مقاله

موتورهای پیشرفته با احتراق دما پایین
چشم‌انداز تحقیقات آینده

امیرحسن کاکایی
استادیار دانشکدهٔ مهندسی خودرو
دانشگاه علم و صنعت ایران
Kakaee_ah@iust.ac.ir

امین پیکانی*
دانشجوی دکتری دانشکدهٔ مهندسی خودرو
دانشگاه علم و صنعت ایران
paykani@iust.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۹/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۰/۱۴

چکیده

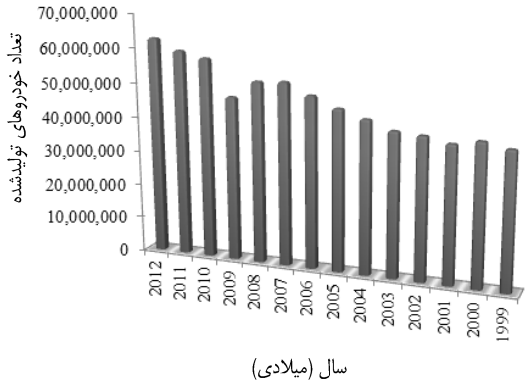
موتور احتراق داخلی به‌عنوان وسیله‌ای برای تبدیل انرژی، اداوتی بسیار باارزش‌اند. امروزه توانایی موتور احتراق داخلی در تولید قدرت ماندگار و مطمئن از لحاظ اقتصادی برای کاربردهای ثابت و متحرک منجر به تولید انبوه آنها در طرح‌های متنوع شده است. در این مقاله، مزایا و معیاب موتورهای احتراق داخلی در مقایسه با سایر دستگاه‌های تولید توان مطرح می‌شود. سپس فرصت‌ها و تهدیدها در زمینهٔ تحقیقات تجربی و عددی انواع موتورهای احتراق داخلی به‌اجمال بررسی می‌گردد. در این رهگذر، موتورهایی با احتراق پیشرفتهٔ دماپایین به‌طور مفصل مورد بررسی قرار می‌گیرند. با استفاده از نتایج به‌دست آمده می‌توان گفت که استفاده از مفاهیم پیشرفتهٔ احتراقی در آینده به‌منظور افزایش بازده و کاهش آلایندگی ضروری است. در نهایت می‌توان عنوان کرد که استفاده از راهبرد اشتعال تراکمی کنترل واکنشی در موتور احتراق داخلی که انعطاف‌پذیری استفاده از سوخت‌های متنوع را فراهم می‌کند، سبب افزایش بازده و کاهش آلایندگی موتور خواهد شد.

واژگان کلیدی: موتور احتراق داخلی، اشتعال تراکمی کنترل واکنشی، بازده، آلایندگی

۱. مقدمه

چرا همچنان به تحقیق دربارهٔ موتورهای احتراق داخلی نیازمندیم؟ جامعه همچنان به موتورهای احتراق داخلی به‌منظور حمل‌ونقل، تجارت و تولید توان نیازمند است. به‌همین دلیل است که تحقیقات دربارهٔ موتورهای احتراق داخلی بیش از یک قرن ادامه دارد و همچنان نیز در حال انجام می‌باشد. موتورهای احتراق داخلی به تمامی ابزارهای کاربردی (مانند پمپ‌ها، ماشین‌های چمن‌زنی، اره‌ها، ژنراتورهای قابل‌حمل و جز این‌ها)، تراکتورها، کشتی‌های اقیانوس‌پیما، موتورسیکلت‌ها به‌علاوهٔ ۷۵۰ میلیون خودرو موجود در سطح جاده‌های جهان توان می‌دهند. بنا بر آمار منتشره، در سال ۲۰۱۲ م شصت میلیون خودرو در جهان تولید شده است که نسبت به دههٔ گذشته افزایشی پنجاه

درصدی دارد (شکل ۱) [۱]. یک‌سوم خودروهای تولیدشده در اتحادیهٔ اروپا ساخته می‌شوند و نیمی از آنها توسط موتورهای دیزل، به‌دلیل بازدهٔ سوخت بالاترشان، توان می‌گیرند. بنابراین، تحقیقات در عرصهٔ موتورهای احتراق داخلی، هم موتورهای بنزینی را دربر می‌گیرد، هم موتورهای دیزل را. حتی کوچکترین بهبود در بازده آنها اثر چشمگیری بر اقتصاد سوخت و آلودگی خواهد داشت. این تعداد چشمگیر خودرو و موتور در جهان مقدار قابل توجهی سوخت را می‌سوزانند. در واقع، ۷۰ درصد از ۸۶ میلیون بشکه نفت خامی که هر روز مصرف می‌کنیم، در موتورهای احتراق داخلی استفاده می‌شوند.



شکل ۱. روند رشد تولید خودرو طی سال‌های اخیر

در کنار این مصرف بسیار زیاد نفت، انتشار آلاینده‌هایی چون اکسیدهای نیتروژن[۱] و ذرات (دوده)، همچنین تولید گاز دی اکسید کربن نیز وجود خواهد داشت. انتشار این آلاینده‌ها پیامدهایی جدی در عرصهٔ محیط زیست و سلامتی بشر به‌همراه دارد، بنابراین اکثر دولت‌ها قوانین سختی را تصویب و اعمال کرده‌اند؛ مقرراتی که همه‌روزه در حال سخت‌تر شدن هستند. به‌علاوه، تولید سالانهٔ ۳۷ میلیارد تن دی اکسید کربن در سطح جهان منجر به تولید گازهای گلخانه‌ای[۲] شده است که می‌تواند به تغییرات آب‌وهوایی با نتایج غیرقابل پیش‌بینی بیانجامد. بدین منظور، کاهش شدید مصرف سوخت جهت تغییر محسوس روند تولید گازهای گلخانه‌ای الزامی است. مثلاً، نقشهٔ راه آژانس بین‌المللی انرژی[۳]، کاهش مصرف سوخت در هر کیلومتر به میزان ۳۰ تا ۵۰ درصد در خودروهای جدید در سراسر جهان تا سال ۲۰۳۰ م و از همه وسائل نقلیه تا سال ۲۰۵۰ م را در بر می‌گیرد [۲].

قوانین و مقررات سخت‌گیرانه‌ای که چنین کاهش‌هایی را ملزم می‌کنند، وظیفهٔ دشواری را بر صنعت خودروسازی قرار داده است. اگرچه تا سال ۲۰۵۰ م فاصله‌ای طولانی مانده است، اما زمان لازم برای تولید موتورهای جدید به‌همراه زمان لازم برای نفوذ و ترویج فناوری‌های جدید در تمامی ناوگان‌های وسائط نقلیه، بدین معناست که تلاش و سرمایه‌گذاری بزرگی در زمینهٔ تحقیقات در عرصهٔ موتورهای احتراق داخلی در دهه‌های آتی مورد نیاز است. از بحث‌های همیشگی دربارهٔ نقاط ضعف موتور احتراق داخلی مربوط به جایگزینی آن با دستگاه تولید توان کارآمدتر همواره وجود داشته است. ایده‌های جدید مرتباً ارائه می‌شوند، اما هزینه، پیچیدگی و کاستی‌های طراحی مورد غفلت واقع شده معمولاً تحقق عملی آنها را محدود می‌کنند. مثال‌هایی که موفقیت چندانی نداشته‌اند شامل موتورهای استرلینگ[۴]، موتورهای دوار[۵]، خورشیدی[۶] و هیدروژنی[۷] و اخیراً موتورهای پیل سوختی[۸] می‌باشند. خودروهای هیبرید الکتریکی در برخی کاربردهای سبک مزایایی دارند، اما مزایای آنها به‌طور چشمگیری به سیکل رانندگی وابسته است و در سیکل شهری نسبت به رانندگی در مسافت طولانی بهتر هستند. همچنین، باید اشاره کرد که بازده حرارتی تولید الکتریسیته در ایستگاه‌های توان (برای شارژ خودروهای پلاگین هیبریدی با باتری) معمولاً کمتر از ۵۰ درصد است. این حالت، بازده انرژی کلی را از همان ابتدا به‌شدت محدود می‌کند. به‌علاوه، افت‌های بیشتر نیز باید در نظر گرفته شوند، مانند مواردی از استخراج تا انتقال سوخت، رساندن توان به کاربر نهایی، و افت‌های ذخیرهٔ انرژی به‌علاوهٔ افت‌های تجهیزات جانبی و خط رانش روی خود خودرو [۳]. با در نظر گرفتن این مطلب، هزینهٔ نسبتاً پایین، دوام بالا و راحتی موتور احتراق

داخلی در ترکیب با توانایی آن در استفاده از سوخت‌های مایع با چگالی انرژی بالا، جایگزین‌کردن آن را مشکل کرده است. به‌علاوه، جایگزین مشخصی برای موتور احتراق داخلی در بازارهای خودروهای تجاری نیمه‌سنگین و سنگین نیز وجود ندارد. همچنین واضح است که میل جهانی به استفاده از نفت در طولانی مدت قابل توجیح نیست و این مسئله نیاز به تحقیق بیشتر را ایجاب می‌کند. با توجه به مطالب ذکرشده می‌توان گفت که جهان به تکیه بر موتور احتراق داخلی همچنان ادامه می‌دهد و این موتورها می‌توانند برای کار با منابع سوخت غیرفسیلی همچون زیست‌سوخت[9]های تجدیدپذیر نیز تبدیل شوند.

۲. فرصت‌ها و تهدیدها در تحقیقات موتور

احتراق در موتور می‌تواند به‌صورت جریانی آشفته با عدد ماخ پایین، تراکم‌پذیر، چندفازی با عدد رینولدز بالا به‌همراه واکنش‌های شیمیایی و انتقال حرارت و محدود در یک هندسهٔ متغیر با زمان توصیف شود. فرایند احتراق چندین رژیم که شامل انتشار شعلهٔ آشفته، سوختن با کنترل ترکیبی و فرایندهایی با کنترل شیمیایی، به‌علاوه ترکیب‌های آنها می‌باشد را طی می‌کند. توصیف این فرایندهای تعاملی پیچیده، قطعاً نیاز به فهم کاملی از فرایندهای فیزیکی و شیمیایی احتراق در داخل موتور را داراست. در واقع، موتور احتراق داخلی یک وسیلهٔ آموزشی کامل است؛ زیرا بر تمامی حوزه‌های دانش مهندسی مکانیک، به استثنای واکنش هسته‌ای، تکیه دارد [۴].

اغلب فعالیت‌های تحقیقاتی در زمینهٔ موتور احتراق داخلی شامل مطالعات بر روی موتورهای احتراق اشتعال جرقه‌ای، احتراق دیزل متداول[10] و اشتعال تراکمی[11] پیشرفته می‌باشد. بیشتر تحقیقات اخیر بر بهبود درک اشتعال، که به‌میزان زیادی به ترکیب شیمیایی سوخت وابسته است، و بر افزایش کیفیت مخلوط هوا و سوخت برای بازده احتراق بهبودیافته در هر دو موتور بنزینی و دیزل تمرکز شده است. پیشرفت تحقیقات با ظهور ابزارهای جدید در عیب‌یابی لیزری است که اجازهٔ توصیف جریان‌های داخل سیلندر، دماهای احتراق و ترکیب گونه‌ها با جزئیات جدید به‌همراه مدل‌های دینامیک سیالات محاسباتی[12] را می‌دهد [۵]. در واقع، ابزارهای دینامیک سیالات محاسباتی کنونی به اندازهٔ کافی تکامل یافته‌اند تا طراحی و توسعهٔ بهتر و دقیق‌تر موتورهای احتراق داخلی را انجام دهند. مدل‌سازی به توسعهٔ طرح‌های جدید احتراقی دماپایین[13] کمک می‌کند [۶]. راهبردهای احتراقی دماپایین شامل اشتعال تراکمی مخلوط همگن[14]، اشتعال تراکمی مخلوط پیش‌آمیخته[15] و اشتعال تراکمی کنترل واکنشی[16] می‌باشند. در حال حاضر اینها و سایر فناوری‌های پیشرفتهٔ احتراقی توسط تمامی شرکت‌های بزرگ خودروسازی، دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی دنبال می‌شوند [۷].

۳. مدل‌سازی و شبیه‌سازی موتور

به‌جای توصیف فرایندهای موتور به‌صورت تجربی، همانند تحلیل‌های کلاسیک براساس ترمودینامیک، کدهای کامپیوتری جامع به‌طور وسیعی در عرصهٔ تحقیقات موتور استفاده می‌شوند. معادلات بقای حاکم دیفرانسیلی با مشتقات جزئی ناویر استوکس روی شبکهٔ عددی حل می‌شوند که هندسهٔ متغیر با زمان موتور را در مدت هر چرخه دنبال می‌کند. زیرمدل‌ها همچنان برای توصیف فرایندهایی که در مقیاس‌های زمانی و طولی بسیار کوچک اتفاق می‌افتند لازم هستند تا بار دیگر در شبیه‌سازی‌ها حل شوند. اطمینان فزاینده استفاده از روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی در طراحی موتورها به کدهای بهبودیافته از نظر صحت و راحتی استفاده بستگی دارد. دو کد پیشگام در این زمینه که شامل کیوا (توسعه‌یافته در آزمایشگاه ملی لوس آلاموس امریکا) و استار سی‌دی (توسعه‌یافته در کالج سلطنتی بریتانیا) هستند، کمک قابل توجهی به کاربرد روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی در شبیه‌سازی موتور کرده‌اند. این کدها دائماً توسط محققان توسعه یافته‌اند و تلاش آنها منجر به آفرینش تعدادی از

مدل‌های جدید شده است. از زمان معرفی کد کیوا، این کد به فرم منبع باز نگه‌داری شده است که توسعهٔ بیشتر آن را آسان می‌کند [۸]. کد کیوا بستر بازی برای محققان در دنیا فراهم می‌کند تا مدل‌هایشان را برای شبیه‌سازی موتور تست و ارزیابی کنند. با این‌وجود، فرایند پیچیدهٔ تولید شبکه و فقدان محیط کاربرپسند مانع از شهرت جهانی کیوا شده است.

از جمله کدهایی که به‌تازگی کاربرد زیادی در حل مسائل احتراق پیدا کرده است، کد متن‌باز اپن‌فوم[۱۷] است. اپن‌فوم یک جعبه‌ابزار دینامیک سیالات محاسباتی است که به‌کمک آن می‌توان هر نوع مسئلهٔ شبیه‌سازی، از جمله حل عددی جریان سیال، را از مسائل ساده تا بسیار پیچیده انجام داد. اپن‌فوم با تعدادی تحلیلگر پیش‌ساخته، کاربردها و کتابخانه‌ها ارائه شده است و می‌تواند به‌عنوان یک بستهٔ شبیه‌سازی معمولی مورد استفاده قرار گیرد. در حالی‌که علاوه بر باز و آزادبودن کد منبع آن، قابلیت توسعه در ساختار و سلسله مراتب حلگرها، کاربردها و نیز کتابخانه‌ها را نیز داراست. اپن‌فوم از شیوهٔ عددی حجم محدود برای حل دستگاه معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی استفاده می‌کند. حلگرهای جریان سیال در یک چارچوب تکراری سرعت - فشار ضمنی قدرتمند توسعه یافته است [۹]. گروه تحقیقات موتور در دانشگاه پلی‌تکنیک میلان تحقیقات گسترده‌ای را برای توسعهٔ کد اپن‌فوم انجام داده‌اند و هم‌اکنون نیز پروژه‌های تحقیقاتی متنوعی در زمینهٔ شبیه‌سازی موتورهای احتراق داخلی با استفاده از اپن‌فوم در حال انجام می‌باشد.

٤. آزمایشات موتور

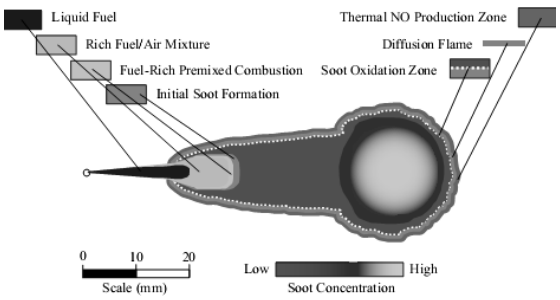
توسعهٔ مدل‌های دینامیک سیالات محاسباتی به‌میزان زیادی از آزمایشات بسیار همراه و هماهنگ سود می‌برد. برای درک فرایندهایی که می‌توانند منجر به بهبود عملکرد موتور شوند مهم هستند. ابزارهای عیب‌یابی همچون تشعشعی لیزر القائی صفحه‌ای، نورتابی شیمیایی (تصویربرداری و انتشار طیف) و انتشار حرارتی دوده اطلاعات جزئی دربارهٔ توزیع‌های فضایی و زمانی گونه‌های مهم داخل سیلندر، شامل گونه‌های میانی احتراق، رادیکال‌ها و ذرات فراهم می‌آورند. جزئیات جریان میدان می‌تواند با استفاده از روش‌های سرعت تصویر ذرات[۱۸] یا آنمومتری فاز تصویر[۱۹] برای تحلیل اندازه و سرعت پاشش قطره به‌دست آیند. البته استفاده از این روش‌ها نیازمند دسترسی بصری به محفظهٔ احتراق می‌باشد.

تصویربرداری آندوسکوپی با کیفیت بالا از احتراق آسان‌تر بوده، همچنین اطلاعات باارزشی را فراهم می‌آورد. تمایل به ابزاهای عیب‌یابی تصویری سرعت‌بالا اجازهٔ دنبال‌کردن زمانی فرایندهای کلیدی در طول صدها سیکل متوالی موتور را می‌دهد. این مورد به‌خصوص برای توصیف تغییرات سیکلی و وقایع نادر که عملکرد موتور را محدود می‌کنند ارزشمند است. آزمایشات خارج از موتور نیز اطلاعات باارزشی برای فهم فرایندهای موتور فراهم می‌آورند. مثلاً، آزمایشات لولهٔ شوک و ماشین تراکم سریع داده‌های مورد نیاز دربارهٔ ویژگی‌های اشتعال سوخت‌ها را فراهم می‌آورند. آزمایشات محفظهٔ احتراقی حجم‌ثابت اطلاعاتی دربارهٔ تبخیر افشانه سوخت، ترکیب سوخت و هوا، اشتعال افشانهٔ سوخت، بلندشدن شعله و آثار سوخت بر تشکیل و اکسیداسیون ذرات (دوده) فراهم می‌آورد. اندازه‌گیری‌های سرعت شعله (هم آرام و هم آشفته) برای توسعهٔ مدل‌های انتشار شعله مفید هستند. با این‌حال، مهم است که آزمایشات رژیم‌های دمایی، نسبت هم‌ارزی، آشفتگی، فشار و ترکیب (شامل بازخورانی گازهای خروجی[۲۰]) موتورهای مورد نظر را پوشش دهند [۱۰].

۵. موتورهای دیزل

موتورهای دیزل به‌دلیل بازده سوخت عالی و نیاز جهانی برای کاهش انتشار آلایندهٔ دی اکسید کربن، که مستقیماً مربوط به مصرف سوخت است، جذاب‌اند. موتورهای دیزل جدید برای خودرو نسبت به همتای بنزینی خود، ۲۰ تا ۴۰

درصد از لحاظ مصرف سوخت کارآمدتر است. بازده بالاتر تاحدودی به‌دلیل این واقعیت است که کنترل بار بدون کنترل جریان هوای ورودی به‌دست می‌آید، بنابراین افت‌های مکش و پمپاژ کاهش پیدا می‌کند. در عوض، کنترل بار با تغییر مقدار سوخت پاشیده‌شده به‌صورت مستقیم در داخل سیلندر به‌دست می‌آید [۱۱]. در موتورهای معمول دیزل، سوخت در نزدیکی نقطهٔ مرگ بالا پاشیده می‌شود. اشتعال و احتراق در هنگامی‌که سوخت پاشیده می‌شود اتفاق می‌افتد و نرخ احتراق توسط نرخ‌های پاشش و ورود هوا به‌داخل جت سوخت کنترل می‌شود. نسبت هم‌ارزی مخلوط در افشانهٔ احتراقی تغییر می‌کند و محدوده‌های دما بالا و نسبت هم‌ارزی نسبتاً پایین منجر به تشکیل اکسیدهای نیتروژن می‌شوند، در حالی‌که تشکیل دوده در نسبت هم‌ارزی بالا و مناطق دمایی متوسط مطلوب است (شکل ۲).



شکل ۲. مدل مفهومی از احتراق دیزل [۱۲]

اقدامات انجام‌شده برای برآوردن الزامات آلایندگی مانند استفاده از زمان‌بندی‌های پاشش سوخت (جهت اجازهٔ زمان بیشتر برای اختلاط سوخت و هوا)، کاربرد مقادیر بزرگ بازخورانی گازهای خروجی (جهت رقیق‌کردن بار و کم‌کردن دماهای محلی)، یا استفاده از فشارهای پاشش بسیار بالا تا ۳۰۰۰ بار (برای بهبود اختلاط) تمایل به کاهش بازده‌های سوخت موتور دیزل و همچنین افزایش هزینهٔ موتور دارند. بیشتر سازندگان موتور دیزل استفاده از سامانهٔ کاتالیستی انتخابی کاهشی[۲۱] را برای کاهش آلایندهٔ اکسیدهای نیتروژن در گازهای خروجی پیشنهاد کرده‌اند. با این‌حال، با استفاده ازاین سامانه مصرف سوخت افزایش می‌یابد؛ زیرا یک عامل کاهنده مانند اوره در نرخ‌های حدود ۱ درصد از نرخ جریان سوخت برای هر یک گرم بر کیلووات ساعت کاهش مطلوب اکسیدهای نیتروژن به‌داخل جریان خروجی پاشیده می‌شود. این امر بسته به کالیبراسیون موتور، می‌تواند منجر به مقدار ۲ تا ۴ درصد مصرف سوخت بیشتر شود. کنترل دوده با استفاده از فیلترهای ذرات دیزل[۲۲] حاصل می‌شود که نیازمند بازیابی تناوبی با تنظیم نسبت هم‌ارزی مخلوط سوخت و هوا جهت افزایش دماهای خروجی برای سوختن دودهٔ انباشته‌شده می‌باشد. این امر نیز ۳ درصد مصرف سوخت اضافی را تحمیل می‌کند. لازم به‌ذکر است که هزینهٔ سیستم کاهش آلاینده‌های خروجی روی یک کامیون امروزی تقریباً با هزینهٔ خود موتور یکسان است، بنابراین هزینه‌ای چشمگیر را برای مصرف‌کننده تحمیل خواهد کرد [۱۳].

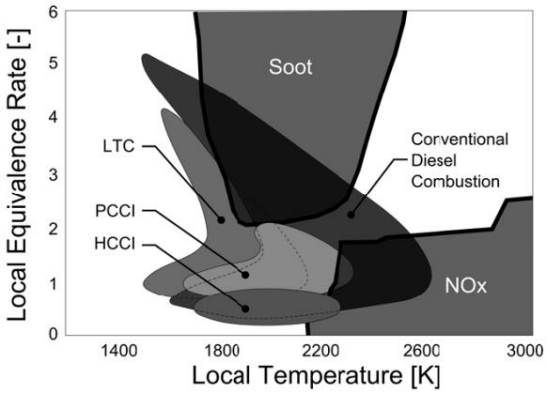
استفاده از پاشش چندمرحله‌ای با زمان‌بندی مناسب می‌تواند گسترهٔ بیش از حد مناطق سوخت غنی در محفظهٔ احتراق را کاهش دهد و تشکیل دوده را کم کند. افزایش تأخیر در اشتعال، شعلهٔ دیزل را به اندازهٔ کافی در پایین‌دست نازل انژکتور قرار می‌دهد که هوای اضافه‌شده را به‌داخل جت نسبت‌های هم‌ارزی محلی زیر تقریباً ۲ قرار می‌دهد. همچنین این نرخ نسبت هم‌ارزی به اندازهٔ کافی برای احتراق بدون دوده فقیر است. تأخیر در اشتعال بیشتر با استفاده از سوخت با عدد ستان[۲۳] پایین به‌همراه پاشش و شرایط ترمودینامیکی مناسب به‌دست می‌آید. کاربرد سوخت‌های اکسیژن‌دار نیز مقدار هوای اضافه‌شده برای کاهش نسبت هم‌ارزی محلی را کاهش می‌دهد و بنابراین آلایندهٔ دوده را کم می‌کند. با این‌حال، سوخت‌های اکسیژن‌دار نیز قادرند آلاینده‌های اکسیدهای نیتروژن را با نزدیک‌کردن احتراق به عملکرد استوکیومتری افزایش دهند که منجر به دماهای شعلهٔ بالاتر می‌شود.

٦. موتورها با احتراق پیشرفتهٔ دماپایین

در سال‌های اخیر به‌منظور برآوردن الزامات آلایندگی حال و آینده، راهبردهای پیشرفتهٔ احتراقی متعددی پیشنهاد شده است. بسیاری از راهبردهای کنونی در دستهٔ احتراق دماپایین جای می‌گیرند. همچنین محققان متعددی نشان داده‌اند که راهبردهای اشتعال تراکمی مخلوط همگن و اشتعال تراکمی مخلوط پیش‌آمیخته روش‌های مطمئنی برای کاهش همزمان آلاینده‌های اکسیدهای نیتروژن و دوده می‌باشند. همچنین عملکرد احتراق دماپایین به‌دلیل کاهش مدت زمان احتراق و نرخ انتقال حرارت کمتر، قادر به کاهش مؤثر آلاینده‌های اکسیدهای نیتروژن و دوده و حفظ بازده سوخت بالا می‌باشد. یکی از راهبردهای احتراقی دماپایین، که تحقیقات جامعی درمورد آن انجام شده است، احتراق اشتعال تراکمی مخلوط همگن است که می‌توان آن‌را به‌صورت آمیزه‌ای از راهبردهای احتراقی اشتعال تراکمی و اشتعال جرقه‌ای توصیف کرد. در این موتورها مخلوط سوخت و هوا به‌صورت ایده‌آل خارج از سیلندر آماده می‌شود و به‌صورت یک مخلوط همگن به‌داخل سیلندر رانده می‌شود. موتور بدون دریچهٔ گاز کار می‌کند و بار به‌وسیلهٔ نسبت هم‌ارزی مخلوط و شرایط ترمودینامیکی کنترل می‌شود (یعنی فشار و دمای مخلوط گاز داخل سیلندر). به‌علت طبیعت فرایند اشتعال، این نوع احتراق معمولاً به‌صورت کنترل سینتیکی شناخته می‌شود. بار با اختلاط زیاد خود به‌خود مشتعل می‌شود و احتراق تقریباً یکنواخت همزمان و سریع در سرتاسر سیلندر رخ می‌دهد. این آزادسازی گرمای سریع، نرخ افزایش فشار حداکثر سریعی تولید می‌کند که در بارهای بالا می‌تواند خصوصیات لرزش و سروصدای مکانیکی مضری ایجاد کند. همچنین، این امر می‌تواند اثر منفی بر افت گرمایی موتور داشته باشد؛ زیرا با افزایش بار موتور، مقدار گرمای آزادشده و نرخ افزایش فشار حداکثر افزایش می‌یابند. این یک مانع فنی و عملی است که همچنان احتراق اشتعال تراکمی مخلوط همگن با آن مواجه است [۱۴].

احتراق اشتعال تراکمی مخلوط پیش‌آمیخته، احتراق ترکیبی بین احتراق اشتعال تراکمی مخلوط همگن و احتراق دیفیوژنی می‌باشد. قبل از شروع اشتعال، سوخت و هوا مخلوط می‌شوند، اما توزیع مخلوط همگن نمی‌باشد. همچنین در مقایسه با احتراق اشتعال تراکمی مخلوط همگن، کنترل احتراق توسط پاشش صورت می‌گیرد و لذا نرخ حداکثر افزایش فشار کاهش یافته و در نتیجه بازخورانی گازهای خروجی کمتری مورد نیاز خواهد بود که به‌دلیل افزایش مطبق‌سازی می‌باشد. اگرچه این راه‌حل تا حدی کنترل روی فاز احتراق را ممکن می‌سازد، اما نمی‌تواند قابلیت کنترل چرخه به‌چرخهٔ مورد نیاز برای فرایندهای احتراق کاملاً پیش‌آمیخته یا پیش‌آمیختهٔ جزئی را مهیا کند. همچنین وقتی از یک سوخت با واکنش‌پذیری پایین استفاده می‌شود، دستیابی به احتراق پایدار در بارهای جزئی و متوسط امکان‌پذیر نمی‌باشد. این نکته بدین معناست که مطبق‌سازی پتانسیل کنترل احتراق و گسترش محدودهٔ عملکردی احتراق احتراق اشتعال تراکمی مخلوط همگن را دارد، اما کافی نیست [۱۵].

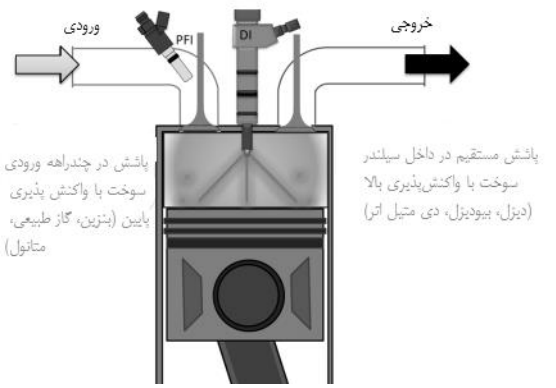
رژیم‌های عملکردی دیزل متداول، اشتعال تراکمی مخلوط همگن، احتراق اشتعال تراکمی مخلوط پیش‌آمیخته و احتراق دماپایین در فضای دما – نسبت هم‌ارزی در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳. تغییرات دما و نسبت هم‌ارزی در رژیم‌های عملکردی دیزل متداول، اشتعال تراکمی مخلوط همگن، اشتعال تراکمی مخلوط پیش‌آمیخته و احتراق دماپایین [۱۶]

اگرچه مرزهای رژیم‌های احتراقی نشان داده‌شده در این شکل تاحدی اختیاری است، اما شکل برای درک خصوصیات احتراقی مختلف مفید می‌باشد. احتراق اشتعال تراکمی مخلوط پیش‌آمیخته با افزایش زمان اختلاط قبل از احتراق به‌دست می‌آید، بنابراین نسبت‌های حداکثر هم‌ارزی زیر آستانهٔ تشکیل آلایندهٔ دوده هستند. به‌علاوه اغلب مقادیر بالایی از بازخورانی گازهای خروجی برای کاهش غلظت اکسیژن و کاهش دماهای حداکثر شعله مورد استفاده قرار می‌گیرد. احتراق اشتعال تراکمی مخلوط پیش‌آمیخته منجر به انتقال به نسبت‌های کمتر هم‌ارزی محلی (به‌علت زمان اختلاط زیاد قبل از احتراق) و دمای حداکثر کمتر (به‌علت ترکیب نسبت‌های کمتر هم‌ارزی محلی و غلظت‌های کمتر اکسیژن) می‌شود که سبب خارج‌شدن نمودار از محدودهٔ دوده و تشکیل کمتر آلاینده اکسیدهای نیتروژن می‌شود. با کاهش بیشتر غلظت اکسیژن از طریق افزایش بازخورانی گازهای خروجی، احتراق دماپایین به‌دست می‌آید. غلظت‌های کمتر اکسیژن منجر به نسبت‌های بالاتر هم‌ارزی محلی در مقایسه با احتراق اشتعال تراکمی مخلوط پیش‌آمیخته می‌شود. منحنی احتراق دماپایین شکل مشابهی با منحنی دیزل متداول دارد اما غلظت کمتر اکسیژن منجر به دماهای کمتر شعله می‌شود و سبب خروج فرایند احتراق از محدودهٔ آلاینده اکسیدهای نیتروژن و احاطه‌کردن محدودهٔ کمتری از آلاینده دوده در مقایسه با موتورهای دیزل می‌شود [۱۶]. اگرچه راهبردهای اشتعال تراکمی پیش‌آمیخته قادر به کاهش همزمان آلاینده‌های اکسیدهای نیتروژن و دوده هستند، اما دو مشکل اصلی استفاده از این راهبردها را محدود کرده است. مسئلهٔ نخست کنترل فاز احتراق است. حتی هنگامی‌که از پاشش مستقیم به‌عنوان راهبرد تحویل سوخت استفاده می‌شود، زمان تأخیر در اشتعال باید به‌حد کافی بالا باشد تا زمان کافی برای اختلاط وجود داشته باشد. با این‌وجود، وقتی تأخیر در اشتعال تا بعد از خاتمهٔ پاشش ادامه می‌یابد، پاشش و اشتعال از هم جدا می‌شوند (یعنی تغییر در زمان پاشش منجر به تغییرات کوچک یا غیرقابل پیش‌بینی در فاز احتراق می‌شود). پس مقیاس‌های زمانی شیمیایی باید به‌نحوی کنترل شوند تا اشتعال در زمان مناسب رخ دهد. مسئلهٔ دوم کنترل نرخ آزادسازی گرماست. چون مانند احتراق دیزل متداول نرخ احتراق دیگر به‌وسیلهٔ فرایند اختلاط محدود نمی‌شود، آزادسازی گرما می‌تواند سریع باشد و منجر به سروصدای بیش از حد موتور و آسیب سازه‌ای به موتور شود [۱۷]. از طرف دیگر چون سوخت‌هایی چون بنزین مشکلات زیادی در اشتعال در شرایط بارهای کم دارند و سوخت‌هایی نظیر دیزل مشکلاتی در زمینهٔ کنترل فاز احتراق در شرایط بارهای بالا دارند، لذا بسیاری از محققان عملکرد اشتعال تراکمی پیش‌آمیخته را با استفاده از مخلوط این سوخت‌ها بررسی کرده‌اند. براساس مطالب بیان‌شده توسط محققان می‌توان عنوان کرد که احتمالاً نیاز به مخلوطهای مختلف سوخت در شرایط عملکردی مختلف خواهد بود (یعنی سوخت با عدد ستان بالا در بارهای کم و سوخت با عدد ستان پایین در بارهای بالا). بنابراین مطلوب است که موتور توانایی عملکرد با مخلوطهای متنوع سوخت، که طیف گسترده‌ای از سوخت‌ها از بنزین خالص تا دیزل خالص را بسته به شرایط عملکردی تحت پوشش قرار می‌دهد، داشته باشد [۱۸]. برای غلبه بر مشکلات مرتبط با موتورهای اشتعال تراکمی پیش‌آمیخته، روش جدید احتراقی اشتعال تراکمی دوگانه‌سوز در مرکز تحقیقات موتور دانشگاه ویسکانسین مدیسون ایالات متحده توسط پروفسور ریتز و همکارانش در سال ۲۰۱۰ معرفی شده است [۱۹]. همان‌طور که در شکل ۴ نمایش داده شده است، در این روش مخلوط سوخت داخل سیلندر توسط پاشش سوختی با واکنش‌پذیری پایین (مانند بنزین) در چندراههٔ ورودی همراه با پاشش چندمرحله‌ای بهینهٔ سوختی با واکنش‌پذیری بالا (مانند دیزل) در داخل سیلندر تهیه می‌شود. این استراتژی احتراقی اشتعال تراکمی کنترل واکنشی نامیده می‌شود و هم مطبق‌سازی نسبت هم‌ارزی و هم واکنش‌پذیری در داخل

محفظه ایجاد می‌کند. در این راهبرد، احتراق به‌طور مداوم از نواحی با واکنش‌پذیری بالا به نواحی با واکنش‌پذیری پایین پیشرفت می‌کند که در نتیجه به‌طور مؤثری نرخ‌های افزایش فشار را کمتر می‌کند. در راهبرد اشتعال تراکمی کنترل واکنشی چون پاشش‌ها به‌خوبی قبل از نقطهٔ مرگ بالا رخ می‌دهند و زمان کافی برای تبخیر سوخت و اختلاط وجود دارد، نیاز به فشارهای بالای پاشش سوخت نیست. راهبرد اشتعال تراکمی کنترل واکنشی محدودهٔ عملکردی بار موتور را فراتر از راهبردهای اشتعال تراکمی مخلوط همگن و اشتعال تراکمی مخلوط پیش‌آمیخته بسط می‌دهد؛ زیرا اختلاط سوخت به احتراق اجازه می‌دهد تا سازمان یابد. راهبرد احتراقی اشتعال تراکمی کنترل واکنشی با سوخت‌های بنزین و دیزل در یک موتور دیزل سنگین با نسبت تراکم ۱۲:۱ به فشار مؤثر متوسط اندیکاتوری ۲۳ بار دست یافته است [۲۰].



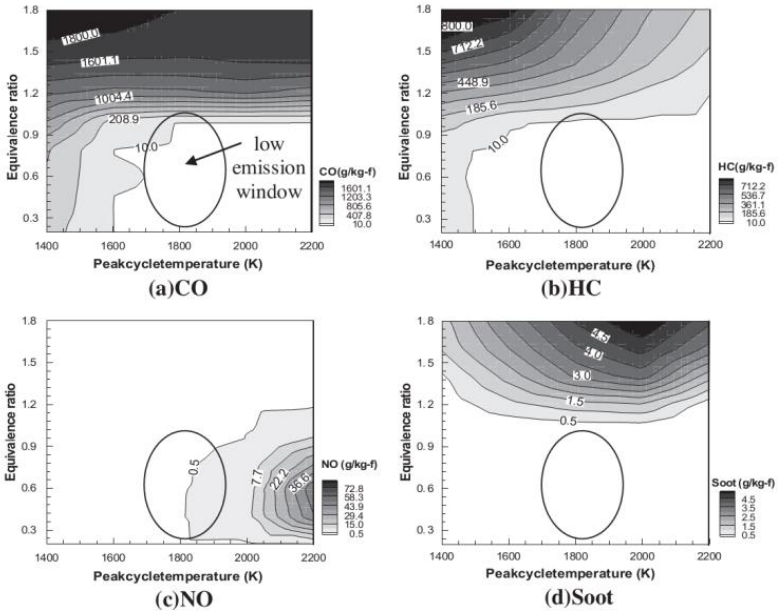
شکل ٤. شماتیک احتراق اشتعال تراکمی کنترل واکنشی

برخلاف سایر مفاهیم احتراقی دماپایین، فازبندی احتراق اشتعال تراکمی کنترل واکنشی توسط تنظیم سهم‌های سوخت‌ها با واکنش‌پذیری بالاتر و کمتر براساس همان چرخه یا چرخه بعدی و با کنترل پسخوراند مناسب احتراق قابل تغییر است. همچنین احتراق اشتعال تراکمی کنترل واکنشی انعطاف‌پذیری قابل توجهی در زمینهٔ انتخاب سوخت دارد. بازدهٔ بالا، آلایندگی کم با استفاده از پاشش مستقیم دیزل و پاشش در منیفولد گاز طبیعی، متانول و حتی اتانول هیدراته (که به‌دلیل واکنش‌پذیری ضعیف آنها به‌تنهایی در موتورهای بنزینی یا دیزل قابل استفاده نیستند) مشاهده شده است [۲۱]. تنها چالش باقیمانده با احتراق اشتعال تراکمی کنترل واکنشی آلاینده‌های هیدروکربن‌های نسوخته و مونو اکسید کربن می‌باشد که افزایش می‌یابند مگر دماهای احتراق در شرایط فقیر از ۱۶۰۰ کلوین تجاوز کنند. با این‌وجود، آزمایش‌های تجربی اخیر احتراق اشتعال تراکمی کنترل واکنشی نشان داد که استفاده از کاتالیست اکسیداسیونی دیزل[۲۴] (شبیه به کاتالیست سه‌راههٔ موتور بنزینی) در کاهش آلاینده‌های هیدروکربن‌های نسوخته و مونو اکسید کربن مؤثر است. همچنین استفاده از این کاتالیست میزان خیلی کم آلاینده ذرات را نیز کاهش می‌دهد [۲۲].

۷. نتیجه‌گیری

در سال‌های اخیر به‌دلیل منابع روبه پایان سوخت‌های فسیلی و سخت‌تر شدن قوانین آلایندگی،موتورها برای دستیابی به بازدهٔ سوخت بالا و آلایندگی کم به‌سمت راهبرد اشتعال تراکمی سوق پیدا کرده‌اند. به‌علت مشکلات مرتبط با آلاینده‌های اکسیدهای نیتروژن و دوده موتورهای اشتعال تراکمی که از احتراق ناهمگن ناشی می‌شود، راهبردهای احتراقی دماپایین پیشنهاد شده‌اند. عملکرد احتراق دماپایین به‌شدت توسط شیمی اشتعال سوخت کنترل می‌شود. راهبردهای احتراقی دماپایین شامل راهبردهای اشتعال تراکمی مخلوط همگن، احتراق اشتعال تراکمی مخلوط پیش‌آمیخته و اشتعال تراکمی کنترل واکنشی می‌باشند. نتایج تحقیقات گذشته نشان داده است که راهبردهای پیشرفتهٔ احتراقی همچون پاشش مستقیم بنزینی و اشتعال تراکمی کنترل واکنشی به ترتیب تا ۲۰ و ۴۰ تا ۵۰ درصد بازده سوخت بهتر در مقایسه با چرخه‌های دیزل استاندارد و موتور بنزینی متداول نشان داده‌اند. احتراق اشتعال تراکمی کنترل واکنشی با حل مشکلات مربوط به راهبردهای اشتعال تراکمی پیش‌آمیخته (کنترل فاز احتراق

و نرخ حداکثر افزایش فشار) جذابیت زیادی بین محققان موتور کسب کرده است. این راهبرد مزیت بیشتری در زمینهٔ انعطاف‌پذیری سوخت دارد. تا زمانی‌که دو سوخت واکنش‌پذیری‌های بسیار متفاوتی دارند، می‌توانند به‌طور مناسب در داخل سیلندر مخلوط شوند تا عملکرد بهینه را به‌صورت تابعی از بار و سرعت موتور به‌دست دهند. موتور اشتعال تراکمی کنترل واکنشی قادر به عملکرد با محدودهٔ وسیعی از سوخت‌ها شامل بنزین، گاز طبیعی و دیزل می‌باشد. همچنین این موتور قادر است با استفاده از یک سوخت همراه با اضافه‌کردن مقدار اندکی از ارتقادهنده ستانی عمل کند. علاوه بر این، با استفاده از سوخت‌های جایگزین یا تجدیدپذیر مانند اتانول هیدراته، متانول و بیودیزل می‌توان به احتراق اشتعال تراکمی کنترل واکنشی دست یافت. در نهایت این راهبرد به‌عنوان یک راهبرد پیشرفتهٔ احتراقی در موتورهای آینده می‌تواند به‌صورت موفقیت‌آمیز مورد استفاده قرار گیرد. همچنین می‌توان گفت این فناوری‌ها به‌دلیل اینکه نیاز به سیستم‌های خروجی گران‌قیمت کاهش آلاینده‌های اکسیدهای نیتروژن و دوده و سیستم‌های پاشش فشار بالا ندارند، مزیت هزینه‌ای قابل توجهی دارند.



شکل ۵. پیش‌بینی آلاینده‌های خروجی موتور اشتعال تراکمی مخلوط همگن براساس نسبت تراکم و حداکثر دمای سیلندر جرم سوخت ۲۰ میلی‌گرم، دور موتور ۲۰۰۰ دور بر دقیق [۲۳]. بیضی‌ها نشانگر ناحیه با آلایندگی کم هستند.

۸. مآخذ

[1] Total Cars Produced in the World, http://www.statisticbrain.com/cars-produced-in-the-world/ (accessed Jan 14, 2014)

[2] Energy Technology Perspectives, International Energy Agency, Paris, 2012, http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/name,31269,en.html (accessed Jan 12, 2014)

[3] Rahman, Z., Butler, K., and Ehsani, M., "A Study of Design Issues on Electrically Peaking Hybrid Electric Vehicle for Diverse Urban Driving Patterns," *SAE Technical Paper* 1999-01-1151, 1999, 1151.

[4] Heywood, J.B., *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw-Hill, 1988.

[5] Merker, G.P., Schwarz, Ch., Teichmann, R., *Combustion Engine Development: Mixture Formation, Combustion, Emissions and Simulation*, Springer, 2012.

[6] Shi, Y., H.W.Ge, R.D. Reitz, *Computational Optimization of InternalCombustion Engines*, Springer, 2011.

[7] Kokjohn, S.L., Splitter, D.A., Hanson, R.M., and Reitz, R.D., "Experiments and Modeling of Dual Fuel HCCI and PCCI Combustion using in-Cylinder Fuel Blending." *SAE International Journal of Engines*, 2(2): 24-39, 2010, 2647.

[8] Lakshminarayanan, P.A., Yoghesh, V. Aghav. *Modeling Diesel Combustion*, Springer, 2010.

[9] The OpenFoam user's guide, Copyright 2011-2013 OpenFOAM Foundation, Septemebr 2013.

[10] Reitz, R. D. *Directions in Internal Combustion Engine Research.Combustion and Flame*, 2013, 160:1–8.

[11] Stone, R. *Introduction to Internal Combustion Engines*, Third Edition, SAE, 1999.

[12] Dec., J.E., "A Conceptual Model of DI Diesel Combustion Based on Laser-Sheet Imaging. *SAE Technical Paper*, 1997.

[13] Kokjohn, S.L., R.D. Reitz. Investigation of the Roles of Flame Propagation, Turbulent Mixing, and Volumetric Heat Release in Conventional and Low Temperature Diesel Combustion. *ASME J. Eng. Gas Turbines Power*, 133(10), 2011, 1-10.

[14] Zhao, H., *HCCI and CAI Engines for the Automotive Industry*, Woodhead Publishing Ltd., ISBN-10: 2007.

[15] Ma, Sh., Zheng, Z., Liu, H., Zhang, Q., Yao, M, "Experimental Investigation of the Effects of Diesel Injection Strategy on Gasoline/Diesel Dual-Fuel Combustion," *Applied Energy* 2013; 109:202–212.

[16] Neely, G.D., Sasaki, S., Huang, Y., Leet, J.A., and Stewart, D.W. "New Diesel Emission Control Strategy to Meet US Tier2 Emissions Regulations," *SAE Technical Paper* 2005-01-1091, 2005.

[17] Kokjohn, S.L. "Reactivity controlled compression ignition combustion." PhD Thesis, University of Wisconsin-Madison, 2012.

[18] Bessonette, P. W., Schleyer, C. H., Duffy, K. P., Hardy, W. L., and Liechty, M. P.,"Effects of Fuel Property Changes on Heavy-Duty HCCI Combustion," *SAE Technical Paper* 2007-01-0191, 2007.

[19] Kokjohn, S.L., Hanson, R.M., Splitter, D.A. and Reitz, R.D. Fuel Reactivity Controlled Compression Ignition (RCCI): A Pathway to Controlled High-Efficiency Clean Combustion. *International Journal of Engine Research*, 2011.

[20] Splitter D.A, Wissink M.L., Hendricks T.L, Ghandhi J.B., and Reitz R.D., "Comparison of RCCI, HCCI, and CDC Operation from Low to Full Load", THIESEL 2012 Conference on Thermo- and Fluid Dynamic Processes in Direct Injection Engines, 2012.

[21] Dempsey, A., Walker, N., and Reitz, R., "Effect of Cetane Improvers on Gasoline, Ethanol, and Methanol Reactivity and the Implications for RCCI Combustion," *SAE International Journal of Fuels and Lubricants* 6(1):170-187, 2013.

[22] Prikhodko, V., Curran, S., Parks, J., and Wagner, R., "Effectiveness of Diesel Oxidation Catalyst in Reducing HC and CO Emissions from Reactivity Controlled Compression Ignition," *SAE International Journal of Fuels and Lubricants* 6(2):329-335, 2013.

[23] Park,S.W., Reitz, R.D., "Numerical Study on the Low Emission Window of Homogeneous Charge Compression Ignition Diesel Combustion," *Combustion Science and Technology*, 2007, 179 (11): 2279–2307.

پی‌نوشت

1. NOx
2. Greenhouse gas (GHG)
3. International Energy Agency, http://www.iea.org (accessed Jan 14, 2014)
4. Stirling engine
5. rotary
6. solar
7. hydrogen
8. fuel cell

۹. زیست‌سوخت (biofuel) اصطلاحاً به سوخت‌هایی گفته می‌شود که از زیست‌توده به‌دست می‌آیند. این تعریف، زیست‌سوخت‌های جامد، سوخت‌های مایع و زیست‌گازها را دربر می‌گیرد. امروزه زیست‌سوخت‌ها مورد توجه بسیار قرار گرفته‌اند. زیست‌اتانول الکلی است که از تخمیر مواد قندی موجود در گیاهان مانند شکر و نشاسته به‌دست می‌آید. با پیشرفت فناوری، سلولزهایی چون درختان و چمن‌ها را نیز می‌شود به‌عنوان مادهٔ خام در فراوری زیست‌اتانول به‌کار برد. امروزه زیست‌اتانول به‌صورت گسترده‌ای در ایالات متحده و برزیل به‌کار می‌رود. زیست‌دیزل از دانه‌های روغنی، روغن‌های حیوانی و روغن‌های بازیافت‌شده به‌دست می‌آید. زیست‌دیزل می‌تواند به‌عنوان سوخت خالص در خودروها به‌کار رود، اما برای کاهش سطح ذره‌ها، مونو اکسید کربن و هیدروکربن‌ها در خودروهای دیزلی، از افزودنی دیزل استفاده می‌شود. زیست‌دیزل سوختی است که از روغن‌ها و چربی‌ها به‌دست می‌آید و همگانی‌ترین زیست‌سوخت در اروپاست. در سال ۲۰۰۸ م، زیست‌سوخت ۱/۸ درصد سوخت ترابری جهان را دربر داشته است. در سال ۲۰۰۷ م، سرمایه‌گذاری جهانی روی گنجایش فراوری زیست‌سوخت بیش از چهار میلیارد دلار بوده و هم‌اکنون نیز در حال افزایش است [ویراستار].

10. Convectional Diesel Combustion (CDC)
11. Compression Ignition (CI)
12. CFD
13. Low Temperature Combustion (LTC)
14. homogenous charge compression ignition (HCCI)
15. premixed charge compression ignition (PCCI)
16. reactivity controlled compression ignition (RCCI)
17. OpenFOAM
18. Particle Image Velocimetry (PIV)
19. Phase Doppler Anemometry (PDA)
20. Exhaust Gas Recirculation (EGR)
21. Selective Catalytic Reduction (SCR)
22. Diesel Particulate Filters (DPF)
23. Cetane Number (CN)
24. Diesel Oxidation Catalyst (DOC)