

بررسی تجربی و شبیه‌سازی ریاضی فرآیند احتراق سوخت بیودیزل حاصل از روغن پسماند

بهمن نجفی*
استادیار دانشگاه محقق اردبیلی
Najafib@uma.ac.ir

* نویسنده مسئول/تاریخ دریافت: ۸۸/۶/۸ پذیرش نهایی مقاله: ۸۸/۱۲/۱

چکیده

بیودیزل به عنوان سوخت جایگزین گازوئیل به آسانی قابل استفاده در موتور دیزل است و دوست‌دار محیط زیست می‌باشد. در این تحقیق برای پیشگویی فرآیند احتراق مخلوط سوخت بیودیزل حاصل از روغن پسماند با گازوئیل در یک موتور دیزل دور پایین (لیستر ۱/MA)، از یک الگوی تک‌منطقه‌ای و ایتیهوس-وی^۱ استفاده گردید. آزمایش‌های تجربی نیز برای مقایسه مقادیر پیشگویی شده، بر اساس تست کوتاه مدت موتور انجام پذیرفت. نتایج آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی ریاضی نشان داد که مقادیر پیشگویی شده فشار داخل استوانه^۲ و آهنگ گرمای رها شده با مقادیر تجربی توافق خوبی دارند. همچنین، نتایج تجربی حاکی از این واقعیت است که با افزودن ۲۰٪ بیودیزل به گازوئیل، مشخصه‌هایی نظیر فشار بیشینه داخل محفظه احتراق، دمای خروجی آگزوز، مهلت اشتعال، بازده حرارتی اندیکاتوری و ترمزی برای کارایی مناسب موتور افزایش پیدا می‌کند و بدلیل بهبود کیفیت احتراق، انتشار آلاینده‌های مونوکسید و هیدروکربن نسوخته کاهش می‌یابد، ولی مقدار آلاینده NO_x اندکی افزایش می‌یابد. مصرف سوخت ویژه ترمزی در این مخلوط تقریباً برابر سوخت گازوئیل می‌باشد که به لحاظ اقتصادی بسیار مهم است.

کلیدواژه‌ها: مخلوط بیودیزل، آزمایش تجربی، شبیه‌سازی فرآیند احتراق، عوامل عملکرد و انتشار آلاینده‌ها

۱- مقدمه

بیودیزل، استرهای منوالکیل اسیدهای چرب با زنجیر طویل است که از منابع طبیعی تجدیدپذیر مانند روغن‌های گیاهی یا چربی‌های حیوانی تهیه می‌شود و دارای فرمول شیمیایی کلی $3C_{19}H_{35}COOCH_3$ می‌باشد. به منظور استفاده از این سوخت در موتورهای احتراق داخلی، لازم است تا

ساختار ملکولی روغن به اجزاء ساده‌تری شکسته شود و متعادل گردد[۱]. مهمترین تفاوت اساسی بیودیزل و گازوئیل، محتوای اکسیژن آن می‌باشد. میزان اکسیژن موجود در گازوئیل صفر است در حالی که بیودیزل حاوی ۱۰٪ تا ۱۲٪ جرمی اکسیژن می‌باشد که باعث کاهش ارزش حرارتی و کاهش انتشار ذرات معلق می‌گردد و سوختی پاک به حساب می‌آید. سوخت بیودیزل چگالی، گرانشی، نقطه اشتعال و عددستان

۱- Whitehouse-Way
۲- Cylinder

۲-۲- آزمایش تجربی

در این تحقیق برای تأیید و به‌سازی الگوی ارائه شده، آزمایش‌های تجربی مطابق با فرضیه‌ها الگو انجام پذیرفت. نسبت‌های مختلفی از بیودیزل با گازوئیل به‌صورت حجمی مخلوط شدند. این مخلوط‌های سوخت، حاوی ۱۰٪، ۲۰٪، ۳۰٪ و ۴۰٪ بیودیزل بر مبنای حجمی است و به ترتیب با علامت‌های B۱۰، B۲۰، B۳۰، B۴۰ نشان داده شده است. همچنین، از گازوئیل خالص B۰ و بیودیزل خالص B۱۰۰ به عنوان سوخت شاهد، استفاده گردید. هر یک از مخلوط‌های سوخت بیودیزل و گازوئیل بطور مجزا در بار ۸۲/۹٪، بار نهایی دینامومتر (بار قابل تنظیم و کاری موتور قبل از رسیدن به حد بر روی یک موتور تک استوانه لیستر (Lester)، پاشش غیر مستقیم (IDI) از نوع M۸/۱ با حداکثر توان ۸ اسب بخار در سرعت ۸۵۰ دور بر دقیقه، مورد آزمایش قرار گرفتند. آزمایش‌ها بر اساس آزمایش کوتاه مدت موتور، به صورت طرح تصادفی با ۳ بار تکرار انجام گرفت.

۲-۳- شبیه‌سازی ریاضی

۲-۳-۱ الگوی احتراق

برای مطالعه فرآیند پیچیده احتراق در موتورهای دیزل، استفاده از الگوی تک منطقه‌ای احتراق به علت نیاز به زمان کامپیوتری خیلی کم، بسیار مناسب می‌باشد. در این تحقیق برای احتراق مخلوط بیودیزل و گازوئیل، از واکنش عمومی احتراق و از الگوی وایت‌هوس-وی^۲ استفاده گردید [۶]. این الگو، معادله‌ای نیمه‌تجربی برای محاسبه سرعت احتراق ارائه می‌دهد. در این روش، فرض می‌شود که:

هر قطره سوختی که جرم مخصوص آن ثابت است، سطح مقطع متناسب با مجذور قطر d^2 و $A \propto d^2$ و جرم m متناسب با مکعب قطر d^3 $m \propto d^3$ دارد بنابراین، می‌توان به این نتیجه رسید که در قطره‌ای مجزا، سطح مقطع متناسب با $m^{2/3}$ است. بدین ترتیب در مورد n قطره‌ای که افشانه سوخت را تشکیل می‌دهند، با فرض اینکه تمامی قطرات اندازه مساوی دارند، سطح مقطع کلی A_i دارای تناسب $A_i \propto n.m^{2/3}$ می‌باشند.

از طرفی رابطه بین جرم قطره‌ای سوختی m و جرم کلی سوخت آماده نشده m_{ii} ، را می‌توان به شکل $m = M_{ii}/n$ نوشت. همچنین، جرم سوخت پاشیده شده M_i تا زمان مورد نظر، به تعداد قطرات پاشیده شده n و قطر اولیه آنها D_0 بستگی دارد (یعنی: $M_i \propto n.D_0^3$). بنابراین، سطح مقطع کل قطرات سوخت A_i متناسب است با سرعت اختلاط سوخت و هوا) بستگی به کل سطح مقطع قطراتی دارد که افشانه سوخت را تشکیل می‌دهند:

Whitehouse-Way - ۲

بزرگتری نسبت به گازوئیل داراست ولی ارزش حرارتی کمتری دارد [۲]. ساز و کار احتراق سوخت بیودیزل به دلیل وجود اکسیژن در ساختار اتمی آن متفاوت با گازوئیل است، طی تحقیقی در سال ۲۰۰۰ میلادی فیشر^۱ و گروه کاریش، خصوصیات ترمودینامیکی و سینتیک شیمیایی احتراق متیل‌بوتانوات را با استفاده از اطلاعات تجربی مورد مطالعه قرار دادند [۳]. در سال‌های اخیر، تحقیقات چشمگیری به منظور تولید و استفاده از سوخت بیودیزل در ایران انجام گرفته است [۴]. ولی در مورد شبیه‌سازی فرآیند احتراق سوخت بیودیزل، کاری انجام نشده یا هنوز وارد ادبیات فن نشده است.

۲- مواد و روشها

۲-۱- سوخت بیودیزل

سوخت بیودیزل استفاده شده، متیل‌استر حاصل از روغن پسماند رستوران دانشگاه محقق اردبیلی می‌باشد. برای هر نمونه از مخلوط سوخت، خواص فیزیکی و احتراقی شامل چگالی، گرانیوی، نقطه اشتعال، نقطه ریزش و ارزش حرارتی مطابق با استاندارد ASTM اندازه‌گیری شد و عدد ستان به روش خفانش هوای ورودی و با استفاده از موتور CFR ستان‌سنج موجود در آزمایشگاه ماشین‌های حرارتی گروه مکانیک دانشگاه تبریز، مطابق استاندارد ASTM-D۶۱۳ اندازه‌گیری شد. مقدار عناصر موجود در سوخت نیز با استفاده از دستگاه GC MSS بدست آمد [۵] و [۴].

جدول ۱ خواص سوخت بیودیزل استفاده شده در این تحقیق

خصوصیت	واحد	استاندارد ASTM	محدوده استاندارد		گازوئیل	بیودیزل
			کمینه	بیشینه		
چگالی	g/cm ^۳	D۴۰۵۲	۰/۹	۰/۸۶	۰/۸۳۹	۰/۸۸۵۳
لزجت جنبشی در ۴۰ °C	Mm ^۲ /s	D۴۴۵	۳/۵	۵	۳/۰۹	۴/۳۹۱
ارزش حرارتی کم	MJ/Kg	D۲۴۰	-	-	۴۲/۵۷	۴۱/۹۷
عدد ستان	-	D۶۱۳	۵۱	-	۵۷/۳۳	۶۲/۱
نقطه اشتعال	°C	D۹۲	۱۲۰	-	۱۱۰	۱۳۹
نقطه ابری شدن	°C	D۲۵۰۰	-۷	-	-۷	-۵

Fisher - ۱

۲-۳-۲ معادله انرژی و قانون اول ترمودینامیک

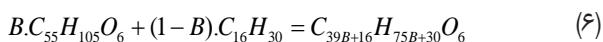
با توجه به اینکه موتور لیستر از نوع پاشش غیر مستقیم (IDI) است، برای ساده‌سازی الگو، حجم، فشار و بار داخل محفظه احتراق اصلی و محفظه پیش احتراقی به صورت یکپارچه و همگن فرض می‌شود. بنابراین قانون اول گرماپویایی بشکل معادله (۵) تبدیل می‌شود:

$$dE + dW + dQ - dm \cdot q_{vs} = 0 \quad (5)$$

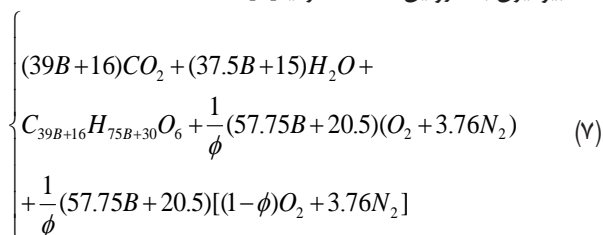
که: q_{vs} ارزش حرارتی کم سوخت بر حسب واحد جرم، dQ انتقال انرژی حرارتی از حجم کنترل، dE تغییر انرژی داخلی به واسطه تغییرات دمایی و واکنش‌های شیمیایی درون مخلوط و dW کار انجام شده با بار استوانه می‌باشد. در چرخه کاری موتور، هر کدام از آیت‌های قانون اول قابل محاسبه می‌باشند.

۲-۳-۳ احتراق مخلوط سوخت بیودیزل و گازوئیل

برای ساده‌سازی بیشتر فرض شد که B مقدار مول بیودیزل موجود در مخلوط سوخت است. در نتیجه مقدار مول گازوئیل نیز برابر $(1-B)$ می‌باشد. لذا فرمول شیمیایی مخلوط سوخت را می‌توان به صورت معادله (۶) نمایش داد:



در این تحقیق از یک واکنش احتراق عمومی برای احتراق مخلوط سوخت بیودیزل با گازوئیل استفاده گردید [۷]:



حال، اگر در طی گام زمانی dt مقدار dm_{FB} مول سوخت مخلوط محترق شود، $B \times dm_{FB}$ مول مربوط به سوخت بیودیزل و $(1-B) \times dm_{FB}$ مول آن سهم گازوئیل می‌باشد. در این صورت از تعداد مول‌های اکسیژن به اندازه $(57.75B+20.5) \times dm_{FB}$ کم شده و تعداد مول‌های CO_2 و H_2O تولیدشده نیز به ترتیب به میزان $(39B+16) \times dm_{FB}$ و $(37.5B+15) \times dm_{FB}$ افزایش می‌یابد. فرض می‌شود که N_2 در واکنش احتراق سوخت شرکت نکرده و تعداد مول‌های آن همواره ثابت است ولی وجود آن بر دما و فشار محفظه احتراق تأثیرگذار هست. موتورهای احتراق تراکمی عموماً با

$$A_i \propto n \cdot \left(\frac{M_u}{n}\right)^{\frac{2}{3}} \propto n^{\frac{1}{3}} \cdot M_u^{\frac{2}{3}} \quad (1)$$

و در نتیجه:

$$A_i \propto M_i^{\frac{1}{3}} \cdot M_u^{\frac{2}{3}} \quad (2)$$

بر این اساس، آهنگ آماده‌سازی سوخت متناسب با $M_i^{\frac{1}{3}} \cdot M_u^{\frac{2}{3}}$ می‌گردد که در این معادله M_i جرم کلی سوخت پاشیده شده تا زمان محاسبه برحسب کیلوگرم، و M_u جرم قسمتی از سوخت برحسب کیلوگرم که فعلاً برای آماده‌سازی در دسترس است، می‌باشد. در این الگو با فرض اینکه آهنگ آماده‌سازی سوخت رابطه مستقیم با مقدار اکسیژن قابل دسترس دارد، در نتیجه آهنگ آماده‌سازی سوخت FPR به صورت معادله (۳) بیان می‌شود:

$$FPR = k \cdot M_i^{\frac{1}{3}} \cdot M_u^{\frac{2}{3}} \cdot P_{O_2}^m \quad (3)$$

که: FPR آهنگ آماده‌سازی سوخت برحسب کیلوگرم بر درجه، M_i جرم سوخت پاشیده شده به داخل استوانه برحسب کیلوگرم، M_u جرم سوخت آماده نشده تا زمان محاسبه برحسب کیلوگرم که برابر است با اختلاف سوخت پاشیده شده و آماده شده یعنی: $P_{O_2}, M_i - \int FPR \cdot d\alpha$ ، فشار جزئی اکسیژن برحسب بار، k و m ضرایب ثابتی هستند که با تحلیل نمودارهای تجربی فشار بدست می‌آیند.

برای محاسبه آهنگ واکنش شیمیایی^۲ با در نظر گرفتن تأثیر مثبت مهلت اشتعال (زمان تاخیر در اشتعال) از معادله مشابه با فرمول آرنیوس استفاده می‌شود، با فرض اینکه آهنگ واکنش با سرعت مولکول‌های گاز در داخل محفظه احتراق، دانسیته اکسیژن موجود و جرم سوخت نسوخته متناسب است. همچنین با فرض اینکه سرعت مولکول‌های گاز متناسب با مجذور دما است و چگالی اکسیژن نیز رابطه مستقیم با فشار جزئی آن و رابطه عکس با دما دارد:

$$FRR = k' \frac{P_{O_2}}{N_{RPM} \cdot \sqrt{T}} \cdot \text{Exp}\left(\frac{-E_{act}}{T}\right) \cdot \int (FPR - FRR) d\alpha \quad (4)$$

در این معادله: FPR و FRR آهنگ واکنش شیمیایی و آهنگ آماده‌شدن سوخت بر حسب کیلوگرم بر ثانیه می‌باشند. N_{RPM} دور موتور برحسب دور بر دقیقه، T درجه حرارت برحسب کلون، E_{act} و k' مقادیر ثابتی هستند که از روی تحلیل نمودارهای اندیکاتور موتور تعیین می‌شوند [۷].

۱ - Fuel Preparation Rate

۲ - Fuel Reaction Rate

$$\begin{cases} U(T)_j = R.(U_{j,1}T + \frac{U_{j,2}}{2}T^2 + \frac{U_{j,3}}{3}T^3 \\ + \frac{U_{j,4}}{4}T^4 + \frac{U_{j,5}}{5}T^5 - T \end{cases} \quad (17)$$

که زیرنویس j نشان دهنده گونه‌های N_2 و CO_2 ، O_2 ، H_2O می‌باشند.

۲-۳-۵ محاسبه مقدار کار

مقدار کار انجام شده dW در هر گام از معادله (۱۸) محاسبه می‌شود:

$$dW = \left(\frac{P_2 + P_1}{2}\right).(V_2 - V_1) \quad (18)$$

که در این معادله: P_1 و V_1 به ترتیب فشار و حجم در شروع گام θ_1 و P_2 و V_2 فشار و حجم در خاتمه گام θ_2 می‌باشد.

۲-۳-۶ محاسبه هندسی (حجم و مساحت جانبی استوانه)

در شروع محاسبات باید فشار و دمای به تله افتاده و ترکیب محتویات استوانه معلوم باشد. محاسبات به صورت گام به گام است و بر اساس تغییرات درجه میل لنگ θ صورت می‌گیرد. میزان گام θ_1 بسته به دقت مورد نظر می‌تواند یک درجه یا بیشتر باشد. برای محاسبه حجم استوانه در هر گام با توجه به مشخصات هندسی آن (شکل ۱)، از معادله (۱۹) استفاده می‌شود:

$$\begin{cases} V(\theta) = V_C + \frac{\pi D^2}{4} \\ \left(L + R.(1 - \cos(\theta)) - \sqrt{L^2 - R^2} \cdot \sin^2(\theta) \right) \end{cases} \quad (19)$$

در معادله فوق $V(\theta)$ حجم استوانه، D قطر استوانه، S طول مسیر سمبه، θ درجه میل لنگ، L طول دسته سمبه و $R=s/2$ شعاع لنگ می‌باشد. V_c حجم فضای مرده نیز از روی حجم جابه‌جا شده با سمبه $V_d = (\pi/4)D^2.S$ و نسبت تراکم CR ، از معادله $V_C = V_d / (CR - 1)$ محاسبه می‌شود [۶].

نسبت‌های هم‌ارزی کم $\phi < 1$ ، مخلوط‌های فقیر کار می‌کنند و همواره مقداری از اکسیژن به اندازه $(1/\phi - 1) \times dM_{FB}$ (57.75B + 20.5) مول در واکنش شرکت نمی‌کند و در محصولات احتراق باقی می‌ماند. بنابراین تعداد کل مول‌های حاصل از احتراق مخلوط سوخت بیودیزل و گازوئیل در زمان t_1 (ابتدای گام زمانی) برابر است با:

$$b_{CO_2} + b_{H_2O} + b_{O_2} + b_{N_2} + b_{FB} \quad (8)$$

همچنین تعداد مول‌های بار استوانه در انتهای گام زمانی $t_2 = t_1 + \Delta t$ برابر است با:

$$a_{CO_2} + a_{H_2O} + a_{O_2} + a_{N_2} + a_{FB} \quad (9)$$

زیرنویس FB به معنی مخلوط سوخت بیودیزل و گازوئیل است. بدین ترتیب رابطه بین تعداد مول‌های ترکیبات در قبل و بعد از این گام زمانی، برابر خواهد بود با:

$$a_{CO_2} + a_{H_2O} + a_{O_2} + a_{N_2} + a_{FB} \quad (10)$$

$$a_{CO_2} = b_{CO_2} + (39B + 16) \times dM_{FB} \quad (11)$$

$$a_{H_2O} = b_{H_2O} + (37.5B + 15) \times dM_{FB} \quad (12)$$

$$a_{O_2} = b_{O_2} - (57.75B + 20.5) \times dM_{FB} \quad (13)$$

$$a_{N_2} = b_{N_2} \quad (14)$$

۲-۳-۴ محاسبه نرخ تغییر انرژی داخلی

انرژی داخلی مطلق بار استوانه در ابتدای گام E_1 به صورت معادله $E_1 = E(T_1) - E(T_s)$ بیان می‌شود که $E(T_s)$ انرژی داخلی بار استوانه در دمای مبنای T_s می‌باشد و در نتیجه اختلاف انرژی داخلی مطلق دو گام متوالی برابر $dE = E(T_2) - E(T_1)$ بدست می‌آید:

$$\begin{cases} E(T_s) = b_{CO_2} \cdot U(T_s)_{CO_2} + b_{H_2O} \cdot U(T_s)_{H_2O} \\ + b_{O_2} \cdot U(T_s)_{O_2} + b_{N_2} \cdot U(T_s)_{N_2} \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} E(T_1) = b_{CO_2} \cdot U(T_1)_{CO_2} + b_{H_2O} \cdot U(T_1)_{H_2O} \\ + b_{O_2} \cdot U(T_1)_{O_2} + b_{N_2} \cdot U(T_1)_{N_2} \end{cases} \quad (16)$$

و در نهایت انرژی داخلی گونه‌ها از معادله (۱۷) محاسبه می‌گردند:

در این معادله T_g دمای متوسط گازهای داخل محفظه احتراق در دو گام زمانی و برابر $T_g = (T_1 + T_2)/2$ و T_w دمای دیواره محفظه احتراق است که فرض می‌شود در حالت کاری ثابت موتور، مقدار ثابت دارد.

سطح تبادل حرارتی As ، بین گازهای داخل محفظه احتراق و دیوارها، تابعی از موقعیت سمبه است و در نتیجه به صورت تابعی از زاویه میل لنگ محاسبه می‌شود:

$$As(\theta) = A_w + A_h + A_p = \left\{ \begin{aligned} &= \frac{V_c}{(D/4)} + \pi.D.(L + a.(1 - \cos(\theta)) \\ & - \sqrt{L^2 - a^2}.\sin^2(\theta) \end{aligned} \right. + 2\frac{\pi.D^2}{4} \quad (22)$$

که A_w مساحت دیواره استوانه، A_h مساحت سر استوانه و A_p مساحت سمبه می‌باشد. عدد رینولدز نیز از معادله $Re = \rho.\bar{V}_p.D / \mu$ محاسبه می‌شود که: $\rho = P / R_a.T$ چگالی کل گازهای داخل محفظه احتراق، R_a ضریب ثابت گاز هوا، $\bar{V}_p = 2.N_{RPS}.S$ سرعت متوسط سمبه، N_{RPS} دور موتور در ثانیه و μ گرانیوی دینامیک کل گازهای داخل محفظه احتراق است که تابعی از دمای متوسط گازهای داخل محفظه احتراق به صورت $\mu = 4.73 \times 10^{-7} T_g^{0.625}$ می‌باشد.

همچنین K_g ضریب هدایت حرارتی گازهای داخل استوانه می‌باشد که با فرض عدد پرانتل 0.7 برای مخلوط داخل استوانه، از معادله $K_g = C_p.\mu/0.7$ به دست می‌آید. ظرفیت گرمایی گازهای داخل محفظه احتراق می‌باشد. مقادیر a ، b و c ثابت‌های تجربی هستند و برای موتور چهار زمانه در محدوده $a = 0.26$ ، $b = 2.75 + 0.25$ و $c = (3.88 \pm 1.39) \times 10^{-8}$ قرار دارند.

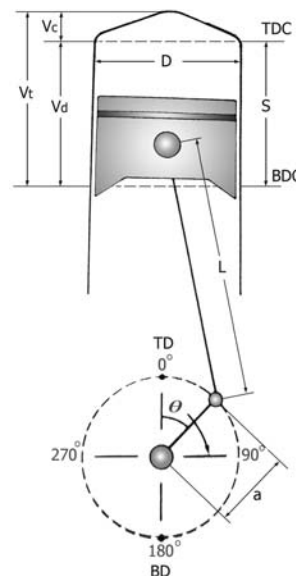
در نهایت برای محاسبه نرخ انتقال حرارت بر اساس تغییرات زاویه میل لنگ، معادله (21) در عبارت $dQ = (dQ/dt) \times (d\theta/360N_{RPS})$ ضرب می‌شود تا نرخ انتقال حرارت در هر گام زاویه‌ای محاسبه شود.

۸-۳-۲ محاسبه نرخ جرمی سوخت مخلوط پاشیده شده

برای محاسبه نرخ جرمی مخلوط سوخت بیودیزل و گازوئیل در طی هر گام باید سرعت پاشش سوخت \bar{V}_0 معلوم باشد:

$$\bar{V}_0 = Cd \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{(P_{inj} - P)}{\rho_F}} \quad (23)$$

که P و P_{inj} به ترتیب فشار متوسط داخل استوانه و فشار پاشش



شکل ۱ هندسه استوانه، سمبه، دسته سمبه و میل لنگ

۷-۳-۲ محاسبه انتقال حرارت

برای محاسبه انتقال حرارت بین گازهای داخل محفظه احتراق و دیواره‌ها از الگوی آناند استفاده شد. در این الگوی انتقال حرارت، تنها در دیواره داخلی محفظه احتراق و به صورت جابجایی و تشعشعی فرض می‌شود (انتقال حرارت به صورت تشعشع، ۱۰٪ از کل انتقال حرارت را شامل می‌شود) [۸]:

$$\frac{dQ}{dt} = As \cdot \left(\frac{a.K_g}{D} Re^b . (T_g - T_w) + c(T_g^4 - T_w^4) \right) \quad (20)$$

که: σ ثابت استفان-بولتزمن و ϵ ضریب صدور گازهای داخل استوانه و دیواره محفظه احتراق می‌باشد و \bar{h}_g متوسط ضریب انتقال حرارت جابجایی در سمت گازهای مجاور استوانه می‌باشد که به دلیل تغییرات در حرکت گازها، آشفتگی جریان، چرخش جریان، سرعت گازها و عوامل دیگر به میزان زیادی در طی چرخه موتور تغییر می‌کند و براساس عدد نوسلت به صورت معادله $\bar{h}_g = Nu(K_g/D)$ تعریف می‌شود که در آن K_g ضریب هدایت حرارتی گازهای داخل و D قطر استوانه می‌باشد. از طرفی عدد نوسلت برای جریان گازهای داخل محفظه احتراق، با استفاده از عدد رینولدز به صورت معادله کلی $Nu = a.Re^b$ بیان می‌شود، در نتیجه نرخ انتقال حرارت به صورت معادله (21) محاسبه می‌گردد:

$$\frac{dQ}{dt} = As \cdot \left(\frac{a.K_g}{D} Re^b . (T_g - T_w) + c(T_g^4 - T_w^4) \right) \quad (21)$$

میلی ثانیه است که برای تبدیل آن بر حسب درجه میل لنگ $\theta_{physical_id}$ می توان آنرا در عبارت $(1000t_{Physical_id}) \cdot (360.N_{RPS})$ ضرب کرد. سپس از مرحله تأخیر فیزیکی، اشتعال با انجام واکنش های شیمیایی که غالباً گرمازا هستند، با سرعت و آهنگ کم شروع می شود و به آهستگی پیش می رود تا زمانی که دمای لایه مخلوط سوخت و هوا که واکنش ها در آنجا اتفاق می افتند، به دمای بحرانی برسد، در این مرحله احتراق به صورت آبی اتفاق می افتد. فاصله زمانی بین رسیدن مخلوط از دمای خود اشتعالی به دمای بحرانی، مهلت اشتعال شیمیایی نامیده می شود که از معادله ای نیمه تجربی قابل محاسبه است [۱۰].

$$\theta_{chemical_id} = C_{chemical_id} \cdot N_{RPS} \cdot P^n \cdot \exp\left(\frac{E_A}{RT}\right) \quad (26)$$

T و P به ترتیب دما و فشار داخل محفظه احتراق می باشند و E_A انرژی فعال سازی سوخت می باشد که تابعی از عدد ستان سوخت به صورت $E_A = a_{EC} - b_{EC} \cdot CN$ می باشد. مقادیر n ، $C_{chemical_id}$ ، a_{E_A} و b_{E_A} ضرایب ثابت هستند که با توجه به داده های تجربی تعیین می گردند. در نتیجه $\theta_{chemical_id}$ مهلت اشتعال شیمیایی بر حسب زاویه میل لنگ بدست می آید.

۲-۳-۱۰ روش حل عددی روابط

برای حل روابط آماده سازی و احتراق مخلوط سوخت بودیزل و گازوئیل از روش عددی گام به گام استفاده می شود، بدین صورت که: برای گام n ام، کل سوخت پاشیده شده تا شروع گام مورد نظر و کل سوخت پاشیده شده تا انتهای این گام به ترتیب برابر است با:

$$(TFMI)_{n-1} = \sum_{k=1}^{n-1} (dFMI)_k \quad (27)$$

$$(TFMI)_n = \sum_{k=1}^n (dFMI)_k \quad (28)$$

به همین ترتیب کل سوخت آماده شده در ابتدا و انتهای گام به ترتیب از روابط (۲۹) و (۳۰) تعیین می شود:

$$(TFP)_{n-1} = \sum_{k=1}^{n-1} (dFPR)_k \quad (29)$$

$$(TFP)_n = \sum_{k=1}^n (dFPR)_k \quad (30)$$

مخلوط سوخت بودیزل و گازوئیل، p_F جرم مخصوص سوخت مخلوط و Cd ضریب تخلیه جریان در گذر از سوراخ انژکتور می باشد. در نتیجه دبی جرمی سوخت مخلوط پاشیده شده از کل سوراخ های انژکتور برابر خواهد بود با:

$$\frac{dm_F}{dt} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot V_0 \cdot \rho_F \cdot HNN \quad (24)$$

که d قطر سوراخ انژکتور و HNN تعداد سوراخ های انژکتور می باشد. با ضرب معادله (۲۱) در عبارت $(d\theta/360N_{RPS}) \times (dm_F/dt)$ مقدار سوخت پاشیده شده در طی یک گام زاویه ای dm_{FB} بدست می آید.

۲-۳-۹ محاسبه مهلت اشتعال

مهلت اشتعال، در موتورهای اشتعال تراکمی، عامل مهم عملکردی می باشد که بر فرآیند احتراق، و در نتیجه بر کارکرد موتور و میزان آلاینده های خروجی از آن، تأثیر گذار است و به صورت فاصله زمانی بین تزریق سوخت به درون استوانه و وقوع اولین افزایش قابل مشاهده فشار درون استوانه به واسطه رهایی انرژی مخلوط تعریف می شود و معمولاً در محدوده ۰/۴ تا ۳ میلی ثانیه می باشد. پس از پاشش سوخت به داخل محفظه احتراق، ابتدا جت مایع به افشانه ای از قطرات ریز با اندازه های مختلف تبدیل می گردد که نتیجه آن، افزایش نسبت سطح به حجم قطرات می باشد. افزایش نسبت سطح قطرات و وجود حرارت هوای داخل محفظه احتراق، موجب گرم شدن و تبخیر سوخت می شود، تا زمانی که مخلوط بخار سوخت و هوا (در لایه بخار سوخت)، در حد نسبت استوکیومتریک برسد. دمای مخلوط برای احتراق و شروع واکنش های شیمیایی باید حداقل برابر با دمای خود اشتعالی سوخت باشد. مدت زمانی که طول می کشد تا سوخت مایع پاشیده شده، اتمیزه شده، تبخیر شده و دمای آن به حد دمای اشتعال برسد، دوره تأخیر فیزیکی نامیده می شود و از معادله (۲۵) تعیین می گردد [۹]:

$$t_{Physical_id} = \frac{\alpha_{id} \cdot d_{droplet} \cdot \rho_F}{C_{Physical_id} \cdot \sqrt{2\rho_{air} \cdot (P_{inj} - P)}} \quad (25)$$

که ρ_F چگالی مخلوط سوخت بودیزل و گازوئیل، ρ_{air} چگالی هوای داخل محفظه، P و P_{inj} به ترتیب فشار متوسط داخل استوانه و فشار پاشش مخلوط سوخت بودیزل و گازوئیل، $d_{droplet}$ قطر قطره سوختی (کوچکتر از ۰/۱ میلی متر)، α_{id} و $C_{physical_id}$ ضرایب ثابت و به ترتیب برابر با ۱۵/۸ و ۰/۸ هستند. $T_{physical_id}$ مهلت اشتعال فیزیکی بر حسب

سوخت آماده شده، بیشتر از مجموع سوخت سوخته شده می‌باشد. بنابراین، در طی این مرحله، جرم سوخت محترق شده تحت نظارت آهنگ واکنش سوخت خواهد بود ولی پس از مدت کوتاهی از شروع احتراق، کل سوخت آماده شده بطور کامل می‌سوزد و در نتیجه احتراق سوخت تحت تأثیر آهنگ آماده سازی خواهد بود. بدین ترتیب هرگاه $(TFR)_n < (TFP)_n$ باشد، سوخت آماده شده کافی است و جرم سوخت سوزانده شده در طی گام برابر خواهد بود با:

$$FMB = dFRR \times \Delta\theta \quad (39)$$

و در صورتی که $(TFR)_n > (TFP)_n$ باشد، سوخت آماده شده کافی در محفظه احتراق موجود نیست و جرم سوخت سوزانده شده تحت تأثیر آهنگ آماده سازی قرار دارد و برابر است با:

$$FMB = dFPR \times \Delta\theta \quad (40)$$

و اگر در طول چرخه کاری موتور، یکبار شرط $(TFR)_n > (TFP)_n$ صادق باشد، از آن پس تمامی احتراق با آهنگ آماده سازی پایش می‌شود [6].

۲-۳-۱۱ شرایط اولیه حل روابط

برای حل روابط کد کامپیوتری در محیط برنامه نویسی ویزوال بیسیک نوشته شد، این برنامه چرخه بسته موتور را از فاصله بسته شدن سوپاپ هوا تا باز شدن سوپاپ دود برای هر درصد مخلوط سوخت بیودیزل، شبیه سازی می‌کند. خواص ترموفیزیکی سوخت بیودیزل نسبت به گازوئیل متفاوت است لذا هر مخلوطی از این دو سوخت دارای مقادیر چگالی، گرانی، ارزش حرارتی و عدد ستان متفاوتی می‌باشد، که در این تحقیق، خواص برحسب مقدار سهم بیودیزل موجود در مخلوط سوخت ($B\%$) بر اساس استاندارد ASTM اندازه گیری و به عنوان شرایط اولیه، وارد کد کامپیوتری شد (جدول ۱). همچنین دما و فشار ورودی در نقطه BDC به ترتیب برابر ۳۱۰ کلوین و ۰/۷۵ بار در نظر گرفته شد. مقدار بار و دور موتور، نیز متناسب با آزمایش‌های تجربی به ترتیب برابر ۸۲/۶٪ بار نهایی دینامومتر (۷۸ نیوتن - متر) و ۷۴۰ دور بر دقیقه به عنوان شرایط اولیه برای هر شش نوع مخلوط سوخت بیودیزل و گازوئیل، وارد کد کامپیوتری گردید [۲]، [۶]، [۱۱] و [۱۲].

کل سوخت محترق شده تا ابتدای این گام نیز برابر است با:

$$(TFR)_n = \sum_{k=1}^n (dFRR)_k \quad (31)$$

جرم سوخت آماده شده در طول این گام از معادله (۳) به دست می‌آید، بنابراین در استفاده از این معادله باید مقادیر متوسط M_i و M_u بکار رود ولی این موضوع مستلزم این است که شرایط انتهایی گام نیز معلوم باشد. حال اگر تغییر این مقادیر در طول گام نسبت به مقادیر مطلق شان کوچک باشد (که اغلب چنین است) می‌توان مقادیر اولیه آنها را بکار برد، اما این کار باعث می‌شود که مقدار آماده سازی در طی گام‌های اولیه کمتر از مقدار حدس زده باشد. ولی می‌توان مقدار نهایی $(TFMI)_n$ را در طول گام بکار برد. پس از معادله (۳) می‌توان از معادله (۳۲) استفاده کرد:

$$M_i = (TFMI)_n \quad (32)$$

$$M_u = (TFMI)_n - (TFP)_{n-1} \quad (33)$$

در نتیجه آهنگ آماده سازی در طول گام عبارتست از:

$$\begin{cases} (dFPR)_n = K_p \cdot (TFMI)_n^2 \\ ((TFMI)_n - (TFP)_{n-1})^{\frac{1}{3}} \cdot P_{O_2}^m \end{cases} \quad (34)$$

و کل سوخت آماده شده تا انتهای گام n ام عبارتست از:

$$(TFP)_n = (TFP)_{n-1} + (dFPR)_n \cdot \Delta\theta \quad (35)$$

برای محاسبه مقدار سوخت محترق شده در طول این گام از معادله (۴) استفاده می‌شود که در آن:

$$\int (FPR - FRR) \cdot d\theta = (TFP)_n - (TFR)_{n-1} \quad (36)$$

بنابراین آهنگ واکنش در طول این گام عبارتست از:

$$\begin{cases} (dFRR)_n = \frac{K_p \cdot P_{O_2}}{N_{RPM} \sqrt{T_{n-1}}} \\ \text{Exp}\left(\frac{E_{act}}{T_{n-1}}\right) \cdot ((TFP)_n - (TFR)_{n-1}) \end{cases} \quad (37)$$

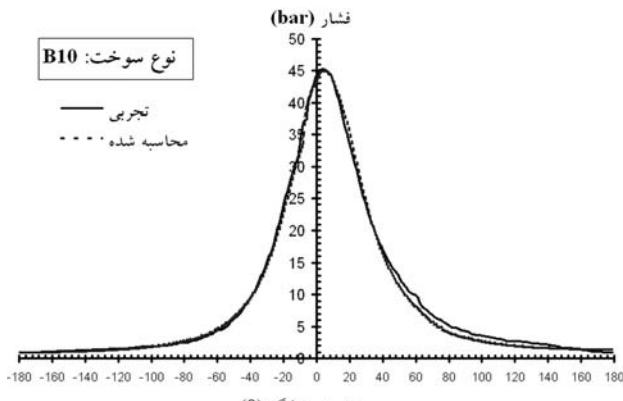
و کل جرم سوزانده شده تا انتهای این گام عبارتست از:

$$(TFR)_n = (TFR)_{n-1} + (dFRR)_n \cdot \Delta\theta \quad (38)$$

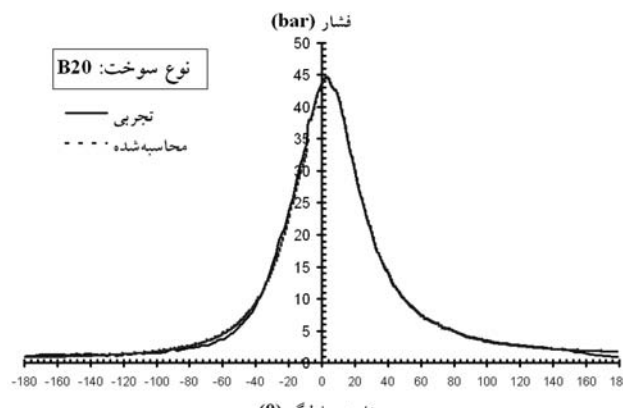
مطابق با الگوی Whitehouse-Way، در ابتدای دوره احتراق مجموع

جدول ۱ خواص ترموفیزیکی مخلوط سوخت بیودیزل و گازوئیل

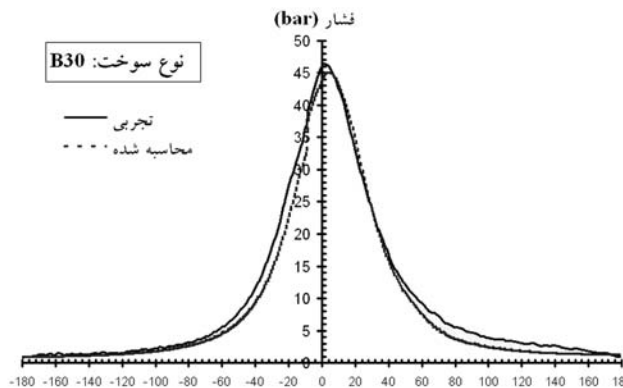
سوخت	چگالی (kg/m ³)	عدد ستان	گرانروی (Nm/s ²)	ارزش حرارتی (kJ/kg)
B۰۰	۰/۸۳۹	۵۷/۵۳	۳/۰۹	۴۲/۵۷
B۱۰	۰/۸۴۳	۵۸/۴۶	۳/۲۸	۴۱/۹۷
B۲۰	۰/۸۴۶	۵۹/۶	۳/۵۲	۴۱/۳۵
B۳۰	۰/۸۴۸	۵۹/۸	۳/۶۱	۴۱/۷۱
B۴۰	۰/۸۵۴	۶۰/۰۷	۳/۷۵	۳۹/۰۶
B۱۰۰	۰/۸۸۵۳	۶۲/۱	۴/۳۹۱	۳۷/۲۵



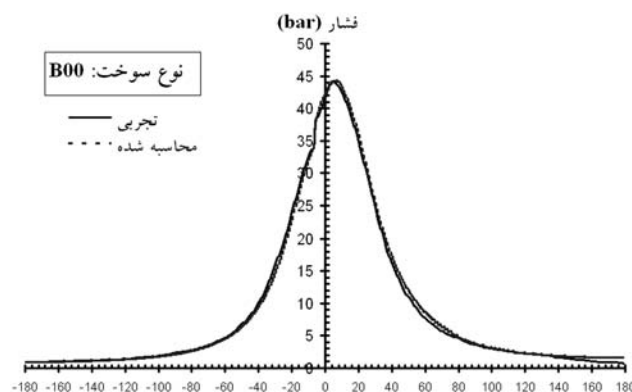
شکل ۳ پیش‌بینی فشار داخل محفظه احتراق، ۱۰٪ بیودیزل



شکل ۴ پیش‌بینی فشار داخل محفظه احتراق، ۲۰٪ بیودیزل



شکل ۵ پیش‌بینی فشار داخل محفظه احتراق، ۳۰٪ بیودیزل



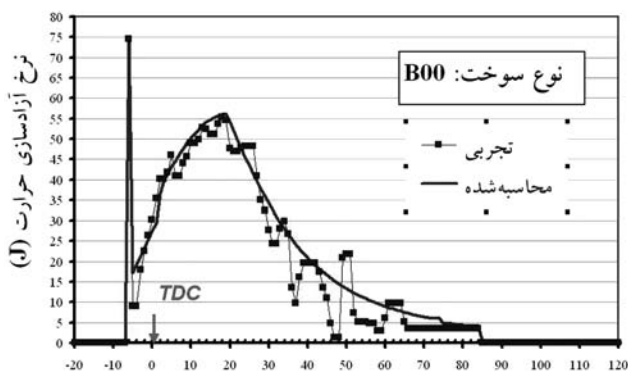
شکل ۲ پیش‌بینی فشار داخل محفظه احتراق، بیودیزل خالص

۳- بحث بر روی نتایج

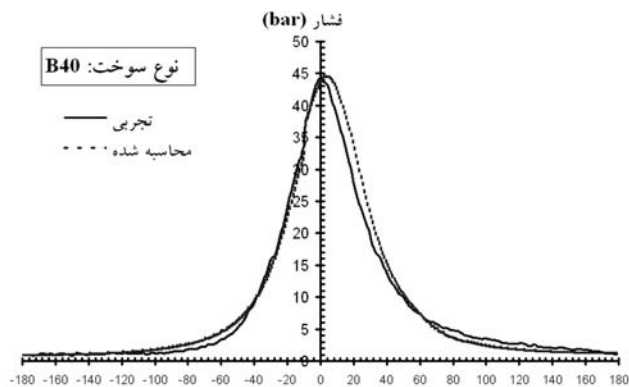
الگوی ارائه شده در این تحقیق، قابلیت پیش‌بینی عوامل عملکرد موتور برای شش نوع مخلوط سوختی مورد آزمایش، دارد.

۳-۱- پیش‌بینی فشار داخل استوانه

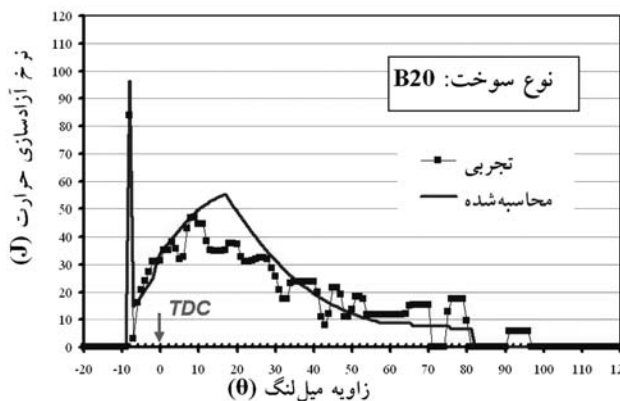
شکل‌های ۲ تا ۷، منحنی‌های $(P-\theta)$ حاصل از الگوی کامپیوتری و نتایج آزمایش‌های تجربی را برای مخلوط‌های مختلف سوخت بیودیزل در بار ۸۲/۶٪ بار نهایی دینامومتر (۷۸ نیوتن-متر) و دور موتور ۷۴۰ دوربردقیقه، نشان می‌دهد. در این منحنی‌ها نقطه پیک فشار برای هر دو حالت پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده، دقیقاً برهم منطبق است. همچنین محل وقوع احتراق پیش‌آمیخته (در انتهای دوره مهلت اشتعال) نیز به خوبی بر هم منطبق می‌باشند.



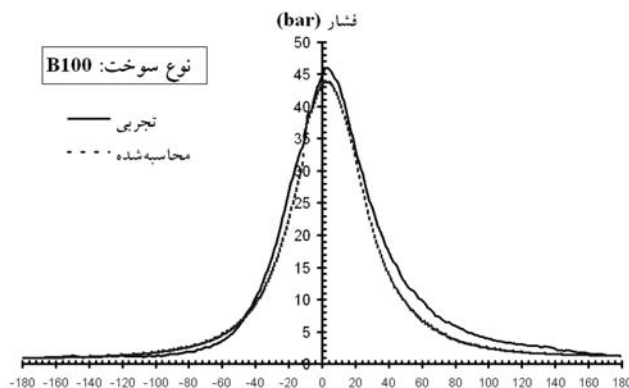
شکل ۸ پیش‌بینی آهنگ رهایی گرما، بیودیزل خالص



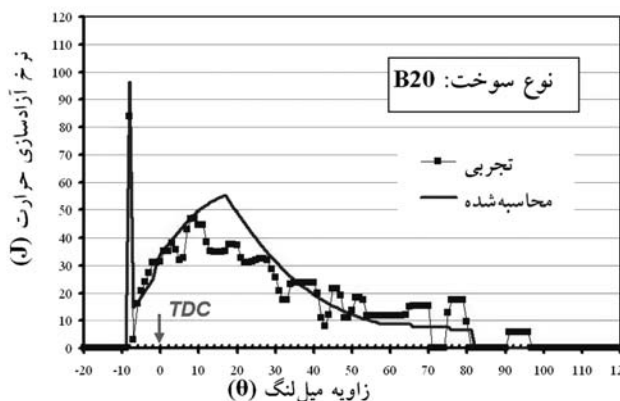
شکل ۶ پیش‌بینی فشار داخل محفظه احتراق، ۴۰٪ بیودیزل



شکل ۹ پیش‌بینی آهنگ رهایی گرما، ۱۰٪ بیودیزل



شکل ۷ پیش‌بینی فشار داخل محفظه احتراق، گازوئیل خالص



شکل ۱۰ پیش‌بینی آهنگ رهایی گرما، ۲۰٪ بیودیزل

در حالت مطلوب باید تمام مقادیر بر روی هم منطبق شوند، ولی به دلیل وجود نوسانات جزئی در مقادیر اندازه‌گیری شده و همچنین قبول فرض‌های ساده‌کننده در محاسبات، این اتفاق نمی‌افتد.

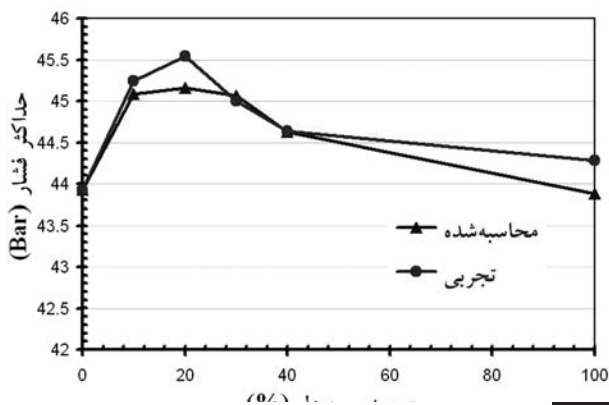
۲-۳- پیش‌بینی آهنگ رهایی گرما

شکل‌های ۸ تا ۱۳، منحنی‌های آهنگ رهایی گرما را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود تطابق خوبی بین مقادیر واقعی و محاسبه شده وجود دارد. این منحنی‌ها دارای دو پیک احتراقی می‌باشد که پیک اول مربوط به احتراق پیش‌آمیخته و پیک دوم مربوط به احتراق نفوذی است. با توجه به این که در الگوی کامپیوتری ارائه شده، از مقادیر واقعی به عنوان شرایط اولیه حل روابط استفاده شده است لذا محل وقوع و مقادیر بیشینه احتراق تقریباً مشابه هم می‌باشند. از طرف دیگر، وجود آشفتگی جریان در داخل استوانه، موجب وقوع تغییرات آماری در اطلاعات تجربی شده است.

حرارتی، چگالی و گرانیوی سوخت و همچنین ساختار مولکولی سوخت و مقدار اکسیژن موجود در آن نیز می‌باشد که هر کدام تأثیر مثبت یا منفی بر کیفیت قطره شدن و کیفیت احتراق سوخت دارند. دما و فشار در ابتدای مرحله تراکم (در نقطه BDC)، مقدار ثابتی می‌باشد و همچنین مطابق با روش انجام آزمایش‌ها، بار لگام ترمز و دور موتور مقادیر ثابتی دارند

۳-۳- پیش‌بینی حداکثر فشار داخل استوانه

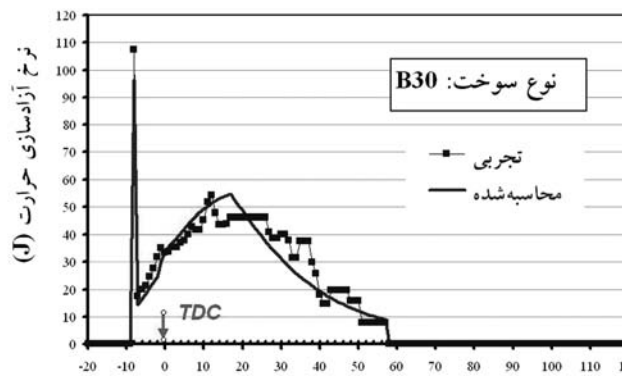
شکل ۱۴ فشار بیشینه داخل استوانه را برای مخلوط‌های مختلف سوخت بیودیزل نشان می‌دهد. همانطور که از نمودار مشخص است، توافق بسیار خوبی بین داده‌های تولیدشده از طریق الگوی کامپیوتری و اطلاعات تجربی وجود دارد که اولاً بیان‌گر صحت پیش‌بینی الگو می‌باشد و در ثانی تأییدی بر این مدعاست که با افزایش سهم بیودیزل در مخلوط سوخت، فشار بیشینه داخل محفظه احتراق ابتدا تا سوخت B۲۰ افزایش و سپس کاهش می‌یابد.



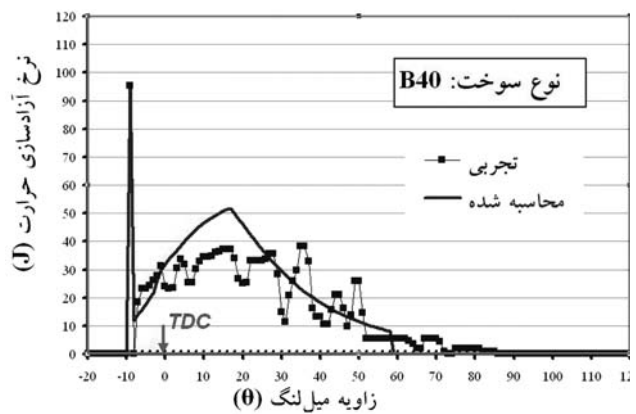
شکل ۱۴ پیش‌بینی حداکثر فشار داخل استوانه

۳-۴- پیش‌بینی دمای خروجی آگزوز

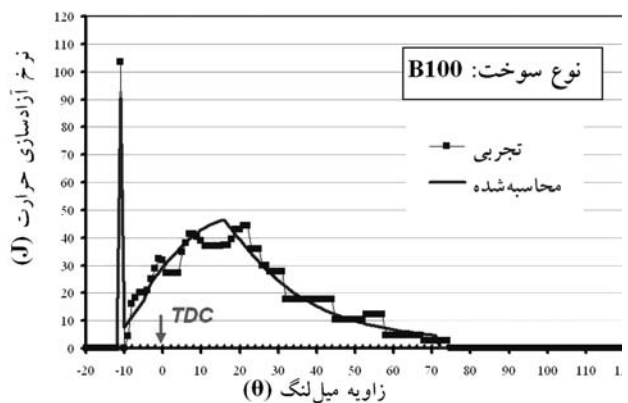
شکل ۱۵ دمای خروجی آگزوز را در درصدهای مختلف سوخت بیودیزل، در دو حالت واقعی و محاسبه‌شده نشان می‌دهد. در حالت محاسباتی، دمای داخل محفظه احتراق در لحظه باز شدن سوپاپ دود (۱۲۰ درجه میل‌لنگ) به عنوان دمای خروجی در نظر گرفته می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود مقادیر دمای خروجی در هر دو حالت واقعی و محاسبه‌شده توافق خوبی نسبت به هم دارند. در هر دو حالت با افزایش سهم بیودیزل دمای خروجی کاهش می‌یابد که نشان از احتراق ملایم‌تر سوخت بیودیزل دارد.



شکل ۱۱ پیش‌بینی آهنگ رهایی گرما، ۳۰٪ بیودیزل زاویه میل‌لنگ (θ)



شکل ۱۲ پیش‌بینی آهنگ رهایی گرما، ۴۰٪ بیودیزل زاویه میل‌لنگ (θ)

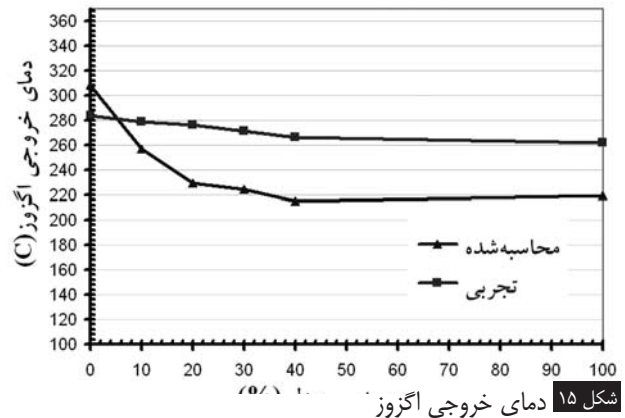


شکل ۱۳ پیش‌بینی آهنگ رهایی گرما، گازوئیل خالص زاویه میل‌لنگ (θ)

نتایج حاکی از این واقعیت است که در احتراق پیش‌آمیخته، مقدار سوخت محترق شده نه تنها وابسته به دوره مهلت اشتعال می‌باشد بلکه وابسته به عوامل دیگری نظیر عدد ستان، انرژی فعال‌سازی، ارزش

Refrence:

- 1- Van Gerpen J., Biodiesel Processing and Production". Articale Fuel Processing Technology 86 (2005):1097-1107.
- 2- Najafi B., Piruzpanah V. and Ghobadian B., 2007, "Experimental Investigation of Performance and Emission Parameters of a Small Diesel Engine Using CNG Biodiesel", SAE Technical Paper, No. 2007320075.
- 3- Fisher E.M., Curran H.J., Glaude P. A., Marinov N.M., Pitz W.J., Westbrook C.K., Flynn P.F., Durrett R.P., Zu Loye A.O., Akinyemi O.C. and Dryer F.L. Detailed Chemical Kinetic Modeling of Diesel, Combustion with Oxygenated Fuels. Twenty Eighth International Symposium on Combustion, Scotland, 2000.
- 4- Najafi B., Piroozpanah V. and Ghobadian B., 2007, "Experimental Investigation of Diesel Engine Performance Parameters and Pollution Using Biodiesel", Modares Thechnical And Engineering, Special Issue on Mechanical Engineering, 28(2007), 78-101.
- 5- ASTM. Standard specification for biodiesel fuel-blend stock (B100) for distillate fuels. ASTM D6751-02. 2002
- 6- Whitehouse, N.D. and Way, R.J.B. 1971. A simple method for the calculation heat release in diesel engines based on fuel injection rate. SAE, paper No.710134.
- 7- Benson R.S., Whitehouse N.D., Internal Combustion Engines. Oxford. Pergamon press, 1979.
- 8- Ferguson, C. R. Internal Combustion Engine, USA, John Wiley & Sons, 2002.
- 9- Ramos, J. I. Internal Combustion Engine Modeling. Hemisphere Publishing Corporation, 1989.
- 10- Solimani G. And ., Piruzpanah V. "Prediction of Ignition Delay on Combustion Process of Direct injection Diesel Engine," Amirkabir Journal,, Special Issue on Mechanical Engineering 82 (2003):72-75.
- 11-Heywood, John B. Internal Combustion Engine Fundamentals. New York: McGraw-Hill Inc, 1988.
- 12- Ramadhas A.S., Jayaraj S. and Muraleedharan C. "Theoretical Modeling and Experimental Studies on Biodiesel-Fueled Engine". Renewable Energy 31 (2006):1813-1826.



۴- نتیجه گیری

در این کار تحقیقاتی از یک الگوی تک منطقه‌ای برای پیشگویی فرآیند احتراق مخلوط سوخت بیودیزل و گازوئیل استفاده گردید. الگوی احتراق تک منطقه‌ای با الگوی Whitehouse-Way الگوی ساده‌ای است که در آن احتراق سوخت بستگی به مقدار سوخت آماده شده برای احتراق دارد، در نتیجه زمان محاسبه نرخ گرمای رها شده و فشار پیشگویی شده با این الگوی بسیار سریع می‌باشد. همچنین، مقایسه نتایج تئوری (حاصل از الگو) با نتایج تجربی برای فشار و نرخ گرمای رها شده نشان می‌دهد که الگوی تک منطقه‌ای ارائه شده با اینکه بر اساس فرض‌های ساده کننده‌ای بنیان شده است ولی تأثیر سهم بیودیزل موجود در مخلوط سوخت بیودیزل و گازوئیل، را بر فرآیند احتراق با دقت نسبتاً خوبی پیشگویی می‌نماید. سوخت بیودیزل حاوی ۱۰٪ تا ۱۲٪ جرمی اکسیژن است و دارای چگالی، گرانشی، عدد ستان و ارزش حرارتی متفاوتی نسبت به گازوئیل می‌باشد، که مهمترین عوامل مؤثر بر احتراق یا رهایی انرژی شیمیایی سوخت هستند.