

تحليل أداء نظام إدارة المحرك البنزيني باستخدام برنامج تكنولوجيا السيارات

د. المهندس جمعة شحادة⁽¹⁾

المخلص

شهدت السنوات الأخيرة تطوراً ملحوظاً في أنظمة التحكم الالكترونية المستخدمة في السيارات، وبشكل خاص نظام إدارة المحرك البنزيني الذي يلعب دوراً بارزاً في تحسين أداء المحرك، وفي تخفيض استهلاك الوقود ونسبة غازات العادم الضارة إلى الحدود الدنيا. إن الهدف الرئيسي لهذا البحث هو دراسة أداء نظام إدارة المحرك البنزيني باستخدام برنامج المحاكاة الشهير تكنولوجيا السيارات. وعلى وجه العموم، فإن المهمة الأساسية لنظام الإدارة هي التحكم الدقيق في حقن الوقود وتوقيت شرارة الاشتعال في آن واحد. وفي هذه الحالة يتكون نظام الإدارة من وحدة تحكم الكترونية مبرمجة مسبقاً، بالإضافة إلى مجموعة من الحساسات التي تحدد متغيرات الدخل، ومجموعة من المشغلات التي تنفذ متغيرات الخرج.

تتضمن متغيرات الدخل: سرعة المحرك، وحمل المحرك، ودرجة حرارة المحرك، وزاوية فتح الصمام الخانق، بالإضافة إلى المعطيات الواردة عن نسبة الاكسجين في غازات العادم من ناحية، وعن ظاهرة الصفع من ناحية ثانية. وأما متغيرات الخرج فتشمل: زاوية توقيت شرارة الاشتعال ϕ_{ign} ، وفترة الإغلاق في وشيعة الاحتراق dw ، وزمن حقن الوقود t_f . لقد أظهرت نتائج المحاكاة مدى تأثير متغيرات الدخل على متغيرات الخرج وذلك عند عمل السيارة في ظروف تشغيل مختلفة تشمل: حالات إقلاع المحرك البارد، والإحماء، والدوران الحر، والتسارع، والتباطؤ. كما تمّ التوصل إلى مجال القيم العددية لمتغيرات الخرج المختلفة على النحو الآتي:

$$\phi_{ign} = [10^\circ - 50^\circ] ; dw = [25 - 46] \% ; t_f = [1 - 10] ms$$

أخيراً، وللدراسات المستقبلية يقترح هذا البحث دراسة نظام التحكم بإعادة تدوير غازات العادم.

الكلمات المفتاحية: محرك بنزيني، نظام إدارة المحرك، تكنولوجيا السيارات، محاكاة، حساسات، مشغلات، وحدة تحكم، متغيرات الدخل، متغيرات الخرج، زاوية توقيت الاشتعال، فترة الإغلاق، زمن حقن الوقود.

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

Performance Analysis of the Petrol Engine Management System by means of Automotive Technology Program

Dr. Joumah Shihada⁽¹⁾

Abstract

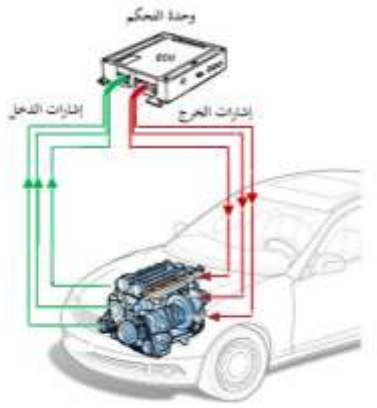
Recent years have witnessed a remarkable development in the electronic control systems used in cars, especially the petrol engine management system, which plays a prominent role in improving the performance of the engine, and in reducing fuel consumption and the harmful exhaust gases to the minimum limits. The main objective of this research is to study the performance of the petrol engine management system using the famous simulation program "Automotive Technology". In general, the main task of the management system is to precisely control the fuel injection and the timing of the ignition spark simultaneously. In this case, the management system consists of a pre-programmed electronic control unit, in addition to a set of sensors that determine the input variables, and a set of actuators that implement the output variables.

The input variables include: engine speed, engine load, engine temperature, throttle opening angle, in addition to the data received about the percentage of oxygen in the exhaust gases on the one hand, and the knock phenomenon on the other hand. As for the output variables, they include: the ignition timing angle ϕ_{ign} , the dwell period dw , and the fuel injection time t_f . The simulation results showed the influence of the input variables on the output variables when the car is working in different operating conditions including: engine cold start, warm-up, idle speed, acceleration and deceleration. The range of numerical values for the different output variables was also obtained as follows: $\phi_{ign} = [10^\circ - 50^\circ]$; $dw = [25 - 46]\%$; $t_f = [1 - 10] \text{ ms}$

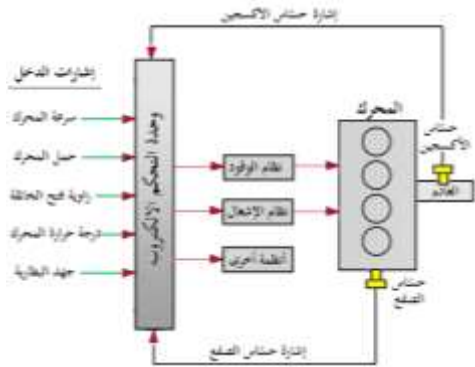
Finally, for future studies, this research suggests studying of EGR control system .

Keywords: petrol engine, engine management system, automotive technology, simulation, sensors, actuators, control unit, input variables, output variables, ignition timing angle, dwell period, fuel injection time.

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



الشكل (1) المبدأ الأساسي في التحكم



الشكل (2) عناصر الدخل والمخرج في نظام إدارة المحرك

إن التحكم الدقيق بالمحرك يتطلب تحديد متغيرات الخرج تجريبياً في أثناء اختبار المحرك، ثم انشاء مخططات الأداء من أجل استخدامها في برمجة وحدة التحكم. كما أن عملية التحكم يجب أن تراعي أنماط التشغيل المختلفة: إقلاع المحرك البارد، والإحماء، والتسارع، والتباطؤ، والدوران الحر، ونظام التحكم المفتوح، ونظام التحكم المغلق [3].

2- عملية الاحتراق في المحرك البنزيني:

- مراحل عملية الاحتراق: يجري عادة تقسيم عملية الاحتراق في المحرك إلى ثلاث مراحل [4,5,7]:
- مرحلة تأخر الاشتعال: حيث يحترق خلالها 5-10% من شحنة الاسطوانة.
 - مرحلة الاحتراق الرئيسية: حيث يحترق خلالها 80-90% من شحنة الاسطوانة.
 - مرحلة الاحتراق النهائية: حيث يحترق خلالها 5-10% من شحنة الاسطوانة.

ولكي تسير عملية الاحتراق بشكل طبيعي، يجب اختيار لحظة إعطاء الشرارة قبل نهاية شوط الانضغاط، وقبل وصول

1- مقدمة البحث:

في الحقيقة، تتجلى أهمية نظام إدارة المحرك المركب على معظم السيارات الحديثة، في أنه يلعب دوراً فعالاً في تخفيض استهلاك الوقود، وفي الحد من التلوث الناجم عن غازات العادم الضارة، بالإضافة إلى تحسين استطاعة المحرك. إن الوظيفة الأساسية الموكولة إلى نظام إدارة المحرك هي التحكم الأمثل في حقن الوقود وعملية الاشتعال في آن واحد [1]. كما أنه يتحكم في أنظمة المحرك الآتية:

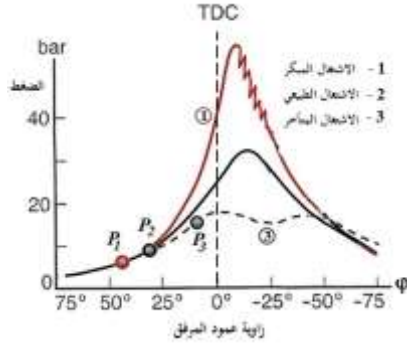
- (a) نظام استرجاع غازات العادم من أجل تخفيض انبعاث أكاسيد الازوت.
 (b) نظام إعطاء الهواء الإضافي بهدف تقليل انبعاث الهيدروكربونات في غازات العادم.
 (c) نظام التقاط أبخرة البنزين من خزان الوقود.
 (d) نظام التحكم بسرعة الدوران الحر (Idle speed) للمحرك.

(e) نظام التشخيص الذاتي لعناصر نظام الإدارة، والتي تضم الحساسات والمشغلات وكذلك وحدة التحكم الالكترونية (ECU).

يوضح الشكل (1) المبدأ الأساسي في التحكم في المحرك، بينما يبيّن الشكل (2) مخططاً مبسطاً لمكونات نظام الإدارة [1]. في هذا المخطط تتعرف وحدة التحكم المبرمجة مسبقاً إلى حالة المحرك من خلال المعلومات الواردة إليها من الحساسات، وتبعاً لهذه الحالة تقوم بإجراء المعالجة وإعطاء الأوامر إلى الحاقنات لحقن الوقود، وإلى وشيعة الاحتراق

لإعطاء شرارة الاشتعال في الوقت المناسب. هذا وتشمل قراءات الحساسات: سرعة المحرك، والحمل، وزاوية فتح الخانقة، ودرجة حرارة المحرك، وجهد البطارية، بالإضافة إلى إشارتي التغذية المرتدة المنقولتين عبر حسّاسي الأكسجين والصفاة [2,3].

تأثير توقيت الاشتعال: يُبيّن الشكل (5) تأثير لحظة انطلاق شرارة الاشتعال على منحنى الضغط داخل المحرك، فعندما تكون زاوية التوقيت كبيرة جداً (النقطة P_1) فإن الاحتراق يصبح مضطرباً ويتراقق مع حدوث ظاهرة الصفع الخطيرة [5].



الشكل (5) العلاقة بين توقيت الاشتعال والضغط

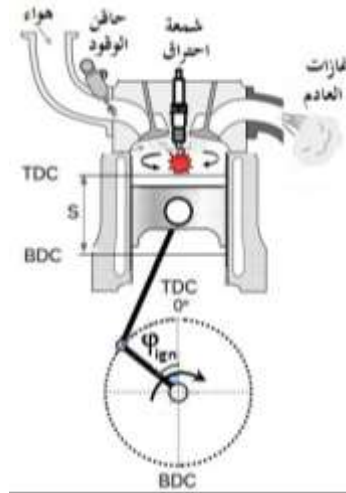
3- مخططات أداء المحرك:

إن تحقيق أفضل أداء لمحرك السيارة، يعتمد على الدقة في ضبط توقيت الاشتعال ومعايرة الوقود. ولهذا تستخدم وحدات التحكم المبرمجة بالاعتماد على معطيات تجريبية كما هو واضح في مخططات الأداء الثلاثة الآتية [6]: المخطط الأول يحدّد زوايا توقيت الشرارة كتابع لسرعة المحرك والحمل الواقع تحت تأثيره كما في الشكل (6). يجري في البداية ضبط زاوية التوقيت باستخدام البيانات التي يعطيها مخطط الأداء، ثم تقوم وحدة التحكم بزيادتها تدريجياً بشكل يؤمن عدم وقوع أي صفع خلال عملية الاحتراق وذلك اعتماداً على إشارة حساس الصفع.

كما يوضّح الشكل (7) المخطط الثاني والذي يحدد فترة الاغلاق كتابع لسرعة دوران المحرك وجهد البطارية. إن فترة الاغلاق هي الفترة الزمنية التي يسري خلالها التيار الكهربائي في الملفات الأولية لوشيعا الاحتراق [2]. ويجري تغيير هذه الفترة بهدف الحفاظ على شدة التيار الاولى المار في وشيعا الاحتراق قبل انطلاق الشرارة. ويجري التعبير حالياً عن فترة الاغلاق بمفهوم نسبة الاغلاق [1].

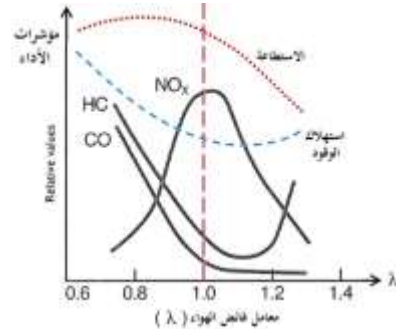
يُبيّن الشكل (8) المخطط الثالث والذي يحدد زمن حقن الوقود كتابع لسرعة دوران المحرك والحمل الواقع تحت تأثيره. يجري في البداية تحديد زمن الحقن باستخدام

المكبس إلى النقطة الميتة العليا (TDC)، بزواية تسمى زاوية توقيت الاشتعال ويرمز لها ϕ_{ign} كما في الشكل (3). وقد أثبتت التجارب بأنه في حالة الاحتراق الطبيعي للخليط، يبلغ الضغط في الاسطوانة قيمته العظمى بعد النقطة (TDC) الموافقة لدوران عمود المرفق بزواية قدرها $10^\circ-12^\circ$ تقريباً [1].



الشكل (3) توقيت الشرارة في اسطوانة المحرك

تأثير تركيب الخليط: يوضح الشكل (4) العلاقة بين مؤشرات أداء المحرك ومعامل فائض الهواء [5,9]. حيث نلاحظ بأنه عندما تكون قيمة λ قريبة من الواحد، فان نسبة الغازات الصارة وكذلك قيمة الاستهلاك النوعي للوقود تكون منخفضة، وذلك باستثناء NO_x .

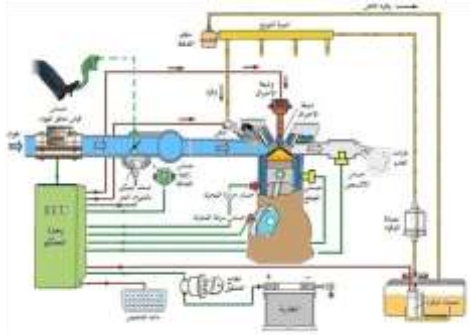


الشكل (4) تأثير تركيب الشحنة على مؤشرات الأداء

(b) مقارنة معطيات الحساسات مع قيم جداول المقارنة المخزنة في ذاكرة وحدة التحكم.
(c) اختيار القيم الأساسية للتحكم بعمليتي الحقن والاشتعال من تلك الجداول، ثم اجراء التصحيح أو التعديل الملائم عند اللزوم.

التحكم بحقن الوقود: عند تشغيل المحرك، تقوم مضخة الوقود الكهربائية بسحب الوقود من خزان الوقود، وسوقه عبر مصفاة الوقود إلى انبوبة التوزيع الموصولة بمنظم الضغط. بعد ذلك تعمل الحاقنات على حقن الكمية اللازمة من الوقود استناداً إلى أوامر وحدة التحكم.

التحكم بتوقيت الاشتعال: تقوم وحدة التحكم بتحديد لحظة اطلاق شرارة الاحتراق على النحو الآتي: عند تشغيل المحرك، يسري التيار الكهربائي من البطارية عن طريق وحدة التحكم إلى وشيعة الاحتراق، فيتولد عندئذ حقل مغناطيسي في قلب الوشيعة. وعند قيام وحدة التحكم بقطع التيار يخفتي الحقل المغناطيسي فجأة، الأمر الذي يؤدي إلى ظهور تيار ذي جهد عال في الملفات الثانوية لوشيعة الاحتراق وانطلاق شرارة الاشتعال بين قطبي شمعة الاحتراق.

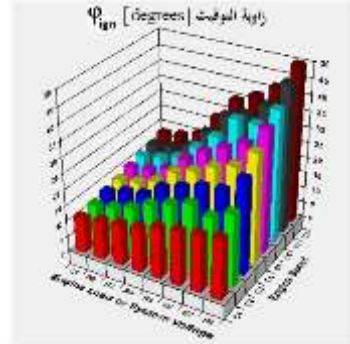


الشكل (9) المخطط العام لنظام إدارة المحرك

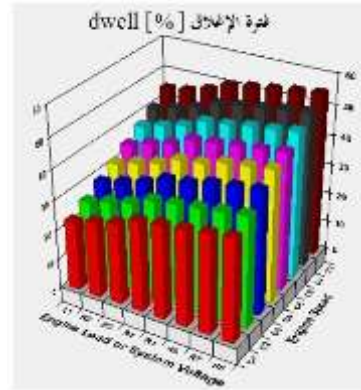
5- برنامج المحاكاة:

يُبيّن الشكل (10) الواجهة الرئيسية لبرنامج محاكاة نظام الإدارة المستخدم في المحركات العاملة بوقود البنزين [6,10]. نرى في وسط هذا الشكل وحدة التحكم الالكترونية (ECU) المبرمجة مسبقاً باستخدام جداول المقارنة المرجعية الثلاث الآتية:

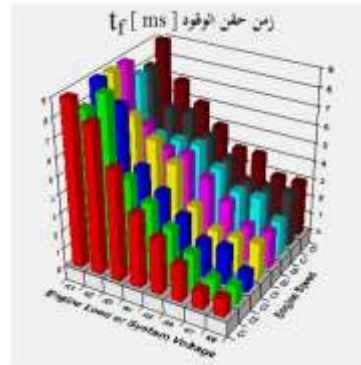
البيانات التي يعطيها مخطط الأداء، ثم تقوم وحدة التحكم بتصحيحه بشكل يتناسب مع درجة حرارة المحرك وجهد البطارية، وكذلك تعديله حسب إشارة حساس الاكسجين.



الشكل (6) مخطط زوايا توقيت شرارة الاشتعال



الشكل (7) مخطط قيم فترات الاغلاق في وشيعة الاحتراق



الشكل (8) مخطط أزمنة الحقن

4- المخطط العام لنظام الإدارة:

يُوضّح الشكل (9) المخطط العام لنظام إدارة المحرك [3,6]. وهنا يتميز نظام الإدارة بأنه يحتوي على وحدة تحكم واحدة فقط، تعمل على معايرة الوقود وضبط الاشتعال وفق التسلسل الآتي:

(a) التعرف على حالة المحرك من خلال الحساسات

يُوضَّح الجدول رقم (1) مدى تأثير معطيات الدخل على معطيات الخرج خلال حركة السيارة في حالات الإقلاع والإحماء والتسارع والتباطؤ والدوران الحر. تشمل متغيرات الخرج: زاوية الاشتعال مقاسة بالدرجات، وفترة الإغلاق كنسبة مئوية، وزمن الحقن بوحدة الملي ثانية. وهنا نلاحظ بوضوح كيف تتغير قيمة معامل فائض الهواء في أثناء عمل المحرك.

الجدول (1) نتائج محاكاة نظام الإدارة في ظروف تشغيل

مختلفة

رقم المحرك	حمل المحرك	درجة حرارة المحرك	معامل فائض الهواء	رقم الغيار	سرعة السيارة	زاوية توقيت الاشتعال	فترة الإغلاق	زمن حقن الوقود	وضع الصمام الخلفي
Ne	n_e	Load	T	λ	i_{gear}	V	ϕ_{ign}	dw	t_f
	r.p.m	%	°C		km/h	degrees	%	ms	throttle
1	800	5	0	1	0	10	25	1.65	Off
2	1000	18	20	<1	1	11	16	25	On
3	1200	26	40	<1	2	16	16	25	On
4	1300	54	50	<1	2	17	17	28	On
5	1400	54	60	<1	5	52	18	28	On
6	1500	21	70	>1	4	44	20	28	On
7	1600	15	80	<1	5	59	20	28	On
8	1700	22	90	>1	1	18	22	28	On
9	1800	37	90	<1	3	37	20	28	On
10	2000	60	90	<1	2	27	20	31	On
11	2400	30	90	>1	3	49	24	31	On
12	2600	46	90	>1	5	96	22	31	On
13	2800	60	90	<1	5	104	20	31	On
14	2900	62	90	>1	3	59	22	34	On
15	3000	68	90	<1	2	40	17	34	On
16	3100	68	90	>1	3	63	17	34	On
17	3200	21	90	<1	5	119	29	34	On
18	3300	64	90	>1	1	35	17	34	On
19	3400	46	90	<1	2	45	24	34	On
20	3500	46	90	>1	2	47	24	34	On
21	3600	40	90	<1	4	106	27	37	On
22	3800	14	90	>1	5	141	33	37	On
23	4000	39	90	>1	3	82	27	37	On
24	4200	11	90	>1	4	124	33	37	On
25	4400	61	90	>1	1	47	23	37	On
26	4600	12	90	<1	2	61	36	40	On
27	4700	29	90	>1	5	174	36	40	On
28	4900	79	29	>1	5	181	17	40	On
29	4800	100	90	<1	4	135	16	40	Full
30	5000	76	90	<1	5	185	19	40	On

واعتماداً على برنامج المحاكاة نستطيع معرفة العلاقة بين زاوية توقيت الاشتعال وسرعة المحرك كما في الشكل (11). في هذه الحالة ومن أجل تحقيق أفضل أداء للمحرك العامل، تعمل وحدة التحكم على زيادة هذه الزاوية مع زيادة سرعة المحرك، بحيث يبلغ الضغط خلال عملية الاحتراق قيمته العظمى بعد وصول المكبس للنقطة الميتة العليا بزاوية قدرها 12° تقريباً كما هو واضح في الشكل (12). وهنا نلاحظ بأنه عندما يدور المحرك البنزيني في شروط التشغيل العادية وبسرعة 1000 r.p.m تكون زاوية الاشتعال 19° ، وعندما تبلغ سرعته 2000 r.p.m تصبح زاوية الاشتعال 30° .

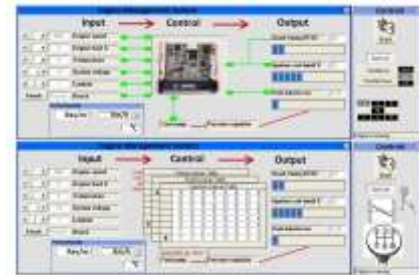
واستناداً إلى الجدول رقم (1)، يمكننا ملاحظة تأثير سرعة المحرك على نسبة الإغلاق في وشيعة الاحتراق قبل انطلاق شرارة الاشتعال. وهنا نرى بأنه مع ازدياد

1. جدول التوقيت (Timing lookup table).
 2. جدول الإغلاق (Dwell lookup table).
 3. جدول الحقن (Injection lookup table).
- وكما نلاحظ من البرنامج أن وحدة التحكم تتعرف على حالة المحرك من خلال متغيرات الدخل (Inputs) الآتية:
1. سرعة المحرك (Engine speed)
 2. حمل المحرك (Engine load %)
 3. درجة حرارة المحرك (Temperature)
 4. جهد البطارية (System voltage)
 5. معامل فائض الهواء (Lambda)
 6. حالة الصنف (Knock)

وكما هو واضح من البرنامج فإن متغيرات الخرج (Outputs) هي:

1. توقيت الشرارة (Spark timing BTDC).
2. فترة الإغلاق (Ignition coil dwell %).
3. زمن الحقن (Fuel injector ms).

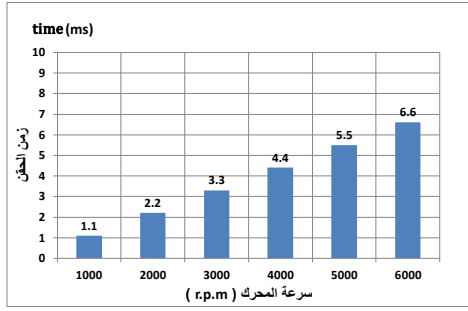
تبدأ عملية المحاكاة بتشغيل المحرك وذلك بالنقر على زر التشغيل (Start)، وبعد ذلك يجري تعشيق الغيار الأول ثم النقر على زر اقلاع السيارة من مكانها (Auto run) في دورة قيادة تحاكي أداء نظام الإدارة في مختلف ظروف التشغيل.



الشكل (10) الواجهة الرئيسية لبرنامج المحاكاة

6- نتائج المحاكاة وتحليلها:

في البداية، لا بُدَّ من الإشارة إلى أن نظام إدارة المحرك المستخدم في هذا البرنامج يقوم بضبط توقيت الاشتعال ومعايرة الوقود كما هو الحال في السيارة الحقيقية [6]. ولإجراء عملية المحاكاة في مختلف ظروف حركة السيارة، نقوم بتشغيل البرنامج ثم نسجّل التغيرات التي تطرأ على متغيرات الدخل، ومدى تأثيرها على متغيرات الخرج.



الشكل (13) تأثير سرعة المحرك على زمن الحقن

7- الخلاصة والمقترحات:

1. إن القوانين الصارمة المتعلقة بالحد من التلوث، ومن استهلاك الوقود، جعلت من إدخال نظام إدارة المحرك في السيارات الحديثة أمراً ضرورياً في معظم دول العالم.
2. إن برنامج تكنولوجيا السيارات (AT) هو من البرامج الجديرة بالاهتمام، لأنه يحاكي نظام الإدارة المسؤول عن عملية التحكم في ضبط الاشتعال ومعايرة الوقود كما هو الحال في السيارة الحقيقية. هذا مع العلم أن تحسين أداء المحرك لا يمكن أن يتحقق إلا بالتحكم المشترك في نظام حقن الوقود ونظام الإشعال.
3. إن متغيرات الخرج الرئيسية في نظام إدارة المحرك هي: زاوية توقيت الاشتعال (ϕ_{ign})، وفترة الإغلاق (dw)، وزمن حقن الوقود (t_f). إن القيم العددية لهذه المتغيرات - تبعاً لبرنامج المحاكاة - تتغير وفقاً لظروف التشغيل، وتقع لمعظم سيارات الركوب ضمن المجالات الآتية:

$$\phi_{ign} = 10^\circ - 50^\circ$$

$$dw = 25 - 46 \%$$

$$t_f = 1 - 10 \text{ milliseconds}$$

4. عند حركة السيارة في ظروف التشغيل المختلفة، فإن نظام الحلقة المغلقة في ضبط الاشتعال ومعايرة الوقود هو الأكثر أهمية، لأنه يعتمد على مخططات أداء المحرك، وعلى إشارتي التغذية الخلفية المنقولتين من خلال حساسي الأكسجين والضغط.
5. يقترح هذا البحث تطوير برنامج المحاكاة بحيث يشمل أيضاً نظام إعادة تدوير غازات العادم.

سرعة المحرك تقوم وحدة التحكم بزيادة نسبة الإغلاق، وذلك لتفادي انخفاض الجهد العالي للتيار الكهربائي الواصل إلى شمعات الاحتراق.

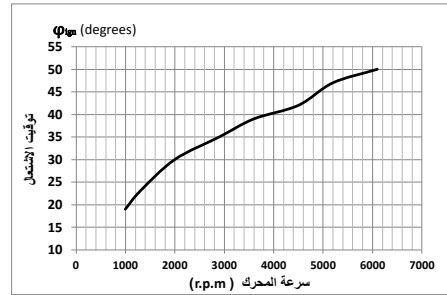
هذا ويوضح الشكل (13) كيفية تغير زمن الحقن كتابع لسرعة المحرك العامل وفق شروط تحميل مختلفة. وهنا يتضح ببساطة، بأنه كلما ازدادت سرعة السيارة ازدادت كمية الوقود المحقونة، نظراً لازدياد كمية الهواء التي يمتصها المحرك من جهة، ولضرورة إغناء الخليط في مجال السرعات العالية من جهة أخرى. وأخيراً، وبالاعتماد على برنامج المحاكاة جرى تحديد المجال التقريبي الذي تقع ضمنه القيم العددية لكل متغير من متغيرات الخرج عند عمل المحرك ضمن ظروف تشغيل مختلفة، وذلك على النحو الآتي:

$$\phi_{ign} = 10^\circ - 50^\circ$$

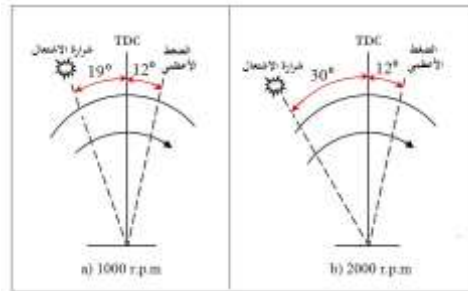
$$dw = 25 - 46 \%$$

$$t_f = 1 - 10 \text{ milliseconds}$$

وعلى وجه العموم، توافق القيم الدنيا السرعات المنخفضة للمحرك، بينما توافق القيم القصوى السرعات العالية للمحرك.



الشكل (11) تأثير سرعة المحرك على توقيت الاشتعال



الشكل (12) مثال يبين تغير زاوية الاشتعال مع سرعة المحرك

References

1. Hillier, V. A.W., **Fundamentals of Automotive Electronics, Second Edition, Nelson Thornes, 2001.**
2. Bonnick, A. M., **Automotive Computer Controlled Systems, First Edition, Butterworth-Heinemann, 2001.**
3. Tom Denton, J., **Automobile Electrical and Electronic Systems, Third Edition, ARNOLD, 2004.**
4. Willard W. Pulkrabek, **Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engines, Second Edition, Prentice Hall, 2003.**
5. Bosch, **Automotive Handbook, Robert Bosch GmbH, 7th edition, 2007.**
6. Tom Denton, J., **Automotive Electronic Systems Simulation and Diagnostic Software, Operations Manual.**
7. Singh, K., **Automobile Engineering, Eighth Edition, Lomus Offset Press, Delhi, 2000.**
8. Siga, X., Medzutahi, C., **An introduction to Automotive Electronics, Moscow-Mir, 1989.**
9. William, B. R., **Understanding Automotive Electronics, Eighth Edition, Butterworth-Heinemann, USA, 2017.**
10. www.automotive-technology.co.uk