

تخمین مدل ریاضی دوره تاخیر اشتعال در یک موتور کوچک

دیزلی پاشش مستقیم

غلامرضا چگینی و برات قبادیان

چکیده: دوره تاخیر اشتعال بر اشتعال های بعدی، عملکرد و کارایی موتور نقش بسزایی دارد. تعیین طول این دوره همواره از مشکلاتی بوده که در کنترل احتراق و طراحی موتور وجود داشته است. با استفاده از یک موتور کوچک دیزلی پاشش مستقیم در قالب طرح آزمایش کامل فاکتوریل اثر پارامترهای کاری موتور مانند دور در ۵ سطح، بار ۴ سطح و زمان پاشش سوخت در ۵ سطح انجام گرفت. در این تحقیق پارامترهای احتراق موتور مانند دمای داخلی سیلندر، نرخ حداکثر گرمای آزاد شده، فشار حداکثر، نرخ فشار حداکثر و شتاب فشار حداکثر سیلندر بر تاخیر اشتعال استاتیکی و دینامیکی اندازه گیری شدند. دمای داخلی سیلندر، دور موتور و نرخ حداکثر گرمای آزاد شده بیشترین تاثیر را بر تاخیر اشتعال داشتند. پارامترهای بار، فشار حداکثر، نرخ فشار حداکثر و شتاب فشار حداکثر تاثیر معنی داری بر تأخیر اشتعال نداشتند. تجزیه و تحلیل رگرسیون تک متغیره نشان داد که پارامترهای درجه حرارت، نرخ حداکثر گرمای آزاد شده، سرعت موتور و زمان پاشش سوخت بیشترین همبستگی را با تاخیر اشتعال دارند. در این تحقیق مدل های ریاضی تاخیر اشتعال دینامیکی و استاتیکی تک متغیره و چند متغیره بر حسب پارامترهای درجه حرارت، سرعت موتور و حداکثر گرمای آزاد شده به دست آمد. بهترین مدل ارائه شده مدل تاخیر اشتعال استاتیکی با ضریب همبستگی ۰/۹۰ و حداکثر خطای ۱/۳۲ ms است. آزمونهای کفایت مدل نشان می دهد که مدل به دست آمده کاملاً خطی بوده و تک تک پارامترها نقش مؤثری در مدل دارند. این مدل جدید بوده و به نظر می رسد مدل های ارائه شده بوسیله محققان قبلی نسبت به مدل به دست آمده، تأخیر اشتعال را در موتورهای دیزلی کوچک با سوخت پاشش مستقیم دقیق پیش بینی نمی کند.

واژه های کلیدی: موتورهای کوچک دیزلی، تاخیر اشتعال، مدل ریاضی

۱. مقدمه

سوخت در موتورهای دیزل بایست مراحل پاشش، اتمیزه شدن، توزیع ذرات، نفوذ ذرات، جذب ذرات، تبخیر و اختلاط با هوا را طی کند تا اشتعال صورت گیرد. این مدت زمان در موتورهای دیزل که از پاشش سوخت تا اشتعال طول می کشد دوره تاخیر اشتعال^۲ نام دارد. با طی مراحل مذکور سوخت و هوای مخلوط مشتعل شده و سریعاً فشار داخل سیلندر به حد اکثر مقدار خود می رسد [۲۰].

مقاله در تاریخ ۸/۸/۸۱ دریافت شده و در تاریخ ۱۱/۲۵/۸۲ به تصویب نهایی رسیده است.

غلامرضا چگینی، دانشکده مهندسی کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران،
chegini@ut.ac.ir

دکتر برات قبادیان، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس،
Bghobadian@aeoi.org.ir

طول این دوره تا حد زیادی بر احتراق، کارایی موتور، اشتعالهای بعدی و ایجاد صدا^۳ و کوبش^۴ دیگر پارامترها تأثیر دارد. تأخیر اشتعال مهمترین دوره ای است که بر توسعه فشار مؤثر است. فشار زیاد باعث ایجاد بارهای ناگهانی و کوبش و صدای زیاد موتور می شود [۳ و ۴]. تعاریف زیادی برای طول این دوره بکار رفته است. تعریف عمومی تأخیر اشتعال مدت زمان بین شروع پاشش سوخت تا شروع اشتعال می باشد. بدست آوردن زمان شروع پاشش اغلب با زمان بلند شدن سوزن انژکتور از نشیمنگاه خود قابل اندازه گیری است، ولی مشخص کردن شروع اشتعال مشکل می باشد. بنابراین از آثار و نشانه های احتراق برای تعیین شروع این مرحله استفاده شده است. بیشترین تفاوت در نشان دادن پایان این دوره است. افزایش

³ Noise

⁴ Roughness

² Ignition delay

$$ID_{ch} = (C.e^{b/T}) / P^n \quad (4)$$

رابطه (۵) برای تأخیر اشتعال افزایش فشار با دما و فشار سیلندر در بمب‌های حجم ثابت به دست آمده است.

$$ID.P = (0.44e^{4650/T}) / P^{1.19} ID \quad (5)$$

این معادله برای تمامی سوخته‌های با عدد ستان بیش از ۵۰ کاملاً دقیق بوده و پارامترهای نسبت سوخت به هوا، شکل محفظه احتراق و نازل سوخت، فشار پاشش، اغتشاش هوا و دمای سوخت بر تأخیر اشتعال تأثیر دارند [۱۶].

بور با آزمایش بر روی موتورهای با قطر ۳ تا ۳/۸ اینچ و کورس ۵ اینچ توانست روابط (۷و۶) را بین تأخیر اشتعال با دما و فشار سیلندر به دست آورد.

$$ID = Fn' (T \text{ Log } P) \quad (6)$$

$$ID = Fn' (P e^T) \quad (7)$$

دریک موتور تک سیلندر می‌توان قسمت شیمیایی تأخیر نور افشانی را به سه بخش نشان داده شده در رابطه (۸) تقسیم نمود و رابطه (۹) را بین تأخیر نور افشانی و پارامترهای دما و فشار سیلندر به دست آورد [۱۶].

$$IDn = ID_{ph} + ID_{CF} + ID_{BF} + ID_{EF} \quad (8)$$

$$IDn = [0.5 + 0.135e^{(7800/RT)}] / P^{0.7} + [4.8 e^{(7800/RT)}] / P^{1.8} \quad (9)$$

هنین و بولت با بررسی معادلات به دست آمده برای تأخیر اشتعال نتیجه گرفتند که بهترین معادله رابطه (۱۰) می‌باشد [۱۶].

$$ID p = C / p^n \quad (10)$$

ضرایب ثابت C و ۶۴۷۰ n و ۱/۷۷۴ می‌باشد. آرهینوس با مطالعه با داده‌های آزمایشگاهی، تأخیر اشتعال را به صورت (۱۱) به دست آورد [۱۷].

$$ID = AP^n \exp(EA / RT) \quad (11)$$

هیس و هاردنبرگ با انجام آزمایش بر روی موتورهای پاشش مستقیم در سطح وسیعی از شرایط موتور، مدل (۱۲) را برای پیش بینی تأخیر اشتعال به دست آوردند [۱۷].

$$ID (ms) = [(0.36 + 0.22 sp) \exp(EA \quad (12)$$

$$(1/RT - 0.058) (21.2 / P^{12.4})^{0.63} / 0.006N$$

$$EA = 25 + 618.84 / CN \quad (13)$$

فشار در طول احتراق یا نورافشانی احتراق به نسبت بیشتری برای تعیین پایان این دوره بکار رفته است. در بعضی موارد نیز افزایش دما در طول احتراق به عنوان پایان این دوره در نظر گرفته شده است. طول این دوره شکل اختلاط سوخت و هوا را تعیین می‌کند. تأخیر اشتعال نه فقط مستقیماً بر کارایی موتور تأثیر دارد بلکه نقش مهمی در آلودگی ایفا می‌کند [۷-۵].

تحقیقات قبلی نشان داده که پارامترهایی نظیر نسبت سوخت به هوا، فشار پاشش، درجه حرارت خنک کننده، اغتشاش، کیفیت پاشش، اندازه ذرات، سرعت پاشش، نرخ پاشش، دما و فشار هوای ورودی، سرعت یا دور موتور، تمرکز اکسیژن، دیواره‌های محفظه احتراق، خصوصیات سوخت و... بر تأخیر اشتعال مؤثر می‌باشند [۸-۱۱].

زمانی که سوخت به داخل سیلندر پاشیده می‌شود بر طول دوره احتراق تأثیر زیادی دارد. وقتی زمان پاشش کوتاهتر از زمان تأخیر است، منحنی احتراق موتور در چند درجه قبل از نقطه مرگ بالا به حداکثر فشار خود می‌رسد. در صورتیکه زمان پاشش طولانی‌تر از زمان تأخیر باشد، منحنی احتراق موتور در چند درجه بعد از نقطه مرگ بالا به حداکثر فشار خود می‌رسد.

با مقایسه این دو زمان پاشش می‌توان نتیجه گرفت که هرچه طول پاشش، کوتاه‌تر از طول دوره تأخیر باشد احتراق کامل صورت گرفته و بیشترین قدرت و راندمان حاصل می‌شود [۱۲ و ۱۳].

برای طراحی یک موتور نیاز است طول این دوره کاملاً پیش بینی شود تا بتوان از بیشترین قدرت و راندمان موتور استفاده و از مشکلات بعدی جلوگیری به عمل آید. با بررسی اثر پارامترهای مختلفی از موتور تاکنون مدلهایی برای تعیین طول دوره تأخیر اشتعال به دست آمده است. بورلز و بروز اثر فشار بر روی تأخیر اشتعال را در یک موتور دیزل تک سیلندر ۴ زمانه پاشش مستقیم دور پائین با محدوده فشار ۳۷۵-۶۰۰ psi توانست رابطه (۱) را بین تأخیر اشتعال افزایش فشار با فشار تراکم بدست آورد [۱۴].

$$ID.p = k / p \quad (1)$$

اشمیت با بررسی‌های تئوری و تجربی بر تأخیر اشتعال و ضربه در موتور، رابطه (۲) را بین تأخیر اشتعال شیمیایی با پارامترهای کاری موتور به دست آورد.

$$ID_{ch} = (e^{E/RT} . T . a' . B) / P \quad (2)$$

او با تحقیقات بیشتر رابطه فوق را به صورت رابطه (۳) به دست آورد.

$$ID_{ch} = (e^{b'/T} . T^{0.5}) / P^n \quad (3)$$

که $E/R = b'$ و نتیجه گرفت که اثر تابع نمایی خیلی بیشتر از اثر عامل های a', T, B می‌باشد و در نهایت فرمول بهینه را به صورت رابطه (۴) به دست آورد [۱۵].

پردازش داده‌های عددی^۲ به وسیله نرم افزار مخصوصی با کامپیوتر تحلیل گردیدند (شکل ۱). مشتملهای اول و دوم سیگنال فشار سیلندر به روش اختلاف محدود نیوتن^۳ (شکل ۱) بدست آمدند.

تخمین تاخیر اشتعال در مقاله حاضر بر اساس معیار تأخیر افزایش فشار^۴ بدست آمده است که در مطالعات مربوط به ارتعاش و صدا روش پذیرفته شده‌ای است. این روش به خاطر سادگی، دقت زیاد و تکرارپذیری آن انتخاب گردید [۱۸، ۱۹].

شروع احتراق (SC) را بجای استفاده از نمودار فشار- زمان، $P_c(t)$ می‌توان از نمودارهای مشتق اول آن $P_c(t)$ و مشتق دوم آن $P_c(t)$ از طریق شروع افزایش سریع فشار تعیین کرد [۲۰]. گرچه می‌توان آنرا از طریق نمودار نرخ آزاد شدن گرما $Q(t)$ نیز بدست آورد [۲۰]. برای اینکار این نمودارها پس از اخذ و ثبت پردازش شده‌اند (قسمتهای مختلف شکل ۱).

همانگونه که در شکل ۱ نشان داده شده است تاخیر اشتعال استاتیکی^۵ (SIS) با بلند شدن سوزن از نشیمنگاه آن در شکل (۱- d) آغاز شده و به دنبال آن شروع تاخیر به صورت دینامیکی^۶ (SID) که سوخت عملاً وارد سیلندر شده و مشتق اول و دوم فشار سیلندر، کاهش افزایش فشار را نشان می‌دهد ادامه می‌یابد (شکل ۱- b, c).

مدت زمان بین (SIS) و (SID) به عنوان اختلاف شروع تأخیر اشتعال استاتیکی و دینامیکی شناخته می‌شود. بنابراین در شکل ۱ هنگامیکه احتراق سوخت شروع می‌شود (SC) همراه با نرخ افزایش فشار قابل توجهی خواهد بود که در نمودارهای (b, c) یعنی $P_c(t)$ و $P_c(t)$ کاملاً مشهود است. با مراجعه به جدول مقادیر عددی بدست آمده با این نمودارها زمان بین (SIS) و (SC) و همچنین (SID) و (SC) به راحتی تأخیر اشتعال استاتیکی و تأخیر اشتعال دینامیکی محاسبه شدند. در این تحقیق پارامترهای کاری موتور سرعت موتور، بار و زمان پاشش سوخت بودند که آزمایشات در طرح کامل فاکتوریل مطابق جدول ۱ انجام شد [۲۱ و ۲۲]. پس از انتخاب متغیرها موتور تست در اتاق مخصوص تست قرار گرفت و شرایط محیطی دما، فشار و رطوبت ثابت نگه داشته شد. با توجه طرح آزمایشی، تمام فاکتوریل ۸۰ آزمایش انجام گرفت.

در این آزمایشات پارامترهای احتراق تأخیر اشتعال استاتیکی و دینامیکی (با دو مقیاس ms, ca)، حداکثر گرمای آزاد شده (در دو مقیاس KJ/ca, KJ/s)، فشارحداکثر، نرخ فشارحداکثر و شتاب فشارحداکثر سیلندر اندازه‌گیری شدند. از روش آماری رگرسیون تک متغیره و چند متغیره برای به دست آوردن مدل‌های پیش‌بینی تاخیر اشتعال استفاده شد [۲۲].

بیشتر تحقیقاتی که بر روی پارامترهای فیزیکی موثر بر تاخیر اشتعال انجام گرفته است، اثر یک یا دو پارامتر را مورد بررسی قرار داده‌اند و مدل‌های پیش‌بینی بر اساس یک یا دو پارامتر تخمین زده شده است.

تحقیقات در زمینه مدل‌های پیش‌بینی تاخیر اشتعال با پارامترهای مختلف کاری موتور و اثر همزمان آنها در یک مدل کمتر صورت گرفته است.

در این تحقیق با تغییر پارامترهای کاری موتور نظیر بار، سرعت، زمان پاشش سوخت، پارامترهای احتراق مانند دما، فشارحداکثر، نرخ فشارحداکثر، شتاب فشارحداکثر و نرخ حداکثر گرمای آزاد شده اندازه‌گیری و اثر تک تک و همزمان هر پارامتر بر تاخیر اشتعال استاتیکی و دینامیکی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲. روش تحقیق و آزمایش

برای بررسی پارامترهای احتراق و پاشش موثر بر تاخیر اشتعال در موتور تعداد زیادی نشانگر نیاز است تا تخمین مناسبی از داده‌های موتور ارائه دهد. این نشانگرها می‌بایست مستقیماً پارامترهای رفتار فشار سیلندر، رفتار شتاب خطی، بارگشتاور، سرعت و مصرف سوخت ویژه را اندازه‌گیری نمایند.

در این تحقیق موتور دیزل مدل Kirloskar، تک سیلندر، پاشش مستقیم با سوخت گازوئیل، خنک کننده آبی با خصوصیات نسبت تراکم ۱: ۱۶/۵، قطر پیستون ۸۰ mm، با کورس ۱۱۰ mm، حجم جابجایی ۰/۵۵۳ Liter، سرعت اسمی ۱۵۰۰ rpm، گشتاور ۲۳ Nm و قدرت ۳/۶۸ KW برای تست انتخاب شد.

موتور در یک اتاق آزمایش قرار گرفت و تجهیزات و ابزار اندازه‌گیری نظیر تراندیوسر فشار سیلندر، تراندیوسر فشار خط سوخت، شتاب سنج و ترموکوپل بر روی آن نصب شد و پارامترهای فشار سیلندر، فشار پاشش سرعت، گشتاور، بار، دمای روغن، دمای آگزوز، مقدار و زمان مصرف سوخت اندازه‌گیری شدند.

از دینامومتر برای بارگذاری و کنترل موتور استفاده شد که دارای تنظیم بار و نشانگر سرعت بود. پارامترهای کاری موتور نظیر قدرت خروجی، سرعت و گشتاور با دینامومتر اندازه‌گیری و با یک واحد دیجیتالی نشان داده شد. مصرف سوخت با نشانگر مصرف سوخت دینامومتر اندازه‌گیری و با اندازه‌گیری زمان لازم برای مصرف ۵۰ ml محاسبه شد. دمای روغن و آگزوز نیز با دماسنج و واحد نشانگر دیجیتالی دینامومتر اندازه‌گیری شد. زمان تاخیر اشتعال از اندازه‌گیری متحنی فشار داخل سیلندر (نمودار P-t) و فشارخط سوخت رسانی بوسیله تراندیوسرهای فشار با دقت ۱٪ ± به دست آمدند. روش محاسبه نیز به این صورت بوده است که سیگنال‌های مربوط پس از اخذ و ثبت جهت پردازش در حوزه زمان^۱ به صورت

² Digital Data Analysis

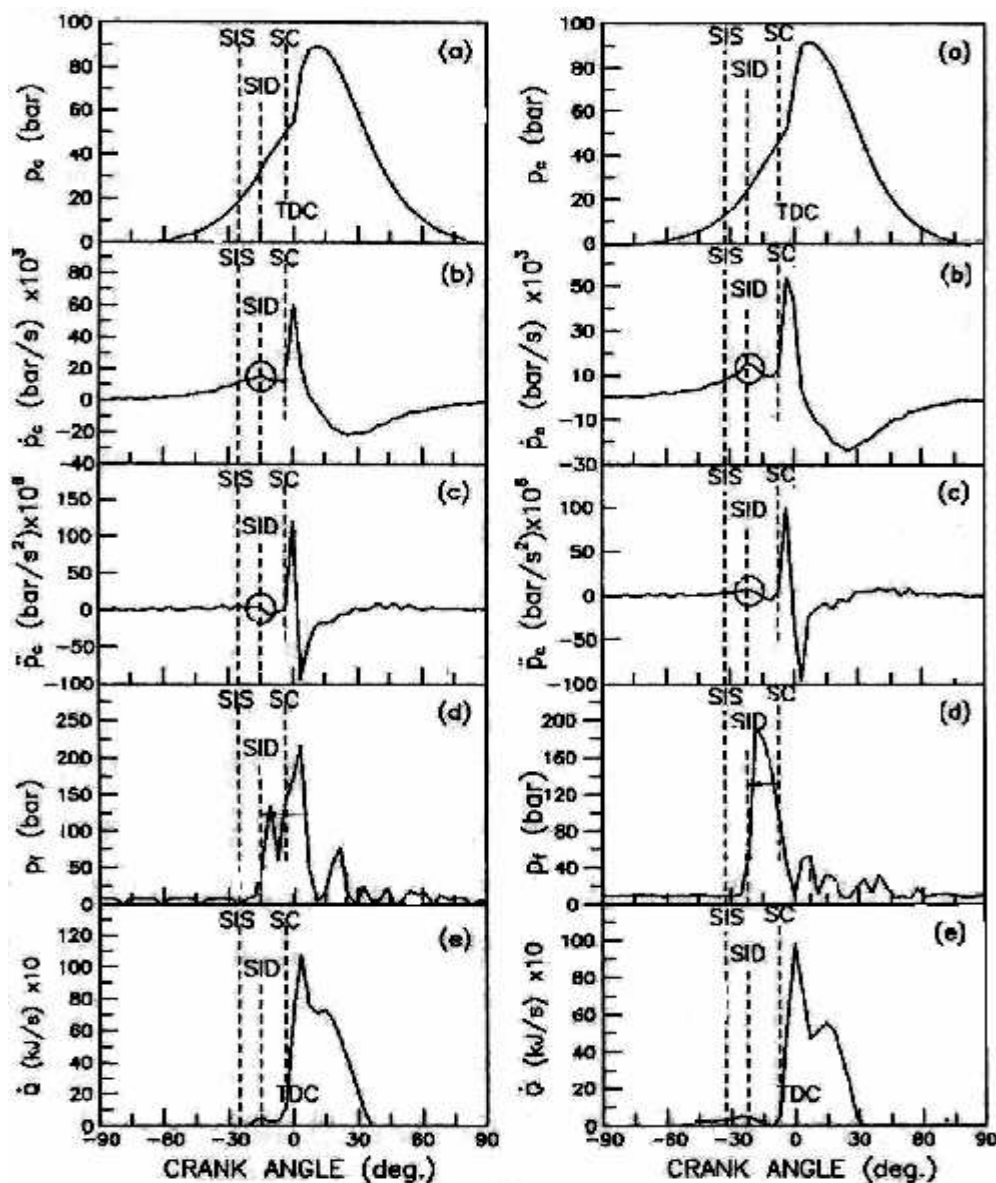
³ Newton's Finite Difference Method

⁴ Pressure Rise Delay criteria

⁵ Start of Static Ignition Delay

⁶ Start of Dynamic Ignition Delay

¹ Time Domain analysis



شکل ۱. تخمین SIS، SC و SID از نمودارهای: a - $P_c(t)$ ، b - $\dot{P}_c(t)$ ، c - $\ddot{P}_c(t)$ ، d - $Q(t)$ در زاویه پاشش 22°CA btde گراف سمت راست
سمت چپ و زاویه پاشش 32°CA btde گراف سمت راست

جدول ۱. ماتریس آزمایش

سطوح					پارامتر
۵	۴	۳	۲	۱	
-	۱۶۵۰	۱۵۰۰	۱۳۵۰	۱۲۰۰	سرعت موتور (rpm)
-	۱۰۰	۸۵	۷۰	۵۵	گشتاور بار موتور (%)
۴۲	۳۷	۳۲	۲۷	۲۲	زمان پاشش سوخت ($^\circ\text{CA btde}$)

دیگر ثابت در نظر گرفته شده و اثر یک پارامتر در شرایط مختلف کاری موتور مورد بررسی قرار گرفته و در مرحله بعد اثر همزمان پارامترهایی که تأثیر بیشتری بر تأخیر اشتعال دارند مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳. نتایج و بحث

برای به دست آوردن یک مدل پیش بینی دقیق که اثر کلیه پارامترهای موثر را در برگرفته باشد، ابتدا اثر هر پارامتر به تنهایی بر تأخیر اشتعال مورد بررسی قرار می‌گیرد. به این طریق پارامترهای

۳-۱-۳. مدل‌های تک متغیره

پارامترهایی که بر تاخیر اشتعال تاثیر داشتند، شناسایی و انتخاب شد. برای بررسی اثر هر متغیر به تنهایی بر تأخیر اشتعال و ارائه مدل یا رابطه آن با تاخیر اشتعال استاتیکی و دینامیکی از رگرسیون تک متغیره استفاده شد.

با توجه به اینکه ممکن است مدل خطی، نمایی، لگاریتمی و یا کسری باشد، تمامی این حالتها برای مدل مورد نظر بررسی گردیده و در نهایت بهترین معادله بین هر پارامتر و تاخیر اشتعال استاتیکی و دینامیکی (ms, Ca) با ضرایب همبستگی بالای ۰.۷۰ به دست آمده است.

۳-۱-۴. زمان پاشش سوخت (t_{inj} °ca btde)

با بررسی اثر پارامتر زمان پاشش سوخت در پنج زاویه مختلف؛ ۲۲، ۲۷، ۳۲، ۳۷، ۴۲ درجه میل لنگ قبل از نقطه مرگ بالا بهترین خط رگرسیون خطی و با ضریب همبستگی $r = 0.75$ برای تأخیر اشتعال دینامیکی (ms) بدست آمد که دارای ضرایب ثابت عرض از مبدأ ۱۱/۵۸ و شیب خط رگرسیون ۰/۴ بوده و رابطه (۱۷) بین زمان پاشش سوخت و تاخیر اشتعال به دست آمده است.

$$SID(ms) = 11/58 + 0.4 t_{inj} (ca) \quad (17)$$

۳-۱-۵. فشار حد اکثر، نرخ فشار حداکثر و شتاب فشار

حداکثر

با بررسی اثر پارامترهای فشار حداکثر، نرخ فشار حداکثر و شتاب فشار حداکثر بر تأخیر اشتعال با استفاده از رگرسیون تک متغیره نتایج حاصله نشان داد که همه ضرایب همبستگی کمتر از ۰/۷۰ بود. بنابراین رابطه معنی داری بین آنها و تأخیر اشتعال وجود ندارد.

۳-۱-۶. بار موتور

نتیجه حاصل از بررسی اثر بار موتور بر تأخیر اشتعال نشان داد که بار هیچ اثری بر تأخیر اشتعال ندارد. با تجزیه و تحلیل رگرسیون تک متغیره نیز ضریب همبستگی معنی داری بین بار و تاخیر اشتعال بدست نیامد.

۲-۳. مدل‌های چند متغیره

با تجزیه و تحلیل اثر پارامترهای کاری و احتراق موتور بر تأخیر اشتعال و تجزیه و تحلیل رگرسیون تک متغیره پارامترهای درجه حرارت، حداکثر گرمای آزاد شده، سرعت دورانی موتور و زمان پاشش سوخت بر اساس زاویه میل لنگ در زمان پاشش بیشترین تاثیر و همبستگی را با تاخیر اشتعال داشتند. پارامترهای بار و فشار حداکثر، نرخ فشار حداکثر و شتاب فشار حداکثر سیلندر تأثیر قابل توجهی بر تأخیر اشتعال نداشتند. برای به دست آوردن اثر همزمان هر پارامتر بر تأخیر اشتعال در کنار پارامترهای مؤثر دیگر بین پارامترهایی که بیشترین اثر را بر تأخیر داشتند تجزیه و تحلیل رگرسیون چند متغیره انجام شد. با توجه به اینکه تأثیر زاویه میل لنگ در زمان پاشش با دما تقریباً یکسان است برای رگرسیون چند متغیره از بین این دو پارامتر دما انتخاب گردید. با استفاده از نتایج رگرسیون تک متغیره جدول ۲ بهترین ضرایب همبستگی را برای سه پارامتر دور موتور، درجه حرارت موتور و نرخ حداکثر گرمای آزاد شده نشان داده است که با بررسی آن می توان دو مدل رگرسیونی برای تأخیر اشتعال استاتیکی و دینامیکی به دست آورد.

۳-۲-۱. مدل تاخیر اشتعال دینامیکی

نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل رگرسیون چند متغیره بین پارامترهای نرخ حداکثر گرمای آزاد شده، سرعت موتور و درجه

۳-۱-۱. دور موتور (N(rpm)

بررسیهای قبلی نشان داده است یکی از پارامترهای کاری که تاثیر قابل توجهی بر تاخیر اشتعال دارد دور موتور می باشد. بنابراین با بررسی اثر دور موتور بر تأخیر اشتعال با رگرسیون تک متغیره، فقط برای رابطه خطی ضرایب همبستگی معنی دار بود برای این متغیر بیشترین ضریب همبستگی ۰/۷۸ برای تأخیر اشتعال استاتیکی بر حسب ms بدست آمد که عرض از مبدأ آن ۷/۴۶ و شیب آن ۰/۰۳۲ می باشد.

بنابراین رابطه (۱۴) بین تاخیر اشتعال استاتیکی و دور موتور به دست آمد.

$$SIS (ms) = 7.46 - 0/0032 N(rpm) \quad (14)$$

۳-۱-۲. نرخ حد اکثر گرمای آزاد شده (Q_{max} (kJ/ca)

یکی دیگر از پارامترهایی که اثر قابل توجهی به تأخیر اشتعال دارد حداکثر گرمای آزاد است. با بررسی اثر آن بر تأخیر اشتعال با استفاده از رگرسیون تک متغیره، بهترین مدل بدست آمده دارای معادله ای خطی و با ضریب همبستگی $r = 0.73$ برای تأخیر اشتعال دینامیکی (ms) است. عرض از مبدأ آن ۱۲/۷۶ و شیب خط رگرسیون ۶۳/۰۶ بدست آمد.

بنابراین رابطه (۱۵) بین نرخ حداکثر گرمای آزاد شده و تاخیر اشتعال دینامیکی به دست آمده است.

$$SID (ms) = 12.76 + 63.06 Q_{max} (kJ/ca) \quad (15)$$

۳-۱-۳. دمای داخلی سیلندر (T (K)

یکی دیگر از پارامترهایی که تأثیر قابل توجهی بر تاخیر اشتعال دارد دمای داخلی سیلندر است. با بررسی رگرسیون آن با تأخیر اشتعال دینامیکی، تنها جواب قابل قبول معادله ای خطی با ضریب همبستگی $r = 0.75$ بدست آمد که عرض از مبدأ آن ۵۷/۳۰ و شیب خط رگرسیون ۰/۰۵۶ نتیجه شد. بنابراین، رابطه (۱۶) بین دما و تاخیر اشتعال دینامیکی به دست آمده است.

$$SID (ms) = 57.30 - 0.056 T(K) \quad (16)$$

اشتعال استاتیکی ($r = 0.90$) و حداکثر خطای $ms \ 1/32$ می‌توان گفت مدل دوم به مقادیر واقعی و اندازه‌گیری شده نزدیکتر می‌باشد.

۳-۳. آزمون کفایت مدل

مقادیر $p\text{-value} = 0.0000$ مدلها نشان می‌دهد که با احتمال خیلی بالایی مدل خطی است. با توجه به اینکه خطاهای رگرسیونی اطراف خط صفر روند ثابتی داشتند می‌توان گفت که واریانس خطاهای رگرسیونی ثابت است. ضرایب DW مدلها کمتر از $2/37$ نشان می‌دهد که مدل دارای خطاهای رگرسیونی مستقلی است [۲۱]. مقادیر $p\text{-value} = 0.0000$ سه پارامتر نشان می‌دهد که همگی کمتر از 0.05 هستند و در نتیجه هر سه متغیر نقش مؤثری در مدل دارند و بالاخره توزیع خطاهای رگرسیونی با انحراف کمی اطراف خط نرمال توزیع شده‌اند. بنابراین با انجام آزمونهای فوق می‌توان گفت با اطمینان بسیار بالایی مدل رگرسیونی بدست آمده قابل اطمینان و قابل استفاده می‌باشد و از اعتماد آماری بالایی برخوردار است [۲۱]. منحنی‌های مختلف بین تأخیر اشتعال اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با پارامترهای دما، دور و نرخ حداکثر گرمای آزاد شده موید این مطلب می‌باشد شکل (۲ الف-ج).

۴. نتیجه‌گیری

با تغییر پارامترهای کاری موتور مانند بار، سرعت و زمان پاشش سوخت پارامترهای احتراق دما، فشارحداکثر، نرخ فشارحداکثر، شتاب فشارحداکثر و نرخ حداکثرگرمای آزادشده اندازه‌گیری شدند و اثر تک تک و همزمان هر پارامتر برتأخیر اشتعال استاتیکی و دینامیکی مورد بررسی قرار گرفت. روابط تأخیر اشتعال و پارامترهای مختلف با توجه به مدل‌های آماری به صورت تک متغیره و چند متغیره مورد ارزیابی قرار گرفت تا پارامترهای تأثیر گذار مشخص شوند.

تجزیه و تحلیل رگرسیون تک متغیره نشان داد که پارامترهای درجه حرارت، حداکثر گرمای آزاد شده، سرعت موتور و زاویه پاشش سوخت بر اساس درجه گردش میل لنگ بیشترین تأثیر همبستگی را با تأخیر اشتعال دارند. پارامترهای بار، فشارحداکثر، نرخ فشارحداکثر و شتاب فشار حداکثر تأثیر معنی داری برتأخیر اشتعال ندارند. پارامترهای درجه حرارت، سرعت موتور، حداکثر گرمای آزاد شده اثر کاملاً محسوسی بر تأخیر اشتعال دارند. براساس روشهای محاسبات رگرسیونی مدل‌های قبل (۱۴ تا ۱۶) بین این پارامترها و تأخیر اشتعال به دست آمده است. همچنین با تجزیه و تحلیل چند متغیره مدل‌های روابط ۱۸ و ۱۹ برای تأخیر اشتعال دینامیکی و استاتیکی به دست آمد. بهترین مدل $SIS(ms)$ با ضریب همبستگی 0.90 و حداکثر خطای $ms \ 1/32$ می‌باشد. آزمونهای کفایت مدل نشان می‌دهد که مدل به دست آمده کاملاً خطی بوده و تک تک پارامترها نقش مؤثری در مدل دارند. این مدل کاملاً جدید بوده و مدل‌های ارائه شده بوسیله محققان قبلی برای پیشگویی

حرارت در جدول ۳ نشان داده شده است. ضریب همبستگی $r = 0.87$ و $p\text{-value} = 0.0000$ مدل و ضریب $2/107$ برای مدل مورد نظر بدست آمد. بنابراین رابطه (۱۸) برای تأخیر اشتعال دینامیکی به دست آمده است.

جدول ۲. بالاترین ضرایب همبستگی پارامترهای کاری موتور با

تأخیر اشتعال		پارامتر
r		
SIS (ms)	SID (ms)	N Qmax T
0.78	0.46	
0.70	0.73	
0.50	0.75	

جدول ۳. ضرایب رگرسیون برای تأخیر اشتعال دینامیکی

متغیرها	ضرایب ثابت	p-value
N	29.048	0.0000
Qmax	0.04	0.0000
T	0.005	0.0003
b	49.98	0.0000

$$SID (ms) = 49.99 + 29.05 Qmax (kJ/ca) - 0.04 T(K) - 0.005 N(rpm) \quad (18)$$

با قرار دادن داده‌های آزمایشگاهی در مدل (۱۸) اختلاف بین تأخیر اشتعال دینامیکی اندازه‌گیری شده و مدل دارای خطای 0.2 تا $4/23 \text{ ca}$ می‌باشد.

۲-۲-۳. مدل تأخیر اشتعال استاتیکی

با بررسی رگرسیون چند متغیره بین تأخیر اشتعال استاتیکی و متغیرهای نرخ حداکثر گرمای آزاد شده، دما و دور موتور ضرایب همبستگی $r = 0.90$ با $p\text{-value} = 0.0000$ و $DW = 2/38$ بدست آمد و نتایج آن در جدول ۴ نشان داده شده است. و مدل رابطه (۱۹) برای تأخیر اشتعال دینامیکی حاصل گردید.

جدول ۴. ضرایب رگرسیون برای تأخیر اشتعال استاتیکی

متغیرها	ضرایب ثابت	p-value
N(rpm)	-0.024	0.0000
Qmax (kJ/ca)	5.53	0.0000
T(K)	-0.024	0.0028
b	6.74	0.0000

$$SIS (ms) = 6.74 - 0.0024 N(rpm) + 0.0024 T(K) + 5.53 Qmax (kJ/ca) \quad (19)$$

با قراردادن داده‌های اندازه‌گیری شده در مدل تأخیر اشتعال استاتیکی حداکثر خطای به دست آمده $1/32$ و حداقل صفر ms به دست آمد. با توجه به ضرایب همبستگی به دست آمده برای تأخیر

[2] Lee, C S., Choi, N. J., "A study on the variations of combustion characteristics in diesel engine". SAE Paper 911245, 1991.

[3] Shundoh, S., Kakegawa, T., Tsujimura, K., "The effect of injection parameters and swirl on diesel combustion with high pressure fuel injection". SAE Paper 910489, 1991.

[4] Reddy, P. R., Krisna, D. M., Mallan, G. K. R., "Evaluation of combustion parameters in direct injection diesel engine-an easy and reliable method". SAE Paper 930605, 1993.

[5] Bassoli, C., Cornetti, G. M., Levizzari, G., "Combustion noise and ignition delay in diesel engines". SAE Paper 770012, 1977.

[6] Gray, P., "Diesel combustion processes and emissions". Roorkee paper 247667, 1989.

[7] Jing, S. G., Wei, F. U. A., "Study on the effect of more volatile fuel on evaporation and ignition for emulsified oil". Fuel, 2001, pp. 80:437-445.

[8] Miwa, K. H., and Kegami, X., "Ignition delay meter for diesel engine". JSME, Vol. 7(1), 1986, pp. 26-32.

[9] Walki M., "Fuel evaporation and ignition lag in diesel combustion". SAE Progress in Technology, Vol. 11, 1967, pp. 110-117.

[10] Andree, A., Pachenege, S. J., "Ignition conditions in diesel engines". 1969, SAE Paper 690253.

[11] Ghobadian, B., A "parametric study on diesel engine noise". Ph.D. Thesis, Roorkee University, INDIA, 1994.

[12] Tizared, H. T., Pye, D. R., "Experiments on the ignition of gases by sudden compression". Philosophical Magazine, 1992, Vol. 44: pp. 79-121.

[13] Taylor, F., "The internal combustion engine in theory and practice". New York, Mit Press, USA, 1982.

[14] Borlase, G. D., Brooz, J. J., "Ignition quality of diesel fuels as expressed in cetane numbers". SEA Journal, Vol. 31, 1932, pp. 283-289.

[15] Schmidt, F. A. F., "Theoretical and experimental study of ignition lag and engine knock". NASA report, 1939, pp. 891.

[16] Henein, N. A., Bolt, J. A., "Ignition delay in diesel engines". SAE paper 670007, 1967.

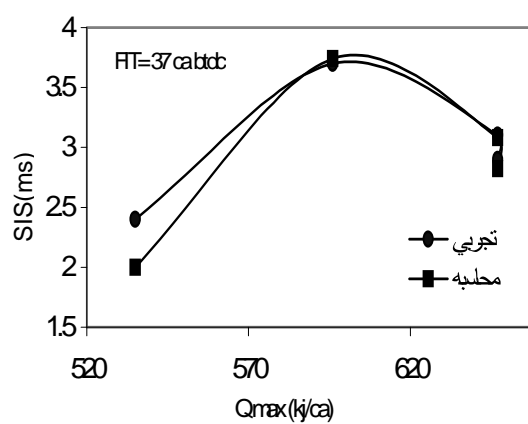
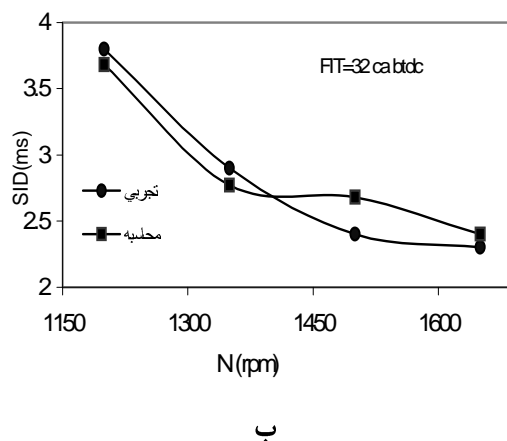
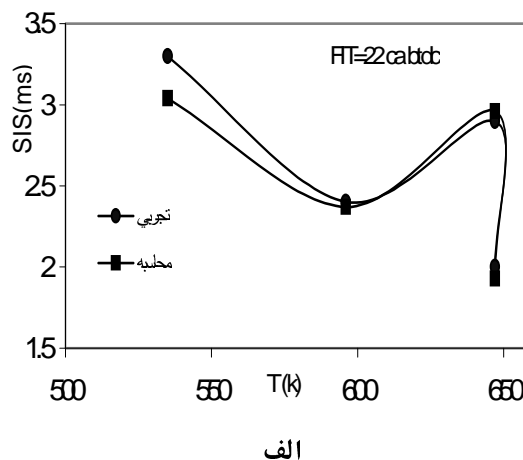
[17] Heywood, J. B., "Internal Combustion Engine Fundamental". New York, McGraw-Hill, USA, 1989.

[18] Patterson, D. J., Henein, N. A., "Emissions from combustion engines and their control". Ann Arbor Science Publishers Inc, USA, 1972.

[19] Henein, N. A., "Analysis of pollutant formation and control and fuel economy in diesel engines". Gas Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 2/4(1-4), 1979, pp. 283-325.

[20] Shundoh, S., Kakegawa, T., Tsujimura, K., "The effect of injection parameters and swirl on diesel combustion with high pressure fuel injection". SAE Paper 910489, 1991.

تأخیر اشتعال در موتورهای دیزلی کوچک با سوخت پاشش مستقیم کافی به نظر نمی‌رسد.



شکل ۲. مقایسه رابطه بین پارامترهای کاری موتور و تاخیر اشتعال با استفاده از داده‌های تجربی و مدل‌های تخمینی

مراجع

[1] Pedersen, P. S., Qwale, B., "A model for the physical part of the ignition delay in a diesel engine". SAE Paper 740716, 1974.

ID_{CF} تأخیر اشتعال شعله سرد
 ID_{ch} تأخیر اشتعال شیمیایی
 SID تأخیر اشتعال دینامیکی
 ID_{EF} تأخیر اشتعال شعله آبی
 ID_{π} تأخیر اشتعال نور افشانی
 ID_p تأخیر اشتعال افزایش فشار
 ID_{ph} تأخیر اشتعال فیزیکی
 SC شروع احتراق
 SIS تأخیر اشتعال استاتیکی
 N دور موتور
 P فشار تراکم
 Q_{max} نرخ حد اکثر گرمای آزاد شده
 R ثابت عمومی گازها
 r ضریب همبستگی
 Sp سرعت متوسط پیستون
 T دمای داخلی سیلندر
 t_{inj} زمان پاشش سوخت

[21] Das, M. N. and Giri, N. C., "Design and Analysis of Experiments". New Delhi, Wiley Eastern, 2nd, INDIA, 1986.

[22] Douglas, C., "Introduction to Linear Regression Analysis". New York, McGraw-Hill, USA, 1992.

فهرست علائم

A ضریب ثابت سوخت
 a' : ضریب ثابت نسبت سوخت و هوا
 B ضریب کاهش تاخیر اشتعال
 b عرض از مبدا
 ca °درجه میل نگ
 CA_{btcd} °درجه میل نگ قبل از نقطه مرگ بالا
 CN عدد ستان سوخت
 DW ضریب دوربین واتسون
 EA انرژی خود اشتعالی سوخت
 F, k, n ضرایب ثابت
 ID_{BF} تأخیر اشتعال شعله آبی