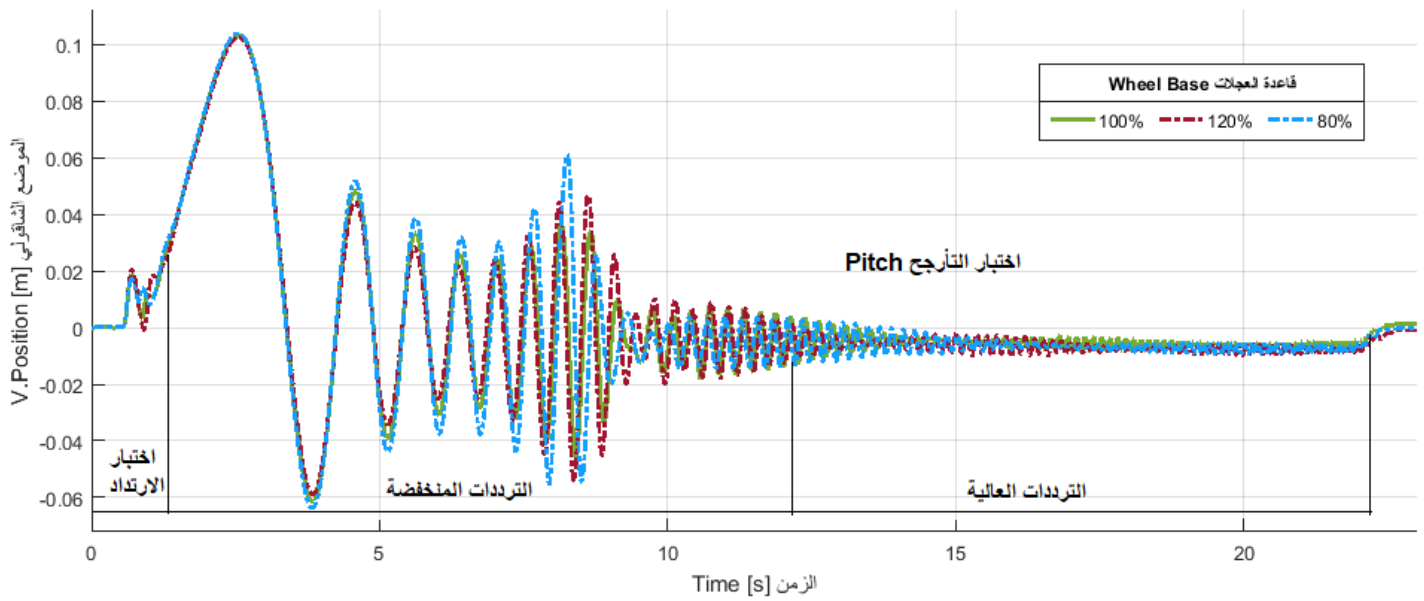
في هذه التجربة تركز الاهتمام على زيادة طول قاعدة العجلات مرة وبخفضه مرة أخرى ومقارنته مع القيمة الابتدائية من حيث الانتقال الشاقولي والتسارع الشاقولي والرجفة لمركز ثقل السيارة وفق الاختبار الأول (Bump) والاختبار الثاني (Pitch & Bounce) وحساب ترددات الاهتزازات، وحساب التسارعين الزاويين حول المحور الجانبي (Pitch) وحول المحور الطولي (Roll).



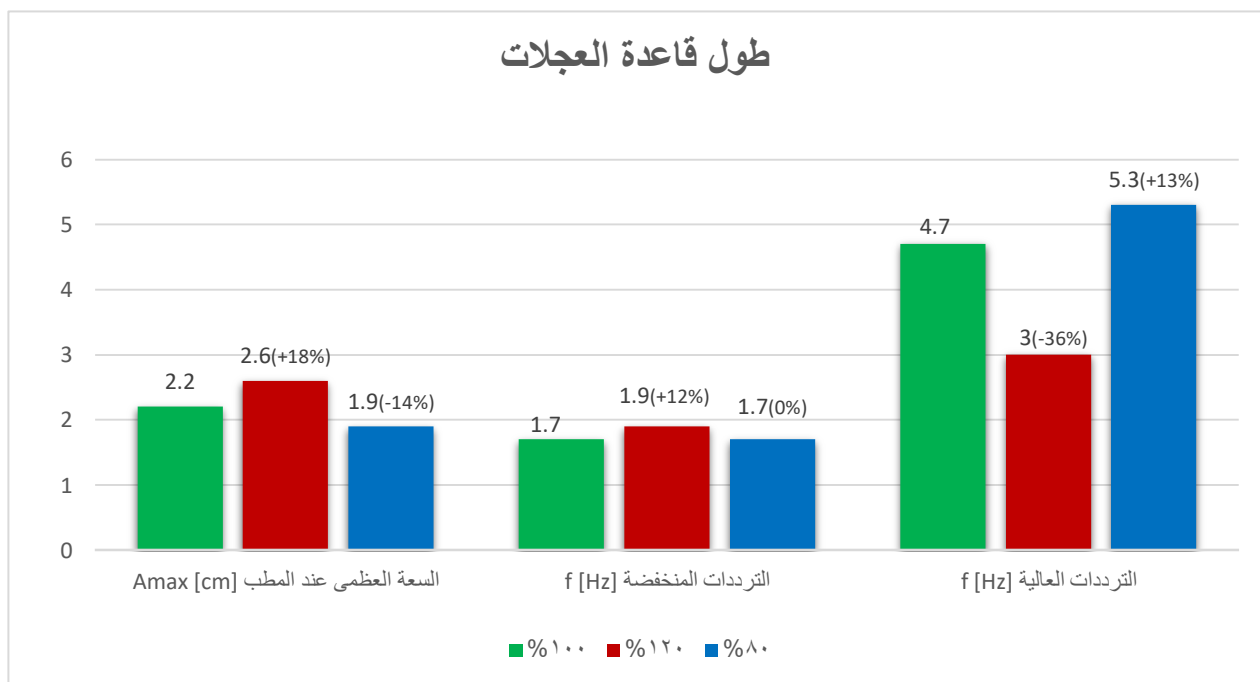
الشكل (٦٧): إجراء التعديل على قيم الأبعاد لقاعدة العجلات ورفعها بنسبة (20%)



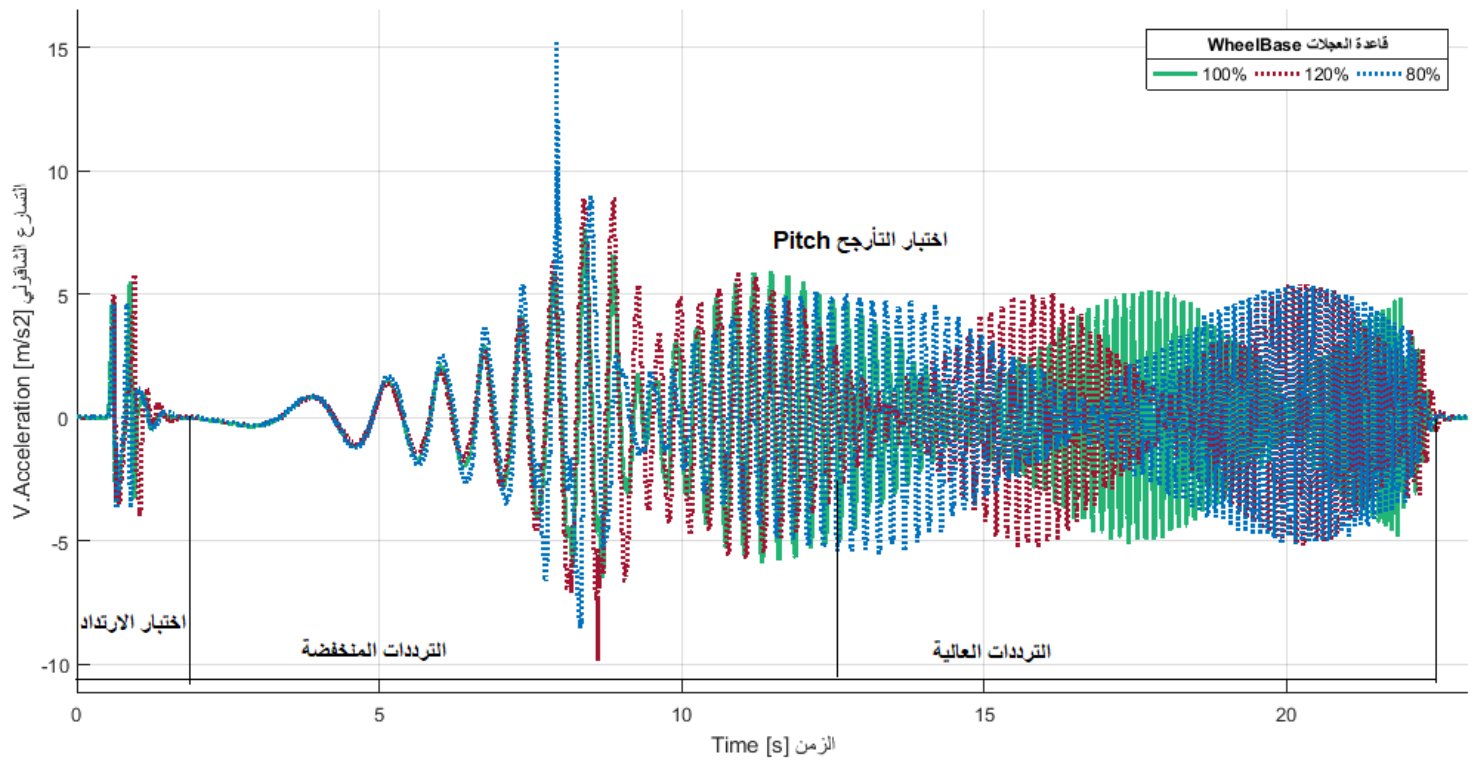
الشكل (٦٨): إجراء التعديل على قيم الأبعاد لقاعدة العجلات وخفضها بنسبة (20%)



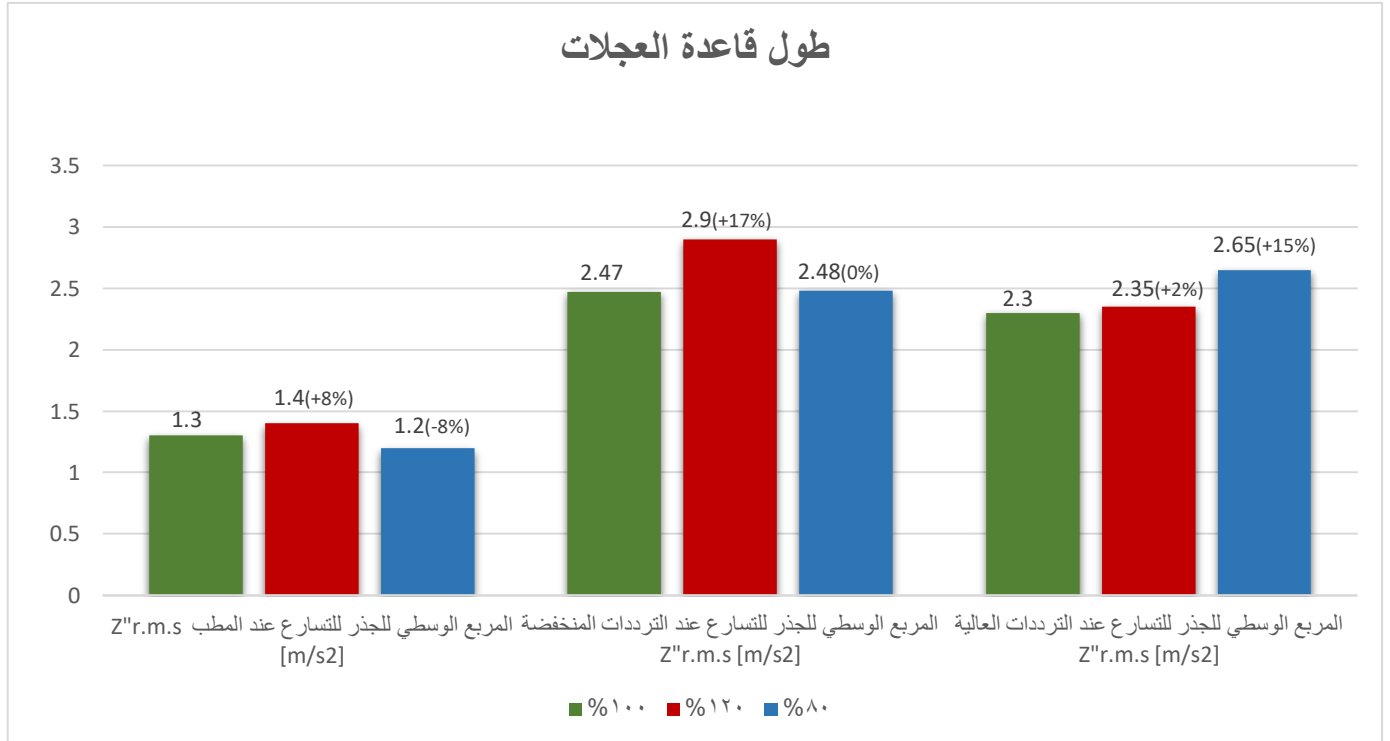
(a) الانتقال الشاقولي وفق الاختبار الأول والثاني (Pitch & Bounce)



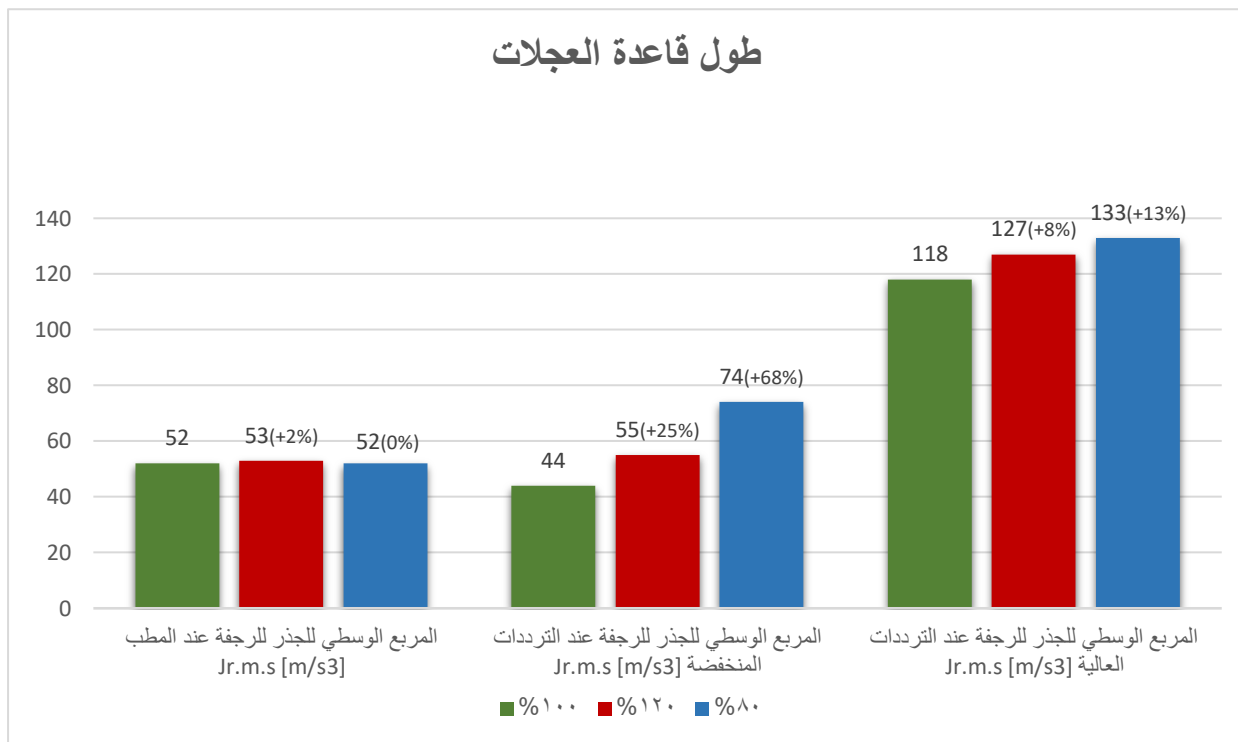
(b) قيم التردد والسعة العظمى وفق الاختبار الأول والثاني (Pitch & Bounce)



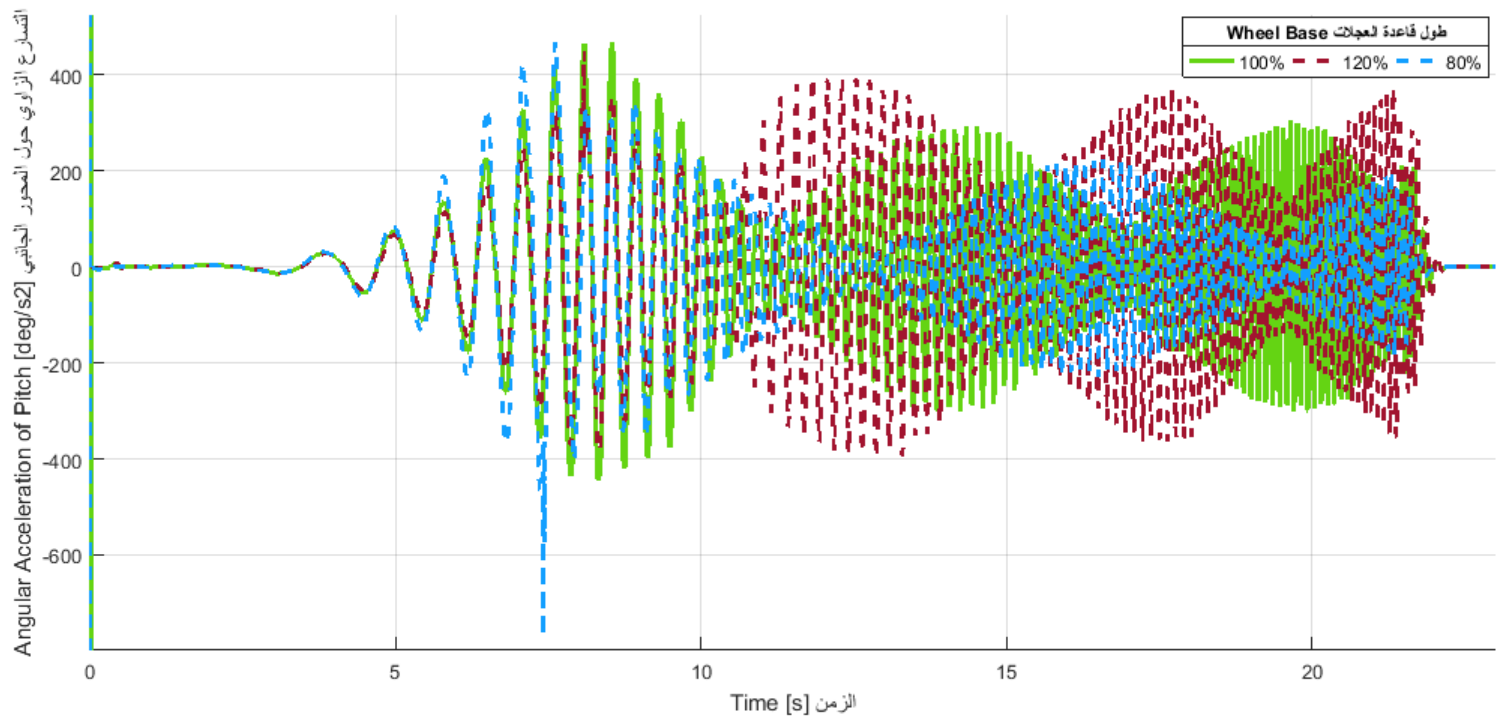
(c) التسارع الشاقولي وفق الاختبار الأول والثاني (Pitch & Bounce)



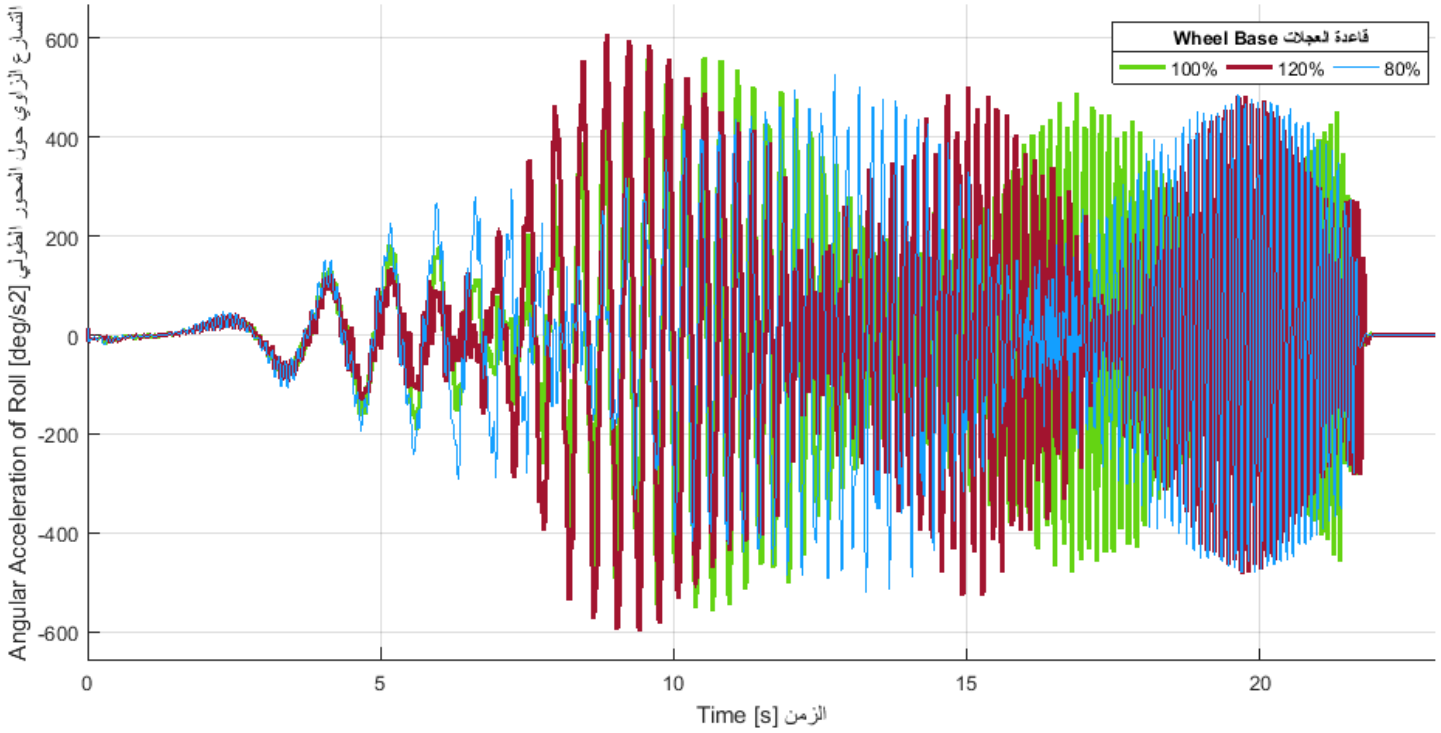
(d) قيم التسارع الشاقولي وفق (RMS)



(e) قيم الرجفة وفق (RMS)



(f) التسارع الزاوي حول المحور الجانبي (Pitch)



(g) التسارع الزاوي حول المحور الطولي (Roll)

الشكل (٦٩): المقارنة عند تعديل طول قاعدة العجلات

[(a) الانتقال الشاقولي وفق الاختبار الأول والثاني (Pitch & Bounce) - (b) قيم التردد والسعة العظمى وفق الاختبار الأول والثاني (Pitch & Bounce) - (c) التسارع الشاقولي وفق الاختبار الأول والثاني (Pitch & Bounce) - (d) قيم التسارع الشاقولي وفق (RMS) - (e) قيم الرجفة وفق (RMS) - (f) التسارع الزاوي حول المحور الجانبي (Pitch) - (g) التسارع الزاوي حول المحور الطولي (Roll)]

- من الشكلين (a), (b) نلاحظ أنه عند زيادة طول قاعدة العجلات تصبح قيم الانتقال الشاقولي عند الترددات المنخفضة أقل وتزداد السعة العظمى عند المطب، ولكن يصاحب ذلك زيادة في تردد الاهتزازات عند الترددات المنخفضة للطريق، أما عند الترددات المرتفعة للطريق فتتخفف قيم تردد الاهتزازات لجسم السيارة، وعند التقليل من طول قاعدة العجلات فإن السعة العظمى تنخفض عند المطب، وتزداد قيم الانتقال الشاقولي عند الترددات المنخفضة للطريق وتحدث حالة تداخل للاهتزازات الأمامية والخلفية فتزداد قيم الانتقال والتسارعات والرجفة، وتزداد ترددات الاهتزازات أيضًا عند الترددات العالية للطريق.
- ومن الأشكال (c), (d), (e) نلاحظ أنه عند زيادة طول قاعدة العجلات فإن قيم التسارع الشاقولي عند المطب تزداد، ونلاحظ تشكل انحصار لشكل منحنى التسارع بعدد أكبر ومن ثم انخفاض التردد للتسارع إجمالاً، أما عند خفض طول قاعدة العجلات فإن قيم التسارع الشاقولي تنخفض عند المطب وتزداد ازدياداً كبيراً عند الترددات المنخفضة لتردد الطريق،

ونلاحظ أيضًا تشكل انحصار لمنحني التسارع أقل ومن ثم ارتفاع التردد للتسارع، أما بالنسبة للرجفة فإنها ترتفع قليلًا مع زيادة طول قاعدة العجلات وترتفع كثيرًا عند خفضه.

- من الشكل (f) نلاحظ أنه عند زيادة طول قاعدة العجلات فإن قيم التسارع الزاوي حول المحور الجانبي تزداد عند الترددات العالية ويتشكل انحصار أكثر في شكل منحني التسارع ومن ثم ينخفض تردد التسارع الزاوي، أما عند خفض طول قاعدة العجلات فيحدث لدينا حالة تجاوز أعظمي في التموجات الطويلة للطريق ويتشكل انحصارات أقل في منحني التسارع الزاوي عند الترددات العالية ومن ثم يزداد تردد التسارع الزاوي. ومن الشكل (g) نلاحظ أنه عند زيادة طول قاعدة العجلات فإن قيم التسارع الزاوي حول المحور الطولي تنخفض عند الترددات المنخفضة ويتشكل انحصار أكثر في منحني التسارع عند الترددات العالية للطريق ومن ثم ينخفض تردد التسارع الزاوي، أما عند خفض طول قاعدة العجلات فيزداد التسارع الزاوي في التموجات الطويلة للطريق ويتشكل انحصار أقل في منحني التسارع الزاوي عند الترددات العالية ومن ثم يرتفع تردد التسارع الزاوي.

ملاحظة:

- استنتجت زيادة تردد التسارعات أو نقصانها بيانيًا وحاسوبيًا في برنامج (Matlab)، وذلك كما ذكرناه في الملاحظات في بداية الفصل الحالي، حيث تم استخدام خصائص (Scope Function) في تحليل البيانات وإعطاء التردد لتابع اهتزازي ضمن مجال زمني معين.
- لم نستطع حساب القيمة المثالية لطول قاعدة العجلات لأنها لم تقدم تحسنًا في قيم التسارع والرجفة بشكل واضح.

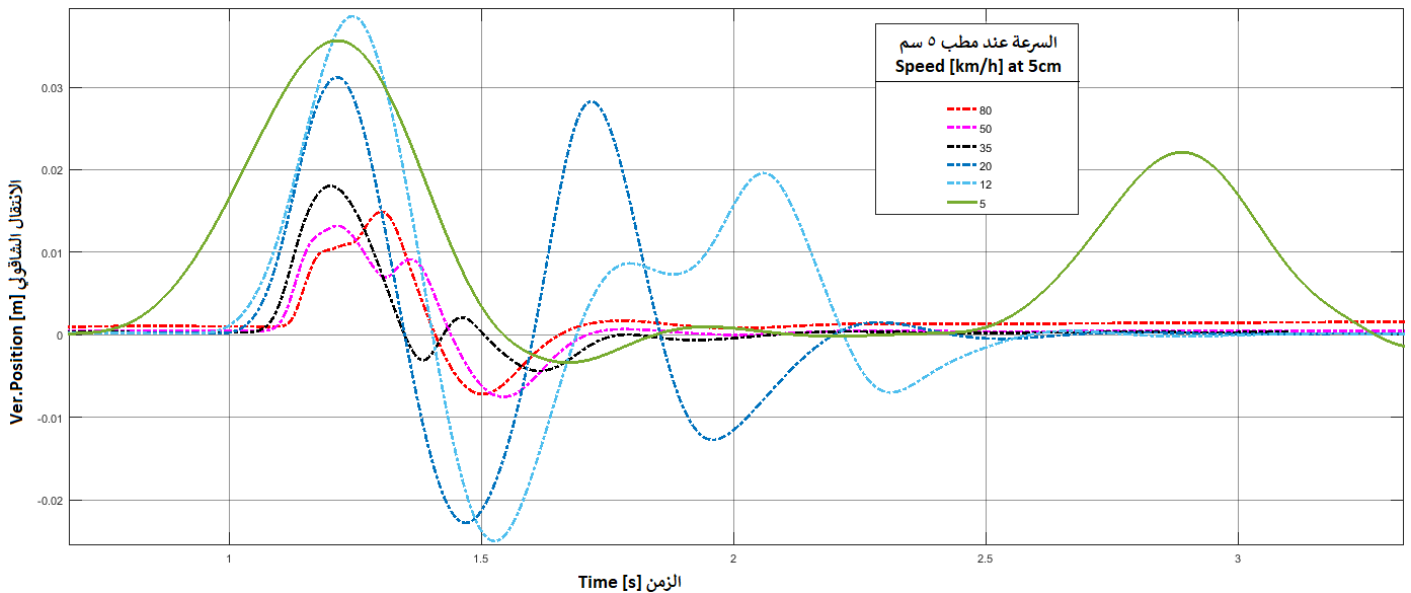
نستخلص من التجربة أن زيادة طول قاعدة العجلات تساعد على التخلص من حالة التجاوز الأعظمي وتقلل من التردد الحاصل عند أطوال الموجات القصيرة، ولكن الزيادة المفرطة تزيد من الرجفة، أما عند خفض طول قاعدة العجلات فسيحدث حالة تجاوز أعظمي عند الترددات المنخفضة ويصبح تردد التسارعات أعلى خاصةً عند أطوال الموجات القصيرة.

٨-٤- التجربة الثامنة: دراسة تأثير سرعة المركبة على أداء نظام التعليق.

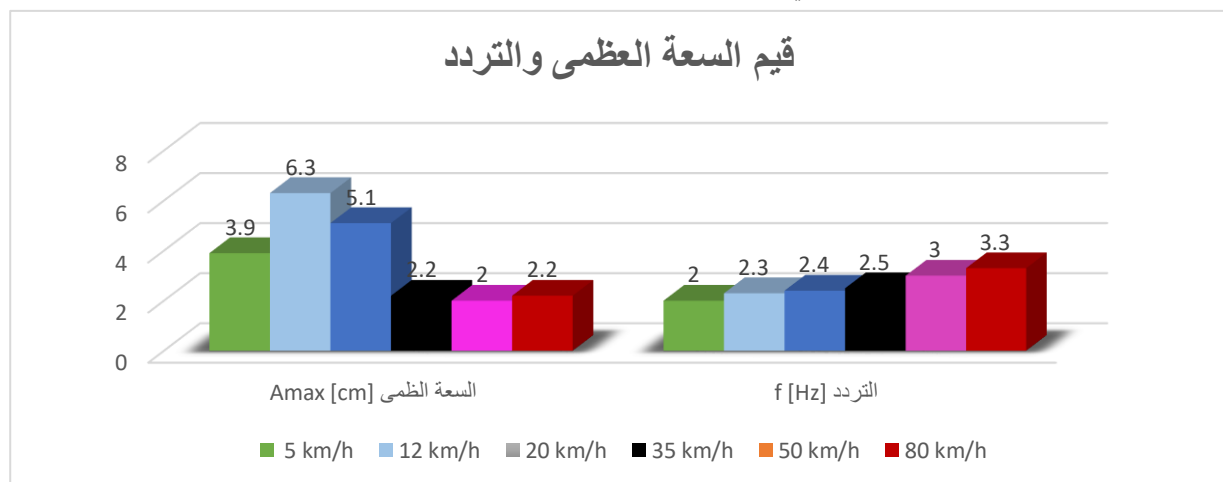
في هذه التجربة تم اختبار أداء نظام التعليق عند سرعات مختلفة للمركبة لفهم مدى تأثير السرعة على عمل نظام التعليق وندرك في أي مجال للسرعة تتحقق معايير راحة أفضل، وتم ذلك بإجراء تجارب على مطبين وبارتفاعين (5cm - 12cm) وبسرعات مختلفة (5 - 12 - 20 - 35 - 50 - 80 [km/h])، ثم تم اختبار المركبة على الطريق المتموج طولياً بسرعتي (10 - 60 [km/h]) ومقارنتها مع قيم تجربة سابقة حصلنا على قيمها عند السرعة (35 km/h).

أ- اختبار المركبة على مطب بارتفاع (5 cm) وبسرعات مختلفة:

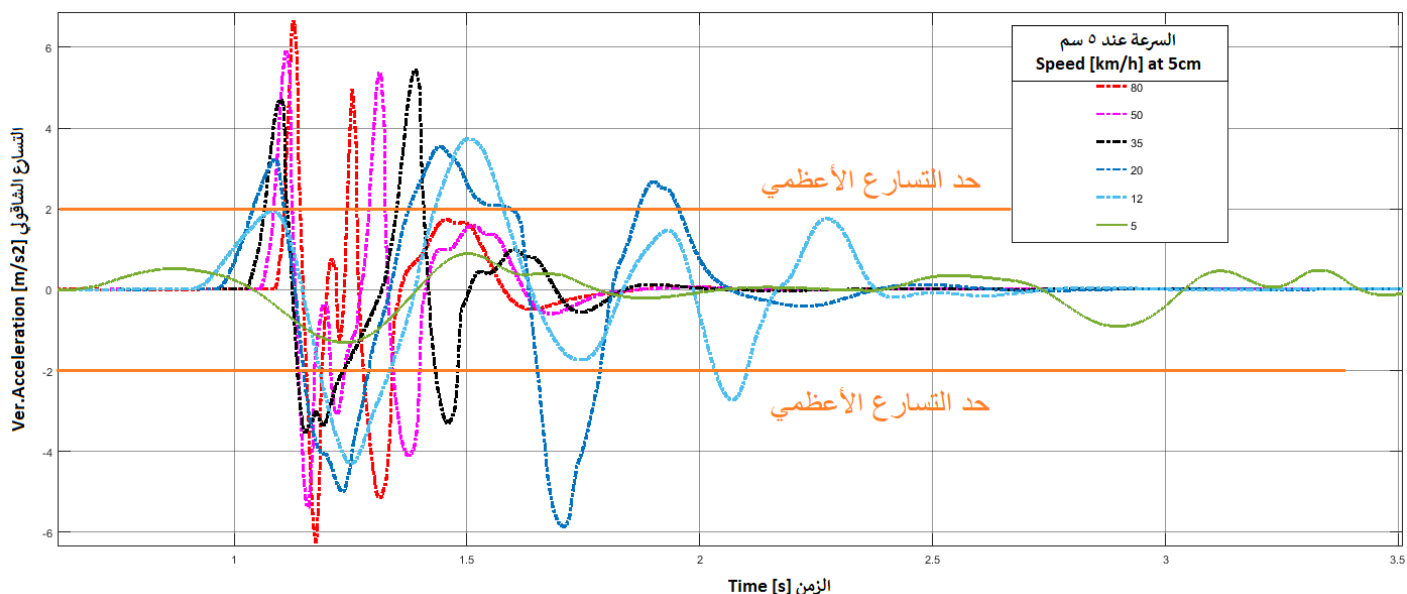
تم اختبار نظام التعليق للسيارة المختارة على مطب بارتفاع (5 cm) وعند السرعات التالية: (5 - 12 - 20 - 35 - 50 - 80 [km/h])، واستخرجنا مخططات الانتقال الشاقولي والتسارع الشاقولي وحساب الرجفة والتردد والسعة العظمى لمركز ثقل السيارة، وكانت النتائج كالآتي:



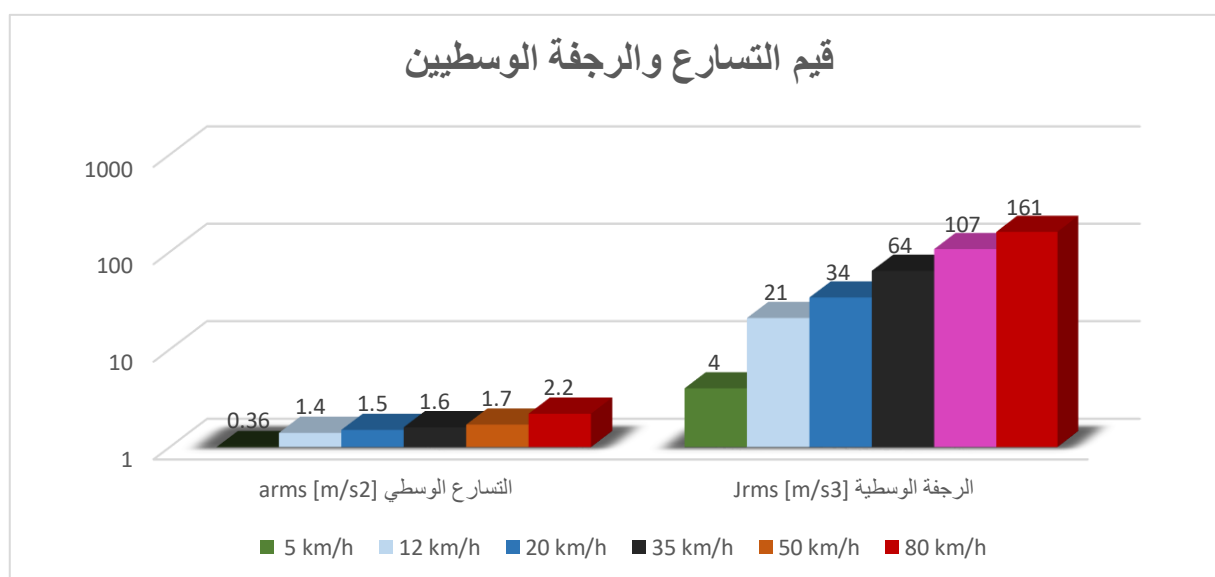
(a) الانتقال الشاقولي وفق الاختبار الأول (Bounce) بارتفاع مطب (5 cm)



(b) قيم التردد والسعة العظمى وفق الاختبار الأول (Bounce) بارتفاع مطب (5 cm)



(c) التسارع الشاقلوي وفق الاختبار الأول (Bounce) بارتفاع مطب (5 cm)



(d) قيم التسارع الشاقلوي وقيم الرجفة وفق (RMS) بارتفاع مطب (5 cm)

الشكل (٧٠): تأثير سرعة المركبة على أداء نظام التعليق بالسير على مطب بارتفاع (5cm) وبسرعات مختلفة

[(a) الانتقال الشاقلوي وفق الاختبار الأول (Bounce) - (b) قيم التردد والسعة العظمى وفق الاختبار الأول (Bounce) - (c) التسارع الشاقلوي وفق الاختبار الأول (Bounce) - (d) قيم التسارع الشاقلوي وقيم الرجفة وفق (RMS)]

- من الشكلين (a), (b) يمكن ملاحظة تفاوت قيم السعات العظمى للانتقال الشاقلوي عند السرعات المختلفة للمركبة مع ميل هذه القيم للانخفاض كلما زادت سرعة المركبة، قد يعود السبب في ذلك لاختلاف القوة المؤثرة على نظام التعليق عند المسير على المطب بسرعات مختلفة، فهي تزداد بزيادة السرعة، وبالتالي يزداد انضغاط النوابض مع زيادة القوة فيتقلص نظام التعليق بشكل أكبر، وأيضًا مع زيادة السرعة ينحسر الوقت اللازم لتحريك جسم السيارة

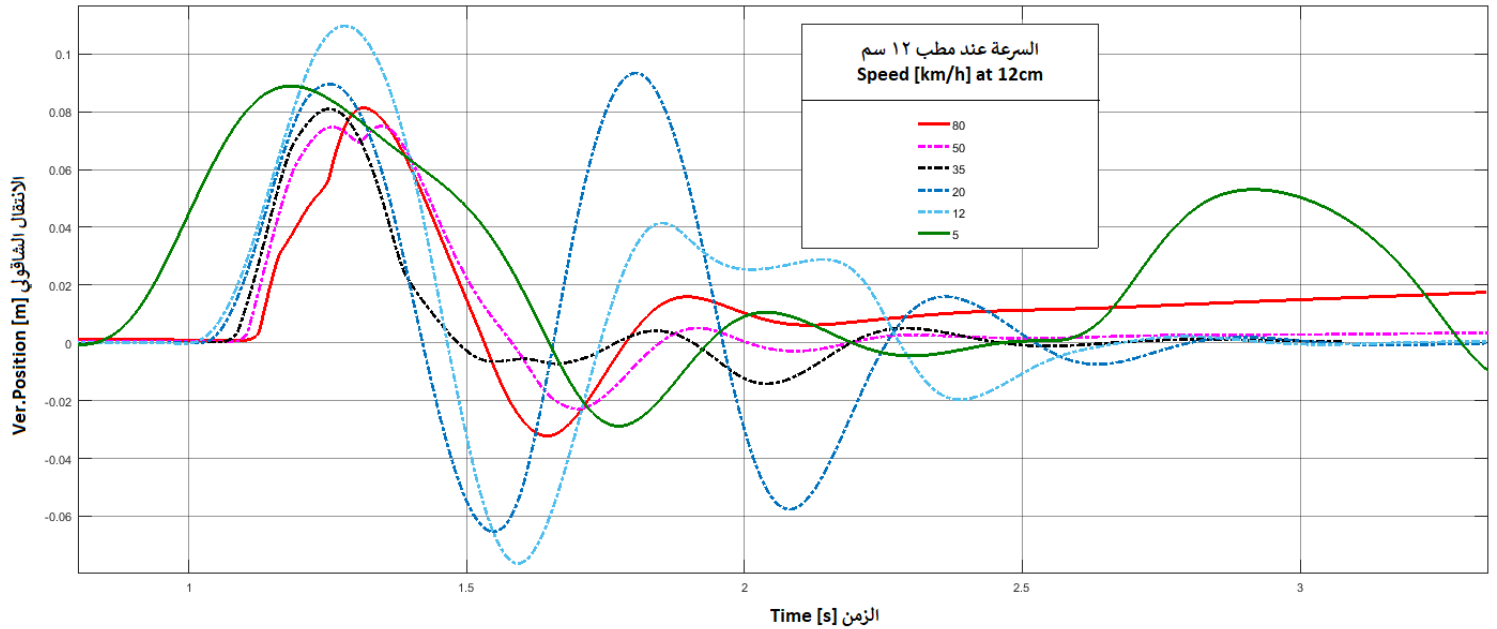
نظرًا لعطالته، ويستمر ذلك الانخفاض في قيم الانتقال إلى أن نصل إلى سرعة يحصل فيها تراكب في الاهتزازات الناتجة عن المحور الأمامي مع الاهتزازات الناتجة عن المحور الخلفي، ويحدث زيادة في الانتقال لمركز الثقل، ولكن يلاحظ أنه عند السرعة المتدنية جدًا (5km/h) يكون الارتفاع أقل مما هو عليه عند السرعة التي تليها قد يعود السبب لعدم تشكل قوة كافية لرفع جسم السيارة، وأيضًا نلاحظ ارتفاع قيم التردد مع زيادة السرعة وبالتالي يصبح نظام التعليق أكثر جساءة.

- ومن الشكلين (d)، (c) نلاحظ ارتفاع قيم التسارع الوسطي والرجفة مع زيادة السرعة، وهذا ما يفسر الشعور بالصدمة القوية عند تجاوز تغيرات الطريق بسرعة عالية، على الرغم أن الناظر إلى السيارة من الخارج يظنها أكثر ثباتًا، ويفسر ذلك بعدم إتاحة الوقت المناسب لتحويل نظام التعليق الصدمة إلى اهتزازات ومن ثم تخميدها، حيث لا يتاح لنظام التعليق رفع كتلة جسم السيارة والتغلب على عطالته وبالتالي انضغاط نظام التعليق بشكل كبير، وأيضًا نلاحظ أن القيادة على السرعات فوق (٥٠ كم/سا) تصبح مزعجة إلى أبعد الحدود.

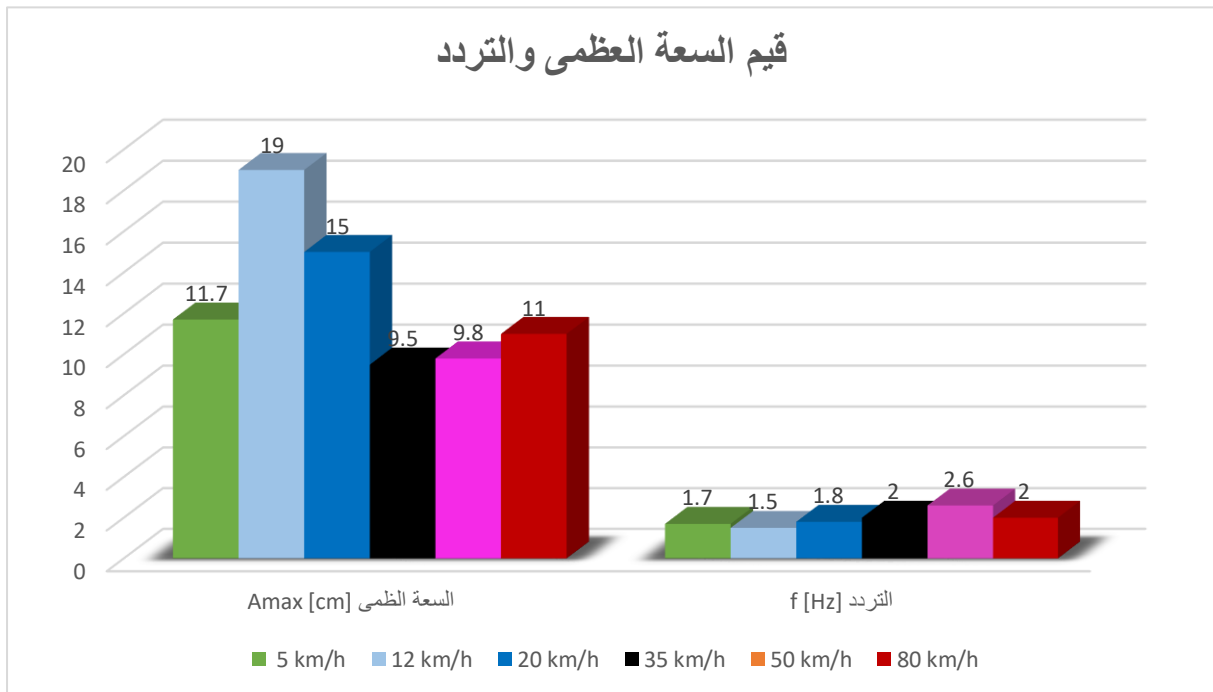
وبالتالي يمكن القول إنه عند المسير فوق مطب بارتفاع (5 cm) وعلى سرعات عالية ينضغط نظام التعليق بشكل كبير ولا يرفع الكتلة العلوية بشكل مناسب فينخفض أدائه نظرًا للراحة وتصبح القيادة مزعجة بشكل كبير وإذا استمرت زيادة السرعة سنصل لحالة تراكب الاهتزازات لقرب اهتزازات المحاور الأمامية والخلفية من بعضها وتداخلها، وعند المسير بسرعات منخفضة تتحسن معايير الراحة مع ميل السيارة للانتقال الشاقولي بشكل أكبر وذلك لإتاحة الوقت الكافي لرفع الكتلة العلوية وبالتالي خفض قيم التسارع والرجفة، وعند المسير بسرعة منخفضة جدًا ينخفض الارتفاع الشاقولي لانخفاض قليلًا لعدم تشكل قوة رفع عالية وتكون قيم التسارع والرجفة متدنية.

ب- اختبار المركبة على مطب بارتفاع (12 cm) وبسرعات مختلفة:

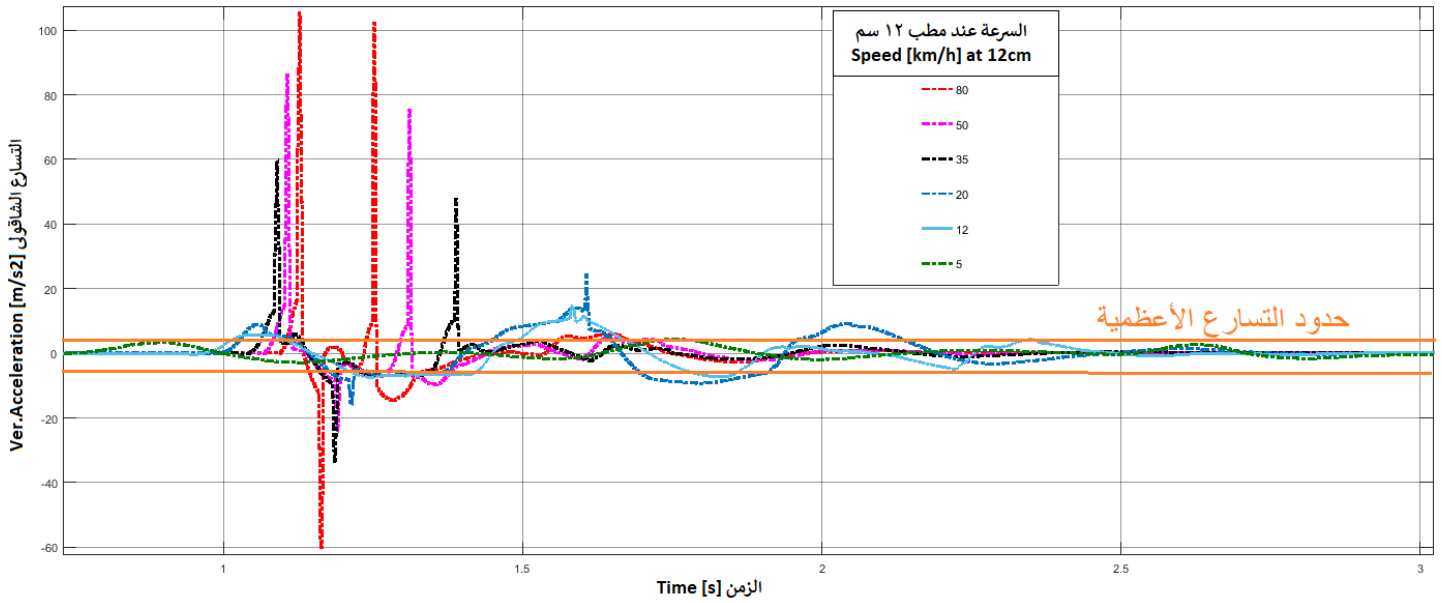
تم اختبار نظام التعليق للسيارة المختارة على مطب بارتفاع (12 cm) وعند السرعات التالية: (5 - 12 - 20 - 35 - 50 - 80 [km/h])، واستخرجنا مخططات الانتقال الشاقولي والتسارع الشاقولي وحساب الرجفة والتردد والسعة العظمى، وكانت النتائج كالآتي:



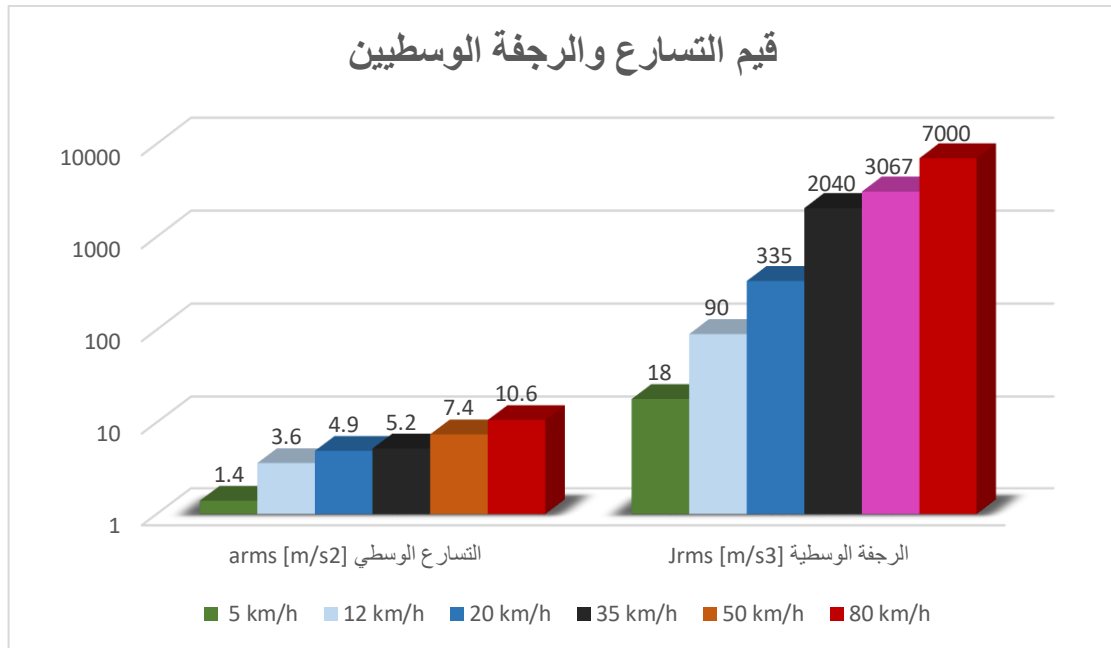
(a) الانتقال الشاقولي وفق الاختبار الأول (Bounce) بارتفاع مطب (12 cm)



(b) قيم التردد والسعة العظمى وفق الاختبار الأول (Bounce) بارتفاع مطب (12 cm)



(c) التسارع الشاقولي وفق الاختبار الأول (Bounce) بارتفاع مطب (12 cm)

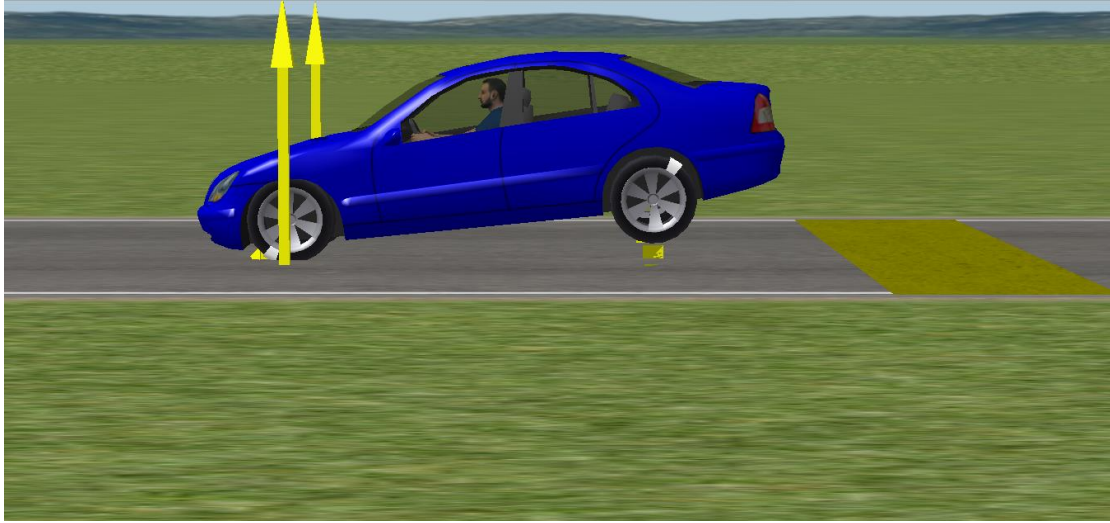


(d) قيم التسارع الشاقولي وقيم الرجفة وفق (RMS) بارتفاع مطب (12 cm)

الشكل (٧١): تأثير سرعة المركبة على أداء نظام التعليق بالسير على مطب بارتفاع (12cm) وبسرعات مختلفة

[(a)] الانتقال الشاقولي وفق الاختبار الأول (Bounce) - قيم التردد والسعة العظمى وفق الاختبار الأول
 (c) - التسارع الشاقولي وفق الاختبار الأول (Bounce) - قيم التسارع الشاقولي وقيم الرجفة
 وفق (RMS)]

نلاحظ من قيم التسارع والرجفة وفقدان السيطرة على المركبة في السرعات (35 km/h) وأعلى منها نظرًا لارتفاع السيارة وقفزها عن الطريق، كما تظهره الصورة أدناه الملتقطة أثناء التجربة:



الشكل (٧٢): فقدان السيطرة على المركبة عند السير على مطب بارتفاع (12cm) وبسرعات عالية

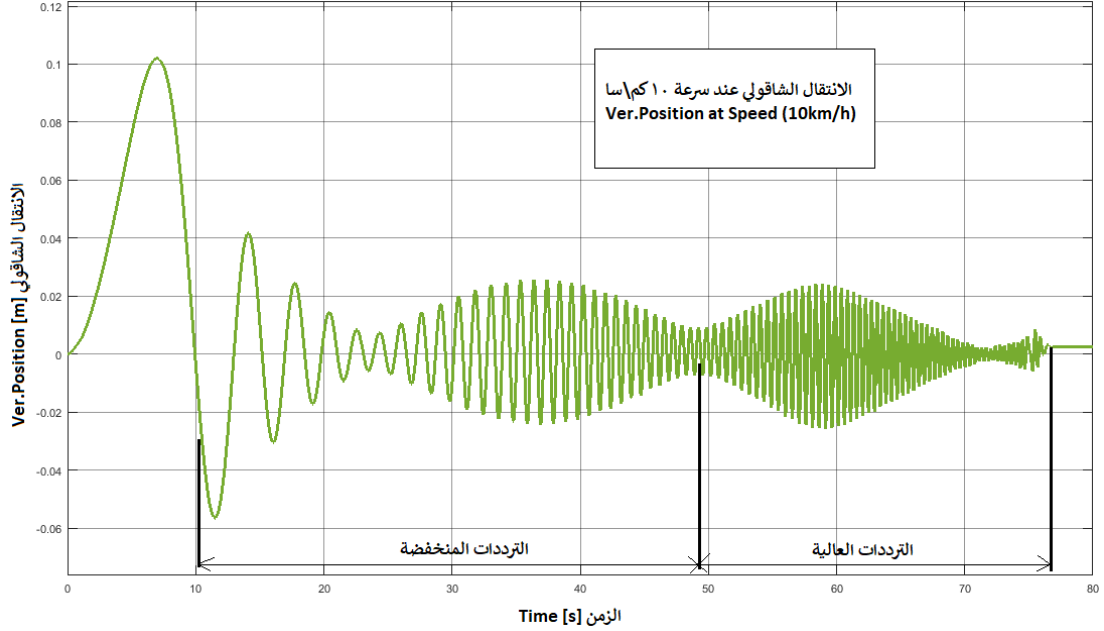
كما نلاحظ تحسن معايير الراحة مع انخفاض السرعة، ونلاحظ أنه عند سرعة معينة (مثلاً 20 km/h) وعند المطبين (5cm – 12 cm) تزداد قيم السعة العظمى والتسارع والرجفة مع ازدياد ارتفاع المطب، وذلك لارتفاع القوة المؤثرة على المركبة.

وبالتالي نستنتج من التجربتين أنه مع زيادة السرعة ينخفض أداء نظام التعليق من منظور الراحة مع الشعور بثبات السيارة حتى ارتفاعات معينة ومتدنية للمطبات، وعند زيادة الارتفاع للمطبات نفقد السيطرة على المركبة وترتفع قيم التسارع والرجفة الشاقوليين بشكلٍ خطير، وعند السرعات المنخفضة تتحسن معايير الراحة مع انزياح شاقولي أكبر كلما انخفضت السرعة حتى نصل لسرعات متدنية يعود الانزياح الشاقولي للتراجع فيها لعدم تشكل قوة كافية لرفع وزن المركبة.

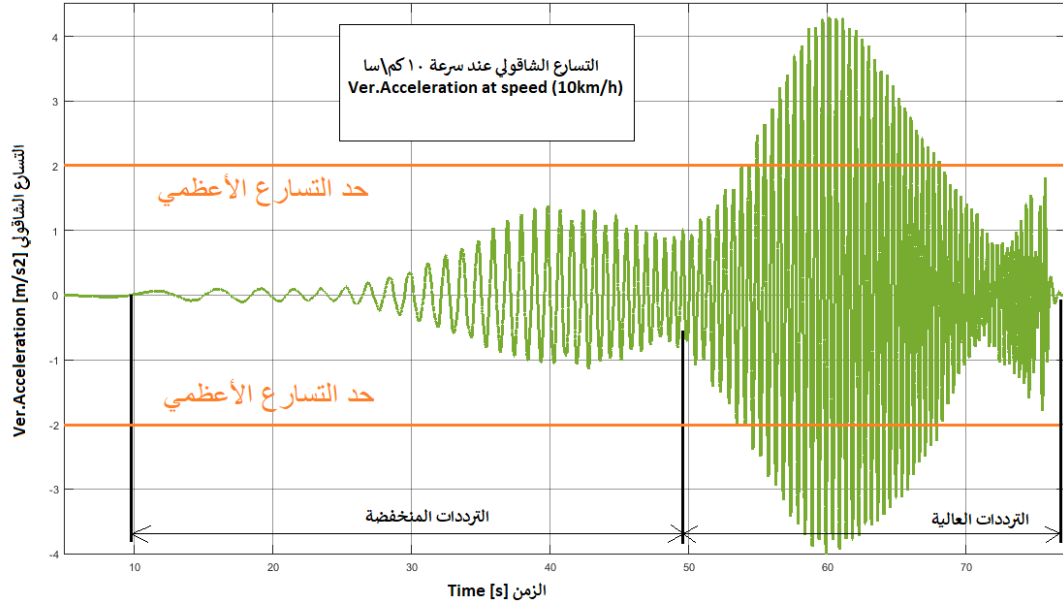
وخلاصته أن العاملين الرئيسيين لأداء نظام التعليق هما الوقت اللازم لامتصاص الصدمة والقوة المؤثرة عليه، فعندما تكون السرعة متدنية (5Km/h) يكون هناك وقت كافٍ ولكن القوة المؤثرة منخفضة لا تستطيع رفع جسم المركبة بشكل كبير فلا يكون الانزياح كبير وتكون قيم التسارع والرجفة منخفضة، وعند زيادة السرعة تدريجيًا (5 → 12 → 20 Km/h) تزداد القوة المؤثرة مع وفرة في الوقت في البداية للتغلب على عطالة جسم السيارة فتبدأ بانزياح عالٍ ومع الاستمرار في زيادة السرعة ينخفض الانزياح تدريجيًا، وبلاستمرار في زيادة السرعة (35-50 Km/h) عند المطب (5 cm) يقل الوقت اللازم لامتصاص الصدمة وتزداد القوة المؤثرة فيتقلص نظام التعليق دون إمكانية رفع جسم السيارة لعطالته فيظهر وكأنه ثابت ولكن يرافق ذلك ارتفاع قيم التسارع والرجفة، حتى نصل إلى سرعات (80 km/h) عند المطب (5 cm) تظهر حالة تتداخل فيه الاهتزازات الأمامية مع الخلفية، أما عند زيادة ارتفاع المطب (12 cm) وعند سرعات متوسطة وعالية تصبح القوة المؤثرة عالية جدًا فنفقد السيطرة على السيارة.

ج- اختبار السيارة على الطريق المتموج طولياً وبسرعات مختلفة:

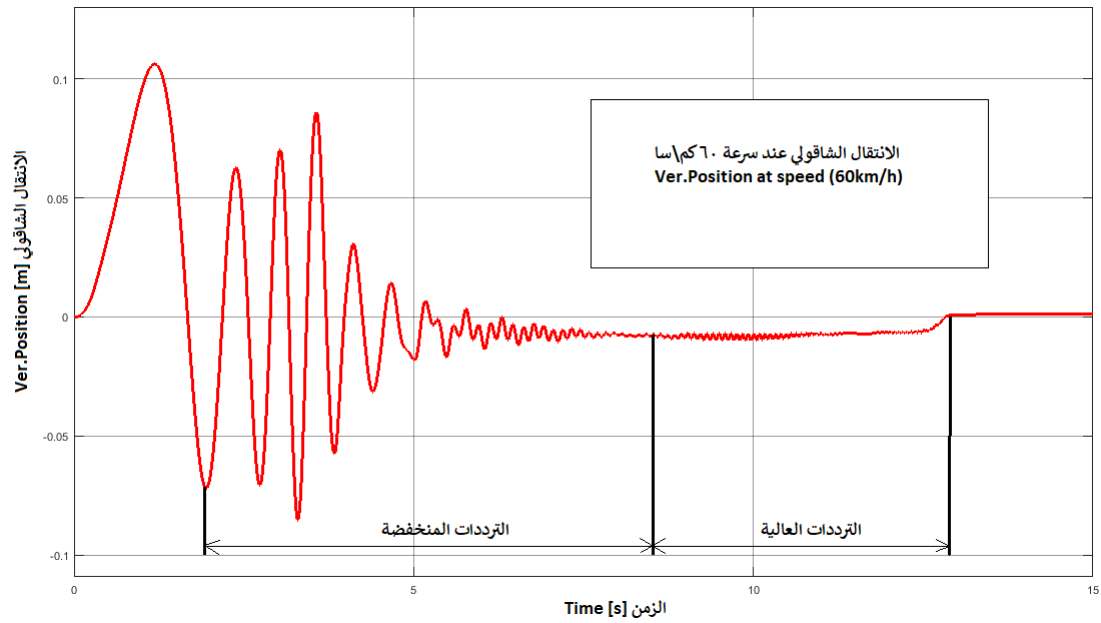
هنا تم اختبار المركبة عند المسير على الطريق المتموج طولياً، الاختبار الثاني (Bounce and Pitch)، وبسرعتي (10 - 60 [km/h]) ومقارنتها مع القيم الناتجة عن تجربة سابقة (في التجربة الثانية) عند السرعة (35 km/h)، واستخلصنا قيم الانتقال والتسارع والرجفة والتردد وكانت النتائج كالآتي:



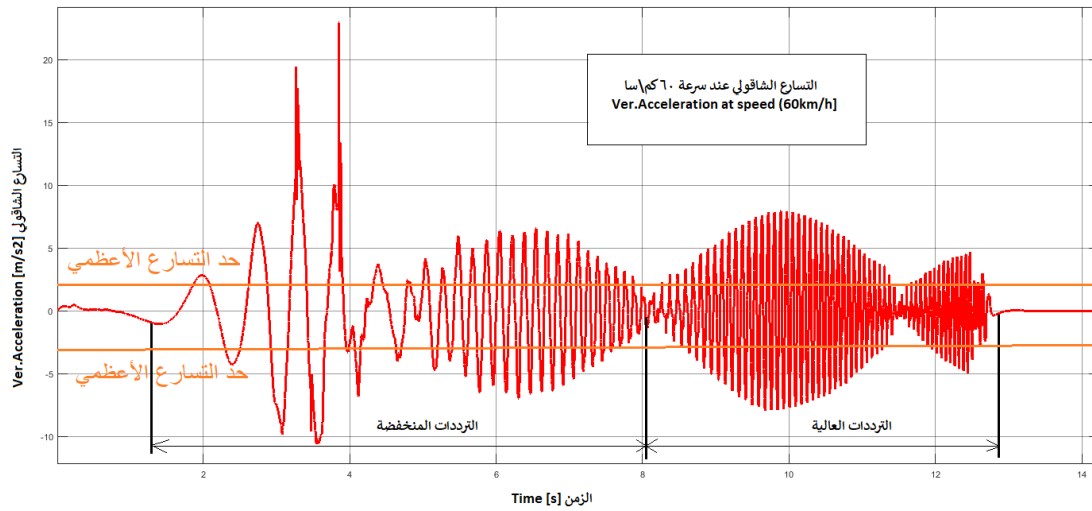
(a) الانتقال الشاقولي وفق الاختبار الثاني (Bounce and Pitch) وبسرعة (10 km/h)



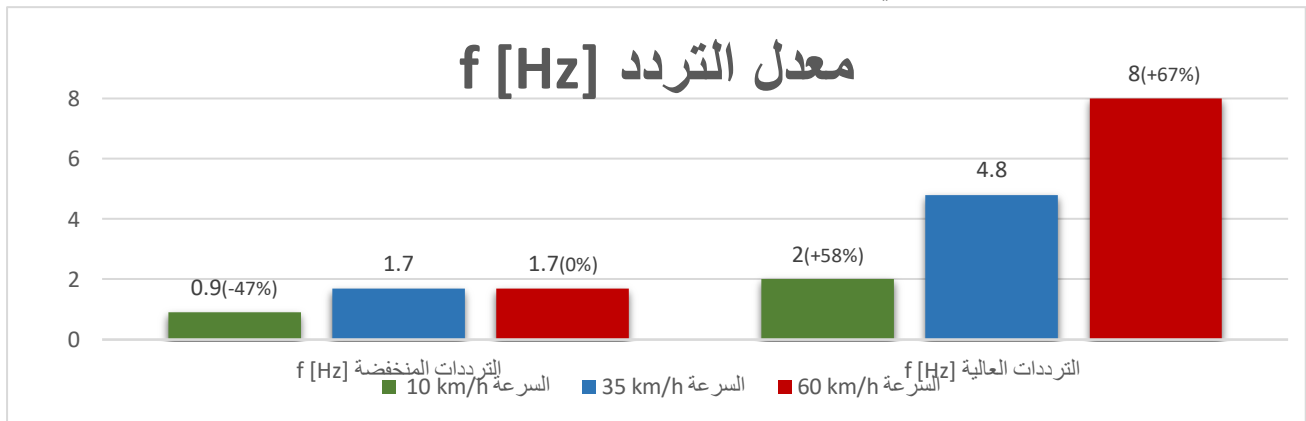
(b) التسارع الشاقولي وفق الاختبار الثاني (Bounce and Pitch) وبسرعة (10 km/h)



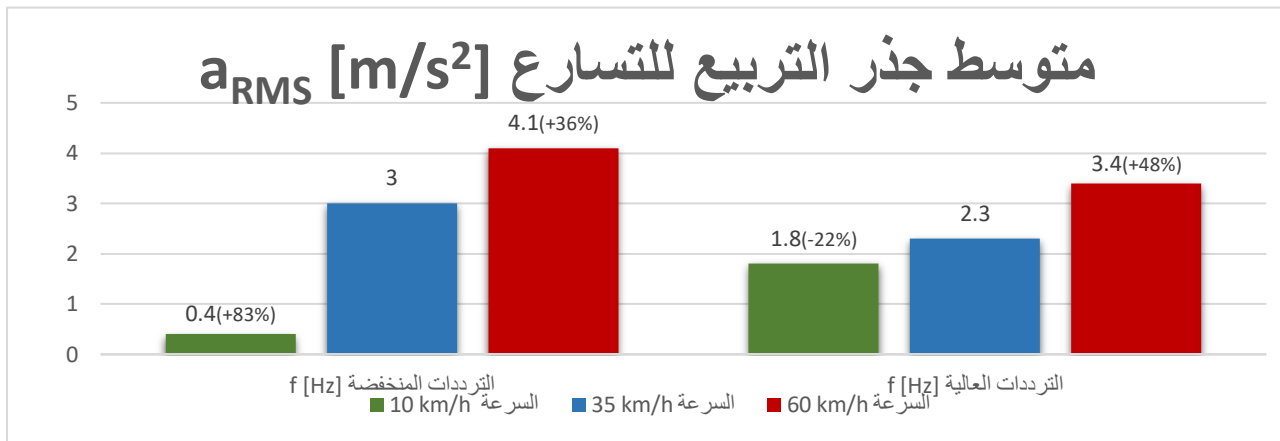
(c) الانتقال الشاقولي وفق الاختبار الثاني (Bounce and Pitch) وبسرعة (60 km/h)



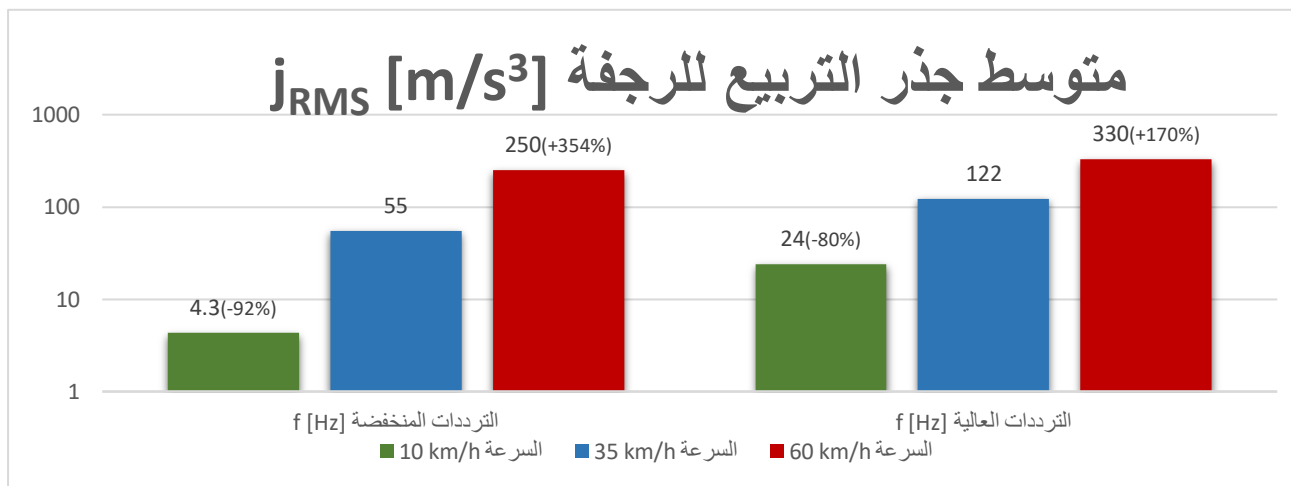
(d) التسارع الشاقولي وفق الاختبار الثاني (Bounce and Pitch) وبسرعة (60 km/h)



(e) معدل التردد



(f) متوسط جذر التربيع لقيم التسارع الشاقولي



(g) متوسط جذر التربيع لقيم الرجفة

الشكل (٧٣): تأثير سرعة المركبة على أداء نظام التعليق بالسير على طريق متموج طويلًا وبسرعات مختلفة

[(a) الانتقال الشاقولي وفق الاختبار الثاني (Bounce and Pitch) وبسرعة (10 km/h) - (b) التسارع الشاقولي وفق الاختبار الثاني (Bounce and Pitch) وبسرعة (10 km/h) - (c) الانتقال الشاقولي وفق الاختبار الثاني (Bounce and Pitch) وبسرعة (60 km/h) - (d) التسارع الشاقولي وفق الاختبار الثاني (Bounce and Pitch) وبسرعة (60 km/h) - (e) معدل التردد - (f) متوسط جذر التربيع لقيم التسارع الشاقولي - (g) متوسط جذر التربيع لقيم الرجفة]

نلاحظ من النتائج أن قيم السرعة والرجفة تزداد مع زيادة السرعة إجمالاً، رغم أننا نرى أن قيم الانتقال الشاقولي تظهر وكأنها دون تغير واضح عند السرعة العالية وبترددات عالية ويرافق ذلك مضاعفة في قيم التردد، وأيضاً معايير الراحة تتحسن مع انخفاض السرعة بشكل كبير.

٤-٩- تلخيص النتائج:

يمكن تلخيص النتائج لاختبارات الارتداد والتأرجحين حول المحورين الطولي والجانبى والتي تمت على سيارة من فئة (D-Class Sedan 2017) وبسرعة مسير (35 Km/h) كالتالى:

- ١- عند إجراء اختبار الارتداد تفوق النظام التعليق الفعال على النظامين التقليدي ونصف الفعال، ويمكن من خلاله الوصول لأعلى معايير الراحة والثبات وإمكانية تطويره أكثر برمجياً، ولكن ذلك سيكون على حساب التعقيد والتكلفة العالية، أما في اختبارات التأرجحين حول المحور الطولي والمحور العرضي فقد أجريت المقارنة فقط بين النظام التقليدي والنصف فعال، وكانت النتيجة أن النصف فعال لم يقدم قيم تخميد مناسبة مع الاهتزازات، قد يعود السبب إلى أن النظام النصف الفعال المستخدم إما أنه يحتاج إلى تحسين في بنيته أو أن المواصفات المختارة للسيارة لم تكن موائمة له، أما نظام التعليق التقليدي فكان في أداءه جساءة ولم يحقق الراحة المطلوبة.
- ٢- عند اختبار نوعي نظام تعليق مستقلين [Strut(MacPherson)(F)/Tri-Links(R)] و [SLA(Double Wishbone)(F)/5-Links(R)] وآخر غير مستقل [Solid Axle(F)/Twist Beam(R) (Dependent)]، لوحظ سوء نظام التعليق غير المستقل على المعايير جميعها ولا سيما في التأرجح حول المحور الطولي (Roll)، على حين أن النظامين المستقلين المستخدمين ففي أدائهما تقارب ويفضل نظام التعليق (SLA (F)/5Links(R)) عند التأرجح (Roll) وفي الترددات العالية نظراً إلى مرونته بسبب زيادة عدد الوصلات.
- ٣- عند خفض قيم صلابة النابض سنحصل على راحة أكثر، ولكن ذلك سيقبل من استقرار المركبة عند الصدمة العالية أو التسارع أو التباطؤ الكبيرين أو الانعطاف الحاد تقلص نظام التعليق بشكل كبير، وعند حساب القيمة المثالية لصلابة النابض لتقديم أفضل قيم راحة وباعتبار السيارة المختارة كانت القيم [55 KN/m(F) / 40 KN/m(R)]، ويفضل استخدام نابض ذو صلابة لاختطية تكون منخفضة عند الانضغاط القليل وعالية عند الانضغاط العالي.
- ٤- للحصول على تخميد جيد يجب علينا اختيار مخمد ذي معدل تخميد لاختطى يتناسب مع القوة المؤثرة فيه، بحيث يكون معدل التخميد منخفضاً عند الترددات العالية وعالياً عند الترددات المنخفضة والارتداد.
- ٥- بارتفاع نسبة الكتلة الفوقية إلى السفلية ستتحسن معايير الراحة، ولكن بتوفر شروط منها توزيع الوزن توزيعاً مناسباً، وفي مثالنا كانت النسبة الأفضل بين الكتلتين هي (14.3=1430/100).
- ٦- عند زيادة طول قاعدة العجلات إلى حدٍ ما ستتحسن بعض معايير الراحة وتسوء أخرى، وعند خفض طول قاعدة العجلات تحدث حالة تجاوز أعظمي عند الترددات المنخفضة.
- ٧- تؤثر السرعة بشكل كبير على أداء نظام التعليق، فيفقد نظام التعليق خواصه عند السرعات العالية وتتحسن معايير الراحة عند السرعات المنخفضة مع ارتفاع في السعة العظمى للانتقال الشاقولي في بعض السرعات المنخفضة.

وهذا جدول يبين ملخصًا للنتائج التي قمنا بها، الجدول رقم (٣):

التجربة الأولى	النظام الفعال Z_{max} , J_{rms} , f أفضل	النظام نصف الفعال غير مستقر يحتاج إلى تحسين	النظام التقليدي f , A_{max} , a_{rms} , J_{rms} أسوأ
التجربة الثانية	النظام نصف فعال أفضل عند الترددات العالية	النظام التقليدي أفضل عند الترددات المنخفضة	
التجربة الثالثة	مستقل (Strut/3Links) عند التآرجح (Roll) مع الترددات المنخفضة أفضل	مستقل (SLA/5Links) عند التآرجح (Roll) مع الترددات العالية أفضل	غير مستقل الأسوأ
التجربة الرابعة	زيادة صلابة النابض أسوأ	خفض صلابة النابض أفضل في جميع القيم مع تراجع بالأداء عند الأمواج الطويلة والانعطافات القوية	
التجربة الخامسة	زيادة معامل التخميد أفضل عند الترددات المنخفضة والصدمة ولكنها تزداد سوءًا عند الترددات العالية	خفض معامل التخميد أفضل عند الترددات العالية ولكنها تزداد سوءًا عند الترددات المنخفضة والصدمة	
التجربة السادسة	زيادة نسبة الكتل العلوية/السفلية أفضل على العموم	خفض نسبة الكتل العلوية/السفلية تزداد سوءًا إلا عند بداية الأمواج الطويلة	
التجربة السابعة	زيادة طول قاعدة العجلات أفضل في قيم تردد التسارع ولكن مع رفع قيم الرجفة	خفض طول قاعدة العجلات حدوث حالة تجاوز أعظمي وقيم ترددات للتسارعات أعلى	
التجربة الثامنة	تأثير السرعات المنخفضة على أداء نظام التعليق يتحسن أداء نظام التعليق وفق الراحة مع ارتفاع في A_{max} عند بعض السرعات	تأثير السرعات العالية على أداء نظام التعليق انخفاض التفاعل لنظام التعليق مع الطريق	

الفصل الخامس

التوصيات

التوصيات

وفي ختام العمل لا بد من بعض التوصيات التي نخرج بها:

١. يوصي الباحث بالاهتمام أكثر والتدقيق في نوع معين من أنظمة التعليق لتحسينه وتطويره والحصول على نتائج أوسع، فيمكن الغوص في دراسة أنواع المتحكمات للأنظمة الفعالة وأدائها (كمثال: المتحكم LQR)، وأيضًا دراسة إمكانية استخدام مخدمات كهرومغناطيسية وفق معايير الراحة وذلك في السيارات الكهربائية حيث تسهم في إنتاج الطاقة الكهربائية فتحسن من أداء هذه السيارات وتقلل من استهلاكها للقدرة بل وتنتج قدرة كهربائية متجددة بدون انبعاثات ما يقلل الخطر المتزايد على البيئة، كما يوصي الباحث بدراسة المخطط الحركي لمختلف تصاميم أنظمة التعليق والمقارنة في أدائها وفق معايير الراحة والثبات.
٢. يوصي الباحث دراسة أنواع النواض ذات معدل الصلابة المتغير من أجل تحقيق معايير الراحة والثبات، وأيضًا أنواع المخدمات التي تمتلك معدل تخميد لاخطي يتغير تبعًا للقوة المؤثرة عليه.
٣. ينوه الباحث إلى أهمية استخدام برنامج المحاكاة (CarSim) ضمن منهج دراسة هندسة السيارات والآليات لما يقدمه من شرح وافٍ لأداء السيارة عند إجراء التجارب والتحكم في شروط هذه التجارب، فيساعد الطلاب في مرحلة الإجازة في فهم عمل وأداء أنظمة السيارة المتعددة ويساعد طلاب الدراسات العليا في مرحلة البحث في الحصول على النتائج المطلوبة حيث يقدم مقارنة بين الأنظمة المختلفة، ويستطيع محاكاة أنظمة أخرى كأداء وحدة نقل القدرة (مثل: علبة السرعة، الدفع الرباعي والثنائي...) وأنظمة الأمان (مثل: نظام منع قفل العجلات عند الكبح ABS، الأنظمة المساعدة في القيادة ADAS...) وكما أنه يقدم لنا حالات عمل متعددة تساعدنا في فهم سلوك السيارات أكثر، ولا يقتصر عمله على السيارات فقط، فهناك نسخ أخرى لنفس شركة التصنيع تهتم بعمل الشاحنات (TruckSim) وهناك نسخ تهتم بعمل الدراجات (BikeSim)، علاوةً على أنه لا يحتاج لتصنيع مختبرات مادية وأجواء واقعية حقيقية فهو يفيد في تكوين بيئة تساعد في تحقيق الغاية، ويقدم قيم منطقية قريبة من الواقع، بالإضافة إلى إمكانية ربطه ببرامج أخرى مثل (Matlab).

٤. يوصي الباحث بالاستفادة من إمكانية ربط برنامج (CarSim) مع (Matlab) أو غيره من البرامج التي يمكنه الارتباط بها وإنشاء نماذج دراسية تساعد في تطوير وتحسين نوع معين من أنظمة التعليق وفق أسس تساهم في تقديم الراحة والثبات وتحسين الأداء.

٥. يوصي الباحث بإقامة دراسة تقوم على أخذ الآراء الشخصية (Subjective) ضمن تجارب واقعية حقيقية لأشخاص في مختلف الأعمار، بحيث لا تتقيد بدراسة المؤشرات المادية (Objective) فقط، فيمكن في الأبحاث القادمة اشراك الآراء الشخصية مع المؤشرات المادية للوصول إلى معايير راحة أكثر، وتقديم توصيف أدق للمؤثرات والعوامل المحيطة، كما يلزم إجراء تجارب واقعية لبعض الحالات المدروسة ومقارنة النتائج مع نتائج التجارب الحاسوبية الافتراضية للتأكد من صحة هذه التجارب.

٦. ختامًا، يوصي الباحث للحفاظ على الأداء المنشود والهدف المراد من نظام التعليق بمراعاة الصيانات الدورية لنظام التعليق وفحص اتزانة وعدم المبالغة في السرعات أثناء المسير، وذلك للحفاظ على أنفسنا أولاً وعلى أداء أنظمة التعليق في الراحة ثانيًا، فبغض النظر عن نوعه وتصميمه لا نستطيع أخذ الأداء الأفضل ما لم يكن نظام التعليق يعمل بشكل جيد ويحافظ على ثبات السيارة أثناء المسير على الطرقات.

هنا ينتهي العمل، ولا يوجد عمل كامل للإنسان، فلا بد من استكمال الخطوات الجيدة واستدراك الأخطاء للحصول على أبحاث جيدة في المراحل القادمة.

المراجع

١. السيد, د. عبد الحليم. "هندسة السيارات (نظرية السيارة)". سورية: جامعة دمشق. (199-1997).
٢. الزبيق, د.أحمد & شحادة, د.جمعة. "الصيانة والإصلاح ومحطاتهما". سورية: جامعة دمشق. (2013-2014)
3. Shirahatt, A. **"Optimal Design of Passenger Car Suspension for Ride and Road Holding"**. Pune, India: Vehicles Research and Development. (2008, January-March).
4. Sezgin, A., & Yagiz, N. **"Analysis of Passenger Ride Comfort"**. Istanbul, Turkey: Mechanical Engineering Department, Istanbul University, Avcilar. (21 May 2012).
5. Chapter(6). In **"Suspension System Principles"**. Cengage Learning. (2014).
6. Aly, A. **"Car Suspension Control Systems: Basic Principles"**. INTERNATIONAL JOURNAL OF CONTROL, AUTOMATION AND SYSTEMS VOL.1, NO.1". (JANUARY 2012).
7. Yao, Z. **"Design and Analysis of an Interconnected Suspension for a Small Off-road Vehicle"**. University of Windsor. (2016).
8. Gameiro da Silva, M. C. **"Measurements of comfort in vehicles"**. Portugal: University of Coimbra. (April 2002).
9. Koumura, S., & Shionoya, T. **"Ride Comfort Analysis Considering Suspension Friction with Series Rigidity"**. SAE International. TOYOTA Motor Corporation. (04/05/2016).
10. Lei, Z., & Ding, Z. **"Simulation and Experimental Research on Vehicle Ride Comfort and Suspension Parameters Optimisation"**. China: Changsha University of Science and Technology. (2016).
11. Goodarzi, A., & Khajepour, A. **"Vehicle Suspension System Technology and Design"**. Morgan & Claypool Publishers, University of Waterloo. (2017).
12. Riley, R. Q. **"AUTOMOBILE RIDE, HANDLING, AND SUSPENSION DESIGN AND IMPLICATIONS FOR LOW-MASS VEHICLES"**. Retrieved from: <https://rqriley.com/automobile-ride-handling-and-suspension-design-and-implications-for-low-mass-vehicles/>.
13. **"Vehicle Ride"**. Retrieved from: <https://slideplayer.com/slide/4279577/>.
14. Dixon, J. C. **"Suspension Geometry and Computation"**. The Open University, Great Britain. (2009).

15. **"Damping Factor of a Tire Dependent on Rolling Velocity and Excitation Frequency"** .EuroMoto Virtual College Site. Retrieved from: <https://www.euromotor.org/mod/resource/view.php?id=21354>.
16. **"CarSim 2017"** Software.
17. **"Genetic Algorithm"** Retrieved from : <https://web.archive.org/web> (18/12/2019).
18. **"Suspension systems and components"** slide. Retrieved from: <https://slideshare.net/anigavali/suspension-system-26532839> .
19. **"Matlab 2016"** Software.
20. **"Monroe"** Corp Site: <https://www.monroe.com> .
21. Abramov, S., Mannan, S., & Durieux, O. **"Semi-active suspension system simulation using Simulink"**. Glyndŵr University. (2009).
22. Vittorio, M. **"Regenerative damping - Analysis of expected benefits on CO2 emissions and ride-comfort improvement"**. University of Windsor. (2016).
23. Ismaila, M. F., Samb, Y. M., Sudinb, S., & Pen, K. **"Modeling and Control of a Nonlinear Active Suspension Using Multi-Body Dynamics System Software"**. Malaysia: Jurnal Teknologi. (March 2014).
24. N. de Winkel, K., Irmak, T., Happee, R., & Shyrokau, B. **"Standards for passenger comfort in automated vehicles: Acceleration and jerk"**. Netherlands: Delft University of Technology, Department of Cognitive Robotics. (2023).
25. D.A. Crolla, R.P. King **"Olley's 'flat ride' revisited"**. Vehicle System Dynamics 33(sup1):762-774. January (2000).
26. **"Root-Mean-Square value"**. A Dictionary of Physics (6 ed). Oxford University Press. (2009).
27. Cieslak, M. P., Kanarachos, S., Diels, C., Blundell, M., Baxendale, A. & Burnett, M. **"Accurate ride comfort estimation combining accelerometer measurements, anthropometric data and neural networks"** . Neural Computing and Applications, vol. 32, no. 12, pp. 8747–8762.
28. **"Shock & Vibration Isolation 101: Everything You Need to Know"**. (November 17, 2014). . Retrieved from Polymer Technologies Inc Site: <https://blog.polytechinc.com/shock-vibration-isolation-101-everything-you-need-to-know/> .
29. Dassi, M., Gaudin, A. & Abbadi, Z. **"Vibro-acoustic specifications and design indicators for lightweight vehicles"**. (2014). Leuven, Belgium.
30. Kashem, S., Nagarajah, R. & Ektesabi, M. **"Vehicle Suspension Systems and Electromagnetic Dampers"**. (12 September 2017). Springer Singapore.
31. **"The Importance of Wheel Alignment"** . Retrieved from The Motorist Assurance Program Site: <https://motorist.org/the-importance-of-wheel-alignment/>.

32. **"CAMBER, CASTER, TOE-IN/TOE-OUT EXPLAINED"** Retrieved from Intrax suspension technology (it is a Dutch manufacturer of high-quality suspension technology) Site: <https://www.intraxracing.nl/en/camber/> .
33. Faheem, A. & Alam, F. **"The Suspension Dynamic Analysis for a Quarter Car Model and Half Car Model"**. (Published 2006). Semantic Scholar.
34. Ashby M. F. & Jones D. R. H. **"Engineering Materials 1: An Introduction to Properties, Applications and Design"**. (2012). Boston.
35. William D. , Callister Jr. & David G. Rethwisch **"Fundamentals of Materials Science and Engineering"** .
36. Uys, P., Els, K. & Thoresson, M. **"Suspension settings for optimal ride comfort of off-road vehicles travelling on roads with different roughness and speeds"**. (April 2007). Journal of Terramechanics.

Abstract

Research Background:

The research studies the effect of suspension systems with its different types, designs and parameters according to comfort ride values by suspension systems modeling, simulation and comparing among its types.

The Research Purpose:

The research purpose is suspension systems performance analyzing due to access to comfort ride desired values and avoiding designs or values, which leads to hard ride.

The Materials and Methods:

The (CarSim) program was used to do simulation for car and detect road type and do test, then the (Matlab) program was used to calculate comfort ride values.

The Experimental Results:

The results was satisfied and logical, and it gave clear difference in variant suspension types and parameters, and it showed the active system progress comparing to the passive and semi active system, and it showed the independent suspension progress comparing to the dependent suspension, and it gave the difference when increasing parameter or decreasing it.

The Conclusions by The Researcher:

- The research gave a general idea about suspension system behavior and it types to access comfort ride values, and we have to complete the work to get more information about specific type.
- The big benefits of (CarSim) program.

The Keywords:

Suspension System - Passive - Semi Active - Active - Vibrations - Frequency - Vertical Position - Vertical Acceleration - Roll - Pitch.

Syrian Arab Republic
Damascus University
Faculty of Mechanical and Electrical Engineering
Automobiles and Heavy Machines Department



The Effect of Suspension Systems of Cars on the Passengers Comfort

**A Research Papered to Obtain a Master Degree of Engines and
Machines Engineering**

Prepared By:

Eng. Ammar Awad

Supervised By:

Pro. Jomaa Shhadeh

Year:

2024-2025