

## محاسبه و مقایسه متغیرهای احتراق و شاخص های عملکرد موتورهای دیزل با سوخت جایگزین بیودیزل

حسین قدمیان<sup>۱</sup>

فریده عتابی<sup>\*۱</sup>

[Far-atabi@jamejam.net](mailto:Far-atabi@jamejam.net)

شاهین قاهری<sup>۳</sup>

تاریخ پذیرش: ۸۶/۱۱/۲۹

تاریخ دریافت: ۸۶/۵/۲۳

### چکیده

روغن‌های گیاهی می‌توانند برای تولید ترکیبات شیمیایی که استر خوانده می‌شوند، با یک الکل (معمولاً متانول) ترکیب شوند. در صورتی که این استرها به عنوان سوخت مورد استفاده قرار گیرند، بیودیزل نامیده می‌شوند. این سوخت قابل تجزیه بیولوژیکی است و هنگامی که به عنوان یک جزء ترکیبی مورد استفاده قرار می‌گیرد، نیازمند انجام حداقل تغییرات در موتور است. نتایج محاسبات برای شاخص های تأثیرگذار بر نحوه احتراق سوخت نشان می‌دهد که ارزش حرارتی خالص برای ترکیب ۲۰٪ بیودیزل و ۸۰٪ دیزل (B20) به میزان  $18577 \text{ Btu/lb}$  و برای سوخت دیزل به میزان  $19159 \text{ Btu/lb}$  می‌باشد. همچنین مقادیر دمای آدیاباتیک شعله سوخت به میزان  $3899^\circ \text{F}$  برای B20 و  $3879^\circ \text{F}$  برای سوخت دیزل محاسبه گردیده است. در بررسی شاخص های تأثیرگذار بر عملکرد موتورهای دیزل با معرفی و محاسبه مقادیر بازده حرارتی موتور مدل با سوخت بیودیزل و سوخت دیزل مقادیر مشابه ۴۱٪ حاصل شد. همچنین توان اندیکه موتور مدل با سوخت دیزل به میزان  $78/2 \text{ kW}$  و برای سوخت بیودیزل  $75/7 \text{ kW}$  محاسبه شده است. بازده حجمی موتور دیزل نیز به عنوان سومین پارامتر تأثیرگذار بر روی عملکرد موتور معرفی شد و مقادیر آن ۸۳٪ برای موتور با سوخت B20 و ۸۰٪ برای سوخت دیزل محاسبه گردید. نتایج حاصل نشان دهنده تفاوت های بسیار جزئی در مقادیر شاخص های احتراق و عملکردی موتور برای دو سوخت یاد شده بوده و سوخت تجدید پذیر بیودیزل را با توجه به الزامات زیست محیطی و روند کاهش ذخایر فسیلی به عنوان یکی از اصلی ترین گزینه ها برای جایگزینی سوخت دیزل مورد توجه قرار می‌دهد.

واژه های کلیدی: بیودیزل، B20، B100، متغیرهای احتراق، تغییر و تبدیل استری، شاخص های عملکرد موتور.

۱- استادیار دانشکده محیط زیست و انرژی، واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی تهران\* (مسئول مکاتبات)

۲- کارشناس ارشد مهندسی انرژی، دانشکده محیط زیست و انرژی، واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی تهران

## مقدمه

بیودیزل (منو آلکیل استر) یک سوخت گازوئیلی پاک است که از منابع طبیعی و قابل تجدید مانند روغن‌های گیاهی و چربی حیوانات ساخته می‌شود. بیودیزل فاقد هر گونه مواد نفتی است ولی می‌توان برای تولید یک فرآورده نفتی آن را به هر نسبتی با گازوئیل مخلوط نمود. بیودیزل خالص را B100 و ترکیب ۲۰٪ از آن با ۸۰٪ سوخت دیزل را اصطلاحاً B20 می‌نامند. این سوخت بدون هیچ تغییرات اساسی قابل استفاده در موتورهای دیزل است.

جایگزینی بیودیزل به جای یک سوخت فسیلی منجر به کاهش انتشار آلاینده‌ها و در نتیجه کاهش روند پدیده گرمایش زمین می‌گردد. هنگامی که گیاهانی مانند سویا رشد و نمو می‌کنند  $CO_2$  هوا را جذب می‌نمایند روغن این گیاهان پس از استخراج تحت فرآیند تولید بیودیزل به سوخت تبدیل می‌شود و پس از سوختن تولید  $CO_2$  و آلاینده‌های دیگری می‌کند که به اتمسفر باز می‌گردند. این چرخه باعث افزایش غلظت  $CO_2$  در هوا نمی‌شود، زیرا فتوسنتز گیاهان و نیاز آنها به  $CO_2$  باعث ثابت ماندن میزان دی‌اکسید کربن در هوا می‌گردد (۱).

مهم‌ترین تفاوت اساسی در ترکیبات بیودیزل و دیزل، محتوای اکسیژن می‌باشد. میزان اکسیژن موجود در دیزل صفر است، در حالی که بیودیزل حاوی ۱۲-۱۰٪ وزنی اکسیژن می‌باشد که باعث کامل‌تر شدن فرآیند احتراق این سوخت می‌شود. به علاوه بیودیزل عاری از گوگرد است، در حالی که در دیزل گوگرد وجود دارد که در سیستم آگزوز موتور به اکسیدهای گوگرد و سپس بخش زیادی از آن در آگزوز و یا محیط به اسید سولفوریک تبدیل می‌گردد. این اسید خود منجر به تولید ذرات ریز معلق می‌شود. بیودیزل به جز در شرایط خاص اساساً عاری از آروماتیک‌ها می‌باشد. در سوخت دیزل هیچ گونه پیوند دوگانه (الفینی) وجود ندارد، در حالی که در بیودیزل به واسطه حضور قابل ملاحظه محل‌های غیر اشباع پایداری در مقابل اکسیداسیون کم می‌باشد.

در جدول ۱ درصد غلظت آلاینده‌های منتشر شده در محیط ناشی از سوخت‌های B100 و B20 با سوخت دیزل معمولی مقایسه شده (۲).

جدول ۱- مقایسه درصد غلظت آلاینده‌های محیط ناشی از سوخت‌های B100 و B20 در مقایسه با سوخت دیزل

B20	B100	نام آلاینده
-۲۰٪	-۶۷٪	هیدرو کربن‌های نسوخته
-۰.۱۲٪	-۴۸٪	منو اکسید کربن
-۱۲٪	-۴۷٪	ذرات ریز معلق
۲٪	۱۰٪	$NO_x$
-۲۰٪	-۱۰۰٪	سولفات‌ها
-۱۳٪	-۸۰٪	هیدرو کربن‌های آروماتیکی چند حلقه‌ای PAH
-۵۰٪	-۹۰٪	nPAH <sup>1</sup>
-۱۰٪	-۵۰٪	Ozone potential of speciated HC

1. Nitrated PAH

## جدول ۲- مشخصات سوخت های دیزل بر اساس

## استاندارد ASTM

سوخت شماره ۴	سوخت شماره ۲	سوخت شماره ۱	استاندارد ASTM D975
۵۵	۵۲	۳۸	حداقل دمای اشتعال (°C)
۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	حداکثر مقدار آب و رسوبات (% حجمی)
-	۰/۳۵	۰/۱۵	حداکثر مقدار کربن باقی مانده (%)
۰/۱	۰/۰۱	۰/۰۱	حداکثر خاکستر (%)
-۲۴	-۴/۱	-۲/۴	گرانروی جنبشی 40°C ( $\times 10^{-6} m^2/s$ )
۵/۵	۱/۹	۱/۳	حداکثر مقدار گوگرد (%)
۲/۰	۰/۰۵	۰/۰۵	حداکثر مقدار خوردگی مس
درجه ۳	درجه ۳	درجه ۳	حداکثر مقدار خوردگی مس
۳۰	۴۰	۴۰	حداقل عدد ستان

در سال ۱۹۹۹، ASTM استاندارد جدیدی را برای سوخت بیودیزل با نام PS121-99 ارائه داد. همچنین در دسامبر سال ۲۰۰۱ استاندارد جدید D-6751 برای بیودیزل خالص (B-100) به تصویب رسید، این استاندارد مخلوطی از سوخت بیودیزل و گازوئیل تا سقف ۲۰٪ بیودیزل B20 را نیز دربر می گیرد (۶).

در جدول ۳ مشخصات ترمودینامیکی سوخت دیزل نوع دوم و همچنین سوخت بیودیزل با پایه روغن دانه سویا که به عنوان مبنای محاسبات در موتور دیزل مورد استفاده قرار گرفته، ارائه شده است (۲).

همان گونه که در جدول ۱ مشاهده می گردد، درصد غلظت کلیه آلاینده ها برای سوخت بیودیزل اعم از B100 و B20 کم تر از سوخت دیزل معمولی است و تنها پارامتر  $NO_x$  است که به مقدار بسیار کم افزایش داشته است. بنابراین استفاده از بیودیزل باعث افزایش میزان آلاینده های نیترات های اکسیژن  $NO_x$  در بسیاری از موتورها می شود. بیودیزل در ساختار خود نیتروژن ندارد، بنابراین افزایش  $NO_x$  مربوط به نیتروژن موجود در سوخت نمی باشد.  $NO_x$  تشکیل شده در موتور از نیتروژن موجود در هوای ورودی و واکنش آن در دمای بسیار بالا ناشی از احتراق در محفظه سیلندر ایجاد می گردد (۳).

## مقایسه مشخصه های سوخت دیزل و بیودیزل

سوخت دیزل برش هایی از نفت خام به رنگ قهوه ای است که شامل اجزای تقطیر شده یا باقی مانده با چگالی نسبی معادل ۰/۸۷ است. سوخت های دیزل براساس نوع استفاده آن ها و نیز براساس یک درجه بندی عددی طبقه بندی می شوند. انجمن آزمون و مواد امریکا<sup>۱</sup> این طبقه بندی را به صورت عددی برای سوخت های دیزل از شماره ۱ تا ۶ انجام داده است. سوخت دیزل شماره ۱ برای استفاده در هوای سرد تعریف شده و سوخت نوع دوم که دارای فراریت کم تری است، به عنوان متداول ترین نوع سوخت در خودروها معرفی شده است. همچنین سوخت نوع چهارم نیز برای استفاده در واحدهای ثابت که موتور دارای سرعت کم تری است ارائه گردیده است. در جدول ۲ مشخصات سه سوخت یاد شده بر اساس استاندارد ASTM D975 ارائه شده است (۴) و (۵).

جدول ۳- مشخصات سوخت دیزل نوع دوم و بیودیزل براساس استاندارد ASTM

مشخصات	واحد	B100	D2
فرمول شیمیائی	-	C <sub>18</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>
جرم ملکولی	gr	۲۹۶	۱۷۰
اندیس ستان	-	۴۹	۴۵
نقطه اشتعال	<sup>0</sup> C	حداقل ۱۳۰	۳۸
آب و رسوبات موجود	% حجمی	حداکثر ۰/۰۵	۰/۰۵
گرانروی جنبشی	mm <sup>2</sup> /s	۱/۹-۶	۱/۸-۵/۵
خاکستر گوگردی	% mass	حداکثر ۰/۰۲	۰/۵
خوردگی مس	-	حداکثر درجه ۳	حداکثر درجه ۳
ستان	-	حداقل ۴۷	۵۰
نقطه کدر شدن	<sup>0</sup> C	-۴-۰	-۶
نقطه ریزش	<sup>0</sup> C	۰	-۲۷
نقطه ابری	<sup>0</sup> C	۲	-۲۳
کربن باقی مانده	% mass	حداکثر ۰/۰۵	۰/۳۵
چگالی در 15 <sup>0</sup> C	kg/m <sup>3</sup>	۰/۸۵	۰/۸۷-۰/۸۹

### منابع و فرآیند تولید بیودیزل

بخش عمده تمایلاتی که امروزه برای تولید بیودیزل وجود دارد، ناشی از ظرفیت بسیار بالای تولید سوپا، تولیدات مازاد و کاهش قیمت‌ها است. متیل سویات، یا سویای دیزل که از واکنش متانول با روغن سویا حاصل می‌شود، اصلی‌ترین شکل بیودیزل در آمریکا می‌باشد. البته چربی‌های بلااستفاده حیوانی و روغن سوخته که به عنوان شبه گریس شناخته می‌شوند نیز منابع و ذخایر بسیار مناسبی می‌باشند. این منابع از روغن سویا ارزان‌ترند و به عنوان راهی برای کاهش هزینه‌های تامین مواد اولیه در نظر گرفته می‌شوند. بادام زمینی، پنبه دانه، گل آفتاب گردان و کنولا (گونه‌ای از دانه شلغم روغنی) نیز از منابع روغنی دیگرند. استرهایی که از هر یک از این منابع ساخته شده‌اند گرچه در میزان انرژی عدد ستان (مشابه اکتان بنزین) یا دیگر مشابهات فیزیکی کمی متفاوت می‌باشند، اما می‌توانند با موفقیت در موتورهای گازوئیلی مورد استفاده قرار گیرند (۷).

بر اساس آزمایش‌ها و پژوهش‌های انجام شده، اساس تولید بیودیزل به شکل امروزی بر پایه فرآیندی بنام تغییر و تبدیل

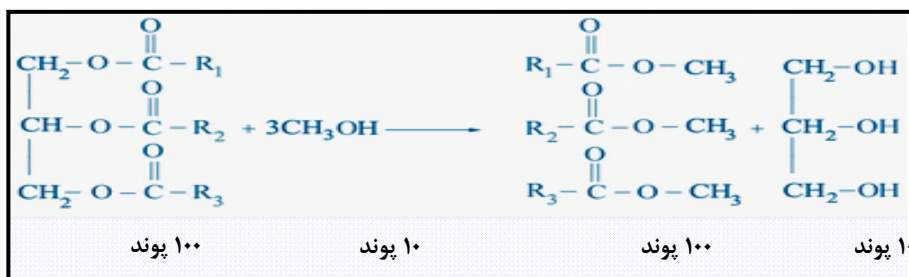
استری<sup>۱</sup> شکل گرفت. در این فرآیند روغن گیاهی (یا چربی حیوانی) پس از عبور از فیلتر برای از بین بردن اسیدهای چرب آزاد، با قلیا فرآیند می‌گردد، سپس با یک الکل (معمولاً متانول) و یک کاتالیزور (معمولاً هیدروکسید سدیم یا پتاسیم) ترکیب می‌شود. تری گلیسریدهای روغن برای تشکیل استرها و گلیسرول واکنش شیمیایی انجام داده و سپس از یکدیگر جدا شده و مورد تصفیه قرار می‌گیرند.

واکنش شیمیایی انجام گرفته در شکل ۱ نمایش داده شده است (۸). همان طور که مشاهده می‌شود، طی این واکنش مقدار ۱۰۰ پوند چربی یا روغن گیاهی (برای مثال روغن دانه‌های سویا) با ۱۰ پوند از یک الکل با زنجیره کوتاه که با ROH نمایش داده شده است (عموماً متانول و گاهی نیز اتانول)، در مجاورت کاتالیزور (عموماً هیدروکسید پتاسیم یا سدیم مخلوط با متانول) واکنش داده است و ۱۰ پوند گلیسرین و ۱۰۰ پوند بیودیزل به عنوان محصولات واکنش تولید گردیده،

1 - Transesterification

oleic, stearic, palmitic و linoleic ترکیبات روغن ها و چربی ها می باشد (۸).

زنجیره اسیدهای چرب در این واکنش با  $R_1$  و  $R_2$  و  $R_3$  نمایش داده شده است که همان گونه که اشاره شد مربوط به اسیدهای



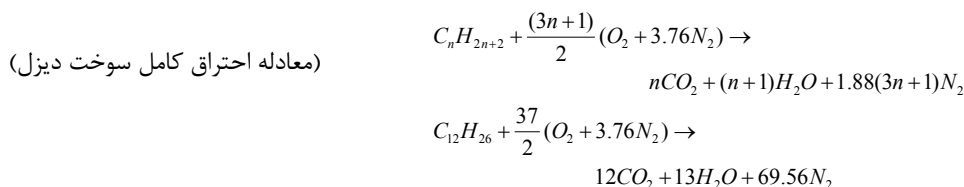
شکل ۱- واکنش تولید متیل استر و گلیسرول

### واکنش های احتراق برای سوخت دیزل و بیودیزل

گیرد. در احتراق کامل کلیه عناصر موجود در سوخت به آخرین حد اکسیداسیون خود می رسند، لیکن در احتراق ناقص مقداری از مواد قابل اکسیدشدن در سوخت باقی می ماند و یا به عنوان اجزائی از گازهای خروجی به خارج هدایت می شود. در صورتی که احتراق صورت گیرد مقداری از مواد نسوخته فرار مانند  $CO$ ،  $H_2$ ،  $CH_4$  و  $HC$  اتمیزه شده نیز در دود وجود خواهد داشت (۱۰). با توجه به توضیحات ارائه شده معادلات احتراق سوخت دیزل و بیودیزل در شرایط انجام احتراق کامل به شرح ذیل خواهد بود:

مراحل مختلف فرآیند احتراق یک ماده سوختنی برای سوخت با فاز مایع به قرار زیر است (۹):

۱. به منظور افزایش تماس سوخت و هوای مایع پودر می شوند.
۲. قطرات سوخت مایع تبخیر شده و از احتراق گازهای حاصل با اکسیژن دمای قطره افزایش می یابد.
۳. ملکول های مایع در دمای معین تجزیه می شوند.
۴. قطره مایع از سطح می سوزد و در اثر گرم شدن حباب های بخار داخل قطره تشکیل می شوند و فرآیند فروپاشی قطره باعث تشدید احتراق می گردد. گازهای حاصل از احتراق سوخت اصطلاحاً دود نامیده می شوند فرآیند احتراق می تواند به طور کامل و یا به طور ناقص انجام



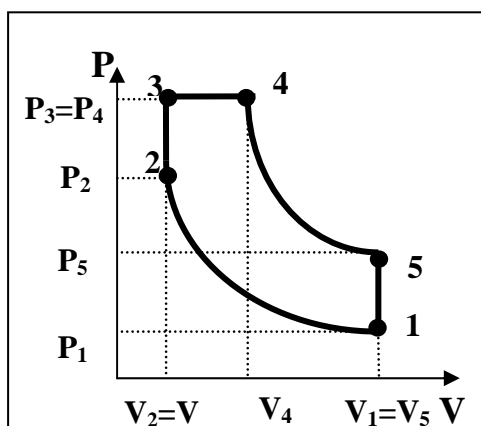
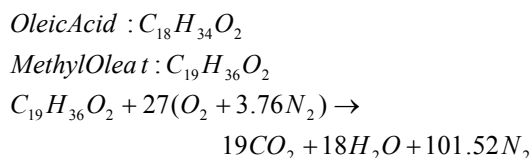
متیل استر به عنوان مدل مطالعه موردی در نظر گرفته شده و محاسبات احتراق و معادله واکنش بر اساس فرمول شیمیایی این متیل استر انجام شده است.

با توجه به این که روغن دانه سویا جزو پرمصرف ترین منابع اولیه در تهیه و تولید سوخت بیودیزل بوده و متیل

با توجه به این که سوخت بیودیزل حاصل ترکیبی از متیل استرهای مختلف است، براساس نوع روغن گیاهی و یا موجودی که بیودیزل از آن تهیه می گردد، درصد های ترکیبی مختلفی از این متیل استرها تشکیل خواهد شد. با در نظر گرفتن این امر در معادلات احتراق برای سوخت بیودیزل یک

در محاسبات شاخص های موتور مدل استفاده شده است. برای این اساس معادله احتراق این سوخت در شرایط احتراق کامل به صورت زیر می باشد:

(معادله احتراق کامل سوخت بیودیزل)



شکل ۲- چرخه هوا با فشار محدود شده

میزان بازده در چرخه فشار محدود به صورت زیر تعریف می شود (۱۱):

$$\eta_{th} = 1 - \left[ \left( \frac{1}{r} \right)^{k-1} \right] \times \left[ \frac{\alpha \cdot \beta^k - 1}{(\alpha - 1) + \alpha \cdot k \cdot (\beta - 1)} \right]$$

#### محاسبه شاخص های تاثیرگذار بر احتراق یک سوخت

شاخص های ارزش حرارتی و دمای آدیباتیک شعله، اصلی ترین پارامترهای تاثیرگذار بر شرایط احتراق یک سوخت می باشند. این شاخص ها برای سوخت های دیزل محاسبه شده است.

#### ۱- محاسبه ارزش حرارتی سوخت دیزل و بیودیزل

بر اساس تعریف ارزش حرارتی سوخت که مقدار حرارت آزاد شده در اثر احتراق کامل یک کیلوگرم سوخت جامد یا مایع و یا یک مترمکعب گاز می باشد، دو نوع ارزش حرارتی ناخالص (حد بالا) و ارزش حرارتی خالص (حد پایین) در نظر گرفته می شود.

#### چرخه هوای ترکیبی با فشار محدود

امروزه اغلب موتورهای دیزلی یا احتراق تراکمی C.I.E<sup>۱</sup> مطابق با چرخه هوای ترکیبی<sup>۲</sup> یا چرخه فشار محدود<sup>۳</sup> کار می کنند. عملکرد موتورهای دیزل در این چرخه از بالاترین میزان بازده برخوردار است. در این میان عملکرد موتورهای دور بالا دارای بیشترین بازده می باشد. موتورهای دیزل با حجم بالا دارای نسبت  $P_3/P_1$  و میزان نسبت تراکم  $r$  پایین هستند. این امر درحالی است که در این موتورها با افزایش میزان  $P_3/P_1$  مقدار بازده افزایش می یابد (۲).

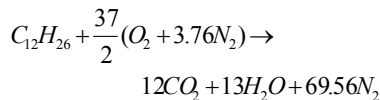
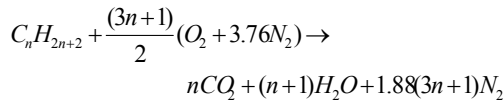
مطابق شکل ۲ در چرخه هوا با فشار محدود، با افزایش نسبت  $P_3/P_2$  سیکل به سمت فرآیند حجم ثابت هدایت می گردد و با کاهش این نسبت، فرآیند بسمت چرخه فشار ثابت میل می کند. به طور کلی وظیفه پمپ انژکتور در موتور دیزل تعیین فاصله نقطه ۲ تا ۴ است. بر این اساس محدوده نسبت  $P_3/P_1$  برای موتورهای کم دور و حجیم، متوسط و بزرگ و کوچک با دور بالا به ترتیب ۵۰، ۷۰ و ۹۰ تعریف می شود.

- 1- Compression Ignition Engines
- 2- Mixed Air Cycle
- 3- Limited Pressure Cycle

$$\Rightarrow \Delta H_{298}^0 = 11,194,010 \text{ kJ / kgmol}$$

$$= 37.817 \text{ Mj / kg} \equiv 1,626,131 \text{ Btu / lb}$$

- محاسبه انرژی سوخت برای سوخت دیزل با استفاده از آنتالپی تشکیل  $\Delta H_f$



$$\Delta H_{298}^0 = 757,986 \text{ kJ / kgmol} \quad (2)$$

$$= 44.558 \text{ Mj / kg} \equiv 1,915,994 \text{ Btu / lb}$$

- محاسبه انرژی سوخت برای سوخت بیودیزل B20

اکنون با استفاده از مقادیر محاسبه شده برای ارزش حرارتی سوخت بیودیزل خالص B100 و سوخت دیزل خالص، مقدار انرژی سوخت بیودیزل B20 محاسبه می‌گردد. با توجه به درصد ترکیب سوخت B20 شامل ۸۰٪ سوخت دیزل شماره ۲ و ۲۰٪ سوخت بیودیزل از نوع متیل اولیت، میزان انرژی سوخت B20 از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Q_{NHV(B20)} = (20\% \times Q_{NHV(B100)}) + (80\% \times Q_{NHV(D2)})$$

$$Q_{NHV(B20)} = 18,577.968 \text{ Btu / lb} \quad (3)$$

## ۲- محاسبه دمای آدیاباتیک شعله برای سوخت دیزل و بیودیزل

بر اساس الگوریتم طراحی شده، مقادیر کسر مولی جزء هر یک از اجزای احتراق ترکیبات سوخت با استفاده از معادلات احتراق کامل که پیش از این بیان گردید، محاسبه می‌گردد. همچنین مقادیر مربوط به تغییرات آنتالپی محصولات احتراق با استفاده از مقادیر ارزش حرارتی خالص محاسبه شده در بخش قبل قابل محاسبه می‌باشد. مطابق با الگوریتم طراحی شده گام‌های ۴ تا ۶ به منظور محاسبه دقیق‌ترین میزان برای دمای آدیاباتیک شعله اجرا می‌گردد (۹).

با توجه به این که حرارت محسوس<sup>۱</sup> حرارتی است که در اثر تغییر دمای یک ماده، بدون تغییر حالت آلتروپیک جذب یا دفع می‌شود و حرارت نهان<sup>۲</sup> حرارتی است که در اثر تغییر حالت یک ماده بدون تغییر دما جذب یا دفع می‌گردد، لذا ارزش حرارتی کل مشتمل بر مجموع حرارت‌های محسوس و نهان بوده لیکن ارزش حرارتی خالص تنها شامل حرارت محسوس است (۱۰):

$$\text{Gross Heating Value} =$$

$$\text{Sensible Heat} + \text{Latent Heat}$$

$$\text{Net Heating Value} = \text{Sensible Heat}$$

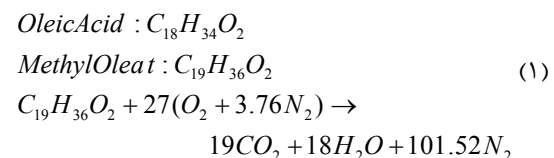
براساس مفاهیم ذکر شده مقادیر ارزش حرارتی سوخت بیودیزل و دیزل در شرایط احتراق کامل (استوکیومتری) با استفاده از روش آنتالپی تشکیل<sup>۳</sup>  $\Delta H_f$  مدنظر قرار گرفت. بر اساس این روش انرژی سوخت را می‌توان از تغییرات آنتالپی تشکیل  $\Delta H_f$  در دو طرف معادله احتراق محاسبه نمود. برای این منظور کافی است با در اختیار داشتن آنتالپی تشکیل  $\Delta H_f$  هر یک از عناصر دو طرف معادله احتراق و بر اساس معادلات ذیل مقدار آنتالپی سوخت را محاسبه نمود (۹):

$$aA + bB \rightarrow cC + dD$$

$$\Rightarrow \Delta H_{298}^0 = \sum_p n_p (\Delta H_f^0)_p - \sum_R n_R (\Delta H_f^0)_R$$

بر اساس معادلات یاد شده محاسبه مقادیر انرژی سوخت برای هریک از سوخت‌های دیزل و بیودیزل با استفاده از آنتالپی صورت می‌پذیرد.

- محاسبه انرژی سوخت برای سوخت بیودیزل و استفاده از آنتالپی تشکیل  $\Delta H_f$



- 
- 1- Sensible Heat
  - 2- Latent Heat
  - 3-  $\Delta H$  of formation

در جدول ۴ مراحل اجرای الگوریتم محاسبه دمای آدیباتیک شعله ارایه گردیده است.

جدول ۴- الگوریتم محاسبه دمای آدیباتیک شعله

۱	تعیین دمای مرجع و تعیین فرض اولیه برای دمای آدیباتیک شعله	فرض اولیه دمای واکنش = $600^{\circ}F$ دمای آدیباتیک = $3000^{\circ}F$
۲	محاسبه کسر مولی جزء محصولات احتراق از معادلات احتراق کامل سوخت	براساس معادلات احتراق کامل برای دیزل و بیودیزل
۳	استخراج مقادیر ظرفیت گرمایی جزئی برای هر یک از محصولات احتراق بر اساس دمای آدیباتیک شعله فرض شده	$T_{af} \Rightarrow C_p$
۴	محاسبه ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت با استفاده از مقادیر کسر مولی و ظرفیت گرمایی جزء	$C_{p_{av}}^1 = \sum_{i=1}^3 y_i C_{p_{i}}$
۵	نوشتن معادله تغییرات انتالپی و محاسبه تغییرات انتالپی محصولات احتراق با استفاده از مقادیر محاسبه شده ارزش حرارتی خالص و جرم ملکولی سوخت	$\Delta H_r + \Delta H_R + \Delta H_p = 0$ $\Delta H_r = -\Delta H_p$ $\Delta H_r = m_f \times NHV$
۶	محاسبه دمای آدیباتیک شعله بر مبنای تغییرات انتالپی محصولات احتراق، تعداد مول محصولات و دمای مرجع	$\Delta H_p = n.C_{p_{av}}^1 (T_{af1} - T_0)$
۷	استخراج مقادیر جدید ظرفیت گرمایی ویژه با استفاده از مقدار جدید دمای آدیباتیک شعله	$T_{af(i)} \Rightarrow C_{p(i)}$
۸	انجام مراحل ۴ تا ۶ جهت محاسبه دقیق ترین میزان دمای شعله آدیباتیک	$T_{af(Final)}$

جدول ۶- محاسبه دمای آدیباتیک شعله برای سوخت

دیزل (درجه فارنهایت)

حدس اولیه	$T_1$	$T_2$	$T_3$
۳۰۰۰	۳۹۴,۶.۹۱	۳۸۶,۷.۸۴	۳۸۷,۹.۶۶

بر این اساس دمای آدیباتیک شعله برای سوخت دیزل پس از انجام سه مرتبه سعی و خطا در محاسبات و همگرایی نهایی پاسخ با دقت مطلوب بدین ترتیب محاسبه می شود:

$$T_{af(D2)} = 387,9.667^{0F} \quad (5)$$

جدول های ۵ و ۶ نتایج محاسبات را برای مقادیر دمای آدیباتیک شعله نشان می دهند، براساس محاسبات انجام شده مقادیر نهایی پس از سه بار سعی و خطا حاصل شده است.

جدول ۵- محاسبه دمای آدیباتیک شعله برای سوخت

بیودیزل (درجه فارنهایت)

حدس اولیه	$T_1$	$T_2$	$T_3$
۳۰۰۰	۳۹۶,۷.۳۹	۳۸۹,۴.۹۴	۳۸۹,۹.۱۸

بنابراین دمای آدیباتیک شعله برای سوخت بیودیزل محاسبه می شود:

$$T_{af(B100)} = 389,9.18^{0F} \quad (4)$$



جدول ۷- مشخصات موتور دیزل چهار زمانه مدل

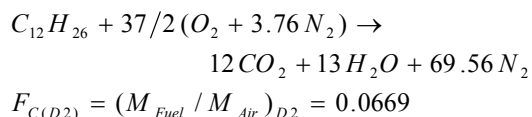
$n = 4$	تعداد سیلندر
$L = 10''$	طول لوله ورودی
$D = 30''$	قطر لوله ورودی
$r = 16$	نسبت تراکم
$r.h = 30\%$	درصد رطوبت نسبی
$T_i = 528^{0R}$	دمای ورودی
$b = 3.875''$	قطر سیلندر
$s = 5''$	کورس
$P_i = 12.5 \text{ psi}$	فشار ورودی
$D_i = 1.75''$	قطر سوپاپ
$O.L = 20^0$	زاویه روی هم افتادگی
$T_c = 640^{0R}$	دمای سیال خنک کن
$N = 2000 \text{ rpm}$	دور موتور
$P_e = 14.7 \text{ psi}$	فشار خروجی
$\dot{M}_f = Cte$	جریان جرمی سوخت
$F_R = 0.9$	نسبت سوخت به هوای نسبی
$I.C.ABC = 60^0$	زاویه بسته شدن سوپاپ ورودی
$T_o = 560^{0R}$	دمای ورودی مینا

• محاسبه نسبت سوخت به هوای صحیح برای

سوخت دیزل و بیودیزل

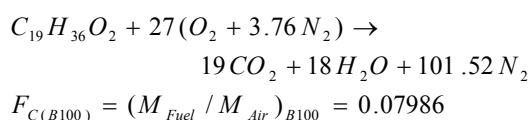
به منظور انجام محاسبات شاخص های موتور دیزل ضروری است تا نسبت سوخت به هوای صحیح به عنوان یک پارامتر اساسی محاسبه شود، این محاسبه بر اساس تعریف ذکر شده برای  $F_c$  و با استفاده از معادلات احتراق کامل جهت محاسبه ارزش حرارتی سوخت دیزل و بیودیزل، انجام می گیرد:

(۶)



و به همین ترتیب برای محاسبه  $F_c$  سوخت بیودیزل می توان نوشت:

(۷)



محاسبه شاخص های اصلی موتور دیزل مدل برای سوخت های دیزل و بیودیزل

با توجه به این که سه شاخص توان خروجی موتور، بازده حرارتی اندیکه و همچنین بازده حجمی به عنوان پارامترهای تاثیرگذار بر روی میزان شتاب گیری به عنوان مشخصه های اصلی در یک موتور دیزل محسوب می شوند، این مشخصه ها در یک موتور مدل برای سوخت های دیزل و بیودیزل محاسبه و با یکدیگر مقایسه گردیدند.

بدین منظور با انتخاب یک موتور چهار زمانه به عنوان مطالعه موردی و استفاده از یک الگوریتم طراحی مبتنی بر روش تیلور<sup>۱</sup> و روابط تجربی مشتق شده از آن این شاخص ها محاسبه می گردند.

سوخت بیودیزل از نوع متیل اولیت با منشأ گیاهی دانه سویا و ترکیب B20 به عنوان نماینده سوخت بیودیزل و مطالعه موردی در کلیه محاسبات مورد استفاده قرار گرفت دلیل این انتخاب عدم اعمال هرگونه تغییرات در ساختار موتور دیزل به هنگام استفاده از سوخت B20 است. بر این اساس کلیه شاخص های محاسبه شده شامل ارزش حرارتی و دمای آدیاباتیک شعله مطابق با مشخصه های فیزیکی و شیمیایی ترکیب B20 محاسب گردیده اند.

با توجه به فرضیات صورت گرفته، برای محاسبه شاخص های مورد نظر در موتور با سوخت B20، مخلوطی کاملاً هموزن شامل ۲۰٪ سوخت بیودیزل از نوع متیل اولیت و ۸۰٪ از سوخت دیزل شماره ۲ معرفی می گردد.

• انتخاب موتور مدل برای طراحی

مشخصه های مربوط به موتور دیزل چهارزمانه با حجم متوسط و منیفولد بلند که به عنوان موتور مدل در طرح استفاده می شود، در جدول ۷ ارایه است.

شرایط کارکرد موتور در هنگام استفاده از این سوخت به جای سوخت دیزل، میزان نسبت سوخت به هوا ثابت باقی خواهد ماند. با جای گذاری رابطه (۸) برای تعیین میزان  $F_R$  جدید می توان نوشت:

$$F_R = \frac{F}{F_C} = \frac{0.05994}{0.07039} \Rightarrow F_R = 0.851 \quad (10)$$

- طراحی الگوریتم محاسبه شاخص های عملکردی موتور دیزل مدل

در شکل ۳ فلودیاگرام طراحی شده جهت محاسبه شاخص های عملکردی موتور دیزل، شامل کلیه مراحل محاسبه شاخص های مربوطه برای دو ترکیب D2 و B20 ارایه شده است. این طراحی براساس معادلات استخراج شده از روش تجربی تیلور و با توجه به ترتیب و توالی نیازمندی های پارامترهای شرکت کننده در هر معادله برای محاسبه ۳ شاخص عملکردی معرفی شده صورت پذیرفته است.

براساس مقادیر محاسبه شده برای سوخت دیزل و بیودیزل خالص، میزان نسبت سوخت به هوای صحیح برای سوخت بیودیزل B20 به صورت زیر محاسبه می گردد:

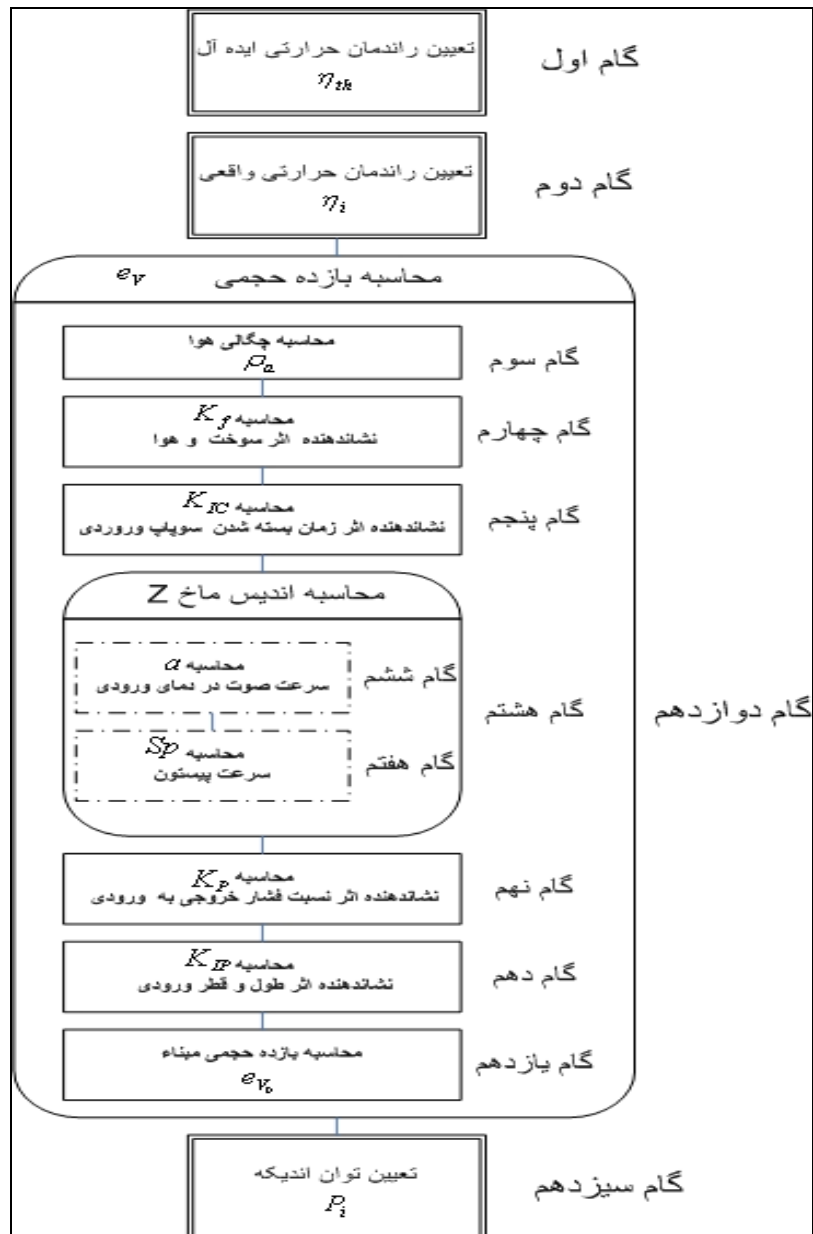
$$F_{C(B20)} = \frac{[(80\% \times M_{Fuel(D2)}) + (20\% \times M_{Fuel(B100)})]}{[(80\% \times M_{Fuel(D2)}) + (20\% \times M_{Fuel(B100)})]} = 0.07039 \quad (8)$$

- محاسبه میزان نسبت سوخت به هوای نسبی  $F_R$  برای سوخت بیودیزل B20

با توجه به این که محاسبه شاخص های اساسی موتور با سوخت دیزل خالص مطابق با فرضیات اولیه و بر اساس نسبت سوخت به هوای نسبی  $F_R = 0.9$  انجام می پذیرد، در محاسبات مربوط به سوخت بیودیزل با توجه به ارتباط این مشخصه با مقادیر  $F$  و  $F_C$  به صورت زیر (۱۱):

$$F_R = F / F_C \quad (9)$$

می توان مقدار  $F_R$  جدید را محاسبه نمود. با استناد به مهم ترین ویژگی سوخت B20 یعنی عدم هرگونه تغییرات در



شکل ۳- فلودیاگرام انجام محاسبات مربوط به تعیین شاخص های اصلی موتور دیزل

همچنین جدول ۸ مراحل محاسبات شاخص های

اساسی موتور دیزل مدل شده را مطابق با فلوجارت طراحی شده

نشان می دهد (۱۱).

جدول ۸- الگوریتم محاسبه برای شاخص های اصلی احتراق

شرح عملیات	
گام اول	محاسبه بازده حرارتی ایده آل با استفاده از نمودار محاسبه $\eta_{th}$ برای چرخه فشار محدود شده (با استفاده از پارامترهای $r, F_R, T_i$ )
گام دوم	محاسبه بازده حرارتی واقعی با استفاده از نمودار محاسبه بازده گرمایی واقعی در چرخه فشار محدود شده با استفاده از پارامترهای $F_R, \eta_{tho}$
گام سوم	محاسبه چگالی هوا $\rho_a$ $\rho_a = \frac{29 \cdot p_i}{R \cdot T_i} \cdot \left[ \frac{1}{1 + \frac{29}{m_f} \cdot F_i + 1.6h} \right]$
گام چهارم	محاسبه $K_f$ پارامتر نشان دهنده اثر نسبت سوخت و هوا بر بازده حجمی با استفاده از دیاگرام محاسبه $K_f$ بر حسب $F_R$
گام پنجم	محاسبه $K_{IC}$ پارامتر نشان دهنده اثر زمان بسته شدن سوپاپ ورودی بر بازده حجمی که براساس طول منیفولد محاسبه می شود
گام ششم	محاسبه $a$ سرعت صوت در دمای ورودی $\frac{a}{\sqrt{T_i}} = 41.399 \times \sqrt{\frac{0.24 + 6.448h}{0.1715 + 0.334h}}$
گام هفتم	محاسبه $Sp$ سرعت پیستون $Sp = 2.N.S$
گام هشتم	محاسبه $Z$ اندیس ماخ $Z = \left( \frac{b}{D_i} \right)^2 \cdot \frac{Sp}{C_i \cdot a}$
گام نهم	محاسبه $K_p$ پارامتر نشان دهنده اثر نسبت فشار خروجی به ورودی بر بازده حجمی با استفاده از دیاگرام محاسبه $K_p$ برحسب تغییرات $P_e/P_i$ و $r$ برای روی هم افتادگی جزئی سوپاپ ها
گام دهم	محاسبه $K_{IP}$ پارامتر نشان دهنده اثر طول و قطر ورودی بر بازده حجمی با استفاده از پارامترهای نسبت طول لوله ورودی به کورس پیستون، نسبت قطر لوله ورودی به قطر سیلندر و اندیس ماخ می توان وارد دیاگرام $K_{IP}$ شد.
گام یازدهم	محاسبه $e_{V_0}$ بازده حجمی مبنا، استفاده از دیاگرام محاسبه $e_{V_0}$ برحسب $Z$ و طول لوله منیفولد
گام دوازدهم	تعیین $e_V$ بازده حجمی موتور با استفاده از پارامترهای محاسبه شده از دیدگاه مشخصه های ساختار موتور $e_v = e_{V_0} \cdot \sqrt{\frac{T_i}{T_o}} \cdot \left( \frac{T_{C_0} + 2000}{T_C + 2000} \right) \times K_p \times K_f \times K_{IC} \times K_{IP}$
گام سیزدهم	تعیین $P_i$ توان اندیکه $P_i = \frac{J}{4} \cdot \rho_a \cdot e_v \cdot A_p \cdot S_p \cdot (F \cdot Q_{CL} \cdot \eta_{th})$

مقادیر سه شاخص یاد شده با انجام محاسبات

سیزده مرحله ای مطابق با جدول ۸ و براساس مشخصه های

بازده حجمی و توان خروجی محاسبه شده را نشان می دهد.

هر یک از سوخت های مذکور و همچنین نتایج حاصل در بخش های قبل حاصل می شود. جدول ۹ مقادیر بازده حرارتی اندیکه،

جدول ۹- نتایج محاسبات سه شاخص اصلی احتراق برای دو سوخت دیزل و B20

توان خروجی	بازده حجمی	بازده حرارتی اندیکه	نوع سوخت
$P_i = 75.7$	$e_v = 0.84$	$\eta_i = 0.399$	B20
$P_i = 78.2$	$e_v = 0.84$	$\eta_i = 0.420$	D2

ناشی از احتراق ترکیب B20 به طور متوسط بین ۱۲ تا ۲۰٪ نسبت به سوخت دیزل خالص کاهش داشته است. با وجود این که به خاطر استفاده از سوخت های فسیلی در فرآیند تولید بیودیزل چرخه گاز  $CO_2$  با سوخت بیودیزل یک چرخه کامل نیست، اما جایگزینی بیودیزل با سوخت دیزل منشأ نفتی چرخه  $CO_2$  را تا میزان ۷۸٪ در مورد سوخت B100 و تا میزان ۱۵/۷٪ در مورد سوخت B20 کاهش می دهد.

با وجود این که افزایش میزان اکسیدهای نیتروژن برای ترکیبات بیودیزل اندک بوده و این میزان افزایش برای ترکیب B20 در حدود ۲٪ است، اما فعالیت هایی نظیر اضافه نمودن مواد افزودنی به سوخت و همچنین تمهیداتی برای کم کردن دمای محفظه احتراق به منظور کاهش میزان  $NO_X$  خروجی در حال انجام است.

۲- محاسبات انجام شده در خصوص ارزش حرارتی هر یک از سوخت های دیزل و بیودیزل به عنوان یکی از دو شاخص تاثیرگذار بر شرایط احتراق نشان دهنده بالاتر بودن میزان ارزش حرارتی سوخت دیزل شماره ۲ نسبت به بیودیزل خالص و B20 است. در جدول ۱۰ مقادیر محاسبه شده از دو روش مذکور با هم مقایسه شده است که نشان دهنده اختلاف کم در نتایج محاسبات و همچنین صحت روش های محاسبه است.

همان طور که در نتایج حاصل در جدول ۹ مشاهده می شود، با وجود اختلاف در مشخصه های دو سوخت دیزل و بیودیزل و همچنین مقادیر نسبت سوخت به هوای نسبی، یکسان شدن میزان بازده حجمی برای دو سوخت یاد شده توجیه پذیر نمی باشد. علت این نتایج را می توان در گرایش معادله تعیین میزان بازده حجمی و ماهیت پارامترهای تشکیل دهنده آن به مشخصه های ساختاری موتور مورد استفاده دانست. لذا برای رسیدن به نتایج دقیق تر از مقادیر بازده حجمی از معادله دومی که پارامترهای آن تابعی از مشخصه های ترکیب سوخت هستند، استفاده شده و مقادیر جدید برای شاخص بازده حجمی محاسبه گردید (۱۲).

$$e_v = \frac{2m_a}{\rho_a \cdot N \cdot V_d} = \frac{4m_a}{\rho_a \cdot A_p \cdot S_p} \quad (11)$$

بر اساس دیدگاه جدید میزان بازه حجمی محاسبه شده برای سوخت دیزل  $e_v = 0.793$  و برای سوخت بیودیزل به میزان  $e_v = 0.830$  محاسبه گردید.

#### جمع بندی نتایج و پیشنهادها

نتایج حاصل از محاسبات و تحلیل های انجام گرفته به شرح زیر است:

۱- با توجه به نتایج ارایه شده در جدول ۱ در خصوص وضعیت تغییرات میزان آلاینده ها، افزایش درصد ترکیب بیودیزل در سوخت، کاهش چشمگیر مقادیر شاخص های آلایندگی را به دنبال خواهد داشت. بر این اساس آلاینده های مونواکسید کربن، ذرات معلق، هیدروکربن های نسوخته و سولفات های

جدول ۱۰- مقادیر محاسبه شده ارزش حرارتی برای سه

سوخت دیزل، B20 و B100 برحسب Btu/lb

Diesel No.2	B20	B100
19,159.94	18,557.96	16,261.31

تاثیر این اختلاف را می توان در محاسبه شاخص های عملکردی موتور دیزل بر روی مقادیر توان خروجی برای هر یک از ترکیبات سوخت مشاهده کرد.

۳- بر اساس محاسبات انجام شده دمای آدیباتیک شعله برای سوخت B100 به میزان  $3899^{\circ}\text{F}$  و برای سوخت D2 به میزان  $3879^{\circ}\text{F}$  محاسبه شد. براین اساس دمای آدیباتیک شعله برای سوخت بیودیزل بالاتر از سوخت دیزل است. از جمله دلایل این اختلاف وجود اکسیژن در ساختار سوخت بیودیزل است که با شرکت در فرآیند احتراق باعث بالا رفتن دما می شود. دمای آدیباتیک شعله از جمله پارامترهای تاثیرگذار بر شرایط کارکرد موتور است و می تواند در زمان احتراق سوخت، سرعت حرکت جبهه شعله و پدیده خوداشتعالی تاثیر گذار باشد. براین اساس در فرآیند احتراق مخلوط هموزن B20 عمل اشتعال در نقطه شروع احتراق با سوختن ملکول های دیزل آغاز شده و ملکول های بیودیزل اندکی پس از آن و با بالا رفتن دمای محفظه احتراق تا دمای خود اشتعالی آن ها محترق می شوند، نتیجه آن که فرآیند احتراق سوخت B20 همانند احتراق با سوخت دیزل خالص از نظر سیکل فرآیند در نقطه اشتعال مشابه روی می دهد. احتراق دو مرحله ای در پیستون شامل احتراق اولیه سوخت دیزل و احتراق ثانویه بیودیزل باعث تشکیل دو جبهه شعله در محفظه احتراق می گردد. وقوع پدیده کوبش<sup>۱</sup> از نتایج دو جبهه ای شدن شعله در محفظه احتراق است که باعث تلفات در قدرت خروجی می گردد.

۴- نتایج محاسبات سه شاخص عملکردی ذکر شده در

جداول ۷، ۸ و ۹ را می توان مطابق موارد مشروح

ذیل بررسی نمود:

۴-۱- میزان بازده حرارتی اندیکه سوخت دیزل بالاتر از سوخت B20 می باشد. این اختلاف از وابستگی مقادیر  $\eta_i$  به عنوان تابعی از  $F_R$  (نسبت سوخت به هوای نسبی) و همچنین  $F_C$  (نسبت سوخت به هوای کامل) ناشی می شود. براین اساس اختلاف اندک بازده حرارتی اندیکه برای سوخت دیزل و B20 عدم نیاز به هرگونه تغییرات در ساختار یک موتور دیزل را برای استفاده از سوخت B20 تأیید می نماید.

۴-۲- علل یکسان شدن میزان بازده حجمی برای دو سوخت دیزل و B100 که مطابق با گام ۱۲ از جدول ۸ محاسبه شده است، عدم وابستگی پارامترهای تشکیل دهنده آن  $(a, Z, K_p, K_{IC})$  به مشخصه های ترکیب سوخت است. اما همان طور که مشاهده شد با محاسبه بازده حجمی از معادله ۱۱ که پارامترهای آن تابعی از مشخصه های ترکیب سوخت هستند، میزان بازده حجمی بالاتری برای ترکیب B20 محاسبه گردید. این پارامتر که در واقع به عنوان تاثیرگذارترین عامل در شتاب گیری است، به عنوان معیاری از عملکرد اجزای موتور در پمپاژ هوای ورودی به سیلندرها معرفی می شود و در واقع یک معیار سنجش کیفی برای موتور می باشد.

۴-۳- براساس معادله بیان شده در گام سیزدهم از جدول ۸ محاسبه مشخصه های احتراق، ظرفیت هواپذیری و ارزش حرارتی سوخت و همچنین  $\eta_{th}$  بازده حرارتی ایده آل از مهم ترین شاخص های تاثیرگذار بر روی میزان توان خروجی موتور هستند، زیرا پارامترهای  $\rho_a$  چگالی هوا،  $A_p$  سطح مقطع پیستون،  $Sp$  سرعت کورس پیستون ثابت بوده و نوع سوخت محترق شده در موتور مدل تغییری در این شاخص ها نمی دهد. بر این اساس مطابق جدول ۹ میزان  $P_i$  یا توان خروجی موتور مدل با سوخت دیزل خالص با اختلاف اندکی بالاتر از توان خروجی برای سوخت B20 است. با توجه به نتایج حاصل، سوخت تجدید پذیر بیودیزل با متوسط درصد پایین تر انتشار آلایندها و همچنین شرایط مناسب و آسان تر نگه داری و

افزایش تقاضا برای مصرف انرژی، کاهش ذخایر انرژی با منشأ فسیلی و همچنین سیاست گذاری های کلان در زمینه اعمال محدودیت های سخت گیرانه تر در خصوص آلاینده های زیست محیطی این رقابت را جدی تر می نماید. در جدول ۱۱ مشخصه های موتور دیزل نشان داده شده است.

انتقال به سبب مشخصه های شیمیایی آن از جمله دمای اشتعال بالاتر نسبت به سوخت دیزل و اختلاف جزئی در میزان شاخص های عملکردی در احتراق، می تواند به عنوان گزینه ای جدی برای جایگزینی سوخت دیزل با منشأ فسیلی مورد توجه قرار گیرد. این امر در حالی است که عواملی چون روند

جدول ۱۱ - فهرست مشخصه های موتور دیزل

نشانه	شرح	واحد
b	قطر سیلندر	inch
s	کورس پیستون	inch
$A_p$	سطح مقطع پیستون	$ft^2$
$V_d$	حجم جابجائی پیستون	$ft^3$
$V_T$	ظرفیت حجمی موتور	$ft^3$
r	نسبت تراکم	-
J	ثابت ابعادی.	$ft.lbf/Btu$
$\dot{M}_a$	دبی جرمی جریان هوا	$ft^3/sec$
$\dot{M}_f$	دبی جرمی جریان سوخت	$gr/sec$
F	نسبت جرمی سوخت به هوا	-
$F_c$	نسبت سوخت به هوای صحیح	-
$F_R$	نسبت سوخت به هوای نسبی	-
$Q_c$	ارزش حرارتی سوخت	$Btu /lb$
HHV	ارزش حرارتی بالاتر	$Btu /lb$
NHV	ارزش حرارتی خالص	$Btu /lb$
$P_i$	توان اندیکه	$kW$
$P_b$	توان ترمزی	$kW$
$\eta_{th}$	بازده حرارتی موتور	%
$\eta_m$	بازده مکانیکی	%
$e_v$	بازده حجمی موتور	%
$e'_v$	بازده حجمی مانده	%
$K_f$	پارامتر اثر نسبت سوخت و هوا بر بازده حجمی	-
$K_{IC}$	پارامتر اثر زمان بسته شدن سوپاپ ورودی بر بازده حجمی	-
a	سرعت صوت در دمای ورودی	$ft/sec$
$K_p$	پارامتر اثر نسبت فشار خروجی به ورودی بر بازده حجمی	-
$K_{IP}$	پارامتر اثر طول و قطر بر بازده حجمی	-
Z	اندیس ماخ	-

$\alpha$	نسبت $P_3/P_2$ در چرخه فشار محدود	-
$\beta$	نسبت $V_4/V_3$ در چرخه فشار محدود	-
$k$	نسبت $C_p/C_v$	-
$n_P$	ضریب مولی محصولات احتراق	-
$n_R$	ضریب مولی واکنش دهندها	-

## منابع

1. [www.Biodiesel.org](http://www.Biodiesel.org) / Standards & Warranties.htm
2. Shaine Tyson K., 2006, "Biodiesel Handling and Use Guideline, 2<sup>nd</sup> version, U.S Department of Energy
3. EPA office, 2004, "Cleaner Diesel Handbook", Environmental Defense
4. Chevron Products Company, 1998, Diesel Fuel Technical Review, Chevron U.S.A Inc.
5. Mahon L. L. J., 2004, "Diesel Generator Handbook, Elsevier Butterworth-Heinemann
6. National Biodiesel Board: <http://www.biodiesel-intl.com/index.htm>
7. Van Gerpen J., 2005, "Biodiesel Processing & Production", Fuel Processing Technology Journal
8. Van Gerpen J., Shanks B., Pruszko R., Clements D. & Knothe G., 2004, Van Gerpen J., Shanks B., Pruszko R., Clements D. & Knothe G., 2004, "Biodiesel Production Technology, National Renewable Energy Laboratory
9. طوبی - حسن، ۱۳۸۱، "مبانی طراحی کوره های صنعتی"، تألیف، انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان
۱۰. امیدی کاشانی- بهزاد، ۱۳۸۳، "محاسبات و تئوری احتراق"، ترجمه، انتشارات واژگان خرد- دانشگاه بیرجند
۱۱. پیروزپناه- وهاب، ۱۳۷۶، "موتورهای احتراق داخلی"، ترجمه، جلد اول، انتشارات مرکز نشر دانشگاهی
12. Ferguson R. & Kirkpatrick Allan T., 2000, "Internal Combustion Engines Applied Thermo sciences", 2<sup>nd</sup> Edition, Jhon Wiley & Sons Inc.