

## مطالعه عددی تأثیرهای زمان‌بندی و به‌کارگیری راهبرد سوراخ گروهی جهت پاشش سوخت در یک موتور اشتعال تراکمی

محمدجواد نوروزی<sup>۱\*</sup>، مهدی صدیق<sup>۲</sup> و حسام‌الدین حبیبی<sup>۳</sup>

۱- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آیت الله بروجردی، بروجرد، m.j.noroozi@abru.ac.ir

۲- کارشناسی، مهندسی مکانیک، دانشگاه آیت الله بروجردی، بروجرد، Mahdi.Seddiq@abru.ac.ir

۳- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، Hesamedinhabibi95@ms.tabrizu.ac.ir

\* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۹۷/۰۶/۱۶، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۷/۸/۴، پذیرش: ۹۷/۹/۲)

**چکیده:** در این مطالعه عددی، تأثیرات زمان‌بندی پاشش مستقیم سوخت دیزل و به‌کارگیری راهبرد سوراخ گروهی با زاویه واگرایی ۱۰ درجه بر مشخصه‌های احتراق و قطره‌سازی ذرات سوخت، میزان آلاینده‌های منتشرشده و سطح عملکرد در یک موتور اشتعال تراکمی سنگین بررسی شده است. برای شبیه‌سازی احتراق، از مکانیزم سنتیک شیمیایی کاهش‌یافته با ۶۱ گونه و ۲۹۶ واکنش استفاده شده است. طبق نتایج، با کاهش طول دوره تأخیر در اشتعال بیشتر جرم سوخت در حالت نفوذی سوخته، فرایند احتراق تضعیف‌شده و در نتیجه میزان آلاینده ذرات دوده افزایش و سطح عملکرد موتور کاهش‌یافته است. همچنین، با تعویق زمان‌بندی پاشش سوخت دیزل هم‌زمان با افزایش فشار و دمای محفظه احتراق، لزجت جریان درون سیلندر افزایش و ضریب نسبی پخش کاهش یافته است. با کاهش عرض افشانه، ذرات سوخت دیزل در ناحیه باریک‌تری افشانه شده و به‌دلیل تراکم ناحیه‌ای افشانه، ذرات سوخت بیشتری باهم برخورد کرده‌اند. در ادامه، به‌دلیل افزایش حجم لختگی، ذرات دوده افزایش یافته است. علاوه بر این، به‌کارگیری راهبرد سوراخ گروهی می‌تواند باعث بهبود فرایند اکسایش ذرات سوخت و همچنین بهبود عملکرد موتور شده، ولی باین‌حال، افزایش آلاینده هیدروکربن‌های نسوخته در مقایسه با حالت تک‌سوراخه از معایب به‌کارگیری این راهبرد پاشش سوخت است.

**کلیدواژگان:** شبیه‌سازی احتراق، زمان‌بندی پاشش، سوراخ گروهی، عملکرد موتور، آلاینده‌گی

### مقدمه

مصرف سوخت کمتر و مقدار آلاینده‌های مونوکسیدکربن و دی‌اکسیدکربن نسبتاً ناچیز باعث شده است تا موتورهای اشتعال تراکمی در مقایسه با موتورهای اشتعال جرقه‌ای، امروزه در سطح گسترده برای کاربردهای مختلف استفاده شوند. استفاده از موتورهای اشتعال تراکمی در سطح گسترده افزایش چشمگیر آلاینده‌های ذرات دوده و اکسیدهای نیتروژن را به‌دنبال دارد. در راستای حل مشکلات پیش‌رو، بسیاری از محققان روش‌های گسترده‌ای را برای کاهش مصرف سوخت و آلاینده‌های خروجی همچون ذرات دوده و اکسیدهای نیتروژن حاصل از احتراق اشتعال تراکمی، پیشنهاد و بررسی کرده‌اند که می‌توان به تغییر در زمان‌بندی پاشش سوخت [۱]، زاویه پاشش سوخت [۲]، فشار پاشش [۳-۴]، تغییر در آهنگ پاشش [۵-۶]، به‌کارگیری پاشش دو یا چندمرحله‌ای [۷-۹]، بازخورانی گازهای خروجی [۱۰-۱۱]، تغییر در مشخصه‌های سوراخ‌های سامانه پاشش [۱۲]، و همچنین به‌کارگیری راهبرد سوراخ گروهی [۱۳] اشاره کرد. در پژوهش‌های بسیاری، محققان تأثیر روش‌های اشاره شده را بر میزان آلاینده‌گی خروجی و همچنین سطح عملکرد موتور بررسی کرده که در بیشتر موارد، موفق به بهبود عملکرد موتور و کاهش آلاینده‌گی شده‌اند.

جیا و همکارانش [۱۴]، در یک پژوهش عددی تأثیرات زمان‌بندی پاشش سوخت دیزل را بر عملکرد و میزان آلاینده‌گی تولیدشده در یک موتور اشتعال تراکمی پاشش مستقیم بررسی کرده‌اند. آن‌ها در پژوهش خود بازه زمان‌بندی را از ۳۵ تا ۵ درجه میل‌لنگ قبل از نقطه مرگ بالا با نرخ بازخورانی ۵۰ درصد از گازهای خروجی با فشار هوای چندراهِه<sup>۱</sup> ۱/۸ بار در نظر گرفته‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که در دو وضعیت مصرف سوخت ویژه اندیکاتور بهیود می‌یابد: یکی با زودتر پاشیده شدن سوخت (حدوداً در ۲۵ درجه میل‌لنگ قبل از نقطه مرگ بالا) همزمان با دیرتر بسته شدن سوپاپ ورودی هوا و دیگری با دیرتر پاشیده شدن سوخت (۱۵ درجه میل‌لنگ قبل از نقطه مرگ بالا) به‌دنبال زودتر بسته شدن سوپاپ ورودی هوا. همچنین آن‌ها اشاره کرده‌اند برای کاهش شدت کوبش موتور، زمان‌بندی پاشش سوخت باید حدوداً در ۲۰ درجه میل‌لنگ قبل از نقطه مرگ بالا ثابت باشد. در پژوهش دیگری، گوری و همکارانش [۱۵] تأثیرات زمان‌بندی پاشش مستقیم سوخت دیزل را در یک موتور اشتعال تراکمی دوگانه‌سوز احتراق دم‌پایین به‌صورت آزمایشگاهی مطالعه کرده‌اند. نتایج آن‌ها نشان داد با جلو انداختن زمان پاشش سوخت دیزل، اختلاف زمانی میان پایان زمان پاشش سوخت و شروع فرایند احتراق و همچنین طول دوره تأخیر در اشتعال افزایش یافته، و همچنین نقطه بیشینه‌ی فشار درون سیلندر نیز افزایش یافته است. با جلو انداختن زمان پاشش سوخت دیزل، بازه حرارتی اندیکاتور موتور با پاشش در زاویه ۶۰ درجه میل‌لنگ قبل از نقطه مرگ بالا افزایش یافته، فاز احتراق به نزدیکی زمان نقطه مرگ بالا منتقل شده و طول دوره احتراق کاهش یافته است. با تعویق زمان‌بندی پاشش مستقیم سوخت دیزل حدوداً در زمان نقطه مرگ بالا میزان آلاینده‌های مونوکسیدکربن و هیدروکربن‌های نسوخته افزایش یافته است. با پاشش سوخت در زمان ۵۰ درجه میل‌لنگ قبل از نقطه مرگ بالا میزان آلاینده‌های مونوکسیدکربن و هیدروکربن‌های نسوخته کاهش یافته ولی باین‌حال با جلو انداختن زمان‌بندی پاشش نسبت به زاویه ۵۰ درجه میل‌لنگ قبل از نقطه مرگ بالا، این دو آلاینده افزایش یافته‌اند. بناجس و همکارانش [۱۶] در یک پژوهش آزمایشگاهی، تأثیرات زمان‌بندی پاشش مستقیم سوخت دیزل را در یک موتور اشتعال تراکمی واکنش کنترل‌شده بررسی کرده‌اند. نتایج آن‌ها نشان داد با زمان‌بندی پاشش سوخت دیزل آهنگ رهاسازی گرما خمیده شکل شده است. آن‌ها همچنین گزارش داده‌اند برای سوخت واکنش‌پذیر بالا با جلو انداختن زمان‌بندی پاشش در بار کارکردی پایین آلاینده ذرات دوده کاهش یافته و علاوه بر این، در بار کارکردی متوسط و بالا مقدار آلاینده ذرات دوده به‌طور چشمگیری تحت تأثیر سطح کیفیت فرایند تشکیل و اکسایش است. در مطالعه عددی دیگری، یانگ و همکارانش [۱۷] تأثیرات زمان‌بندی پاشش سوخت واکنش‌پذیر بالا را در یک موتور اشتعال تراکمی دوگانه‌سوز بنزین-زیست دیزل بررسی کرده‌اند. آن‌ها در مطالعه خود نشان داده‌اند مشخصه‌های احتراق برای زمان‌بندی پاشش ۷ درجه میل‌لنگ قبل از نقطه مرگ بالا در مقایسه با ۳۵ درجه حساسیت کمتری با تغییر نسبت بنزین نشان داده‌اند. همچنین میزان آلاینده ذرات دوده برای زمان‌بندی پاشش سوخت ۳۵ درجه میل‌لنگ قبل از نقطه مرگ بالا در مقایسه با زمان‌بندی ۷ درجه بیشتر شده است. آن‌ها همچنین گزارش داده‌اند با پاشش سوخت در زاویه ۳۵ درجه میل‌لنگ قبل از نقطه مرگ بالا، مشخصه زاویه پاشش سوخت تأثیر بسزایی بر فرایند تبخیر دارد و متعاقباً، طول دوره احتراق و میزان آلاینده ذرات دوده نیز کنترل می‌شوند.

در کنار راهکارها و نوآوری‌های امروزه، نوع هندسه و مشخصات سامانه پاشش سوخت همچون سوراخ‌های پاشش به عنوان یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار بر عملکرد و میزان آلاینده خروجی حاصل از احتراق اشتعال تراکمی در موتورهای پاشش مستقیم است زیرا تأثیر بسزایی بر کیفیت ترکیب سوخت و هوا دارد که مستقیماً با احتراق دیزل و فرایند احتراق ارتباط دارد [۲۰-۱۸]. پس بنابراین، بسیاری از پژوهش‌های عددی و تجربی در ارتباط با بررسی مشخصه‌های سامانه پاشش سوخت بر سطح عملکرد و میزان آلاینده‌گی خروجی موتور اشتعال تراکمی صورت گرفته است. گائوزو همکارانش [۲۱] در یک مطالعه عددی تأثیرات استفاده از راهبرد سوراخ گروهی را در یک موتور اشتعال تراکمی بررسی کرده‌اند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های آن‌ها نشان داده است با به‌کارگیری راهبرد سوراخ گروهی طول نفوذ افشانه سوخت و همچنین قطر ذرات سوخت کاهش یافته است. همچنین دوره تبخیر ذرات سوخت نیز کوتاه‌تر شده و باعث بهبود فرایند تبخیر شده است. آن‌ها علاوه بر این نشان داده‌اند که استفاده از راهبرد

سوراخ گروهی، یکی از راهکارهای کاربردی در بهبود فرایند قطره‌سازی ذرات سوخت و همچنین فرایند تبخیر ذرات افشانده شده است که در ادامه باعث کاهش میزان آلاینده‌گی ذرات دوده شده است. در پژوهشی با موضوع مشابه دیگری، پارک و همکارانش [۲۲] در یک پژوهش عددی، تأثیرات استفاده از راهبرد سوراخ گروهی را بر مشخصه‌های احتراق و قطره‌سازی سوخت، میزان آلاینده‌های تولید شده و سطح عملکرد موتور اشتعال تراکمی را بررسی کرده‌اند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داده است که به‌کارگیری راهبرد سوراخ گروهی با زاویه واگرایی ۳ درجه، دوره تبخیر سوخت در مقایسه با حالت تک سوراخ آهسته‌تر شده است که دلیل آن افزایش میانگین قطر ذرات سوخت افشانده شده است که به دلیل زاویه واگرایی کم میان سوراخ‌های پاشش سوخت و ایجاد لختگی ذرات سوخت به‌رغم کوچک‌بودن قطر سوراخ‌ها در مقایسه با حالت تک‌سوراخ است. همچنین، آن‌ها گزارش داده‌اند که به‌کارگیری راهبرد سوراخ گروهی باعث افزایش نقطه بیشینه فشار و کاهش دوره احتراق شده است که دلیل آن این است که با به‌کارگیری راهبرد سوراخ گروهی به‌رغم بزرگ‌بودن میانگین قطر ذرات سوخت، هوای بیشتری درون محفظه احتراق با ذرات سوخت افشانده شده ترکیب می‌شود. علاوه بر این، با افزایش زاویه واگرایی، دوره تأخیر در اشتعال، به دلیل بهبود فرایند قطره‌سازی بهبود یافته و میزان آلاینده‌های اکسیدهای نیتروژن افزایش یافته است. باین‌حال، هرچه ترکیب سوخت و هوا همگن‌تر باشد که دلیل آن افزایش زاویه واگرایی است، میزان آلاینده ذرات دوده کاهش می‌یابد. پارک در پژوهش عددی دیگری به‌همراه دیگر همکارش [۲۳] تأثیرات به‌کارگیری راهبرد سوراخ گروهی را بر میزان آلاینده‌گی تولیدشده و سطح عملکرد موتور اشتعال تراکمی بررسی کرده‌اند. نتایج آن‌ها نشان داده است که به‌کارگیری راهبرد سوراخ گروهی با دو زاویه پاشش ۱۷۰ و ۸۰ درجه باعث بهبود مصرف سوخت تا حدود ۱۶/۴ درصد شده است و همچنین میزان آلاینده‌های مونوکسید کربن و هیدروکربن‌های نسوخته را کاهش داده است. همچنین، اشاره کرده‌اند زاویه میان دو سوراخ پاشش و سوراخ پایینی باید بیش از ۷۰ درجه باشد تا افشانده‌های سوخت ایجادشده برای افشاندن سوخت باهم تلاقی نداشته و ذرات سوخت کمتری با یکدیگر برخورد کرده و از ایجاد نواحی با نسبت هم‌ارزی جلوگیری شود. تلاقی نواحی افشانده‌های ایجادشده، باعث افزایش مصرف سوخت و همچنین میزان آلاینده مونوکسید کربن می‌شود.

طبق پژوهش‌های مرور شده، مشاهده شد که زمان‌بندی پاشش سوخت دیزل تأثیر بسزایی بر میزان آلاینده‌گی و سطح عملکرد موتور اشتعال تراکمی دارد زیرا زمان‌بندی پاشش یکی از راهبردی‌ترین ابزار برای کنترل فاز احتراق است. همچنین، همان‌طور که اشاره شد، راهبرد سوراخ گروهی باعث بهبود فرایند ترکیب سوخت و هوا شده و در نتیجه بهبود عملکرد موتور را به‌دنبال دارد. بنابراین، هدف از انجام این پژوهش، بررسی تأثیرات هم‌زمان زمان‌بندی پاشش سوخت دیزل و به‌کارگیری راهبرد سوراخ گروهی بر مشخصه‌های فرایند احتراق و قطره‌سازی ذرات سوخت، میزان آلاینده‌های تولید شده و همچنین سطح عملکرد یک موتور اشتعال تراکمی سنگین است. این پژوهش به‌طور کلی به سه بخش تقسیم شده است، که بخش اول آن به بررسی تأثیرات راهبردهای اتخاذشده بر مشخصه‌های احتراق و قطره‌سازی ذرات سوخت، و بخش دوم و سوم به ترتیب به تأثیرات راهبردهای اتخاذشده در مطالعه بر آلاینده‌های تشکیل شده و سطح عملکرد موتور می‌پردازد.

## شبکه محاسباتی و مدل‌سازی عددی

این مطالعه‌ی عددی، با استفاده از نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) Converge انجام شده است [۲۴]. در راستای کاهش زمان محاسبات با حفظ دقت آن، همچنین به دلیل مکان هندسی متقارن سامانه پاشش سوخت و قرارگیری آن در مرکز استوانه و ۶ سوراخ بودن نازل پاشش، محاسبات بر روی یک قطاع ۶۰ درجه انجام شده است. شبکه‌بندی قطاع محاسباتی، توسط ابزار موجود در خود نرم‌افزار انجام شده است [۲۴]. شکل ۱ قطاع محاسباتی در نقطه مرگ بالا را نشان می‌دهد. گام محاسباتی در نظر گرفته شده برای انجام محاسبات از زمان شروع تا به‌هنگام آغاز فرایند احتراق برابر با ۵۰۰ نانو ثانیه و برای

فرایند احتراق و تا پایان محاسبات برابر ۱۰ نانوثانیه است. برای بررسی استقلال نتایج از شبکه، برای شکل پایه محفظه احتراق، چند شبکه محاسباتی با اندازه بلوک متفاوت در نظر گرفته شد. شکل ۲ تأثیر تعداد بلوک‌های شبکه محاسباتی را بر روند میانگین فشار درون سیلندر و همچنین آهنگ رهایی گرما نشان می‌دهد. برای شبکه محاسباتی با اندازه ۱/۲ میلی‌متر، نتایج به دست آمده حاصل از شبیه‌سازی حالت پایه کارکردی موتور، مستقل از تأثیر تعداد نواحی سه‌بعدی است. به همین سبب، برای انجام شبیه‌سازی‌های این پژوهش عددی از این شبکه محاسباتی استفاده شده است.

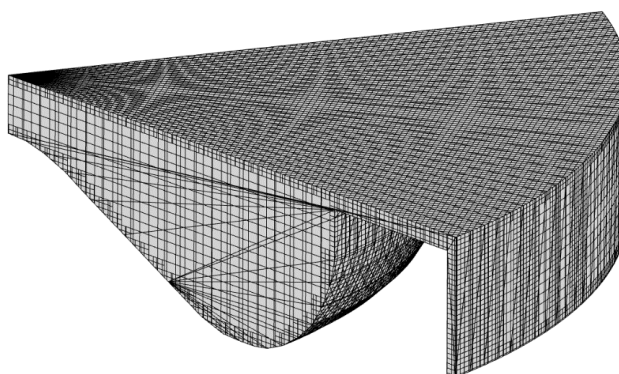


Figure 1- Computational grid at TDC  
شکل ۱- شبکه محاسباتی در نقطه مرگ بالا

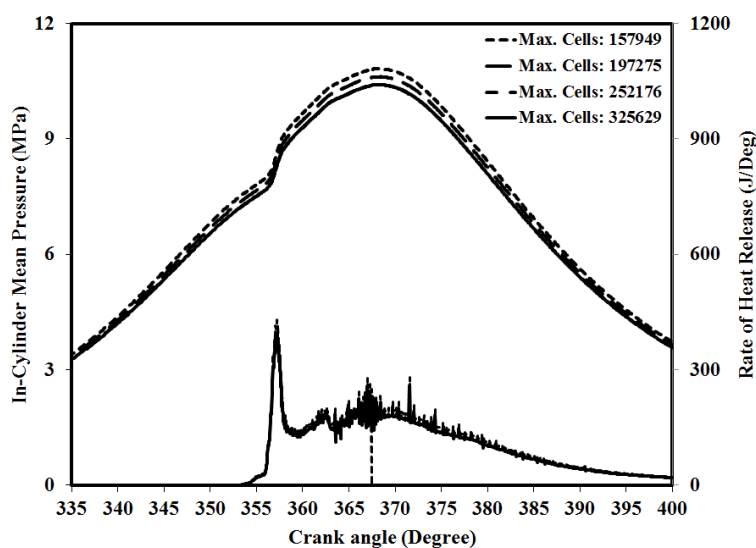


Figure 2- Effects of grid size on in-cylinder mean pressure and rate of heat release  
شکل ۲- تأثیر اندازه بلوک محاسباتی بر میانگین فشار درون سیلندر و آهنگ رهاسازی گرما

برای شبیه‌سازی احتراق در این پژوهش، از روش شیمی دقیق استفاده شده که به همین دلیل حل گر SAGE به کار گرفته شده است [۲۵]. در این پژوهش، برای شبیه‌سازی فرایند احتراق دیزل، از مکانیزم سنتیک شیمیایی کاهش یافته هپتان که شامل ۲۹ گونه و ۵۲ واکنش است، استفاده شده است [۲۶]. برای شبیه‌سازی فرایند تشکیل و اکسایش ذرات دوده با ۲۰ گونه و ۱۳۹ واکنش از مکانیزم سنتیک شیمیایی کاهش یافته PAH<sup>۱</sup> بهره گرفته شد [۲۷]. همچنین جهت پیش‌بینی آلایندگی اکسیدهای ازت

1 Heptane

2. Poly-Aromatic Hydrocarbons

نیز از مکانیزم کاهش یافته GRI NOx با ۴ گونه و ۱۲ واکنش استفاده شد [۲۸]. به طور کلی، مکانیزم سنتیک شیمیایی کاهش یافته‌ای که برای شبیه‌سازی فرایند احتراق اشتعال تراکمی دیزل با قابلیت پیش‌بینی آلاینده‌های مونوکسید کربن، دی-اکسید کربن، ذرات دوده، اکسیدهای ازت، و هیدروکربن‌های نسوخته است شامل ۶۱ گونه و ۲۹۶ واکنش است. علاوه بر این، برای کاهش زمان محاسبات، از روش حل شیمی چند ناحیه‌ای استفاده شده است [۲۹]. این روش حل، به طور قابل چشمگیری مقدار محاسبات را برای احتراق کم می‌کند. روش محاسبات به گونه‌ای است که سلول‌هایی محاسباتی مشابه یک ناحیه در نظر گرفته شده و محاسبات مربوط به احتراق برای آن ناحیه انجام می‌شود و از انجام محاسبات برای هر سلول خودداری می‌شود.

مرحله تبخیر و اختلاط به‌ویژه آهنگ اختلاط سوخت به‌عنوان یک عامل بحرانی و تعیین‌کننده در موتور اشتعال تراکمی مطرح است و مراحل اولیه اشتعال به‌شدت تحت تأثیر این فرایند قرار می‌گیرند. مدل‌های اختلاطی زیادی وجود دارد که در این پژوهش عددی نرخ مخلوط مهار شده واکنش برحسب مقیاس زمانی آشفستگی  $K - \varepsilon$  استفاده شده که توسط یاکهوت و همکارانش با نرمال کردن معادلات ناویر-استوکس برای بررسی اثرات مقیاس‌های کوچک‌تر حرکت سیال، بهبود داده شده است [۳۰]. برای مدل  $K - \varepsilon$  استاندارد، گردابه لزجت از یک مقیاس طولی آشفستگی تعیین می‌شود، بنابراین انتشار آشفستگی محاسبه شده تنها برای مقیاس مشخصی رخ می‌دهد، هرچند در واقعیت تمامی مقیاس‌های حرکتی به انتشار آشفستگی کمک می‌کنند. نرمال‌سازی مجدد گروهی<sup>۱</sup> یک روش ریاضی است که می‌تواند در راستای ایجاد یک مدل آشفستگی همانند مدل  $K - \varepsilon$  استفاده شده که نتیجه آن یک شکل اصلاح شده از معادله  $\varepsilon$  است که تلاش می‌کند تا مقیاس‌های متفاوتی از حرکت را در خلال تغییرات به‌وجود آمده، در نظر گیرد. در راستای شبیه‌سازی واپاشی اولیه و ثانیه ذرات سوخت به‌طور همزمان از دو مدل کلونین-هلمهولتز<sup>۲</sup> و رایلی-تیلور<sup>۳</sup> استفاده شده است. بی‌ثباتی مدل کلونین-هلمهولتز بر اساس تجزیه و تحلیل ثبات جت مایع است که به‌طور کامل در مرجع [۳۱] توسط ریتز و براکو توضیح داده شده است. این مدل، بیشتر برای سرعت‌های نسبی بالا و همچنین محیط‌هایی با چگالی بالا مناسب‌تر است. بی‌ثباتی مدل رایلی-تیلور نیز باعث واپاشی ذرات می‌شود. به عبارت دیگر، مدل رایلی-تیلور این‌گونه است که کاهش سریع سرعت قطرات، منجر به رشد امواج سطحی در نقطه آرام قطره سوخت پاشیده شده می‌شود [۲۵]. به طور کلی، با اتخاذ هر دو مدل واپاشی همزمان با یکدیگر، مدل کلونین-هلمهولتز (موج‌های سطحی) و رایلی-تیلور (اغتشاشات) باید به‌طور مداوم و پیاپی در رقابت با یکدیگر باشند تا فرایند واپاشی قطرات سوخت رخ دهد. زمانی که ذرات سوخت درون ناحیه محاسباتی پاشیده شد، یک مدل محاسباتی، جهت تبدیل ذرات مایع سوخت به بخار گازی نیاز است. در این پژوهش، برای شبیه‌سازی فرایند تبخیر ذرات سوخت مایع افشانده شده توسط سامانه پاشش سوخت، از مدل همبستگی فراسلینگ<sup>۴</sup> که توسط آمسدن<sup>۵</sup> و همکارانش بهبود داده شده استفاده شده است [۳۲]. همچنین، در این پژوهش از مشخصات فیزیکی سوخت دیزل<sup>۶</sup> شماره ۲، که در کتابخانه نرم‌افزار موجود است، برای سوخت پاشش مستقیم استفاده شده است.

در این مطالعه عددی، برای شبیه‌سازی برخورد ذرات سوخت پاشیده شده با یکدیگر از مدل بدون شمارش زمانی<sup>۷</sup> که توسط راتلند<sup>۸</sup> و دیگر همکارش ارائه شده، استفاده شده است [۳۲]. این مدل براساس روش استفاده‌شده در دینامیک گازها، برای شبیه‌سازی مستقیم محاسبات مونته کارلو<sup>۹</sup> است. این مدل در مقایسه با مدل اورورک<sup>۱۰</sup> تحت بعضی شرایط معین، دقیق‌تر و از نظر زمان محاسبات سریع‌تر است. روش بدون شمارش زمانی: این مدل محاسباتی شامل (تعیین تصادفی) نمونه‌گیری تصادفی ذرات در هر سلول محاسباتی است که باعث می‌شود تا محاسبات مربوط به برخورد ذرات سریع‌تر انجام شود. برخلاف

1 Re-Normalization Group  
 2 Kelvin-Helmholtz  
 3 Rayleigh-Taylor  
 4 Frossling  
 5 Amsden  
 6 C12H26  
 7 No Time Counter  
 8 Rutland  
 9 Monte Carlo Calculations  
 10 Rourke

روش اورورک که باعث افزایش زمان محاسبات با مربع تعداد ذرات می‌شود، رابطه‌ی زمان محاسبات با تعداد ذرات در روش بدون شمارش زمانی برای این مدل رابطه‌ای خطی بوده و تحت تاثیر یک توزیع پواسون است. با این حال، توزیع پواسون صحیح نیست تا زمانی که برخورد هیچ تأثیری بر ذره نداشته باشد. با اینکه برخورد سرعت، اندازه، و تعداد ذرات را تغییر می‌دهد، روش نمونه‌گیری تکرارشونده که با استفاده از روش بدون شمارش زمانی مهیا می‌شود، جواب‌های دقیق‌تری ارائه می‌دهد. در ادامه نیز برای شبیه‌سازی برخورد ذرات سوخت با دیواره، از مدل محاسباتی نیبر و ریتز [۳۳] استفاده شده که بعدها توسط منیوئل و همکارانش توسعه یافت [۳۴]. این مدل محاسباتی، بر اساس عدد و بر دو حالت پس‌زدگی و سر خوردن بر روی سطح را برای ذرات افشاندن شده در نظر می‌گیرد.

### مشخصات موتور، شرایط آزمایشگاهی و صحت‌سنجی

موتوری که برای مطالعه عددی حاضر انتخاب شده است یک موتور تک‌سیلندر آزمایشگاهی برای بررسی کیفیت روان‌کننده‌هاست که توسط شرکت کاترپیلار ساخته شده است. این موتور مجهز به سامانه پرخوران بوده که بعضی از مشخصات فنی موتور در جدول ۱ آمده است [۳۵]. همچنین، در جدول ۲ نیز بعضی از مشخصات کاربردی سامانه پاشش سوخت مستقیم دیزل ذکر شده است [۳۵].

جدول ۱- مشخصات فنی موتور

Table 1- Engine Specifications

Engine Type	Heavy Duty Turbo-Charged Diesel Engine
Number of Cylinders	1
Bore (mm) x Stroke (mm)	137.16 x 165.1
Geometric compression ratio	16.1:1
Displacement Volume (L)	2.44
Connecting rod Length (mm)	261.6
TDC Clearance gap (mm)	1.97
Engine Speed (rpm)	1208
Piston Shape	Stock
Bowl Volume (cc)	110.8
Intake Valve Close time (CA)	143
Exhaust Valve Opening time (CA)	490
Intake Manifold Air Pressure (bar)	2.0
Intake Manifold Air Temperature (K)	313

جدول ۲- مشخصات سامانه پاشش سوخت

Table 2- Fuel injection system specifications

Injector Holder	Bosch CRIN 2
Nozzle Type	Sac
Sac Volume (mm <sup>3</sup> )	0.7
Number of Injector Holes	6
Spray Angle (Degree)	145
Nozzle Hole Diameter (mm)	0.25
Injection Pressure (bar)	755
Discharge Coefficient (-)	0.69
Hydraulic Flow (cc per 30 sec @ 100 bar)	1000
Fuel Temperature (K)	341
Total Fuel per Cycle (mg)	172.2
Fuel Injection Timing (CA)	350
Fuel Injection Duration (CA)	16.8

احتراق دیزل سنتی، یک فرایند اختلاط کنترل شده است و انرژی موردنیاز برای اختلاط نیز به‌طور معمول از انرژی جنبشی حاصل از فرایند پاشش سوخت تأمین می‌شود. شکل ۳ نرخ پاشش مستقیم سوخت را برای موتور موردنظر نشان می‌دهد [۳۵].

1Caterpillar

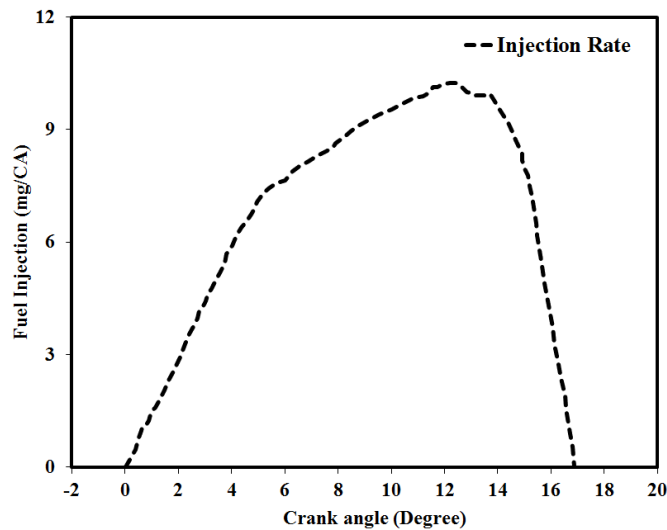


Figure 3- Fuel injection rate  
شکل ۳- آهنگ پاشش سوخت

سوختی که در آزمایشگاه موتور از آن استفاده شده و همچنین از آن برای انجام شبیه‌سازی‌های این پژوهش به کار گرفته شده است، سوخت سنگین شماره ۲ است که بعضی از مشخصات کاربردی آن در جدول ۳ ذکر شده است [۳۶].

جدول ۳- مشخصات سوخت

Table 3- Fuel specifications

Specific Gravity @ 15.5 C (-)	0.856
Viscosity @ 40 C (cSt)	2.71
Surface Tension @ 25 C	30
Lower Heating Value (MJ/Kg)	42.526
Cetane Number	46.1
H/C ratio	1.74

چندراهه ورودی هوای موتور تک‌سیلندر آزمایشگاهی، مجهز به یک کنترل‌کننده فشار و دمای ورودی است. این موتور مجهز به سامانه اندازه‌گیری فشار درون سیلندر است که فشار در هر ۰/۲۵ زاویه میل‌لنگ اندازه‌گیری می‌شود. این سامانه ثبت فشار، توسط سیستمی با نام Kistler 6067C1 خنک‌کاری می‌شود. همچنین فشار اندازه‌گیری شده درون سیلندر، حاصل از میانگین فشار ۴۹۹ چرخه کارکردی است. علاوه بر این، در ارتباط با اندازه‌گیری و ثبت آلاینده‌های خروجی نیز، برای این موتور از سامانه اندازه‌گیری چندگازی هوریا استفاده شده است. برای اندازه‌گیری و نیز ثبت آلاینده ذرات دوده به صورت جداگانه از سامانه AVL-415S استفاده شده است. شکل ۴ مقایسه میان روند تغییر فشار میانگین و آهنگ‌رهای گرمای تجربی و عددی درون محفظه احتراق را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، روند تغییر فشار و آهنگ‌رهای گرمای درون سیلندر که توسط نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی شبیه‌سازی شده است، با دقت قابل قبولی شبیه به روند تغییر فشار و آهنگ‌رهای گرمای حالت تجربی است. مقدار بیشینه فشار درون استوانه تجربی و عددی برابر با ۱۰/۵ و ۱۰/۴ میلیون پاسکال است. طبق شکل ۴ اگر دقت شود، اختلاف گزارش شده بین نتایج تجربی و نتایج حاصل از شبیه‌سازی در محدوده ۳۵۰ تا ۳۷۰ درجه میل‌لنگ مشاهده می‌شود که علت این امر می‌تواند مربوط به عدم قطعیت در برخی اطلاعات و شرایط اولیه، مانند دمای

دیواره سیلندر و سطح پیستون به‌هنگام بسته‌شدن سوپاپ‌های هوای ورودی باشد. همچنین، جدول ۴ نیز مقادیر برخی پارامترهای ورودی و فرض‌های در نظر گرفته شده در ابتدای شروع محاسبات را نشان می‌دهد.

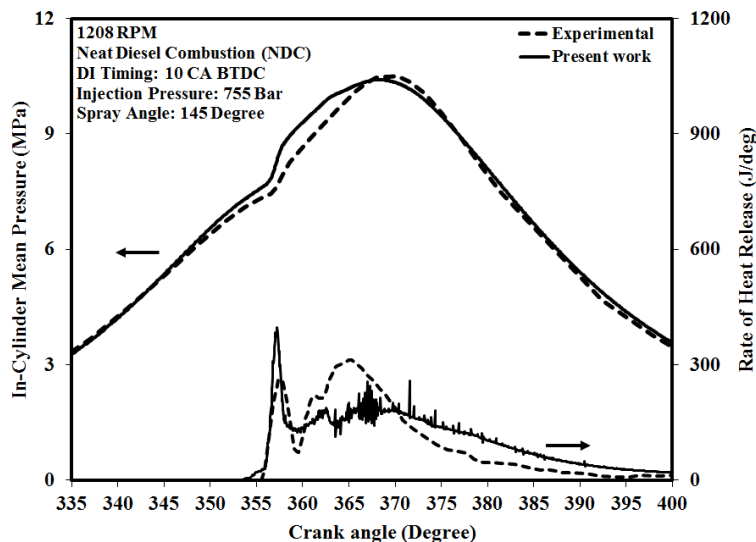


Figure 4- Validation of nean in-cylinder pressure and rate of heat release  
 شکل ۴- صحت‌سنجی میانگین فشار درون سیلندر و آهنگ رهاسازی گرما

جدول ۴- شرایط اولیه در نظر گرفته شده

Table 4- Initial boundary conditions

In-Cylinder Temperature (K) @ IVC	350
In-Cylinder Pressure (bar) @ IVC	2.0
Swirl ratio (-) @ IVC	0.7
Piston Top Temperature (K)	533
Cylinder Head Temperature (K)	513
Cylinder Wall Temperature (K)	423

جدول ۵ مقایسه میان میزان آلاینده‌های تشکیل شده در حالت تجربی و شبیه‌سازی شده حالت پایه کارکردی موتور را نشان می‌دهد. طبق اطلاعات جدول مشخص است که میزان آلاینده‌های تشکیل شده با دقت مناسبی در مقایسه با حالت تجربی شبیه‌سازی شده‌اند [۳۵].

جدول ۵- مقادیر تجربی و عددی آلاینده‌ها

Table 5- Experimental and numerical values of emissions

Results (g/Kg. fuel)	NOx	PM	CO	UHC
Experimental	49.8	0.31	3.1	2.1
CFD Simulation	50.6	0.325	2.781	1.729

## راهبرد اتخاذ شده در مطالعه عددی حاضر

هدف اصلی از انجام این پژوهش بررسی تأثیرات همزمان زمان بندی و استفاده از راهبرد سوراخ گروهی جهت پاشش مستقیم سوخت دیزل بر فرایند احتراق یک موتور اشتعال تراکمی سنگین است. براساس موفقیت کسب شده در بخش صحت‌سنجی و



اطمینان به نتایج حاصل از شبیه‌سازی حالت پایه کارکردی موتور، ۱۹ راهبرد پاشش سوخت در نظر گرفته شده است که تأثیرات آن بر مشخصه‌های احتراق، میزان آلاینده‌های خروجی، و همچنین عملکرد موتور بررسی شده است. شکل ۵ روند کلی راهبرد اتخاذ شده در پژوهش حاضر را به صورت طرحواره نشان داده است.

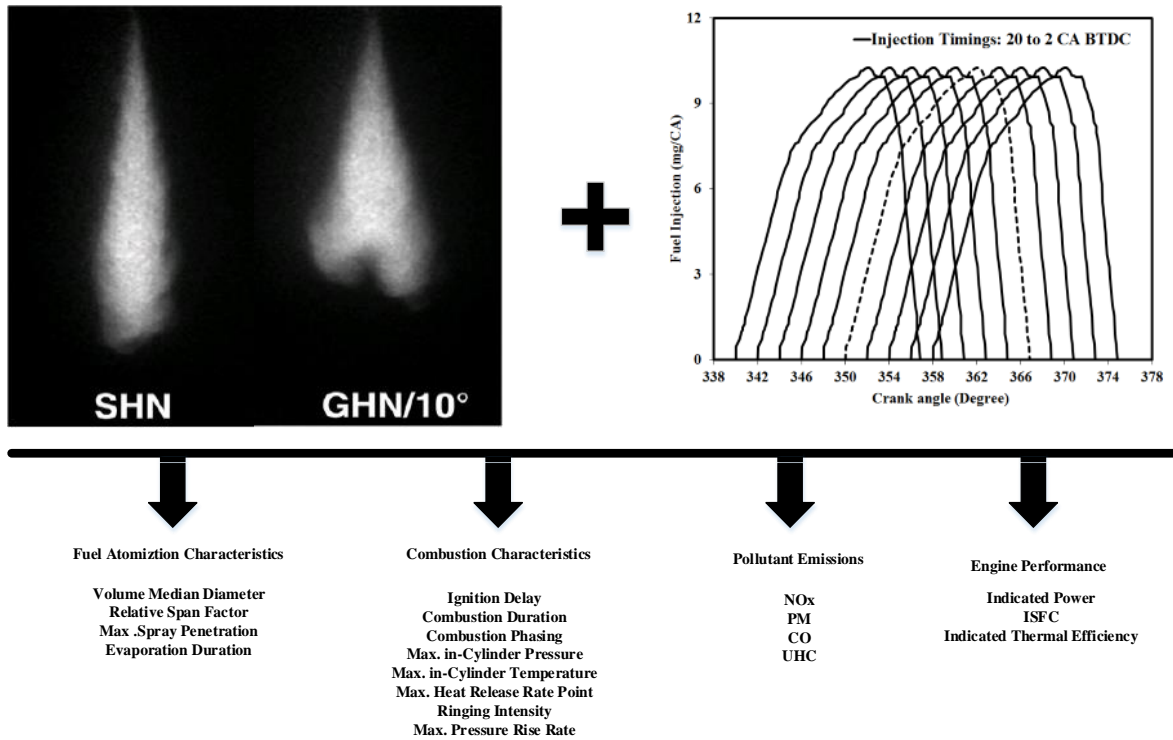


Figure 5- Numerical study strategies [21]

شکل ۵- راهبردهای مطالعه‌ی عددی [۲۱]

طبق شکل ۵ مشاهده می‌شود برای زمان‌بندی پاشش سوخت ۱۰ حالت در نظر گرفته شده است که زمان‌بندی از ۲۰ تا ۲ درجه میل‌لنگ قبل از نقطه مرگ بالا با گام‌های ۲ درجه میل‌لنگ است. علاوه بر این، در ارتباط با راهبرد سوراخ گروهی نیز زاویه واگرایی برای دو سوراخ مجاور ۱۰ درجه در نظر گرفته شده که باید اشاره کرد که این پژوهش سعی بر بررسی همزمان تأثیرات زمان‌بندی و استفاده از روش سوراخ گروهی برای پاشش مستقیم سوخت اشتعال تراکمی دیزل دارد و هدف آن بررسی زاویه واگرایی بین دو سوراخ پاشش سوخت مجاور نیست. به همین سبب تنها زاویه واگرایی ۱۰ درجه در این پژوهش بررسی شد. لازم به ذکر است که در مطالعات آتی، تأثیرات بررسی زاویه واگرایی میان دو سوراخ پاشش راهبرد سوراخی توسط پژوهشگران این مطالعه بررسی خواهد شد و یکی از اهداف این نویسندگان خواهد بود.

جدول ۶ شرایط در نظر گرفته شده برای مطالعه حاضر در خصوص استفاده از راهبرد سوراخ گروهی را نشان داده است. طبق جدول ۶ مشاهده می‌شود برای راهبرد سوراخ گروهی قطر سوراخ پاشش کوچک‌تر شده است و همچنین برای هر دو حالت سوراخ گروهی و حالت تک‌سوراخ طول دوره پاشش ثابت است. باید اشاره کرد که برای ثابت نگه‌داشتن دبی خروجی سوخت از سامانه پاشش و همچنین ثابت‌بودن فشار پاشش برای هر دو حالت، سوراخ گروهی حدود ۳۰ درصد کوچک‌تر شده است.

جدول ۶- شرایط اولیه برای راهبرد تک سوراخه و سوراخ گروهی

Table 6- Initial conditions for single and group hole nozzle

Specifications	Single Hole Nozzle (SHN)	Group Hole Nozzle (GHN)
Number of Nozzle Holes	6	12

Number of Nozzle Holes in each computational domain	1	2
Injection Duration (CA)	16.8 CA	
Nozzle Hole Diameter (mm)	0.25	0.175
Injection Pressure (bar)	755	
Fuel Spray Angle (Degree)	145	
Divergence Angle (Degree)	-	10

همان‌طور که در شکل ۵ به آن اشاره شد، در این مطالعه تأثیرات راهبردهای اتخاذ شده بر مشخصه‌های احتراق و قطره‌سازی ذرات سوخت بررسی شده است که شرح بعضی از مفاهیم ارائه شده در مطالعه‌ی حاضر در ادامه آورده شده است. تأخیر در اشتعال: به بازه زمانی میان زاویه شروع فرایند پاشش سوخت و زاویه CA5 (زاویه‌ایی که ۵ درصد از سوخت در آن زاویه سوخته شده است) گفته می‌شود. دوره احتراق: به بازه زمانی میان CA10 و CA90 گفته می‌شود. فاز احتراق: به بازه زمانی از شروع پاشش سوخت تا پایان احتراق گفته می‌شود که در این مطالعه با CA50 بیان شده است. شدت کوبش: شدت کوبش حاصل از احتراق اشتعال تراکمی، یکی از مشخصه‌های مهم احتراق است که با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$\text{Ringing Intensity (RI)} = \frac{1}{2\gamma} \frac{(0.05 \left(\frac{dp}{dt}\right)_{\max})^2}{P_{\max}} \sqrt{\gamma RT_{\max}} \quad (1)$$

که طبق رابطه‌ی بالا  $\gamma$  برابر است با نسبت گرماهای ویژه،  $\left(\frac{dp}{dt}\right)_{\max}$  برابر است با نقطه بیشینه آهنگ تغییرات فشار برحسب میلی‌ثانیه،  $P_{\max}$  برابر است با نقطه بیشینه میانگین فشار درون سیلندر،  $R$  برابر است با ثابت گاز ایدئال، و  $T_{\max}$  برابر است با نقطه بیشینه دمای درون سیلندر.

ضریب نسبی پخش: یکی از مشخصه‌های بی‌بعد مهم قطره‌سازی ذرات سوخت است که میزان عرض افشانه سوخت را ارزیابی می‌کند و با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$\text{Relative Span Factor (RSF)} = \frac{DV90 - DV10}{DV50} \quad (2)$$

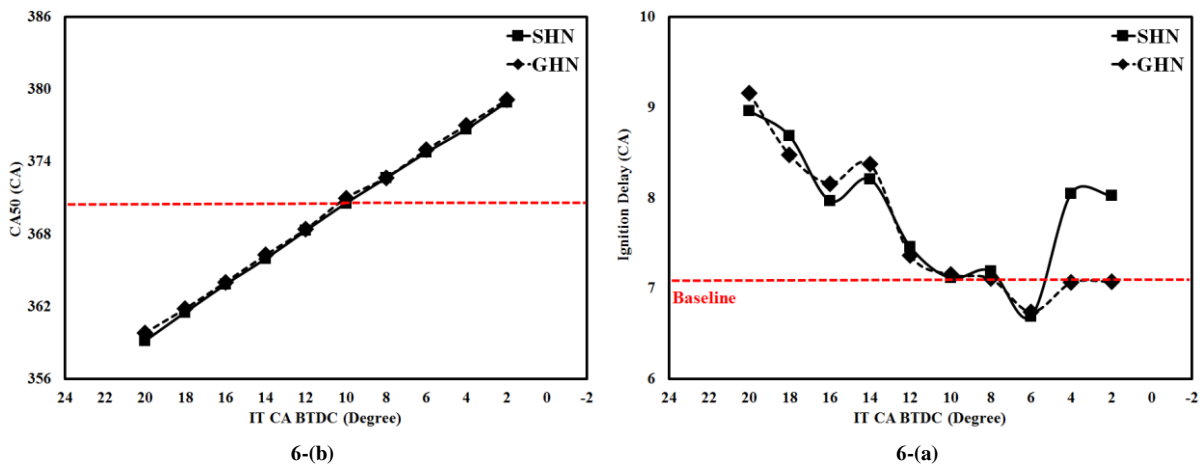
طبق رابطه‌ی بالا  $DV10$ ،  $DV50$ ، و  $DV90$  به ترتیب قطر ۱۰، ۵۰، و ۹۰ درصد از حجم ذرات سوخت افشانه شده است. لازم به ذکر است که در این مطالعه از ضریب نسبی پخش در راستای بررسی هرچه بهتر کیفیت فرایند ترکیب سوخت و هوا استفاده شده است و می‌توان گفت این پارامتر از یکی از وجوه نوآورانه پژوهش حاضر است که به‌ندرت از این ضریب در پژوهش‌ها برای بررسی کیفیت فرایند احتراق در موتورهای اشتعال تراکمی استفاده شده است. قطر متوسط حجم: قطر ۵۰ درصد از حجم ذرات سوخت افشانه شده است که به‌عبارت‌دیگر، همان  $DV50$  است.

## بحث و نتایج

در این بخش، نتایج حاصل از اتخاذ راهبردهای اشاره‌شده، که در بخش قبل به جزئیات آن پرداخته شد، آورده شده است. به‌طورکلی این بخش به ۳ قسمت تقسیم شده است. بخش اول پژوهش به بررسی تأثیرات زمان‌بندی و استفاده از راهبرد سوراخ گروهی بر مشخصه‌های احتراق و قطره‌سازی ذرات سوخت می‌پردازد. بخش دوم، و سوم نیز به ترتیب به تأثیرات راهبردهای اتخاذ شده بر تشکیل آلاینده‌ها و سطح عملکرد موتور اختصاص داده شده است. در هر بخش نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در قالب نمودارها و جداول ارائه شده است.

تأثیرات زمان‌بندی پاشش سوخت و راهبرد سوراخ گروهی بر مشخصه‌های احتراق و قطره‌سازی سوخت

فرایند احتراق در موتورهای اشتعال تراکمی پاشش مستقیم از دو فاز جداگانه تشکیل شده است: دوره تأخیر در اشتعال و دوره رهاسازی گرما. دوره تأخیر در اشتعال به فشار درون سیلندر، دما، و مشخصات شیمیایی سوخت بستگی دارد. در موتورهای دیزلی پاشش مستقیم، دوره تأخیر در اشتعال تابعی از نسبت تراکم، میزان سرعت گردابه‌ای حرکت هوا درون سیلندر و همچنین دور موتور است [۳۷]. شکل‌های ۶-الف و ۶-ب به ترتیب تأثیر زمان‌بندی و استفاده از راهبرد سوراخ گروهی برای پاشش مستقیم سوخت دیزل بر دوره تأخیر در اشتعال و فاز احتراق را نشان می‌دهد.



6-(b) 6-(a)  
**Figure 6- Effects of study strategies on ignition delay (a) and combustion phase (b)**  
 شکل ۶- تأثیرات راهبردهای مطالعه بر (الف) دوره تأخیر در اشتعال و (ب) فاز احتراق

طبق شکل ۶-الف مشاهده می‌شود با تعویق زمان‌بندی پاشش سوخت دیزل در مقایسه با حالت پایه کارکردی موتور، طول دوره تأخیر در اشتعال در ابتدا کاهش سپس افزایش یافته است. همچنین، با جلو انداختن زمان‌بندی پاشش سوخت دیزل نسبت به حالت پایه، طول دوره تأخیر در اشتعال افزایش چشمگیری داشته است. با جلو انداختن زمان‌بندی پاشش سوخت فشار و دمای درون سیلندر به اندازه کافی بالا نیست تا سوخت مشتعل شود و به همین دلیل حجم بیشتری از سوخت تبخیر شده در طول دوره تأخیر در اشتعال انباشته شده و همچنین، با تعویق زمان پاشش سوخت فشار و دمای درون سیلندر به اندازه کافی بالا است تا سوخت محترق شود. لازم به ذکر است هرچه بیشتر جلو انداختن زمان پاشش سوخت دیزل به آن معنا نیست که باعث بیشتر شدن حجم سوخت تبخیر شده شود زیرا تبخیر مناسب سوخت نیازمند شرایط مناسب همچون دماست که پاشش زود هنگام سوخت اغلب با شرایط نامناسب‌تری از قبیل دما و فشار درون سیلندر همراه است. با توجه به توضیحات ارائه شده، دوره تأخیر در اشتعال با تعویق زمان پاشش سوخت کوتاه‌تر شده و حجم کمتری از سوخت در طول این دوره تبخیر و انباشته می‌شود. علاوه بر این، مشاهده می‌شود برای زمان‌بندی پاشش مستقیم سوخت دیزل از ۶ تا ۲ درجه میل‌لنگ قبل از نقطه مرگ بالا دوره تأخیر در اشتعال افزایش یافته که دلیل آن نیز می‌تواند طول دوره پاشش سوخت، زمان‌بندی دیر هنگام پاشش و همچنین، حرکت انبساطی محفظه احتراق بعد از زمان نقطه مرگ بالا است که با کاهش تدریجی میانگین دما و فشار محفظه احتراق طول دوره اشتعال افزایش یافته و در نتیجه منجر به افزایش طول دوره تأخیر در اشتعال شده است. طبق شکل ۶-الف مشاهده می‌شود که طول دوره تأخیر در اشتعال برای زمان‌بندی پاشش ۶ درجه میل‌لنگ قبل از نقطه مرگ بالا کوتاه‌ترین مقدار را در مقایسه با زمان‌بندی‌های پاشش سوخت دیگر دارد. همچنین برای زمان‌بندی ۲۰ درجه میل‌لنگ قبل از نقطه مرگ بالا طول دوره تأخیر در اشتعال در مقایسه با زمان‌بندی‌های پاشش دیگر طولانی‌ترین حالت گزارش شده است. طبق شکل ۶-ب مشاهده می‌شود با تعویق زمان‌بندی پاشش سوخت فاز احتراق نیز به تعویق افتاده است که دلیل آن شروع دیر هنگام زمان احتراق ترکیب سوخت و هوا است. به‌طور کلی، طبق نتایج به‌دست آمده از شکل‌های ۶-الف و ۶-ب، دوره تأخیر در اشتعال و همچنین فاز احتراق به‌طور

قابل چشمگیری نسبت به زمان‌بندی پاشش سوخت حساسیت بالایی دارند زیرا زمان پاشش سوخت در واقع زمان شروع ترکیب سوخت و هوا را کنترل می‌کند.

استفاده از راهبرد سوراخ گروهی جهت پاشش مستقیم سوخت دیزل این امکان را به وجود می‌آورد تا در مقایسه با روش‌های سنتی پاشش سوخت (راهبرد تک سوراخه)، نواحی غنی ترکیب سوخت-هوا و معمولاً با دمای بسیار بالا درون محفظه احتراق کاهش یابد و در نتیجه باعث کاهش آلاینده‌های تولید شده شود. طبق شکل ۶-الف مشاهده می‌شود برای حالت سوراخ گروهی در مقایسه با حالت تک سوراخه روند تغییرات دوره تأخیر در اشتعال با تغییر در زمان‌بندی پاشش سوخت دیزل مشابه است ولی در بازه ۶ تا ۲ درجه میل‌لنگ قبل از نقطه مرگ بالا دوره تأخیر در اشتعال برای حالت سوراخ گروهی کمتر از حالت تک سوراخه گزارش شده است. همچنین، طبق شکل ۶-ب مشاهده می‌شود با تعویق زمان‌بندی پاشش سوخت دیزل از ۲۰ تا ۲ درجه میل‌لنگ قبل از نقطه مرگ بالا، فاز احتراق برای حالت سوراخ گروهی در مقیاس کوچکی در مقایسه با حالت تک سوراخه، به تعویق افتاده است.

در موتورهای اشتعال تراکمی پاشش مستقیم، مشخصه‌های قطره‌سازی ذرات سوخت نقش مهمی در ارتباط با مشخصه‌های احتراق اشتعال تراکمی دارند زیرا فرایند تشکیل ترکیب میان ذرات سوخت افشانه شده و هوای موجود درون سیلندر دارای تأثیر مستقیم بر تشکیل آلاینده‌ها و سطح عملکرد موتور دارد. در این پژوهش، تأثیرات زمان‌بندی پاشش سوخت و به کارگیری راهبرد سوراخ گروهی بر قطر متوسط حجم ذرات، ضریب نسبی پخش، بیشینه طول نفوذ افشانه، و همچنین طول دوره تبخیر ذرات سوخت مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند. شکل ۷-الف تأثیر زمان‌بندی پاشش سوخت دیزل و راهبرد سوراخ گروهی را بر ضریب نسبی پخش افشانه سوخت نشان می‌دهد. طبق شکل ۷-الف مشاهده می‌شود با تعویق زمان‌بندی پاشش سوخت، ضریب نسبی پخش افشانه سوخت برای هر دو حالت تک سوراخه و سوراخ گروهی کاهش یافته است. به‌طور کلی، این مشخصه بی‌بعد عرض افشانه سوخت درون محفظه احتراق را ارزیابی می‌کند به این گونه که هرچقدر این مشخصه بزرگ‌تر باشد عرض افشانه سوخت بیشتر بوده و بالعکس هرچقدر این مشخصه کوچک‌تر باشد عرض افشانه سوخت نیز باریک‌تر است. باین‌حال، می‌توان از این مشخصه به‌عنوان یک ابزار عددی برای بررسی کیفیت ترکیب سوخت و هوا استفاده کرد. از عوامل مؤثر بر ضریب نسبی پخش می‌توان به میانگین فشار درون سیلندر اشاره کرد. با افزایش فشار درون سیلندر لزجت هوا افزایش یافته و در ادامه نیروی پسا حاصل از وجود ذرات هوا به‌عنوان یک عامل بازدارنده باعث می‌شود تا عرض افشانه سوخت کاهش یابد. با کاهش عرض افشانه سوخت دیزل، ذرات در دامنه کوچک‌تری افشانه شده و ذرات سوخت در ناحیه محدودتری تشکیل ترکیب سوخت و هوا می‌دهند. این اتفاق باعث می‌شود تا کیفیت فرایند تشکیل سوخت و هوا درون محفظه احتراق کاهش یافته و در نتیجه به‌دنبال کاهش عرض افشانه سوخت، احتمال برخورد ذرات افشانه شده با یکدیگر به مقدار قابل توجهی افزایش یافته و پدیده لختگی ذرات سوخت تشدید شود. به‌طور کلی لختگی که باعث تشکل ترکیب سوخت و هوای ناحیه‌ای با نسبت هم‌ارزی نسبتاً بالا شده که در نتیجه فرایند تبخیر ذرات سوخت را تضعیف می‌کند. تضعیف شدن فرایند تبخیر ذرات سوخت باعث می‌شود سطح عملکرد موتور کاهش و همچنین، میزان آلاینده‌هایی همچون ذرات دوده افزایش یابند. طبق شکل ۷-الف مشاهده می‌شود برای حالت سوراخ گروهی با زمان‌بندی پاشش زود هنگام سوخت دیزل، ضریب نسبی پخش در مقایسه با حالت پایه تک‌سوراخه به‌مقدار قابل توجهی افزایش یافته است. به‌عبارت‌دیگر، با پاشش زود هنگام سوخت و به کارگیری راهبرد سوراخ گروهی عرض افشانه سوخت به‌مقدار قابل توجهی افزایش یافته که سبب می‌شود تا ذرات سوخت در ناحیه وسیع‌تری افشانه شده و با هوای بیشتری درگیر شده و تشکیل ترکیب سوخت و هوا دهند.

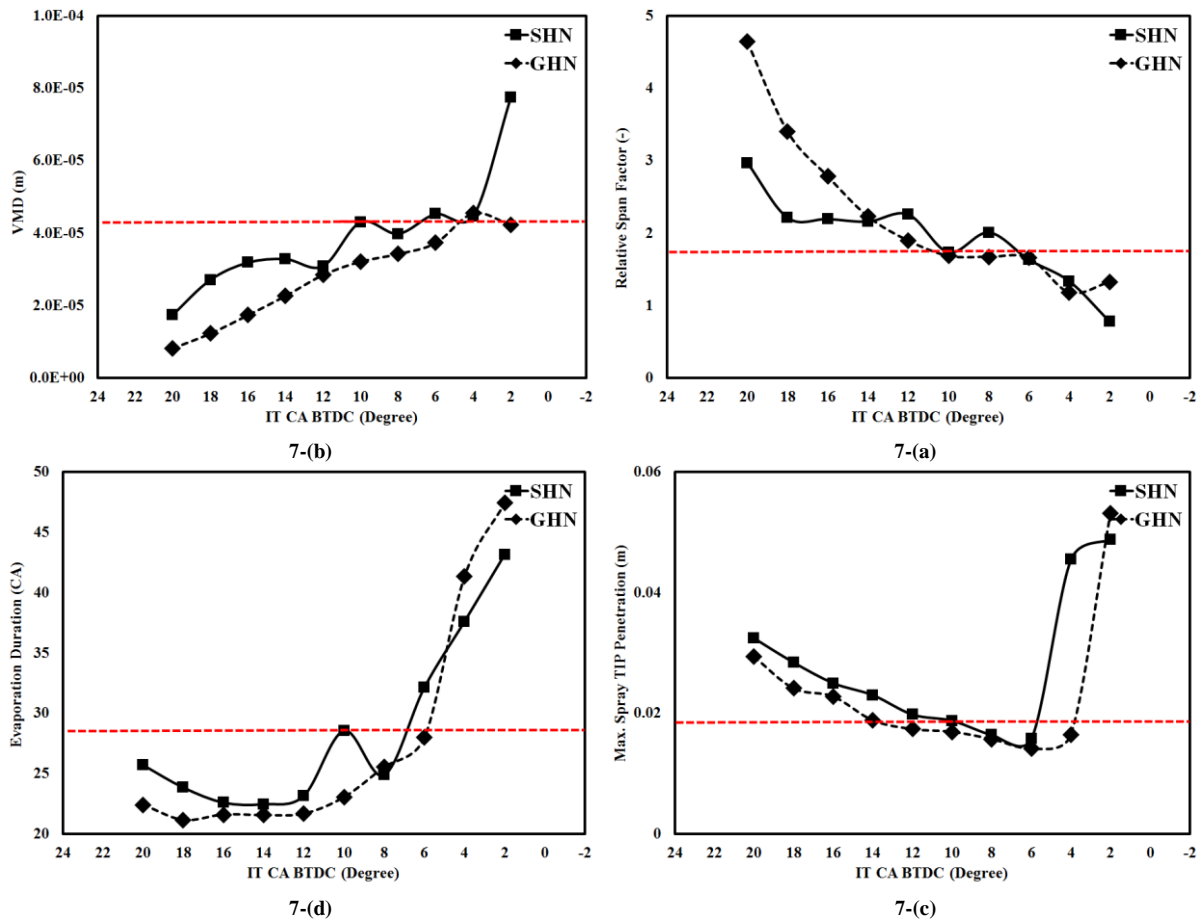


Fig. 7 Effects of study strategies on fuel atomization characteristics  
 شکل ۷- تأثیرات راهبردهای مطالعه بر مشخصه‌های قطره‌سازی سوخت

شکل ۷-ب تأثیرات زمان‌بندی پاشش سوخت دیزل و راهبرد سوراخ گروهی را بر قطر متوسط حجم ذرات درون محفظه احتراق را نشان می‌دهد. طبق شکل ۷-ب مشاهده می‌شود با تعویق زمان‌بندی پاشش سوخت، قطر متوسط حجم ذرات افزایش یافته است. همان‌طور که قبلاً به آن اشاره شد، با حرکت تراکمی محفظه احتراق میانگین فشار درون سیلندر افزایش یافته و باعث می‌شود تا لزجت جریان‌های موجود افزایش یابد. با افزایش لزجت جریان نیروی پسا نیز افزایش یافته و منجر به باریک‌تر شدن ناحیه افشانه سوخت یا به عبارت دیگر کاهش ضریب نسبی پخش می‌شود. طبق آنچه که قبلاً گزارش شده است، با کاهش ضریب نسبی پخش، ذرات سوخت در ناحیه کوچک‌تری افشانه شده، برخورد ذرات با یکدیگر افزایش یافته و در نتیجه پدیده لختگی تشدید می‌شود. با افزایش لختگی درون محفظه احتراق، قطر متوسط حجم ذرات افزایش می‌یابد. علاوه بر این، مشاهده می‌شود برای حالت سوراخ گروهی در مقایسه با حالت تک سوراخ، قطر متوسط حجم ذرت کمتر است که دلیل آن کوچک‌تر بودن قطر سوراخ‌های سامانه پاشش سوخت برای راهبرد سوراخ گروهی است که در نهایت منجر به کوچک‌تر شدن قطر ذرات سوخت شده است. شکل ۷-ج تأثیرات زمان‌بندی پاشش سوخت و راهبرد سوراخ گروهی را بر طول نفوذ افشانه درون محفظه احتراق نشان می‌دهد. طبق شکل ۷-ج مشاهده می‌شود با تعویق زمان‌بندی پاشش سوخت دیزل، طول نفوذ افشانه سوخت کاهش یافته است. با تعویق زمان‌بندی پاشش سوخت دیزل و کاهش ضریب نسبی پخش، قطر متوسط حجم ذرات طبق شکل ۷-ب افزایش می‌یابد. با افزایش قطر متوسط حجم ذرات سوخت و افزایش تدریجی میانگین فشار درون سیلندر به دلیل حرکت تراکمی محفظه احتراق، مقاومت آیرودینامیکی افزایش یافته و همچنین انرژی جنبشی ذرات به دلیل افزایش قطر کاهش

یافته است و در نتیجه طول نفوذ افشانه سوخت کاهش می‌یابد. علاوه بر این، مشاهده می‌شود با مقایسه میان حالت تک سوراخه و حالت سوراخ گروهی، طول نفوذ افشانه برای حالت سوراخ گروهی کوتاه‌تر گزارش شده است.

با به‌کارگیری راهبرد سوراخ گروهی و کاهش قطر سوراخ پاشش سوخت، طول نفوذ افشانه در مقایسه با حالت تک سوراخه کوتاه‌تر گزارش شده است. با به‌کارگیری راهبرد سوراخ گروهی و کاهش قطر سوراخ پاشش سوخت، طول و پاشی سوخت به‌دلیل افزایش اثر متقابل میان سطح جریان سوخت و دیواره سوراخ سامانه پاشش (تنش برشی دیواره)، کاهش یافته و همان‌طور که مشاهده می‌شود طول نفوذ افشانه برای حالت سوراخ گروهی در مقایسه با حالت تک سوراخه کوتاه‌تر شده است. علاوه بر توضیحات ارائه شده طبق شکل ۷-ج مشاهده می‌شود برای پاشش دیر هنگام سوخت دیزل برای هر دو حالت تک‌سوراخه و سوراخ گروهی طول نفوذ افشانه سوخت افزایش چشمگیری داشته است. با پاشش سوخت با زمان‌بندی دیر هنگام به‌دلیل کاهش فشار سیلندر و همچنین، حرکت انبساطی محفظه احتراق و فاصله‌گرفتن آن از سامانه پاشش، ذرات سوخت نیز می‌توانند مسافت بیشتری را درون محفظه احتراق طی کنند. شکل ۷-د تأثیرات زمان‌بندی پاشش سوخت دیزل و به‌کارگیری راهبرد سوراخ گروهی را بر طول دوره تبخیر ذرات سوخت نشان داده است. طبق شکل ۷-د مشاهده می‌شود با تعویق زمان‌بندی پاشش سوخت دیزل طول دوره تبخیر ذرات سوخت در ابتدا کمی کاهش سپس به‌مقدار قابل‌توجهی افزایش یافته است. دما و فشار درون محفظه احتراق یکی از عوامل مؤثر بر چگونگی و سطح کیفیت فرایند تبخیر ذرات سوخت درون محفظه احتراق است. با تعویق زمان‌بندی پاشش سوخت از ۲۰ تا ۱۶ درجه میل‌لنگ قبل از نقطه مرگ بالا طول دوره تبخیر سوخت کاهش یافته است. با تعویق زمان‌بندی پاشش سوخت دیزل در این بازه اشاره شده، به تدریج دما و فشار درون سیلندر افزایش یافته و در طی دوره تأخیر در اشتعال ایجاد شده به‌دلیل وجود شرایط مناسب از نظر دما و فشار درون محفظه احتراق، میزان سوخت بیشتری تبخیر و انباشته می‌شود و در نتیجه دوره و مدت زمان جهت تبخیر کل سوخت افشانه شده کاهش می‌یابد.

از دیگر عوامل تأثیرگذار بر سطح کیفیت تبخیر ذرات سوخت اندازه ذرات سوخت افشانه شده است. با تعویق زمان‌بندی پاشش سوخت دیزل و کاهش ضریب نسبی پخش ذرات سوخت، برخورد ذرات سوخت با یکدیگر افزایش یافته و میزان لختگی افزایش می‌یابد. با افزایش لختگی سوخت دیزل، قطر متوسط حجم ذرات افزایش یافته و در نتیجه زمان بیشتر لازم است تا ذرات درشت‌تر ایجاد شده حاصل از برخورد با یکدیگر تبخیر شوند به همین سبب، با افزایش طول دوره تبخیر ذرات سوخت کیفیت فرایند ترکیب سوخت و هوا تضعیف می‌شود. علاوه بر این، مشاهده می‌شود با به‌کارگیری راهبرد سوراخ گروهی در بازه ۲۰ تا ۱۰ درجه میل‌لنگ قبل از نقطه مرگ بالا طول دوره تبخیر ذرات سوخت در مقایسه با حالت تک سوراخه کوتاه‌تر گزارش شده است که دلیل آن کوچک‌تر بودن قطر اولیه ذرات سوخت افشانه شده است. لازم به ذکر است علاوه بر اینکه اندازه قطر اولیه ذرات سوخت بر سطح کیفی فرایند تبخیر تأثیرگذار است و همچنین، از آنجا که طول عمر ذرات سوخت افشانه شده بسیار کوتاه است، سطح کیفیت فرایند تبخیر تأثیر غیر قابل‌انکاری بر اندازه ذرات افشانه شده سوخت درون محفظه احتراق دارد. برای پاشش یکپارچه سوخت درون محفظه احتراق، فرایند تبخیر تحت شرایط خاصی باعث کاهش قطر متوسط حجم ذرات می‌شود [۳۷]. با تعویق زمان‌بندی پاشش سوخت دیزل طول دوره تأخیر در اشتعال کاهش چشمگیری یافته و زمان مورد نیاز جهت تبخیر و انباشته شدن ذرات سوخت کاهش می‌یابد و همان‌طور که مشاهده می‌شود تعویق زمان‌بندی پاشش سوخت دیزل باعث افزایش طول دوره تبخیر ذرات شده است که تضعیف فرایند ترکیب سوخت و هوا را به‌دنبال دارد.

دوره رهاسازی گرما شامل دو حالت سوختن پیش‌آمیخته و نفوذی است. در ابتدا ترکیب سوخت و هوا که تبخیر و انباشته شده بود در حالت پیش‌آمیخته می‌سوزد تا به پایان برسد. بعد از آن سوختن در حالت نفوذی تا پایان دوره احتراق اتفاق می‌افتد [۳۸]. شکل ۸-الف تأثیرات زمان‌بندی پاشش و استفاده از راهبرد سوراخ گروهی برای پاشش سوخت دیزل را بر نقطه بیشینه آهنگ رهاسازی گرما را نشان می‌دهد. طبق شکل ۸-الف مشاهده می‌شود نقطه بیشینه آهنگ رهاسازی گرما در ابتدا کاهش، سپس افزایش، در ادامه کاهش و دوباره افزایش یافته است.

1 Break-up length

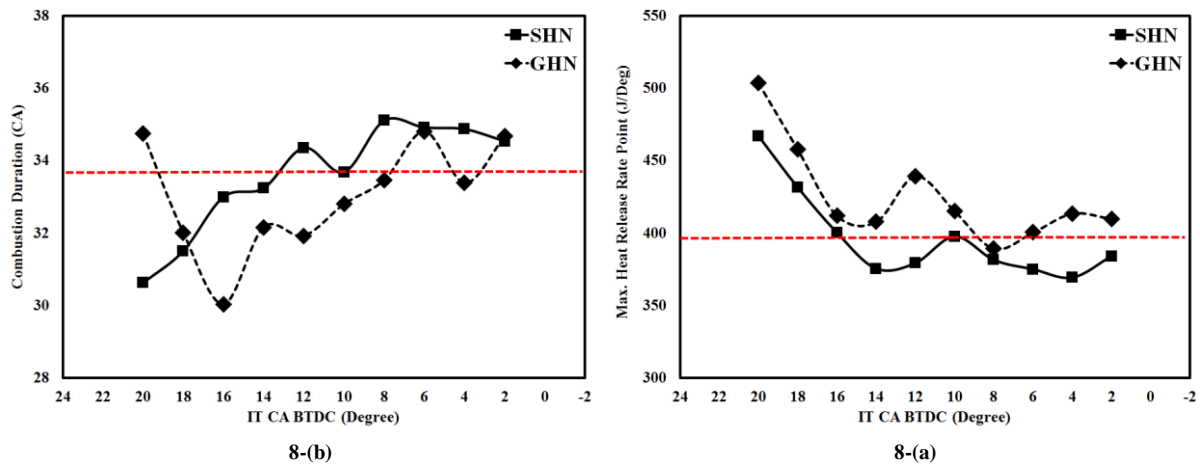


Figure 8-Effects of study strategies on max heat release rate point (a) and combustion duration (b)  
 شکل ۸- تأثیرات راهبردهای مطالعه بر (الف) - نقطه بیشینه آهنگ رهاسازی گرما و (ب) - طول دوره احتراق

با جلو انداختن زمان پاشش سوخت از ۱۴ تا ۲۰ درجه میل‌لنگ قبل از نقطه مرگ بالا نقطه بیشینه آهنگ رهاسازی گرما افزایش یافته است. همان‌طور که در شکل ۶-الف به آن اشاره شد، با جلو انداختن زمان پاشش سوخت طول دوره تأخیر در اشتعال افزایش یافته که این امر باعث می‌شود تا در طول این دوره، میزان سوخت بیشتری تبخیر و انباشته شود. افزایش طول دوره تأخیر در اشتعال منجر به افزایش آهنگ سوختن ذرات سوخت افشاند شده می‌شود که در نتیجه بیشتر میزان سوخت افشاند شده در حالت احتراق پیش‌آمیخته می‌سوزد. به همین سبب، همان‌طور که در شکل ۸-الف مشاهده می‌شود، با جلو انداختن زمان پاشش سوخت دیزل از ۱۴ تا ۲۰ درجه میل‌لنگ قبل از نقطه مرگ بالا نقطه بیشینه آهنگ رهاسازی گرما افزایش یافته است. برای راهبرد تک‌سوراخه مشاهده می‌شود که با تعویق زمان‌بندی پاشش سوخت از ۱۰ تا ۴ درجه میل‌لنگ قبل از نقطه مرگ بالا نقطه بیشینه آهنگ رهاسازی گرما کاهش یافته است. با تعویق زمان‌بندی پاشش سوخت دیزل، دوره تأخیر در اشتعال نسبت به حالت پایه کارکردی موتور کوتاه‌تر بوده و در طی این دوره مقدار سوخت کمتری تبخیر و انباشته شده است که نتیجه آن کاهش آهنگ سوختن ذرات سوخت دیزل افشاند شده است و در نهایت نقطه بیشینه آهنگ رهاسازی گرما کاهش یافته است.

باید اشاره کرد که با کاهش طول دوره تأخیر در اشتعال میزان سوخت کمتری تبخیر و انباشته شده و در نتیجه بیشتر سوخت در حالت احتراق نفوذی می‌سوزد. همان‌طور که در شکل ۸-الف مشاهده می‌شود نقطه بیشینه آهنگ رهاسازی گرما برای حالت پایه کارکردی برخلاف روند اشاره‌شده بوده و افزایش یافته است که دلیل آن می‌تواند پاشش سوخت با زمان‌بندی مناسب باشد که سوخت بر روی سطح فوقانی کاسه پیستون افشاند شده که در آن ناحیه سطح اکسیژن موجود نسبت به نواحی دیگر بیشتر بوده و در نتیجه نقطه بیشینه آهنگ رهاسازی گرما افزایش یافته است. همچنین، مشاهده می‌شود با زمان‌بندی پاشش سوخت در زاویه ۲ درجه میل‌لنگ قبل از نقطه مرگ بالا، نقطه بیشینه آهنگ رهاسازی گرما نیز افزایش یافته است. طبق شکل ۶-الف مشاهده شد برای زمان‌بندی پاشش ۲ درجه میل‌لنگ قبل از نقطه مرگ بالا دوره تأخیر در اشتعال افزایش یافته که باعث می‌شود تا میزان سوخت بیشتری در طول این دوره تبخیر و انباشته شود و آهنگ سوختن ذرات افشاند شده سوخت دیزل افزایش یابد.

طبق شکل ۸-الف مشاهده می‌شود برای راهبرد سوراخ گروهی روند تغییرات نقطه بیشینه آهنگ رهاسازی گرما مشابه روند گزارش شده برای راهبرد تک‌سوراخه است ولی برای زمان‌بندی‌های پاشش سوخت در ۱۲ و ۸ تا ۲ درجه میل‌لنگ قبل از نقطه مرگ بالا روند تغییرات متفاوت است. همان‌طور که در شکل ۸-الف مشاهده می‌شود نقطه بیشینه‌های آهنگ رهاسازی گرما

برای حالت سوراخ گروهی از حالت تک سوراخه بیشتر است که دلیل آن می‌تواند کوچک تر بودن قطر متوسط حجم ذرات سوخت افشاندن شده در مقایسه با حالت پایه تک سوراخه باشد. افزایش طول دوره تأخیر در اشتعال همان‌طور که قبلاً به آن اشاره شده می‌تواند باعث افزایش نقطه بیشینه آهنگ رهاسازی گرما شود. علاوه بر این که پاشش سوخت با طول دوره پاشش ثابت همزمان از دو سوراخ باعث می‌شود تا سوخت بیشتری با هوا ترکیب شده و در نتیجه فرایند اکسایش ترکیب سوخت و هوا در مقایسه با حالت تک‌سوراخه به مقدار قابل توجهی افزایش یابد. برای زمان‌بندی ۱۲ درجه میل‌لنگ قبل از نقطه مرگ بالا برای راهبرد سوراخ گروهی، مشاهده می‌شود نقطه بیشینه آهنگ رهاسازی گرما برخلاف روند کلی افزایش یافته است. همان‌طور که قبلاً برای زمان‌بندی پاشش سوخت در ۱۰ درجه میل‌لنگ قبل از نقطه مرگ بالا برای حالت تک سوراخه اشاره شد، برای حالت سوراخ گروهی پاشش سوخت با زمان‌بندی ۱۲ درجه میل‌لنگ قبل از نقطه مرگ بالا باعث شده است تا ذرات سوخت افشاندن شده بر روی سطح فوقانی کاسه پیستون که میزان اکسیژن موجود در آن ناحیه نسبت به بقیه قسمت‌های محفظه احتراق بالاتر است وارد شده و همچنین، اینکه در حالت سوراخ گروهی سوخت از دو سوراخ همزمان افشاندن شود که باعث می‌شود تا فرایند ترکیب سوخت و هوا نسبت به حالت تک سوراخه بهبود یابد. می‌توان اشاره کرد دلیل اصلی میان این دو زمان‌بندی‌ها می‌تواند زاویه واگرایی میان دو سوراخ پاشش سوخت در راهبرد سوراخ گروهی باشد که این زمان‌بندی پاشش دیزل این امکان را به وجود می‌آورد تا محفظه احتراق در فاصله مناسبی از سامانه پاشش سوخت قرار گرفته و سوخت تا حد امکان در ناحیه‌ای افشاندن شود تا بیشترین مقدار ترکیب سوخت و هوا تشکیل شده و ذرات سوخت به دلیل وجود زاویه واگرایی میان سوراخ‌های پاشش به درز و شکاف‌های موجود درون محفظه احتراق کمتر نفوذ کرده و کمترین اتلاف حاصل شود.

شکل ۸-ب تأثیرات زمان‌بندی پاشش سوخت و استفاده از راهبرد سوراخ گروهی را بر طول دوره احتراق نشان می‌دهد. طبق شکل مشاهده می‌شود برای راهبرد سوراخ گروهی طول دوره احتراق در ابتدا کاهش، سپس، همانند حالت تک‌سوراخه با تعویق زمان‌بندی پاشش سوخت دیزل این مشخصه افزایش یافته است. همان‌طور که قبلاً به آن اشاره شد، با تعویق زمان‌بندی پاشش، طول دوره تأخیر در اشتعال در ابتدا کاهش یافته و باعث می‌شود تا میزان سوخت کمتری تبخیر و انباشته شود و بنابراین بیشتر سوخت در حالت احتراق نفوذی می‌سوزد. احتراق نفوذی سوخت باعث می‌شود تا ابتدا طول دوره تبخیر سوخت افزایش یافته و در ادامه آهنگ احتراق کاهش یابد. بنابراین، طبق شکل ۸-ب مشاهده می‌شود با تعویق زمان‌بندی پاشش سوخت برای هر دو راهبرد تک سوراخه طول دوره احتراق افزایش و برای سوراخ گروهی در ابتدا کاهش سپس افزایش یافته است. به‌طور کلی آهنگ احتراق حالت پیش‌آمیخته در مقایسه با حالت نفوذی بیشتر است. در حالت احتراق پیش‌آمیخته، سوخت و عامل اکسیدکننده (هوا) قبل از رخ دادن هرگونه واکنشی، ابتدا در سطح مولکولی باهم ترکیب می‌شوند. در طی فرایند ترکیب سوخت و هوا ذرات سوخت تبخیر می‌شوند و در نتیجه طول دوره تبخیر سوخت کاهش می‌یابد، زیرا در ابتدا سوخت تبخیر سپس واکنش‌های مربوطه رخ می‌دهند. در حالت نفوذی دو فرایند احتراق و تشکیل ترکیب سوخت و هوا همزمان با یکدیگر رخ می‌دهند. این نوع سوختن به این‌گونه است که عامل اکسیدکننده و ذرات سوخت در جهت مخالف یکدیگر به‌سوی شعله حرکت می‌کنند. بنابراین، در این نوع سوختن فرایند تبخیر ذرات سوخت به‌کندی پیش می‌رود و آهنگ احتراق سوخت کاهش می‌یابد. علاوه بر توضیحات ارائه‌شده اگر در شکل ۸-ب دقت شود طول دوره اشتعال برای حالت سوراخ گروهی در ابتدا کاهش یافته است. در زمان‌بندی‌های پاشش زود هنگام به دلیل اینکه دما و فشار درون محفظه احتراق کافی نیست و همچنین اینکه سوخت در حالت دو سوراخه با یک زاویه واگرایی ۱۰ درجه افشاندن می‌شود ممکن است میزان بیشتری از سوخت در مقایسه با حالت تک سوراخه در نواحی که میزان هوای موجود کمتر باشد افشاندن شود و به دلیل فشار و دمای کمتر، طول دوره اشتعال به سبب اکسایش ضعیف ترکیب سوخت و هوا در زمان‌بندی‌های زود هنگام افزایش یافته است.

شکل ۹-الف و ۹-ب به ترتیب تأثیرات زمان‌بندی پاشش سوخت و همچنین، راهبرد سوراخ گروهی را بر نقطه بیشینه میانگین فشار و دمای درون سیلندر موتور را نشان می‌دهد. طبق شکل مشاهده می‌شود با تعویق زمان‌بندی پاشش سوخت دیزل برای هر دو راهبرد تک سوراخه و سوراخ گروهی نقطه بیشینه میانگین فشار و دمای درون سیلندر کاهش یافته است. همان‌طور



که قبلاً به آن اشاره شد با تعویق زمان بندی پاشش سوخت دیزل طول دوره تأخیر در اشتعال کاهش یافته، مقدار سوخت کمتری در طول این دوره تبخیر و انباشته می شود و در نتیجه بیشتر مقدار سوخت در حالت نفوذی می سوزد. احتراق در حالت نفوذی باعث شده تا آهنگ احتراق کاهش یافته، طول دوره تبخیر ذرات سوخت و همچنین احتراق افزایش یابد و به دنبال آن نقطه بیشینه فشار و دمای درون سیلندر کاهش یافته است. طبق شکل های ۹-الف و ۹-ب مشاهده می شود برای حالت سوراخ گروهی در مقایسه با حالت تک سوراخه تأثیر چندان و قابل توجهی بر نقطه بیشینه میانگین فشار ایجاد نشده است ولی برای میانگین دمای درون سیلندر نقطه بیشینه های دما برای حالت سوراخ گروهی در مقیاس کمی افزایش یافته است. به عبارت دیگر، با تعویق زمان بندی پاشش سوخت دیزل ضریب نسبی پخش ذرات کاهش یافته، برخورد ذرات با یکدیگر بیشتر شده و در نتیجه میزان لختگی سوخت افزایش می یابد. با افزایش لختگی سوخت، نواحی غنی از سوخت با نسبت هم آری بالا درون محفظه احتراق ایجاد شده که باعث تضعیف فرایند ترکیب سوخت و هوا می شود که در نهایت نقطه بیشینه دما و فشار درون سیلندر کاهش یافته است.

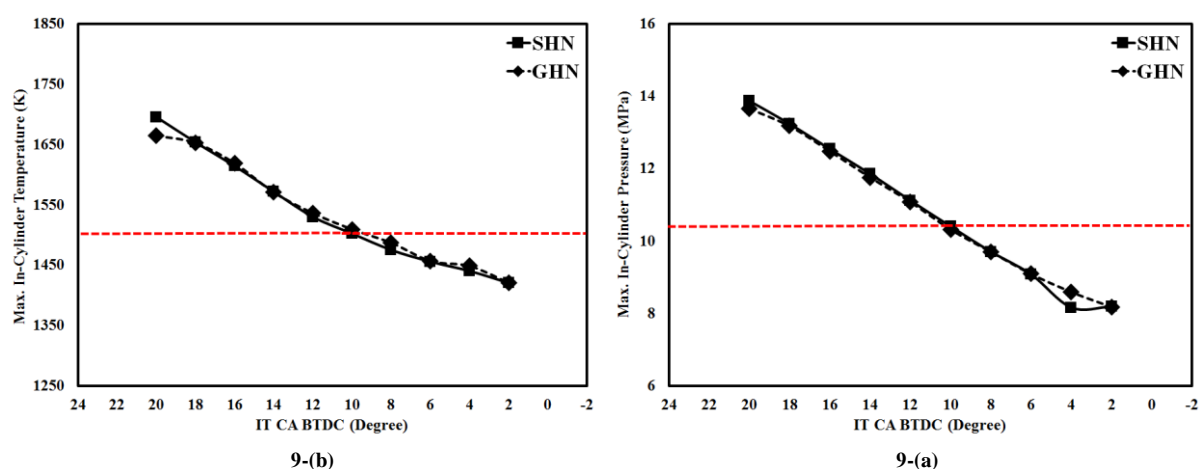


Figure 9- Effects of study strategies on max in-cylinder pressure (a) and temperature (b)  
 شکل ۹- تأثیرات راهبردهای مطالعه بر (الف) بیشینه فشار و (ب) دمای درون سیلندر

شدت کوبش موتور یکی از مشخصه های مهم فرایند احتراق اشتعال تراکمی در موتورهای دیزلی است. شکل ۱۰-الف و ۱۰-ب به ترتیب تأثیرات زمان بندی پاشش سوخت و راهبرد سوراخ گروهی را بر شدت کوبش و همچنین نقطه بیشینه آهنگ تغییرات فشار، نشان می دهد. طبق شکل های ۱۰-الف و ۱۰-ب مشاهده می شود با تعویق زمان بندی پاشش سوخت دیزل برای حالت تک سوراخه شدت کوبش و نقطه بیشینه آهنگ تغییرات فشار کاهش یافته است. به طور کلی با تعویق زمان بندی پاشش سوخت دیزل، به دلیل کاهش طول دوره تأخیر در اشتعال بیشتر جرم سوخت در حالت احتراق نفوذی سوخته، آهنگ احتراق کاهش یافته، طول دوره احتراق و تبخیر سوخت افزایش یافته و همان طور که در شکل ۱۰-ب مشاهده می شود نقطه بیشینه آهنگ تغییرات فشار درون سیلندر کاهش یافته است. برای حالت سوراخ گروهی مشاهده می شود در دو زمان بندی ۱۴ و ۱۲ درجه میل لنگ قبل از نقطه مرگ بالا نتایج برخلاف روند کلی می باشند و شدت کوبش موتور و نقطه بیشینه آهنگ تغییرات فشار افزایش یافته است. همان طور که در قسمت های قبلی به آن اشاره شد با استفاده از راهبرد سوراخ گروهی سوخت بیشتری می تواند با هوا تشکیل ترکیب سوخت و هوا دهد و همچنین در این دو زمان بندی می توان استنباط کرد که به دلیل قرارگیری پیستون درون سیلندر سوخت بیشتری بر روی سطح کاسه پیستون افشاند شده که در آن نواحی سطح اکسیژن موجود بیشتر بوده است. بنابراین مشاهده می شود برای دو زمان بندی ۱۴ و ۱۲ درجه میل لنگ قبل از نقطه مرگ بالا برای حالت سوراخ گروهی شدت کوبش موتور و بیشینه آهنگ تغییرات فشار افزایش یافته است.

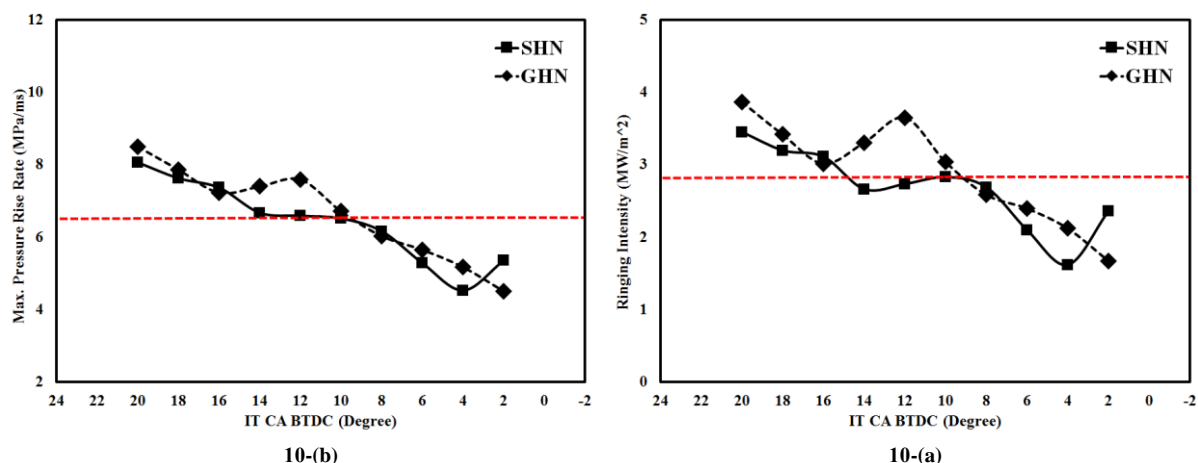


Figure 10- Effects of study strategies on ringing intensity (a) and max. pressure rise rate (b)

شکل ۱۰- تأثیرات راهبردهای مطالعه بر (الف) - شدت کوبش و (ب) - نقطه بیشینه آهنگ تغییرات فشار

### تأثیرات زمان‌بندی پاشش سوخت و راهبرد سوراخ گروهی بر میزان آلاینده‌های خروجی

در احتراق اشتعال تراکمی، به‌طور عمده آلاینده مونوکسید نیتروژن تشکیل می‌شود که در نهایت تقریباً به‌طور کامل تحت شرایط جوی به دی‌اکسید نیتروژن تبدیل می‌شود. در طی احتراق، مونوکسید نیتروژن طی سه روش تشکیل می‌شود. روش اول که به آن مونوکسید نیتروژن گرمایی می‌گویند که همراه با محصولات احتراق در دمای بسیار بالا طبق مکانیزم زلدوویچ تشکیل شده که منبع آن نیتروژن موجود در هوای درون محفظه احتراق است. روش دوم، مونوکسید نیتروژن فوری است که در جبهه‌ی شعله حاصل از احتراق اشتعال تراکمی وجود دارد که همچنین منبع آن نیتروژن موجود در هوای درون سیلندر است. روش سوم که مونوکسید نیتروژن سوخت است و منبع آن نیتروژن موجود در ساختار سوخت است. شکل ۱۱-الف تأثیرات زمان‌بندی پاشش سوخت دیزل و راهبرد سوراخ گروهی را بر میزان آلاینده‌های اکسیدهای نیتروژن تولید شده نشان می‌دهد. طبق شکل ۱۱-الف مشاهده می‌شود با تعویق زمان‌بندی پاشش سوخت دیزل برای هر دو حالت تک سوراخه و سوراخ گروهی، میزان آلاینده اکسیدهای نیتروژن کاهش چشمگیری داشته است. تعویق زمان‌بندی پاشش سوخت دیزل باعث می‌شود تا طول دوره تأخیر در اشتعال کاهش یابد و مقدار سوخت کمتری در طول این دوره تبخیر و انباشته شود. با کاهش طول دوره تأخیر در اشتعال، بیشتر جرم سوخت در حالت نفوذی سوخته، فرایند تبخیر ذرات سوخت تضعیف شده و در نتیجه فرایند اکسایش ذرات سوخت تضعیف می‌شود. تضعیف فرایند اکسایش ذرات سوخت توسط هوا باعث می‌شود تا نقطه بیشینه دما و فشار درون سیلندر کاهش یابد و در نتیجه مونوکسیدکربن زلدوویچ کاهش می‌یابد. همچنین، با تعویق زمان‌بندی پاشش سوخت دیزل، فشار درون سیلندر بر اثر حرکت تراکمی محفظه احتراق افزایش می‌یابد و باعث می‌شود تا ضریب نسبی پخش کاهش یابد. کاهش ضریب نسبی پخش ذرات سوخت به آن معنا است که عرض افشانه سوخت کوچک‌تر شده و ذرات سوخت در ناحیه‌ای بسیار متراکم‌تر قرار گرفته و به‌علت برخورد ذرات با یکدیگر تشکیل لخته سوخت می‌دهند.

ایجاد لختگی توسط ذرات سوخت فرایند تبخیر را تضعیف کرده و در ادامه نیز فرایند تشکیل ترکیب سوخت و هوا تضعیف می‌شود. به‌عبارت‌دیگر، تشکیل لختگی توسط ذرات سوخت باعث می‌شود تا درون محفظه احتراق نواحی با نسبت هم‌ارزی بالا ایجاد شده که نتیجه آن تضعیف فرایند اکسایش ذرات سوخت است. طول دوره تأخیر در اشتعال این امکان را به‌وجود می‌آورد تا سوخت بیشتری تبخیر شده و در نتیجه آهنگ تشکیل آلاینده‌های اکسیدهای نیتروژن افزایش یابد که همان‌طور که در شکل ۱۱-الف مشاهده می‌شود با کاهش طول دوره تأخیر در اشتعال میزان سوخت کمتری تبخیر و انباشته شده و در نتیجه

آهنگ تشکیل آلاینده‌های اکسیدهای ازت کاهش یافته است. طبق شکل ۱۱-الف مشاهده می‌شود به کارگیری راهبرد سوراخ گروهی در مقایسه با حالت تک‌سوراخ باعث شده است تا میزان آلاینده‌های اکسیدهای نیتروژن در بازه‌ای میان ۱ تا ۸ درصد کاهش یابد. می‌توان نتیجه گرفت استفاده از راهبرد سوراخ گروهی باعث می‌شود تا با پاشش سوخت از دو سوراخ پاشش سطح جبهه شعله در مقایسه با جبهه ایجادشده در حالت تک سوراخ کاهش یابد و در نتیجه مونوکسید نیتروژن فوری که در جبهه شعله تشکیل می‌شود کاهش یابد.

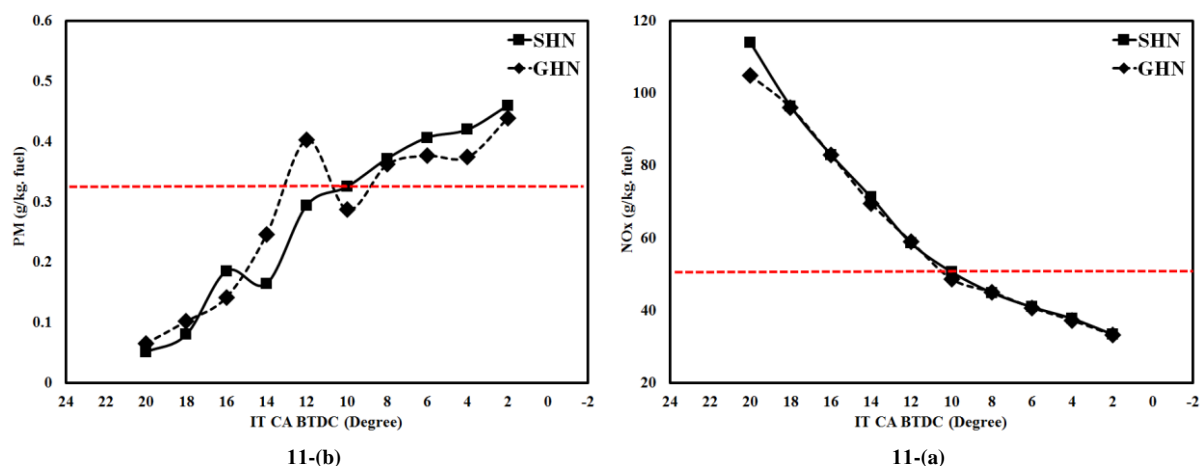


Figure 11- Effects of study strategies on NOx (a) and PM pollutants (b)

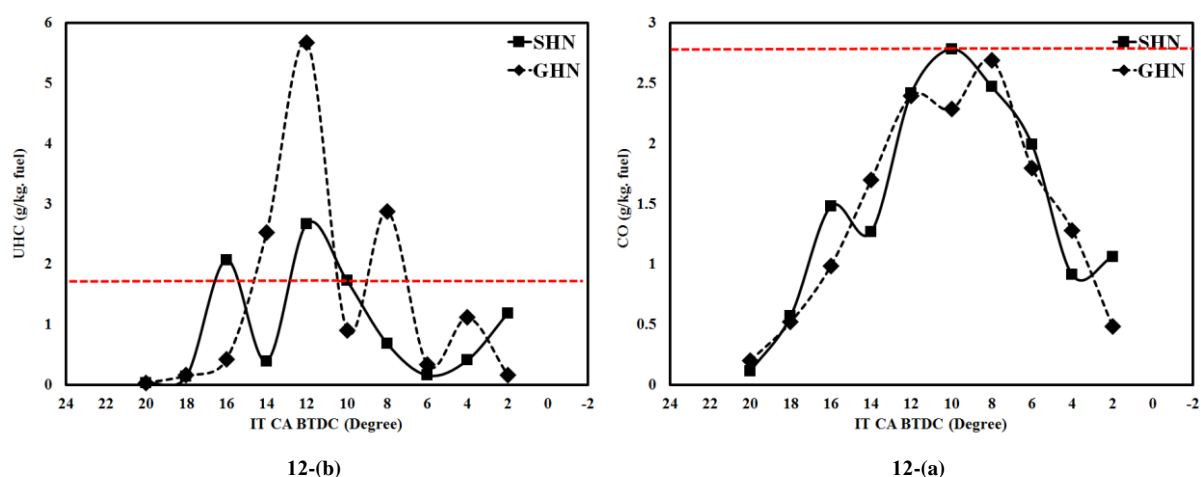
شکل ۱۱- تأثیرات راهبردهای مطالعه بر آلاینده‌های (الف) اکسیدهای نیتروژن و (ب) ذرات دوده

شکل ۱۱-ب تأثیرات زمان‌بندی و به کارگیری راهبرد سوراخ گروهی را بر میزان آلاینده ذرات دوده نشان می‌دهد. طبق شکل مشاهده می‌شود برخلاف روند گزارش شده برای آلاینده‌های اکسیدهای نیتروژن، با تعویق زمان‌بندی پاشش سوخت دیزل برای هر دو حالت تک سوراخ و سوراخ گروهی میزان آلاینده ذرات دوده افزایش یافته است. با تعویق زمان‌بندی پاشش سوخت دیزل طول دوره تأخیر در اشتعال کاهش یافته و طی این دوره مقدار سوخت کمتری تبخیر و انباشته می‌شود. با کاهش طول دوره تأخیر در اشتعال بیشتر جرم سوخت در حالت نفوذی سوخته، طول دوره احتراق و تبخیر سوخت افزایش یافته و در نتیجه فرایند اکسایش ذرات سوخت تضعیف می‌شود. همان‌طور که قبلاً به آن اشاره شده است، سوختن در حالت نفوذی باعث می‌شود تا آهنگ احتراق کاهش یافته و نقطه بیشینه دما و فشار درون سیلندر کاهش یابد. کاهش دمای درون سیلندر حاصل از احتراق اشتعال تراکمی باعث می‌شود تا فرایند اکسایش ذرات دوده تضعیف شده و در نتیجه طبق شکل ۱۱-ب که گزارش شده است، با تعویق زمان‌بندی پاشش سوخت دیزل میزان آلاینده‌های ذرات دوده نیز افزایش یابد. علاوه بر این، افزایش طول دوره تبخیر ذرات سوخت این زمان را در اختیار هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای قرار می‌دهد تا بر اثر بخورد با یکدیگر انباشته شده و در نهایت حجم ذرات زیاد شود.

همان‌طور که در شکل ۷-الف به آن اشاره شده است، با تعویق زمان‌بندی پاشش سوخت دیزل ضریب نسبی پخش کاهش یافته است. با کاهش ضریب نسبی پخش، به دلیل متراکم شدن ناحیه افشانه، ذرات سوخت بیشتری با هم برخورد کرده و تشکیل لختگی درون محفظه احتراق می‌دهند. تشکیل لختگی توسط تجمع ذرات سوخت با یکدیگر نیز یکی از عوامل مهم در تضعیف فرایند اکسایش ذرات سوخت است که باعث شده است تا میزان آلاینده ذرات دوده افزایش یابد. طبق شکل ۱۱-ب مشاهده می‌شود برای حالت سوراخ گروهی برای پاشش سوخت دیزل، با در نظر گرفتن حالت پایه موتور، با جلو انداختن زمان‌بندی پاشش سوخت میزان آلاینده ذرات دوده بیشتری در مقایسه با حالت تک‌سوراخ تولید شده است. با این حال، با تعویق زمان‌بندی پاشش

سوخت دیزل برای حالت سوراخ گروهی میزان آلاینده ذرات دوده در مقایسه با حالت تک‌سوراخ کمتر تولید شده است. با توجه به این مشاهدات می‌توان نتیجه گرفت که علاوه بر اینکه استفاده از راهبرد سوراخ گروهی می‌تواند باعث بهبود فرایند اکسایش ذرات سوخت شود، به دلیل وجود ۱۰ درجه زاویه واگرایی میان دو سوراخ پاشش ممکن است بخشی از سوخت در نواحی پاشیده شود که سطح اکسیژن موجود در آن نواحی کمتر است و در نتیجه باعث تولید بیشتر ذرات دوده می‌شود. همان‌طور که قبلاً هم به آن اشاره شد، سطح اکسیژن موجود درون سیلندر بیشتر بر روی نواحی روی پیستون است که با جلوانداختن زمان‌بندی پاشش سوخت دیزل مشاهده می‌شود که میزان آلاینده ذرات دوده در مقایسه با حالت تک‌سوراخه بیشتر گزارش شده است که دلیل آن همان‌طور که به آن اشاره شده است، وجود واگرایی میان دو سوراخ پاشش سوخت در حالت سوراخ گروهی است که باعث می‌شود میزانی از سوخت دیزل در نواحی افشانده شود که به دلیل کاهش سطح اکسیژن موجود، فرایند اکسایش ذرات سوخت کاهش یابد.

شکل ۱۲-الف و ۱۲-ب به ترتیب تأثیرات زمان‌بندی و راهبرد سوراخ گروهی را بر میزان آلاینده‌های مونوکسیدکربن و هیدروکربن‌های نسوخته نشان می‌دهد.



12-(b)

12-(a)

Figure 12- Effects of study strategies on CO (a) and UHC (b) pollutants

شکل ۱۲- تأثیرات راهبردهای مطالعه بر آلاینده‌های (الف) - مونوکسیدکربن و (ب) - هیدروکربن‌های نسوخته

طبق شکل ۱۲-الف مشاهده می‌شود که با تعویق زمان‌بندی پاشش سوخت دیزل برای هر دو راهبرد تک‌سوراخه و سوراخ گروهی، میزان آلاینده مونوکسیدکربن در بازه ۲۰ تا ۱۰ درجه میل‌لنگ قبل از نقطه مرگ بالا ابتدا افزایش یافته سپس در بازه ۱۰ تا ۴ درجه میل‌لنگ قبل از نقطه مرگ بالا کاهش یافته است و در نهایت برای بازه ۴ تا ۲ درجه میل‌لنگ قبل از نقطه مرگ بالا برای حالت تک‌سوراخه در مقایسه با حالت سوراخ گروهی روند افزایشی داشته است. همان‌طور که در شکل ۶-الف گزارش شده است، طول دوره تأخیر در اشتعال در ابتدا کاهش سپس افزایش یافته است. با کاهش طول دوره تأخیر در اشتعال زمان لازم جهت اکسایش ذرات کربن موجود در ساختار شیمیایی سوخت کاهش یافته و در نتیجه آلاینده مونوکسید کربن افزایش یافته است. با این حال، با افزایش طول دوره تأخیر در اشتعال زمان لازم جهت اکسایش ذرات کربن درون محفظه احتراق افزایش یافته و در نتیجه میزان آلاینده مونوکسیدکربن کاهش یافته است. همان‌طور که اشاره شده است با پاشش سوخت دیزل با زمان‌بندی دیر هنگام به علت افزایش طول دوره تأخیر در اشتعال و تضعیف فرایند اکسایش ذرات سوخت میزان آلاینده مونوکسیدکربن افزایش یافته است. به همین دلیل می‌توان نتیجه گرفت برای حالت سوراخ گروهی در زمان‌بندی ۲ درجه میل‌لنگ قبل از نقطه مرگ بالا با افزایش ضریب نسبی پخش و میانگین قطر ذرات سوخت افشانده شده و در ادامه به دلیل بهبود فرایند اکسایش ذرات

سوخت به سبب کاهش میزان لختگی در نتیجه آلاینده مونوکسید کربن کاهش یافته است. همچنین، طبق شکل ۱۲-ب نوسانات چشمگیری برای آلاینده هیدروکربن‌های نسوخته با تغییر در زمان بندی پاشش سوخت دیزل گزارش شده است. طبق شکل ۱۲-ب مشاهده می‌شود استفاده از راهبرد سوراخ گروهی باعث افزایش چشمگیر میزان آلاینده هیدروکربن‌های نسوخته شده است. همان‌طور که قبلاً به آن اشاره شد استفاده از راهبرد سوراخ گروهی اگرچه می‌تواند باعث بهبود فرایند اکسایش ذرات سوخت شود ولی باین‌حال به دلیل وجود زاویه واگرایی میان سوراخ‌های پاشش سوخت و همچنین پاشش از دو سوراخ هم‌زمان با یکدیگر، ممکن است مقدار سوخت بیشتری در مقایسه با حالت تک سوراخه وارد نواحی درز و شکاف موجود در محفظه احتراق شده و میزان این آلاینده را افزایش دهد. طبق شکل ۱۲-ب مشاهده می‌شود در بازه ۲۰ تا ۱۲ درجه میل‌لنگ قبل از نقطه مرگ بالا میزان آلاینده هیدروکربن‌های نسوخته برای حالت سوراخ گروهی افزایش یافته است. با حرکت محفظه احتراق به سمت سر سیلندر و همچنین نزدیک شدن به سامانه پاشش، سوخت درون شیارها و شکاف‌های موجود بر روی پیستون افشاندن شده و در نتیجه بیشتر سوخت به صورت ناقص اکسید شده است که طبق شکل ۱۲-ب مشاهده می‌شود میزان آلاینده هیدروکربن‌های نسوخته در بازه ۲۰ تا ۱۲ درجه میل‌لنگ قبل از نقطه مرگ بالا افزایش چشمگیری داشته است. در بازه ۱۲ تا ۲ درجه میل‌لنگ قبل از نقطه مرگ بالا برای حالت سوراخ گروهی مشاهده می‌شود که با وجود نوسانات، میزان هیدروکربن‌های نسوخته در مقایسه با بازه ۱۲ تا ۲۰ درجه میل‌لنگ قبل از نقطه مرگ بالا برای حالت تک سوراخه مشاهده شده است که دلیل آن می‌توان کاهش ورود ذرات سوخت افشاندن شده به درون شکاف‌ها و درزهای موجود در محفظه احتراق و همچنین مکان قرارگیری پیستون باشد که در این حالت و در این بازه زمانی سوخت به درون تقعر کاسه پیستون افشاندن شده است که احتمال سوختن ناقص ذرات افشاندن شده را کاهش داده است. برای حالت تک سوراخه مشاهده می‌شود در بازه ۲۰ تا ۱۲ درجه میل‌لنگ قبل از نقطه مرگ بالا آلاینده هیدروکربن‌های نسوخته ابتدا افزایش سپس کاهش و دوباره افزایش یافته است. با تعویق زمان بندی پاشش سوخت طول دوره تأخیر در اشتعال کوتاه‌تر شده و دوره اشتعال افزایش می‌یابد که در نتیجه آن فرایند اکسایش سوخت تضعیف می‌شود. با تضعیف فرایند اکسایش سوخت دیزل میزان آلاینده هیدروکربن‌های نسوخته افزایش یافته است. طبق شکل ۱۲-ب مشاهده می‌شود برای زمان بندی ۱۴ درجه میل‌لنگ قبل از نقطه مرگ بالا برخلاف روند گزارش شده هیدروکربن‌های نسوخته کاهش چشمگیری داشته‌اند که دلیل آن می‌تواند شرایط مساعد دما و فشار درون محفظه احتراق است که می‌تواند به تسریع فرایند اکسایش کمک کند و همچنین اینکه در این زاویه ذرات سوخت کمتری وارد شیارها و شکاف‌های موجود درون محفظه احتراق شده‌اند و میزان جرم سوخت کمتری دچار احتراق ناقص شده است. طبق شکل ۱۲-ب مشاهده می‌شود در بازه ۱۲ تا ۶ درجه میل‌لنگ قبل از نقطه مرگ بالا برای حالت تک سوراخه آلاینده هیدروکربن‌های نسوخته به مقدار چشمگیری کاهش یافته است که دلیل آن می‌تواند کاهش میزان جرم افشاندن شده درون شکاف و شیارهای موجود درون محفظه احتراق است که احتمال احتراق ناقص را کاهش داده است. علاوه بر این، در بازه ۶ تا ۲ درجه میل‌لنگ قبل از نقطه مرگ بالا برای حالت تک سوراخه میزان هیدروکربن‌های نسوخته افزایش یافته است که می‌توان گفت به دلیل احتراق نفوذی ذرات سوخت افشاندن شده در زمان بندی دیر هنگام و تضعیف فرایند اکسایش ذرات سوخت دیزل در نتیجه این آلاینده‌گی افزایش یافته است. می‌توان نتیجه گرفت راهبرد سوراخ گروهی با توجه به توضیحات ارائه شده برای پاشش سوخت با زمان بندی‌های زود هنگام تأثیر منفی بر آلاینده هیدروکربن‌های نسوخته دارد.

#### تأثیرات زمان بندی پاشش سوخت و راهبرد سوراخ گروهی بر سطح عملکرد موتور

شکل ۱۳-الف، ۱۳-ب، و ۱۳-ج به ترتیب تأثیرات زمان بندی پاشش و راهبرد سوراخ گروهی را بر توان اندیکاتوری، مصرف سوخت ویژه اندیکاتوری، و بازده حرارتی اندیکاتوری نشان می‌دهد. طبق شکل ۱۳ مشاهده می‌شود با تعویق زمان بندی پاشش سوخت، سطح عملکرد موتور بهبود یافته است و همچنین استفاده از راهبرد سوراخ گروهی در مقایسه با حالت تک سوراخه نیز باعث افزایش توان اندیکاتوری، بازده حرارتی اندیکاتوری، و همچنین کاهش مصرف سوخت ویژه اندیکاتوری شده است. با تعویق زمان بندی پاشش سوخت دیزل، طول دوره تأخیر در اشتعال کاهش یافته و در نتیجه میزان سوخت کمتری در طی این دوره تبخیر و انباشته می‌شود. با کاهش طول دوره تأخیر در اشتعال بیشتر جرم سوخت در حالت احتراق نفوذی سوخته، آهنگ احتراق کاهش

یافته، طول دوره اشتعال افزایش یافته، فرایند تبخیر ذرات سوخت تضعیف شده و در نتیجه نقطه بیشینه دما و فشار درون سیلندر کاهش می‌یابد. با کاهش نقطه بیشینه دما و فشار حاصل از احتراق سطح عملکرد موتور تضعیف شده و در نتیجه طبق شکل ۱۳ مشاهده می‌شود مصرف سوخت ویژه اندیکاتوری افزایش، توان و بازده حرارتی اندیکاتوری نیز کاهش یافته است. علاوه بر این، استفاده از راهبرد سوراخ گروهی در مقایسه با حالت تک سوراخه نیز می‌تواند باعث بهبود آهنگ احتراق و همچنین فرایند تبخیر ذرات سوخت شود که طبق شکل ۱۳ مشاهده می‌شود با به‌کارگیری راهبرد سوراخ گروهی سطح عملکرد موتور بهبود یافته است.

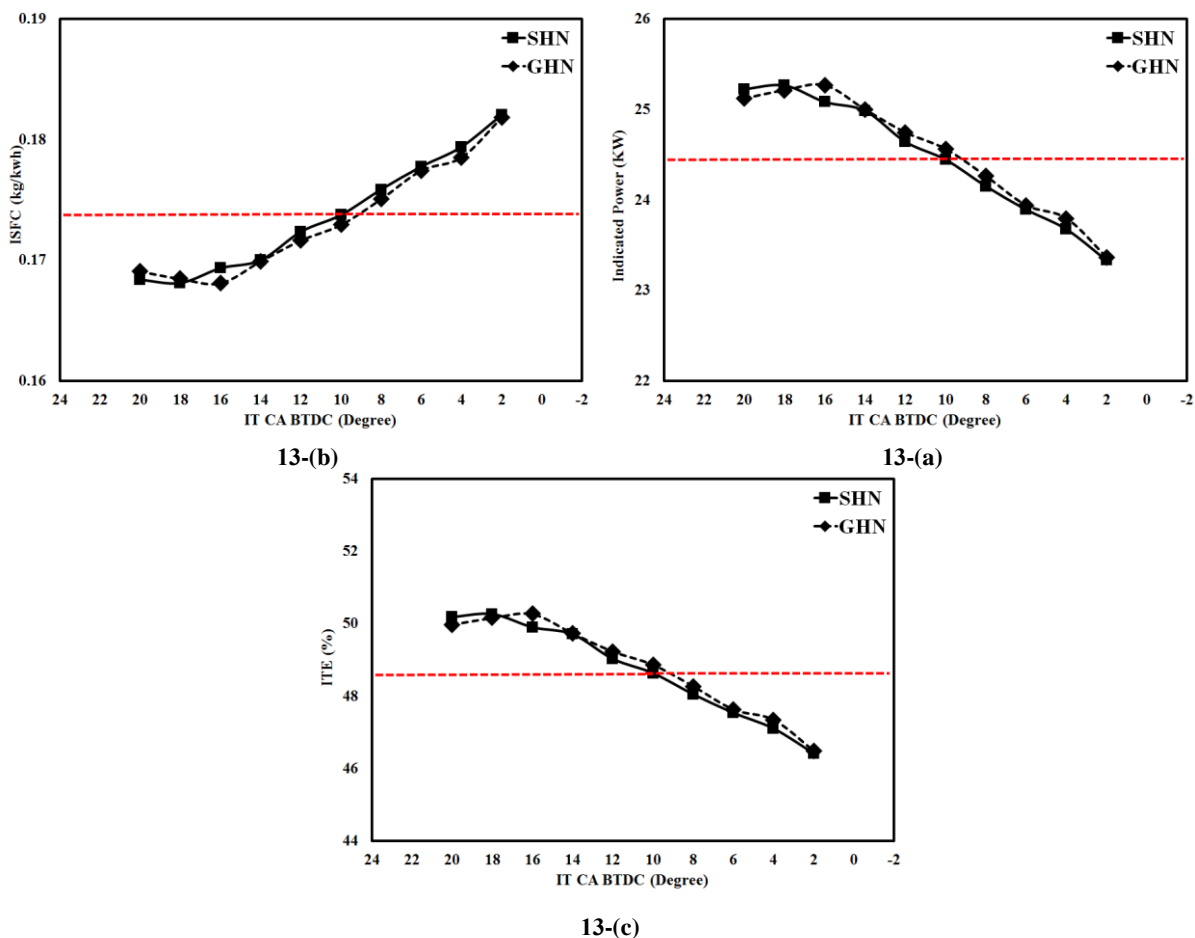


Figure 13- Effects of study strategies on engine performance  
 شکل ۱۳- تأثیرات راهبردهای مطالعه بر سطح عملکرد موتور

طبق گزارش‌های ارائه شده در سه بخش مشاهده شد با پاشش سوخت در زاویه ۱۰ درجه میل‌لنگ قبل از نقطه مرگ بالا و به‌کارگیری راهبرد سوراخ گروهی با ۱۰ درجه زاویه واگرایی در مقایسه باحالت پایه کارکردی میزان آلاینده‌ها کاهش و سطح عملکرد موتور بهبود یافته است ولی باین حال افزایش شدت کوبش موتور از معایب به‌کارگیری این راهبرد مطالعاتی است. جدول ۷ مقایسه‌ای میان حالت پایه و حالت بهینه شده آلاینده‌گی و عملکرد موتور در این مطالعه را نشان داده است.

جدول ۷- مقایسه میان حالت پایه کارکردی و حالت بهینه آلاینده‌گی و عملکرد موتور

Table 7- Comparison between Baseline and pollutants -performance optimum case

Case	NOx (g/kg. fuel)	PM (g/kg. fuel)	CO (g/kg. fuel)	UHC (g/kg. fuel)	IP (kw)	ISFC (Kg/kwh)	ITE (%)	RI (MW/m <sup>2</sup> )
------	---------------------	--------------------	--------------------	---------------------	------------	------------------	------------	----------------------------

Baseline case	50.6664	0.32501	1.7296	2.7813	24.4445	0.1737	48.6359	2.8296
Optimum case	48.6738	0.2876	0.9090	2.2832	24.56023	0.1729	48.8658	3.037

## نتیجه گیری

در این پژوهش تأثیرات زمان بندی پاشش سوخت دیزل و راهبرد سوراخ گروهی با زاویه واگرایی ۱۰ درجه بر مشخصه های احتراق و قطره سازی سوخت، میزان آلاینده های تولید شده، و سطح عملکرد موتور بررسی شده است. نتایج به دست آمده به شرح زیر می باشند:

- تعویق زمان بندی پاشش سوخت دیزل در بازه زمان بندی پاشش ۲۰ تا ۶ درجه میل لنگ قبل از نقطه مرگ بالا، باعث کاهش طول دوره تأخیر در اشتعال شده و در نتیجه میزان سوخت کمتری در طول این دوره تبخیر و انباشته می شود. در نتیجه، بیشتر جرم سوخت در حالت نفوذی سوخته، طول دوره اشتعال افزایش یافته، و فرایند اکسایش ذرات سوخت تضعیف می شود. با تضعیف فرایند اکسایش سوخت، نقطه بیشینه دما و فشار درون سیلندر کاهش می یابد و در نتیجه سطح عملکرد موتور تضعیف شده و باین حال میزان آلاینده اکسیدهای نیتروژن کاهش و آلاینده ذرات دوده افزایش می یابد.
- جلوانداختن زمان بندی پاشش سوخت دیزل در بازه زمان بندی پاشش سوخت ۶ تا ۲۰ درجه میل لنگ قبل از نقطه مرگ بالا باعث افزایش طول دوره تأخیر در اشتعال شده و در نتیجه میزان سوخت بیشتری در طول این دوره تبخیر و انباشته می شود. با افزایش طول دوره تأخیر در اشتعال بیشتر جرم سوخت در حالت پیش آمیخته سوخته، طول دوره اشتعال کاهش یافته، و فرایند اکسایش ذرات سوخت بهبود می یابد. با بهبود فرایند اکسایش ذرات سوخت، نقطه بیشینه دما و فشار درون سیلندر افزایش می یابد و در نتیجه سطح عملکرد موتور افزایش یافته و باین حال میزان آلاینده اکسیدهای نیتروژن افزایش و ذرات دوده کاهش می یابد.
- با تعویق زمان بندی پاشش سوخت دیزل ضریب نسبی پخش ذرات سوخت کاهش می یابد. با عقب انداختن زمان پاشش سوخت به دلیل حرکت تراکمی محفظه احتراق و افزایش تدریجی دما و فشار درون سیلندر، لزجت جریان درون سیلندر افزایش یافته و عرض افشانه سوخت کاهش می یابد. با کاهش عرض افشانه سوخت، ذرات سوخت دیزل در ناحیه محدودتری افشانه شده و به دلیل تراکم ناحیه ای افشانه، ذرات سوخت بیشتری باهم برخورد کرده و تشکیل لختگی می دهند. افزایش حجم لختگی باعث می شود تا فرایند تبخیر ذرات سوخت تضعیف شده و میزان آلاینده ذرات دوده افزایش یابد.
- استفاده از راهبرد سوراخ گروهی، باعث بهبود فرایند اکسایش ذرات سوخت می شود. با پاشش سوخت از دو سوراخ همزمان با یکدیگر، جرم سوخت بیشتری در دسترس مولکول های هوا قرار گرفته و به همین سبب، طول دوره تبخیر ذرات سوخت کاهش یافته است. با کاهش دوره تبخیر سوخت، دوره احتراق کاهش یافته و در نتیجه سطح عملکرد موتور بهبود یافته است. علاوه بر این، استفاده از راهبرد سوراخ گروهی باعث می شود تا سطح جبهه شعله کاهش یافته و میزان آلاینده مونوکسید کربن فوری کاهش یابد. علاوه بر این، از معایب استفاده از راهبرد سوراخ گروهی، افزایش میزان آلاینده هیدروکربن های نسوخته است.
- با افزایش طول دوره تأخیر در اشتعال این زمان فراهم می شود تا ذرات کربن موجود در ساختار شیمیایی سوخت فرصت بیشتری برای اکسایش توسط اکسیژن موجود درون محفظه احتراق داشته باشند و در نتیجه با بهبود فرایند اکسایش ذرات کربن، میزان آلاینده مونوکسید کربن کاهش می یابد.
- طبق نتایج به دست آمده در سه بخش مشاهده شد با پاشش سوخت در زاویه ۱۰ درجه میل لنگ قبل از نقطه مرگ بالا و به کارگیری راهبرد سوراخ گروهی با ۱۰ درجه زاویه واگرایی در مقایسه با حالت پایه کارکردی میزان آلاینده های اکسیدهای نیتروژن (۴ درصد)، ذرات دوده (۱۱/۵ درصد)، مونوکسید کربن (۴۷/۴۴ درصد)، و هیدروکربن های نسوخته (۱۷/۹ درصد) کاهش یافته اند. همچنین در ارتباط با سطح عملکرد موتور، توان اندیکاتوری حدود ۰/۵ درصد افزایش، مصرف سوخت ویژه اندیکاتوری

حدوداً ۱ درصد کاهش، و بازه حرارتی اندیکاتوری نیز حدود ۰/۵ درصد افزایش یافته است. باین‌حال، افزایش حدود ۷/۳۳ درصد شدت کوبش در مقایسه باحالت پایه کارکردی موتور، یکی از معایب استفاده از این راهبرد مطالعاتی است.

## فهرست علائم

NOx	Nitrogen Oxides
PM	Particulate Matter
CO	Carbon Monoxide
UHC	Unburnt Hydro-Carbons
IP	Indicated Power
ISFC	Indicated Specific Fuel Consumption
ITE	Indicated Thermal Efficiency
IT	Injection Timing
SOI	Start of Injection
CA	Crank Angle
BTDC	Before Top Dead Center
RI	Ringing Intensity

## تشکر و قدردانی

این مطالعه عددی مرتبط با یک طرح پژوهشی انجام شده در دانشگاه حضرت آیت ... بروجردی (ره) به شماره سمات ۱۶۳۸۳۲-۱۵۶۶۴ است و محققین این طرح از حوزه محترم معاونت پژوهش بابت حمایت از این طرح کمال تشکر و قدردانی را دارند.

## منابع

1. A. Yousefi, M. Birouk, and H. Guo. "An experimental and numerical study of the effect of diesel injection timing on natural gas/diesel dual-fuel combustion at low load." *Fuel*, 203, 2017, pp. 642-657.
2. R. Payri, F.J. Salvador, J. De la Morena, and V. Pagano. "Experimental investigation of the effect of orifices inclination angle in multihole diesel injector nozzles. Part 2–Spray characteristics." *Fuel*, 213, 2018, pp. 215-221.
3. W. Du, Q. Zhang, Z. Zhang, J. Lou, and W. Bao. "Effects of injection pressure on ignition and combustion characteristics of impinging diesel spray." *Applied energy*, 226, 2018, pp. 1163-1168.
4. M.K. Yesilyurt. "The effects of the fuel injection pressure on the performance and emission characteristics of a diesel engine fuelled with waste cooking oil biodiesel-diesel blends." *Renewable energy*, 132, 2019, pp. 649-666.
5. B. Jafari, M. Pourfallah, S. Mirsalim, and D.D. Ganji. "The Effect of Different Injection Configuration on Combustion and Emissions Formation in a Heavy Duty Diesel Engine." *THE JOURNAL OF ENGINE RESEARCH*, 16, 2009, pp. 43-51.
6. J.A. Soriano, C. Mata, O. Armas, and C. Ávila. "A zero-dimensional model to simulate injection rate from first generation common rail diesel injectors under thermodynamic diagnosis." *Energy*, 158, 2018, pp. 845-858.
7. J. Hu, C. Yao, P. Geng, J. Feng, M. Liu, Z. Li, and H. Wang. "Effects of pilot injection strategy of diesel fuel on combustion characteristics in a premixed methanol-air mixture atmosphere in a CVCC." *Fuel*, 234, 2018, pp. 1132-1143.
8. R. Mobasheri, and M. Seddiq, "Applying the Homogeneity Factor to Evaluate the Effects of Pilot Injection Characteristics on Air-Fuel Mixing Quality and Engine Performance in a Turbo-Charged High Speed Direct Injection (HSDI) Diesel Engine." *Fuel and Combustion*, 10, 2017, pp. 53-71.
9. K. Mathivanan, J. M. Mallikarjuna, and A. Ramesh. "Influence of multiple fuel injection strategies on performance and combustion characteristics of a diesel fuelled HCCI engine—An experimental investigation." *Experimental Thermal and Fluid Science*, 77, 2016, pp. 337-346.
10. T. He, Z. Chen, L. Zhu, and Q. Zhang. "The influence of alcohol additives and EGR on the combustion and emission characteristics of diesel engine under high-load condition." *Applied Thermal Engineering*, 140, 2018, pp. 363-372.
11. C.D. Rakopoulos, D.C. Rakopoulos, G.C. Mavropoulos, and G.M. Kosmadakis. "Investigating the EGR rate and temperature impact on diesel engine combustion and emissions under various injection timings and loads by comprehensive two-zone modeling." *Energy*, 157, 2018, pp. 990-1014.
12. D. Han, J. Zhai, Y. Duan, C. Wang, and Z. Huang. "Nozzle effects on the injection characteristics of diesel and gasoline blends on a common rail system." *Energy*, 153, 2018, pp. 223-230.
13. J. Gao, S. Moon, Y. Zhang, K. Nishida, and Y. Matsumoto. "Flame structure of wall-impinging diesel fuel sprays injected by group-hole nozzles." *Combustion and Flame*, 156, 2009, pp. 1263-1277.
14. M. Jia, M. Xie, T. Wang, and Z. Peng. "The effect of injection timing and intake valve close timing on performance and emissions of diesel PCCI engine with a full engine cycle CFD simulation." *Applied Energy*, 88, 2011, pp. 2967-2975.
15. E.S. Guerry, M.S. Raihan, K.K. Srinivasan, S.R. Krishnan, and A. Sohail. "Injection timing effects on partially premixed diesel-methane dual fuel low temperature combustion." *Applied energy*, 162, 2016, pp. 99-113.



16. J. Benajes, S. Molina, A. García, and J. Monsalve-Serrano. "Effects of direct injection timing and blending ratio on RCCI combustion with different low reactivity fuels." *Energy Conversion and Management*, 99, 2015, pp. 193-209.
17. J. Li, W.M. Yang, H. An, and D. Zhao. "Effects of fuel ratio and injection timing on gasoline/biodiesel fueled RCCI engine: A modeling study." *Applied Energy*, 155, 2015, pp. 59-67.
18. J.B. Heywood, Internal combustion engine fundamentals, New York, McGraw Hill, 1988.
19. H. Hiroyasu, and A. Masataka. "Structures of fuel sprays in diesel engines." *SAE transactions*, 99, 1990, pp. 1050-1061.
20. G.L. Borman, and K.W. Ragland, Combustion engineering, New York, McGraw-Hill, 1998.
21. J. Gao, S.W. Park, Y. Wang, R.D. Reitz, S. Moon, and K. Nishida. "Simulation and analysis of group-hole nozzle sprays using a gas jet superposition model." *Fuel*, 89, 2010, pp. 3758-3772.
22. S. Park, R.D. Reitz, and J. Kim. "Combustion and emission characteristics of converging group-hole nozzle under lean engine operating conditions." *Fuel*, 90, 2011, pp. 3259-3267.
23. S.W. Park, and R.D. Reitz. "Optimization of fuel/air mixture formation for stoichiometric diesel combustion using a 2-spray-angle group-hole nozzle." *Fuel*, 88, 2009, pp. 843-852.
24. K.J. Richards, P.K. Senecal, and E. Pomraning. "CONVERGE v2. 3 Manual." *Convergent Science, Inc., Madison, WI* 2016.
25. A. Patel, S. Kong, and R.D. Reitz. "Development and Validation of a Reduced Reaction Mechanism for HCCI Engine Simulations," SAE Technical Paper 2004-01-0558, 2004, <https://doi.org/10.4271/2004-01-0558>.
26. H. Wang, R.D. Reitz, M. Yao, B. Yang, Q. Jiao, and L. Qiu. "Development of an n-heptane-n-butanol-PAH mechanism and its application for combustion and soot prediction." *Combustion and Flame*, 160, 2013, pp. 504-519.
27. S.L. Kokjohn, and R.D. Reitz. "Reactivity controlled compression ignition and conventional diesel combustion: a comparison of methods to meet light-duty NOx and fuel economy targets." *International Journal of Engine Research*, 14, 2013, pp. 452-468.
28. M. Raju, M. Wang, M. Dai, W. Piggott, and D. Flowers. "Acceleration of Detailed Chemical Kinetics Using Multi-zone Modeling for CFD in Internal Combustion Engine Simulations," SAE Technical Paper 2012-01-0135, 2012, <https://doi.org/10.4271/2012-01-0135>.
29. V. Yakhot, S. A. Orszag, S. Thangam, T.B. Gatski, and C.G. Speziale. "Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique." *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, 4, 1992, pp. 1510-1520.
30. S.P. Lin, and Z. W. Lian. "Mechanisms of the breakup of liquid jets." *AIAA Journal*, 28, 1990, pp. 120-126.
31. A.A. Amsden, J.P. Orourke, and T.D. Butler. "KIVA-2: A computer program for chemically reactive flows with sprays." *NASA STI/recon technical report, N 89*, 1989.
32. D.P. Schmidt, and C.J. Rutland. "A new droplet collision algorithm". *Journal of Computational Physics*, 164, 2000, pp.62-80.
33. J.D. Naber, and R.D. Reitz. "Modeling engine spray/wall impingement" *SAE transactions*, 97, 1988, pp. 118-140.
34. A. Manuel, D. Gonzalez, G. Borman, and R.D. Reitz. "A Study of Diesel Cold Starting using both Cycle Analysis and Multidimensional Calculations," SAE Technical Paper 910180, 1991, <https://doi.org/10.4271/910180>.
35. M.J. Tess, L. Chang-Wook, and R.D. Reitz. "Diesel engine size scaling at medium load without EGR." *SAE International Journal of Engines*, 4, 2011, pp. 1993-2009.
36. R.M. Hanson, S.L. Kokjohn, D.A. Splitter, and R.D. Reitz. "An experimental investigation of fuel reactivity controlled PCCI combustion in a heavy-duty engine." *SAE international journal of engines*, 3, 2010, pp. 700-716.
37. A.H. Lefebvre, and G.M. Vincent, Atomization and sprays, New York, CRC press, 2017.
38. J.I. Ramos, Internal combustion engine modeling, New York, Hemisphere Publishing Corporation, 1989.

## English Abstract

# Numerical Study of the Effects of Injection Timing and Using Group-Hole Nozzle for Fuel Injection in a Compression Ignition Engine

Mohammad Javad Noroozi<sup>1\*</sup>, Mahdi Seddiq<sup>2</sup>, Hessamedin Habibi<sup>3</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Ayatollah Ozma Borujerdi University, Borujerd, Iran, m.j.noroozi@abru.ac.ir

2- Department of Mechanical Engineering, Ayatollah Ozma Borujerdi University, Borujerd, Iran, Mahdi.Seddiq@abru.ac.ir

3- Department of Mechanical Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran, Hesamedinhabibi95@ms.tabrizu.ac.ir

\*Corresponding author

(Received: 2018.09.7, Received in revised form: 2018.10.26, Accepted: 2018.11.23)

In this numerical study, the effects of diesel direct injection timing and using a group-hole nozzle with 10

degrees as divergence angle on combustion and fuel atomization characteristics, pollutant emissions, and performance in a heavy duty diesel engine have been investigated. Regarding compression ignition combustion simulation, a chemical kinetic mechanism consists of 61 species, and 296 reactions have been used. Results showed that with a decrease in ignition delay duration, most of the fuel burnt in diffusive mode, combustion process weakened, PM increased, and engine performance deteriorated. Also, by retarding the diesel injection timing simultaneous with an increase in in-cylinder pressure and temperature, relative span factor has been decreased. With the reduction of fuel spray width, diesel fuel droplets sprayed in a narrower region, and due to the high density of the spray region, more fuel droplets collide. In the following because of the increase in coagulation volume, PM increased. Furthermore, using group-hole nozzle strategy can improve fuel oxidation process but results in more UHC emission compared with the baseline case which must be considered as a disadvantage of using group hole nozzle concept.

**Keywords:** Combustion simulation, Injection timing, Group-hole nozzle, Engine performance, Pollutants