

پیش بینی زمان پریود تأخیر در اشتعال در فرآیند احتراق موتورهای دیزلی با پاشش مستقیم

قادر سلیمانی علمداری

وهاب پیروزپناه

دانشگاه تبریز-دانشکده فنی-گروه مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز-دانشکده تربیت معلم تبریز-دانشکده تربیت دبیر فنی

چکیده:

برای پیش بینی زمان پریود تأخیر در اشتعال در موتورهای دیزلی با پاشش مستقیم با محفظه ساکن و با حرکت هوای گردبادی، یک مدل نیمه تجربی ارائه گردیده که در آن پریود تأخیر در اشتعال به صورت مجموع پریودهای تأخیر فیزیکی و تأخیر شیمیایی در اشتعال در نظر گرفته شده است.

زمان پریود تأخیر فیزیکی در اشتعال بر اساس تئوری «تبخیر قطره سوختی» محاسبه شده و معادلات حاکم برای محاسبه آن، معادله حرکت قطره سوختی، معادله انتقال گرما و معادله جرم تبخیر شده قطره سوختی می باشند. این معادلات به طور همزمان با استفاده از روش عددی رانگ کوتا حل می شوند. محاسبات تا وقتی ادامه می یابند که در لایه اطراف قطره سوختی یک مخلوط نزدیک به استوکیومتریک با دمای اشتعال خود بخودی سوخت تشکیل یابد. برای محاسبه زمان پریود تأخیر شیمیایی در اشتعال از معادلات آهنگ واکنش شیمیایی و موازنه انرژی در لایه قابل اشتعال فوق استفاده شده است. محاسبه زمان پریود تأخیر شیمیایی در اشتعال بر پایه افزایش دمای مخلوط سوخت و هوا در لایه اطراف قطره سوختی در اثر انجام واکنشهای پیش شعله ای قرار گرفته و انتهای این پریود در دمایی است که در آن دما فرآیند احتراق به حالت پابرجا رسیده است. در این مدل زمان پریود تأخیر شیمیایی در اشتعال بر حسب پارامترهایی از قبیل عدد ستانی سوخت، فشار سیلندر، قوت مخلوط، سرعت موتور و غیره برآورد می شود. نتایج حاصله از مدل عمومی تأخیر در اشتعال با نتایج تجربی بدست آمده از چهار نوع موتور دیزلی با پاشش مستقیم ولی با دوره های متفاوت مقایسه شده و تطابق خوبی «خطا در حدود ۱۰٪» بدست آمده است. همچنین تأثیر پارامترهای مختلف عملکرد و طراحی موتور بر روی پریود تأخیر در اشتعال مطالعه شده و رفتار مدل هماهنگی مناسبی با نتایج موجود در ادبیات فن دارد. مدل عمومی تأخیر در اشتعال ضمن اینکه می تواند مستقلاً زمان پریود تأخیر در اشتعال را پیش بینی نماید به عنوان زیر مدل در مدل های احتراق نیز کاربرد دارد.

Prediction of Ignition Delay Period in The Combustion Process of D. I. Diesel Engines

V. Pirouzpanah, Ph. D.

G. Soleymani Alamdari

Mech. Eng. Dept., University of Tabriz Tabriz Teacher Training University

Abstract

For the prediction of ignition delay period in the combustion process of Direct-Injection (D. I.) diesel engine, a semi-empirical mathematical model is developed. In this model ignition delay period is considered as the sum of physical

delay and chemical delay periods. For predicting the physical delay period, a semi-empirical model is constructed, which is based on a single droplet evaporation model. The governing equations, namely, equation of droplet motion, heat and mass transfer are solved simultaneously using a Rung-Kutta step by step method. The computation extended until somewhere in the vapour layer around the liquid droplet a near stoichiometric mixture of the fuel, vapour and air, having at least self ignition temperature (SIT) of the fuel, is formed. For predicting the chemical delay time period, chemical reaction rate and energy balance equations are solved in the vapour layer around the droplet. In this model, chemical delay is taken as the time required to raise the vapour layer temperature from SIT, to temperature which ignition occurs. This temperature is called pre-flame reactions temperature. Chemical delay time period is calculated as a function of fuel cetane number, cylinder pressure and temperature, mixture strength, and engine speed. The predicted ignition delay period is compared with experimental results from four different types of D. I. diesel engines, and good agreement is obtained (within 10% error). This model can also be used as a submodel in the mathematical combustion models of diesel engines.

۱- مقدمه

شدن قطرات سوخت و مخلوط شدن بخار سوخت با هوا است فرآیندهای شیمیایی شامل واکنشهای پیش احتراق مخلوط سوخت هوا بوده و این فرآیندها تحت تأثیر طراحی موتور و متغیرهای عملکرد و مشخصات سوخت قرار می گیرند.

سوخت مایعی که در موقع شروع پاشش به داخل محفظه احتراق سیلندر پاشیده می شود، بعد از انتقال حرارت با هوای گرم داخل محفظه احتراق به بخار تبدیل شده و در اثر نفوذ هوای گرم به داخل بخار سوخت، مخلوط سوخت هوای قابل اشتعال بوجود می آید و در مخلوط قابل اشتعال واکنشهای شیمیایی صورت گرفته و باعث ازدیاد دمای مخلوط سوخت هوا می گردد. در این مدل فرض می شود که پریود تأخیر در اشتعال از دو قسمت فیزیکی و شیمیایی تشکیل شده است. قسمت اول پریود تأخیر یعنی تأخیر فیزیکی در اشتعال با استفاده از مدل‌های ارائه شده قبلی [۳] قابل محاسبه بوده و در اینجا مدلی برای پیشگویی پریود تأخیر شیمیایی در اشتعال بر اساس افزایش دمای مخلوط واکنشگرها تا دمای بحرانی معینی ارائه شده است. دمای بحرانی در این مدل دمای مربوط به انتهای واکنشهای پیش شعله ای است. اغلب پژوهشگرها برای محاسبه پریود تأخیر در اشتعال فرمولی به شکل نمایی به صورت زیر:

$$I.D = A \cdot P^n \cdot \text{EXP}(E/RT)$$

ارائه داده و با استفاده از آن پریود تأخیر کلی در اشتعال

موتورهای دیزلی از جمله موتورهای احتراق داخلی هستند که امروزه به دلیل نشر مواد آلوده کننده کم به محیط و بازده حرارتی بالا بیشتر مورد توجه قرار می گیرد. چون فرآیند احتراق در موتورهای دیزلی بیشترین تأثیر را بر روی عملکرد موتور و منتشر شدن مواد آلوده کننده می گذارد، لذا فرآیند احتراق و مراحل مختلف آن پیوسته مورد مطالعه پژوهشگران بوده و است.

مراحل مختلف فرآیند احتراق در موتورهای دیزلی به شرح زیر است:

- ۱- پریود تأخیر در اشتعال
- ۲- پریود احتراق پیش آمیخته یا پریود احتراق سریع
- ۳- پریود احتراق دیفوزیونی یا احتراق با آهنگ متوسط
- ۴- دنباله احتراق یا مرحله احتراق خیلی آهسته

در موتورهای دیزلی پر دور، فرآیند احتراق در حدود چهار الی پنج میلی ثانیه طول می کشد. فاز اول این فرآیند یعنی پریود تأخیر در اشتعال در حدود یک میلی ثانیه بوده که کسر قابل ملاحظه ای از طول فرآیند احتراق را در بر می گیرد. پریود تأخیر در اشتعال به صورت فاصله زمانی یا درجه میل لنگ بین شروع پاشش سوخت تا شروع احتراق تعریف می شود. فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی بایستی قبل از آزاد شدن انرژی شیمیایی از سوخت مایع پاشیده شده به داخل محفظه احتراق سیلندر صورت بگیرد. از جمله فرآیندهای فیزیکی، اتمیزه شدن جت سوختی مایع، بخار

محاسبه شده و مرحله فیزیکی تأخیر در اشتعال در نظر گرفته نمی شود. در مورد جداگانه در نظر گرفتن پیروید تأخیر فیزیکی و تأخیر شیمیایی در اشتعال می توان به فرمولهای Sitkei [۴] و Thelliez [۵] اشاره نمود.

$$I.D = 0.5 + \frac{0.135e^{7800}}{p^{0.7}} + \frac{4.8e^{7800}}{p^{1.8}} [\text{msec}] \text{ Sitkei}$$

$$I.D = 0.5 + 5.06 \times 10^{-6} (P)^{-0.36}$$

$$\times \text{EXP} \left(\frac{10150}{T_m} \right) [\text{msec}] \text{ THELLIEZ}$$

در فرمولهای فوق فشار (P) بر حسب اتمسفر و دما (T) بر حسب درجه کلون است.

۲- شرح فیزیکی پدیده تأخیر در اشتعال و تقسیم بندی آن به دو بخش فیزیکی و شیمیایی

همان گونه که قبلاً بیان شد یکی از مراحل مهم فرآیند پیچیده احتراق، پیروید تأخیر در اشتعال است که تأثیر قابل ملاحظه ای بر روی عملکرد موتور دیزلی دارد. در موتورهای که در آنها زمان تأخیر در اشتعال زیاد است در این صورت احتمال دارد که اشتعال سوخت در مرحله انبساط به طور کامل انجام نگرفته و باعث ناقص شدن فرآیند احتراق و در نتیجه کاهش قدرت خروجی موتور، بازده حرارتی پایین و به هدر رفتن مقداری سوخت همراه با گازهای خروجی می گردد. همچنین در چنین موتورهایی به دلیل اینکه سوخت بیشتری قبل از اینکه اشتعال رخ دهد داخل سیلندر پاشیده شده و انباشته می شود، لذا این عمل باعث سریع شدن آهنگ سوختن و به طور آنی شروع شدن احتراق، آهنگ افزایش سریع فشار و بیشتر شدن فشار پیک می گردد و در این شرایط صدای موتور زیاد شده و احتمال بروز پدیده کوبش دیزلی در موتور بوجود می آید و این شرایط از لحاظ تنشهای مکانیکی وارده به قطعات موتور یک حالت نامناسبی است.

با توجه به موارد بیان شده می توان دریافت که طول پیروید تأخیر در اشتعال نقش عمده ای را در کارکرد موتور ایفا می کند. پس بررسی و در نظر گرفتن چنین پدیده ای در عملکرد و طراحی موتورهای دیزلی بسیار حائز اهمیت است. پیروید تأخیر در اشتعال در موتورهای دیزلی به صورت فاصله زمانی از شروع پاشش سوخت به داخل محفظه احتراق موتور

تا شروع اشتعال تعریف می شود. البته لازم به ذکر است که تعاریف متعددی برای این پیروید تا به حال ارائه شده و اختلاف در این تعاریف فقط در معین نمودن انتهای پیروید تأخیر در اشتعال است.

در این مدل تأخیر در اشتعال را به صورت فاصله زمانی بین شروع پاشش سوخت تا انتهای واکنشهای پیش شعله ای (Pre-flame reactions) تعریف نموده و تأخیر در اشتعال را به دو قسمت فیزیکی و شیمیایی تقسیم کرده و با استفاده از تئوری تبخیر قطره سوختی سعی در برآورد زمان تأخیر فیزیکی و شیمیایی در اشتعال شده است. هنگامی که سوخت مایع به داخل محفظه احتراق موتور دیزلی پاشیده می شود، در ابتدا سوخت به صورت جت مایع نوک انژکتور را ترک می کند. بعد از فاصله کوتاهی از نوک انژکتور جت مایع به افشانه ای از قطرات با اندازه های مختلف تبدیل می گردد این زمان به پیروید از هم پاشیدگی جت سوختی مشهور است. هنگامی که قطرات تشکیل یافتند به علت زیاد بودن نسبت سطح قطرات به حجم آنها، تبخیر شروع می شود. قبل از شروع تبخیر، قطرات بایستی گرما از هوای محیط دریافت نمایند. همان طور که بخار در حال تشکیل شدن است، آن از هوای اطراف گرما گرفته و فوق داغ می گردد. تا جایی که در لایه بخار، مخلوط بخار سوخت، هوا نزدیک به نسبت استوکیومتریکی تشکیل شود دمای این مخلوط، در انتهای پیروید تأخیر فیزیکی در اشتعال حداقل برابر با دمای اشتعال خودبخودی سوخت است. در این مورد جزئیات بیشتر را می توان از مرجع [۳] بدست آورد. بعد از انتهای پیروید تأخیر فیزیکی در اشتعال، پیروید تأخیر شیمیایی شروع می شود.

از لحظه شروع تأخیر شیمیایی در اشتعال به بعد، واکنشهای شیمیایی زنجیره ای با آهنگ مشخصی شروع شده و چون اکثر واکنشها گرمازا هستند، دمای لایه مخلوط بخار سوخت-هوا در اطراف قطره سوختی که واکنشهای شیمیایی در آنجا صورت می گیرد به تدریج نسبت به زمان افزایش می یابد. معمولاً بعد از یک دمای بحرانی معین احتراق آنی در مخلوط سوخت-هوا به وقوع می پیوندد. با پیشرفت واکنش موقعی که دمای مخلوط واکنشگرها به این دمای بحرانی برسد در این صورت دمای فوق انتهای پیروید تأخیر در اشتعال در نظر گرفته شده و بعد از این دما احتراق آنی و ناگهانی در مخلوط واکنشگرها رخ می دهد. با توجه به ادبیات فن دمای بحرانی معمولاً برابر با دمای مربوط به واکنشهای پیش شعله ای (Pre-flame reactions) است [۲].

بنابر این پریود تأخیر شیمیایی را می توان به صورت فاصله زمانی که در آن دمای مخلوط واکنشگرها حداقل از دمای اشتعال خودبخودی (SIT) به دمای انتهای واکنشهای پیش شعله ای برسد، تعریف نمود و با استفاده از روابط مربوط به اصول سینتیک واکنشهای شیمیایی، زمان این پریود برآورد شده است.

۳- معادلات بکار رفته در مدل

چنانکه گفته شد برای برآورد زمان پریود تأخیر در اشتعال در موتورهای دیزلی با پاشش مستقیم، زمان مربوطه به دو قسمت تأخیر فیزیکی در اشتعال و تأخیر شیمیایی در اشتعال تقسیم شده است و برای محاسبه هر کدام از این مراحل از معادلات جداگانه استفاده شده است. در این قسمت معادلات بکار رفته برای مراحل فوق به صورت خیلی خلاصه توضیح داده می شوند.

۱-۳- شرح معادلات به کار رفته برای محاسبه بخش فیزیکی تأخیر در اشتعال

موقعی که سوخت مایع به توسط انژکتور داخل محفظه احتراق موتور دیزلی پاشیده می شود ابتدا جت مایع پیوسته بوجود آمده و بعد از زمان کوتاهی جت مایع پیوسته در اثر نیروهای برشی به افشانه سوختی تبدیل شده که شامل قطرات سوخت با قطرهای مختلف است. این زمان، پریود از هم پاشیدگی جت سوختی نامیده شده و با استفاده از فرمول زیر می توان طول این پریود را محاسبه نمود [۶].

$$t_b = \frac{\alpha \cdot \rho_L \cdot d}{c \sqrt{2\rho_a \Delta p}}$$

که در آن $\alpha \cong 15.8$ و $c \cong 0.8$ است.

معادلات بورمن و جانسون [۷] در اینجا برای محاسبه آهنگ انتقال جرم از سطح قطره به توسط یک معادله نیمه تجربی بکار می روند. شکل معادله از احتساب آهنگهای نفوذ جرم مولکولی در یک لایه بخار سوخت فرضی موجود در سطح خارجی قطره ناشی می شود. معادله جرم به طور تجربی اصلاح شده تا اثر همرفتی حرکت قطره نسبت به هوا را در نظر بگیرد. ضرایب این معادله تابعی از خواص سوخت، فشار بخار سوخت و دمای مایع، سرعت قطره، دما و فشار محیط اطراف هستند. در این معادله آهنگ انتقالی گرما از

محیط به قطره شامل کاربرد یک معادله نیمه تجربی با در نظرگرفتن اثرات ملکولی و همرفتی انتقال گرما است. سرعت قطره با مساوی کردن آهنگ تغییر مقدار حرکت قطره با نیروی دراگ (مقاوم) وارده به آن معین می شود. دو معادله انتقال جرم و انتقال حرارت معادلات دیفرانسیل مرتبه اول معمولی هستند، معادله مربوط به تغییرات مقدار حرکت یک معادله دیفرانسیل مرتبه دوم است که به دو معادله مرتبه اول تبدیل می شود. اجرای محاسبه نیاز به حل چهار معادله دیفرانسیل مرتبه اول دارد که در آنها زمان متغیر مستقل است. جزئیات بیشتر در مورد بخش فیزیکی تأخیر در اشتعال در مرجع [۳] آمده است. خلاصه معادلات به شرح زیر است.

معادلات حرکت قطره:

$$\frac{d^2 X_d}{dt^2} = -F \frac{dX_d}{dt}$$

سرعت قطره:

$$V_d = \frac{dX_d}{dt}$$

معادله انتقال جرم (آهنگ تبخیر):

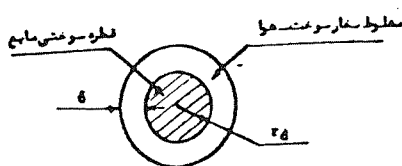
$$\frac{d}{dt}(\text{md}) = - \left(\frac{2\pi D_v \cdot P_T \cdot \text{Nu}_m \cdot M_w F_d}{R \cdot T_m} \right) \text{Ln} \left(\frac{P_T}{P_T - P_{FL}} \right)$$

معادله انتقال گرما به قطره:

$$\dot{Q}_d + \dot{Q}_R = m_d C_{pd} \frac{dT_d}{dt} - L \frac{dm_d}{dt}$$

۲-۳- شرح معادلات بکار رفته برای محاسبه بخش شیمیایی تأخیر در اشتعال

برای شرح معادلات بکار رفته در مدل، قطره سوختی مایعی که شعاع آن r_d است در نظر گرفته می شود. پریود تأخیر فیزیکی در اشتعال را پایان یافته تلقی نموده و فرض می کنیم که ضخامت لایه مخلوط بخار سوخت-هوا در اطراف قطره مایع δ باشد.



حجم کنترلی از مخلوط بخار سوخت-هوا از لایه اطراف قطره سوختی در نظر گرفته شده و معادله موازنه انرژی در مورد این حجم کنترل نوشته می شود یعنی:

تغییرات انرژی آهنگ کار انجام آهنگ اتلافات آهنگ حرارت داخلی حجم یافته بر روی حرارتی از اثر واکنشهای کنترل نسبت حجم کنترل حجم کنترل شیمیایی به زمان

مجاور لایه صورت می گیرد نسبت به حرارت آزاد شده در اثر واکنشهای شیمیایی در حجم کنترل ناچیز است، لذا از اتلافات حرارتی در حجم کنترل نیز صرف نظر شده است. با در نظر گرفتن این فرضیات معادله (۳) را می توان به صورت زیر نوشت:

$$dt = \frac{\rho_m \cdot C_p \cdot V}{Vq} dT \quad (4)$$

از رابطه (۴) می توان حجم را حذف نموده و فرمولی مستقل از حجم بدست آورد. آهنگ حرارت آزاد شده در اثر واکنشهای شیمیایی [q] را می توان به صورت حاصل ضرب گرمای واکنش و آهنگ واکنش به صورت زیر بیان نمود:

$$q = \Delta H \cdot \dot{W}_f \quad (5)$$

که در آن ΔH گرمای واکنش بر حسب [J/Kg] و \dot{W}_f آهنگ واکنش بر حسب $\text{Kg/m}^3 \cdot \text{sec}$ است. با توجه به اصول سینتیک واکنشهای شیمیایی، آهنگ واکنش به صورت زیر در نظر گرفته می شود [۱].

$$W_f = A \cdot (C_f)^n \cdot \text{EXP}[-E/RT] \quad (6)$$

که در آن

$$E = \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot \text{mole} \cdot \text{k}} \quad \text{انرژی اکتیواسیون سوخت بر حسب}$$

$$R = \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot \text{mole} \cdot \text{k}} \quad \text{ثابت عمومی گازها}$$

$$C_f = (\text{mole} / \text{cm}^3) \quad \text{غلظت سوخت}$$

غلظت سوخت یعنی C_f را می توان بر حسب تابعی از دما، فشار و کسر مولی سوخت در نظر گرفت یعنی:

$$C_f = X_f \left(\frac{P}{RT} \right)$$

بنابراین رابطه (۶) را می توان به صورت زیر نوشت:

$$W_f = A \cdot (X_f \cdot \frac{P}{RT})^n \cdot [\text{EXP}(-E/RT)] \quad (7)$$

$$\dot{Q} - \dot{Q}_{\text{loss}} + P\dot{V} = \rho C_p V \frac{dT}{dt} \quad (1)$$

که در آن:

$$\dot{Q} = \text{[J/sec]} \quad \text{آهنگ حرارت آزاد شده در اثر واکنشهای شیمیایی}$$

$$\dot{Q}_{\text{loss}} = \text{[J/sec]} \quad \text{آهنگ اتلافات حرارتی از حجم کنترل}$$

$$P = \text{[Pa]} \quad \text{فشار مخلوط سوخت-هوا}$$

$$\dot{V} = \text{[m}^3/\text{t]} \quad \text{آهنگ تغییرات حجم نسبت به زمان}$$

$$\rho_m = \text{[Kg/m}^3\text{]} \quad \text{جرم مخصوص مخلوط بخار سوخت-هوا}$$

$$C_p = \text{[J/Kg.K]} \quad \text{گرمای ویژه مخلوط در فشار ثابت}$$

$$dT/dt = \text{[K/sec]} \quad \text{تغییرات دمای مخلوط نسبت به زمان}$$

در معادله (۱)، \dot{Q} را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\dot{Q} = V \cdot q \quad (2)$$

که در آن q آهنگ حرارت آزاد شده در اثر واکنش بر حسب $\text{J/m}^3 \cdot \text{sec}$ و V حجم بر حسب m^3 است. با بکار بردن رابطه (۲) در معادله (۱) و پیدا کردن dt از آن می توان نوشت:

$$dt = \frac{\rho_m \cdot C_p \cdot V \cdot dT}{V \cdot q - \dot{Q}_{\text{loss}} + P\dot{V}} \quad (3)$$

در رابطه (۳) از جمله $P\dot{V}$ که آهنگ کار انجام یافته بر روی حجم کنترل است به علت ناچیز بودن آن در مقابل آهنگ گرمای آزاد شده از واکنش (Vq) صرف نظر می گردد. همچنین چون در طول پریود تأخیر در اشتعال اتلافات حرارتی که از لایه مخلوط بخار سوخت-هوا به محیط

اگر دور موتور [RPM] N در نظر گرفته شود زاویه جاروب شده در مدت زمان t [sec] برابر است با:

$$\gamma = 6 t N \text{ [degree]}$$

انرژی اکتیواسیون که به صورت رابطه‌نمایی در انتگرال (۱۰) آمده است می‌توان آن را به صورت تابعی از عددستانی سوخت نوشت: [۲]

$$E = 21022 - 119.5 \times CN \left(\frac{\text{KJ}}{\text{Kg-mole}} \right)$$

در رابطه فوق CN عددستانی سوخت است. برای محاسبه زمان تأخیر شیمیایی در اشتعال از معادله (۱۰) بایستی انتگرال گیری شود، اما چون با روشهای تحلیلی نمی‌توان از معادله فوق انتگرال گیری نمود، لذا از روشهای عددی برای این منظور استفاده شده که روش عددی مورد استفاده در این مدل روش دوزنقه ای (Trapazoidal rule) است.

۴- نتایج بدست آمده و بحث در مورد آنها

مدل عمومی تأخیر در اشتعال با استفاده از داده‌های چندین موتور دیزلی با پاشش مستقیم ولی با سرعتهای مختلف (جدول ۱) اجرا شده و جدول شماره (۲) نتایج بدست آمده برای پریودهای تأخیر فیزیکی و تأخیر شیمیایی و کل پریود تأخیر در اشتعال را نشان می‌دهد.

جدول (۱)

نوع موتور / مشخصات	OM 360	TACUM-LAB	Mirless	Layland
سرعت موتور	2300 RPM	1922	500	2000
فشار هوای ورودی	101 KPa	147.8	101	149.4
دمای هوای ورودی	293 K	343	293	293
فشار پاشش	202.65 bar	451	232.8	200
قطر سوراخ نازل	0.35	0.201	0.7	0.37
شروع پاشش	21 BTDC	17	17	20
نسبت تراکم	16.8	16	12.85	12.8
کورس	0.14	0.1143	0.381	0.125
قطر سیلندر	0.115	0.1143	0.3047	0.1180
تعداد سیلندر	6	1	2	6
نسبت سوخت هوای نسبی	0.55	0.5	0.5	0.39

و آهنگ حرارت آزاد شده در اثر واکنشهای شیمیایی به صورت زیر در می‌آید:

$$\dot{q} = \Delta H \cdot A \cdot \left(X_f \cdot \frac{P}{RT} \right)^n \cdot [\text{EXP}(-E/RT)] \quad (8)$$

با جایگذاری رابطه (۸) در رابطه (۴) می‌توان نوشت:

$$dt = \frac{\rho_m \cdot C_p}{A \cdot \Delta H \cdot \left(X_f \cdot \frac{P}{RT} \right) \text{EXP}(-E/RT)} dT \quad (9)$$

از معادله (۹) از دمایی که مخلوط در انتهای پریود تأخیر فیزیکی دارا است تا دمای انتهای واکنشهای پیش شعله ای T_{PF} انتگرال گیری کرده، لذا زمان بدست آمده در فاصله دمایی فوق طبق تعریفی که در این مدل انجام گرفته پریود تأخیر شیمیایی در اشتعال خواهد بود یعنی:

$$\tau_{CHD} = \Delta t = \int_{T_{2ST}}^{T_{PF}} \frac{\rho_m \cdot C_p}{A \cdot \Delta H \cdot \left(X_f \cdot \frac{P}{RT} \right) \text{EXP}(-E/RT)} dT \text{ (sec)} \quad (10)$$

گرمای ویژه هوا و بخار سوخت بر حسب دما به صورت یک چند جمله‌ای توسط پژوهشگرانی ارائه شده است و در این مدل از این چند جمله‌ایها برای محاسبه گرمای ویژه بر حسب تابعی از دما استفاده شده است:

$$C_{p_{air}} = 4.1868 (0.212 + 0.689 \times 10^{-4} \cdot T - 0.8488 \times 10^{-8} \cdot T^2) \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot \text{K}}$$

$$C_{p_{fuel}} = 4.1868 (0.07251 + 0.9244 \times 10^{-3} \cdot T + 1.0328 \times 10^{-6} \cdot T^2 - 2.0659 \times 10^{-9} \cdot T^3 + 9.4404 \times 10^{-12} \cdot T^4) \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot \text{K}}$$

تغییرات فشار در طول پریود تأخیر شیمیایی در اشتعال را می‌توان با استفاده از روابط زیر بیان نمود، و حجم سیلندر V را می‌توان به صورت تابعی از نسبت تراکم، قطر سیلندر، کورس بیستون و زاویه میلنگ نوشت یعنی:

$$V = S \frac{\pi D^2}{4} \left[\frac{1}{r-i} + \frac{1}{2} [1 + n - (n^2 - \sin^2 \alpha)^{1/2} - \cos \alpha] \right] \text{ [m}^3 \text{]}$$

می توان این گونه توجیه نمود، که هر چه فشار هوای ورودی به محفظه سیلندر بیشتر شود با توجه به روابط فرآیند تراکم پلی تروپیک در مرحله تراکم فشار هوای محفظه سیلندر در شروع پاشش سوخت افزایش یافته و در نتیجه مولکولهای سوخت و هوا فشرده تر شده و فاصله آزاد بین مولکولها کاهش خواهد یافت، در اثر این عمل تعداد تصادم در مولکولها افزایش یافته و لذا آهنگ واکنش بیشتر می گردد. با سریعتر شدن آهنگ واکنش، زمان تکامل واکنش کاهش یافته و با می توان گفت که افزایش فشار باعث افزایش آهنگ واکنش و در نتیجه کاهش طول پریود تأخیر در اشتعال می گردد.

۲-۵- دمای هوای ورودی

شکل (۲) تأثیر دمای هوای ورودی به سیلندر را بر روی پریود تأخیر در اشتعال نشان می دهد. افزایش دمای هوای ورودی به سیلندر باعث می شود که دمای هوای محفظه احتراق در مرحله تراکم افزایش یافته و انتقال حرارت بین قطره مایع پاشیده شده به محفظه احتراق و هوای مجاور آن به خوبی صورت گرفته و فرآیند تبخیر سریع انجام یافته و نیز دمای مخلوط بخار سوخت هوای اطراف قطره سوختی به تندی افزایش می یابد. همچنین افزایش دما، مخلوطهای واکنشگر با در نظر گرفتن روابط مربوط به سینتیک واکنشهای شیمیایی باعث افزایش آهنگ واکنش شده و روی هم رفته عوامل فوق سبب کاهش طول پریود تأخیر در اشتعال می گردد. کاهش طول پریود تأخیر با افزایش دمای هوای ورودی در شکل (۲) به خوبی آشکار است.

در این جدول نتایج تجربی مربوط به کل زمان تأخیر در اشتعال این موتورها نیز جهت مقایسه آورده شده اند. چنانکه از این جدول مشاهده می شود، مدل عمومی تأخیر در اشتعال می تواند زمان مربوط به پریود تأخیر در اشتعال را با تقریب مناسبی پیش بینی نماید.

برای سوخت دیزلی مرتبه واکنش $n=1.736$ و دمای بحرانی $T_{c,p}=1454.7\text{ K}$ است. [۲] نتایج حاصله پایان صفحه در جدول شماره (۲) آمده است:

۵- مطالعه پارامتریک مدل

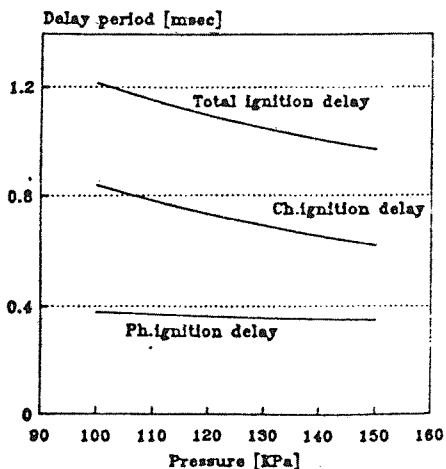
برای اطمینان از کارایی مدل در موتورهای دیزلی مختلف و در شرایط کارکن متفاوت، مطالعات پارامتریک بر روی مدل تأخیر در اشتعال صورت گرفته است. برای این منظور تأثیر پارامترهایی چون فشار هوای ورودی، دمای هوای ورودی، سرعت موتور، عددستانی سوخت، نسبت سرعت گرد بادی هوا، نسبت سوخت هوای نسبی، دمای اولیه سوخت و فشار پاشش در زمان تأخیر در اشتعال مورد مطالعه قرار گرفته است.

۱-۵- فشار هوای ورودی

شکل (۱) تأثیر فشار هوای ورودی به سیلندر را بر روی پریود تأخیر اشتعال نشان می دهد. همان گونه که از شکل دیده می شود، با افزایش فشار هوای ورودی پریود تأخیر در اشتعال کمتر می گردد. این روند با آزمایشاتی که بر روی موتورهای دیزلی توسط پژوهشگران صورت گرفته به اثبات رسیده است. کاهش طول پریود تأخیر با افزایش فشار هوا را

جدول (۲)

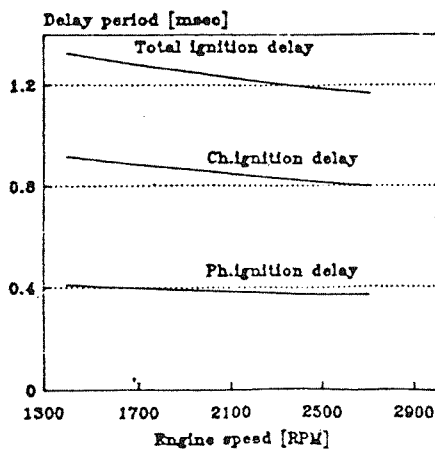
	Ph. delay (msec)	Ch. delay (msec)	Total ignition delay (msec)	Exp. ignition. delay (msec)	relative error %
OM-360	0.375	0.725	1.1	1.1	0.0
TACOM-LAB	0.158	0.56	0.718	0.697	3.0
MIRLESS	0.80	1.07	1.87	2.0	6.5
LAYLAND	0.403	1.09	1.493	1.67	10.6



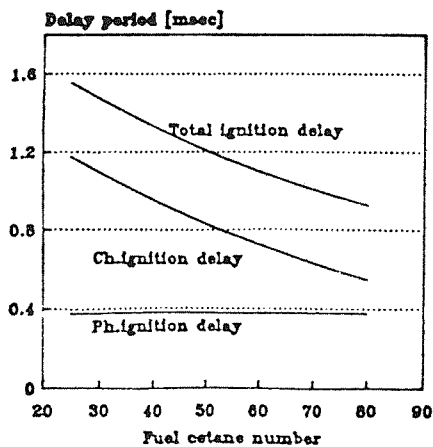
شکل (۱) اثر فشار اولیه سیلندر بر روی تأخیر در اشتعال

۴-۵ = عددستانی سوخت

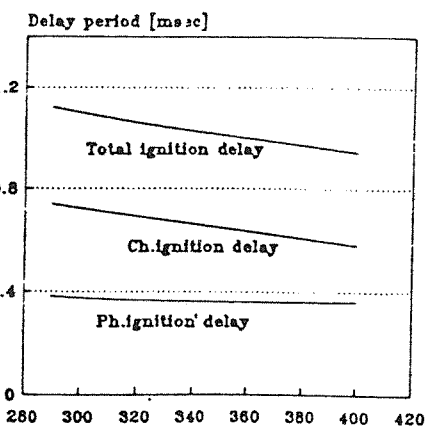
شکل (۴) تأثیر عددستانی سوخت را بر روی پریود تأخیر در اشتعال نشان می دهد. کیفیت اشتعالی سوخت دیزلی با افزایش عددستانی آن بهبود خواهد یافت. با توجه به رابطه، "عددستانی $21022 - 119.5 \times$ انرژی اکتیواسیون" انرژی اکتیواسیون سوخت تابع عددستانی بوده و با افزایش عددستانی، انرژی اکتیواسیون سوخت کاهش یافته و در نتیجه آهنگ واکنش با توجه به رابطه آرنوس افزایش خواهد یافت. با افزایش آهنگ واکنش، زمان تکمیل واکنش کمتر شده و بالاخره باعث کاهش پریود تأخیر در اشتعال می شود. نتایج موجود در ادبیات فن این روند را به اثبات رسانده است.



شکل (۳) اثر سرعت موتور بر تأخیر در اشتعال



شکل (۴) اثر عدد اکتان سوخت بر تأخیر در اشتعال



شکل (۲) اثر درجه حرارت محیط بر تأخیر در اشتعال

۳-۵ = سرعت موتور

تأثیر سرعت موتور بر روی پریود تأخیر در اشتعال در شکل (۳) نشان داده شده است. آزمایشات انجام یافته بر روی موتورهای دیزلی نشان می دهد که اگر پریود تأخیر بر حسب واحد زمان بیان شود، با افزایش سرعت موتور اندکی کاهش در طول پریود تأخیر در اشتعال مشاهده می گردد. تغییرات در سرعت موتور باعث تغییراتی در روابط زمان/فشار و زمان/دما شده و در نتیجه آن، دما و فشار پیک در فرآیند تراکم با افزایش سرعت موتور افزایش می یابد [۸]. افزایش سرعت موتور سبب کاهش طول فرآیند تراکم شده و بنابراین اتلافات حرارتی و افت فشار در طول این فرآیند کاهش می یابد. افزایش فشار و دما همان طوری که بیان شد باعث کاهش طول پریود تأخیر در اشتعال می شود.

۵-۵- نسبت سرعت گرد بادی هوا

در شکل (۵) تأثیر نسبت سرعت گرد بادی هوا بر روی پریود تأخیر در اشتعال نشان داده شده است. افزایش نسبت سرعت گرد بادی هوا سبب افزایش فرآیندهای انتقال حرارت و جرم در قطره سوختی شده و پریود تأخیر فیزیکی که رابطه معکوسی با آهنگ انتقال حرارت و جرم دارد کاهش می یابد. همان گونه که از شکل دیده می شود، افزایش نسبت سرعت گرد بادی هوا باعث کاهش طول پریود تأخیر در اشتعال شده و می توان گفت که طراحی محفظه احتراق برای ایجاد هوای گرد بادی نه تنها باعث بهبود کیفیت احتراق و کاهش مواد آلوده کننده می شود بلکه سبب کاهش طول پریود تأخیر نیز می گردد.

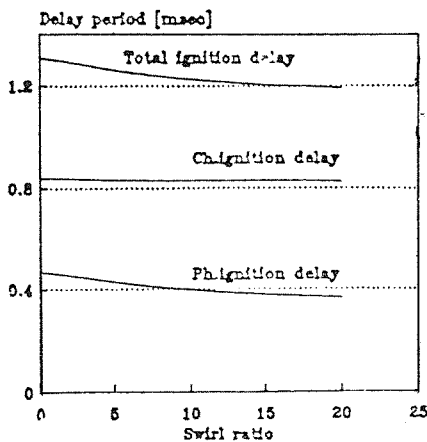
۵-۶- نسبت سوخت-هوای نسبی یا نسبت اکیوالانس

شکل (۶) تأثیر نسبت سوخت-هوای نسبی (F_R) یا نسبت اکیوالانس (ϕ) را بر روی پریود تأخیر در اشتعال

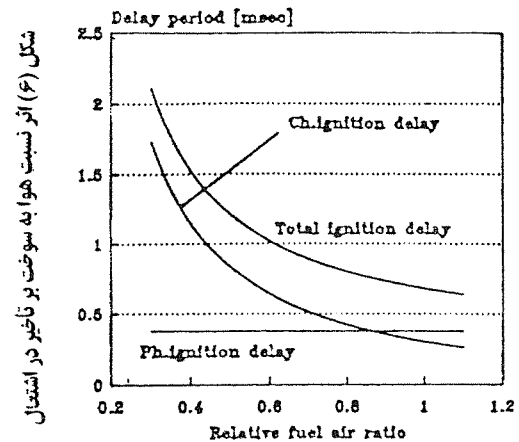
نشان می دهد. چنانکه می دانیم در موتورهای دیزلی، دبی هوا ثابت بوده و افزایش (F_R) به معنی افزایش دبی سوخت یا به عبارت دیگر افزایش بار موتور است. زمان پریود تأخیر در اشتعال با افزایش بار موتور کاهش می یابد و علت آن افزایش سریع دمای سیلندر با بار است.

۵-۷- دمای اولیه سوخت

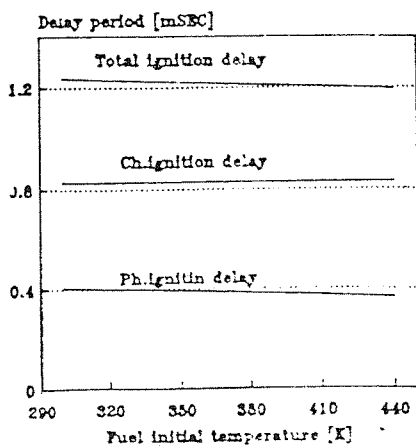
تأثیر دمای اولیه سوخت بر روی پریود تأخیر در اشتعال در شکل (۷) نشان داده شده است. افزایش این پارامتر باعث کاهش طول پریود تأخیر می شود. تغییرات در دمای اولیه قطره سوختی باعث تغییراتی در خواص فیزیکی سوخت از قبیل دانسیته، ویسکوزیته، کشش سطحی و گرمای ویژه سوخت شده و تغییرات این خواص با دما به گونه ای است که افزایش دمای سوخت باعث تبخیر سریع قطره سوختی و کاهش زمان رسیدن دمای مخلوط بخار سوخت-هوا به دمای اشتعال خود بخودی می گردد.



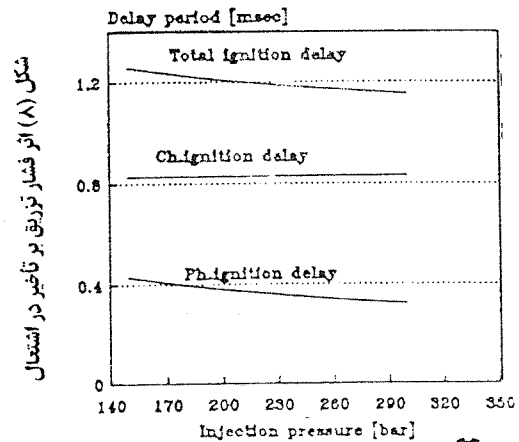
شکل (۵) اثر نسبت چرخش بر تأخیر در اشتعال



شکل (۶) اثر نسبت هوا به سوخت بر تأخیر در اشتعال



شکل (۷) اثر درجه حرارت اولیه سوخت بر تأخیر در اشتعال



شکل (۸) اثر فشار تزریق بر تأخیر در اشتعال

۸-۵- فشار پاشش سوخت

تأثیر فشار پاشش سوخت بر روی پریود تأخیر در اشتعال در شکل (۸) نشان داده شده است. همان طور که در شکل دیده می شود با افزایش فشار پاشش طول پریود تأخیر در اشتعال کاهش می یابد. دلیل را می توان این گونه توجیه نمود که افزایش فشار پاشش سوخت سبب کاهش قطر متوسط قطرات سوختی و افزایش سرعت قطرات می گردد. این عوامل باعث تسریع در فرآیند تبخیر شده و در نتیجه طول

پریود تأخیر در اشتعال با افزایش فشار پاشش، کاهش خواهد یافت.

نتایج فوق نشان می دهند که مدل عمومی تأخیر در اشتعال در گستره وسیعی از موتورهای دیزلی با پاشش مستقیم می تواند بکار برده شود و رفتار معقولی را با تغییرات پارامترهای طراحی و عملکرد موتور از خود نشان می دهد.

نتیجه گیری:

بر اساس مدلی که برای برآورد زمان پریود تأخیر در اشتعال ارائه شده نتایج زیر را می توان بدست آورد:

۱- مدل حاضر بر اساس تئوری قطره سوختی بنا نهاده شده که در آن با استفاده از داده های طراحی و عملکرد موتور دیزلی پریود تأخیر در اشتعال را به صورت مجموع دو قسمت مجزای پریود فیزیکی و شیمیایی می توان محاسبه نمود.

۲- در این مدل شرایط ورودی به موتور در نظر گرفته شده و این گونه داده ها به عنوان پارامتر طراحی همواره در دسترس طراح بوده و بنابراین به پارامترهای مجهول نظیر شرایط سیلندر در موقع پاشش، سوخت نیازی نیست.

۳- بر اساس این مدل، تأخیر شیمیایی در اشتعال بر حسب تابعی از عددستانی سوخت، فشار ورودی، نسبت تراکم، نسبت سوخت به هوای نسبی و سرعت موتور بیان شده

است.

۴- با توجه به مطالعات پارامتریک مدل، به ازاء گستره وسیعی از تغییرات پارامترهای عملکرد و طراحی موتور رفتار مدل معقول و مناسب بوده و مطابقت خوبی را با رفتار سایر مدل های قبلی دارد.

۵- با در نظر گرفتن مطالعات پارامتریک دیده می شود که افزایش فشار و دمای ورودی به موتور سبب کاهش پریود تأخیر در اشتعال می گردد، لذا پرخورانی نمودن موتور دیزلی باعث کاهش پریود تأخیر در اشتعال می شود.

۶- افزایش پارامترهایی از قبیل عددستانی سوخت، دور موتور، نسبت سوخت هوای نسبی فشار پاشش، نسبت سرعت گردبادی هوا و دمای اولیه سوخت باعث کاهش طول پریود تأخیر در اشتعال می گردد.

۷- ضمن اینکه این مدل به تنهایی می تواند پریود تأخیر در اشتعال را پیش بینی نماید همراه با مدل های مختلف احتراق نیز می توان این مدل را بکار برد.

نمادها:

AH: گرمای واکنش	A: ضریب پیش نما
X_a : کسر مولی هوا	n_p : نوان پلی تروپیک
ID: تأخیر در اشتعال	C_p : گرمای ویژه در فشار ثابت
X_f : کسر مولی سوخت	P: فشار
M_a : جرم مولکولی هوا	CN: عددستانی سوخت
p: جرم مخصوص	\dot{Q} : آهنگ حرارت آزاد شده
M_f : وزن مولکولی سوخت	C_f : غلظت سوخت
T: دما	\dot{Q}_{Loss} : آهنگ اتلافات حرارتی
n: مرتبه واکنش	E: انرژی اکتیواسیون
V: حجم	R: ثابت عمومی گازها
N: سرعت موتور	F_R : نسبت سوخت به هوای نسبی
\dot{W}_f : آهنگ واکنش	t: زمان

1. A. Murty Kanury, "Introduction to Combustion Phenomena.", 1984, Combustion Science and Technology Volume 2, Gordon and Breach Science Publishers.
2. Y. Q. Xia and R. C. Flanagan, "Ignition Delay-A General Engine/ Fuel model. ", SAE Paper 870591, 1987.
3. V. Pirouz-panah and S. E. Razavi, "Prediction of Physical Delay Period in Direct Injection Diesel Engine Combustion".
CSME MECHANICAL ENGINEERING FORUM, CANADA, 1990.
4. G. Sitkei, "Über den Dieselmotorisehen Zündverzug.", M. T. Z., Jahrg 24, Heft 6, Juni 1963.
5. M. Thellies, Zhu Ming Ji, "Reflexion Sur Modélisation du delai d, inflammation dans les Moteurs Diesel.", entropie, No. 134, U. A. CNRS 879, FR.,1987.
6. Kadota, T., Hiroyasu, H., Oya, H., "Spontaneous ignition Delay of a Fuel Droplet in Pressyre and High Temperature Gaseous Environments", Bulletin of JSME, VOL. 19, NO. 3, April 1979.
7. G. L. Borman and J. M. Johnson, "Unsteady Vaporization Histories and Trajectories of Fuel Drops injected into Swirling air", S. A. E Paper 5980,1952.
8. J. B. Heywood, "Internal Combustion Engine Fundamentals", Mc Graw-Hill Book Co., 1988.
9. N. A. Henein and J. A . Bolt, "Ignition Delay in Diesel Engines." SAE Paper No. 670007, 1967.
10. C. A. Bergeron, and W. L. H. Hallet, "Auto-ignition of Single Droplets of Two-Component Liquid Fuels." , Comb. Scin. and Tech., Vol. 65, 1989.
11. H. O. Hardenberg and F. W. Hase, "An Empirical Formola for Computing the Pressure Rise Delay of a Fuel from its Cetane Number and from the Relevant Parameters of Direct-Injection Diesel Engine.", SAE Paper 790493, SAE Trans.. VOL. 88,1979.
12. K. C. Salooja, "Ignition Behaviours of Mixtures of Hydrocarbons.", Comb. and Flame, 12. 597, 1968.
13. T. C. Yu, R. N. Collins, K. Mahadevan, O. A. Uyehara, and P. S. Myers", Physical and Chemical Ignition Delay in an Operating Diesel Engine Using the Hot-Motored Technique.", SAE Trans., Vol. 64, 1956.
14. C. L. Wong, and D. E. Steere, "The Effects of Diesel Fuel Properties and Engine Operating Condition on Ignition Delay.", SAE Paper 821231, SAE Trans., Vol. 91, 1982.