محاكاة حاسوبية لاستهلاك السيَّارات من الوقود في ظروف تشغيل محددة

د. م. جمعة شحادة[1]

الملخص

الاقتصادية هي إحدى الخصائص الاستثمارية التي تبيِّن قدرة السيارة على استخدام الوقود بشكل معقول . وتَتَحدَّد عادة بكمية الوقود المستهلكة باللترات لكي تقطع السيارة مسافة طولها مئة كيلومتر . وبهذا الخصوص , يتعين استهلاك الوقود إما تجريبياً على طريق رئيس , أو بالحساب باستخدام المحاكاة الحاسوبية. تركَّزت الدراسة هنا على الطريقة الحسابية، والتي تتضمن ثلاث خطوات أساسية، وهي: النمذجة الديناميكية، والنمذجة الرياضية، والبرمجة الحاسوبية باستخدام Excel.

إن الهدف الرئيس من هذا البحث هو بيان مدى تأثير تغير سرعة السيارة في استهلاك الوقود عند حركتها بسرعات منتظمة على طريق أفقي . تناولت الدراسة حالتين مختلفتين :إحداهما سيارة تعمل بوقود البنزين، والأخرى بوقود الديزل. لقد أظهرت نتائج المقارنة أن محاكاة السيارتين المدروستين قد أنجزت بنجاح , إذ تطابقت في هاتين الحالتين القيمة الحسابية لاستهلاك الوقود مع القيمة التجريبية المحددة من قبل الشركة الصانعة , وذلك عند سرعة ثابتة للسيارة قدرها 120 km/h. أخيراً، وللدراسات المستقبلية يمكن استخدام مبادئ المحاكاة في دراسة اقتصادية السيارات الهجينة.

الكلمات المفتاحية : محاكاة حاسوبية , استهلاك الوقود، الاقتصادية، نمذجة ديناميكية، نمذجة رياضية، وقود البنزين، وقود الديزل، سيارة هجينة.

[1]أستاذ مساعد – قسم هندسة السيارات والآليات الثقيلةكلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية–جامعة دمشق

Computer Simulation of the Vehicle Fuel Consumption in Certain Operation Conditions

Dr. Joumah Shihada[(1)]

Abstract

The fuel economy of a motor vehicle is an operational propert , which shows its ability to employ the fuel rationally. It is usually estimated by the amount of fuel consumption in liters per 100 km traveling distance. In this regard, Fuel consumption is measured on the road or calculated by computer simulation. Here, the study has focused on the calculation method, which includes three major steps : dynamic modeling, mathematical modelin, and computer programming using Excel .

The basic purpose of this research is to show the influence of speed variation on the fuel consumption, during motion of the vehicle on a level road at a series of constant speeds. This study was applied on two different cases: petrol-powered vehicle and diesel-powered vehicle.

The results of comparison have shown that simulation of the two studied vehicles is achieved successfully. In both cases , the calculated fuel consumption was identical to the experimental value, which was given by the automaker at a constant cruising speed (120 km/h). Finally, for the future studies, the simulation principles can be used to study the fuel economy of hybrid vehicles .

Keywords: computer simulation, fuel consumption, fuel economy, dynamic modeling, mathematical modeling, petrol fuel, Diesel fuel, hybrid vehicle.

[(1)] Associate Professor , Department of Automobiles and Heavy Machines Engineering , Faculty of Mechanical & Electrical Engineering. Damascus University.

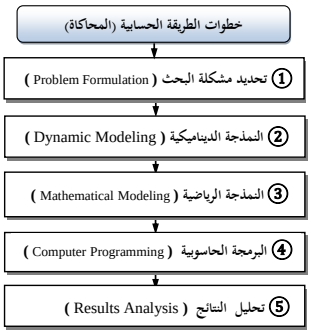
1- مقدمة البحث:

تُقاس اقتصادية السَّيارة بمعدَّل استهلاكها من الوقود مقدراً باللترات لكي تقطع مسافة طولها مئة كيلومتر [1]. ولدراسة اقتصادية السيارة خلال حركتها المستقيمة على طريق رئيس، ينبغي إنشاء مخطط بياني يدعى مخطط اقتصادية السيارة [2] والذي يعطي إمكانية تحديد استهلاك الوقود عند أيّ سرعة من سرعات حركة السيارة.

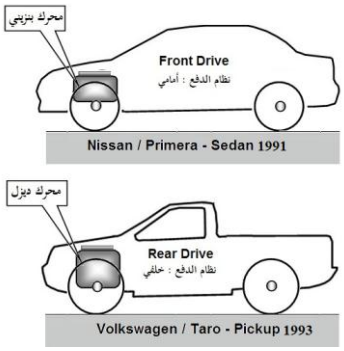
في الوقت الحاضر، تقوم معظم شركات السيارات من خلال التجارب المخبرية أو الميدانية بقياس معدَّل استهلاك الوقود ضمن المدن، وفق دورة قيادة ذات قيم مختلفة لسرعة الحركة، أو خارج المدن على الطرق الرئيسة السريعة عند قيمة محددة لسرعة السيارة . وبما أن الطريقتين التجريبية والحسابية مهمتان على حدّ سواء لتحديد استهلاك الوقود لذا يهتم هذا البحث باستخدام الطريقة الحسابية، والذي يشكل علم المحاكاة عمودها الفقري [3]. تتضمن الطريقة الحسابية كما هو واضح في الشكل (1) خمس خطوات أساسية: الخطوة الأولى هي تحديد مسألة البحث، والخطوة الثانية هي ردّ النموذج الفيزيائي المعقَّد (السيارة) إلى نموذج هندسي (ديناميكي) بسيط، والخطوة الثالثة هي التعبير عن النموذج الهندسي رياضياً، والخطوة الرابعة هي الحلّ باستخدام البرمجة الحاسوبية، والخطوة الأخيرة هي تفسير النتائج [4].

تناولت الدراسة حالتين مختلفتين، إحداهما سيارة تعمل بوقود البنزين، والأخرى بوقود الديزل كما هو واضح في الشكل (2). هذا ويُبيِّن الجدول رقم (1) المواصفات الفنية لهاتين السيارتين [5,6] .

وهنا لابُدَّ من الإشارة إلى أن هذا الجدول يتضمن مُعَدَّل استهلاك الوقود المحدَّد تجريبياً عند حركة السيارة بسرعة ثابتة قدرها 120km/h.



الشكل(1) الخطوات العامَّة لطريقة الحساب



الشكل(2) الشكل العام للسيارتين قيد الدراسة

جدول رقم (1) معطيات الشركات الصانعة

№	المواصفات الفنية	الرمز		الحالة الاولى	الحالة الثانية	وحدة القياس
1	نوع الوقود المستخدم	Fuel	=	بنزين	ديزل	-
2	الحجم الفعال للمحرك	V_h	=	1998	2446	Cm^3
3	الاستطاعة القصوى للمحرك	P_{max}	=	89(121)	59(80)	kW(hp)
4	سرعة المحرك عند الاستطاعة القصوى	n_p	=	6000	4200	r.p.m
5	عزم الدوران الأعظمي	M_{max}	=	166	165	N.m
6	سرعة المحرك عند عزم الدوران الأعظمي	n_M	=	4000	2400	r.p.m
7	عدد نسب النقل في علبة السرعة	G	=	5	5	-
8	نسبة النقل الرئيسية	i_0	=	4.06	4.10	-
9	مواصفات الاطارات	Tire		185/65R14	195/60R14	-
10	عرض السيارة	B	=	1.700	1.650	m
11	ارتفاع السيارة	H	=	1.395	1.555	m
12	كتلة السيارة	m_o	=	1260	1400	kg
13	كتلة السيارة مع الحمولة الكاملة	m_a		1690	2400	kg
14	السرعة القصوى للسيارة	V_{max}	=	200	145	km/h
15	معدل استهلاك الوقود المحدد تجريبياً	Qs	=	**7.6**	**9.6**	**L/100km**

2- خصائص المحرك البنزيني:

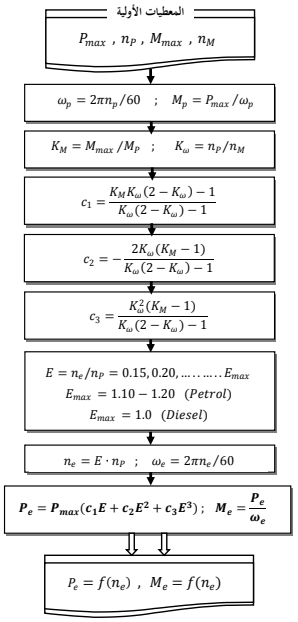
إن دراسة اقتصادية السيارة الأولى في استهلاك البنزين تتطلب تعيين خصائص محرك السيارة، والتي تُبيِّن كيفية تغير عزم الدوران M_e والاستطاعة P_e مع سرعة المحرك n_e. وبما أن هذه الخصائص غير محددة، لذا سنقوم بإنشاء الخصائص الحدّية التي تمثل أقصى ما يمكن أن يعطيه المحرك، وذلك بالاعتماد على المعطيات الأولية للشركة الصانعة للسيارة من جهة [5]، وعلى المعطيات

الحسابية الموضحة في الجدول رقم (2) من جهة أخرى. تتضمن المعطيات الأولية: الاستطاعة القصوىP_{max}، وسرعة المحرك n_P الموافقة لها والعزم الأعظمي M_{max} ، وسرعة المحرك n_M الموافقة له، ولإجراء الحسابات [2] نستخدم العلاقات الرياضية الموضحة في خوارزمية الشكل(3).

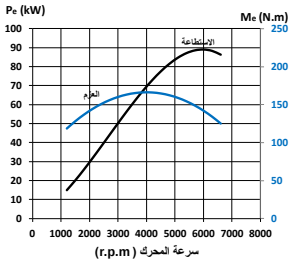
جدول (2) المعطيات الأولية والحسابية

№	المعطيات الأولية والحسابية	الرمز		القيمة	وحدة القياس
1	الاستطاعة القصوى للمحرك	P_{max}	=	89	kW
2	سرعة المحرك عند الاستطاعة القصوى	n_p	=	6000	r.p.m
3	عزم الدوران الأعظمي	M_{max}	=	166	N.m
4	سرعة المحرك عند عزم الدوران الأعظمي	n_M	=	4000	r.p.m
5	السرعة الزاوية عند الاستطاعة القصوى	ω_P	=	628	rad/s
6	عزم الدوران عند الاستطاعة القصوى	M_p	=	142	N.m
7	مُعامل تكيُّف المحرك مع تغير العزم	K_M	=	1.17	-
8	مُعامل تكيُّف المحرك مع تغير السرعة	K_ω	=	1.50	-
9	الثابت الأول لعلاقة الاستطاعة	C_1	=	0.48	-
10	الثابت الثاني لعلاقة الاستطاعة	C_2	=	2.06	-
11	الثابت الثالث لعلاقة الاستطاعة	C_3	=	-1.55	-
12	المجموع	$\sum C$	=	1.00	-

وبتطبيق ذلك على محرك السيارة المراد دراستها، فإننا نحصل استناداً إلى المعطيات الأولية والحسابية الموضحة في الجدول رقم (2) على منحنيات العزم والاستطاعة كما هو واضح في الشكل (4).



الشكل(3) خوارزمية حساب مؤشرات المحرك



الشكل(4) منحنيات أداء المحرك

3- خصائص محرك الديزل :

وبصورة مماثلة للحالة السابقة، فإن دراسة اقتصادية السيارة العاملة بوقود الديزل تتطلب أيضاً تعيين خصائص محرك السيارة، والتي تُبيِّن كيفية تغير عزم الدوران M_e والاستطاعة P_e مع سرعة المحرك n_e. وبما أن هذه الخصائص غير محددة لهذا ينبغي إنشاء الخصائص الحدّية لمحرك الديزل، وذلك باستخدام المعطيات الأولية للشركة الصانعة للسيارة من جهة [6]، وإدخال المعطيات الحسابية الموضحة في الجدول رقم (3) من جهة أخرى. تتضمن المعطيات الأولية: الاستطاعة القصوى P_{max} وسرعة المحرك n_P الموافقة لها، والعزم الأعظمي M_{max} وسرعة المحرك n_M الموافقة له. ولإجراء الحسابات نستخدم العلاقات الرياضية المذكورة آنفاً والموضحة في الشكل(3).

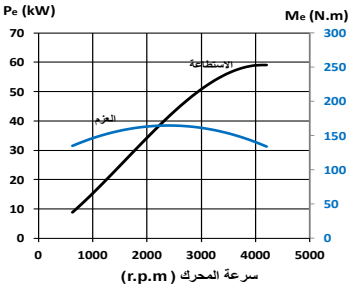
جدول (3) المعطيات الأولية والحسابية

№	المعطيات الأولية والحسابية	الرمز		القيمة العددية	وحدة القياس
1	الاستطاعة القصوى للمحرك	P_{max}	=	59	kW
2	سرعة المحرك عند الاستطاعة القصوى	n_p	=	4200	r.p.m
3	عزم الدوران الأعظمي	M_{max}	=	165	N.m
4	سرعة المحرك عند عزم الدوران الأعظمي	n_M	=	2400	r.p.m
5	السرعة الزاوية عند الاستطاعة القصوى	ω_P	=	440	rad/s
6	عزم الدوران عند الاستطاعة القصوى	M_p	=	134	N.m
7	مُعامل تكيُّف المحرك مع تغير العزم	K_M	=	1.23	-
8	مُعامل تكيُّف المحرك مع تغير السرعة	K_ω	=	1.75	-
9	الثابت الأول لعلاقة الاستطاعة	C_1	=	0.82	-
10	الثابت الثاني لعلاقة الاستطاعة	C_2	=	1.43	-
11	الثابت الثالث لعلاقة الاستطاعة	C_3	=	-1.25	-
12	المجموع	$\sum C$	=	1.00	-

وبتطبيق ذلك على محرك السيارة الثانية المراد دراستها، فإننا نحصل استناداً إلى المعطيات الأولية والحسابية على الجدول رقم (4)، وعلى منحنيات العزم والاستطاعة كما هو واضح في الشكل (5).

جدول (4) خصائص محرك الديزل

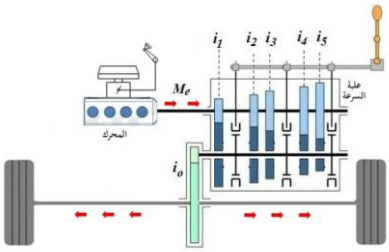
نسبة عدد الدورات	عدد الدورات	سرعة المحرك	استطاعة المحرك	عزم المحرك
E	n_e	ω_e	P_e	M_e
n_e/n_p	r.p.m	rad/s	Kw	N.m
0.20	840	88	12.48	141.8
0.25	1050	110	16.2	147.6
0.30	1260	132	20.1	152.6
0.35	1470	154	24.1	156.8
0.40	1680	176	28.2	160.1
0.45	1890	198	32.2	162.5
0.50	2100	220	36.1	164.1
0.55	2310	242	39.9	164.9
0.60	2520	264	43.5	164.9
0.65	2730	286	46.9	164.0
0.70	2940	308	49.9	162.2
0.75	3150	330	52.7	159.6
0.80	3360	352	55.0	156.2
0.83	3476	364	56.0	154.0
0.90	3780	396	58.1	146.9
0.95	3990	418	58.9	140.9
1.00	4200	440	59.0	134.1



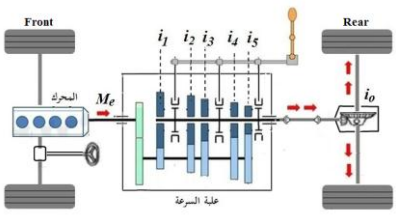
الشكل(5) منحنيات أداء المحرك

4- تعيين نسب التغيير الانتقالية :

يوضح الشكل(6) رسماً تخطيطياً مبسطاً لنظام الدفع الأمامي المستخدم في السيارة الأولى بينما يوضح الشكل(7) رسماً تخطيطياً مبسطاً لنظام الدفع الخلفي المستخدم في السيارة الثانية.

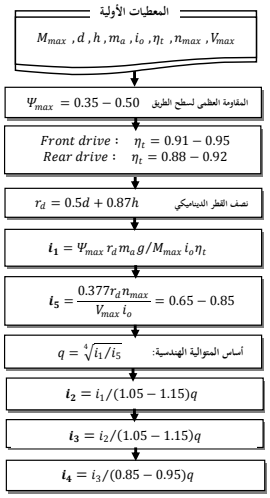


الشكل(6) مخطط نظام الدفع الأمامي



الشكل(7) مخطط نظام الدفع الخلفي

إن دراسة الاقتصادية تتطلب تعيين نسب التغيير الانتقالية في علبة السرعة العائدة لكل من السيارتين. ومن الطرق الشائعة بهذا الخصوص طريقة المتوالية الهندسية المعدَّلة، والتي ترتبط نسب التغيير فيها بموجب متوالية يرمز لأساسها بالحرف q. ولإجراء الحسابات[2,5,9] نستعمل العلاقات الموضحة في الخوارزمية المبينة في الشكل (8) مع ملاحظة أن جميع دلالات الرموز مبينة في الجدول (5) والذي يعرض المعطيات ونتائج الحساب باستخدام برنامج Excel في آن واحد.



الشكل(8) خوارزمية حساب نسب التغيير

جدول (5) المعطيات ونتائج حساب نسب التغيير

№	المعطيات الأولية والحسابية	الرمز		الحالة الاولى	الحالة الثانية	وحدة القياس
1	عدد نسب النقل في علبة السرعة	G	=	5	5	-
2	عزم الدوران الأعظمي	M_{max}	=	166	165	N.m
3	القطر الداخلي للعجلة	d	=	14	14	inch
4	عرض الاطار المطاطي	b	=	185	195	mm
5	ارتفاع مقطع الاطار المطاطي	h	=	120	117	mm
6	نصف قطر عجلة السيارة	r_d	=	0.28	0.28	m
7	كتلة السيارة مع الحمولة الكاملة	m_a		1690	2400	kg
8	نسبة النقل الرئيسية	i_0	=	4.06	4.10	-
9	مردود جملة التوصيل	η_t	=	0.95	0.92	-
10	سرعة المحرك عند الاستطاعة القصوى	n_{max}	=	6600	4200	r.p.m
11	السرعة القصوى	V_{max}	=	200	145	km/h
12	المقاومة العظمى لسطح الطريق	Ψ_{max}	=	0.42	0.41	-
13	نسبة التغير الاولى	i_1	=	3.06	4.33	-
14	نسبة التغير الاخيرة	i_5	=	0.73	0.74	-
15	أساس المتوالية الهندسية	q	=	1.43	1.55	-
16	نسبة التغير الثانية	i_2	=	1.83	2.54	-
17	نسبة التغير الثالثة	i_3	=	1.21	1.56	-
18	نسبة التغير الرابعة	i_4	=	0.93	1.05	-

5- النمذجة الديناميكية والرياضية للسيارة:

إن الغرض من هذه النمذجة هو تعيين القوى المؤثرة في السيارة ثم إنشاء منحنيات الاستطاعة، وذلك عند حركة السيارة على طريق صلب أفقي. يُوضِّح الشكل (9) القوى المؤثرة في السيارة الأولى ذات الدفع الأمامي، بينما يوضح الشكل (10) القوى المؤثرة في السيارة الثانية ذات الدفع الخلفي .

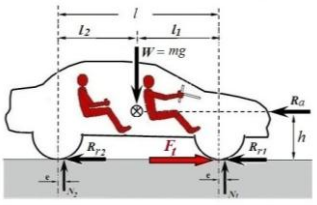
تتحدد القوى المؤثرة في السيارة بالعلاقات الموضحة في الشكل (11) وتشمل وزن السيارة W بالإضافة إلى القوى الآتية [1,2]:

I. N_1 , N_2 – ردّا الفعل الناظميين لسطح الطريق، حيث يبعد كل منهما مسافة قدرها (e) عن خط الشاقول المار من مركز العجلة، لأن شدة الضغط في الجزء الأمامي من منطقة التماس تكون أكبر مقارنة بالجزء الخلفي.

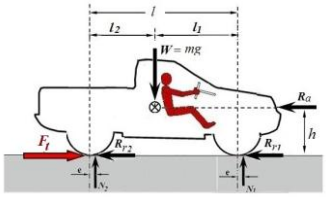
II. F_t – قوة الشد الدافعة للسيارة، والتي تتولد نتيجة لتأثير عزم المحرك الواصل إلى العجلات .

III. R_{r1} , R_{r2} – مقاومتا تدحرج العجلات الأمامية والخلفية، وتتولد كل منهما بفعل تشوه الإطارات عند احتكاكها بسطح الطريق. ويُمثِّل مجموعهما R_r مقاومة التدحرج الكلية للعجلات، وتساوي إلى جداء وزن السيارة W بمُعامل مقاومة التدحرج f .

IV. R_a– مقاومة الهواء التي تنشأ نتيجة لاصطدام تيارات الهواء بمقدمة السيارة.ويتوقف مقدارها على معامل مقاومة الهواء k_a، وعلى مساحة سطح المواجهة A، بالإضافة إلى سرعة حركة السيارة V .كما يتعلق سطح المواجهة بدوره بعرض السيارة B وبارتفاعها H.



الشكل(9) القوى المؤثرة في السيارة الأولى



الشكل(10) القوى المؤثرة في السيارة الثانية

معادلات حساب القوى المؤثرة في السيارة

1- وزن السيارة

$$W = mg \;\; ; \;\; g = 9.8\, m/s^2$$

2- قوة الشد الكلية

$$F_t = M_e i_g i_o \eta_t \,/r_d$$

3- مقاومة تدحرج العجلات

$$R_r = R_{r1} + R_{r2} = fW$$

$$f = f_o\left(1 + \frac{V}{160}\right)$$

$$f_o = (0.007 - 0.015)$$

$$V = r_d \omega_e / i_g i_o$$

4- مقاومة الهواء

$$R_a = K_a A V^2$$

$$K = 0.20 - 0.35$$

$$A = 0.8BH$$

الشكل(11) معادلات حساب القوى

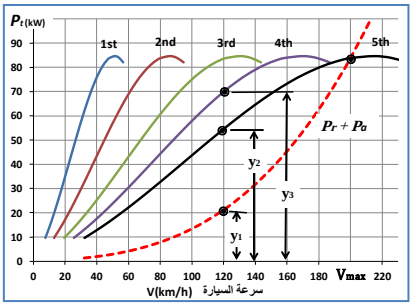
بعد تعيين القوى المؤثرة في السيارة، أصبح بالإمكان كتابة معادلة حركة السيارة انطلاقاً من القانون الأساسي في علم التحريك[10] :

$$\sum F = \delta ma$$
$$F_t - R_r - R_a = \delta ma$$
$$F_t = R_r + R_a + R_{in}$$

حيث: a تسارع السيارة، والرمز δ يمثل مُعامل احتساب عطالة أجزائها الدوارة كالعجلات وغيرها. وبضرب طرفي المعادلة الأخيرة بسرعة السيارة ينتج قانون موازنة استطاعة السيارة :

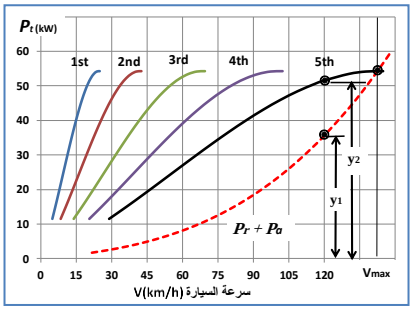
$$F_t V = R_r V + R_a V + R_{in} V$$
$$P_t = P_r + P_a + P_{in}$$

هذا القانون يعكس–في كل لحظة من لحظات الحركة– المساواة بين استطاعة الشد P_t من جهة، ومجموع قيم الاستطاعة $(P_r+P_a+P_{in})$ المصروفة على مقاومات التدحرج والهواء والعطالة من جهة ثانية. وبالانتقال إلى الحالتين المدروستين، نقوم بإنشاء منحنيات الاستطاعة الموافقة لجميع الغيارات للسيارة الأولى كما في الشكل (12)، وكذلك الأمر بالنسبة للسيارة الثانية كما في الشكل (13).



الشكل(12) منحنيات الاستطاعة– بنزين

إنَّ عملية الإنشاء البياني أُجريت باستخدام البرنامج الشهير Excel، بعد إجراء الحسابات الرياضية اللازمة اعتماداً على جداول المعطيات، وحسب التسلسل الموضح في الجدولين (7)و(8) .



الشكل(13) منحنيات الاستطاعة– ديزل

هذا ويمكن من خلال مخطط منحنيات الاستطاعة أن نحدد نسبة الاستطاعة المستغلة عندما تكون سرعة الحركة ثابتة وتسارعها يساوي إلى الصفر، وذلك بتطبيق العلاقة الآتية [7,8]:

$$U = \frac{P_r + P_a}{P_t} = \frac{P_r + P_a}{\eta_t P_e}$$

نلحظ حسب الشكل (12) أن نسبة الاستطاعة المستغلة خلال حركة السيارة بسرعة ثابتة قدرها 120 km/h عند تعشيق الغيار الأخير (الخامس):

$$U_{5th} = \frac{y_1}{y_2} = \frac{21.25}{54.5} = 0.39$$

بينما تكون عند تعشيق الغيار الرابع :

$$U_{4th} = \frac{y_1}{y_3} = \frac{21.25}{69.9} = 0.30$$

وبما أن انخفاض U يترافق عادة بازدياد معدل استهلاك الوقود، لهذا ينبغي أن تعمل السيارة على الغيار الأخير.

وبالمقابل، فإن نسبة الاستطاعة المستغلة في السيارة الثانية (الشكل 13) عند السرعة المذكورة :

$$U_{5th} = \frac{y_1}{y_2} = \frac{35.96}{52.12} = 0.69$$

6– معادلة الاستهلاك وبرنامج المحاكاة :

عندما تتحرك السيارة بسرعة ثابتة على طريق رئيس فإن معدل استهلاكها من الوقود مقدراً باللترات لكي تقطع مسافة طولها مئة كيلومتر، يتحدد بالعلاقة الآتية [2,7]

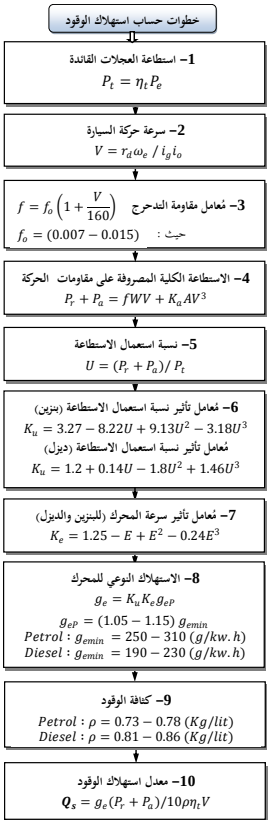
$$Q_s = \frac{g_e(P_r + P_a)}{10\rho\eta_t V}$$

ولتطبيق هذه المعادلة، ينبغي الاستناد إلى نتائج حساب تغير الاستطاعة الفعالة للمحرك مع سرعته الدورانية $P_e=f(\omega_e)$، بالإضافة إلى المعطيات الواردة في الجدول (6). وبما أن حركة السيارة عند نسبة التغيير الأخيرة هي في الواقع ذات الأهمية الأكبر في أثناء استثمار السيارة الفعلي، لهذا فإن العمل الحالي يتناول هذه الحالة فقط.

جدول (6) معطيات حساب الاستهلاك

№	المعطيات الأولية والحسابية	الرمز		الحالة الاولى	الحالة الثانية	وحدة القياس
1	نوع الوقود المستخدم	Fuel	=	بنزين	ديزل	
2	مردود جملة التوصيل	η_t	=	0.95	0.92	-
3	نصف قطر عجلة السيارة	r_d	=	0.28	0.28	m
4	نسبة النقل الرئيسية	i_0	=	4.06	4.10	-
5	نسبة التغيير الانتقالية الاخيرة	i_5	=	0.73	0.74	-
6	معامل التدحرج عند السرع المنخفضة	f_o	=	0.01	0.01	
7	كتلة السيارة	m_o	=	1260	1400	kg
8	كتلة السيارة مع الحمولة الكاملة	m_a		1690	2400	kg
9	معامل مقاومة الهواء	K_a	=	0.23	0.30	-
10	عرض السيارة	B	=	1.700	1.650	m
11	ارتفاع السيارة	H	=	1.395	1.555	m
12	مساحة سطح المواجهة	A	=	1.85	2.00	m^2
13	الاستهلاك النوعي الاصغري	ge_{min}	=	250	230	g/kW.h
14	الاستهلاك النوعي عند الاستطاعة القصوى	ge_p	=	263	253	g/kW.h
15	كثافة الوقود المستخدم	ρ	=	0.78	0.82	kg/lit

يوضح الشكل(14) تسلسل خطوات عملية الحساب، والعلاقات الرياضية اللازمة [1,7,9]. ويبين الجدول رقم (7) برنامج محاكاة استهلاك وقود البنزين، بينما يوضح الجدول رقم (8) برنامج محاكاة استهلاك وقود الديزل.



الشكل (14) – خطوات حساب الاستهلاك

جدول (7) برنامج محاكاة استهلاك وقود البنزين عند تعشيق الغيار الأخير

نسبة عدد الدورات	عدد الدورات	سرعة المحرك	استطاعة المحرك	عزم المحرك	استطاعة العجلات القائدة	سرعة السيارة	معامل مقاومة التدحرج	الاستطاعة الكلية المصروفة	نسبة استعمال الاستطاعة	معامل تأثير الاستطاعة	معامل تأثير السرعة	الاستهلاك النوعي للوقود	معدل الاستهلاك
E	n_e	ω_e	P_e	M_e	P_t	V	f	P_f+P_a	U	K_u	K_e	g_e	Q_s
n_e/n_p	r.p.m	rad/s	Kw	N.m	Kw	km/h		Kw				g/Kw.h	lit/100km
0.15	900	94	10.13	107.5	9.6	32.2	0.010	1.36	0.14	2.28	1.12	672	3.83
0.20	1200	126	14.86	118.3	14.1	42.9	0.010	2.20	0.16	2.20	1.09	628	4.35
0.25	1500	157	20.1	127.9	19.1	53.7	0.011	3.35	0.18	2.09	1.06	581	4.90
0.30	1800	188	25.7	136.5	24.4	64.4	0.011	4.87	0.20	1.97	1.03	534	5.45
0.35	2100	220	31.7	144.0	30.1	75.1	0.012	6.83	0.23	1.84	1.01	488	5.99
0.40	2400	251	37.8	150.4	35.9	85.9	0.012	9.29	0.26	1.70	0.99	444	6.48
0.45	2700	283	44.0	155.7	41.8	96.6	0.013	12.33	0.29	1.56	0.98	401	6.91
0.50	3000	314	50.2	159.9	47.7	107	0.013	16.00	0.34	1.42	0.97	362	7.28
0.56	3354	351	57.4	163.5	54.5	**120**	0.014	21.25	0.39	1.27	0.96	319	**7.6**
0.60	3600	377	62.2	165.0	59.1	129	0.014	25.52	0.43	1.17	0.96	293	7.85
0.65	3900	408	67.8	165.9	64.4	140	0.015	31.51	0.49	1.06	0.96	266	8.12
0.70	4200	440	72.9	165.8	69.3	150	0.016	38.39	0.55	0.98	0.96	246	8.47
0.75	4500	471	77.5	164.5	73.6	161	0.016	46.25	0.63	0.92	0.96	232	9.01
0.80	4800	503	81.5	162.1	77.4	172	0.017	55.14	0.71	0.90	0.97	228	9.88
0.85	5128	537	85.0	158.3	80.7	183	0.017	66.12	0.82	0.91	0.98	234	11.40
0.90	5400	565	87.1	154.1	82.8	193	0.018	76.31	0.92	0.96	0.99	248	13.23
0.93	5587	585	88.2	150.7	83.74	200	0.018	83.91	1.00	1.00	0.99	261	14.77
1.00	6000	628	89.0	141.6	84.6	–	–	–	–	–	–	–	–
1.05	6300	660	88.3	133.8	83.9	–	–	–	–	–	–	–	–
1.10	6600	691	86.3	124.8	82.0	–	–	–	–	–	–	–	–

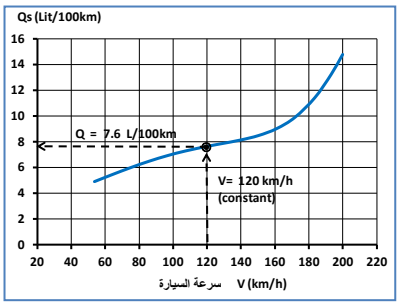
جدول (8) برنامج محاكاة استهلاك وقود الديزل عند تعشيق الغيار الأخير

نسبة عدد الدورات	عدد الدورات	سرعة المحرك	استطاعة المحرك	عزم المحرك	استطاعة العجلات القائدة	سرعة السيارة	معامل مقاومة التدحرج	الاستطاعة الكلية المصروفة	نسبة استعمال الاستطاعة	معامل تأثير الاستطاعة	معامل تأثير السرعة	الاستهلاك النوعي للوقود	معدل الاستهلاك
E	n_e	ω_e	P_e	M_e	P_t	V	f	P_f+P_a	U	K_u	K_e	g_e	Q_s
n_e/n_p	r.p.m	rad/s	Kw	N.m	Kw	km/h		Kw				g/Kw.h	lit/100km
0.20	840	88	12.48	141.8	11.48	29.0	0.012	2.55	0.22	1.16	1.09	344	4.00
0.25	1050	110	16.2	147.6	14.94	36.2	0.012	3.51	0.23	1.15	1.06	333	4.27
0.30	1260	132	20.1	152.6	18.53	43.5	0.013	4.66	0.25	1.14	1.03	323	4.58
0.35	1470	154	24.1	156.8	22.20	50.7	0.013	6.02	0.27	1.13	1.01	313	4.93
0.40	1680	176	28.2	160.1	25.91	58.0	0.014	7.63	0.29	1.12	0.99	305	5.31
0.45	1890	198	32.2	162.5	29.59	65.2	0.014	9.52	0.32	1.11	0.98	296	5.73
0.50	2100	220	36.1	164.1	33.21	72.5	0.015	11.70	0.35	1.09	0.97	288	6.17
0.55	2310	242	39.9	164.9	36.70	79.7	0.015	14.22	0.39	1.07	0.96	281	6.64
0.60	2520	264	43.5	164.9	40.03	87.0	0.015	17.11	0.43	1.05	0.96	273	7.12
0.65	2730	286	46.9	164.0	43.12	94.2	0.016	20.38	0.47	1.02	0.96	266	7.62
0.70	2940	308	49.9	162.2	45.95	101.5	0.016	24.07	0.52	0.99	0.96	258	8.12
0.75	3150	330	52.7	159.6	48.45	108.7	0.017	28.21	0.58	0.96	0.96	252	8.65
0.80	3360	352	55.0	156.2	50.57	116.0	0.017	32.82	0.65	0.93	0.97	246	9.22
0.83	3476	364	56.0	154.0	51.56	120	0.018	35.59	0.69	0.92	0.97	244	9.6
0.90	3780	396	58.1	146.9	53.48	130.5	0.018	43.60	0.82	0.91	0.99	244	10.82
0.95	3990	418	58.9	140.9	54.17	137.7	0.019	49.82	0.92	0.94	1.00	256	12.28
1.00	4200	440	59.0	134.1	54.28	145.0	0.019	56.63	1.0	1.04	1.01	288	14.90

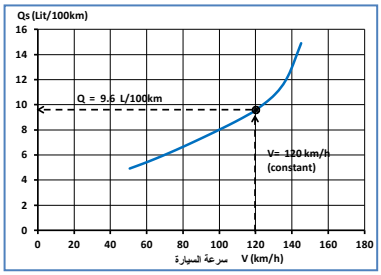
7- تحليل النتائج :

استناداً إلى نتائج برنامج المحاكاة التنفيذي المبين في الجدول (7) نستطيع مباشرة إنشاء مخطط اقتصادية السيارة الأولى كما هو واضح في الشكل (15) .إنَّ هذا المخطط يعطي إمكانية تحديد معدل استهلاك البنزين عند حركة السيارة بأيّ سرعة، على طريق رئيس وباستعمال نسبة التغيير الأخيرة. وهنا نلحظ أنَّ معدل الاستهلاك عند حركة السيارة بسرعة ثابتة قدرها 120 km/h يساوي إلى 7.6Lit/100km. إنَّ هذه النتيجة مطابقة تماماً لمعدَّل الاستهلاك المحدد تجريبياً، من قبل الشركة الصانعة [5]، على طريق رئيس سريع وبالسرعة المذكورة.

وبصورة مماثلة، وبالرجوع إلى نتائج برنامج المحاكاة المبين في الجدول (8) نستطيع أيضاً إنشاء مخطط اقتصادية السيارة الثانية كما هو واضح في الشكل (16). وهنا نلحظ أن معدل الاستهلاك عند حركة السيارة بحمولتها الكاملة، وبسرعة ثابتة 120 km/h يساوي إلى 9.6Lit/100km. إنَّ هذه النتيجة مطابقة أيضاً لقيمة الاستهلاك المحدد تجريبياً من قبل الشركة الصانعة [6]. ولإعطاء تصور رقمي، يبين الجدول (9) كيفية تغير مُعدَّل استهلاك البنزين والديزل للحالتين المدروستين لمختلف سرعات الحركة المتوسطة والعالية عند تعشيق الغيار الأخير. وهنا يتضح ببساطة، أنَّه كلما ازدادت سرعة السيارة ارتفع مُعدَّل استهلاك الوقود، نظراً لارتفاع قيمة المقاومات التي تعاكس حركة السيارة من جهة، ولضرورة إغناء الخليط في مجال السرعات العالية من جهة أخرى.



الشكل(15)-مخطط استهلاك وقود البنزين خلال حركة السيارة



الشكل(16) مخطط استهلاك وقود الديزل خلال حركة السيارة

الجدول (9) علاقة الاستهلاك بسرعة السيارة

معدل استهلاك الديزل Lit/100 km	معدل استهلاك البنزين Lit/100 km	سرعة السيارة Km/h
5.42	5.23	60
6.02	5.74	70
6.06	6.22	80
7.32	6.65	90
8.02	7.03	100
8.75	7.36	110
9.6	7.6	120
10.74	7.88	031
12.93	8.13	140
—	8.64	150
—	8.95	160
—	9.71	170
—	10.88	180
—	12.57	190
—	14.79	200

8- الخلاصة والمقترحات:

1. إنَّ المحاكاة الحاسوبية لاقتصادية السيارة، تعطي تصوراً عن مدى صلاحية السيارة للاستثمار، وتساعد الباحثين والشركات الصانعة في تطوير السيارات الحديثة.
2. تطابقت في هذا البحث نتائج محاكاة استهلاك البنزين مع النتائج التجريبية للشركة الصانعة. وبناء عليه يمكن القول : إنَّ عملية المحاكاة كانت تعكس وبشكل صحيح الحالة الحقيقية للسيارة ذات المحرك البنزيني.
3. كما تطابقت في هذا البحث نتائج محاكاة استهلاك الديزل مع النتائج التجريبية للشركة الصانعة . ومن هنا فإنَّ عملية المحاكاة كانت تعكس وبشكل صحيح الحالة الحقيقية للسيارة العاملة بوقود الديزل.
4. في حالة عدم توفر البيانات التجريبية حول معدّل استهلاك الوقود، يمكن اعتماداً على هذا البحث الحساب التقريبي لمعدّل استهلاك الوقود عند أيّ سرعة من سرعات حركة السيارة.
5. يتعلق استهلاك الوقود بتصميم السيارة وظروف حركتها ولمعرفة مدى تأثير العوامل التصميمية والتشغيلية يمكن الاستفادة من هذا البحث في الدراسات المستقبلية
6. يقترح هذا البحث الاستفادة من نتائج هذه الدراسة في محاكاة اقتصادية السيارات الكهربائية والهجينة لأنها تحظى باهتمام شركات السيارات في الوقت الحاضر.

المراجع References

1. **Ehsani, M., Gao,Y., Emadi,A., Modern Electric & Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles, Second Edition, CRC-Press, 2010.**
2. **Grishkeyvich, A. E., Theory of Motor Vehicles, Minsk, 1986.**
3. **Averill, M. L., Simulation Modeling and Analysis, Fourth Edition, McGraw-Hill, USA, 2007.**
4. **Nauheimer, H., Bertsche, B., Ryborz, J.,Automotive Transmissions, Second Edition,Springer, Stuttgart, 2010.**
5. **Auto Journal, ,Russia,1991.**
6. **Auto catalog Journal, Stuttgart, 1993.**
7. **Shitena, V. A., Lokenski, V. C., Vakhlamuv, V. K., Motor Vehicles, Transport, Moscow. 1989.**
8. **Artamonov, M. D. , Ilarionov, V. A., Morin, M. M., Fundamentals and Design of Motor Vehicles, Mir, Moscow.1976.**
9. **Bosch , Automotive Handbook, Robert Bosch Gmbh,7th edition,2007.**
10. **Beer,F.B., Johnston,E.R. ,Mazurek, D.F., Cornwell,P.J., Eisenberg, E.R., Vector Mechanics For Engineers, Ninth Edition, McGraw-Hill,2010.**

Received	**2020/5/14**	**إيداع البحث**
Accepted for Publ.	**2020/10/22**	**قبول البحث للنشر**