

محاكاة عملية الاحتراق في محركات الديزل ذات الحقن المباشر، باستخدام النماذج شبه البعدية

الدكتور نبيل غدير*
الدكتور عارف علي**
أزد زيود***

(تاريخ الإيداع 12 / 9 / 2011. قَبْلُ للنشر في 22 / 12 / 2011)

□ ملخص □

تلبية لمتطلبات تخفيض زمن وكلفة تطوير المحركات، فإن أدوات المحاكاة تستخدم للتصميم الأمثل الأولي لدورة العمل الترموديناميكية. وبسبب تزايد درجات الحرية في أنظمة إدارة المحركات، فإن التركيز موجه على أدوات المحاكاة ذات زمن الحساب القصير. وتصف هذه المقالة طريقة مبتكرة لتطوير نماذج الاحتراق شبه البعدية، بالاستخدام المتعدد لتوابع فييبي Viebe's functions. وتتضمن نماذج لتأخر الاشتعال، مرحلة الاشتعال السريع، مرحلة الاشتعال البطيء، مرحلة الاشتعال المتأخر. والتي طورت لتصف مجالاً واسعاً من حالات عمل محركات الديزل ذات الحقن المباشر.

الكلمات المفتاحية: معدل انطلاق الحرارة، محركات ديزل، حقن مباشر، محاكاة.

* أستاذ - قسم القوى الميكانيكية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.
** أستاذ مساعد - قسم القوى الميكانيكية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.
*** طالب دراسات عليا (ماجستير) - قسم القوى الميكانيكية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

Using Quasi-Dimensional Models, Simulating Combustion in Direct Injection Diesel Engines

Dr. Nabil Ghadir^{*}
Dr. Aref Ali^{**}
Azd Zayoud^{***}

(Received 12 / 9 / 2011. Accepted 22 / 12 / 2011)

□ ABSTRACT □

In order to save time and cost for engine development, simulation tools are used for pre-optimization of the thermodynamic working cycle. Due to the increasing number of possible degrees of freedom in engine management system, the focus is on simulation tools with short computation time. This paper describes a generic strategy for the development of Quasi-dimensional combustion models using multi-Viebe's function. Models for ignition delay, pre-mixed combustion phase, mixing-controlled combustion phase, and late combustion phase were developed based on equations describing a wide range of working cases involving direct injection diesel engines.

Key words: Rate of heat release, ROHR, Diesel Engines, direct injection, Simulation.

^{*}Professor, Department of Mechanical Power, Faculty of Mechanical & Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

^{**}Associate Professor, Department of Mechanical Power, Faculty of Mechanical & Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

^{***}Postgraduate Student, Department of Mechanical Power, Faculty of Mechanical & Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

مقدمة:

يعتبر الاحتراق العملية الأساسية في محركات الاحتراق الداخلي والتي يتم من خلالها تحول الطاقة الكيميائية الكامنة في الوقود إلى طاقة حرارية ثم حركية، ومنه أخذت تسمية آلات احتراق سواء داخلية أو خارجية. تستخدم الآن محركات الديزل ذات الحقن المباشر (DIDE) Direct Injection Diesel Engine في النقل البحري والآليات الثقيلة بشكل واسع، كما يتزايد استخدامها في وسائط النقل الخفيفة في أنحاء العالم. نظراً لاقتصاديتها في استهلاك الوقود مقارنة بالمحركات البنزينية وعدم وجود ضياعات للخانق عند الأحمال الجزئية. كما يمكن زيادة استطاعتها بالنسبة لكتلتها باستخدام أنظمة تشحيم ودون الخوف من حدوث ظاهرة الطرقة [1]. ويتم أمثلة احتراق الوقود بتطوير تصميم حجرة الاحتراق، أنظمة حقن الوقود عالية الضغط، تدوير غازات العادم، تصميم الحواقي، واستراتيجيات حقن الوقود [1].

ومن أهم النتائج التي نحصل عليها من مميزات الاحتراق عند محاكاة المحرك هو منحنى معدل انطلاق الحرارة. كما تعطي مميزات الاحتراق معامل مفتاحي لنمذجة المحركات حيث يؤثر انطلاق الحرارة من الوقود في الاسطوانة مباشرة على عمليات الحساب والتصميم للمحركات. تتعدد نماذج الاحتراق وتصنف تبعاً لدرجة تعقيدها وزمن الحساب، أو عدد المتغيرات اللازمة لإتمام حسابات هذه النماذج، والغاية الأساسية حساب معدل انطلاق الحرارة. ويوجد ثلاث أصناف رئيسية:

1- نماذج ترموديناميكية (البعديّة):

(Single-Zone, Thermodynamic, Or zero-dimensional models)

يتم إنشاء هذه النماذج على أساس القوانين الترموديناميكية. ولا يوجد في هذه الحالة عرض لمراحل الاحتراق وحساباتها. وتسمح بارامترات كثيرة كالضغط، الحرارة... الخ [1]. وبساطة هذه النماذج تؤمن نتائج حسابات كافية. مع الإشارة إلى ضرورة العلاقات التجريبية لبعض الحسابات كحساب منحنى انطلاق الحرارة بالاعتماد على منحنى الضغط ويتم استخدام مقاييس بيزومترية، وعندما تكون ذات تصاميم رفيعة الأداء، تعطي قيماً عند كل 0.5 درجة أو أقل لعمود المرفق [2]. وهذه الطريقة ممكنة فقط عند توافر منحنى تغير الضغط ضمن الاسطوانة أي بعد إنتاج المحرك .

2- النماذج الظاهرية (شبه البعدية):

(Phenomenological or Quasi-dimensional models)

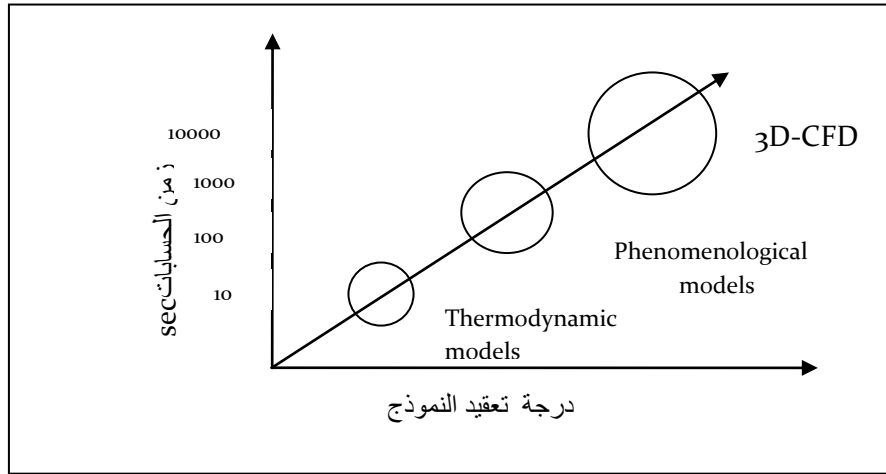
وتستخدم العديد من النماذج لحساب عمليات الاحتراق، والنواتج الملوثة تبعاً لظواهر فيزيائية وكيميائية كتشكل الرذاذ، الاحتراق... غالباً يقسم الحيز المدروس إلى قطاعات جزئية ويكون من الضروري لتسهيل الدراسة. وتختلف النماذج شبه البعدية عن الترموديناميكية من حيث اعتبار حجرة الاحتراق مثالية، والاعتماد على نتائج تجريبية في النماذج الترموديناميكية [3]، [4]. ومن أهم النماذج المستخدمة نموذج فييبي Viebe's function، حيث يستخدم في مرحلة التصميم عندما تتوافر قيم سرعة الدوران، زاوية الحقن، مدة الحقن... الخ وبغياب منح الضغط الدليلي. وتأخذ العديد من الحسابات ثواني معدودة في النماذج شبه البعدية، بدلا عن ساعات باستخدام النماذج البعدية.

3- نماذج بعديّة (ثلاثية الأبعاد) ديناميك الموائع الحسابي:

(CFD computational fluid dynamics, Or Multi-dimensional Models)

وتبنى على أساس وصف العمليات الفيزيائية والكيميائية الحاصلة في المحرك وهي تعتمد على قوانين حفظ الطاقة وكمية الحركة تلك المكتوبة بشكل تفاضلي. ويمكن التعبير عن الزمان والمكان. ويتم فيها وصف عملية الحقن،

التدوير، التبخر، تشكل المزيج، الاحتراق، بالإضافة لنواتج الاحتراق. وتحتاج وقتاً طويلاً للحساب. كما يوضح الشكل (1) مقارنة بين النماذج من حيث التعقيد وزمن الحسابات.



الشكل (1): مقارنة بين زمن الحسابات والتعقيد لنماذج الاحتراق الثلاثة.

أهمية البحث وأهدافه:

من أهم البارامترات المأخوذة من مميزات الاحتراق عند محاكاة المحركات هو منحنى معدل انطلاق الحرارة. حيث يرتبط عدد كبير من البارامترات بعملية الاحتراق:

• منحنى الضغط (المخطط الدليلي للمحرك)، والذي يؤثر بشكل مباشر على الحسابات الديناميكية للمحرك، وعلى الاهتزازات والضجيج في المحرك.

• المواد الملوثة في غازات العادم ومن أهمها، أكاسيد النتروجين NOx والسخام Soot، حيث إن القوانين الأوربية والعالمية تزداد صرامة مع مرور الوقت، وتخفض الحد الأعلى المسموح به.

• معدل استهلاك الوقود، والذي تتعاطم أهميته مع الارتفاع العالمي لأسعار الوقود.

• دراسة منظومات التشحيم.

• دراسة منظومات التبريد تبعاً لكمية الحرارة المطروحة في عملية الاحتراق.

• دراسة علم المواد المستخدمة في صناعة المحركات.

والبارامترات السابقة ليست منفصلة تماماً، ولا يمكن دراسة أحدها بإهمال الآخر، فلا يجوز مثلاً الاهتمام بمعدل استهلاك الوقود على حساب معدل المواد الملوثة في غازات العادم.

وما زاد من أهمية النماذج شبه البعدية إمكانية استخدامها في وحدات التحكم الإلكتروني بسبب زمن الحساب الصغير قياساً بالنماذج متعددة الأبعاد.

وفي مراحل التصميم عندما تتوافر قيم سرعة الدوران و زمن الحقن وزاويته... الخ، تستخدم توابع فيبي Viebe's functions لحساب معدل انطلاق الحرارة، بالرغم من عدم توافر المخطط الدليلي.

يهدف البحث إلى تحديد معدل انطلاق الحرارة في محركات الديزل ذات الحقن المباشر، بالاعتماد على النماذج شبه البعدية باستخدام توابع فيبي Viebe's functions، وذلك عند سرعات مختلفة وأحمال مختلفة. وتحديد قيم

متحولات توابع فيبييه *Viebe's functions*، للحصول على أفضل النتائج، ودراسة مرحلة تأخر الاشتعال وتأثيرها والعوامل المؤثرة فيها.

طرائق البحث ومواده:

اعتمدت منهجية البحث على دراسة وتحليل التجارب والأبحاث السابقة والمراجع العالمية والاطلاع على ما قدمته الدراسات العالمية في مجال الاحتراق في محركات الديزل، والتحليل العلمي والمعالجة لقاعدة بيانات لعمل محركات عند أحمال مختلفة وسرعات مختلفة، لتوصيف منحنى انطلاق الحرارة باستخدام توابع رياضية *Viebe's function*، القائمة على الوصف التجريبي. وزيادة إمكانية تحقيق نتائج دقيقة وذلك باستخدام المتعدد لتوابع فيبييه *Viebe's functions*.

النتائج والمناقشة:

1. مراحل الاحتراق في محركات الديزل:

يوضح الشكل (2) مراحل الاحتراق المختلفة لمحرك ديزل تقليدي ذي حقن مباشر، يقسم منحنى معدل انطلاق الحرارة إلى المراحل التالية [5]:

(a) فترة تأخر الاشتعال (ab):

تمثل الفترة من لحظة حقن الوقود في غرفة الاحتراق و حتى لحظة تفاعلات الأكسدة السريعة وانفصال خط الضغط عند النقطة b تؤثر هذه الفترة على مجمل عملية الاحتراق. يكون الاحتراق في هذا الطور هادئاً إذا كان زمن تأخر الاشتعال قصيراً بينما يكون الاحتراق عنيفاً إذا كان زمن تأخر اللهب طويلاً، لأنه تتجمع كمية كبيرة من الوقود المهيأ للاحتراق ويؤدي هذا إلى ارتفاع حاد وسريع في الضغط.

(b) طور الاحتراق السريع للمزيج (bc):

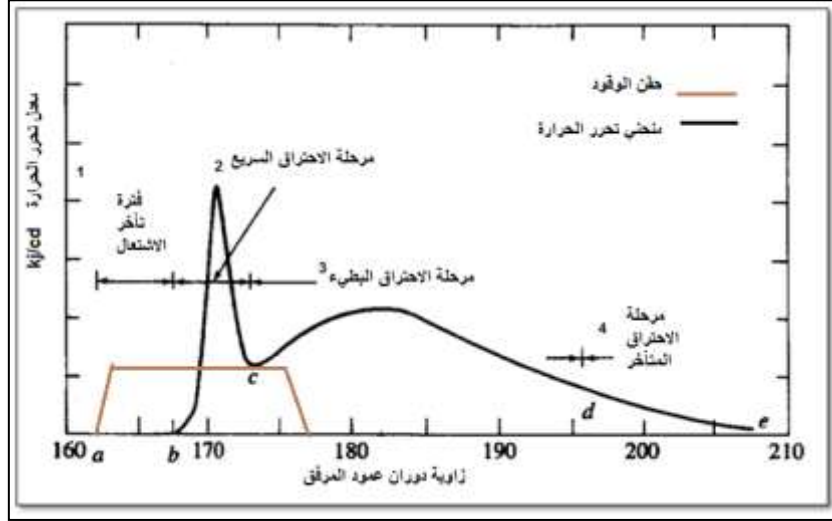
يدخل الوقود الممتزج مع الهواء حدود عملية الاحتراق. تنطلق حرارة عالية عندما يضاف المزيج المحترق إلى الوقود الجاهز للاحتراق (يحدث احتراق المزيج واحتراق جزئي للوقود المحقون) ويحدث بعد ذلك احتراق لكل المزيج. يرتفع ضغط الغازات داخل الأسطوانة ليلعب قيمته الأعظمية حيث يستمر في هذه المرحلة حقن الوقود في حجرة الاحتراق. وهنا يحدث زيادة في درجة الحرارة والضغط.

(c) طور الاحتراق المنتظم للمزيج (cd):

في هذه المرحلة تستمر شدة انطلاق الحرارة بالزيادة، وتبلغ درجة حرارة الشحنة قيمتها العظمى. في الوقت الذي يحصل فيه عدة عمليات مطلوبة (تذير الوقود السائل، التبخر، مزج بخار الوقود مع الهواء، تفاعلات اللهب الكيميائية) وتكون نسبة معدل انطلاق الحرارة مرتبطة بعملية المزج بين الهواء و الوقود السائل.

(d) طور الاحتراق الأخير أو البطيء (de):

تستمر هذه المرحلة لتأخذ جزءاً من شوط التمدد و تنخفض درجة الحرارة والضغط بسبب تناقص تركيز الوقود والهواء وزيادة حجم حجرة الاحتراق فتتقص سرعة الاحتراق ويبدأ بالتباطؤ والتوقف تدريجياً.



الشكل (2) مراحل الاحتراق المختلفة لمحرك ديزل تقليدي ذو حقن مباشر.

2. تابع فيبييه Viebe's functions الأحادي والمضاعف لحساب معدل انطلاق الحرارة:

تابع فيبييه Viebe's functions هو تابع أسي، والمعادلة (1) تمثل قانون انطلاق الحرارة HRL (Heat Release Law) ويعطى كنسبة مئوية تبعا لزاوية دوران عمود المرفق. أما المعادلة (2) فتمثل معدل انطلاق الحرارة (Rate of Heat Release) RoHR وهو تابع فيبييه Viebe's functions المفرد، وينتج من اشتقاق قانون انطلاق الحرارة:

$$HRL = \left[1 - e^{-a \left(\frac{\varphi - \varphi_{SOC}}{\Delta\varphi_{CD}} \right)^{m+1}} \right] \quad (1)$$

$$RoHR = a * (m + 1) * \left(\frac{\varphi - \varphi_{SOC}}{\Delta\varphi_{CD}} \right)^m * e^{-a \left(\frac{\varphi - \varphi_{SOC}}{\Delta\varphi_{CD}} \right)^{m+1}} \quad [\% / C^{\circ}A] \quad (2)$$

with $\varphi_{SOC} \leq \varphi \leq \varphi_{SOC} + \Delta\varphi_{CD}$

وفق المعادلة (3) نحصل على منحنى انطلاق الحرارة مقدرا بالجول من المعادلة الأولى بضربها بالمحتوى الحراري الكلي في الوقود، حيث يحسب المحتوى الحراري للوقود وفق المعادلة (4)، وبنفس الطريقة نحصل على معدل انطلاق الحرارة مقدرا بـ $[Kj/C^{\circ}A]$ المعادلة (5) ويصح هذا على تابع فيبييه Viebe's functions المضاعف، والمتعدد.

$$Q_{f(\varphi)} = Q_{f,total} * HRL \quad (3)$$

$$Q_{f,total} = m_{fuel} * lhv \quad (4)$$

$$\frac{dQ_{f(\varphi)}}{d\varphi} = Q_{f,total} * RoHR \quad (5)$$

$Q_{f,total}$: مقدار الطاقة الكلية الموجودة في الوقود $[KJ]$.

m_{fuel} : كتلة الوقود الكلية الداخلة إلى حجرة الاحتراق $[Kg]$.

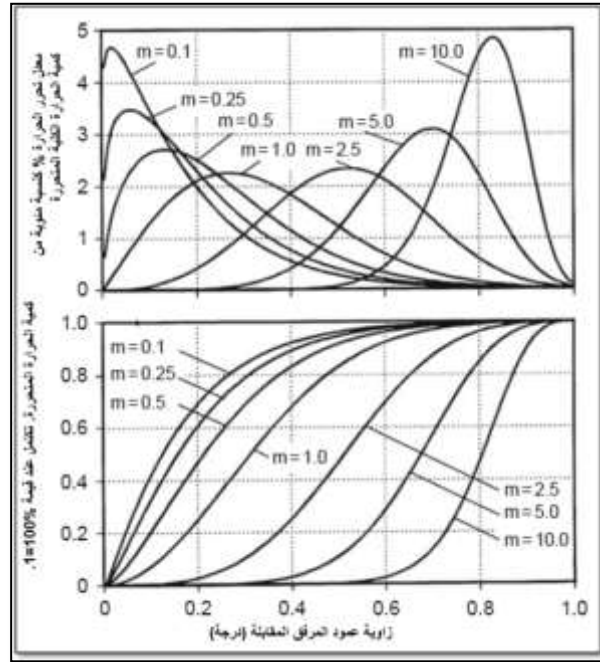
Lhv : القيمة الحرارية الدنيا للوقود $[J/kg]$.

φ_{SOC} : زاوية دوران عمود المرفق التي يبدأ عندها الاحتراق $[C^{\circ}A]$.

φ_{EOC} : زاوية دوران عمود المرفق التي ينتهي عندها الاحتراق $[C^{\circ}A]$.

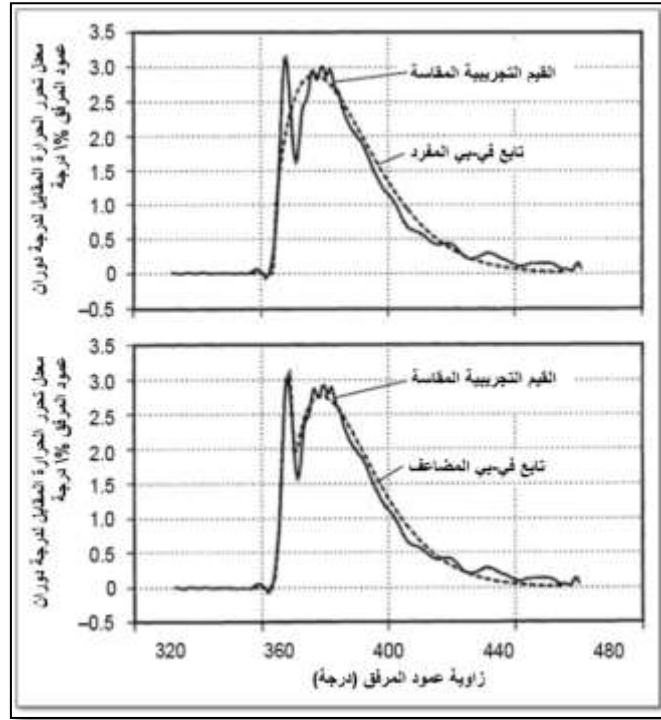
$$\varphi_{CD} = \varphi_{EOC} - \varphi_{SOC} [C^{\circ}A], \quad m: \text{معامل شكل حيث أن } 0 < m$$

a: معامل يحدد النسبة المئوية للطاقة المتحررة النهائية من أصل المحتوى الكلي للطاقة في الوقود. يوضح الشكل (3) تغير منحنى قانون الاحتراق الذي يعبر عن كمية الوقود الكلية المحترقة عند الزاوية المقابلة، ومعدل انطلاق الحرارة الذي يعبر عن كمية الحرارة المتحررة عند الزاوية المقابلة فقط وينتج من مفاضلة قانون الاحتراق، تبعاً لتغير قيمة m ، وذلك تبعاً لقانون فيبي Viebe's functions الأحادي.



الشكل (3) تابع الاحتراق، و معدل انطلاق الحرارة، عند قيم مختلفة للمعامل [2].m

ولضبط منحنى الاحتراق بالاعتماد على تابع فيبي Viebe's functions نحتاج لتحديد ثلاث بارامترات: بداية الحقن، فترة الاحتراق، قيمة معامل الشكل m . ويمكن تحديدها بشكل بصري أو تحليل رياضي. والطريقة الرياضية المقدمة من قبل فيبي Viebe's functions لم تعط نتائج كافية ومرضية خصوصاً لمحركات الديزل ذات الحقن المباشر والسرعة العالية. لذلك تم تضمين تابعين لفيبي Viebe's functions ودعي بتابع فيبي المضاعف Double Viebe's functions، وقد أعطى أداءً عالياً، والشكل (4) يوضح عدم قدرة التابع الأحادي على وصف مميزات الاحتراق عند بداية الاحتراق (الاحتراق السريع).



الشكل (4): مقارنة مميزات الاحتراق باستخدام تابع فيبي Viebe's functions المضاعف والأحادي.

ويتم تضمين تابعين الأول ومرحلة الاحتراق السريع، والثاني لمرحلة الاحتراق البطيء والمتأخر. كما توضح المعادلة (6) قانون الاحتراق، والمعادلة (7) معدل انطلاق الحرارة وفق تابع فيبي Viebe's functions المضاعف.

$$HRL = \beta_1 * \left[1 - e^{-a_1 \left(\frac{\varphi - \varphi_{SOC,1}}{\Delta\varphi_{CD,1}} \right)^{m_1+1}} \right] + \beta_2 * \left[1 - e^{-a_2 \left(\frac{\varphi - \varphi_{SOC,2}}{\Delta\varphi_{CD,2}} \right)^{m_2+1}} \right] \quad (6)$$

للحد الأول $\varphi_{SOC,1} \leq \varphi \leq \varphi_{SOC,1} + \Delta\varphi_{CD,1}$

للحد الثاني $\varphi_{SOC,2} \leq \varphi \leq \varphi_{SOC,2} + \Delta\varphi_{CD,2}$

β_1 : النسبة المئوية للوقود المحترق في المرحلة الأولى.

β_2 : النسبة المئوية للوقود المحترق في المرحلة الثانية.

$\beta_1 + \beta_2 = 1$: مجموع النسبتين 100%.

$$RoHR = \beta_1 * a_1 * (m_1 + 1) * \left(\frac{\varphi - \varphi_{SOC,1}}{\Delta\varphi_{CD,1}} \right)^{m_1} * e^{-a_1 \left(\frac{\varphi - \varphi_{SOC,1}}{\Delta\varphi_{CD,1}} \right)^{m_1+1}} + \beta_2 * a_2 * (m_2 + 1) * \left(\frac{\varphi - \varphi_{SOC,2}}{\Delta\varphi_{CD,2}} \right)^{m_2} * e^{-a_2 \left(\frac{\varphi - \varphi_{SOC,2}}{\Delta\varphi_{CD,2}} \right)^{m_2+1}} \quad (7)$$

3. تابع فيبي Viebe's functions المتعدد الحدود لحساب معدل انطلاق الحرارة:

ويمكن تضمين عدد من توابع فيبي Viebe's functions، واستخدامها لزيادة الدقة، ويمكن استخدامها للاحتراق

في الحقن متعدد المراحل، مع حقن سابق، أو لاحق. والمعادلة (7) قانون انطلاق الحرارة

$$\text{HRL} = \sum_{i=1}^n \beta_i * \left[1 - e^{-a_i \left(\frac{\varphi - \varphi_{\text{SOC},i}}{\Delta \varphi_{\text{CD},i}} \right)^{m_i+1}} \right] \quad (7)$$

والمعادلة (8) لمعدل انطلاق الحرارة.

$$\text{RoHR} = \sum_{i=1}^n \left[\beta_i * a_i * (m_i + 1) * \left(\frac{\varphi - \varphi_{\text{SOC},i}}{\Delta \varphi_{\text{CD},i}} \right)^{m_i} \right] \quad (8)$$

n: عدد التوابع المتضمنة.

ويكون مجموع نسب الوقود المشتعلة في جميع المراحل، كما في المعادلة (9):

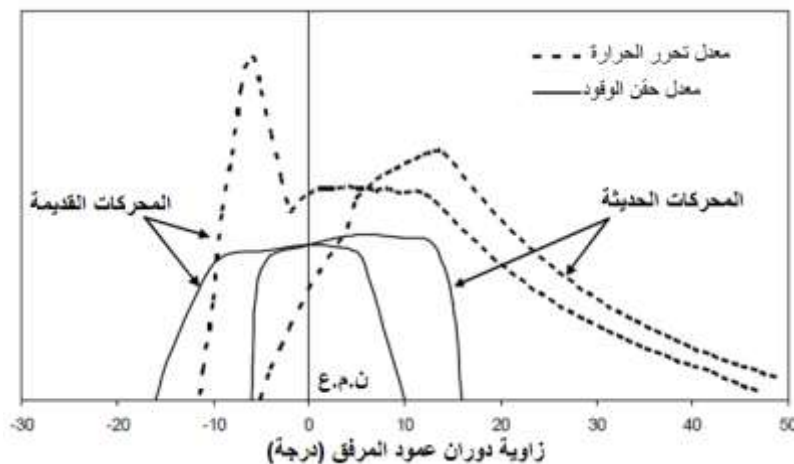
$$\sum_{i=1}^n \beta_i = 100\% \quad (9)$$

4. حسابات تأخر الاشتعال و مراحل الاحتراق:

تعتبر مرحلة تأخر الاشتعال من قضايا البحث المهمة لعملية الاحتراق في محركات الديزل، حيث تؤثر بشكل مباشر في عملية الاحتراق وشكل منحنى انطلاق الحرارة، وبالتالي شكل منحنى الضغط، ونواتج العادم الملوثة أكاسيد النتروجين (NOx) والسخام (Hartridge Number, Soot)، وتتأثر مرحلة تأخر الاشتعال بعدة عوامل أهمها:

1. الضغط ودرجة الحرارة عند الحقن V,P: حيث تتناسب فترة تأخر الإشعال عكسا مع هذين العاملين.
2. سرعة الدوران n: حيث تتناسب فترة تأخر الإشعال عكسا مع سرعة الدوران.
3. زاوية تسبيق الحقن φ_{inj} : حيث تتناسب فترة تأخر الإشعال طرذا مع زاوية تسبيق الحقن.
4. رقم السيتان C.N: حيث تتناسب فترة تأخر الإشعال عكسا مع رقم السيتان.

وكلما كانت فترة تأخر الاشتعال أطول كلما زادت كمية الوقود المهياً للاشتعال، وبالتالي فإن مرحلة الاحتراق السريع تزداد حدة. بينما تكون مرحلة الاحتراق السريع صغيرة عند القيم الصغيرة لفترة تأخر الاشتعال وتكاد تكون غير ملحوظة. ويظهر الشكل (5) التطور الحاصل في منحنى انطلاق الحرارة في المحركات الحديثة، ويعود ذلك إلى نسب الانضغاط العالية مقارنة مع التقليدية القديمة، مع وجود أنظمة الحقن الجديدة common rail (ذات المجمع) والتي تعطي درجات حرارة كبيرة في حقن الوقود [4].



الشكل (5): مقارنة الاحتراق بين محركات الديزل القديمة والحديثة.

وتعتبر معادلة جامعة متشعبن من أكثر المعادلات وثوقية لحساب فترة تأخر الاشتعال وفق التالي (10) [6] University of Michigan Equation.

$$\tau_{ign} = 1.3 * 10^{-4} * P^{-1.05} * \alpha^{-0.77} * y_{O_2}^{-1.41} * \exp\left(\frac{33700}{RT}\right) \quad (10)$$

حيث:

τ_{ign} : زمن تأخر الاشتعال [Sec].

T&P: الضغط ودرجة الحرارة الحالية في الأسطوانة [K] [atm].

α : نسبة الهواء وقود.

y_{O_2} : تركيز الأكسجين.

R: ثابت الغازات العام

كما يمكن استخدام معادلة تلسنوف المعدلة [7] Tolstov's equation. على الشكل التالي:

$$\tau_{ign} = 3.8 * 10^{-6} * (1 - 1.6 * 10^{-4} * n) * \sqrt{\frac{T}{P}} * \exp\left[\frac{E_a}{8.312 * T} * \frac{70}{CN + 25}\right] \quad (11)$$

حيث:

E_a : طاقة التنشيط 23000...28000 kJ/kmole

CN: رقم السيتان للوقود.

T&P: الضغط ودرجة الحرارة السائدة في الاسطوانة [K] [MPa] على التوالي.

n: سرعة دوران عمود المرفق [rpm].

غير أنه فضلنا استخدام معادلة تلسنوف لمراعاتها سرعة الدوران، ورقم السيتان. حيث يتأثر زمن تأخر الاشتعال بهذين العاملين إضافة لنسبة الانضغاط مما يؤثر على معدل انطلاق الحرارة بشكل ملحوظ. ونحصل على زاوية تأخر الاشتعال ϕ_{ign} من المعادلة التالية [6]:

$$\phi_{ign} = 6 * n * \tau_{ign} [CA] \quad (12)$$

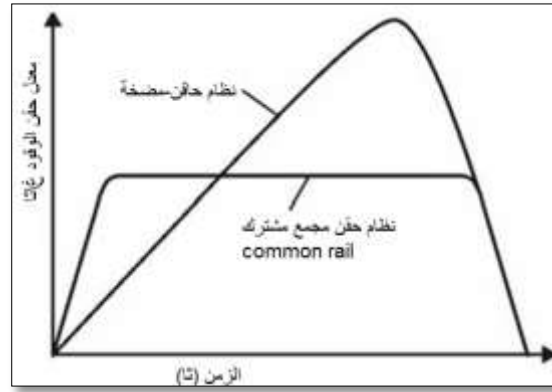
ثم تبدأ مرحلة الاحتراق السريع. وتستمر هذه المرحلة حوالي: $\Delta\phi_{CD1} = 5 \dots 30 [C^\circ A]$

وقيمة معامل الشكل $m_1 = 0.3 \dots 0.8$

و نسبة الوقود المحترق في هذه المرحلة $\beta_1 = 0.05 \dots 0.3$ من كمية الوقود المحقونة في الدورة.

وتكون كمية الوقود المحقون في الدورة أعظمية عند عمل المحرك على حمولة كاملة، وتستمر فترة حقن الوقود $[C^\circ A] 35 \dots 45$. أما في المحركات الحديثة، وتحسين تصميم عناصر مجموعة الحقن (مضخات، حواقي، أنابيب الضغط العالي...) ووسائل إدارتها فقد تم تقليل زمن الحقن إلى حدود $[C^\circ A] 30 \dots 35$.

أضف إلى ذلك فإنه باستخدام أنظمة الحقن ذات المجمع common rail. أصبح بالإمكان الحصول على بداية ونهاية حقن فجائية، غير متدرجة، وضغط حقن عال عند بداية الحقن. إضافة إلى مستو عال لضغط حقن وقود، والشكل (6) يظهر مقارنة بين شكل تابع الحقن لنظام حقن ذي مجمع، وأنظمة حاقن-مضخة. ويؤثر شكل تابع الحقن في تابع انطلاق الحرارة بشكل كبير [8].



الشكل (6) مقارنة بين شكل تابع الحقن لنظام حقن ذو مجمع، وأنظمة حاقن-مضخة [8].

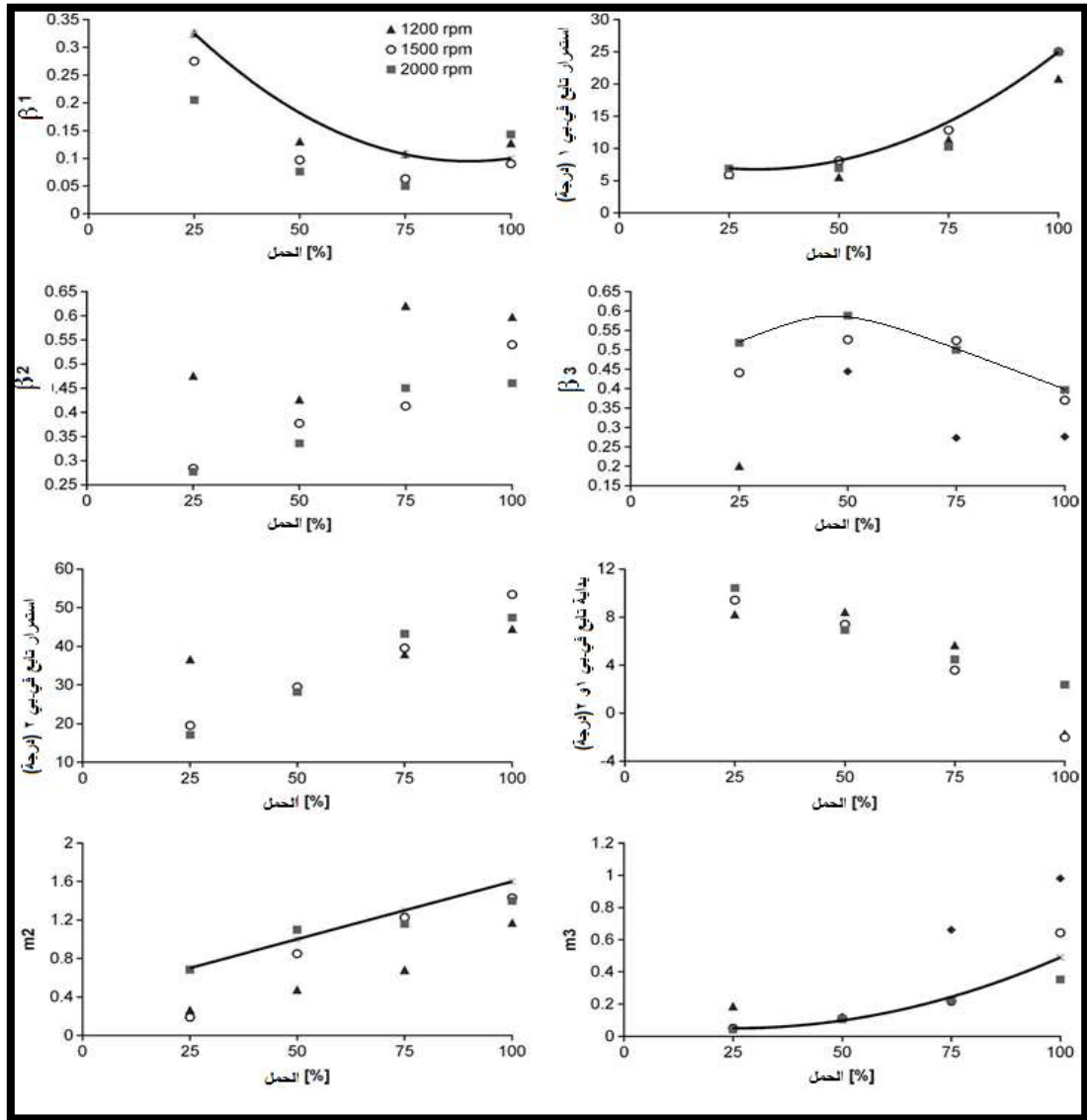
ونستطيع ضبط منحني معدل انطلاق الحرارة RoHR للمحرك الموصف في الجدول (1).
وذلك لاثنتي عشرة حالة، عند ثلاث سرعات دوران ومختلفة وثلاث حمولات [9].

الجدول (1): المواصفات الأساسية للمحرك.

Types of engine	Heavy duty turbocharger Diesel engine
Number of cylinders	6 in line
Bore	123 mm
Stroke	152 mm
Compression ratio	17.5:1
Maximum engine speed	2100rpm
Number of valve	4 per cylinder
Injection system	Unit pump injector
Turbocharger	FGT + Waste-gate
Charge cooling	Yes
EGR Exhaust Gas Recycling	Yes

نبين النتائج المتعلقة بالحالات المعتمدة في الشكل (7). حيث يتم تحديد قيم معاملات تابع فيبي Viebe's functions. وهي

- 1- نسبة الوقود المحترقة في المراحل الثلاثة: وعند جميع السرعات، تتناقص كمية الوقود المحترقة في المرحلة الأولى بزيادة الحمل. وتتزايد كمية الوقود المحترقة في المرحلة الأولى بزيادة الحمل.
- 2- معامل الشكل للمرحلة الأولى يتم تثبيت قيمتها $m_1 = 0.7$.
- 3- معامل الشكل للمرحلة الثانية β_2 : تتزايد قيمة معامل الشكل عند جميع السرعات، بزيادة الحمل.
- 4- معامل الشكل للمرحلة الثالثة β_3 : تتزايد قيمة معامل الشكل عند جميع السرعات، بزيادة الحمل.
- 5- زاوية بدء الاحتراق للمرحلة الأولى $\varphi_{CD,1}$ يتم تحديدها باستخدام معادلة تلتستوف المعدلة Tolstov's equation 11.
- 6- تأخر الاحتراق للمراحل الثانية $\varphi_{CD,2}$: تتناقص قيمتها عند جميع السرعات، بزيادة الحمل.
- 7- تأخر الاحتراق للمراحل الثالثة $\varphi_{CD,3}$: تتناقص قيمتها عند جميع السرعات، بزيادة الحمل.
- 8- امتداد الاحتراق للمرحلة الأولى $\Delta\varphi_{CD,1}$: تتزايد قيمتها عند جميع السرعات، بزيادة الحمل.
- 9- امتداد الاحتراق للمرحلة الثانية $\Delta\varphi_{CD,2}$: تتزايد قيمتها عند جميع السرعات، بزيادة الحمل.
- 10- وتم تثبيت امتداد المرحلة الثالثة $\Delta\varphi_{CD,3} = 120 [C^\circ A]$.



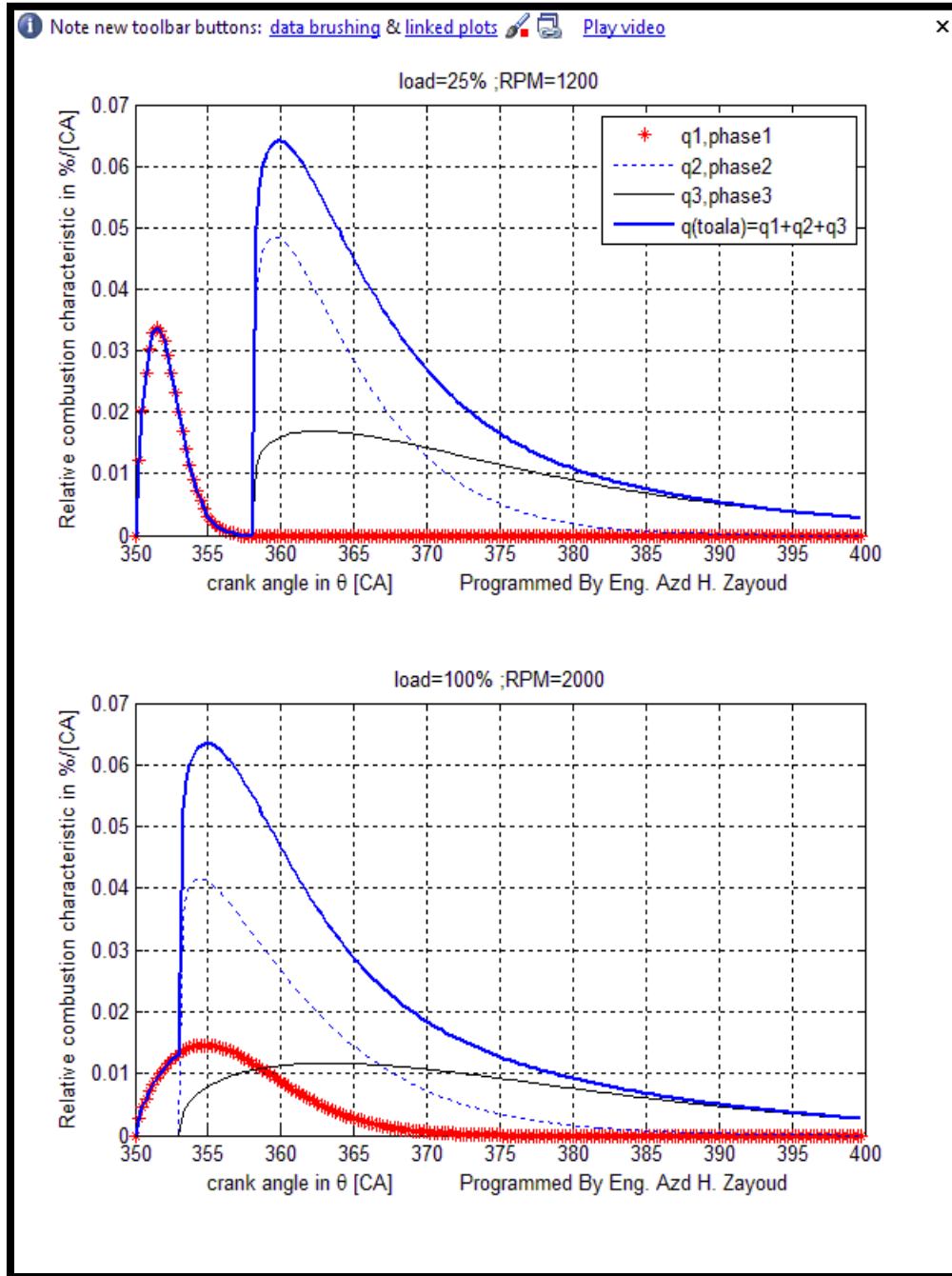
الشكل (7): تغير قيم معاملات توابع فيبي Viebe's functions مع الحمولة وفق سرعات دوران مختلفة.

● نلاحظ من النتائج على الشكل (7) أن كمية الوقود المحترقة في المرحلة الأولى تتناقص مع زيادة الحمولة حتى 75% من الحمولة الكاملة لتستقر أو تتزايد قليلاً مع الزيادة اللاحقة للحمولة حتى الحمولة الكاملة وذلك عند جميع سرعات الدوران. بينما تتزايد كمية الوقود المحترقة في المرحلة الثانية مع زيادة الحمولة وعند جميع سرعات الدوران وهذا يتوافق مع ما هو معروف عن المرحلة الثانية من الاحتراق بوصفها مرحلة رئيسة يتم فيها احتراق الكمية الأكبر من الوقود المحقون.

● أضف إلى ذلك فإن كمية الوقود المحترقة في المرحلة الثالثة تتناقص مع زيادة الحمولة عند جميع سرعات الدوران ويعود ذلك لعدم كفاية الأكسجين اللازم لإتمام الاحتراق في مرحلته الأخيرة حيث تتزايد كمية الوقود المحقون في الدورة عند زيادة الحمولة ويبقى قسم من الوقود لا يحصل على ما يكفي من الأكسجين لأكسدته واحتراقه.

● تتمتع معاملات الشكل m_2, m_3 بصفة التزايد عند زيادة الحمولة من 25% إلى 100% ويكون ل m_2 قيمة أعلى بالمقارنة مع m_3 عند جميع السرعات. راجع الشكل (3) لملاحظة تأثير قيم معامل الشكل.

نُبيّن على الشكل (8) منحنيات لانطلاق الحرارة عند حمل كامل وأحمال جزئية، وسرعات مختلفة. حيث يتغير شكل منحنى انطلاق الحرارة بتغير الحمل وسرعة الدوران، ونلاحظ عند انخفاض سرعة الدوران ظهور مرحلة الاحتراق السريع بشكل واضح، وذلك بسبب تأخر مرحلة الاشتعال التي تتناسب عكسا مع سرعة الدوران، وكلما زادت مرحلة تأخر الاشتعال تزداد كمية الوقود المهيأة للاحتراق السريع. وتكون منحنيات الاحتراق أقل حدة عند الحملات الكبيرة والقريبة من الكاملة وعند سرعات الدوران العالية والمتوسطة ويعود ذلك إلى اختصار زمن مرحلة تأخر الاشتعال مقيساً بالثواني مع زيادة سرعة الدوران والذي يترافق مع تجمع كمية معتدلة من الوقود خلال تلك المرحلة لتعطي احتراقاً أكثر سلاسة وأقل حدة في انطلاق الحرارة.



الشكل (8) تغيير منحنيات انطلاق الحرارة عند عدة أحمال، و سرعات دوران مختلفة.

الاستنتاجات والتوصيات:

سمحت الدراسة التي أجريت في هذا البحث بالتوصل إلى النتائج التالية:

- 1- لا يعطي استخدام تابع فيبي Viebe's functions المفرد مطابقة جيدة لمنحني انطلاق الحرارة وخاصة في مرحلة الاحتراق السريع، استخدام تابع فيبي Viebe's functions المضاعف يعطي دقة أكبر ويمكن توصيف مرحلة الاحتراق السريع، مع الأخذ بالحسبان توصيف مرحلة الاحتراق المتأخر.
 - 2- يعطي استخدام تابع فيبي Viebe's functions المتعدد الحدود نتائج أفضل، حيث يصف منحني انطلاق الحرارة عند أحمال وسرعات مختلفة وبدقة أكبر.
 - 3- زمن الحساب باستخدام النماذج شبه البعدية لا يتعدى 10 ثوان لكل حالة، وبالإمكان استخدامها في مرحلة التصميم الأولي الأمثل.
 - 4- عند استخدام النماذج شبه البعدية، فإن متغيرات تابع فيبي Viebe's functions تتأثر بالعديد من العوامل كشكل تابع الحقن، ضغط الحقن، شكل حجرة الاحتراق وغيرها... لذلك يمكن استخدام قيم المتغيرات لسلسلة محركات ذات مواصفات تصميمية متشابهة. وتغيير هذه القيم عند وصف منحني الاحتراق لمحرك آخر.
 - 5- بالإمكان استخدام تابع فيبي Viebe's functions لتوصيف الحقن متعدد المراحل (حقن أساسي، حقن سابق، حقن لاحق...) وذلك بإضافة عدة حدود كما سبق ذكره في المعادلة 7 و 8.
 - 6- توافر الطريقة الحسابية باستخدام تابع فيبي Viebe's functions الحصول على منحنيات انطلاق الحرارة عند الاحتراق مما يعطي تصورا واضحا عن كمال عملية الاحتراق ومجرياتها وبالتالي تحقيق الوفر في مرحلة دراسة وتطوير دورة عمل المحركات وتصميمها.
- نورد لاحقا البرنامج الذي كتبناه باستخدام البرنامج الهندسي MATLAB لرسم منحنيات الاحتراق.

المراجع:

- [1] JUNG, D.; ASSANIS, D. *Multi-Zone DI Diesel Spray Combustion Model for Cycle Simulation Studies of Engine Performance and Emissions*. Society of Automotive Engineers U.S.A, 1246-01-2001, 1-2.
- [2] MOLLENHAUER, K.; TSCHOEKE, H. *Handbook of Diesel Engines. First edition*, Springer , Germany, U.K, & U.S.A.2010, 18-24.
- [3] MERKER, G.; SCHWARZ, C.; STIESCH, G.; OTTO, F. *Simulating Combustion Simulation of combustion and pollutant formation for engine-development*. Springer, Germany, 2006, 98-113.
- [4] LAKSHMINARAYANAN, P.; YOGESH, A. *Modelling Diesel Combustion*. Springer , Germany, U.K, & U.S.A, 2010.
- [5] HEYWOOD, J. *Internal combustion engine fundamental*. McGraw-Hill, U.S.A, 1988.
- [6] KULESHOV, A; KOZLOV, A; MAHKAMOV, K. *Self-Ignition delay Prediction in PCCI direct injection diesel engines using multi-zone spray combustion model and detailed chemistry*. Society of Automotive Engineers U.S.A, 10CV-0019-2006, 12; 14.
- [7] KULESHOV, A. *Model for predicting air-fuel mixing, combustion and emissions in DI diesel engines over whole operating range*. Society of Automotive Engineers U.S.A, 01-2119-2005, 9.
- [8] BAUMGARTEN, C. *Mixture Formation in Internal Combustion Engines*. Springer, Germany, 2006, 35.
- [9] SERRANO, J.; CLIMENT, H.; GUARDIOLA, C.; PIQUERAS, P. *Methodology for characterisation and simulation of turbocharged diesel engines combustion during transient operation Part 2: Phenomenological combustion simulation*. Applied Thermal Engineering 29, 2009, 150-158

ملحق:

نذكر فيما يلي جزء من كود البرمجة مكتوبة بالماتلاب والمستخدم لرسم منحني الاحتراق بعد تحديد البارامترات المطلوبة:

```
%start of combustion
m1=0.325;%shape function
m2=0.2;
m3=0.2;
for beta1=0.1%rate of combust fuel
beta2=0.45;
beta3=1-beta1-beta2;
a1=6.9;
a2=6.9;
a3=6.9;
theta1=350;%start combustion angle
theta2=358;
theta3=358;
cd1=7;%combustion duration
cd2=35;
cd3=100;
%i=340-500;
d=0.25;
%combustion duration
tic
for i=1:200
theta(i)=(i-1)*d+theta1;
%%this structure for calculating PREMIXED combustion phase
if (theta(i)>=theta1)&&(theta(i)<=theta1+cd1)
q1(i)=beta1*(a1*(m1+1)/cd1*((theta(i)-theta1)/cd1)^(m1)*exp(-a1*((theta(i)-theta1)/cd1).^(m1+1)))
else
q1(i)=0;
end;
%%this structure for calculating DIFFUSION combustion phase
if (theta(i)>=theta2)&&(theta(i)<=theta2+cd2)
q2(i)=beta2*(a2*(m2+1)/cd2*((theta(i)-theta2)/cd2)^(m2)*exp(-a2*((theta(i)-theta2)/cd2).^(m2+1)))
else
q2(i)=0;
end;
%%this structure for calculating LATE combustion phase
if (theta(i)>=theta3)&&(theta(i)<=theta3+cd3)
q3(i)=beta3*(a3*(m3+1)/cd3*((theta(i)-theta3)/cd3)^(m3)*exp(-a3*((theta(i)-theta3)/cd3).^(m3+1)))
else
q3(i)=0;
end;
end
q=q1+q2+q3;
%plot(theta,q1,'red')% 'DisplayName', 'q2(1,1:181)', 'YDataSource', 'q2(1,1:181)'); figure(gcf)
hold on;
grid on;
subplot(2,2,4);
plot(theta,q1,'red');%plot the premixed phase RoHR
plot(theta,q2,'green');%plot the mixing controlled (DIFFUSION) phase RoHR
plot(theta,q3,'black');%plot the delay phase RoHR
plot(theta,q);%plot the total RoHR
title('load=25% ;RPM=1200');
xlabel('crank angle in \theta [CA]');
ylabel('Relative combustion characteristic in %[CA]');
end
```